

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

DYSCYPLINA NAUKOWA AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA

ELEKTROTECHNIKA I TECHNOLOGIE KOSMICZNE

DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH

Rozprawa Doktorska

mgr inż. Kacper Skarżyński

**Opracowanie technologii wytwarzania elementów systemu
pozyskiwania i bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej
z zastosowaniem techniki przyrostowej druku aerozolowego**

Promotor

dr hab. inż. Marcin Słoma, prof. uczelni

WARSZAWA, 2025

Najdroższej Rodzinie

Serdecznie dziękuję Panu Doktorowi Habilitowanemu Marcinowi Słomie za opiekę oraz cierpliwość w trakcie realizacji niniejszej pracy.

Dziękuję Pracownikom Instytutu Metrologii i Inżynierii Biomedycznej za nieocenioną pomoc w realizacji tej pracy.

Dziękuję również Koleżankom i Kolegom oraz wszystkim osobom z którymi współpracowałem i które przyczyniły się do pomyślnego ukończenia niniejsze pracy.

Szczególnie dziękuję mojej Żonie za wytrwale motywowanie mnie i wspieranie.

STRESZCZENIE

Elektronika noszona jest obecnie jedną z najszybciej rozwijających się gałęzi w elektronice, co wiąże się z potrzebą zasilania w niedalekiej przyszłości miliardów bezprzewodowych sensorów. Jednym z podejść do ograniczenia masy i wymiarów urządzeń niewymagającym ograniczenia ich funkcjonalności jest zastosowanie systemów pozyskiwania i przesyłania energii celem ograniczenia koniecznej pojemności ogniw w urządzeniu oraz technik elektroniki drukowanej celem minimalizacji zużycia materiałów i wytwarzania elektroniki na lekkich, cienkich i elastycznych podłożach. Potencjalnym źródłem energii do pozyskiwania są fale elektromagnetyczne, które umożliwiają również jej przesyłanie. Wiele tradycyjnych technik elektroniki drukowanej było już wykorzystywanych do wykonywania anten prostowniczych pozyskujących energię z fal radiowych. Obecnie potrzebna jest technika pozwalająca zarówno na nadruk wzorów w wysokiej rozdzielczości w celu wykonywania układów działających w wysokich częstotliwościach oraz nadruk na podłożach 3D w związku z rozpoczynającymi się pracami nad elementami elektronicznymi projektowanymi w trzech wymiarach [1]–[3]. Technika spełniającą te wymagania jest druk aerozolowy. Przy jego użyciu wytwarzano już anteny, elementy RLC i tranzystory, natomiast brak jest w literaturze przykładów kompletnych anten prostowniczych wykonanych tą techniką, bądź wykorzystujących elementy nią wykonane. Aby wykorzystać wysoką rozdzielczość tej techniki przy jednoczesnym ograniczeniu czasu druku i zużycia materiału, korzystnym jest zastosowanie anteny o konstrukcji siatkowej.

W przedstawionej rozprawie doktorskiej zweryfikowano możliwość wykorzystania techniki druku aerozolowego do wykonywania elementów systemów do pozyskiwania i przesyłu energii. Zaprojektowano, dokonano symulacji i wykonano anteny z siatki mikrolinii, dopasowując ich częstotliwość rezonansową i współczynnik odbicia do częstotliwości 2,45 GHz. Opracowane anteny włączono w anteny prostownicze w celu weryfikacji możliwości pozyskiwania energii przez tak wykonany układ. Przedstawiono również aplikację druku aerozolowego do wykonania sensorów mikrofalowych, aplikację druku FDM do wykonywania anten i stroików impedancyjnych, a także prace perspektywiczne z zakresu wytwarzania pozostałych elementów anten prostowniczych drukiem aerozolowym i druku na podłożach niepłaskich.

Słowa kluczowe: druk aerozolowy, pozyskiwanie energii, bezprzewodowy transfer mocy, anteny siatkowe

ABSTRACT

Wearable electronics is currently one of the fastest-growing branches in electronics, with the need to power billions of wireless sensors in the near future. One approach to reducing the weight and size of devices that does not require reducing their functionality is to use Energy Harvesting and Wireless Power Transfer systems to reduce the necessary cell capacity in the device and printed electronics techniques to minimize material consumption and fabricate electronics on lightweight, thin, and flexible substrates. Electromagnetic waves are a potential energy source for harvesting, enabling Wireless Power Transfer. Many traditional printed electronics techniques have already been used to produce rectifying antennas that harvest energy from radio waves. Now, a technique is needed that allows high-resolution printing of patterns to make circuits that operate at high frequencies and printing on 3D substrates, as work begins on electronic components designed in three dimensions. A technique that meets these requirements is aerosol jet printing. Antennas, RLC components, and transistors have already been manufactured using this technique. At the same time, there is a lack of examples of complete rectennas made entirely with this technique or using components made with it in the literature. To take advantage of the high resolution of this technique while reducing printing time and material consumption, it is advantageous to use a mesh antenna.

The presented dissertation verified the usability of the aerosol printing technique to make components for energy harvesting and transmission systems. Microline mesh antennas were designed, simulated, and fabricated, matching their resonant frequency and reflection coefficient to 2.45 GHz. The developed antennas were incorporated into rectennas to verify the energy harvesting capabilities of such a fabricated system. The application of aerosol jet printing to make microwave sensors, the application of FDM printing to make antennas and stubs, and prospective work in manufacturing other components of rectennas by aerosol printing and printing on non-flat substrates are also presented.

Keywords: aerosol jet printing, energy harvesting, wireless power transfer, mesh antennas

WYKAZ OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

AJP – ang. Aerosol Jet Printing, druk aerozolowy

RF – ang. Radio Frequency, częstotliwości radiowe

WPT – ang. Wireless Power Transfer, bezprzewodowy transfer mocy/ przesył energii

EH – ang. Energy Harvesting, pozyskiwanie energii odpadowej

IoT – ang. Internet of Things, internet rzeczy

RFID – ang. Radio Frequency Identification, systemy identyfikacji radiowej

DIW – ang. Direct Ink Writing, bezpośredni druk tuszem

ABS - terpolimer akrylonitrylo-butadieno-styrenowy

PTFE - politetrafluoroetylen

FDM - Fused Deposition Modeling, druk przyrostowy z użycie uplastycznionego filamentu

mSLA – ang. masked Stereolithography, maskowana stereolitografia

PMMA – polimetakrylan metylu

IGZO – tlenek indu galu i cynku

SnO₂ – tlenek cyny(IV)

WO₃ – tlenek wolframu (VI)

DC – ang. Direct Current, prąd stały

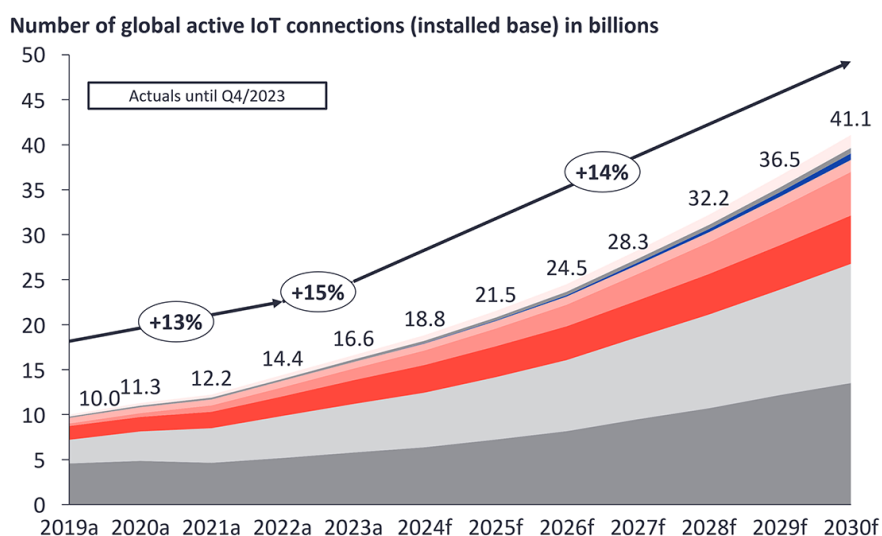
Spis treści

1. Wprowadzenie	11
2. Stan wiedzy.....	15
2.1. Internet rzeczy.....	15
2.2. Systemy pozyskiwania energii i bezprzewodowego transferu mocy	16
2.2.1. Projektowanie anten prostowniczych i analiza ich efektywności dla systemów bezprzewodowego transferu mocy i pozyskiwania energii	20
2.2.2. Źródła energii odpadowej do pozyskiwania oraz obecnie rozwijane systemy bezprzewodowego transferu mocy.....	27
2.2.3. Przepisy regulujące emitowaną moc urządzeń i sieć 5G	28
2.3. Elektronika drukowana	30
2.3.1. Wybrane techniki elektroniki drukowanej	31
2.3.2. Elektronika przyjazna dla środowiska	41
2.3.3. 3D drukowana elektronika strukturalna	43
2.4. Aplikacje elektroniki drukowanej w systemach pozyskiwania energii i bezprzewodowego transferu mocy	45
2.4.1. Wyzwania współczesnych technik elektroniki drukowanej.....	48
2.4.2. Drukowane anteny używane w układach anten prostowniczych dla systemów pozyskiwania energii i bezprzewodowego transferu mocy	49
2.4.3. Pozostałe drukowane elementy anten prostowniczych	65
2.5. Podsumowanie	73
3. Cel i zakres pracy.....	74
4. Materiały i metody.....	75
4.1. Materiały	75
4.2. Symulacje i przygotowanie próbek.....	76
5. Prace konstrukcyjne	81
6. Anteny prostownicze	90
6.1. Prace technologiczne	90
6.2. Drukowana aerozolowo siatkowa antena mikropaskowa typu „patch”	97
6.3. Drukowana aerozolowo siatkowa linia transmisyjna	99
6.4. Drukowane aerozolowo podwójnie siatkowe anteny mikropaskowe typu „patch”	101
6.5. Drukowane aerozolowo anteny mikropaskowe typu „patch” z siatka z pojedynczych linii	102

6.6.	Badania linii transmisyjnych i anten z zastosowaniem tuszu o wyższej zawartości fazy funkcjonalnej.....	103
6.7.	Zysk energetyczny	104
6.8.	Anteny prostownicze	106
7.	Badania aplikacyjne druku aerozolowego w sensorach mikrofalowych.....	110
7.1.	Badania linii mikropaskowych w częstotliwościach do 43 GHz.....	110
7.2.	Wykonanie sensora poziomu glukozy w ślinie.....	112
8.	Alternatywne podejście do integracji drukowanych anten z obudowami urządzeń – druk FDM z zastosowaniem kompozytów przewodzących.....	116
8.1.	Symulacja i pomiar anten wykonanych drukiem 3D.....	116
8.2.	Symulacja i pomiar elementów układu dopasowania impedancyjnego wykonanych drukiem 3D	118
9.	Prace perspektywiczne.....	123
9.1.	Zastosowanie druku aerozolowego do wykonywania cewek planarnych	123
9.2.	Weryfikacja atomizowalności tuszy	124
9.3.	Nanoszenie wydruków na podłoża niepłaskie	129
10.	Podsumowanie i wnioski	133
	Bibliografia	139

1. Wprowadzenie

Elektronika osobista (ang. wearable electronics) jest obecnie jedną z najszybciej rozwijających się gałęzi w elektronice. W ciągu najbliższych lat wartość rynku elektroniki osobistej i urządzeń typu smart, czyli komunikujących się, zwiększa się rocznie o paręnaście procent, co wiąże się ze stale zwiększającą się ilością tego typu urządzeń (Rysunek 1). Niektórzy uważają, że jest to zwiastun zbliżającej się ery internetu rzeczy (ang. Internet of Things – IoT) i kluczowej dla bezpieczeństwa i zdrowia publicznego sieci sensorów bezprzewodowych. Wiąże się to z potrzebą zasilania w niedalekiej przyszłości miliardów bezprzewodowych sensorów, takich jak inteligentne opakowania w medycynie, czujniki temperatury w przemyśle czy pulsometry. Obecnie do ich zasilania wykorzystywane są baterie, które ze względu na wymagania funkcjonalne często przedkładają niską masę nad pojemność baterii. Współczesny rozwój możliwy jest przez zwiększanie pojemności miniaturowych baterii i dopasowanie ich kształtu do aplikacji poprzez wykonywanie spersonalizowanych baterii przez twórców poszczególnych rozwiązań, np. baterie w kształcie okręgu w inteligentnych pierścieniach. Kolejnym powodem rozwoju jest zmiana w budowie elementów aktywnych takich jak czujniki, mikrofony czy elementy systemów komunikacji, zmniejszająca ich zapotrzebowanie na energię. Pomimo tego pojemność baterii takich urządzeń ogranicza liczbę możliwych do wykorzystania funkcjonalności lub sprawia, że można ich używać jedynie okazjonalnie.



Rysunek 1 Przewidywania wzrostu liczby aktywnych urządzeń IoT (w bilionach aktywnych połączeń) [4].

Jednym z podejść do ograniczenia masy i wymiarów urządzeń jest zastosowanie systemów pozyskiwania i przesyłania energii oraz technik elektroniki drukowanej. Systemy

pozyskiwania i przesyłania energii pozwalają ograniczyć konieczną pojemność ogniw w urządzeniu lub całkowicie zlikwidować potrzebę ich zastosowania. Jednym z potencjalnych źródeł energii do pozyskiwania są fale elektromagnetyczne, które umożliwiają również jej przesyłanie poprzez bezprzewodowy transfer mocy wykorzystując często te same urządzenia odbiorcze. Addytywne techniki elektroniki drukowanej pozwalają na wytwarzanie elektroniki na lekkich, cienkich i elastycznych podłożach, jak również bezpośrednio na obudowach urządzeń. Umożliwiają one minimalizację zużycia materiałów niezbędnych do wytworzenia układów elektronicznych i niższe koszty wytworzenia w przypadku jednostkowej produkcji.

Wiele tradycyjnych technik elektroniki drukowanej – grawiura, sitodruk, bezpośredni druk tuszem czy druk strumieniowy były już wykorzystywane do wykonywania anten prostowniczych (ang. rectifying antennas, rectennas) pozyskujących energię z fal radiowych. Obecnie potrzebna jest technika pozwalająca zarówno na nadruk wzorów w wysokiej rozdzielczości w celu wykonywania układów działających w wysokich częstotliwościach oraz nadruk na podłożach 3D – rozpoczynają się prace nad elementami elektronicznymi projektowanymi w 3 wymiarach, dającymi dodatkowy stopień swobody w projektowaniu układów lub oferujących unikalne właściwości [1]–[3]. Techniką spełniającą te wymagania jest druk aerozolowy (ang. Aerosol Jet Printing, AJP). Przy jego pomocy wytwarzano już anteny, elementy RLC i tranzystory, natomiast brak jest w literaturze kompletnych anten prostowniczych wykonanych tą techniką, bądź wykorzystujących elementy nią wykonane. Technika ta w ostatnich latach jest intensywnie rozwijana poprzez badania umożliwiające optymalizację jej parametrów, dogłębne zrozumienie procesu i badania możliwości aplikacyjnych. Aby wykorzystać wysoką rozdzielczość tej techniki przy jednoczesnym ograniczeniu czasu druku oraz nadrukowaniu w sposób zrównoważony (wykorzystując niewielkie ilości tuszu) korzystnym jest wykonanie anteny o konstrukcji siatkowej.

W przedstawionej rozprawie doktorskiej zweryfikowano wykorzystanie techniki druku aerozolowego do wykonywania elementów systemów do pozyskiwania energii odpadowej z fal radiowych i bezprzewodowego przesyłania mocy. Dobrano parametry procesowe i rozwiązania techniczne do wytworzenia próbek oraz przeprowadzono symulację i pomiar współczynników rozproszenia linii transmisyjnych. Na podstawie uzyskanych wyników zaprojektowano, dokonano symulacji i wykonano anteny z siatki mikrolinii, dopasowując ich częstotliwość rezonansową i współczynnik odbicia do częstotliwości 2,45 GHz. Opracowane wzory anten połączono z wykonanym specjalnie do tego celu prostownikiem z układem dopasowania impedancyjnego w celu weryfikacji możliwości pozyskiwania energii przez tak

wykonany układ. Przedstawiono również aplikację druku aerozolowego do wykonania sensorów mikrofalowych, aplikację osadzania uplastycznionego materiału (Fused Deposition Modelling, FDM) do wykonywania anten i stroików impedancyjnych, a także prace perspektywiczne z zakresu wytwarzania pozostałych elementów anten prostowniczych drukiem aerozolowym i druku na podłożach niepłaskich.

Rozprawa składa się z 10 rozdziałów.

Pierwszym rozdziałem jest wprowadzenie, w którym skrótowo przedstawiono zagadnienia internetu rzeczy, pozyskiwania energii i bezprzewodowego transferu mocy oraz elektroniki drukowanej, a także opis prezentowanych w dalszej części rozprawy aplikacji wykonywanych techniką druku aerozolowego.

W drugim rozdziale przedstawiono obecny stan wiedzy dotyczący rozwoju technik elektroniki drukowanej w zakresie wykonywania elementów systemów do pozyskiwania energii i bezprzewodowego transferu mocy. Zawarto w nim również analizę techniki druku aerozolowego pod kątem możliwości praktycznego wykorzystywania tej techniki, a także wyniki badań nad drukowanymi antenami siatkowymi wykonanymi technikami elektroniki drukowanej.

Zawarty w rozdziale trzecim cel pracy został zaproponowany na podstawie analizy literaturowej i wstępnych badań własnych.

W czwartym rozdziale przedstawiono materiały użyte do badań, metody symulacji oraz wykonywania próbek oraz metody ich pomiaru.

W rozdziale piątym opisano rozwój stanowiska do druku aerozolowego pozwalający na pełne wykorzystanie możliwości stanowiska w zakresie rozdzielczości, powtarzalności i jakości wykonywanych wzorów. Przedstawiono również prace rozwojowe wykonane w celu weryfikacji możliwości upowszechnienia techniki druku aerozolowego.

W rozdziale szóstym opisano proces przygotowania anteny prostowniczej wykorzystującej drukowaną antenę siatkową. W rozdziale przedstawiono wstępne badania technologiczne, projektowanie i pomiary linii transmisyjnych wraz z zaprezentowaniem nowatorskiego podejścia drukowanej siatkowej linii transmisyjnej oraz projektowanie i pomiary anten siatkowych typu „patch”. W ostatniej części tego rozdziału zaprezentowano wykonanie prostownika z układem dopasowania impedancyjnego, połączenie go z antenami w antenę prostowniczą i pomiar napięcia uzyskanego podczas pozyskiwania energii.

W rozdziale siódmym przedstawiam inne zastosowania techniki AJP do zastosowań mikrofalowych poprzez wykonanie mikrofalowych sensorów stężenia glukozy w płynach ustrojowych, w tym dobór parametrów pozwalających na wykonanie łuków o mikrometrycznych promieniach.

W rozdziale ósmym, w celu porównania z antenami wykonanymi drukiem aerozolowym, przedstawiono wykorzystanie druku FDM przy użyciu przewodzącego kompozytu i galwanizacji jako metody wytwarzania anten i stroików impedancyjnych.

W rozdziale dziewiątym zaprezentowane są prace rozwojowe wykonane w celu rozwoju możliwości wykonywania w pełni drukowanej anteny prostowniczej na podłożach niepłaskich. Zweryfikowano możliwości wykonywania elementów indukcyjnych metodą druku aerozolowego, proces przygotowania i weryfikacja możliwości atomizacji i nanoszenia tuszy wykonywanych – przewodzącego na bazie reaktywnej miedzi, dielektrycznego na bazie PMMA oraz półprzewodnikowego na bazie nanocząstek IGZO – oraz komercyjnych – dielektrycznych na bazie tlenków metali. Badano również wpływ nadruku na podłożach niepłaskich na parametry wzorów.

W rozdziale dziesiątym podsumowano przeprowadzone prace i wyciągnięto wnioski z otrzymanych wyników.

2. Stan wiedzy

2.1. Internet rzeczy

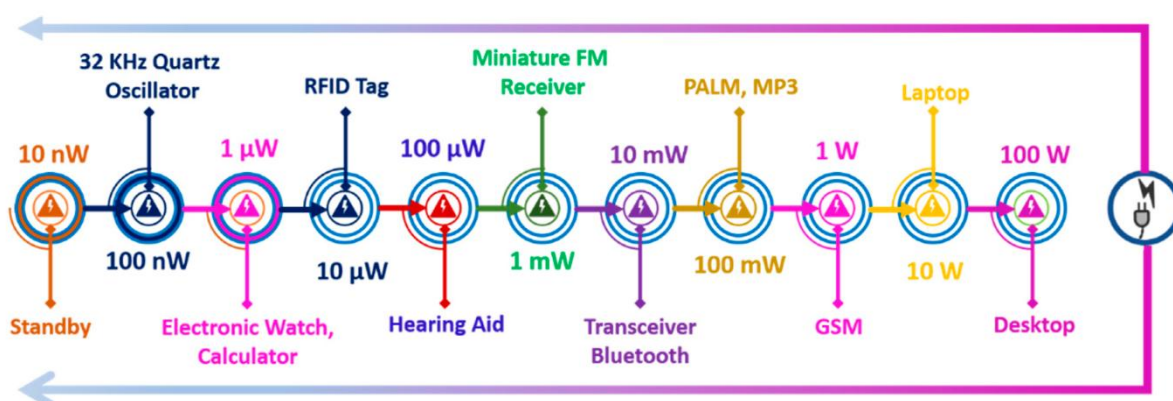
Sieci bezprzewodowych czujników w ciągu ostatnich lat stały się wszechobecne i wywierają coraz większy wpływ na funkcjonowanie nowoczesnego społeczeństwa. Przykładowymi elementami takich sieci są noszone urządzenia określane jako *inteligentne*, czyli wyposażone w możliwość komunikacji (telefony, zegarki lub tekstylia), domowe czujniki temperatury czy wilgotności, a także kompletne ekosystemy, np., domów inteligentnych czy tele-medycyny [5]. W ostatnich dekadach rozszerzano zakres aplikacyjny bezprzewodowych sieci czujników [6]–[9], a najbardziej popularną koncepcją takich sieci został internet rzeczy [10]. W związku z wykorzystaniem pojęcia internetu rzeczy w wielu różnych dziedzinach i aplikacjach, jego definicje różnią się między sobą [11]–[13], choć ogólna koncepcja systemu jest w nich zbieżna. Internet rzeczy składa się z „rzeczy” - indywidualnie rozróżnialnych inteligentnych obiektów – mogących komunikować się pomiędzy sobą bezpośrednio i poprzez chmurę, wymieniając dane z sensorów lub je przetwarzając [14]–[16]. Z perspektywy rynku przewidywany jest dalszy intensywny wzrost liczby urządzeń internetu rzeczy – o kilkanaście procent każdego roku – co powoduje konieczność rozwiązania związanych z tym problemów badawczych, takich jak konieczność zasilania miliardów bezprzewodowych czujników [17]–[21].

Zminiaturyzowane bezprzewodowe inteligentne czujniki i urządzenia są możliwe do wytwarzania dzięki postępowi w miniaturyzacji układów scalonych, rozwojowi czujników i systemów komunikacji o niskim poborze mocy, a także rozwojowi miniaturowych baterii - zwiększeniu ich pojemności [22] oraz kształtowaniu specjalnie przystosowanym do aplikacji [23]. Jednakże ograniczona pojemność baterii przy zachowaniu miniaturowych rozmiarów i niskiej masy zawęża ich zakres aplikacyjny, ograniczając czas pracy lub spektrum możliwych do uzyskania funkcjonalności. Baterie po pewnym czasie muszą być ładowane lub wymieniane, co wymaga zarówno obsługi przez człowieka jak i konieczności zakupu nowych baterii [24], a wymieniane baterie powodują niekorzystne skutki dla środowiska jako źródła emisji dwutlenku węgla [25]. W celu przezwyciężenia tych ograniczeń wymagane jest lekkie, kompaktowe i niedrogie źródło zasilania wystarczające do zaspokojenia potrzeb energetycznych części czujników i urządzeń IoT, co wymaga niekonwencjonalnych metod produkcyjnych [10]. Doskonałą odpowiedzią na te ograniczenia jest połączenie technologii pozyskiwania energii odpadowej (ang. Energy Harvesting – EH) i bezprzewodowego

przesyłania mocy (ang. Wireless Power Transfer – WPT) [26] oraz technik wytwarzania elektroniki drukowanej [27].

2.2. Systemy pozyskiwania energii i bezprzewodowego transferu mocy

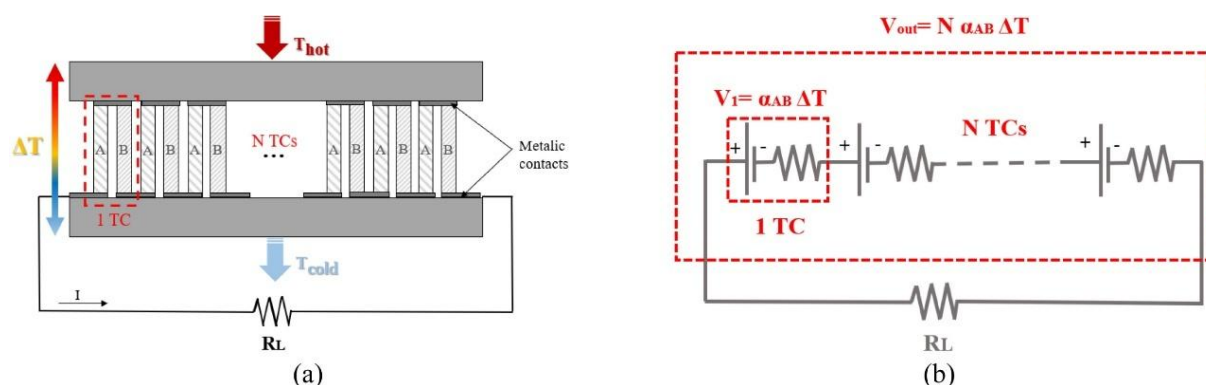
Systemy pozyskiwania energii konwertują jeden typ energii ze źródeł znajdujących się w otoczeniu w inną, np. elektryczną. Taki sposób pozyskiwania energii do zasilania urządzeń pozwala przewyżczyć część ograniczeń współczesnego akumulatorowego sposobu zasilania elektroniki (zapotrzebowanie na energię poszczególnych rodzajów odbiorników przedstawia Rysunek 2) [28]–[31].



Rysunek 2 Zapotrzebowanie na energię czujników i urządzeń, od prawej: komputer stacjonarny (ang. Desktop), laptop, telefon komórkowy, odtwarzacz mp3, przekaźnik Bluetooth (ang. Transceiver), miniaturowe radio (ang. Miniature FM receiver), aparat słuchowy (ang. Hearing aid), etykieta RFID (ang. RFID tag), zegarek elektroniczny (ang. electronic watch), oscylator kwarcowy 32 KHz (ang. Quartz Oscillator) i tryb czuwania urządzeń (ang. Standby) [32].

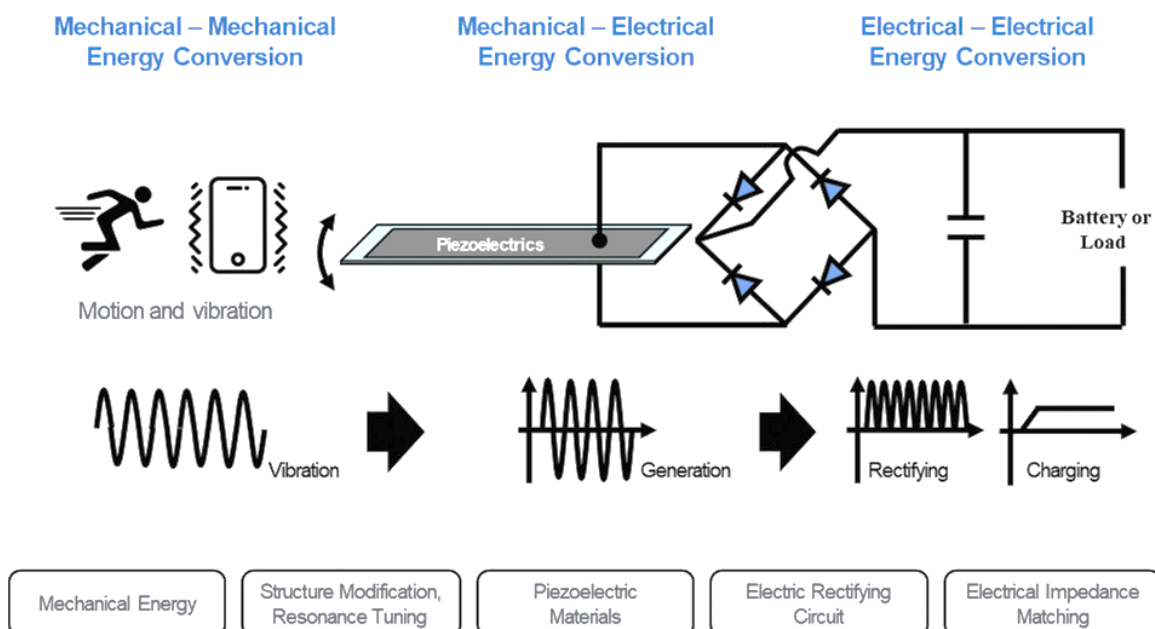
Najbardziej obiecującymi źródłami energii do zasilania elektroniki osobistej są ciepło, wibracje i fale elektromagnetyczne, np. fale radiowe, promieniowanie podczerwone czy światło widzialne [33]. Urządzenia wykorzystujące te źródła zasilania są obecnie rozwijane i miniaturyzowane. Do praktycznych zastosowań systemów pozyskiwania energii zaliczamy m.in. fotowoltaikę, urządzenia wykorzystujące ciepło ludzkiego ciała [34], sieci bezprzewodowych czujników [35], [36] oraz inteligentne sieci łączące energię ze źródeł odnawialnych z energią z konwencjonalnych elektrowni [37]. W ostatnich dwóch dekadach technologie EH były szeroko badane przez interdyscyplinarne grupy badawcze, a dzięki nowoczesnym rozwiązaniom są wykorzystywane w innowacyjnych aplikacjach wieloźródłowych, takich jak sieci Spectrum Power™ ADMS26 lub bezprzewodowe sieci czujników EnOcean. Ciepło wykorzystywane jest przez Generatory Termoelektryczne (ang. Thermoelectric Generators – TEG) przy wykorzystaniu efektu Seebeck’a [38] – prąd jest generowany między materiałami termoelektrycznymi na skutek gradientu temperatury

(Rysunek 3) [39], [40]. Uzyskiwana w ten sposób gęstość mocy w typowej dla elektroniki osobistej sytuacji różnicy temperatur - między ludzkim ciałem, a powietrzem w temperaturze pokojowej - wynosi $20\text{-}60 \text{ mWcm}^{-2}$ [41], a w warunkach przemysłowych można pozyskać nawet $7,6 \text{ Wcm}^{-2}$ [42].



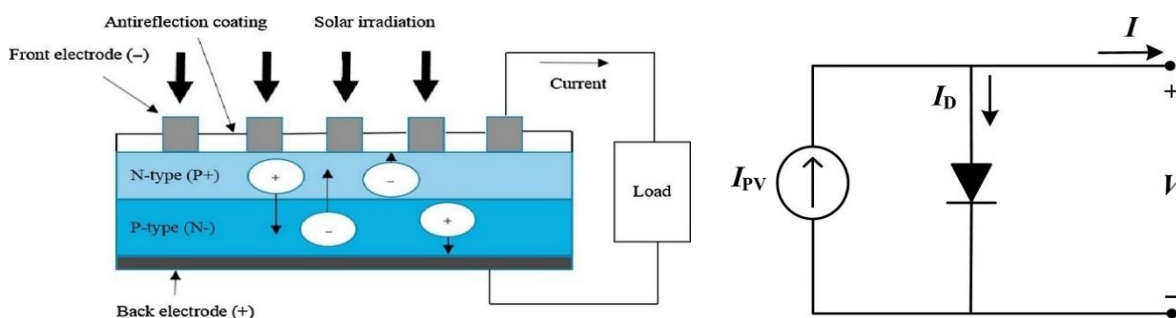
Rysunek 3 Podstawowa zasada działania (a) i równoważny obwód elektryczny (b) typowego generatora termoelektrycznego, wykorzystującego ogniwa termoelektryczne (TC) o metalowych kontaktach (ang. Metallic contacts) między gorącą (T_{hot}) a zimną (T_{cold}) powierzchnią [40].

Drgania, ruch i hałas wykorzystywane są przez systemy piezoelektrycznego pozyskiwania energii (Rysunek 4) [43], [44]. Ten typ pozyskiwania energii charakteryzuje się niską efektywnością ze względu na wysoką wartość napięcia i niską wartość natężenia uzyskiwanego prądu, a typowa uzyskiwana gęstość mocy to ok. 250 mWcm^{-3} [45].



Rysunek 4 Konwersja energii i diagram przepływu pozyskiwania energii piezoelektrycznej (Przekształcenie energii mechanicznej w mechaniczną - wibracje (ang. Vibrations), przekształcenie energii mechanicznej w elektryczną - generacja sygnału elektrycznego (ang. Generation), przekształcenie energii elektrycznej w elektryczną - wyprostowanie (ang. Rectifying) i ładowanie (ang. Charging) [44].

Naturalnie występujące źródła światła widzialnego są uznawane za najbardziej popularne źródła energii do jej pozyskiwania (Rysunek 5) [46]–[48]. Gęstość mocy pozyskiwana przy pomocy ogniw fotowoltaicznych może sięgać 25 mWcm^{-2} w pełnym słońcu [49], niemniej w cieniu wartość ta może spaść o trzy rzędy wielkości. [32] Efekt ten może zostać zredukowany poprzez zastosowanie systemów pozyskujących energię wykorzystując zacienienie części ich powierzchni aktywnej [50].



Rysunek 5 Struktura złącza p-n z pojedynczym ogniwem fotowoltaicznym i jego równoważny obwód elektryczny (promieniowanie słoneczne (ang. Solar irradiation) pada na powierzchnię pokrytą elektrodami zbierającymi (ang. Front electrode) i powłoką antyrefleksyjną (ang. Antireflection coating) i przenika to warstwy PN wywołując przepływ prądu (ang. Current) przez obciążenie (ang. Load) w skutek wytworzenia napięcia pomiędzy elektrodami zbierającymi a tylną elektrodą (back electrode) [48].

Pozyskiwanie energii z fal radiowych (ang. Radio frequency energy harvesting, RF EH) jest techniką pozyskiwania energii przy użyciu anteny prostowniczej z promieniowania elektromagnetycznego (EM) w częstotliwościach radiowych (pomiędzy 3 kHz a 300 GHz) swobodnie dostępnego w miejscu pozyskiwania [51]. Promieniowanie EM o częstotliwości wyższej niż częstotliwości radiowe – promieniowanie podczerwone lub światło widzialne o częstotliwości do 700 THz – również może być pozyskiwane przy użyciu anten prostowniczych o wymiarach submikronowych. Praktyczne zastosowanie takich anten prostowniczych jest jednak ograniczone przez niezadowalającą integrację diod uniemożliwiającą prawidłowe wyprostowanie pozyskanego sygnału przy wykonywaniu anten prostowniczych metodą odgórną (ang. top-down, np. metodami nano-litografii) albo przez trudność w zebraniu pozyskanego ładunku w podejściu oddolnym (np. diody z antenami typu „patch” z nanocząstek) [52].

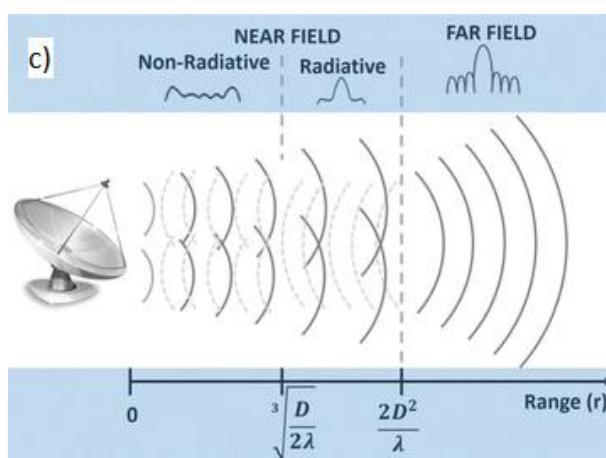
Pomimo niskiej gęstości energii w otoczeniu (do 11 μWcm^{-2}) [53], pozyskiwanie energii z fal radiowych zostało w ostatnich latach uznane za wystarczające do zasilania nowoczesnej niskomocowej elektroniki [54], [55]. W zastosowaniach wymagających więcej mocy wykorzystanie tego rodzaju systemów pozyskiwania energii pozwala przedłużyć czas pracy urządzeń [51]. Zgodnie z prawem Koomey’a, w przeciągu dwóch kolejnych dekad ilość

energii potrzebnej do wykonania tego samego zadania przez urządzenia elektroniczne spadnie o 4 rzędy wielkości [56], co stwarza znaczny potencjał dla pozyskiwania energii z fal radiowych jako metody zasilania urządzeń o najniższym zapotrzebowaniu na energię. Promieniowanie EM jest przy tym najbardziej wszechstronnym ze wszystkich źródeł wykorzystywanych w systemach pozyskiwania energii ze względu na brak konieczności fizycznego kontaktu systemu z konkretną powierzchnią oraz niższą niż w przypadku światła widzialnego ilością przeszkód tłumiących w środowiskach w których wykorzystywana jest elektronika osobista.

Systemy bezprzewodowego transferu mocy, inaczej niż systemy pozyskiwania energii, zamiast energii z istniejących w otoczeniu źródeł wykorzystują promieniowanie wytworzone specjalnie w celu transferu mocy. Systemy bezprzewodowego transferu mocy wykorzystujące fale radiowe pozwalają na uzyskanie najwyższych dostępnych dla systemów pozyskiwania energii z fal radiowych mocy, wykorzystując źródła promieniowania o wysokiej mocy dopasowane do odbiorników. Źródła promieniowania wykorzystywane przez dostawców bezprzewodowego transferu mocy mogą transmitować je w sposób dookólny lub kierunkowy [26]. Dookólny sposób transferu mocy pozwala na zasilanie wielu odbiorników jednocześnie w szerokim zakresie kierunków oraz jest łatwy w implementacji i zarządzaniu, niemniej niski zysk energetyczny dookólnych anten ogranicza zasięg, w którym moc przesyłana do odbiornika wystarcza do jego zasilania. Kierunkowy sposób transferu pozwala na przesłanie wiązki promieniowania na większe odległości, ale by dotarła ona do odbiornika potrzebna jest informacja o bieżącej jego lokalizacji. Elementy systemów do bezprzewodowego transferu mocy umożliwiają również przesyłanie informacji w systemach takich jak bezprzewodowo zasilana komunikacja (ang. Wireless Powered Communication, WPC) oraz symultaniczny bezprzewodowy transfer informacji i mocy (ang. Simultaneous Wireless Information and Power Transfer, SWIPT) [57], [58].

Zachowanie się fal elektromagnetycznych zależy od odległości pomiędzy anteną nadawczą, a anteną odbiorczą [59]. Systemy bezprzewodowego transferu mocy i pozyskiwania energii występują w odmianach dopasowanych do transferowania energii w bliskim lub dalekim polu (Rysunek 6) [60]. Wewnątrz bliskiego pola, czyli przestrzeni odległej od anteny nadawczej o mniej niż odległość Fraunhofer'a [61], w obszarze bliższym centrum występuje strefa reaktywna, w której pole elektryczne i magnetyczne nie są w fazie, co powoduje zakłócenia energii. Drugi obszar to obszar radiacyjny bliskiego pola zwany również obszarem Fresnela. W tym obszarze nie dominuje reaktywne zachowanie fal

elektromagnetycznych, niemniej fazy pól wciąż zmieniają się wraz z odległością [59]. Bezprzewodowy transfer mocy w polu bliskim realizowany jest przez techniki bazujące na sprzężeniu magnetycznym pomiędzy cewkami, które są najbardziej znanymi i standaryzowanymi technikami bezprzewodowego transferu mocy. Przy pomocy silnie sprzężonego rezonansu magnetycznego możliwy jest efektywny transfer mocy nawet na odległość 2 m [62]. Jednakże takie odległości transferu mocy są niemożliwe do uzyskania dla urządzeń przenośnych, gdyż efektywna odległość transferu mocy przy pomocy tej techniki wynosi do dziesięciu średnic cewki, której wielkość jest w przypadku tych urządzeń ograniczona [63]. W dalekim polu, kształt fal elektromagnetycznych jest prawie jednolity. Radiacyjny bezprzewodowy transfer mocy w dalekim polu jest w stanie zasilić urządzenia w odległości dziesiątek metrów [26] przy wykorzystaniu fal o wysokiej częstotliwości, od setek Megahertzów do Gigahertzów [64], jednakże efektywność tego transferu jest niższa niż transferu w bliskim polu [65], [66]. Anteny prostownicze wykorzystywane w radiacyjnym bezprzewodowym transferze mocy w dalekim polu mogą być również wykorzystane w systemach pozyskiwania energii z fal elektromagnetycznych, dzięki wszechobecności fal elektromagnetycznych w obszarach miejskich [61].

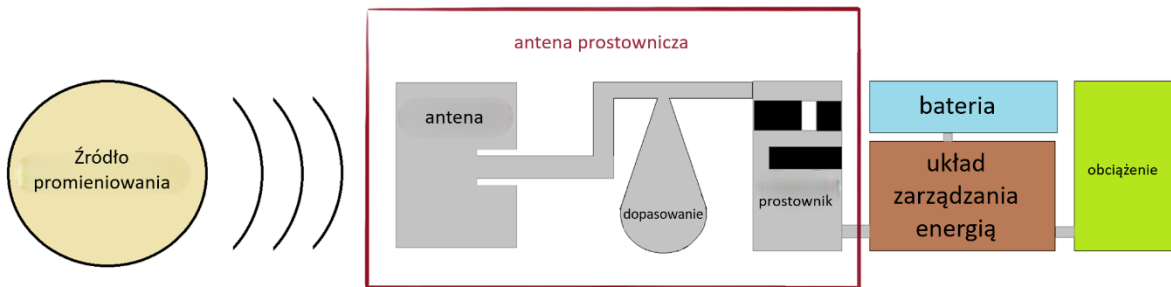


Rysunek 6 Rozmieszczenie obszarów bliskiego(ang. Near field) – reaktywnego (ang. Non-radiative) i radiacyjnego (ang. Radiative) i dalekiego pola (ang. Far field) w przestrzeni [59].

2.2.1. Projektowanie anten prostowniczych i analiza ich efektywności dla systemów bezprzewodowego transferu mocy i pozyskiwania energii

Układy odbiorcze w systemach bezprzewodowego transferu mocy i pozyskiwania energii składają się z anteny prostowniczej połączonej z układem magazynowania energii i zarządzania nią oraz z układem funkcjonalnym (Rysunek 7). Badana jest obecnie możliwość wykorzystania znanych od ponad pół wieku anten prostowniczych do zasilania sensorów w sieciach IoT [67]–[69]. Antena prostownicza składa się z anteny, układu dopasowania

impedancyjnego oraz prostownika, czasem wzbogaconego o funkcjonalność wzmacniacza napięciowego) [70]. Antena przechwytuje energię fal radiowych rozchodzącą się w przestrzeni. Następnie, układ dopasowania minimalizuje straty przesyłowe między anteną a prostownikiem, a prostownik konwertuje przechwyconą energię w stały prąd o pożądanej wartości napięcia [71]. Uzyskany w ten sposób prąd może zasilać układ funkcjonalny bezpośrednio, jak również przy pomocy układu magazynowania i zarządzania energią, np. wyspecjalizowanych układów elektronicznych sparowanych z akumulatorami bądź prostymi kondensatorami.



Rysunek 7 Schemat ideowy anteny prostowniczej w systemach pozyskiwania energii i bezprzewodowego transferu mocy.

Efektywność anten prostowniczych

Szeroki zakres aplikacji systemów bezprzewodowego transferu mocy i pozyskiwania energii w których wykorzystywane są anteny prostownicze sprawia, że nie ma jednego najważniejszego wskaźnika jakości (ang. Figure of Merit), który może być używany do porównania między sobą ich efektywności. Jest jednak parę miar, których można użyć by zweryfikować możliwości anteny prostowniczej do przechwytywania energii na pewnym dystansie i efektywnej jej konwersji. Końcowy wzór powinien być wybrany jako kompromis pomiędzy tymi specjalnymi miarami, a ogólnymi miarami procesu wytwarzania – niskim kosztem, małymi wymiarami, łatwością wykonywania i wysoką niezawodnością [72].

Najpowszechniejszą miarą w ewaluacji anten prostowniczych jest proporcja między mocą przekazaną na obciążenie (P_{load}), a mocą przechwyconą przez antenę ($P_{retrieved}$), czyli efektywność konwersji mocy (ang. Power Conversion Efficiency, η_{PCE} , PCE) [26], [73]–[75].

$$\eta_{PCE} = \frac{P_{load}}{P_{retrieved}} \quad (1)$$

Efektywność konwersji mocy zwykle zakłada idealne dopasowanie anteny do wzmacniacza, wskazując *de facto* sprawność samego wzmacniacza [59], [72], z rzadka

jedynie uwzględniając straty wynikające z efektywności dopasowania anteny i prostownika [76].

Wysoka wartość efektywności konwersji mocy jest preferowana, choć jest ograniczona przez straty mocy na skutek prądów upływu i pasożytniczych parametrów komponentów RLC, których nie można uniknąć w rzeczywistych zastosowaniach. W układach wykorzystujących klasyczne płytki PCB wyjątkowo wysokie wartości PCE oznaczają wartości powyżej 60% [77]–[80] a w układach wielowarstwowych mogą osiągać wartość nawet 90,6% [81].

Kolejnym istotnym parametrem jest dobroć (Q) charakteryzująca ilościowo układ rezonansowy, wskazująca potencjał komponentu do efektywnego przechowywania energii. W układach RLC Dobroć wyraża się wzorem: [82]

$$Q = 2\pi \frac{E_s}{E_d}, \quad (2)$$

gdzie E_s jest całkowitą energią zgromadzoną w systemie, a E_d jest energią traconą na rezystywnych komponentach systemu. Wybór konkretnego wzoru na dobroć zależy jednak od wybrania konkretnej topologii anteny [72]. Na podstawie wartości dobroci można wyznaczyć również szerokość pasma układu określaną w tym przypadku jako szerokość połówkowa krzywej rezonansowej, czyli różnica częstotliwości, dla których energia drgań wynosi połowę energii maksymalnej dla danej częstotliwości [83].

Istotnym parametrem jest również Czułość określana jako minimalna moc (P) wymagana do zadziałania anteny prostowniczej, określona jako: [59]

$$\text{Czułość (dBm)} = 10 \log_{10} \left(\frac{P}{1\text{mW}} \right). \quad (3)$$

W niektórych aplikacjach czułość jest parametrem bardziej krytycznym od PCE, np. podczas pracy w środowisku o niskiej gęstości mocy, a projektowanie układu w celu zwiększenia czułości może doprowadzić do obniżenia PCE poprzez wzrost prądów upływu [72]. Przy wykorzystaniu zewnętrznych układów zarządzających pozyskaną energią często najważniejszym parametrem jest wartość napięcia, która może być uzyskane na wyjściu anteny prostowniczej w środowisku pracy, po przekroczeniu którego układ może zadziałać ładując akumulator lub też bezpośrednio zasilając urządzenie (np. TI BQ25570) [84].

Linie transmisyjne

W paśmie częstotliwości radiowych i mikrofalowych, wymiary fizyczne komponentów stają się porównywalne z elektryczną długością sygnału, co wymaga podejścia opartego na teorii pól elektromagnetycznych, a nie na uproszczonej teorii obwodów z elementami dyskretnymi. Linie transmisyjne, w przeciwieństwie do elementów skupionych, są sieciami gdzie napięcia i prądy ulegają zmianom amplitudy i fazy na całej długości linii.

Linie mikropaskowe są jednym z najbardziej rozpowszechnionych typów płaskich linii transmisyjnych, przede wszystkim ze względu na łatwość ich wytwarzania metodami fotolitograficznymi oraz możliwości miniaturyzacji i integracji z innymi komponentami mikrofalowymi. Składają się one z przewodnika o określonej szerokości, umieszczonego nad cienkim, uziemionym podłożem dielektrycznym. Ze względu na ich złożony, częstotliwościowo zależny charakter, bezpośredni pomiar napięcia i prądu jest często niepraktyczny, a kluczową rolę w ich pomiarze i analizie odgrywa macierz rozproszenia (macierz S). Macierz S, której poszczególne składniki nazywane są parametrami S, to narzędzie służące do charakteryzowania sieci wieloportowych poprzez określanie relacji między amplitudami napięcia fal padających, a amplitudami napięcia fal odbitych od poszczególnych portów. Dla sieci dwuportowej, jaką jest linia transmisyjna, element macierzy S o wskaźnikach 11 (S_{11}) reprezentuje współczynnik odbicia na porcie 1, opisujący amplitudę napięcia fali odbitej do portu 1 w stosunku do amplitudy napięcia fali wychodzącej z tego portu. Z kolei element macierzy S o wskaźnikach 21 (S_{21}) stanowi współczynnik transmisji z portu 1 do portu 2, odzwierciedlając amplitudę fali przetransmitowanej do portu 2 w stosunku do amplitudy napięcia fali wychodzącej z portu 1. Wartości te, często wyrażane w decybelach, są fundamentalne dla oceny dopasowania impedancyjnego, strat, zysku energetycznego i izolacji w systemach mikrofalowych. Nowoczesne pakiety oprogramowania CAD powszechnie wykorzystują te parametry do modelowania i optymalizacji obwodów mikrofalowych [85].

Anteny

Antena jest integralnym komponentem anteny prostowniczej. Jej pierwotną funkcją jest przechwytywanie promieniowania elektromagnetycznego i przesyłanie do pozostałej części układu anteny prostowniczej. Wzór anteny jest kluczowy do maksymalizacji efektywności transferu mocy [51].

Najpopularniejszymi wzorami anten są: anteny mikropaskowe typu „patch” [86]–[89] (nazywane też łatkowymi [90]), anteny dipolowe [91], anteny monopolowe [92], anteny

pętlowe [93], [94], anteny yagi [95]–[97], anteny typu PIFA (ang. Planar Inverted F Antenna) [98], a także anteny z rezonatorem dielektrycznym (DRAs) [99]. Anteny można również łączyć w matryce anten [100], co podnosi ich efektywność przy niskim poziomie docierającej do nich mocy [101] i umożliwia sterowanie kierunkiem przesyłania wiązki elektromagnetycznej wychodzącej z anten nadawczych poprzez zmiany fazy poszczególnych anten w matrycy, bez żadnej fizycznej zmiany w układzie [102].

Podczas wyboru lub projektowania anteny, powinno się wziąć pod uwagę: zysk energetyczny (ang. gain), pasmo przenoszenia, impedancję i wymiary geometryczne [59], [70]. W antenie będącej elementem układu odbiorczego, zysk energetyczny określa jak dobrze antena przekształca promieniowanie elektromagnetyczne z danego konkretnego kierunku na moc elektryczną w porównaniu do optymalnej dookólnej i izotropowej anteny [27]. Wysoki zysk energetyczny i miniaturyzacja są głównymi celami współczesnej technologii antenowej [103], [104]. Wysoka wartość zysku energetycznego w jednym kierunku zwykle prowadzi do pomniejszenia jej w innym kierunku [59]. Pasma przenoszenia anteny jest zakresem częstotliwości po obu stronach częstotliwości środkowej, gdzie parametry anteny (impedancja, zysk energetyczny) mają wartości w akceptowalnym zakresie różniące się od parametrów dla wybranej częstotliwości rezonansowej [105]. Standardowa antena monopolowa rezonuje, gdy jej długość jest równa połowie długości fali dla wybranej częstotliwości, powodując zmniejszanie się wymiarów anten wraz ze wzrostem częstotliwości do pracy w której są projektowane [106]. Z tego powodu w miniaturowych urządzeniach nie jest możliwe używanie bardzo niskich częstotliwości do przesyłania do nich informacji bądź energii. Antena o szerokim paśmie przenoszenia jest korzystna w systemach pozyskiwania energii gdyż może przechwytywać sygnał z szerokiego spektrum częstotliwości, niemniej z tego samego powodu może powodować interferencje jako szum w częstotliwościach używanych np. do komunikacji [59]. Impedancję anteny zwykle weryfikuje się poprzez pomiar S_{11} . Im mniejsza jego wartość w częstotliwości pracy anteny, tym bardziej impedancja anteny jest dopasowana w tej częstotliwości (najczęściej wykorzystywana jest impedancja $50\ \Omega$, rzadziej $75\ \Omega$) [107].

Anteny siatkowe

Podjęcie polegające na zmianie konstrukcji anteny poprzez zastąpienie jej siatką linii przewodzących służy do uzyskania przezroczystości optycznej anteny (w zastosowaniach na przedniej szybie samochodu [108] lub na ogniwach słonecznych [109]) i zmniejszeniu ilości odpadów materiałowych powstających podczas procesów wytwarzania przyrostowego, np.

procesu sitodruku [110], druku strumieniowego [111], bezpośredniego druku tuszem [76], lub fleksografii [112]. Przezroczystość wyższa niż 90% sprawia, że "antenę siatkową" są preferowaną konstrukcją do integracji z ogniwami słonecznymi, oknami i wyświetlaczami LED [113]. Aby osiągnąć taką przezroczystość w wysokich częstotliwościach, potrzebne są metody wytwarzania wzorców o wysokiej rozdzielczości i wysokiej przewodności [114] lub minimalizacja spadku zysku energetycznego dzięki gęstej siatce wąskich linii [115]. Siatkowe podejście było stosowane do drukowanych płaszczyzn uziemienia wykonywanych technikami elektroniki drukowanej [116]. Podejście siatkowe jest również wykorzystywane do wykonywania siatkowych linii transmisyjnych w celu zwiększenia teoretycznej przezroczystości optycznej całego układu. Próbkę takich linii transmisyjnych nie były jednakże do tej pory wykonywane technikami elektroniki drukowanej, tylko z trawionej miedzi na PCB, jako struktura z otworami [117]–[119].

Układ dopasowania impedancyjnego

Wysoka wartość strat odbiciowych podczas transmisji sygnału może obniżyć efektywność anteny prostowniczej poniżej akceptowalnego poziomu [51], [72]. Straty odbiciowe mogą być spowodowane przez brak dopasowania impedancyjnego pomiędzy źródłem, a obciążeniem, ponieważ powoduje to przepływ odbitej mocy z powrotem w przestrzeń [72]. By zapobiec temu zjawisku stosuje się układy dopasowania impedancyjnego. W antenie prostowniczej, antena jest uznawana za źródło, a prostownik jako obciążenie [59]. Impedancje anteny i prostownika muszą być sprzężone ze sobą nawzajem w projektowanej częstotliwości roboczej by były dopasowane i w ten sposób maksymalizowały wartość napięcia wchodzącego do prostownika [77], [120], [121]. Specyfika procesu dopasowania zależy od wielkości i konstrukcji anteny. W antenach prostowniczych typowo jest to realizowane przez pasywną sieć LC stworzoną z nierozpraszających energii komponentów elektronicznych - cewek i kondensatorów [120]. Idealny układ dopasowania impedancyjnego powinien zapewniać idealne dopasowanie przy minimalnych stratach [122]. Nawet niewielka zmiana w układzie dopasowania impedancyjnego może powodować poważny spadek efektywności anteny prostowniczej [70]. W związku z tym precyzja podczas wytwarzania tego elementu jest krytyczna dla całego układu anteny prostowniczej [72]. Użycie komercyjnie dostępnych elementów elektronicznych do wytworzenia układu dopasowania impedancyjnego może być wymagające ze względu na występowanie tych elementów w określonych łańcuchach technologicznych i zakres tolerancji parametrów owych komponentów, powodujące brak możliwości uzyskania komponentów o dokładnie takich

wartościach jakich potrzeba. Alternatywne podejście zakłada użycie otwartej lub zwartej linii transmisyjnej, która z perspektywy jej wejścia jest czystą reaktancją/susceptancją. Takie linie nazywane są stroikami impedancyjnymi typu „stub”, a potrzebne dopasowanie impedancyjne może zostać zrealizowane poprzez ich odpowiednie zaprojektowanie i wykonanie [123]. Układy dopasowania impedancyjnego nie zawsze są potrzebne – możliwe jest uniknięcie ich zastosowania poprzez wspólne projektowanie anteny i prostownika [76].

Prostownik

Prostownik jest częścią anteny prostowniczej prostującą prąd zmienny na prąd stały [120]. Prostownik składa się z pasywnych komponentów RLC i aktywnych diod lub tranzystorów [87], [124], [125]. Typowa konstrukcja składa się z diody połączonej z kondensatorem tworzącymi razem filtr dolnoprzepustowy – prostownik poł-falowy – by uzyskać prąd tętniący, czyli stały z niewielką składową zmienną [126]. Wielkość tej składowej zmiennej jest zależna od stałej czasowej RC kondensatora. W aplikacjach gdzie konieczna jest jej minimalizacja, zastosowanie układu prostownika pełnofalowego jest preferowane [59]. W aplikacjach takich jak ładowanie baterii wymagających pewnego określonego napięcia do rozpoczęcia procesu często konieczne jest zastosowanie wzmacniacza napięciowego by uzyskać odpowiednio wysokie napięcie na wyjściu z anteny prostowniczej. Częstym sposobem realizacji wzmacniacza napięciowego w układach anten prostowniczych jest kaskadowe połączenie prostowników [127]. Ilość stopni w połączeniu kaskadowym należy dobrać do konkretnej aplikacji, gdyż zbyt duża ich ilość powoduje trudności z dopasowaniem impedancyjnym poprzez wytworzenie wysokiej pasożytniczej pojemności, a zbyt mała jest niewystarczająca do uzyskania odpowiedniego napięcia wyjściowego [72], [126]. W przypadku pozyskiwania energii w środowiskach o bardzo niskiej gęstości energii (-12 dB) konstrukcje prostownika oparte na pojedynczej diodzie skutkują uzyskaniem wyższej wartości PCE od innych konstrukcji [128].

Diody

Diody są urządzeniami umożliwiającymi przepływ prądu w jedynie jednym kierunku pomiędzy dwoma terminalami [126]. Wybór diody jest kluczowym elementem podczas projektowania prostownika, ponieważ jego parametry są ściśle zależne od parametrów użytych do jego wykonania diod: pojemności złącza (preferowana jest wysoka w celu maksymalizacji zarówno krańcowej częstotliwości w której dioda działa jak i PCE), wartości progowego napięcia przewodzenia (preferowana niska by umożliwić działanie w środowisku o niskiej gęstości mocy oraz maksymalizację PCE), rezystancji w kierunku przewodzenia

(preferowana niska by zmaksymalizować PCE) i prądu nasycenia (dla czułych prostowników preferowany jest niski, dla szerokopasmowych wysoki) [59], [70], [129]–[131]. Najbardziej popularnym typem diody używanej w prostownikach anten prostowniczych ze względu na niską pojemność złącza, niskie progowe napięcie przewodzenia i wysoki prąd nasycenia są diody Schottky’ego [132]–[134]. Tranzystory TFT mogą również być stosowane jako diody i choć mają niższą wydajność w porównaniu do diod Schottky’ego, łatwość ich wykonania czyni je lepszym wyborem w niektórych zastosowaniach [126]. Innymi rodzajami diod używanych w prostownikach są diody tunelowe, charakteryzujące się niskimi wartościami pasożytniczych komponentów RLC, diody spinowe posiadającą jeszcze niższą od diody Schottky’ego wartość progowego napięcia przewodzenia oraz diody metal-izolator-metal [59].

2.2.2. Źródła energii odpadowej do pozyskiwania oraz obecnie rozwijane systemy bezprzewodowego transferu mocy

Do fal radiowych występujących w otoczeniu zalicza się sygnały radiowe AM/FM [135], [136], sygnały telewizyjne [137], [138], sygnały GSM telefonii komórkowej [134], sygnały Wi-Fi [139], [140], sygnały LTE i 4G [141], aż do najnowszych sygnałów 5G [26], [142]. Anteny prostownicze mogą wykorzystywać te sygnały do zasilania prostych urządzeń [143]–[145]. Sygnały radiowe w otoczeniu są zwykle dostarczane przez stacjonarne źródło, takie jak stacja bazowa, emitujące stałą wartość promieniowania w czasie [72]. Przykładami praktycznych testów pozyskiwania energii w miejskich środowiskach są eksperymenty przeprowadzone w Londyńskim metrze [146], Bordeaux [132] i Paryżu [147].

By umożliwić bezprzewodowy transfer mocy pomiędzy urządzeniami wyprodukowanymi przez różne firmy, konieczne jest wykorzystanie standardów określających parametry i funkcje niezbędne by dane urządzenie mogło być używane jako element pewnego systemu transferu mocy. Największymi firmami zajmującymi się standaryzacją systemów bezprzewodowego transferu mocy są:

- **Wireless Power Consortium** – twórcy standardu Qi, wykorzystywanego między innymi do ładowania smartfonów i inteligentnych zegarków w częstotliwościach 100-205kHz i standardu Ki do ładowania urządzeń kuchennych.
- **AirFuel Alliance** – twórcy standardu resonance (6,78 MHz) używanego do transferu mocy do wielu urządzeń poprzez powierzchnię ładującą oraz standardu RF pozwalającego na zasilanie prostych urządzeń w odległości do dziesiątek metrów,

korzystając z połączenia bluetooth i matrycy anten sterującej kierunkiem transferu mocy.

- **NFC Consortium** twórcy dwóch standardów wykorzystujących moduły NFC do bezprzewodowego transferu mocy w częstotliwości 13,56MHz.

Bezprzewodowy transfer mocy ma również miejsce przy wykorzystywaniu systemów identyfikacji radiowej (ang. Radio Frequency Identification, RFID) [148]–[150]. Systemy identyfikacji radiowej są bezprzewodową technologią o krótkim zasięgu, wykorzystującą małe przekaźniki radiowe do cyfrowego kodowania danych [151]. Systemy identyfikacji radiowej są szeroko stosowane w zarządzaniu łańcuchami dostaw i w przemysłowym śledzeniu danych [72]. Aby osiągnąć konkurencyjne odległości odczytywania, pasywne przekaźniki RFID muszą przezwyciężyć wyzwanie jakim jest wzrost jakości przy jednoczesnym pozostawieniu niskiej ceny. Przekaźniki RFID najczęściej korzystają z częstotliwości 125KHz lub 13,56MHz.

Niektóre źródła wskazują iż pasma 915MHz i 850MHz są korzystne jako kompromis pomiędzy efektywnością, a wielkością anteny [26]. Te pasma są używane przez niektóre firmy w ich komercyjnych systemach bezprzewodowego transferu mocy. Największą z nich jest Powercast, których system pozwala na ładowanie kontrolerów do gier czy zasilanie elektronicznych wyświetlaczy cen w sklepach i był już wykorzystywany przez naukowców do zasilania drukowanych anten prostowniczych [76]. Innym systemem jest Powerplug firmy Aeterlink, którego obszarem zastosowania są inteligentne biura i bezprzewodowe zasilanie implantów [152].

2.2.3. Przepisy regulujące emitowaną moc urządzeń i sieć 5G

Systemy bezprzewodowego transferu mocy są istotnym elementem koncepcji środowiska bezprzewodowego ładowania (ang. Wireless Charging Landscape), czyli środowiska, w którym źródła energii będą umieszczane w celu ciągłego zasilania i ładowania urządzeń mobilnych. Jednak, aby osiągnąć takie cele, konieczne są zmiany w przepisach, ponieważ różne dopuszczalne maksymalne moce wyjściowe nadajników WPT na całym świecie uniemożliwiają ich globalizację. By chronić ludzi przed potencjalnymi niekorzystnymi skutkami zdrowotnymi niejonizującego pola elektromagnetycznego [61], organizacje takie jak Federalna Komisja Łączności (ang. Federal Communications Commission, FCC) [153], Instytut Inżynierów Elektryków i Elektroników (ang. Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) [154], oraz Międzynarodowa Komisja Ochrony przed Promieniowaniem Niejonizującym (ang. International Commission on Non-Ionizing

Radiation Protection, ICNIRP) [155] zalecają ograniczenia dotyczące maksymalnej efektywnej mocy promieniowanej (ang. Effective radiated power, ERP). Jednak obecne ograniczenia (nie wyższe od pojedynczych watów) nakładane przez krajowe organy regulacyjne np. amerykańskie FCC 15.247.b.4, nie zostały napisane z myślą o bezprzewodowym transferze mocy [26]. W Polsce podobnie, choć obowiązują regulacje dotyczące RFID działającego w częstotliwości 2,45 GHz wskazujące szczegółowo ograniczenia w maksymalnej mocy promieniowanej (Dz.U.2022.567). W prawodawstwie krajowym współpraca między ustawodawcą, a przemysłem, zwłaszcza konsorcjami normalizacyjnymi, jest niezbędna do szerszego wdrożenia systemów przesyłania mocy i dopasowania optymalnych poziomów mocy dla wysokiej sprawności i bezpieczeństwa w przepisach i regulacjach różnych krajów. Tempo badań nad wpływem promieniowania na organizm ludzki jest wzmagane przez szeroko zakrojone badania nad implantami biomedycznymi tkanek głębokich wykorzystującymi energię bezprzewodową [156] oraz obawy opinii publicznej dotyczące możliwego negatywnego wpływu pól o częstotliwości radiowej powyżej 6 GHz na zdrowie ludzkie. Ten negatywny wpływ, poniżej zalecanych przez ICNIRP poziomów narażenia, nie został potwierdzony [157].

Przyszłe regulacje mające dotyczyć nowych wdrażanych częstotliwości mają już uwzględniać wyższe poziomy mocy do wykorzystania w bezprzewodowym transferze mocy. Planowane jest zwiększenie wartości dopuszczalnego przesyłanego ERP dla częstotliwości z zakresu technologii komunikacji mobilnej piątej generacji (5G) przez amerykańskiego regulatora FCC do wartości 75 dBm, czyli ok. 31,6 kW [158], [159]. Tak wysoka wartość, jeżeli wejdzie w życie, może znacząco zwiększyć popularność WPT, a projekty anten prostowniczych do wykorzystania w częstotliwościach 5G są już badane [160], [161]. 5G charakteryzuje się wyjątkowo niskimi opóźnieniami i wysoką szybkością transmisji danych, co jest wymagane w Przemśle 4.0 [162] i przyszłych zastosowaniach IoT [161]. Wysoka szybkość transmisji danych w sieci 5G może dostarczać węzłom IoT informacji o ich wzajemnym położeniu, dzięki czemu korzystne kierunkowe ładowanie bezprzewodowe może stać się szeroko dostępne i pozwalać na płynne przełączanie między źródłami zasilania [26]. Ponieważ techniki elektroniki drukowanej dążą do wyższej przewodności ścieżek przy wysokich częstotliwościach i wyższych rozdzielczościach, małe anteny 5G mogą być powszechnie drukowane. Aktualne przykłady obejmują anteny wykonywane drukiem strumieniowym [163], aerozolowym [164], sitodrukiem [165] i bezpośrednim drukiem tuszem [166].

2.3. Elektronika drukowana

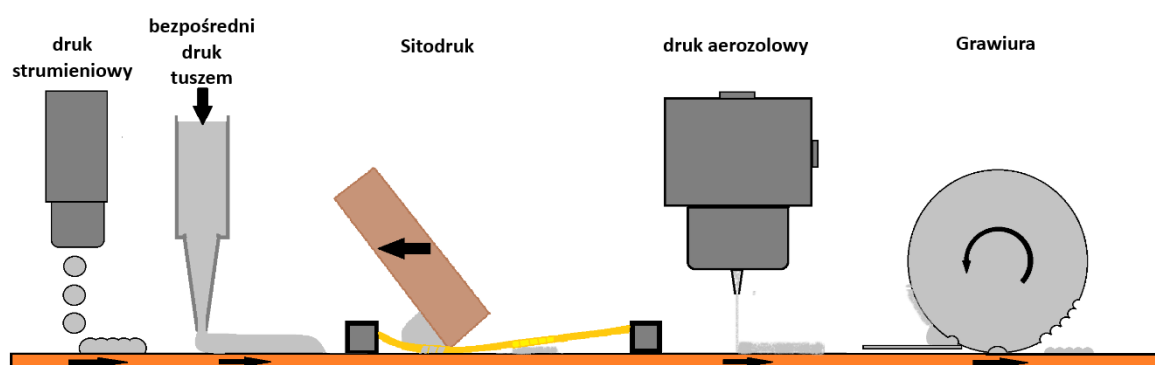
Elektronika drukowana jest grupą technik (Rysunek 8) wykorzystujących systemy drukarskie do wytwarzania układów i komponentów elektronicznych [167], [168]. Możliwość wykonywania szerokiej gamy anten prostowniczych przy użyciu technik elektroniki drukowanej jest obecnie badana ze względu na właściwości komponentów elektronicznych wykonanych tą techniką spełniające niektóre z potrzeb współczesnej elektroniki, takiej jak: [167], [169]–[171]

- Niski koszt produkcji – techniki elektroniki drukowanej umożliwiają wykonywanie układów i komponentów bez użycia masek lub przy wykorzystaniu technik drukarskich o niskim koszcie wytwarzania. Jako podłoża można używać niedrogich materiałów takich jak folie polimerowe lub papier, a niektóre techniki pozwalają na wykonanie nadruków bezpośrednio na opakowaniach bądź obudowach urządzeń.
- Szybkie wykonanie i dostarczenie na rynek – możliwość produkowania małych serii produktów, wykorzystanie dostępnych komercyjnie materiałów i szybkie przygotowanie produkcji również dzięki wykorzystaniu oprogramowania CAD/CAM do generacji kodu sterującego urządzeniami pozwala na szybsze dostarczenie układów i komponentów na rynek.
- Niski wpływ na środowisko naturalne – efektywne wykorzystanie materiału w przyrostowych procesach wytwórczych obniża koszty i zwiększa zrównoważoność produkcji, co jest szczególnie ważne ze względu na wysoki koszt recyklingu elektroniki i dużą ilość zanieczyszczeń produkowanych podczas tego procesu.

Techniki elektroniki drukowanej mogą wykorzystywać szerokie spektrum materiałów [172] w formach tuszy i past, m.in. nanocząstki metali [173]–[175], nanorurki węglowe (ang. carbon nanotubes, CNT) [176]–[178], nanopłatki grafenowe (ang. graphene nanoplatelets, GNP) [179]–[181], polimery przewodzące [182]–[184], transparentne przewodzące tlenki (ang. transparent conducting oxides, TCO) [185]–[187], i nanomateriały półprzewodnikowe [188]–[190]. Niektóre z materiałów używanych w jednej technice mogą być wykorzystywane w innych, np. podobna wartość lepkości pozwala na zastosowanie niektórych past do druku sitowego do bezpośredniego druku tuszem. Kiedy używane są różne techniki elektroniki drukowanej, czasem w połączeniu z klasyczną technologią PCB, do wykonywania różnych elementów układu anteny prostowniczej, najczęstszym sposobem połączenia jest bezpośredni druk warstwa po warstwie, czasem z wykorzystaniem warstw rozdzielających w celu uniknięcia mieszania się materiałów na granicy między warstwami [191]. Jeżeli nie jest to

możliwe konieczne jest dobranie odpowiednich technik łączenia ich ze sobą, takich jak kleje przewodzące [192], taśmy metaliczne z klejami przewodzącymi [111], skręcanie lub lutowanie niskotemperaturowe [193]. Odpowiedni dobór techniki i materiału do danego zastosowania pozwala na użycie technik elektroniki drukowanej w niecodziennych zastosowaniach, takich jak wykonywanie połączeń elektrycznych na podłożach wrażliwych na temperaturę [194] lub wykonywanie funkcjonalnych wzorów o kształtach wykrywających zmianę temperatury [195]. Zakres zastosowań elektroniki drukowanej to m.in. wyświetlacze [196]–[198], sensory [199]–[201], elementy elektroniczne [202], [203] czy elektronika osobista [204]–[206].

2.3.1. Wybrane techniki elektroniki drukowanej

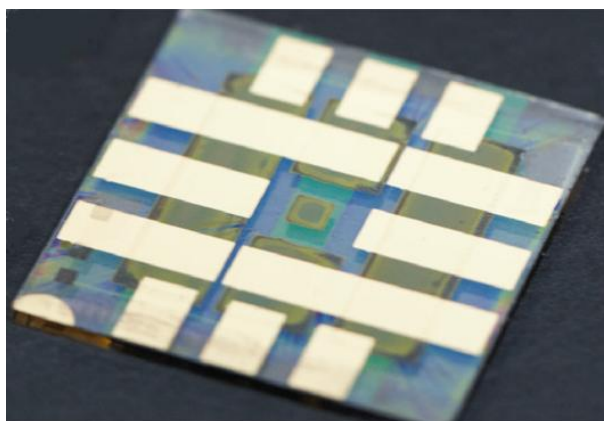


Rysunek 8 Schematyczny rysunek omawianych technik elektroniki drukowanej

Druk Strumieniowy

Druk strumieniowy (ang. Inkjet) to technika, która wykorzystuje cyfrowo sterowaną dyszę do nakładania krople płynnego tuszu na żądane miejsce na podłożu, które może być sztywne lub elastyczne [169], [172], [207]–[209]. Krople można nanosić układając je w pożądane wzory o ostrych krawędziach [210], [211]. Druk strumieniowy jest bezkontaktową techniką addytywną i nie wymaga stosowania masek [212], co sprawia, że druk na geometriach 3D [213] i delikatnych podłożach jest możliwy. Jednakże do uzyskania wysokiej jakości wydruków dla elektroniki wysokiej częstotliwości jest wymagana precyzyjna kontrola nad stałą odległością między dyszą, a podłożem. Dysze drukujące mogą wykorzystywać dwa mechanizmy tworzenia kroplel – metodę termiczną lub piezoelektryczną [173], [209], [214]–[216]. W metodzie termicznej tusz jest podgrzewany w dyszy w celu zwiększenia jego objętości i ciśnienia, co powoduje wypływ kropli z dyszy. Metoda piezoelektryczna wywiera nacisk mechaniczny za pomocą płytki piezoelektrycznej, aby wymusić powstanie kroplel tuszu. Drukarki strumieniowe mogą osadzać wzory w trybie ciągłym i przerywanym (ang.

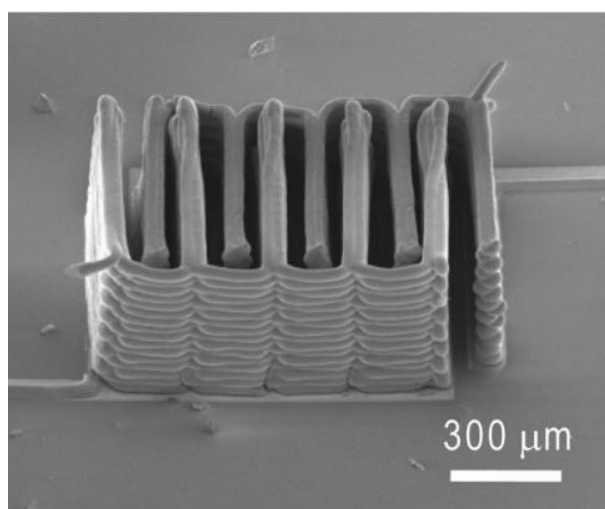
Drop on Demand, DoD) [217]. W trybie druku ciągłego kropelki są generowane jako ciągły, stały przepływ i precyzyjnie kierowane polem elektrycznym w kierunku podłoża lub kolektora nadmiaru tuszu. W trybie przerywanym kropelki osadzone są na podłożu "na żądanie" tylko w wybranych miejscach, tworząc wydrukowany wzór. Druk strumieniowy wykorzystuje różne materiały w postaci ciekłych tuszów – przewodzących, półprzewodnikowych i izolacyjnych [218]. Tusze muszą mieć niską lepkość (mniej niż 50 cP), aby można je było uznać za użyteczne w tej technice [219], [220]. Cyfrowa kontrola każdej kropli i wysoka rozdzielczość zapewniają niskie zużycie materiału w procesie druku strumieniowego [27]. Druk strumieniowy to dojrzała technika, a do drukowania wysokowydajnej elektroniki dostępna jest szeroka gama komercyjnych drukarek i tuszów. Drukarka strumieniowa jest w stanie wytwarzać linie transmisyjne o niskich stratach do 67 GHz [221]. Niski koszt uruchomienia [214] oraz szybkie i bezproblemowe generowanie i zmiana wzorów ze względu na cyfrową kontrolę druku sprawiają, że technika ta jest wygodna do prototypowania i produkcji demonstratorów (ang. Proof of Concept, PoC) dla symulacji układów w częstotliwościach radiowych [222]. Ze względu na prostotę użycia w produkcji masowej, niski koszt oraz równowagę między rozdzielczością a skalowalnością, technika ta nadaje się również do produkcji przemysłowej na dużą skalę [211], [223]–[225]. Parametry procesowe tej techniki były badane w zakresie ich wpływu na jakość komponentów RF, takich jak pasywne etykiety RFID 13,56 MHz [226]. Druk strumieniowy jest stosowany w różnych dziedzinach, takich jak elektronika osobista i optoelektronika, do produkcji elektrod przewodzących [174], organicznych tranzystorów FET [227], ogniw fotowoltaicznych [228] i elastycznych wyświetlaczy OLED (Rysunek 9) [196], [229].



Rysunek 9 Perowskitowe ogniwo fotowoltaiczne wykonane przy pomocy druku strumieniowego [196].

Bezpośredni druk tuszem

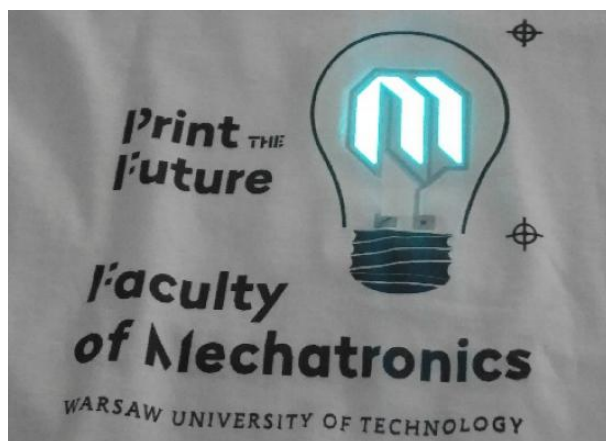
Bezpośredni druk tuszem (ang. Direct Ink Writing, DIW), wymieniany również w literaturze jako druk dyspenserem, to technika elektroniki drukowanej, która wykorzystuje nacisk wywierany na materiał funkcjonalny w strzykawce zakończonej kapilarą lub igłą w celu osadzenia tego materiału na podłożu [230]. Sterowany cyfrowo, ekstruzyjny charakter tej techniki osadzania grubych warstw [231] umożliwia drukowanie ścieżek przewodzących na podłożach o wysokiej chropowatości, które wykraczają poza możliwości technik roll-to-roll i standardowego zastosowania druków strumieniowego i aerozolowego [232]. Atrament jest zwykle drukowany jako ciągła ścieżka, ale zastosowana modulacja nacisku umożliwia drukowanie na żądanie [233]–[235]. Średnica otworu igły używanej do osadzania waha się od 0,5 do 400 μm [230], ale ultraprecyzyjna odmiana tej techniki obejmuje igły o średnicy nawet poniżej 1 μm [236]. W tej technice można stosować materiały o wysokim zakresie lepkości (od kilku cP do ponad 105 cP). Za pomocą DIW można drukować wysokiej jakości linie transmisyjne do 45 GHz [237]. Technika ta jest odpowiednia do prototypowania i produkcji małoseryjnej ze względu na zminimalizowane koszty początkowe i czas realizacji [238], ale nie do produkcji masowej ze względu na niższą przepustowość niż sitodruk przy użyciu materiałów o podobnych właściwościach [76]. DIW zademonstrowano jako technikę produkcji generatora termoelektrycznego [38], [239], [240], baterii (Rysunek 10) [239], [241], [242], struktur 4D [195] i ceramicznych [234], [235], a inteligentne tkaniny wykonane przy wykorzystaniu tej techniki zademonstrowały funkcje emisji dźwięku [243], elektroluminescencji [244], zmiany koloru [245], [246], wykrywania rozciągania [247] i zbliżenia [248].



Rysunek 10 Drukowana bezpośrednim drukiem tuszem szesnasto-warstwowa elektroda [241].

Sitodruk

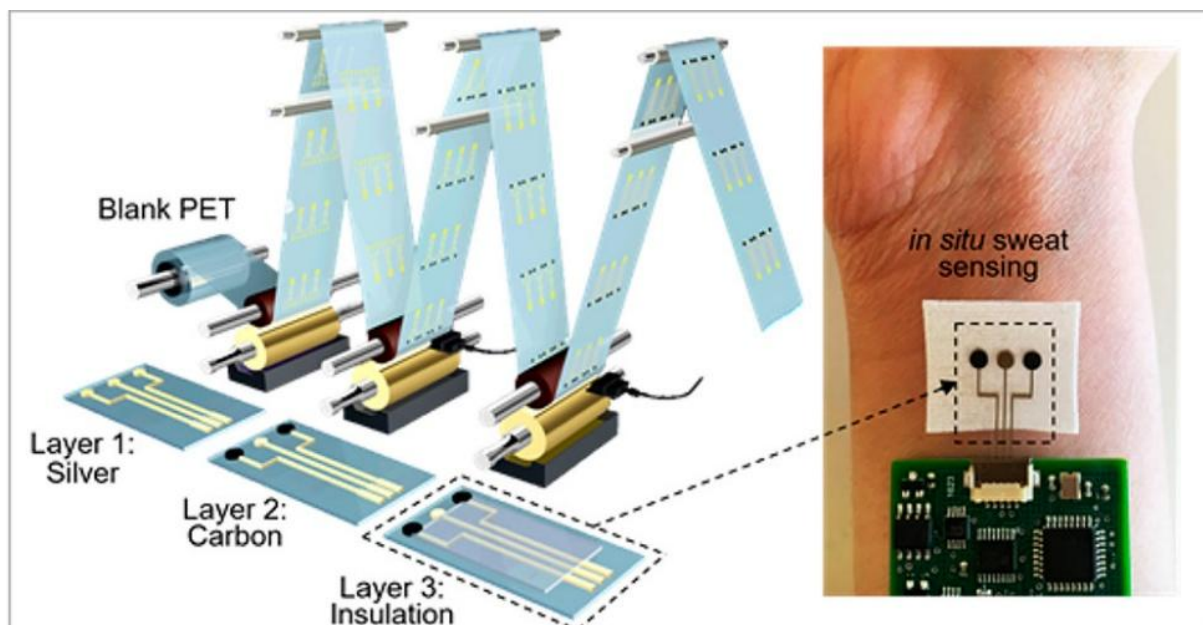
Sitodruk to technika polegająca na nanoszeniu pasty funkcyjnej na docelowe podłoże za pomocą sita lub szablonu pełniących funkcję formy drukarskiej [27], [207], [208]. Sitodruk jest używany do wytwarzania elementów i obwodów elektroniki drukowanej od czasów II wojny światowej, a obecnie zyskuje coraz większą uwagę jako dojrzała technika elektroniki drukowanej [249]. W tym procesie sito jest umieszczane nad podłożem. Pastę nakłada się na jego krawędź, a rakla stopniowo dociska sito do podłoża i przeciska pastę poprzez sito. Pasta jest przenoszona na podłoże zgodnie ze wzorem sita [215], [250], [251]. Sito może być wykonane z drobnej siatki stalowej lub nylonowej lub metalowego szablonu, rozciągniętego na sztywnej ramie [173]. Alternatywnie, szablony drukarskie o wysokiej rozdzielczości mogą być wytwarzane z cienkich wafli krzemowych z wykonanymi w nich wzorami [250], [252]. Jakość wydruków zależy od parametrów procesu druku (tj. odległości między sitem a podłożem, prędkości druku, siły docisku rakli), reologii tuszu oraz elementów składowych drukarki (sito, rakla, podłoże) [253], [254]. Po wydrukowaniu składniki grubowarstwowe są przekształcane z płynnych w stałe poprzez suszenie lub spiekanie [249]. W przeciwieństwie do drukarek strumieniowych, aerozolowych lub grawiury, sitodruk może wytwarzać grube elementy (do 100 μm). Sitodrukarki mogą osadzać szeroką gamę funkcjonalnych materiałów organicznych i nieorganicznych [208] w formie past o wysokiej lepkości (100-5000 cP) [27] na bazie żywicy organicznej lub nośnika i wypełniacza funkcjonalnego w postaci mikroproszków lub nanocząstek [249]. Ta technika umożliwia drukowanie wysokiej jakości linii transmisyjnych do 110 GHz [255], [256]. Ze względu na swoją wszechstronność, prostotę, powtarzalność i kompatybilność z elastycznymi podłożami, nadaje się do masowego druku elastycznych urządzeń [253], [257]. Jednak nałożony tusz jest dość chropowaty, zmiana wzoru wymaga produkcji nowych sit, a fizyczny kontakt podłoża i maski może czasami być problematyczny w przypadku kruchych podłoży [215], [253]. Ostatnio sitodruk jest używany do produkcji ogniw słonecznych, diod TFEL (Rysunek 11), czujników, tranzystorów i komponentów RLC [204], [252], [254], [258]–[261].



Rysunek 11 Drukowany sitodrukiem rozciągliwy wyświetlacz [204].

Grawiura

Grawiura to technika elektroniki drukowanej, która wykorzystuje wałek z wygrawerowanymi wzorami na jego powierzchni w celu osadzenia tuszu na podłożu [27], [262]. W pierwszym etapie tusz jest przenoszony z wlotu na wałek [222]. Następnie wałek jest przesuwany w kierunku ostrza, aby usunąć nadmiar tuszu z jego powierzchni. Tusz przenoszony jest na podłoże w szczelinie pomiędzy wałkiem dociskowym (konfiguracja ang. roll-to-roll, R2R) lub płytą (konfiguracja ang. roll-to-plate R2P) a grawerowanym wałkiem drukarskim [263] poprzez bezpośredni kontakt fizyczny [208], gdzie jest rozprowadzany, tworząc ostateczny wzór. W konfiguracji R2R grawiura oferuje wysoką przepustowość i dużą prędkość (10 m/s), dzięki czemu doskonale nadaje się do produkcji przemysłowej na dużą skalę [251], [264]. Dodatkowo, osiągnięta rozdzielczość (rozmiary rzędu kilku μm) jest konkurencyjna w porównaniu z innymi technikami elektroniki drukowanej [173]. Przy użyciu grawiury możliwe jest drukowanie linii transmisyjnych wysokiej częstotliwości do 40 GHz przy użyciu farb srebrnych i miedzianych [265]. Tą techniką można wytwarzać folie wielowarstwowe przy użyciu wielu wałków ustawionych w konfiguracji szeregowej. Możliwe jest również wykonanie linii hybrydowej z innymi technikami w konfiguracji R2R, np. sitodrukiem [266]. Spektrum lepkości tuszy w tej technice jest dość szerokie – od 10 do 1000 cP – co pozwala na wykorzystanie niektórych tuszy dostępnych dla wszystkich innych wymienionych technik [27]. Technika ta jest również kosztowna na początkowych etapach i w przypadku konieczności zmiany projektu [267]. Grawiura jest stosowana głównie w przemyśle opakowaniowym, ale również w produkcji wyrobów biomedycznych (Rysunek 12) [199] i układów logicznych [268].

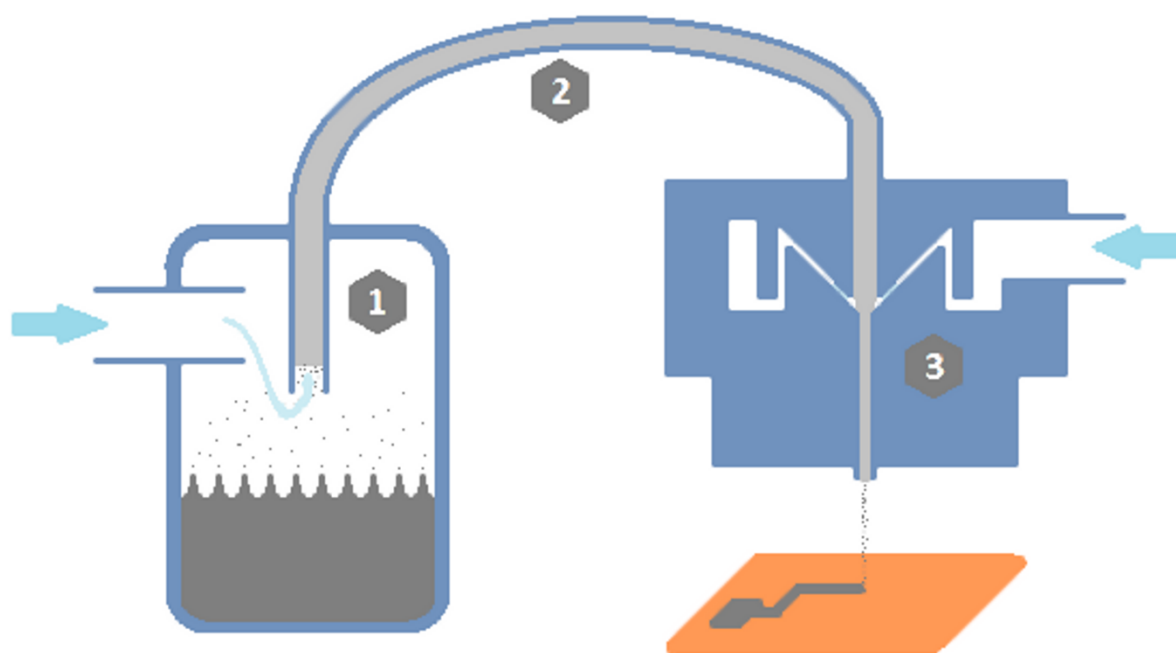


Rysunek 12 Czujnik potu wykonany grawiurą (na pustą folię PET (ang. Blank PET) nanoszone są 3 warstwy (ang. Layer) – srebrna (ang. Silver), węglowa (ang. Carbon) i izolacyjna (ang. Insulation) w wyniku czego wytorzony zostaje czujnik pozwalający na pomiar potu w miejscu jego wydzielania (ang. in situ sweat sensing) [199].

Druk aerozolowy

Druk aerozolowy (ang. Aerosol Jet Printing, AJP) to technika, która wykorzystuje skoncentrowaną strugę tuszu w formie aerozolu do drukowania funkcjonalnych wzorów (Rysunek 13) [269]. Jest to stosunkowo nowa technika elektroniki drukowanej opracowana z myślą o elastycznej elektronice drukowanej [208]. Pierwszym etapem procesu jest atomizacja tuszy funkcjonalnych, pneumatycznie lub ultradźwiękowo. Podczas atomizacji tuszy funkcjonalnych, pneumatycznie lub ultradźwiękowo. Podczas atomizacji pneumatycznej tusz jest rozdmuchiwany w krople o wielkości około 50 μm . Wytworzenie aerozolu polega na przepychaniu tuszu pod dużym ciśnieniem przez wąską szczelinę. Tarcie pomiędzy płynem a powietrzem zakłóca strumień tuszu, powodując jego rozpad na krople. Atomizer pneumatyczny może rozpylać tusze o dużej lepkości (do 1000 cP), np. roztwory polimerów [270]. Atomizacja ultradźwiękowa, stosowana jest w druku aerozolowym w zastosowaniach wymagających wysokiej rozdzielczości przy zachowaniu wysokiej przewodności [271]. Krople tworzące mgłę aerozolową w tym procesie powstają na skutek niestabilności w kapilarnej fali stojącej i akustycznych bąbli kawitacyjnych, co przedstawili Boguslavski i Eknadiosyants w badaniach weryfikujących teorię łączącą te zjawiska [272]. Fala stojąca powstaje na skutek transferu vibracji z źródła ultradźwięków do tuszu, tworząc tzw. prążki Faradaya. Po osiągnięciu odpowiednio wysokiej amplitudy, odrywają się od niej drobne krople tworząc aerozol. Bąble akustyczne tworzą się na skutek powstawania fali stojącej pod powierzchnią tuszu doprowadzającej do powstania zjawiska kawitacji. W procesie ich wytwarzania i zanikania wytwarzane są krople o większej średnicy i pędzie niż te

wytworzone z wierzchołka fali stojącej [273]. Trzecim hipotetycznym źródłem kropeł są bąble powietrza powstałe na skutek wrzenia tuszu w centrum fali stojącej [274]. Atomizacja ultradźwiękowa pozwala na stosowanie tuszu o maksymalnej lepkości jedynie $\sim 10\text{--}15$ cP [270], [275], jednakże uzyskiwane są krople o małej średnicy (od 50nm) [276]. W optymalnej atomizacji rozkład kropeł jest najbardziej zbliżony do jednorodnego, a krople mają średnicę około $5\text{ }\mu\text{m}$ [277]. Następnie aerozol transportowany jest przez gaz nośny do głowicy drukującej, gdzie strumień jest zagęszczany przez przepływ gazu osłonowego i osadzany na powierzchni docelowej [278], [279]. Wartości przepływu gazu nośnego i osłonowego są głównymi parametrami procesu drukowania i powinny być zoptymalizowane dla każdego tuszu [279], [280]. Ruch podłoża jest kontrolowany cyfrowo, a osadzanie strumienia aerozolu jest kontrolowane poprzez zasłanianie go przez ruchomą przesłonę w celu stworzenia pożądanych wzorów lub przez pneumatyczną zmianę kierunku przepływu gazu osłonowego [262].

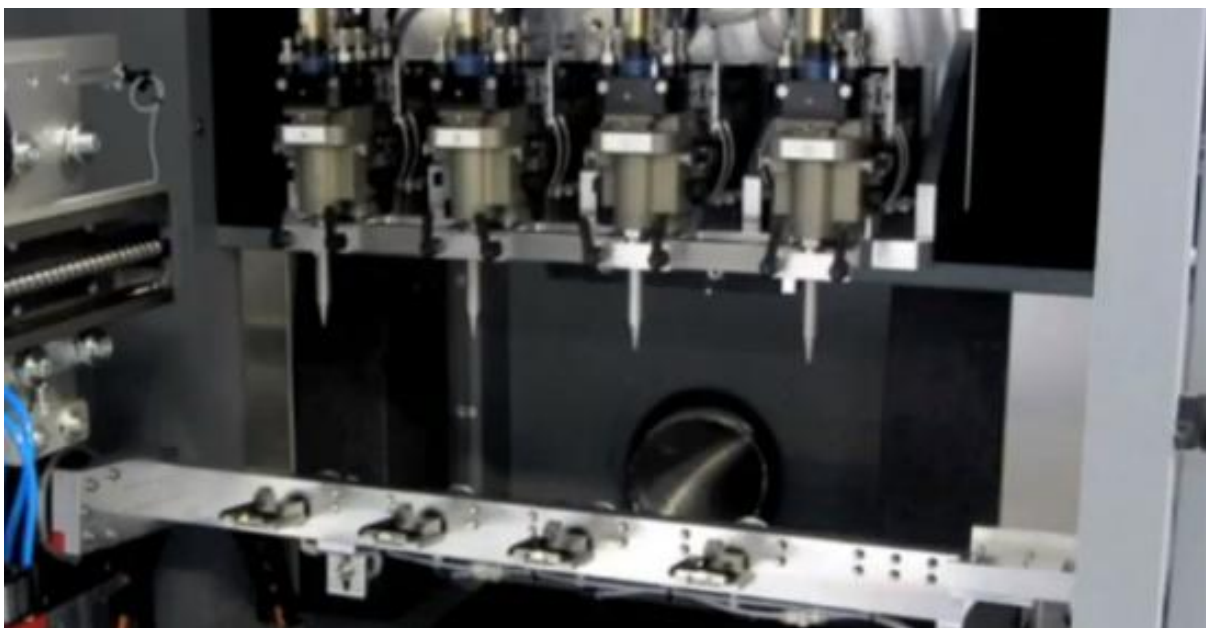


Rysunek 13 Schemat procesu druku aerosolowego, 1 Atomizacja 2 Przesyłanie mgły aerosolowej 3 Koncentracja w głowicy i nadruk

Materiałami stosowanymi w druku aerosolowym są tusze zawierające rozpuszczalnik, fazę funkcjonalną i dodatki. Jako rozpuszczalniki w tuszach stosuje się alkohole lub wodę dejonizowaną. Pożądaną lepkość, gęstość i czas parowania otrzymuje się mieszając ze sobą różne rozpuszczalniki. Parametry rozpuszczalnika determinują późniejsze właściwości tuszu. Fazę funkcjonalną stanowią cząstki, których największy wymiar w przestrzeni jest nie

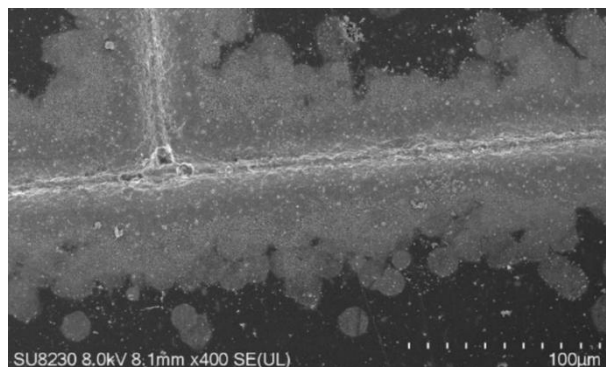
wiekszy niż 1 μm (do atomizacji ultradźwiękowej do 200 nm), lub substancje które całkowicie rozpuszczają się w użytym rozpuszczalniku. Materiałami stosowanymi jako faza funkcjonalna do tuszy przewodzących, charakteryzującymi się najwyższą przewodnością elektryczną są srebro, złoto i miedź. Stosowane są również węglowe mikro i nanomateriały, takie jak grafen czy nanorurki węglowe, ze względu na ich właściwości takie jak rozciągliwość, czy przezierność. Dodatki, jak sama nazwa wskazuje, stosowane są do ulepszenia właściwości tuszu, np. dodatek etylocelulozy do tuszu grafenowego zapobiega aglomeracji nanopłatków grafenowych.

Podstawową zaletą, druku aerozolowego jest jego uniwersalność. Dzięki możliwości zastosowania szerokiej gamy materiałów, wymiennym dyszom o różnych średnicach i możliwości integracji z mechanizmami pozycjonującymi podłoże o różnej kinematyce, pozwala on łączyć za pomocą jednej techniki i stanowiska połączenia o różnych szerokościach, rezystancjach i pozwala na tworzenie wielowarstwowych elementów czynnych (Rysunek 14). Większość technik elektroniki drukowanej wymaga dokładnego ustawienia odległości między ostatnim elementem systemu drukującego a podłożem podczas nakładania materiału na podłoża niepłaskie – teksturowane, schodkowe, zakrzywione – w celu zachowania wysokiej jednorodności druku [169]. Technika ta jest wolna od tego ograniczenia ze względu na użycie skoncentrowanego strumienia aerozolu do drukowania wzorów, których parametry pozostają stabilne w odległości 10 mm w kierunku podłoża od końca dyszy drukującej [275], [281]–[284]. Technika druku aerozolowego jest obecnie szeroko badana –w zakresie optymalizacji procesów [285]–[294], charakterystyki nowych tuszy i materiałów podłożowych [295]–[298] i usprawniania procesu [299]–[302]. Ponieważ druk aerozolowy to technika bezmaskowa i bezkontaktowa, często jest uważana za potencjalnego konkurenta dla druku strumieniowego [278], [303], [304]. Ma lepszą rozdzielczość, pozwala uniknąć efektu „pierścienia kawy” (zagłębienia w środku kropeł wykonanych drukiem strumieniowym) i może wykorzystywać szerszy zakres materiałów i szybkości nanoszenia, ale system AJP jest kosztowny i wymaga większych nakładów czasowych na obsługę niż drukarka strumieniowa.



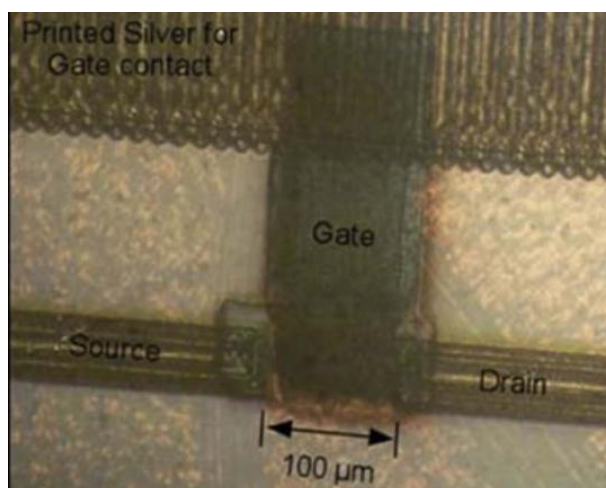
Rysunek 14 Przykład wielodyszowego systemu do druku aerozolowego firmy Optomec w zastosowaniu do wielkoskalowego nanoszenia anten na obudowy telefonów [305].

Mimo, iż koncepcje nanoszenia materiału na podłoże za pomocą aerozolu mają długą tradycję, to ta konkretna technika, produkowana przez amerykańskie firmy Optomec, Inc. i od niedawna Integrated Deposition Solutions (IDS), Inc. oraz chińska firmę WE Electronics, została opracowana dopiero w późnych latach 90, a wprowadzona do sprzedaży dopiero w kolejnym dziesięcioleciu. Jest ona w związku z tym dopiero poznawana i powoli przezwyciężane są niektóre jej ograniczenia. Głównym z tych ograniczeń jest tzw. *Overspray* (Rysunek 15). Podczas druku nie wszystkie krople koncentrują się w centralnym punkcie strugi na podłożu – niektóre pojedyncze osadzają się dookoła ścieżki, zmniejszając rzeczywistą rozdzielczość tej techniki, gdyż po pierwsze odpowiednio gęsto usadowione mogą przewodzić, po długie przy pomocy standardowych wizualnych metod inspekcji trudno jest znaleźć granicę między ścieżką a *Overspray'em*. W trakcie ostatnich 10 lat powstało wiele koncepcji na temat przyczyn jego powstawania, a najnowsza z nich, oprócz oczywistego powodu dobrania zbyt wysokich przepływów gazu w strudze, jako przyczynę podaje zbyt niską wielkość kropeł, które nie są skupiane w strumieniu przez siły Saffmana (siły nośne inercyjnych cząstek gazu w strudze, powodująca ich kolimację w kierunku jej środka) i są rozwiewane przy podłożu. By to zmienić trzeba byłoby mieć możliwość dokładnego kontrolowania spektrum wielkości wytwarzanych kropeł, by nie były ani za duże, ani za małe. O ile zbyt duże krople opadają grawitacyjnie, o tyle najmniejsze ciężko jest usunąć z powstałego aerozolu.



Rysunek 15 Mikrografia SEM przedstawiająca Overspray, czyli rozdmuchane cząstki tuszu poza właściwą nadrukowaną linią [269].

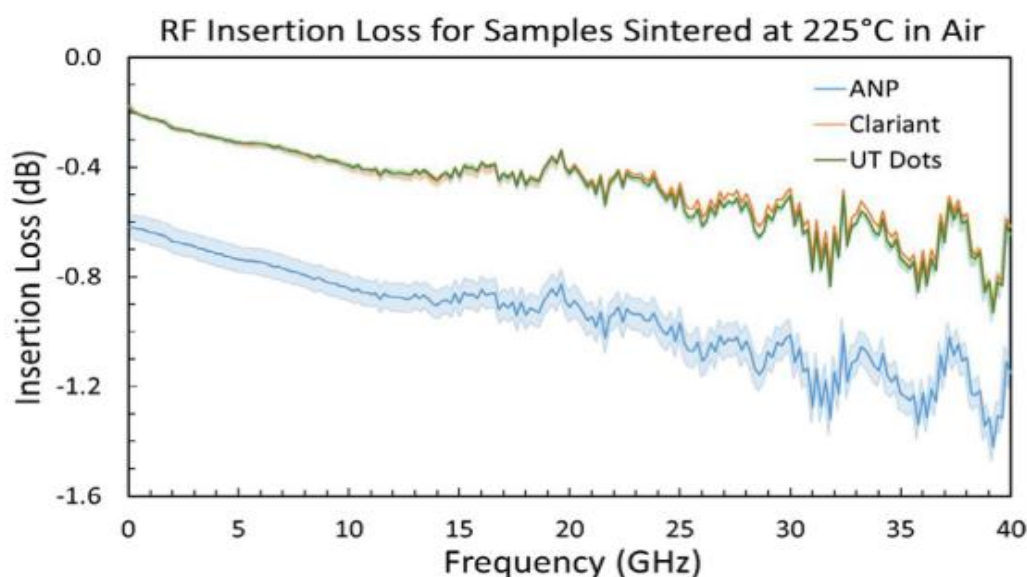
Kolejnym problemem jest stabilność wytwarzania i dostarczania aerozolu. W atomizerze ultradźwiękowym konieczna jest ręczna kalibracja w celu wyzwolenia najlepszej w danych warunkach mgły. Może to być minimalizowane przez stabilizację temperatury otoczenia czy automatyczne ustalanie wysokości lustra wody przenoszącej ultradźwięki, jednak każdorazowo konieczna jest wizualna ocena jakości. Ze względu na to, że w trakcie druku zużywany jest materiał i częściowo się nagrzewa pracując, w trakcie druku należy ponawiać ręczną kalibrację by uzyskiwać najlepszą rozdzielczość druku, gdyż zmienia się gęstość aerozolu i wielkość kropeł, a także szybciej wysychają one przed naniesieniem na podłoże.



Rysunek 16 Tranzystor wykonany drukiem aerozolowym z oznaczonymi źródłem (ang. Source) drenem (ang. Drain) bramką (ang. Gate) i srebrnym drukowanym polem kontaktowym do bramki (ang. Printed Silver for Gate Contact) [306].

Zastosowanie druku aerozolowego jest udokumentowane w produkcji różnych czujników [307]–[311], komponentów elektronicznych (Rysunek 16) [306], [312]–[316], mikro-połączeń w układach elektronicznych [284], [317], [318] i układach

wysokoczęstotliwościowych [319]. Ostatnie badania badające rezystywność i stratność linii transmisyjnych drukowanych tą techniką w częstotliwościach radiowych sugerują, że AJP do 20 GHz nadaje się do produkcji anten i może z powodzeniem drukować linie transmisyjne o przewodności i stratach porównywalnych do parametrów czystego jednorodnego srebra (Rysunek 17) [319]–[323]. Zbadano również, że zginanie linii nie wpływa na ich właściwości transmisyjne [324]. Duża innowacyjność tej techniki, pojawienie się nowych firm na rynku oraz przykłady elementów obwodów wysokiej częstotliwości wyprodukowanych za pomocą AJP przedstawiają tę technikę jako wysoce perspektywiczną dla RF EH i WPT.



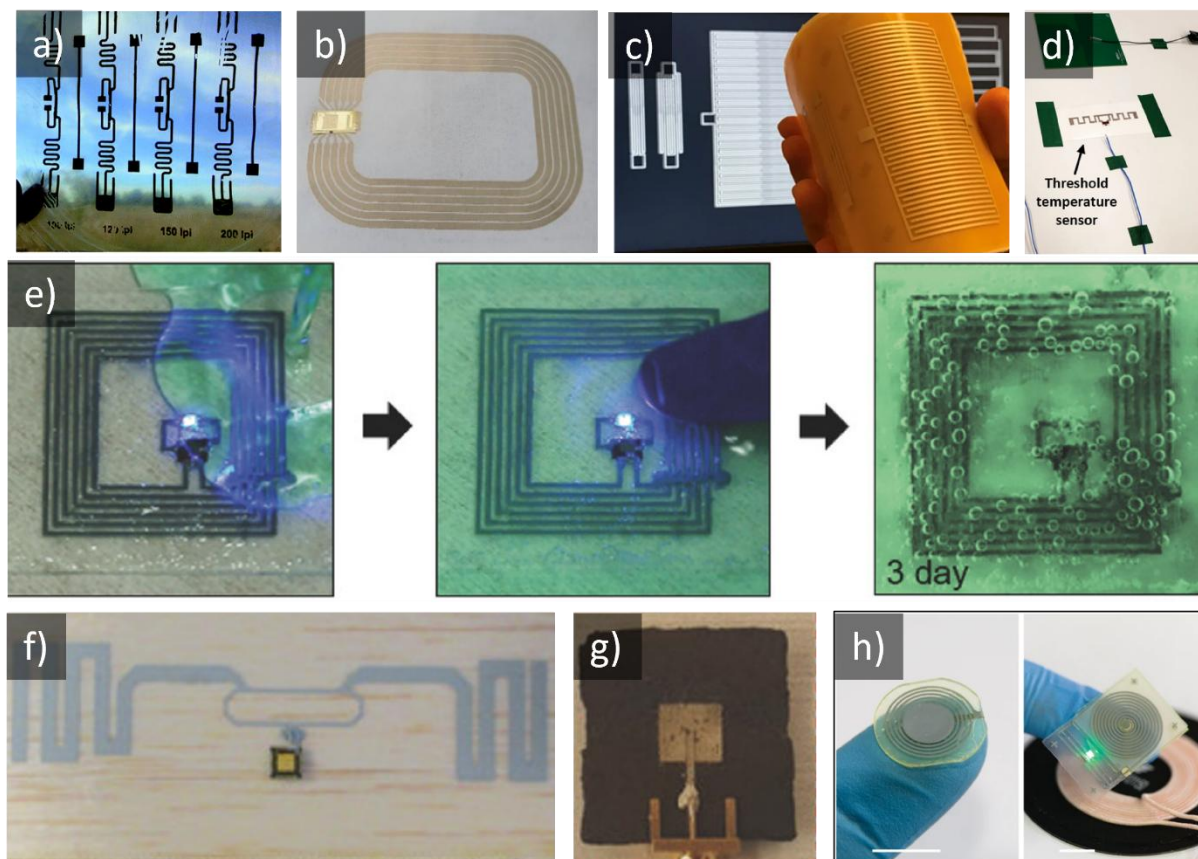
Rysunek 17 Straty odbiciowe (ang. Insertion Loss) linii transmisyjnych wykonanych drukiem aerozolowym w zakresie częstotliwości (ang. Frequency) do 40 GHz [321].

2.3.2. Elektronika przyjazna dla środowiska

Jednym z powodów stosowania systemów pozyskiwania energii z fal radiowych i bezprzewodowego transferu mocy jest zmniejszenie zapotrzebowania na baterie, a co za tym idzie, zmniejszenie niekorzystnego wpływu ich produkcji i utylizacji na środowisko [325]. Aby jeszcze poprawić ten ekologiczny aspekt, materiały używane do produkcji systemów pozyskujących energię i bezprzewodowo transferujących moc muszą być przyjazne dla środowiska, aby osiągnąć prawie zerowy ślad środowiskowy. Można to zrobić przy użyciu biodegradowalnych podłoży i funkcjonalnych materiałów o niskim wpływie na środowisko.

Podłoża są dominującym składnikiem objętości odpadów PCB i zwykle nie nadają się do recyklingu. Aby rozwiązać ten problem, naukowcy szeroko badają zastosowanie podłoży biodegradowalnych. Drukowane elementy obwodów anten prostowniczych są drukowane grawiurą na papierze wykonanym z nanowłókien celulozowych (rysunek 18a) [326], nanoszone sitodrukiem na membranę nano-celulozową [327], karton wielokrotnego użytku

(rysunek 18b) [328], na medyczny biodegradowalny hydro-koloid (Rysunek 18c) [329] i papier (Rysunek 18d) [330], nanoszone drukiem strumieniowym na karton [92], bezpośrednim drukiem tuszu na papier [331], drukowane aerozolowo na biodegradowalnym polimerze PCL [332], a także drukowane hybrydowo – druk strumieniowy + sitodruk – na biodegradowalnym polimerze PHBV [25].



Rysunek 18 Elektronika przyjazna dla środowiska (a) Cztery drukowane anteny RFID na przezroczystym nanopapierze [326] (b) Sitodrukowana antena na podłożu na bazie włókien [328] (c) Struktura hydrokoloidalna dla inteligentnego bandaża [329] (d) Konfiguracja pomiaru dla czujnika progu temperatury na bazie anteny sitodrukowanej na papierze [330] (e) Kompatybilność wodna cynkowego sitodrukowanego urządzenia NFC i degradacja przy enkapsulacji PLGA [334] (f) Antena drukowana hybrydowo – sitodrukiem i drukiem strumieniowym – na biodegradowalnym polimerze PHBV [25] (g) Nadrukowana drukiem strumieniowym antena z cząstek tlenku żelaza [336] (h) (po lewej) Bioresorbowalny czujnik ciśnienia bez układu scalonego o częstotliwości radiowej (po prawej), zasilany bezprzewodowo obwód LED oparty na cynkowej cewce wtórnej na degradowalnym podłożu [337].

Większość powierzchni podłoży prostych urządzeń IoT jest pokryta połączeniami elektrycznymi i antenami. Aby zminimalizować niekorzystny wpływ tych urządzeń na środowisko, materiały używane do ich wytwarzania muszą łatwo ulegać biodegradacji lub recyklingowi. Jednym ze sposobów jest użycie metali których tlenki rozpuszczalne są w wodzie (Rysunek 18e) [333], [334]. Przykłady takich aplikacji obejmują drukowaną sitodrukiem i drukiem strumieniowym antenę cynkową, (Rysunek 18f) [25], sitodrukowaną cynkową antenę cewkową [335], drukowaną strumieniową antenę z tlenków żelaza (Rysunek 18g) [336] i sitodrukowany cynkowy układ RLC (Rysunek 18h) [337]. Naukowcy badają

również możliwości zastosowania obróbek wykańczających, które mają na celu poprawę przewodności tych materiałów [334] i wydłużenie czasu biodegradacji w wilgotnym środowisku [338].

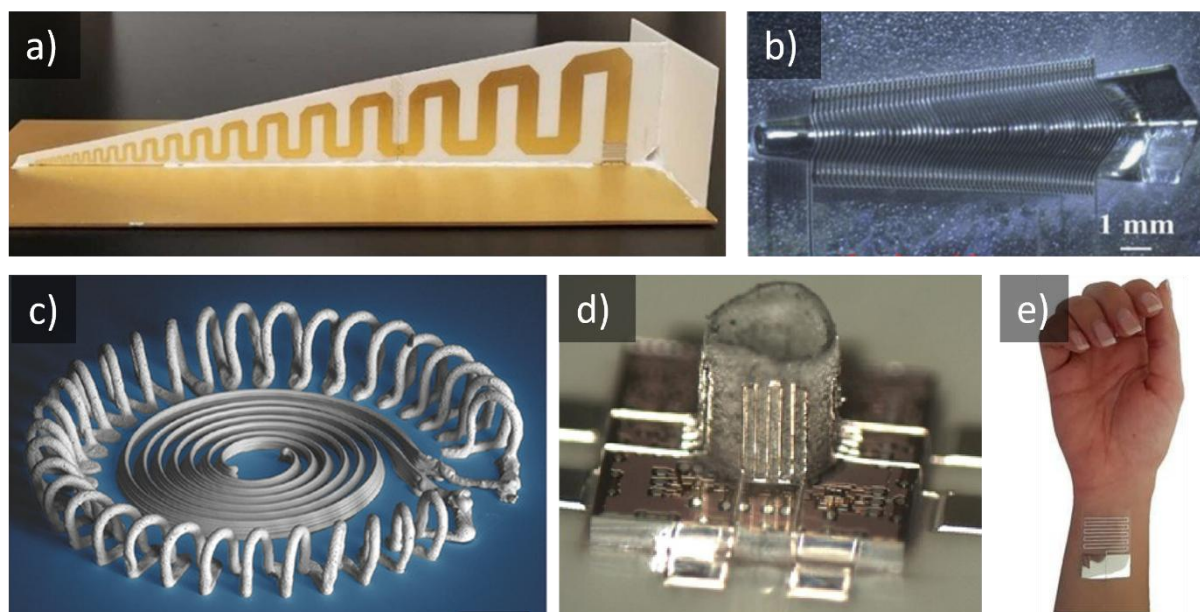
2.3.3. 3D drukowana elektronika strukturalna

Obecny rozwój elektroniki skupiał się nie tylko na opracowywaniu wysokowydajnych obwodów, ale także na wymyślaniu nowych sposobów ich wykonywania [339]. Jednym z tych nowych sposobów wykonywania elektroniki jest elektronika strukturalna, która zawiera komponenty i obwody osadzone w obudowach lub ramkach [340]. Takie podejście może zmniejszyć rozmiar urządzenia [341], jego masę i koszt [342]. Komponenty elektroniczne projektowane do pracy w częstotliwościach radiowych w całkowicie trójwymiarowym podejściu konstrukcyjnym otwierają nową perspektywę na kompaktowe, efektywne i funkcjonalne projektowanie elektroniki. Elektronika strukturalna może przewyższać swoje płaskie odpowiedniki, wykorzystując dodatkowy stopień swobody [343]. Elektronika strukturalna może być oparta na druku 3D, co pozwala na łatwą w modyfikacji i dostosowaną do potrzeb klienta produkcję. Przy pomocy Druku 3D, takiego jak FDM, możliwe jest wytwarzanie połączeń elektrycznych na bazie proszków metali o niskiej rezystywności ($0,156 \times 10^{-5} \Omega m$) [344] oraz w pełni drukowanych kondensatorów i cewek indukcyjnych [345]. Fallowody drukowane przez FDM, poddane chemicznej obróbce końcowej, charakteryzują się stratami transmisji porównywalnymi z metodami drukowania charakteryzującymi się wyższą przewodnością, np. AJP [323], [346]. Jednak niska rozdzielczość i grube warstwy w technikach druku 3D ograniczają ich wytwarzanie aktywnych komponentów i anten wysokiej częstotliwości. Techniki druku 3D można zintegrować z elektroniką drukowaną, aby przezwyciężyć to ograniczenie.

W literaturze opisano różne próby wytwarzania drukowanej elektroniki na strukturach 3D [168]. Bezpośrednie drukowanie wzorów na niepłaskich podłożach drukowanych w 3D jest możliwe przy użyciu druku aerozolowego, zwłaszcza jeśli drukarka jest wyposażona w pięcioosiowy stół lub ramię robota [347]. Konieczne jest jednak wygładzenie powierzchni szorstkich podłoży (np. drukowanych przez FDM), aby osadzać wzory AJP. Złota antena (Rysunek 19a) [348] i cewki indukcyjne z rdzeniem stałym (rysunek 19b) [349] zostały wydrukowane aerozolowo na podłożu ceramicznym wydrukowanym w technologii DLP do zastosowań w wysokich temperaturach. W innych technikach proces drukowania musi być wykonywany na płaskim lub cylindrycznym podłożu, aby uzyskać jednolite wydruki, ale te geometrie można zintegrować jako część złożonej struktury 3D. Podłoża wykonane przy

pomocy stereolitografii mogą być używane do osadzania na nich anten drukowanych strumieniowo bez dodatkowej obróbki wykańczającej [350]. Technika sitodruku, odpowiednią do druku na szorstkich powierzchniach, może drukować srebrową pastę bezpośrednio na bokach kostki wydrukowanej techniką FDM [192].

Techniki elektroniki drukowanej nie zostały opracowane z myślą o elektronice strukturalnej 3D, ale badanie ich zdolności do wytwarzania struktur 3D zostało opisane w kilku badaniach i wdrożone w nowatorskich komercyjnych systemach druku. Możliwe jest tworzenie pasywnych komponentów 3D pracujących z częstotliwością do 45 GHz przy użyciu materiału przewodzącego na bazie polimerów i techniki DIW (Rysunek 19c) [237]. Za pomocą systemu AJP możliwe jest drukowanie filarów dielektrycznych oraz na ich powierzchni pionowych metalowych linii (Rysunek 19d) [351]. Wielomateriałowy druk strumieniowy elektroniki strukturalnej jest również dostępny przy użyciu komercyjnych systemów dostosowanych do takiego zastosowania druku strumieniowego, takich jak DragonFly (Nano dimension, USA). Przy ich pomocy dokonano produkcji anten wielowarstwowych [352] i biokompatybilnych anten meandrowych działających w częstotliwości około 800 MHz (Rysunek 19e) [353].



Rysunek 19 Rysunek 7 Drukowana w 3D elektronika strukturalna (a) Zmontowana Antena 3D do pracy w środowiskach o ekstremalnie wysokich temperaturach [348] (b) Drukowana w 3D cewka elektromagnetyczna z rdzeniem polimerowym [349] (c) Rezonator 3D LC składający się z 32-zwojowej cewki toroidalnej i kondensatora z równoległą płytką [237] (d) Pionowe metalowe linie na ścianie filaru dielektrycznego [351] (e) Elastyczna antena na podłożu PEN na ludzkim ramieniu [353].

2.4. Aplikacje elektroniki drukowanej w systemach pozyskiwania energii i bezprzewodowego transferu mocy

Rosnące zainteresowanie przemysłu w zakresie realizacji bezprzewodowego transferu mocy i pozyskiwania energii jest stymulowane przez rozwój standardów, globalny kryzys energetyczny i zainteresowanie naukowe tym obszarem. Połączenie bezbaterijnego zasilania urządzeń w szerokim spektrum zastosowań z energią fal radiowych dostarczoną do nich w użytecznej formie za pomocą lekkich, efektywnych kosztowo i przyjaznych dla środowiska anten prostowniczych wyprodukowanych przy użyciu technik elektroniki drukowanej może rozszerzyć zakres aplikacji urządzeń IoT. Prace przeglądowe omawiające różne aspekty z zakresu systemów pozyskiwania energii i bezprzewodowego transferu mocy, przedstawionych w Tabeli 1.

Tabela 1 Prace przeglądowe w zakresie których są zawarte elementy systemów pozyskiwania energii i bezprzewodowego transferu mocy, w tym wykonane technikami elektroniki drukowanej

Tytuł artykułu przeglądowego	Zakres poruszanej tematyki	Rok
A survey on RF energy harvesting: Circuits and protocols [354]	Ten przegląd koncentruje się na energooszczędnych protokołach dla urządzeń zasilanych przez pozyskiwanie energii., wspominając o metodach projektowania obwodów pozyskiwania energii z fal radiowych.	2014
Wireless networks with rf energy harvesting: A contemporary survey [120]	Dokładnie badając sprawność konwersji mocy wielu rodzajów prostowników w różnych pasmach częstotliwości, przegląd ten koncentruje się na architekturze sieci i strategiach transmisji dla pozyskiwania energii fal radiowych	2015
On feasibility of 5G-grade dedicated RF charging technology for wireless-powered wearables [26]	W niniejszym przeglądzie omówiono źródła technologii ładowania poprzez fale radiowe, wydajność i przyszłe wyzwania związane z elektroniką osobistą zasilaną bezprzewodowo.	2016
RF Energy Harvesting for Embedded Systems: A Survey of Tradeoffs and Methodology [72]	Niniejszy przegląd koncentruje się na projektach obwodów RFID i kompromisach do podjęcia podczas wyboru pomiędzy nimi.	2016

Flexible diodes for radio frequency (RF) electronics: A materials perspective [126]	Niniejszy przegląd podsumowuje niedawny postęp i status elastycznych diod i obwodów prostowniczych pracujących w częstotliwości radiowej, w tym wytwarzanych przy użyciu technik elektroniki drukowanej, ale z naciskiem na użyte materiały.	2017
Wearable Energy Harvesting: From body to battery [5]	Praca przeglądowa koncentruje się na metodach pozyskiwania energii w celu zasilania elektroniki osobistej. Zwracana jest uwaga, że w elektronice osobistej pozyskiwanie energii z fal radiowych nie nadaje się do samodzielnego zasilania urządzeń.	2017
RF power harvesting: a review on designing methodologies and applications [59]	Niniejszy przegląd zawiera informacje na temat najnowocześniejszych komponentów i metodologii projektowania wysoce wydajnych obwodów bezprzewodowego transferu mocy.	2017
Printed Motes for IoT Wireless Networks: State of the Art, Challenges, Outlooks [10]	W tej recenzji omówiono drukowane elementy składowe sieci bezprzewodowych IoT (nazywane tu „Motes”) i przedstawiono przykład drukowanego urządzenia pracującego w częstotliwościach radiowych.	2017
Printable Materials for the Realization of High Performance RF Components: Challenges and Opportunities [343]	Niniejszy przegląd koncentruje się na materiałach do produkcji addytywnej i technikach druku bezpośredniego do realizacji komponentów do pracy w częstotliwościach radiowych wraz z przykładami zastosowań.	2018
A New Frontier of Printed Electronics: Flexible Hybrid Electronics [27]	Niniejszy przegląd koncentruje się na elektronice drukowanej wykorzystywanej do produkcji elastycznej elektroniki hybrydowej, łączącej elektronikę drukowaną i krzemowe układy scalone, a także przedstawia serię badań wykorzystujących drukowane anteny komunikacyjne i cewki do bezprzewodowego transferu mocy.	2020
Recent Advances in Printing Technologies of Nanomaterials for	Artykuł zawiera szeroki przegląd nanomateriałów i metod elektroniki drukowanej stosowanych do produkcji wyrobów wszczepialnych. Wspominana jest w niej	2021

Implantable Wireless Systems in Health Monitoring and Diagnosis [172]	informacja o czujnikach pasywnych wydrukowanych w 3D.	
State-of-the-Art Techniques in RF Energy Harvesting Circuits [70]	W artykule scharakteryzowano elementy układów anten prostowniczych, ich znaczenie i wpływ na ogólną sprawność i parametry anten.	2021
Chipless RFID Printing Technologies: A State of the Art [355]	Niniejszy przegląd koncentruje się na produkcji systemów RFID nieużywających układów scalonych przy użyciu technik elektroniki drukowanej.	2021
A Comprehensive Survey on RF Energy Harvesting: Applications and Performance Determinants [51]	W niniejszym przeglądzie omówiono różne zastosowania pozyskiwania energii z fal radiowych i ich wymagania dotyczące wydajności oraz zbadano czynniki wpływające na tę wydajność.	2022
Advances in Wirelessly Powered Backscatter Communications: From Antenna/RF Circuitry Design to Printed Flexible Electronics [158]	W niniejszym przeglądzie szeroko przedstawiono komunikację wykorzystującą rozproszenie wsteczne, systemy pozyskiwania energii i bezprzewodowego transferu mocy wykorzystywane do tego typu komunikacji oraz obecne zastosowanie druku 3D i druku strumieniowego w ich procesie produkcyjnym.	2022
Printed Electronics in Radiofrequency Energy Harvesters and Wireless Power Transfer Rectennas for IoT Applications [356]	W niniejszej pracy omówiono aplikacje wybranych technik elektroniki drukowanej w realizacji elementów układów pozyskiwania energii z fal radiowych i bezprzewodowego transferu mocy.	2023
MXenes: Multifunctional Materials for the Smart Cities of Tomorrow [357]	W tej pracy przeglądowej omówiono zastosowanie węglików, azotków i węglikoazotków metali przejściowych (MXenów) do wykonywania elementów Inteligentnego miasta, w tym systemów do pozyskiwania i przesyłania energii elektrycznej.	2025

2.4.1. Wyzwania współczesnych technik elektroniki drukowanej

Wydajność urządzeń elektronicznych w dużym stopniu zależy od przewodności elektrycznej ich warstw przewodzących. Berges i in. [132] zasymulował zachowanie prostownika dwupasmowego w funkcji przewodności osadzonej warstwy. Z zaobserwowanych wyników wynika, że niska przewodność drukowanych linii zwiększa straty odbiciowe i obniża wartość wyprostowanego napięcia, co powoduje zakłócenie pracy zasilanych systemów. Wielu badaczy wykorzystujących techniki elektroniki drukowanej dąży do uzyskania wzorów o wysokiej przewodności. Wysoce przewodzące wzory drukowane za pomocą AJP uzyskuje się poprzez modyfikację tuszów z nanocząstkami srebra poprzez dodatki wpływające na parametry reologiczne tuszu [269], dodanie kolejnej fazy przewodzącej, np. nanorurek węglowych [358] lub zastosowanie rzadko spotykanych tuszów reaktywnych osiągających najwyższą przewodność [323]. Wysoką przewodność elektroniki drukowanej uzyskano różnymi metodami, np. poprzez zdobienie grafenem nanocząstek srebra w tuszu do drukarek strumieniowych [359] lub połączenie metod obróbki wykańczającej - obróbki plazmowej, wyżarzania termicznego i wysokiego ciśnienia - na wzorach drukowanych metodą sitodruku [360].

Kolejnym wyzwaniem w druku anteny prostowniczej jest ograniczona częstotliwość pracy drukowanych diod. Dojrzała technologia organicznych drukowanych diod pozwala na wyprodukowanie diod o częstotliwości pracy ograniczonej do pasma fal krótkich [208]. Diody, które mogą pracować w paśmie fal ultrakrótkich i wyższym, mogą być wykonane z warstw krzemu [361], bądź IGZO [362], ale pierwszy z tych rodzajów nie oferuje wysokiej wydajności produkcji i opłacalności, a drugi wymaga obróbki w wysokiej temperaturze podczas drukowania [363]. Przetwarzanie krzemu w roztworze jest obecnie opracowywane w celu zwiększenia wydajności diod z niego wytwarzanych, a diody na bazie IGZO mogą być wykonywane przy użyciu podejścia hybrydowego łączącego techniki drukowania i próżniowe, np. rozpylanie próżniowe [364]. Badane są również diody oparte na nanomateriałach [365], jednak brak powtarzalności ich impedancji między próbkami wymaga dodatkowych badań skoncentrowanych na materiałach i procesach drukarskich w celu uzyskania wysoce powtarzalnego procesu [208].

Techniki drukowania w wysokiej rozdzielczości są niezbędne do produkcji mniejszych obwodów drukowanych i złożonych projektów anten o wysokiej częstotliwości [76] i są opracowywane w środowisku akademickim i instytutach komercyjnych. Chociaż sitodruk jest uważany za technikę o niskiej rozdzielczości, może drukować linie wąskie do 20 μm [366],

[367]. Precyzyjny dobór parametrów procesu druku aerozolowego zaowocował liniami o szerokości 5 μm na szkle rozgrzanym do 150 $^{\circ}\text{C}$ [368] lub 6 μm przy użyciu dodatkowych systemów kolimujących [369], a bezpośredni druk tuszem przy użyciu wąskich igieł może osiągać rozdzielczość 1-10 μm [236]. Opracowanie drukowanych warstw łączących wysoką rozdzielczość i wysoką przewodność z niską chropowatością powierzchni może zwiększyć wydajność drukowanych struktur i stymulować szersze wykorzystanie elektroniki drukowanej w produkcji systemów pozyskiwania energii z fal radiowych i bezprzewodowego transferu mocy [370].

2.4.2. Drukowane anteny używane w układach anten prostowniczych dla systemów pozyskiwania energii i bezprzewodowego transferu mocy

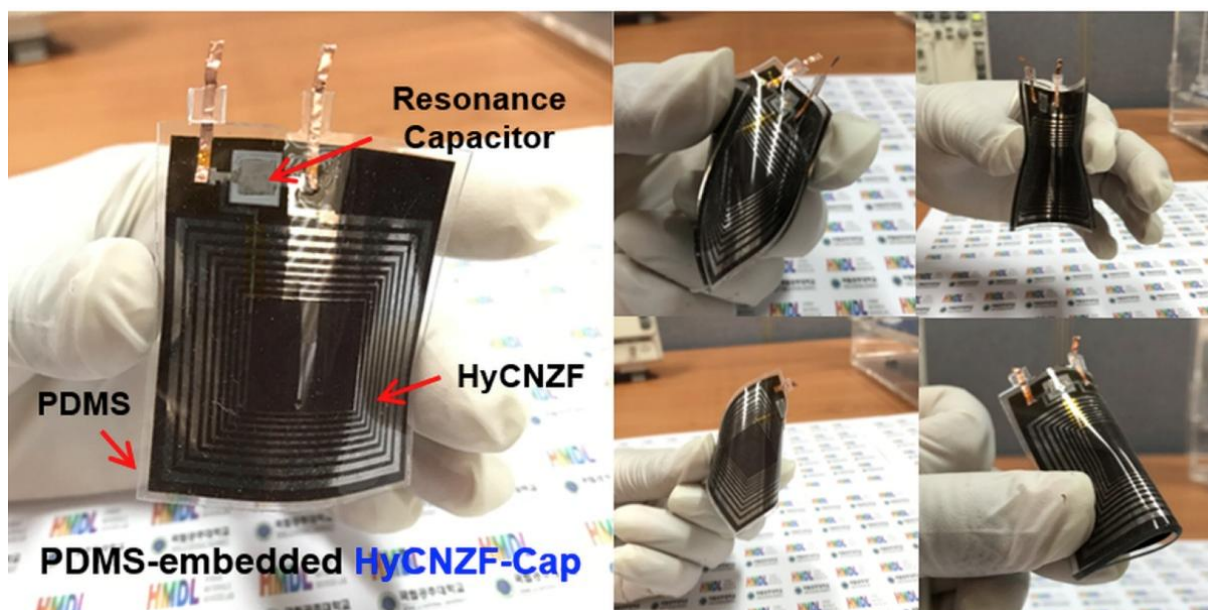
Anteny i cewki w zastosowaniach bliskiego pola

Druk aerozolowy nie jest często wykorzystywany w antenach i cewkach w zastosowaniach bliskiego pola, gdyż częściej stosowane niższe częstotliwości powodują konieczność wytwarzania struktur o znacznej powierzchni, do czego ta technika nie jest przystosowana. W niektórych zastosowaniach można jednak wytwarzać elementy z pojedynczych nadrukowanych linii a następnie zwiększyć ich wydajność za pomocą technik produkcyjnych powszechnie stosowanych w produkcji anten, np. galwanizacji. Galwanizowane miedzą nadrukowane linie z komercyjnego tuszu srebrowego były używane przez Xu i in. [371] do produkcji drukowanej aerozolowo anteny cewkowej do zastosowania w RFID 13,56 MHz. Drukowany tusz srebrowy, spiekany w temperaturze 150 $^{\circ}\text{C}$, służył jako warstwa zalążkowa do galwanizacji miedzi. Wyprodukowane anteny cewkowe miały indukcyjność 2,87-2,97 μH , co było zgodne z wymaganiami od 2 do 6 μH dla analizowanego komercyjnego systemu RFID.

Możliwość dokonywania szybkich zmian w zaprojektowanych wzorach jest korzystna dla prototypowania, skracając czas potrzebny na optymalizację. Bito i in. [372] wykorzystali druk strumieniowy by wytworzyć znaczną ilość prototypowych układów elastycznych systemów pozyskiwania energii na potrzeby noszonych sensorów w celu zoptymalizowania wydajności układu. Systemy pozyskiwały energię z dwukierunkowej radiowej linii transmisyjnej wykorzystującej pasma 464,550 MHz i 467,925 MHz. Pięć warstw tuszu na bazie nanocząstek srebra wydrukowano na folii poliimidowej i spiekano w temperaturze 150 $^{\circ}\text{C}$. Dodatkowe elementy dyskretne obwodu prostownika zostały połączone za pomocą kleju przewodzącego. Cały obwód został pokryty żywicą epoksydową, aby skompensować nierównomierny rozkład naprężeń w warunkach zgięcia/rozciągnięcia. Osiągnięto poziomy

mocy 146,9 mW i 43,2 mW. Systemy pozyskujące energię zostały dodatkowo przetestowane w warunkach praktycznego umiejscowienia - przymocowane do nadgarstka - co wykazało ich zdolność do zasilania diody LED w warunkach zgięcia/rozciągnięcia.

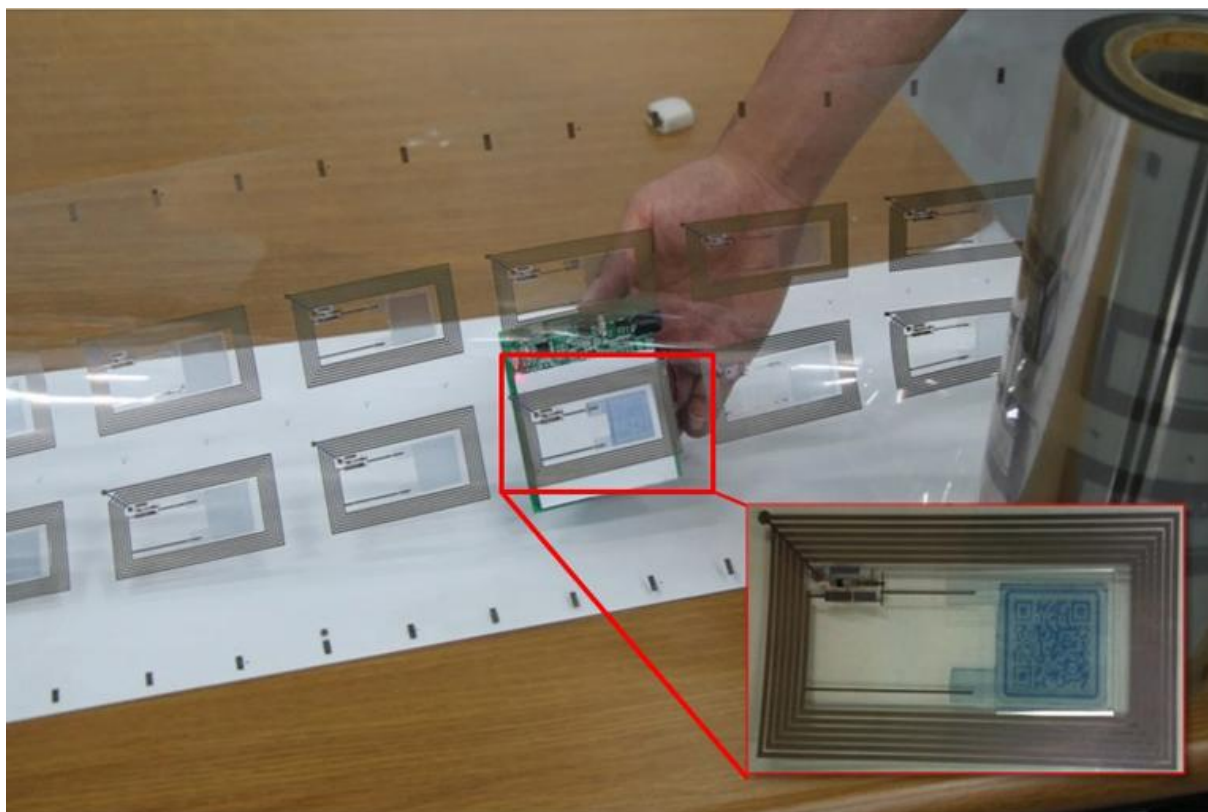
Elastyczne anteny można również dostosować do istniejących źródeł energii będących elementami systemów bezprzewodowego transferu mocy. Bissannagari i in. [373] wydrukowali strumieniowo wzór cewki do przechwytywania promieniowania z komercyjnego bezprzewodowego źródła zasilania 6,78 MHz EPC9112 (Rysunek 20). Rowkowana spiralna struktura z ferrytu NiZn (NZF) została wydrukowana drukiem strumieniowym w celu utworzenia struktury 3D. Warstwy srebra zostały nadrukowane w tej strukturze lub srebra i poliimidu zamiennie, by zwiększyć jej elastyczność, tworząc antenę cewkową o wysokim współczynniku kształtu. Kondensatory oparte na tuszu BaTiO₃ zostały osadzone w strukturze cewki. Po umieszczeniu na cewce transmisyjnej antena cewki zademonstrowała swoją funkcjonalność, zasilając smartfon i smartwatch. Dodatkowo prezentowany układ wykazuje dużą elastyczność, a po 1000 cyklach cyklicznego gięcia nie zaobserwowano zauważalnych zmian w rezystancji cewki.



Rysunek 20 Drukowana strumieniowo cewka z kondensatorem rezonansowym (ang. Resonance Capacitor) [373].

Wagih i in. [374] bezpośrednio wydrukowali tuszem srebrowym dwustronną cewkę, dostrojoną do rezonansu z częstotliwością 6,78 MHz za pomocą układu dopasowania impedancyjnego na bazie komercyjnych elementów SMD. Antenę dwustronną uzyskali poprzez połączenie dwóch jednostronnych anten warstwą kleju i połączenie ich srebrowym tuszem przez przelotkę. Wyprodukowana cewka osiąga szczytowy PCE na poziomie 50%. W

dalszych badaniach [375] wytworzyli oni sitodrukowaną antenę cewkową pracującą w częstotliwości 6,78 MHz na folii poliuretanowej (PU), która została dodatkowo przeniesiona termicznie na tkaninę. Pasta srebrowa została użyta do produkcji warstwy anteny i elektrod kondensatora MIM, w którym folia PU była użyta jako warstwa dielektryczna. Układ scalony z drukowaną anteną, kondensatorem dopasowującym impedancję i prostownikiem złożonym z komponentów dyskretnych wykazał sprawność sięgającą 60% i zdolność do zdalnego zasilania sitodrukowanej grzałki z 2 cm, osiągając do 60 °C. W pełni drukowana grawiurą w konfiguracji roll-to-roll antena prostownicza na folii z tworzywa sztucznego została przedstawiona jako rozwiązanie dla niedrogiego bezprzewodowego transferu mocy z nadajnika o częstotliwości 13,56 MHz. Park i in. [376] drukował te anteny na folii PET z szybkością 8 m/min i spiekał je w temperaturze 150 °C. Połączenia elektryczne, antena oraz dolne elektrody diod i kondensatorów zostały wydrukowane przy użyciu srebrowego tuszu. Kondensator został wyprodukowany przy użyciu tuszu na bazie BaTiO₃ dla warstwy dielektrycznej i tuszu srebrowego dla górnej elektrody. Diody wydrukowano przy użyciu tuszu na bazie ZnO dla warstwy aktywnej i tuszu aluminiowego dla górnej elektrody. Drukowane kondensatory charakteryzowały się pojemnościami $3,0 \pm 0,4 \text{ nFcm}^{-2}$. Diody charakteryzowały się napięciem załączenia 0,9 V i stosunkiem napięcia włączenia do wyłączenia $2,5 \times 10^3$. Drukowana antena prostownicza może prostować sygnał o częstotliwości 13,56 MHz do prądu stałego o napięciu 20 V przy 1,0 MΩ obciążenia w odległości 2 cm od czytnika RFID. Ów zespół badawczy przedstawił również wzór anteny prostowniczej do zasilania mierników wilgotności w inteligentnych opakowaniach (Rysunek 21) [377]. Na inteligentne opakowanie nadrukowano w pełni grawiurą antenę prostowniczą, czujnik wilgotności i ekran elektrochromatyczny używany do wyświetlania kodów QR.

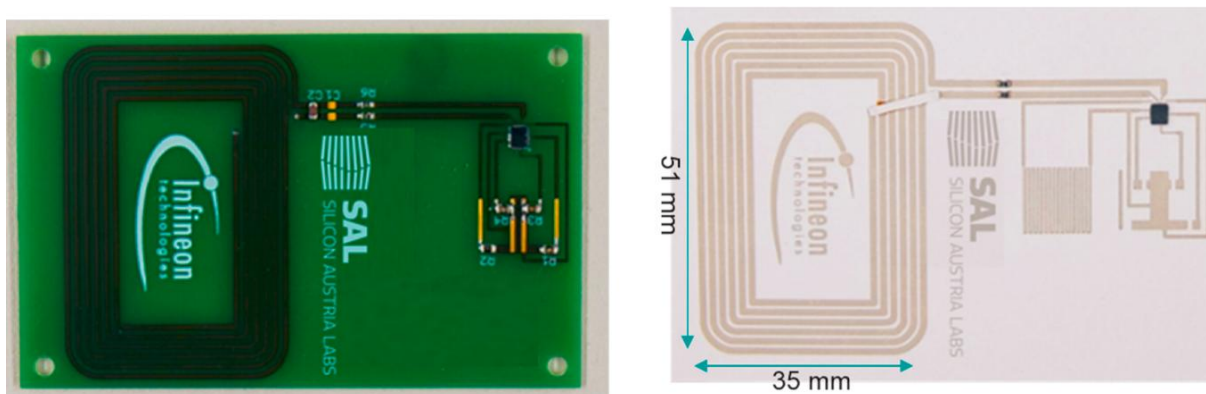


Rysunek 21 Antena prostownicza i elektrochromatyczny znacznik wykonana grawiurą w konfiguracji R2R [377].

Użycie jednej anteny zarówno do komunikacji, jak i pozyskiwania energii może zwiększyć możliwości zastosowania systemów pozyskiwania energii w urządzeniach ubieralnych. Le i in. [378] zademonstrował wykorzystanie DIW do produkcji anteny RFID zaprojektowanej do pracy w częstotliwości 13,56 MHz do komunikacji i pozyskiwania energii. Ze względu na zdolność DIW do wytwarzania struktur na elastycznych i chropowatych podłożach, anteny zostały bezpośrednio wydrukowane komercyjnym tuszem przewodzącym na płycie FR4, papierze fotograficznym i folii PET. Anteny RFID wykonane na papierze i PET przy użyciu elastycznego tuszu komercyjnego charakteryzowały się impedancją docelową $\sim 50 \Omega$ i częstotliwością środkową $\sim 13,56$ MHz.

Wysokiej jakości sitodrukowane anteny RFID i NFC mogą być drukowane przy użyciu różnych materiałów. Kordzadeh i in. [379] wydrukował antenę cewkową NFC do pracy w częstotliwości 13,56 MHz na papierze przy użyciu komercyjnej pasty srebrowej (Rysunek 22). W odległości 5 mm wydrukowana antena charakteryzuje się maksymalną wydajnością transmisji wynoszącą 78,6%. Kim i in. [380] wydrukowali anteny cewkowe RFID 13,56 MHz przy użyciu komercyjnej pasty srebrowej i reaktywnej pasty miedzianej i utwardzili je w temperaturze 300°C. Anteny drukowane miały podobne straty odbiciowe i szersze pasmo przenoszenia niż referencyjne anteny PCB. Jaakkola i in. [381] wydrukował

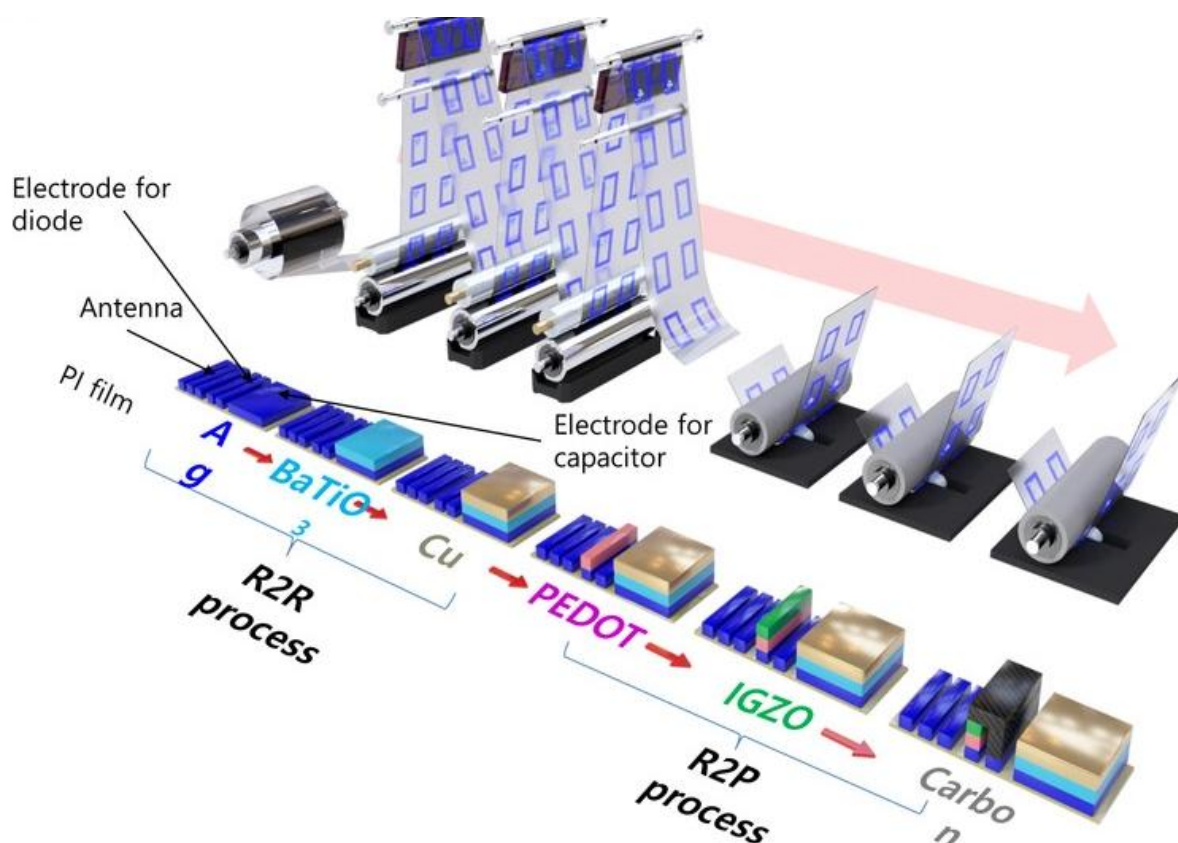
antnę transpondera RFID bliskiego zasięgu pracującego w bardzo wysokiej częstotliwości przy użyciu pasty grafenowej na podłożach PET, PI, PEN i papierowych. Najmniejsza wyprodukowana etykieta (21x18 mm) jest czytelna tylko z odległości 10 mm. Kopyt i in. [382] wydrukowali antnę RFID zaprojektowaną do pracy w bardzo wysokich częstotliwościach za pomocą pasty grafenowej na papierze. Klej przewodzący na bazie srebra został użyty aby połączyć chip RFID z antną. Odległość odczytywania sitodrukowanych anten była krótsza niż miedzianych, ale nawet najgorsze etykiety oferowały ponad 10 cm zasięgu odczytywania przy 17 dBm mocy wyjściowej czytnika RFID.



Rysunek 22 Sitodrukowana cewka NFC na podłożu papierowym [379].

W pełni wydrukowane anteny prostownicze mogą być używane w różnych zastosowaniach, np. jako inteligentne opakowania lub bioczujniki. Sun i in. [191] wydrukowali grawiurą etykietę zapobiegającą fałszerstwom, powstałą z połączenia: czterech urządzeń-kluczy, anteny prostowniczej pracującej w częstotliwości 13,56 MHz, superkondensatora, jednobitowego generatora kodu i kodu o wysokiej responsywności. Proces drukowania w konfiguracji R2R przeprowadzono w pomieszczeniu czystym (ang. cleanroom) z prędkością 6 m/min, a wydruk utwardzono w temperaturze 150 °C. Do wydrukowania anteny i dolnych elektrod użyto tuszu srebrowego, do warstw dielektrycznych użyto tuszu na bazie BaTiO₃, a do górnych elektrod, drukowanych kondensatorów i diod użyto tuszu miedzianego. Drukowane kondensatory w częstotliwościach pracy od 1 kHz do 1 MHz miały pojemność 0,55 nF. Prostownicze diody Schottky'ego na bazie IGZO zostały wydrukowane w procesie grawiury z rolki na płytę (R2P). Warstwa PEDOT:PSS i warstwy aktywne na bazie IGZO zostały wydrukowane na dolnych elektrodach. PEDOT:PSS został wydrukowany pierwszy, aby zapewnić połączenie Schottky'ego z warstwą IGZO. Wydrukowane diody charakteryzują się sprawnością prostowania 50% i napięciem załączenia 0,3 V. Ich średni współczynnik prostowania wynoszący ≈ 1000 zaobserwowano przy ± 3 V. W

tym artykule autor pokrótce zademonstrował również rezystory w zakresie wartości rezystancji 0,7 - 13M Ω , drukowane grawiurą przy użyciu specjalnie przygotowanej komercyjnej pasty węglowej. Drukowana antena prostownicza, składająca się z trójkąta napięcia z drukowaną 10-zwojową anteną, może bezprzewodowo dostarczać spolaryzowane napięcie wyjściowe międzyszczytowe około ± 10 V. Jung i in. [362] przygotowali drukowaną grawiurą antenę prostowniczą pracującą w częstotliwości 13,56 MHz jako część generatora fal trójkątnych, który jest potrzebny do wytworzenia drukowanego, bezprzewodowego i jednorazowego biosensora opartego na woltamperometrii cyklicznej (CV) do wykrywania redoks - aktywnych analitów (Rysunek 23). Warstwy srebrowe dla dolnych elektrod diod, kondensatorów i anteny zostały wydrukowane na folii poliimidowej za pomocą grawiury w konfiguracji R2R z prędkością 6 m/min przy użyciu tuszu zawierającego nanocząstki srebra. Dielektryk kondensatora i warstwa elektrody górnej zostały wykonane w tym samym procesie, przy użyciu odpowiednio tuszu na bazie BaTiO₃ i tuszu miedzanego. Warstwy PEDOT:PSS, IGZO, miedziane i górnych elektrod węglowych zostały wydrukowane za pomocą grawiury w konfiguracji R2P. Każda warstwa została wysuszona w temperaturze 150 °C. Współczynnik Q drukowanej anteny 7-zwojowej wynosił 4,02, a pojemności kondensatorów $0,4 \pm 0,03$ nF. Diody Schottky'ego na bazie IGZO charakteryzują się napięciem załączenia 0,6 V i prądem włączenia 0,8 mAcm⁻². Sprawność pojedynczego prostownika wynosiła około 50%, a sprawność trójstopniowego prostownika napięcia również wynosiła 50%. Drukowany generator fal trójkątnych może je generować z promieniowania dostarczanego przez moduł NFC z smartfona.



Rysunek 23 Schemat blokowy procesu drukowania anteny prostowniczej za pomocą połączonych procesów grawiury w konfiguracjach R2R (w pierwszym kroku nanosząc srebrną najniższą warstwę zawierającą antenę (ang. Antenna) i Elektrode spodnią diody (ang. Electrode for diode) i R2P (w ostatnim kroku nanosząc warstwę węglową (ang. Carbon) [362].

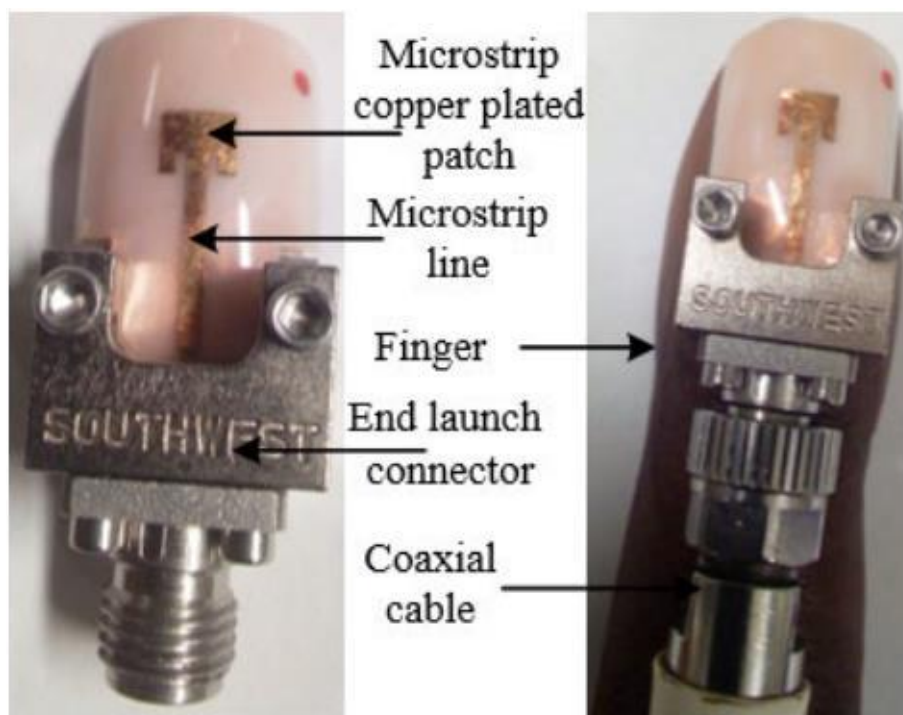
Anteny w zastosowaniach dalekiego pola

Druk aerozolowy jest częściej stosowany do wykonywania anten w zastosowaniach dalekiego pola z powodu ograniczonej wielkości anten (spowodowanej stosowaniem wyższych częstotliwości) przy jednorodności krawędzi i wysokiej przewodności wytwarzanych aerozolowo mikrowzorów. Khan i in. [383] wydrukowali aerozolowo anteny mikropaskowe o częstotliwości środkowej 2,45GHz wykorzystując atomizowany pneumatycznie tusz poliuretanowy na bazie płatków srebra. Wykonane anteny osiągnęły w tej częstotliwości S11 poniżej -30 dB. Docelowe zastosowanie anten zostało zasymulowane w formie macierzy składającej się z czterech anten, która w połączeniu z wykonanym przez nich prostownikiem miałyby w przyszłości umożliwiać pozyskiwanie energii odpadowej.

Ze względu na ograniczone występowanie w literaturze anten wykonanych techniką druku aerozolowego, warto wskazać również anteny wykonane tą techniką które nie były przygotowane z myślą o aplikacji w systemach EH lub WPT, a potencjalnie mogą być w nich zastosowane. Ultraszerokopasmowa antena fraktalno-mikropaskowa do zastosowań w elektronice osobistej wykorzystująca trójkąt Sierpińskiego została wydrukowana aerozolowo

na folii poliimidowej przez Paveca i in. [384] przy użyciu komercyjnego tuszu srebrowego i atomizacji ultradźwiękowej. Pomiar współczynnika odbicia S_{11} wskazał dwa pasma częstotliwości w których jego wartość była niższa niż -10 dB – pierwsze dla częstotliwości od 730 MHz do 966 MHz, a drugie od 1454 MHz do 1500 MHz. He i in. [385] wydrukowali aerozolowo antenę quasi-Yagi-Uda zaprojektowaną do pracy w częstotliwości 24GHz na strukturze wykonanej techniką polyjet, metalizowanej miedzią od spodu poprzez fizyczne osadzanie z fazy gazowej. Drukowana aerozolowo antena, linie transmisyjne i symetryzator zostały wykonane przy pomocy atomizowanego ultradźwiękowo srebrowego tuszu. Po wydrukowaniu wzór został wysuszony w temperaturze 65°C i utwardzony plazmowo. Powstała w ten sposób antena ma częstotliwość środkową 25,8 GHz i maksymalny zysk energetyczny 3,32dBi. Chietera i in. [386] wydrukowali aerozolowo antenę do pasywnej etykiety RFID zaprojektowanej do pracy w ultra wysokiej częstotliwości atomizując tusz ultradźwiękowo. Srebrny tusz został nadrukowany na podłożu ABS i utwardzony w temperaturze 110°C. Podłoże z ABS zostały wydrukowane na drukarce FDM i wygładzone poprzez naniesienie żywicznego wypełniacza. Wyprodukowaną etykietę RFID można zidentyfikować z odległości 7 m. Do wykonania etykiety na ciele wykorzystano również podłoże ABS. Njogu i in. [164] wydrukowali aerozolowo anteny mikropaskowe typu „patch” pracujące w częstotliwościach 15 i 28GHz na sztucznym paznokciu wykonanym z ABS-u, używając atomizowanego ultradźwiękowo srebrowego tuszu (Rysunek 24). Ze względu na niską przewodność uzyskanych wydruków anteny zostały pokryte galwanicznie miedzią, aby osiągnąć wysoką wydajność elektryczną. Zysk energetyczny anteny 15 GHz wynosił 6,4 dBi przy 70% efektywności promieniowania, a anteny 28 GHz 7,4 dBi przy 80% efektywności promieniowania. Arsenov i in. [387] wykonali linie transmisyjne i 10,5 GHz antenę szczelinową na folii Kapton wykorzystując tusz srebrowy atomizowany pneumatycznie. Linia transmisyjna miała wyjątkowo niską wartość S_{12} w częstotliwości 10,5 GHz – działała raczej jako filtr – niemniej sama antena w tej częstotliwości osiągnęła wartość S_{11} poniżej -20 dB, pomimo przesunięcia częstotliwości środkowej do ok. 10,25 GHz. Joseph i in. [388] wykonali zasilaną liniowo macierz anten pracującą w częstotliwości 47GHz na Kaptonie używając srebrowego tuszu. W niniejszej pracy dokonane jest bardzo ciekawe porównanie – antenę wykonaną w technologii PCB z miedzi na laminacie do układów mikrofalowych porównano z ową anteną drukowaną aerozolowo anteną naklejoną na takie samo podłoże. Wyniki w założonej częstotliwości wyszły bardzo podobnie – ta sama częstotliwość środkowa i spadek S_{11} o mniej niż 10% - niemniej minimum S_{11} dla anteny miedzianej było w innej częstotliwości, w której S_{11} dla anteny aerozolowej było już dużo wyższe. Można z tego

wyciągnąć wnioski, że pomimo iż taki sposób prototypowania może dawać dobre rezultaty i jest ciekawym sposobem weryfikacji zaprojektowanego wzoru, to jednak dokładne parametry anteny w zależności od częstotliwości mogą się znacząco różnić. Podobne porównanie próbowali zrobić Saad i in. [389], niemniej w ich badaniach symulowane i uzyskane wyniki S_{11} równolegle zasilanej macierzy anten 30 GHz na podłożu Rogers 3003 znacząco odbiegają od siebie. Uzyskane przez nich wyniki wskazują na niższą niż symulowana wartość S_{11} wytworzonej anteny na Kaptonie, ok. -15dB, a także niższą częstotliwość środkową od zasymulowanej, co wskazuje na potencjalną możliwość oszczędności materiału poprzez zmniejszenie anteny. Cheng i Nicholson [390] uzyskali antenę typu „PICA” (ang. planar inverted cone antenna) nadrukowując aerozolowo srebrowy tusz na podłożu poliwęglanowe. Zmierzone S_{11} anteny wyniosło ok. -50 dB w ok. 5GHz, a całość charakterystyki odpowiadała symulacji z wyjątkiem drobnego przesunięcia w kierunku niższych częstotliwości. W tym badaniu konieczne było nadrukowanie co najmniej ośmiu warstw drukiem aerozolowym korzystając z tuszu Ag40Te (UT Dots, USA) by wyniki symulacji odpowiadały uzyskanym wynikom pomiarów. Li i in. [391] wydrukowali aerozolowo przezierną antenę typu PIFA o częstotliwości środkowej 2,45 GHz używając do tego tuszu na bazie PEDOT:PSS z srebrnymi nanodrutami na polioksymetylenie. Wydrukowana antena wykazała częstotliwość środkową zgodną z symulacją, S_{11} ok. -20 dB w 2,4GHz, szerokie pasmo przenoszenia i zrealizowany zysk energetyczny -3,6 dBi przy ok. 80% przezierności próbki.



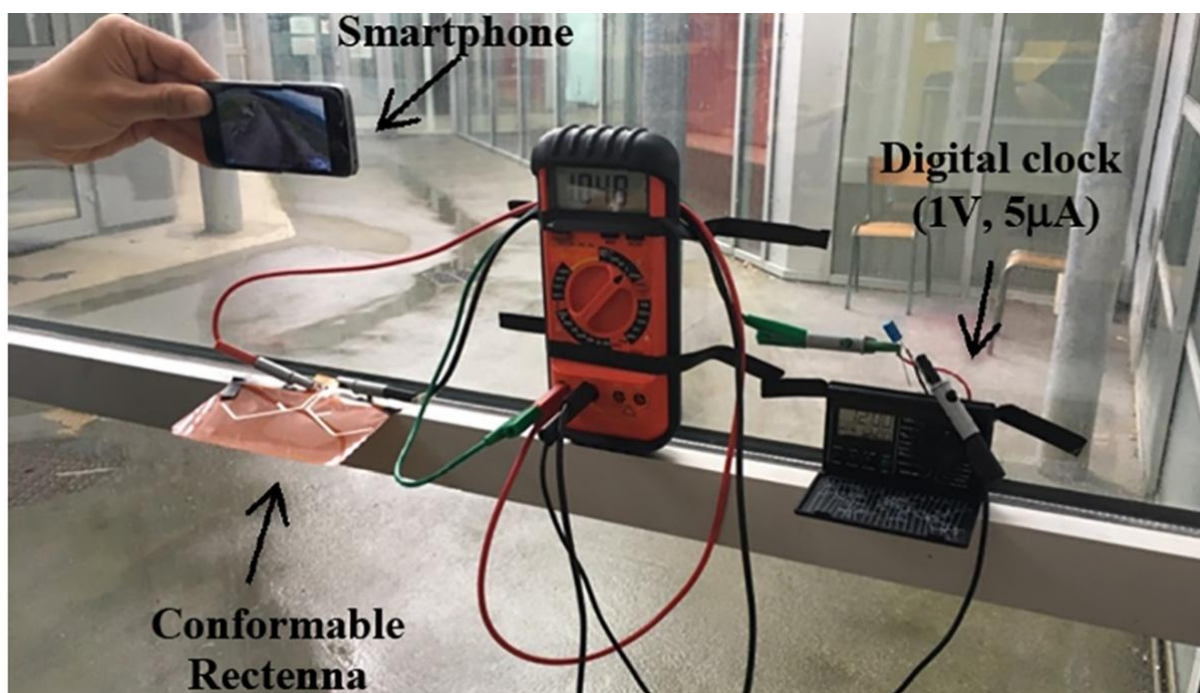
Rysunek 24 Wykonana AJP i pokryta elektrochemicznie miedzią antena mikropaskowa typu „patch” (ang. Microstrip copper plated patch) i linia transmisyjna (ang. Microstrip line) na sztucznym paznokciu umieszczonym na palcu (ang. Finger) podłączona złączem skręcanym (End launch connector) do kabla koncentrycznego (Coaxial cable) [164].

Anteny siatkowe o wzorach dostosowanych do bezpośredniego druku tuszem były wykorzystywane jako elementy anten prostowniczych w celu ograniczenia zużycia materiału i osiągnięcia wysokiej przezierności. Wagih i in. Wyprodukowali siatkową antenę prostowniczą zaprojektowaną do pracy w częstotliwości 900 MHz o wysokiej impedancji w pętli zamkniętej dostosowaną do DIW [76], zastępując powszechnie stosowaną strukturę anteny planarnej siatką przewodzących linii. Takie podejście zostało już zaproponowane w przypadku konstrukcji anten prostowniczych, ale wcześniejszym celem było skupienie się na jej optycznej przezroczystości [112]. W tym zastosowaniu tworzenie siatki skraca czas drukowania w przypadku technik druku bezpośredniego i wymaga mniejszej ilości tuszu. Anteny zostały wydrukowane na folii poliimidowej komercyjnym srebrowym tuszem. W aplikacji pozyskiwania energii z fal radiowych, w pobliżu działającego smartfona, antena prostownicza pozyskuje 12,5 μW mocy przy napięciu o wartości 500mV. Antena prostownicza charakteryzuje się 70% przezroczystością optyczną (30% wypełnienia) i 60% *PCE*, podczas gdy antena planarna osiąga 70% *PCE*. Dodatkowa modyfikacja topologii pozwala na wykonanie w 50% przezroczystej anteny osiągającej napięcie wyjściowe 1 V DC przy gęstości dostarczanej mocy 1,5 μWcm^{-2} . Dopasowanie konstrukcji anteny do wcześniej zaprojektowanego prostownika, użyte w tym artykule, wykorzystano również w kolejnych badaniach tego zespołu [392]. W tych badaniach indukcyjna pętla zasilająca została włączona

do drukowanej siatkowej anteny mikropaskowej o częstotliwości środkowej 2 GHz, co zaowocowało wartością *PCE* 72% wykonanej z jej uwzględnieniem anteny prostowniczej, przy 82% teoretycznej przezroczystości. W innym dziele [393], ten zespół zaproponował dwupasmową antenę do bezprzewodowego transferu mocy w paśmie 915 MHz i pozyskiwania energii z dwukierunkowego radia na częstotliwości 433 MHz. Ta antena prostownicza ładowała superkondensator o pojemności 6,8 mF bez obwodu zarządzania energią, z 47,2% sprawnością w paśmie 433 MHz i 33,3% w paśmie 915 MHz. Podobne struktury antenowe wykonane zostały też przez Gok i in. [394] którzy bezpośrednio nadrukowali tuszem na szkle borokrzemowym macierze anten siatkowych o częstotliwościach środkowych 2,45 GHz i 5,8GHz, zaprojektowane do nadruku na ogniwach fotowoltaicznych w celu bezpośredniego transferu mocy pomiędzy satelitami. W badaniu samej anteny na szkle jako płaszczyznę uziemienia wykorzystano samoprzylepną folię miedzianą, a wyniki były zbliżone do zasymulowanych (wartość *S11* na poziomie ok. -12 dB w częstotliwości 2,45 GHz).

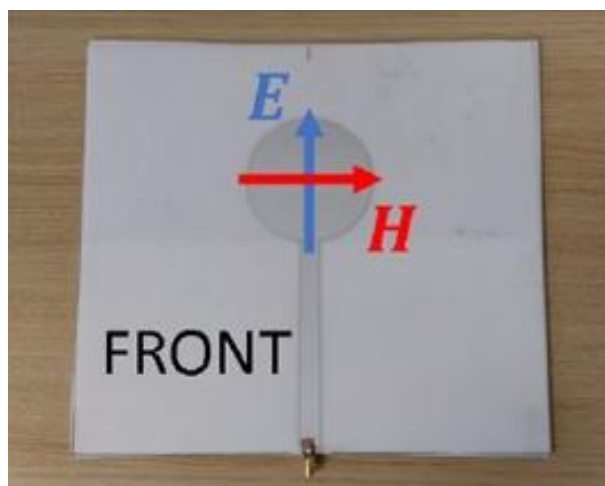
Drukowane anteny EH i WPT dostosowane do źródeł otoczenia często wykorzystują komponenty SMD w projektach prostowników. Saglatoon i in. [92] wydrukował sitodrukiem szerokopasmową płaską antenę typu monopole na podłożu papierowym w celu pozyskiwania energii z źródeł występujących w otoczeniu wytwarzających fale elektromagnetyczne w częstotliwościach 800-1500MHz. Antena wyprodukowana dla tego konkretnego pasma może pozyskiwać promieniowanie z ponad 72% efektywnością. Został on zaprojektowany do połączenia z modułem pozyskiwania energii P2110 Powercast, zdolnym do pozyskiwania energii z sygnału systemów RFID UHF i sygnału GSM900, najczęściej używanych sygnałów w zastosowaniach cywilnych w paśmie fal ultrakrótkich. Struktura anteny została wykonana na cienkim arkuszu tektury. Nałożono pięć warstw tuszu akrylowego w celu zmniejszenia szorstkości kartonu. Antena została osadzona na utwardzanym promieniami UV tuszu akrylowym w sześciu warstwach przy użyciu komercyjnego tuszu z nanocząstek srebra spiekanego w temperaturze 150°C. Skinner [395] bezpośrednio wydrukował tuszem antenę pracującą w częstotliwości 2,4GHz, charakteryzującą się stratami odbiciowymi na poziomie -16dBm i pasmem przenoszenia 70MHz. Antena i połączenia elektryczne dla prostownika opartego na komponentach SMD zostały bezpośrednio wydrukowane tuszem przy użyciu komercyjnego tuszu srebrowego. Sprawność samego prostownika wynosiła 28,6%, a *PCE* anteny prostowniczej było na poziomie 11%. Korzystając z sitodruku, Berges i in. [132] wytworzyli dwuzakresową antenę prostowniczą zdolną do pozyskiwania energii w pasmach

900 MHz i 2,4 GHz (Rysunek 25). Antena i połączenia elektryczne zostały nadrukowane sitodrukiem za pomocą pasty srebrowej na folii poliimidowej. Antena jest zintegrowana z prostownikiem, w którym rezystory są realizowane jako wzory z pasty srebrowej, a reszta dyskretnych elementów jest łączona za pomocą kleju przewodzącego. Prostowniki dostarczają napięcie 1 V przy natężeniu sygnału -14 dBm w paśmie 900 MHz i mają *PCE* 30% przy -5dBm, demonstrując możliwość zasilania zegara cyfrowego z promieniowania w pobliżu smartfona pobierającego wideo przez sieć GSM, umieszczonego w odległości 30 cm od anteny prostowniczej.



Rysunek 25 Bezprzewodowy transfer mocy użyty do zasilania cyfrowego zegara (ang. Digital clock) przy użyciu sitodrukowanej anteny prostowniczej (ang. Rectenna) i smartfona (ang. Smartphone) pobierającego plik wideo [132].

Niektóre badania koncentrują się na drukowaniu anten szerokopasmowych w celu pozyskiwania energii z kilku źródeł promieniowania. Druk strumieniowy był używany przez Alex-Amor i in. [396] w hybrydowej produkcji dwóch ultra szerokopasmowych anten monopolowych, które działają w zakresie od 0,6 do 8 GHz, obejmując wszystkie pasma częstotliwości istotne podczas powstawania tego artykułu dla systemów pozyskiwania energii z fal radiowych (Rysunek 26). Obie anteny zostały wydrukowane przy pomocy komercyjnego srebrowego tuszu na folii PET o grubości 0,35 mm i ułożone w stos z podłożem piankowym o grubości 2 mm i aluminiową płaszczyzną uziemienia. Obie anteny były dookólne, preferowane do pozyskiwania energii. Ich efektywność obliczono na podstawie wzmocnienia zmierzonego w komorze bezodbiciowej. Średnia obliczona sprawność wyniosła 53,47% dla anten eliptycznych i 54,49% dla anten okrągłych.



Rysunek 26 Wierzchnia strona (Front) drukowanej strumieniowo anteny monopolowej [396].

Inne badania dotyczą drukowania anten o złożonej geometrii projektowanych do pozyskiwania energii. Elwi [397] wydrukował strumieniowo antenę do pozyskiwania energii opartą na metamateriałowej matrycy w kształcie Hilberta. Pięć warstw srebrowego tuszu wydrukowano na podłożu z włókna palmowego spolimeryzowanego tlenkiem niklu (INP) i FR4. Tusz spiekano w piecu konwekcyjnym w temperaturze 120°C. Maksymalne zmierzone wartości napięcia stałego dla anteny prostowniczej zawierającej antenę na podłożu z INP wynosiły 2,76 mV przy 5,8 GHz i 1,76 mV przy 8 GHz.

Techniki elektroniki drukowanej wykorzystano również do drukowania anten na podłożach 3D. Kimionis i in. [350] wydrukowali strumieniowo anteny na strukturze origami, która po podgrzaniu składa się do formy 3D. To podejście, czasami nazywane "drukem 4D", pozwala na proste wytwarzanie zakrzywionych i kształtowanych w 3D podłoży oraz złożonych struktur antenowych. Proces druku hybrydowego służy do osadzania materiału bezpośrednio na podłożach drukowanych w 3D - dwie warstwy standardowych tuszy z nanocząstek srebra są drukowane na polimerze, następnie do 20 warstw reaktywnego tuszu zawierającego jako fazę funkcjonalną octan diaminasrebra(I) (DSA), a na końcu suszone w temperaturze 80°C. Autorzy zakładają że tusz DSA o niskiej lepkości wnika w tusz z nanocząsteczkami srebra, zwiększając przewodność po wytworzeniu się srebra z octanu. Częstotliwość środkowa anteny wynosi 2,3GHz, a wartość napięcia zbieranego przez anteną prostowniczą przy -10 dBm wynosi powyżej 0,3 V. Anteny do pozyskiwania energii i bezprzewodowego transferu mocy można również drukować bezpośrednio na obiekcie przestrzennym wydrukowanym w 3D. Bakytbekov i in. [192] zaprezentowali wydrukowany w 3D sześciąt z sitodrukowaną fraktalną anteną po bokach (Rysunek 27). Fraktalny kształt

zapewnia wielopasmową wydajność anteny (900, 1800 i 2100 MHz). Boki kostki zostały wydrukowane osobno przy użyciu komercyjnej pasty srebrowej, połączone w sześcian i wzmocnione oraz połączone elektrycznie na krawędziach klejem przewodzącym. Prostownik został wydrukowany na jednej ze stron kostki, wykorzystując stroiki impedancyjne typu „stub” jako układ dopasowania impedancyjnego. Antena prostownicza może pozyskiwać prąd o napięciu do 200 mV w warunkach otoczenia i 550 mV w pobliżu smartfona podczas rozmowy telefonicznej.



Rysunek 27 Przestrzenna antena na powierzchni sześcianu

Inne podejście do zwiększania funkcjonalności systemów koncentruje się na zagnieżdżaniu komponentów elektronicznych w strukturach drukowanych w 3D. Lin i in. [398] wydrukowali strumieniowo układ zagnieżdżony w wydrukowanej stereolitografią strukturze. Przestrzenną strukturę układu tworzyło wiele warstw SU8 i srebrowego tuszu drukowanych na wydrukowane z żywicy podłoże, a płaszczyzna uziemienia i przelotki wykonane zostały z kleju przewodzącego. Następnie układ scalony w konfiguracji flip-chip został zamontowany na srebrnych warstwach przewodzących, a gniazdo z całym układem zostało wypełnione materiałem elastycznym. Na powierzchni tego materiału zostały nadrukowane anteny przy użyciu warstw SU8 i srebrowego tuszu. System pozyskiwania energii pozyskiwał prąd o napięciu 0,9V.

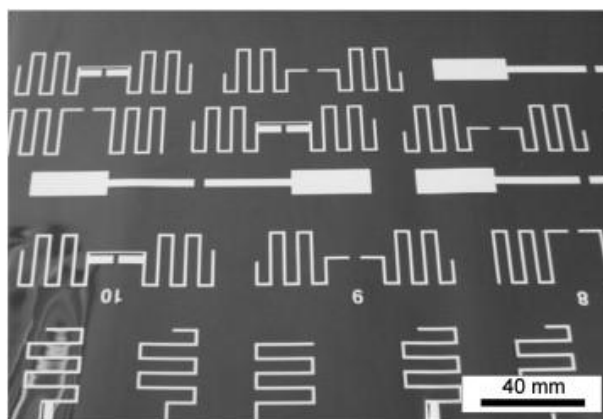
Niektóre zespoły badawcze badają drukowanie pasywnych etykiet RFID. Godlinski i in. [399] bezpośrednio wydrukowali tuszem antenę dopasowaną do układu wscalonego RFID na plastikowej obudowie lusterka samochodowego (Rysunek 28). Dyspenser zamontowany na ramieniu robota został wykorzystany do nałożenia srebrowego tuszu, utwardzanego termicznie w temperaturze 110 °C. Wartości impedancji anten i układu scalonego RFID w częstotliwości roboczej układu nie były dopasowane. Wykonana w ten sposób etykieta RFID może być jednakże identyfikowana z odległości 8,85 m i odbierać sygnał o sile -53 dBm. Bjornien i in. [400] wykorzystał system bezpośredniego druku tuszem do produkcji etykiet

RFID na tekstyliach. Antena została wydrukowana przy użyciu srebrowego tuszu i dostosowana do pracy z układem scalonym RFID. Wydrukowane etykiety z układami scalonymi RFID przymocowanymi do nich za pomocą kleju przewodzącego były identyfikowane z odległości ponad 10 m. Gdy zamiast kleju przewodzącego użyto srebrowej pasty, odległość ta zmniejszyła się do 8 m. Ten sam zespół kontynuował swoje badania [401] i zbadał tani tusz na bazie miedzi. Etykieta wykorzystująca antenę wydrukowaną tym tuszem działała na dystansie 6 m. Badali oni również technikę grawiury w celu wydrukowania anteny RFID pracującej w ultra wysokich częstotliwościach [402] przy użyciu komercyjnego polimerowego tuszu srebrowego utwardzanego w temperaturze 120°C na podłożu PET. Niska grubość drukowanej warstwy skutkuje wysoką rezystancją oraz niskim zasięgiem detekcji - ~4m w porównaniu do odpowiednio 7,5 i 11 m dla anten sitodrukowanych i trawionych z miedzi.



Rysunek 28 Drukowana antena dipolowa do pracy w ultrawysokich częstotliwościach z chipem RFID na plastikowej obudowie lusterka samochodowego [399].

Choi i in. [403] wydrukowali antenę RFID pracującą w ultrawysokich częstotliwościach używając techniki grawiury offsetowej. Antena została wydrukowana na podłożu PET przy użyciu komercyjnego tuszu srebrowego. Odległość identyfikacji została zmierzona za pomocą czytnika RFID, a średnia odległość wyniosła 1,8 m dla anteny drukowanej, w porównaniu do 3,2 m dla anteny z wytrawionej miedzi. Shin i in. [404] sitodrukowali ultrawysoko-częstotliwościową antenę RFID na folii PET przy użyciu pasty srebrowej utwardzonej w temperaturze 120°C (rysunek 29). Częstotliwość środkowa drukowanych anten była porównywalna z antenami PCB (o 1% niższa) i charakteryzowały się one niższym zyskiem energetycznym (1,6 i -3,9 dBi w porównaniu do 2,8 i 0 dBi).



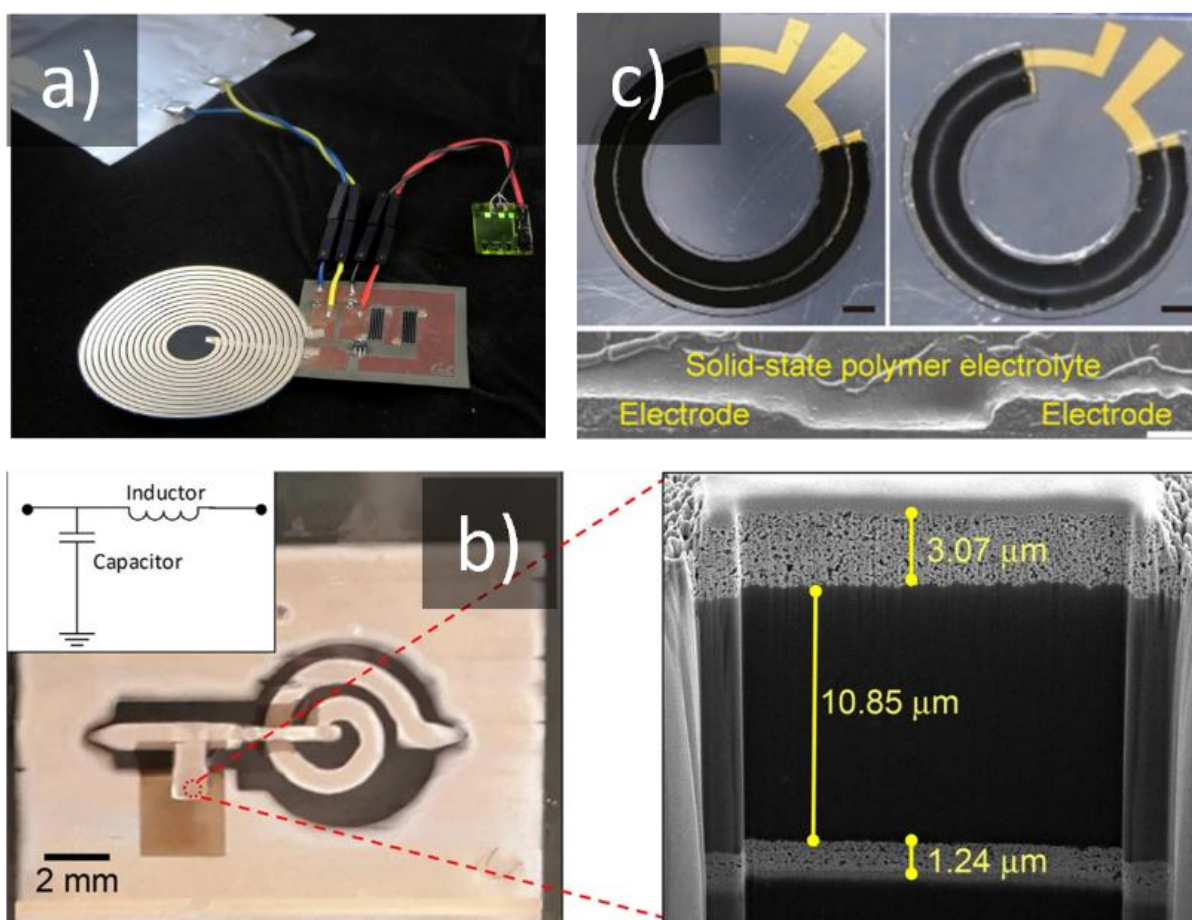
Rysunek 29 Wzory anten RFID drukowane sitodrukiem na folii PET [404].

Materiały o wysokiej chropowatości, takie jak tekstylia, mogą być używane jako podłoża do drukowania anten prostowniczych do zastosowania w inteligentnej odzieży lub inteligentnej medycynie. Adami i in. [405] sitodrukowali na tekstyliach anteny mikropaskowe typu „patch” o częstotliwości środkowej 2,45 GHz i anteny prostownicze dedykowane do systemów pozyskiwania energii z fal radiowych i bezprzewodowego transferu mocy. Ze względu na wysoką chropowatość podłoża PES/bawełnianego podłoża tekstylnego, na podłoże z każdej strony nałożono cztery warstwy pasty interfejsowej utwardzanej promieniami UV, a następnie wielokrotnie nadrukowaną komercyjnie dostępną pastę srebrową utwardzoną następnie w temperaturze 120 °C. Podłoże pokryte warstwą interfejsową charakteryzuje się przenikalnością względną 3,23 i tangensem strat 0,06 przy częstotliwości 2,45 GHz. Antena na tkaninie charakteryzowała się wydajnością promieniowania na poziomie 11%, w porównaniu do 30% tej samej anteny produkowanej na FR4. Antena połączona z prostownikiem została zmierzona w odległości 15 cm od nadajnika o mocy 100 mW, pozyskując 100 μ W mocy. Estrada i in. [406] wykonali szerokopasmowe matryce anten prostowniczych typu *bowtie* drukowane metodą sitodruku na bawełnianej koszulce. Matryce anten prostowniczych zostały dostosowane do pozyskiwania energii w częstotliwościach od 2 do 5 GHz przy gęstości mocy od 4 do 130 μ Wcm⁻². Wzór wykonany ze srebrowej pasty został naniesiony bezpośrednio na koszulkę, która posłużyła również do wykonania połączeń diod SMD z tym nadrukiem. Cały eksperyment został przeprowadzony na fantomie wypełnionym solą fizjologiczną, o parametrach porównywalnych z rzeczywistym ciałem. Zmierzona wartość mocy prądu stałego wynosiła do 32 μ W dla gęstości mocy 4 μ Wcm⁻² i wartości obciążenia 2 k Ω . Efektywność mieściła się w zakresie 5–10% dla niskich gęstości mocy i osiągnęła 32% dla 100 μ Wcm⁻².

2.4.3. Pozostałe drukowane elementy anten prostowniczych

Elementy RLC

Lan i in. [407] wydrukowali aerozolowo dopasowane rezystory utwardzane w 120°C o zakresie rezystancji między 50 a 487 Ohmów poprzez nadruk warstw z PEDOT:PSS pomiędzy dwiema srebrnymi elektrodami. Srebrny tusz atomizowano pneumatycznie, a ten na bazie PEDOT:PSS - ultradźwiękowo. Folgar i in. [408] wykorzystali technikę AJP do produkcji wielowarstwowych kondensatorów ceramicznych na bazie BaTiO₃. Kondensator został wydrukowany przy użyciu komercyjnego tuszu srebrowego i BaTiO₃ na platynie, złocie i krzemie pokrytym tlenkiem krzemu, a następnie spiekany w temperaturze 200°C. Funkcjonalny kondensator wykazuje pojemność 17,5 pF dla częstotliwości 1 MHz. Gupta i in. [409] przedstawili w pełni drukowane aerozolowo kondensatory, cewki indukcyjne i rezystory na szkle. Przewodzące dolne elektrody i cewki indukcyjne zostały wydrukowane przy użyciu komercyjnego tuszu srebrowego spiekane w temperaturze 150°C, rezystor i górna elektroda kondensatora za pomocą tuszu na bazie PEDOT: PSS utwardzonego w temperaturze 120°C, a warstwy dielektryczne przy użyciu tuszu na bazie SU8 suszonego w temperaturze 80°C, wszystkie atomizowane ultradźwiękowo. Kondensatory produkowano w zakresie pojemności od 10 do 60 pF, rezystory w zakresie rezystancji od 200 do 950 Ω, a cewki indukcyjne w zakresie indukcyjności od 1 do 12,5 nH. Wykazywały one niemal liniowy wzrost tych wartości przy zwiększaniu nakładającej się powierzchni elektrod. Inną interesującą metodę drukowania cewek zaprezentowali Gu i in. [349]. Przewodzące trójwymiarowe meandry zostały wytworzone przez drukowanie przewodzących ścieżek drukiem aerozolowym na szklanym podłożu za pomocą komercyjnego tuszu srebrowego, a następnie drukowanie przestrzennego rdzenia polimerowego i osadzanie drukiem aerozolowym srebrowych ścieżek na tym rdzeniu, tworząc ostatecznie trójwymiarową cewkę indukcyjną. Wszystkie tusze atomizowano pneumatycznie, tusz srebrowy spiekano w temperaturze 150°C, a tusz polimerowy utwardzono promieniami UV. Wartość indukcyjności produkowanych cewek indukcyjnych ma potencjał do zastosowań komercyjnych, w zakresie od kilku μH do 0,4 H, testowana dla częstotliwości do 230 MHz.



Rysunek 30 (a) Obwód regulatora napięcia na elastycznej płycie drukowanej zrealizowany za pomocą drukowanej cewki indukcyjnej i rezystorów [261] (b) Obraz i przekrój SEM w pełni drukowanego strumieniowo filtra złożonego z kondensatora (ang. Capacitor) i induktora (Inductor) [410] (c) Zdjęcia w widoku z góry (górne obrazy) i obraz ze skaningowej mikroskopii elektronowej w przekroju poprzecznym (SEM) (dolne obrazy) elektrod (ang. Electrode) i elektrolitu polimerowego w stanie stałym (ang. Solid-state polymer electrolyte) superkondensatora MIS [411].

Wielu badaczy prezentuje wytwarzanie pasywnych komponentów RLC przy użyciu technik elektroniki drukowanej (Rysunek 30). Plötner i in. [412] bezpośrednio nadrukowali tuszem całkowicie-drukowane cienkowarstwowe kondensatory na podłożu szklanym. Zastosowano dwa dyspensery o różnych średnicach igieł – 30 μm dla przewodzącej pasty srebrowej i 60 μm dla pasty dielektrycznej – w celu kontrolowania rozmiaru elementu i zminimalizowania zanieczyszczenia krzyżowego. Pojemność kondensatora osiągała 40 pFmm^{-2} przy wytrzymałości dielektrycznej 2 MVcm^{-1} . Przy napięciu roboczym 15 V gęstość prądu upływu drukowanych kondensatorów utrzymywała się na poziomie 10^{-4} A. Dominguez [413] bezpośrednio drukował srebrowym tuszem kondensatory i cewki. Prostokątne kondensatory o wymiarach nie większych niż 5mm charakteryzowały się zakresem pojemności od 10 do 12 pF. Cewki o indukcyjności około 150 nH miały średnicę około 2,2mm. Zhou i in. [237] bezpośrednio drukowali pastą opartą na srebrnych płatkach pokrytych warstwą PAA kondensatory i cewki w celu wytworzenia struktur 3D i integracji ich w układy mikrofalowe. Częstotliwość rezonansu własnego drukowanych cewek przekracza

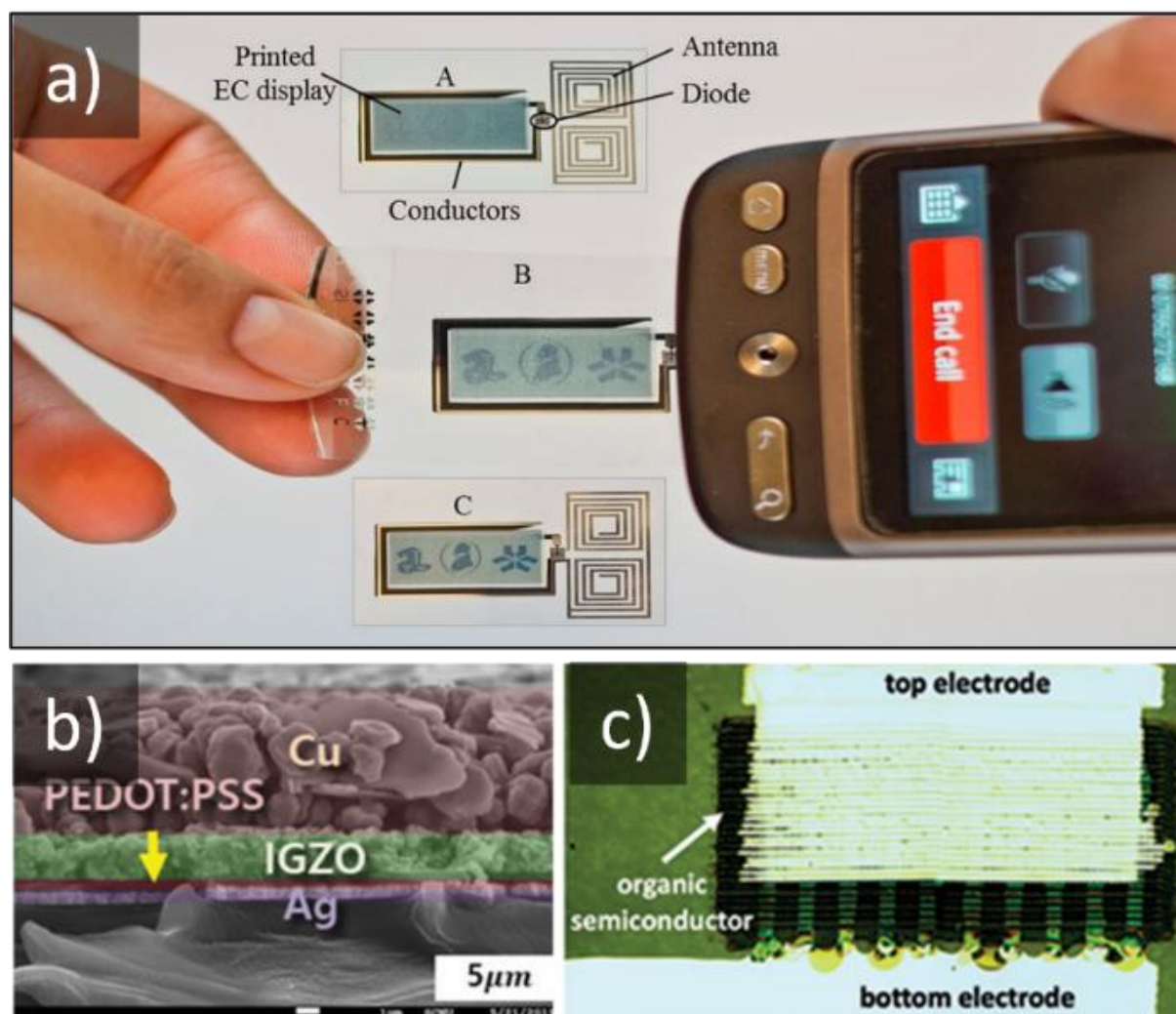
10 GHz. Ashebir i in. [414] sitodrukowali układ RLC. Kondensatory drukowano przy użyciu tuszu srebrowego do elektrod i tuszu z tytanianu baru jako materiału dielektrycznego. Kondensatory takie charakteryzowały się pojemnością 300 ± 1 pF. Rezystory zostały wydrukowane przy użyciu komercyjnej pasty węglowej, a ich rezystywność wynosiła 6,7 k Ω . Cewki indukcyjne wydrukowano przy użyciu sześciu warstw srebrowej pasty przewodzącej suszonej w temperaturze 100°C. Ich współczynnik jakości, 25,5 przy 13 MHz, oznacza, że cewki te nadają się do użytku w systemach RFID i bezprzewodowych aplikacjach sensorycznych. Arenas i in. [415] bezpośrednio drukowali srebrową pastą kondensatory metal-izolator-metal (MIM) i kwadratowe cewki i sprawdzali ich straty przy zastosowaniach w wysokich częstotliwościach. Pomimo faktu, iż wytworzone przez nich komponenty działały aż do częstotliwości 12GHz, ich aplikacyjność jest znikoma ze względu na brak powtarzalności ich parametrów elektrycznych. Ostfeld i in. [261] sitodrukowali elementy RLC na podłożu z folii PET. Warstwy przewodzące wydrukowano za pomocą komercyjnej pasty z mikropłatków srebra, rezystory za pomocą pasty węglowej, a warstwę dielektryczną za pomocą pasty z tytanianu baru. Kondensatory zostały wydrukowane z sześcioma warstwami przewodzącymi jako elektrody górne i dolne oraz dwiema lub trzema warstwami dielektrycznymi, co dało pojemność właściwą odpowiednio 0,53 nFcm⁻² i 0,33 nFcm⁻². W zakresie częstotliwości od 1 do 10 MHz pojemność wzrasta o 20%. Niskie wartości strat i pojemności wynoszące od 100 pF do 1 nF sprawiają, że te kondensatory nadają się do zastosowań takich jak obwody rezonansowe, np. w układach dopasowania impedancyjnego. Jednowarstwowe rezystory węglowe o rezystancjach nominalnych 10 k Ω , 100 k Ω i 1,5 M Ω zostały zaprojektowane i wydrukowane z odchyleniem standardowym rezystancji 10% lub mniejszym. Większa liczba nadrukowanych warstw skutkuje rozszerzeniem spektrum możliwych do uzyskania rezystancji. Okrągłe cewki zostały zasymulowane przy założeniu 7-mikrometrowej grubości warstwy komercyjnej pasty przewodzącej. Cztery cewki o różnych średnicach, szerokościach linii i liczbie pętli zostały wydrukowane, a wartości ich indukcyjności różniły się o nie więcej niż 0,2nH od symulowanych (2,3; 7,2; 4,7; 8,0 μ H). Kondensatory i cewki indukcyjne, oparte na warstwach PVP, zostały wydrukowane drukarką strumieniową przez McKerricher’a i in. [416] Produkowane cewki indukcyjne wykazywały indukcyjność 9,7 nH przy częstotliwości rezonansu własnego 850 MHz i współczynniku Q 4,4 oraz indukcyjność 75 nH przy współczynniku Q 3,3. Wykonano kondensatory o pojemnościach w zakresie od 16 do 50 pF. Chociaż ich częstotliwość rezonansowa, 1580 MHz, była wystarczająca dla wielu zastosowań w układach radiowych, ich współczynniki jakości były stosunkowo niskie w porównaniu z konwencjonalnymi kondensatorami.

Następny drukowany kondensator tego zespołu badawczego o pojemności 2 pF [410] charakteryzuje się częstotliwością rezonansową 6,5 GHz, prądem upływowym 1×10^{-10} Acm⁻² przy 0,08 MV cm⁻¹ i stałą dielektryczną ~3, niezależnie od częstotliwości. Maksymalny współczynnik Q tego kondensatora wynosi 25. Wykonana cewka indukcyjna o długości 4 mm i ilości zwojów 1,5 ma rezonuje w częstotliwości 4 GHz i charakteryzuje ją indukcyjność 8 nH dla częstotliwości 1 GHz. Współczynnik jakości tej cewki wynosi ~8. Proces drukowania został przeprowadzony na dwóch drukarkach – drukarce o wysokiej przepustowości do wytwarzania skomplikowanych wzorów nieplanarnych za pomocą tuszu utwardzanego promieniami UV oraz naukowej drukarce strumieniowej do drukowania wygładzających warstw utwardzanych promieniami UV i precyzyjnych wzorów przy wykorzystaniu srebrowego tuszu. Bezpośredni druk tuszem został również zastosowany do wykonania kondensatora o kształcie dopasowanym do inteligentnych soczewek. Park i in. [411] wyprodukowali kondensator MIS, drukowany przez osadzanie tuszu na bazie węgla dla warstw przewodzących i tuszu polimerowo-elektrolitowego w stanie stałym dla warstwy dielektrycznej. Kondensator, zastosowany jako część systemu bezprzewodowego transferu mocy dla inteligentnej soczewki, wykazywał stabilną wydajność do 10000 cykli ładowania-rozładowania.

Diody

Diody są głównymi elementami prostownika i mogą być drukowane z różnych materiałów (rysunek 31). Pimpolari i in. [365] wydrukowali strumieniowo diody z tuszu upartego na nanomateriałach węglowych – grafenie i nanorurkach węglowych. Elektrody diod zostały wydrukowane strumieniowo na folii poliimidowej z tuszów na bazie srebra, PEDOT:PSS i grafenu. Warstwę półprzewodnikową wydrukowano przy użyciu tuszu z jednościennej nanorurek węglowych, a kontakty omowe i Schottky'ego między wydrukowanymi nanorurkami a grafenem uzyskano dzięki obróbce termicznej w różnych temperaturach po druku. Dioda może pracować z częstotliwością do 5 MHz. Martinez-Lopez i in. [417] wydrukowali strumieniowo diody Schottkiego oparte na tlenku tytanu. Komponenty wydrukowano przy użyciu tuszu na bazie TiO₂ na szklanym podłożu pokrytym przezroczystą elektrodą z tlenku fluoro-cynowego (FTO). Po osadzeniu diody metalizowano sitodrukowaną pastą srebrową i spiekano w temperaturze 375°C. Wydajność diody nie została zmierzona, ale potwierdzono utworzenie się diody Schottky'ego. Marjanovic i in. [418] wydrukowali strumieniowo spiekane fonicznie diody oparte na tlenku miedzi i siarczku kadmu. Obie warstwy były drukowane zamiennie na folii PET, tworząc wielowarstwową

strukturę. Chociaż wydajność diody była słaba, według autorów tego artykułu demonstruje ona koncepcję taniego wytwarzania. Vasquez i in. [364] zaprezentowali możliwości bezpośredniego druku tuszem do wytwarzania srebrnych elektrod do wytwarzanej hybrydowo diody Schottky'ego Ag/InGaZnO. Warstwę srebra utwardzono w temperaturze 120 °C po osadzeniu. Dioda Schottky'ego wykazywała napięcie progowe 0,63 V i średni współczynnik prostowania 80.



Rysunek 31 (a) Obwód wyświetlacza (ang. Printed EC display) i anteny (ang. Antenna) z drukowaną diodą (ang. Diode) Schottky'ego [361] (b) Przekrój poprzeczny SEM diody Schottky'ego IGZO drukowanej grawiurą [191] (c) Mikrografia optyczna diody organicznej (półprzewodnik organiczny (ang. organic semiconductor) pomiędzy dolną (ang. Bottom electrode) i górną elektrodą (ang. Top electrode) w pełni drukowanej strumieniowo [420].

Znalezienie najbardziej odpowiedniego materiału do sitodruku organicznych diod Schottky'ego jest często wyzwaniem. Persson [419] badała to zagadnienie używając srebrowych, węglowych i aluminiumowych past jako materiałów do wykonywania elektrod dla diody opartej na paście na bazie ZnO. Najlepszą kombinacją były elektrody aluminiumowe z pastą srebrową jako warstwą stykową, co pozwoliło na maksymalny współczynnik

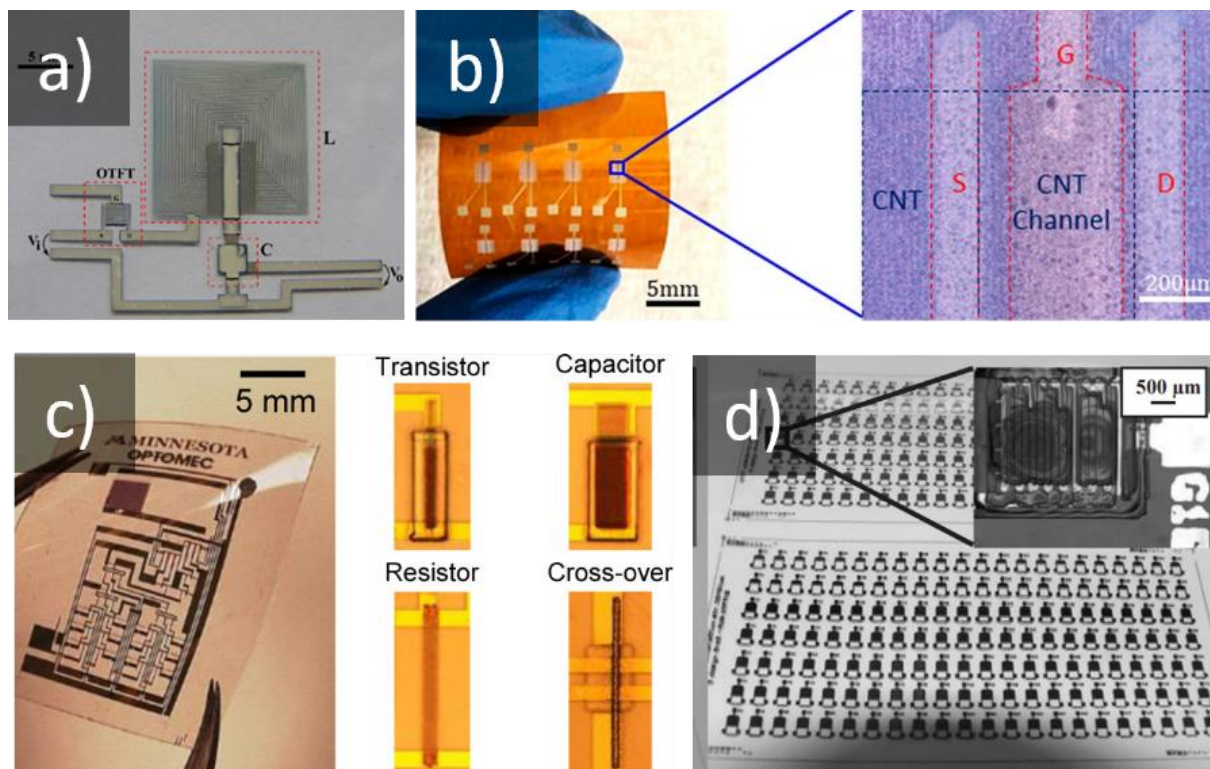
prostowania diody 10^5 - 10^6 . W porównaniu z konwencjonalnymi diodami Schottky'ego wartości napięcia roboczego wytworzonych diod były niskie.

Podobne podejście hybrydowe jest stosowane przez Bi i in. [361] Wydrukowana dioda o pionowej strukturze może pracować w paśmie UHF. Dioda wydrukowana na aluminiowej elektrodzie wytworzonej metodą fotolitografii na podłożu PET. Cząstki Si_2 i NbSi_2 wydrukowano na warstwach żywicy SU8, a jako warstwy przewodzące zastosowano warstwy z pasty węglowej i pasty srebrowej. Parametry pracy uzyskiwane przez diodę wynosiły: średnia wartość prądu $19 \mu\text{A}$ przy polaryzacji przewodzenia 2 V , współczynnik prostowania sygnału około 100 przy napięciu 1 V oraz częstotliwość graniczna $1,6 \text{ GHz}$. Funkcjonalność tej diody została zademonstrowana poprzez wyprostowanie sygnału pasma GSM zebranego z sygnału telefonu komórkowego przez antenę w celu zasilenia wskaźnika wyświetlacza elektrochromatycznego.

Mitra i in. [421] badali zastosowania druku strumieniowego w przemysłowej, wielkoseryjnej produkcji organicznych tranzystorów cienkowarstwowych i kondensatorów. Wydrukowane komponenty zostały najpierw wyprodukowane na folii PEN za pomocą drukarki laboratoryjnej jako dowód słuszności koncepcji, a następnie wyprodukowano je na przemysłowej drukarce o wysokiej wydajności. Komercyjny tusz srebrowy zastosowano do warstw przewodzących, tusz cPVP do warstw dielektrycznych, a amorficzny tusz polimerowy do warstwy półprzewodników organicznych. Najwyższa znormalizowana pojemność drukowanych kondensatorów o strukturze srebro-cPVP-srebro wynosiła $\sim 4 \text{ nF/cm}^2$ dla kondensatorów o powierzchni czynnej $1,4$ i 9 mm^2 wydrukowanych przy użyciu kropeł o średnicy $40 \mu\text{m}$. Najlepszej jakości OTFT, charakteryzujące się niskim prądem upływu i minimalizacją liczby zwarć, uzyskano poprzez osadzanie elektrod za pomocą kropeł o średnicy $45 \mu\text{m}$. Wartości prądu pomiędzy źródłem a drenem uzyskiwana dla takich tranzystorów mieściła się w zakresie od $2,5 \mu\text{A}$ do $24,4 \mu\text{A}$. Castro i in. wykorzystali organiczne tranzystory i kondensatory TFT w swoich późniejszych badaniach [422] jako bazę dla filtrów dolnoprzepustowych z regulowanymi częstotliwościami odcięcia. Wyprodukowano cewki indukcyjne (warstwy cPVP między dwiema warstwami srebrowymi) o znormalizowanej indukcyjności $2,77 \text{ nH/cm}^2$. Dodatkowo wydrukowano rezystory z PEDOT:PSS ze znormalizowaną rezystancją w funkcji grubości (liczby warstw PEDOT:PSS) wynoszącą $175 \Omega/\square$ dla dwóch warstw i $20 \Omega/\square$ dla sześciu warstw.

Drukowanie tranzystorów TFT (Rysunek 32) było również szeroko badane, chociaż ich wydajność jako diod nie została jeszcze sprawdzona. Lu i in. [312] wydrukowali

aerozolowo strukturę TFT 1D–2D. Urządzenie zostało wydrukowane przy użyciu półprzewodnikowego tuszu na bazie nanorurek węglowych jako kanału, tuszu h-BN jako warstwy dielektrycznej i tuszu z nanodrutów srebra do wykonania elektrod. Urządzenie zostało utwardzone w niskiej temperaturze $<80^{\circ}\text{C}$. Wyprodukowane urządzenie TFT charakteryzuje się stosunkiem prądu włączenia do prądu wyłączenia do $3,5 \times 10^5$, ruchliwością dziur do $10,7 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ oraz minimalnymi zmianami wydajności po 1000 cyklach próbnym zginania. Ten sam zespół kontynuował te badania [288] i osiągnął bardziej powtarzalny wynik poprzez stabilizację temperatury ultradźwiękowej kąpieli atomizacyjnej. Ha i in. [423] wydrukowali tranzystor, rezystor i kondensator przy częściowym wykorzystaniu techniki druku aerozolowego. Złote dolne elektrody zostały odwzorowane na folii PET za pomocą fotolitografii. Warstwy funkcjonalne tranzystora i kondensatora THT zostały wykonane poprzez osadzenie pneumatycznie atomizowanej warstwy tuszu P3HT, warstwy tuszu jonowo-żelowego oraz warstwy PEDOT:PSS. Współczynnik prądu włączenia do prądu wyłączenia tego tranzystora również wynosił powyżej 10^5 , a efektywna pojemność kondensatora została oszacowana na $500 \text{ }\mu\text{Fcm}^{-2}$. Rezystor został wydrukowany między dwoma złotymi elektrodami za pomocą tuszu PEDOT:PSS. Jego rezystancja zależy od regulowanej szerokości i grubości drukowanego wzoru, a wartość wyprodukowanej próbki wyniosła $82 \text{ k}\Omega$.



Rysunek 32 (a) Filtr dolnoprzepustowy drugiego rzędu drukowany w całości strumieniowo [422] (b) Elastyczny i w pełni drukowany wyświetlacz TFT 1D–2D [312] (c) Rezystory (ang. Resistor), kondensatory (ang. Capacitor) i tranzystory (ang. Transistors) drukowane aerozolowo [423] (d) Organiczne tranzystory TFT w pełni drukowane strumieniowo na folii [421].

Drukowane prostowniki i układy dopasowania impedancyjnego

Prostowniki i układy dopasowujące mogą być częściowo lub w całości drukowane przy użyciu kilku technik elektroniki drukowanej. Kimionis i in. [424] wydrukowali strumieniowo prostownik działający w paśmie fal ultrakrótkich i niskich fal milimetrycznych. Pięć warstw srebrowego tuszu wydrukowano na folii poliimidowej, a komponenty dyskretne połączono ze srebrnymi liniami za pomocą kleju przewodzącego. Drukowana strumieniowo niejednorodna linia transmisyjna mikropaskowa i cewka indukcyjna były używane jako układ dopasowania impedancyjnego. Zmierzona sprawność prostownika z mikropaskowym układem dopasowania impedancyjnego jest wyższa niż 33% dla szerokiego pasma częstotliwości - od 250MHz do 3GHz. Viola i in. [420] wydrukowali obwód prostownika za pomocą w pełni drukowanych strumieniowo diod. Diody wydrukowano na podłożu PEN przy użyciu komercyjnego tuszu srebrowego i pierwotnie opracowanego organicznego tuszu półprzewodnikowego. Otrzymane diody wykazują współczynnik prostowania sygnału powyżej 10^6 , a prostowniki w pełni drukowane strumieniowo z takimi diodami mogą prostować sygnały AC do 25MHz, pokrywając najbardziej popularne znormalizowane pasma WPT. W pełni drukowany prostownik umożliwia wykonanie w pełni drukowanych układów RFID, zasilających interaktywne etykiety i inteligentne opakowania. Heljo i in. [425]

wydrukowali grawiurą prostowniki półfalowe i pełnofalowe na bazie drukowanych diod organicznych. Diody zostały wydrukowane na wstępnie naniesionych elektrodach miedzianych na podłożu PET. Warstwa półprzewodnikowa została wydrukowana za pomocą PTAA, a górne elektrody zostały wydrukowane przy użyciu komercyjnego tuszu srebrowego, a następnie utwardzone w temperaturze 115 °C. Obwód prostownika półfalowego uzyskał wartość stałego napięcia wyjściowego 3,5V dla częstotliwości 13,56 MHz i maksymalną wartość mocy wyjściowej 0,58 mW dla obciążeń do 10 kΩ. Układ prostownika pełnofalowego uzyskał maksymalną wartość mocy wyjściowej 0,17 mW przy obciążeniu 50 kΩ. Wyniki opierają się na wcześniejszych badaniach tego zespołu [426] w którym diody wydrukowane w tym samym procesie generują napięcie wyjściowe DC około 2,7 V przy 10 MHz, wykorzystując sygnał wejściowy o amplitudzie napięcia 10 V.

2.5. Podsumowanie

Wiele tradycyjnych technik elektroniki drukowanej – grawiura, sitodruk, bezpośredni druk tuszem czy druk strumieniowy były już wykorzystywane do wykonywania anten prostowniczych pozyskujących energię z fal radiowych. Obecnie potrzebna jest technika pozwalająca zarówno na nadruk wzorów w wysokiej rozdzielczości w celu wykonywania układów działających w wysokich częstotliwościach oraz nadruk na podłożach przestrzennych, gdyż rozpoczynają się prace nad elementami elektronicznymi projektowanymi w trzech wymiarach, dającymi dodatkowy stopień swobody w projektowaniu układów lub oferujących unikalne właściwości. Techniką umożliwiającą takie wytwarzanie jest druk aerozolowy, który jest w ostatnich latach intensywnie rozwijany poprzez badania umożliwiające optymalizację jego parametrów oraz dogłębne zrozumienie procesu i możliwości aplikacyjnych. Przy pomocy tej techniki wytwarzano już anteny, elementy RLC i tranzystory, natomiast brak jest w literaturze kompletnych anten prostowniczych wykonanych tą techniką, bądź wykorzystujących elementy nią wykonane. Nie wskazano również prób optymalizacji zużycia materiału i czasu wydruku poprzez wykonywanie anten siatkowych tą techniką.

3. Cel i zakres pracy

Celem rozprawy jest opracowanie technologii wytwarzania elementów systemu pozyskiwania i bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej z zastosowaniem techniki przyrostowej druku aerozolowego. Realizowane badania mają skupiać się zarówno na wykonaniu przyrostowym i charakterystyce poszczególnych elementów, wraz z niezbędnymi pracami konstrukcyjnymi i technologicznymi, jak również ogólnej weryfikacji możliwości zastosowania druku aerozolowego w aplikacjach wykorzystujących sygnały o wysokiej częstotliwości. Otrzymane w toku realizacji celu rozprawy anteny powinny charakteryzować się niską wartością współczynnika odbicia w zaprojektowanej częstotliwości oraz geometrią dostosowaną do możliwości technologicznych użytej techniki drukarskiej. Drukowane anteny wraz z innymi elementami anteny prostowniczej mają umożliwiać pozyskiwanie energii odpadowej o wydajności pozwalającej na zasilanie prostych układów elektronicznych.

Na podstawie analizy literatury światowej i wyników badań wstępnych, wybrano do wykonania antenę mikropaskową typu „patch” zrealizowaną w technice siatkowej o częstotliwości pracy 2,45 GHz. Rodzaj anteny - mikropaskowa typu „patch” - został wybrany ze względu na prostotę wykonania i łatwą adaptację kształtu, a także licznie występujące przykłady zastosowania w drukowanych antenach prostowniczych. Realizacja anteny w technice siatkowej została wybrana z uwagi na wysoką rozdzielczość druku aerozolowego, jednocześnie adresując ograniczenie związane z wydajnością wykonywania dużych wzorów tą precyzyjną techniką druku. Częstotliwość 2,45 GHz wybrano ze względu na wszechobecne jej występowanie w przestrzeni biurowej i zurbanizowanej.

Osiągnięcie celu pozwoli na ocenę przydatności druku aerozolowego do wykonywania elementów systemu pozyskiwania i bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej oraz jego potencjału w wytwarzaniu przyrostowym innych rodzajów urządzeń i układów mikrofalowych.

4. Materiały i metody

4.1. Materiały

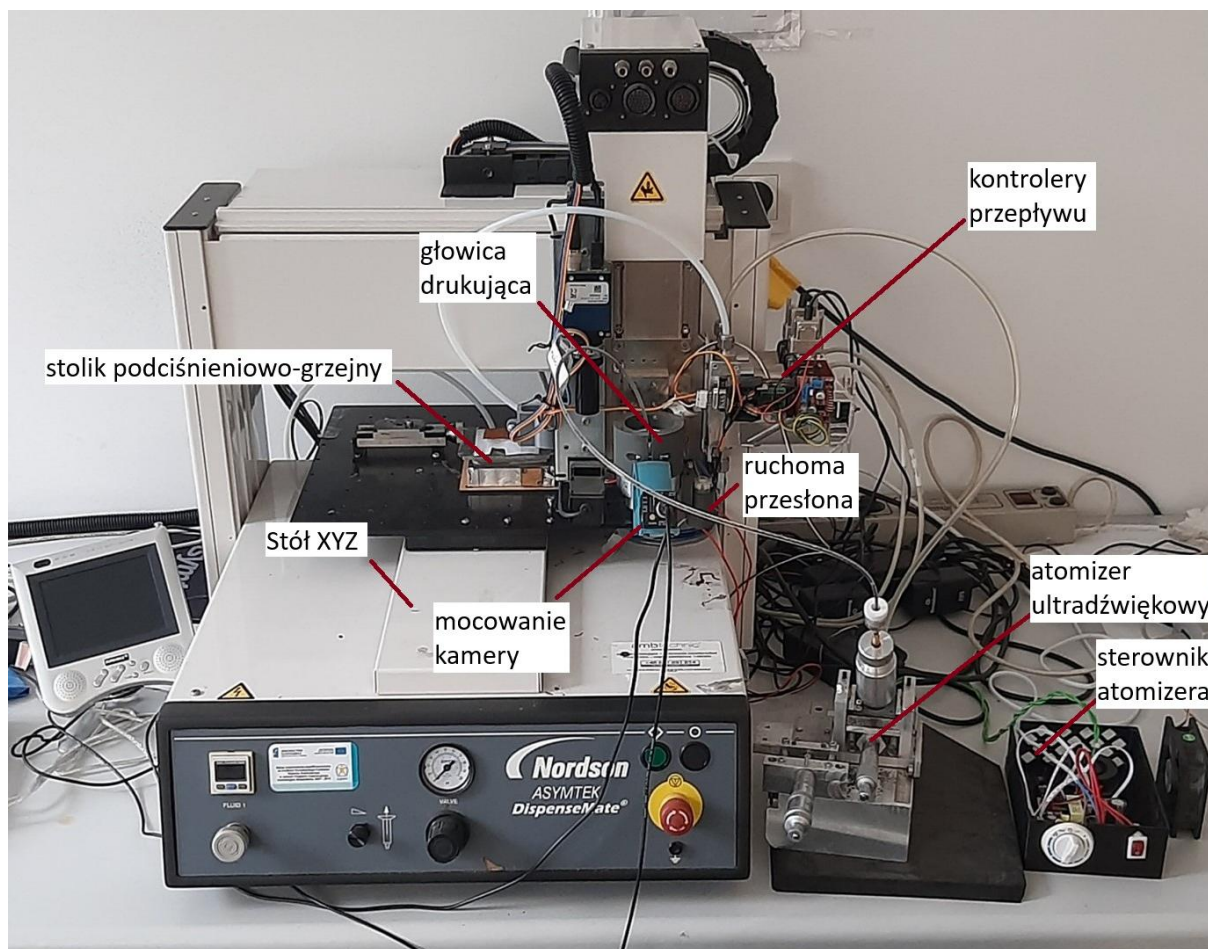
Jako podłoże dla linii mikropaskowych, anten i cewek została użyta folia poliimidowa Kapton HN (DuPont, USA) o grubości 75 μm , ze względu na jej odporność temperaturową i chemiczną, niską chropowatość powierzchni, znane parametry dielektryczne i dobrą zwilżalność przez tusz srebrowy drukowany metodą AJP. Jako podłoże do przygotowania próbek mikrofalowych sensorów stężenia glukozy w ślinie została zastosowana szklana płytka o grubości 0,26 mm i względnej przenikalności elektrycznej $\epsilon_r = 6$. Do wykonania podłoży do pomiarów rezystancji naniesionych linii na podłożach niepłaskich wykorzystano żywicę Standard Resin clear (Anycubic, Chiny). Do wykonania linii mikropaskowych do badań w częstotliwościach do 43 GHz jako podłoża użyto metalizowanej folii Kapton o grubości 1mil, 2 mil i 4mil i laminat RO4003C (nazywany w dalszej części pracy beżowym laminatem). Do przygotowania referencyjnych linii transmisyjnych do weryfikacji urządzenia pomiarowego został użyty laminat z włókna szklanego na bazie politetrafluoroetyleny (PTFE) Diclاد 880 (Rogers, USA), a jako podłoże dla prostownika wykonanego w technologii PCB, sieci dopasowania impedancyjnego i jako podłoże do wydruków FDM został użyty laminat FR4.

W procesie druku aerozolowego w celu druku linii transmisyjnych i anten zostały użyte tusze z nanocząsteczkami srebra, Ag25Te(UTDots, USA). W celu ograniczenia *Overspray'u* będącego jednym z głównych wyzwań stojącym przed praktycznym wykorzystaniem druku aerozolowego w przemyśle, zastosowano eksperymentalny tusz Ag60Te (UTDots, USA). Tusz ten dostarczono dopiero pod koniec realizacji opisanych w rozprawie badań i z tego względu liczba aplikacji gdzie został użyty i porównany z tuszem Ag25Te była ograniczona. Kompozytem przewodzącym użytym do wykonywania pasywnych elementów elektronicznych – linii transmisyjnej, anteny i stroika impedancyjnego – był Ampere PLA (print-me, Polska). Elektrycznie przewodząca miedziana taśma samoprzylepna 1181 (3M, USA) została użyta jako płaszczyzna uziemienia w projektach anten (taśmy miedziane były używane jako płaszczyzny uziemienia w artykułach dotyczących elastycznych anten na foliach poliimidowych [427]–[429]). Lakier PVB 16 (Termopasty, PL) został użyty na części próbek anten w celu zbadania jego wpływu na ich parametry jako powłoka zabezpieczająca przed czynnikami zewnętrznymi, chociaż nie oczekuje się, że srebro utleni się wystarczająco szybko aby wpłynąć na wydajność anteny podczas wykonywanych badań [430].

4.2. Symulacje i przygotowanie próbek

Analiza elektromagnetyczna linii transmisyjnych i wzorów anten (parametry rozproszenia S_{11} i S_{12}) została przeprowadzona w programie ANSYS HFSS (Ansys Inc., USA). Projekty CAD linii transmisyjnych i anten zostały przygotowane bezpośrednio w ANSYS HFSS lub Fusion/Inventor (Autodesk, USA) i zaimportowane do oprogramowania symulacyjnego jako plik STEP, w zależności od złożoności projektu. Teoretyczna przezroczystość optyczna warstwy siatki anteny została obliczona jako różnica między 100%, a współczynnikiem wypełnienia siatki, tj. stosunkiem między obszarem zajmowanym przez linie siatki a obszarem ograniczonym przez zewnętrzne krawędzie zewnętrznych linii anteny, zmierzonym w programie Inventor. Modele złączy SMA zostały pobrane bez modyfikacji z biblioteki używanego oprogramowania. Prostownik i układ dopasowania impedancyjnego zostały zaprojektowane w programie QucsStudio [431] przy użyciu modeli *Spice* cewek indukcyjnych dostarczonych przez producenta (Würth Elektronik, Niemcy). Układy wszystkich próbek PCB zostały zaprojektowane w programie Eagle (Autodesk, USA).

Próbki PCB zostały przygotowane poprzez nałożenie akrylowej warstwy maskującej na miedzianą warstwę płytek PCB, selektywne naświetlanie za pomocą grawerki laserowej CO₂ Rayjet 50 C12 (Trotec, Austria) i wytrawianie w kąpieli z nadsiarczanu sodu. Próbki drukowane aerozolowo zostały przygotowane przy użyciu drukarki aerozolowej z dyszą o średnicy 150 μm i atomizacją ultradźwiękową, przedstawionej po modyfikacjach dokonanych w ramach niniejszej pracy na Rysunku 33. Stanowisko składa się z aluminiowej głowicy drukującej wykonanej w ramach mojej pracy inżynierskiej, ruchomej przesłony której wstępne projekty wykonano w ramach pracy przejściowej podczas moich studiów magisterskich, oraz zbudowanych: atomizera ultradźwiękowego ze sterownikiem, stolika podciśnieniowo-grzejnego i mocowania kamery. Całość układu pneumatycznego kontrolowana jest przez dwa kontrolery przepływu EL_FLOW F-201CV-100-AGD-33-V (Bronkhorst, Holandia), a przemieszczenie mechaniczne i sygnał do ruchomej przesłony realizowane są za pomocą urządzenia Asymtek D593 (Nordson, USA) i dedykowanego oprogramowania Fluidmove.



Rysunek 33 Drukarka aerozolowa

Podłoże z folii Kapton było najpierw oczyszczone pistoletem pneumatycznym oraz bezpyłowym ręcznikiem papierowym zwilżonym acetonem, a następnie umieszczone na stole drukarki aerozolowej i podgrzane do 60°C. Podłoża szklane przygotowano przed drukowaniem przez zanurzenie w kąpeli kwasowej, wodzie dejonizowanej, kąpeli zasadowej i wodzie dejonizowanej, a następnie 5-minutowe czyszczenie w myjce ultradźwiękowej Proclean 2.0 M (Ulsonix, Niemcy). Następnie podłoże osuszono bezpyłowym ręcznikiem papierowym i pistoletem pneumatycznym. Podłoże zostało zamontowane na stole drukarki aerozolowej poprzez wydrukowany FDM zacisk kształtowy. Próbki podłoża przestrzennego z żywicy wykonano przy pomocy drukarki SLA Photon Mono X (Anycubic, Chiny) wykorzystując grubość warstwy 0,01mm.

Po druku próbki były suszone w warunkach otoczenia przez godzinę. Następnie były przetransportowane do stacji spiekania fotonicznego, składającej się z lampy halogenowej o mocy 500 W i spiekane przez 60 sekund. Nakładanie lakieru na wybrane próbki odbywało się zgodnie z zaleceniami producenta, po uprzednim zamaskowaniu pola kontaktowego. Alternatywne spiekanie próbek na foliach i laminatach i lutowanie rozpliwowe realizowane

było w suszarce komorowej SUP-30G (WAMED, Polska). Wybrane próbki na podłożach SLA spiekane były przy pomocy lutownicy powietrznej.

Próbki wykonane techniką FDM wydrukowane zostały za pomocą drukarki Kobra (Anycubic, Chiny) i dyszy 0,6 mm. Galwanizacja elektrochemiczna miedzią została wykonana w kąpeli galwanicznej [432], a próbki i płyta miedziana zostały podłączone do programowalnego zasilacza Rigol DP832A.

2.3 Pomiary

Współczynnik odbicia (S_{11}) linii transmisyjnych i anten oraz współczynnik transmisji (S_{21}) linii transmisyjnych i toru antenowego zmierzono za pomocą NanoVNA S-A-A V2 (Nooelec, Kanada) z dedykowanym zestawem kalibracyjnym (NanoVNA porównywano ze standardowymi VNA [433], [434] i wykorzystywano do pomiaru anteny [435], cewki [337] lub wzmacniacza [436]). Napięcie stałe oraz rezystancję próbek metodą dwupunktową mierzono za pomocą laboratoryjnego multimetru cyfrowego (Escort 3145 A, Tajwan). Rezystancję i indukcyjność wykonanych cewek zmierzono za pomocą miernika indukcyjności TH2816A (Tonghui, Chiny) w częstotliwości 200 kHz i napięciu 100 mV.

Wydrukowane linie transmisyjne zostały przetestowane na uchwycie testowym wykonanym z bloku czystej miedzi z dwoma złączami SMA spłaszczonymi i obrobionymi za pomocą frezarki i papieru ściernego o ziarnistości 1200 w celu usunięcia warstwy utleniania i zmniejszenia chropowatości powierzchni - podobne podejście do przygotowania płaszczyzny uziemienia zostało wykonane przez Hendershot et al. [437]. Przed montażem próbki zostały spłaszczone za pomocą drukowanego bloku 3D, aby zapewnić zgodność między zmierzonymi próbkami a symulacją (Rysunek 34).



Rysunek 34 Uchwyt testowy do pomiarów linii transmisyjnych

Pomiary toru antenowego wykonano przy użyciu komercyjnej anteny yagi wykonanej w technologii PCB o współczynniku odbicia -32,5 dB w częstotliwości 2,45 GHz. Obszar Fraunhofera dla tej anteny wynosi:

$$R_f = \frac{2 \cdot D^2}{\lambda} = \frac{2 \cdot (0.04\text{m})^2}{0.1224\text{m}} = 2.61\text{cm}, \quad (4)$$

gdzie $D=0,04$ m to szerokość najszerszego elementu anteny w kierunku promieniowania, a $\lambda=0,1224$ m to długość fali sygnału 2,45 GHz. Ponieważ wartość R_f jest mała, a badane anteny są elektrycznie małe, odległość między nimi powinna wynosić kilka długości fali - wartość ta waha się między jedną [438] a dziesięcioma [439], jednakże w podobnych badaniach zwykle wskazywana jest wartość większa od dwóch [76], [392], co dla częstotliwości 2,45 GHz oznacza wartość większą od 24,4 cm. Odległości między anteną nadawczą a anteną odbiorczą ustawiono na 25, 30 i 35 cm, aby zmierzyć współczynnik transmisji łącza antenowego w dalekim polu. Na jego podstawie obliczono średni zrealizowany zysk energetyczny przy użyciu metody trzech anten. Po wyznaczeniu jego wartości dla anteny PCB yagi, użyto jej jako odniesienia w metodzie dwóch anten przy wyznaczaniu zysku energetycznego anten drukowanych [439].

Metody te polegają na rozwiązaniu równań transmisji Friis'a:

$$P_R = P_{in} G_A G_B \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2, \quad (5)$$

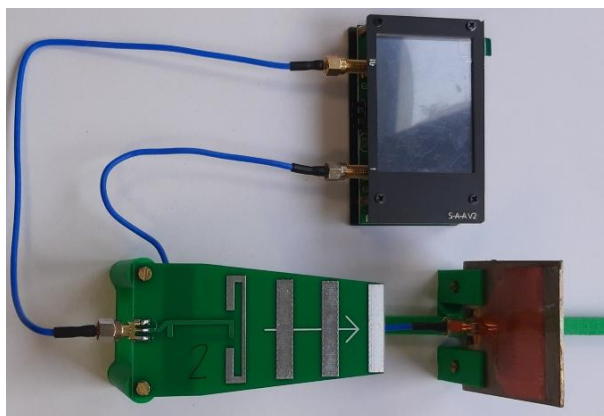
gdzie P_R oznacza moc dostępną w terminalu anteny odbiorczej, P_{in} oznacza moc pobraną przez antenę nadawczą, G_A oznacza zysk energetyczny anteny nadawczej, G_B oznacza zysk energetyczny anteny odbiorczej, λ oznacza długość fali, a R odległość między antenami. W przypadku gdy całość tego wyrażenia zapisuje się w postaci logarytmicznej i wykorzystuje S_{21} do rozwiązania równania bądź układu równań, G_A i G_B stanowią zrealizowane zyski energetyczne anten, nieuwzględniające strat odbiciowych anten.

Następnie obliczono bezwzględny zysk energetyczny (zwany też po prostu zyskiem energetycznym), biorąc pod uwagę współczynnik odbicia anteny: [439]

$$G = \frac{G_r}{(1 - |\Gamma|^2)}, \quad (6)$$

gdzie, G oznacza zysk energetyczny, G_R oznacza zrealizowany zysk energetyczny, a Γ jest współczynnikiem odbicia anteny w postaci liniowej.

Pomiary przeprowadzono na stanowisku (Rysunek 35) samodzielnie wydrukowanym przy pomocy techniki druku 3D FDM, a orientację między antenami ustawiono tak, aby zmaksymalizować transmisję.



Rysunek 35 Wydrukowane FDM stanowisko do pomiarów anten w torze antenowym

Efektywność konwersji mocy (PCE) prostownika z układem dopasowania impedancyjnego zmierzono zgodnie ze wzorem $\eta_{PCE} = \frac{P_{load}}{P_{retrieved}}$, przyjmując jako P_{load} kwadrat napięcia zmierzonego na rezystorze obciążającym antenę prostowniczą podzielony przez rezystancję owego rezystora, natomiast $P_{retrieved}$ jako moc generatora sygnału LibreVNA (ZeenKo, Chiny) [59], [72].

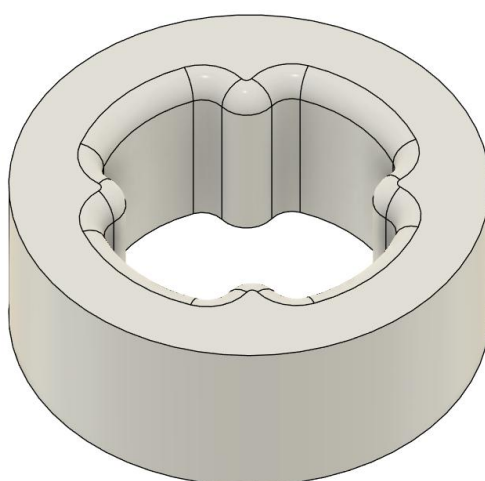
Pomiar szerokości drukowanych linii w celu przygotowania wzorów próbek i zademonstrowania geometrii krytycznych punktów wzoru, a także w celu jakościowego porównania próbek wyprodukowanych przy użyciu różnych tuszów pod względem szerokości i *Overspray'u*, wykonano przy użyciu mikroskopu D-EL2 (Motic, USA) z dedykowaną płytą kalibracyjną i oprogramowaniem. Chropowatość próbki wydrukowanej metodą SLA zmierzono przy pomocy Profilometru z Profilografem Talysurf 10 (Tayler-Hobson, USA), z nastawionym zakresem pomiarowym do pięciu mikrometrów. Masę mierzono przy pomocy wagi laboratoryjnej LWM03 (Mensor, Polska).

5. Prace konstrukcyjne

W celu wykonania prac zawierających się w niniejszej rozprawie dokonano doposażenia i modyfikacji elementów stanowiska do druku aerozolowego. Prace miały na celu rozszerzenie możliwości stanowiska o funkcje pozwalające na pełniejszą kontrolę nad procesem druku aerozolowego poprzez możliwość obserwacji i kontroli kluczowych parametrów procesowych.

Atomizer ultradźwiękowy

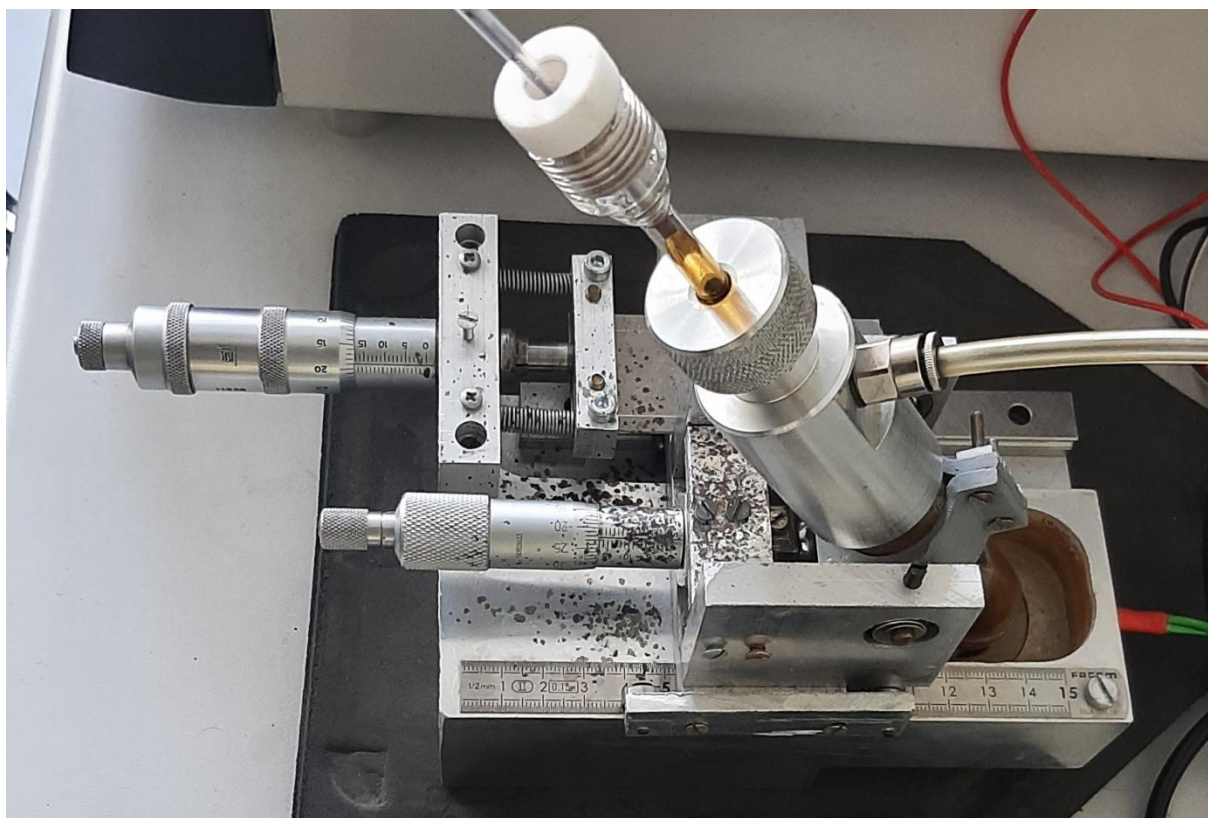
Pierwszym wykonanym elementem był atomizer ultradźwiękowy. Atomizer ultradźwiękowy jest urządzeniem służącym do atomizacji ultradźwiękowej tuszu. Do jego zadań należą przekazanie energii źródła ultradźwiękowego do tuszu i ustawienie położenia kąтового i liniowego próbki. Uprzednio użytkowany atomizer nie posiadał możliwości regulacji mocy, położenie kątowe ustawiało się przy pomocy śruby mikrometrycznej zakończonej ścieralnym zakończeniem z tworzyw sztucznych, a regulacja położenia liniowego była utrudniona ze względu na zakleszczanie się mechanizmu umiejscowionego na dwóch prowadnicach liniowych. Nowy atomizer wyposażono, podobnie jak uprzedni, w pastylkę ultradźwiękową z układem sterującym z ultradźwiękowego nawilżacza. Urządzeniem z którego pobrano układ jest HUM 282 (Hyundai Electronics, Korea Południowa) o mocy 35W. Układ kontrolujący z możliwością płynnej regulacji mocy umieszczono w wydrukowanej na drukarce FDM obudowie i umiejscowiono przy nim dodatkowy wentylator ze względu na wysokie straty ciepłe aktywnych elementów układu.



Rysunek 36 wkładka do atomizera kolimująca ultradźwięki

Podstawą atomizera jest rama wykonana z pojedynczego bloku duraluminium AW2017A frezowanego na frezarce CNC F1 (EMCO, Austria). W bloku wykonano

podfrezowania do montażu pojedynczej przewodnicy liniowej i pastylki ultradźwiękowej z uszczelką, oraz zbiornik na wodę dejonizowaną. Na frezarce wykonano również wkładkę kolimującą ultradźwięki, zgodnie ze wzorem z poprzedniego atomizera ultradźwiękowego (Rysunek 36).



Rysunek 37 Atomizer ultradźwiękowy do AJP

Przy użyciu narzędzi ręcznych wykonano pozostałe elementy mechanizmu, przyłączone do listwy zamocowanej na karetkce umieszczonej na przewodnicy liniowej (Rysunek 37):

- mocowanie łożysk stanowiących suport mechaniczny umożliwiający swobodny przesuw liniowy całości układu po linijce stalowej.
- układ ustawienia położenia kąтового wyposażony w głowicę mikrometryczną zakończoną mocowaniem kształtowym kulki stalowej swobodnie przesuwającej się, do której dociskany jest przy pomocy dwóch sprężyn naciągowych ułożyskowany na dwóch łożyskach kulkowych tocznych uchwyt. Uchwyt wyposażony jest w wyjmowaną drukowaną FDM obejmą pozwalającą na zamocowanie fiolki nd24 o pojemności 40ml z siłą pozwalającą przykręcać tuleje łączącą atomizer z pozostałymi elementami stanowiska bez ryzyka zmiany położenia fiolki.

- Połączenie listwy z zamocowanym do ramy układem ustawienia położenia liniowego wyposażonym w głowicę mikrometryczną.

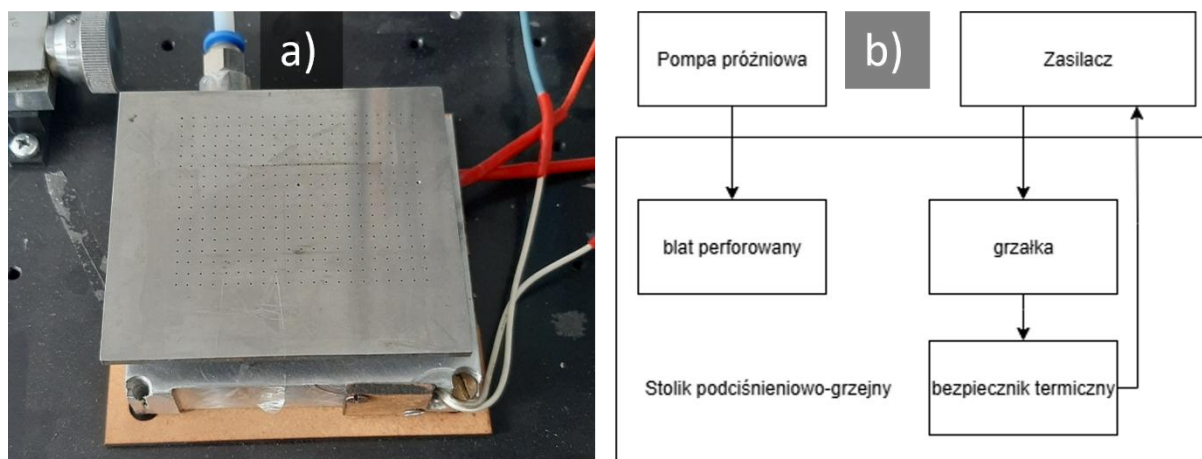
Umożliwienie płynnej regulacji zarówno mocy, jak i położenia liniowego i kąтового bez konieczności radzenia sobie ze startym tworzywem sztucznym pozwoliło na dokładne ustawienie optymalnego zestawu tych wartości do uzyskania wydajnej generacji mgły aerozolowej przy ograniczeniu strat cieplnych w atomizerze, co ma kluczowe znaczenie dla badań przeprowadzonych w rozdziale 6.1.

Stolik podciśnieniowo-grzewczy

Kolejnym wykonanym elementem jest stół podciśnieniowo – grzewczy. Wykorzystywany jest on w urządzeniach firmy Optomec i umożliwia zarówno dokładne zamocowanie podłoża w formie elastycznego arkusza papieru lub folii, jak i zwiększenie temperatury podłoża, co wpływa na wydruk poprzez ograniczenie rozplływania się materiału podczas nadruku wielu warstw na skutek wstępnego odparowania rozpuszczalnika z nadrukowanego wzoru. Stół grzewczy był również wykorzystywany na stanowisku wykorzystywanym przez autora rozprawy podczas przygotowania próbek do artykułu o tuszach [269] w którym przyjęto pewne założone proporcje między wysokością a szerokością linii, które wykorzystano podczas przygotowania modeli do symulacji linii transmisyjnych i anten w niniejszej pracy. W celu uzyskania zgodności założonego kształtu z rzeczywistymi wydrukami i uzyskania wysokiej jakości próbek konieczne było wykonanie owego elementu oprzyrządowania stanowiska. Układ pneumatyczny składa się z pompy próżniowej ROB-10398 (SparkFun, USA) połączonej ze stołem elastyczną rurką pneumatyczną. Układ grzewczy składa się z grzałki od drukarki 3D połączonej liniowo z bezpiecznikiem termicznym normalnie otwartym, który zamyka obwód gdy temperatura w miejscu jego zamocowania osiągnie 70 °C, zasilanych przy pomocy zasilacza 12V 2A.

Do przygotowania stolika (Rysunek 38) wykorzystano gotowy blat perforowany i kostkę duraluminiową frezowaną w celu wykonania:

- przestrzeni łączącej blat z gniazdem pneumatycznym na rurkę 6mm,
- otworu na grzałkę do drukarek 3D FDM
- otworu na bezpiecznik temperaturowy
- połączenia blatu z kostką i blatem stanowiska do druku aerozolowego przez przekładkę z płyty HDF izolującą termicznie.



Rysunek 38 Stolik podciśnieniowo-grzewczy a) zdjęcie b) schemat

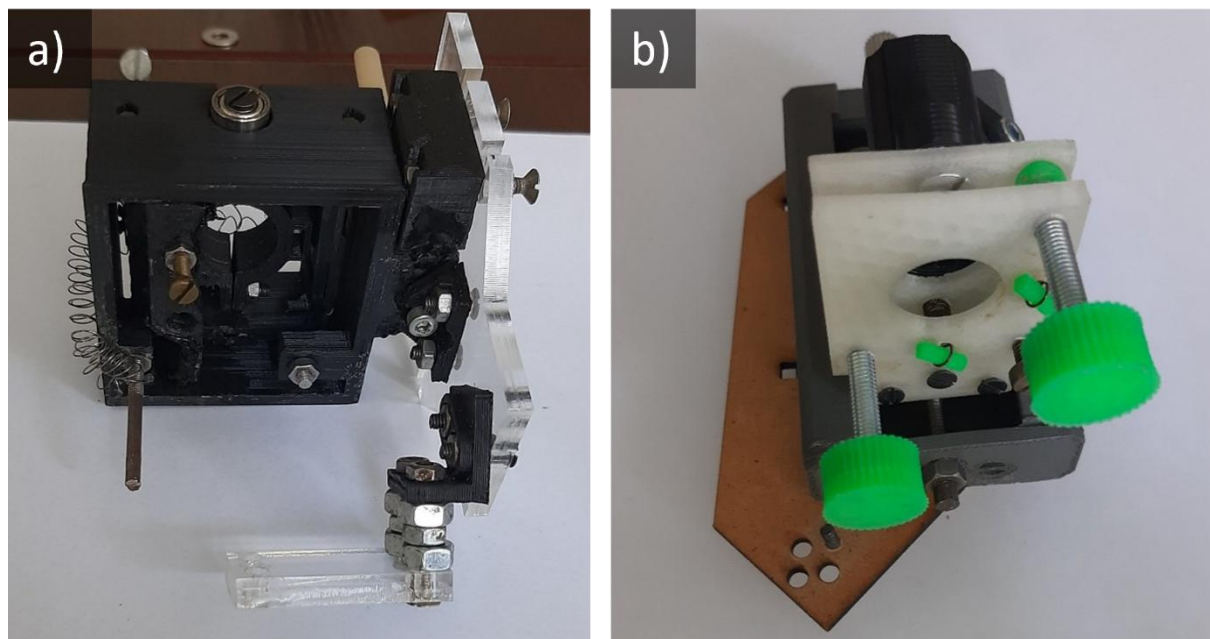
Zrealizowany stół umożliwia uzyskanie na powierzchni stołu temperatury ok. 65 °C, co jednocześnie pozwala na efektywne odparowanie części rozpuszczalnika podczas druku i jest wartością poniżej progu oparzenia wg. *PN-EN ISO 13732-1:2006 Ergonomia środowiska termicznego*, umożliwiając obsługę bez konieczności dodatkowych środków ochrony osobistej. Zakres temperatury podłoża między 60 a 80 stopni °C został również wskazany przez Smith'a jako optymalny do uzyskania wąskich wysoko przewodzących linii [279].

Mocowanie kamery

Kolejnym elementem istotnym do uzyskania wysokiej jakości wydruków jest umożliwienie obserwacji procesu podczas druku przy użyciu kamery. Brak obserwacji procesu podczas druku może skutkować osiąganiem suboptymalnych rezultatów – obserwacja gołym okiem linii o szerokości 30 µm pozwala jedynie zaobserwować czy linia jest czy jej nie ma oraz czy ilość tuszu nie jest znacząco za duża co powoduje znaczne rozlewanie się linii podczas nadruku. Obserwacja podczas procesu pozwala na zaobserwowanie morfologii pojedynczych nakładanych warstw na żywo i identyfikację momentu gdy linia podczas druku dopiero zaczyna się rozlewać, co umożliwia zmianę parametrów lub szybsze zakończenie druku nieprawidłowo wykonanego wzoru. Taki sposób obserwacji jest też kluczowy dla zaobserwowania momentu rozpoczęcia prawidłowego nanoszenia aerozolu na podłoże podczas przygotowania do druku. Prawidłowe nanoszenie następuje gdy aerozol w obserwowanym punkcie jest nanoszony w ilości jedynie odrobinę mniejszej od takiej w której tusz rozlewa się (objawia się to charakterystycznymi kropkami promieniście wylewającymi się z głównej strugi) i właśnie zaczyna formować się filar z tuszu.

W komercyjnych stanowiskach mocowanie kamery do stanowiska jest realizowane przy pomocy manipulatorów optycznych np. K6XS (Thorlabs, USA) zamocowanych na

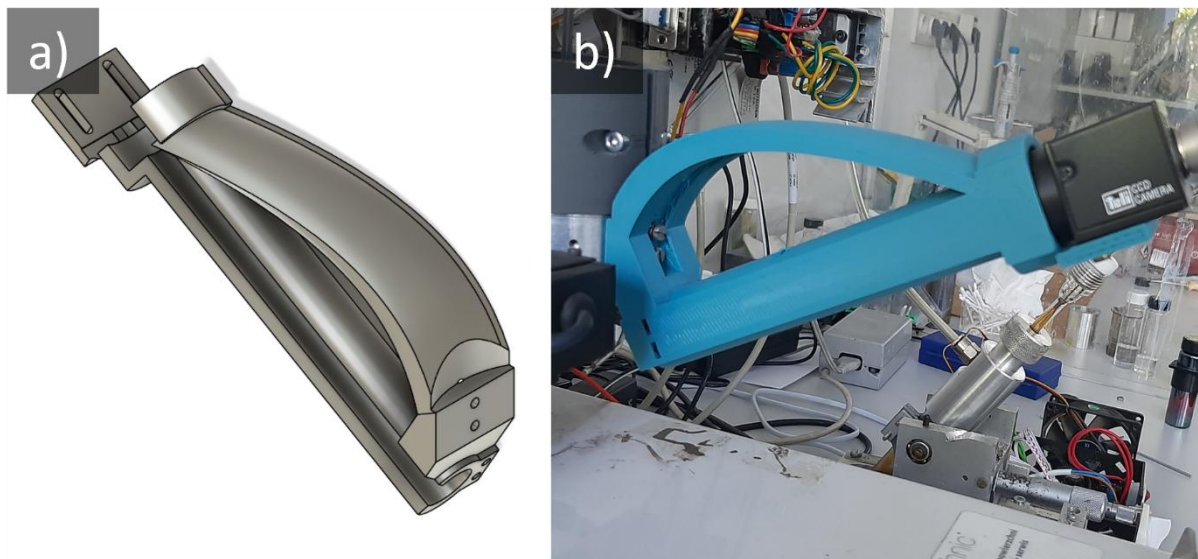
stolikach liniowych. Pierwotne projekty wykonywane przy pomocy druku 3D FDM i cięcia laserowego miały na celu odwzorowanie kinematyki takiego układu. Pierwszy projekt (Rysunek 39a) składał się z dwóch ramek ułożyskowanych na małych liniowych łożyskach kulkowych tocznych, manipulowanych przy pomocy śrub i sprężyn naciągowych. Taki układ pozwalał na dokładną manipulację, jednakże w połączeniu z znacznej długości obiektywem makro VS-MC2-60 (VS Technology, Japan) i masą kamery tak delikatny układ podczas wykonywania ruchów szybkich przez stanowisko rozstrajał się.



Rysunek 39 a) pierwszy projekt mocowania kamery b) drugi projekt mocowania kamery

Drugi układ (Rysunek 39b) ściślej odwzorowywał komercyjne układy. Wykonano kulkowy stolik liniowy przy pomocy druku 3D FDM i sztywny manipulator 3-osiowy. Udało się wyeliminować rozstrajanie się maszyny podczas pracy, więc rzeczne mocowanie kamery pozwalało już na dokładną kalibrację procesu. Wciąż jednak nie pozwalało na stabilną obserwację procesu podczas druku – wysoka podatność układu na drgania sprawiała, że po przemieszczeniu głowicy w miejsce wykonywania oddzielnej części wzoru przez parę sekund nie dało się obserwować wydruku ze względu na drgania. Wiąże się to też z innym niż w komercyjnych urządzeniach firmy Optomec układem kinematycznym stosowanego stanowiska – w urządzeniach komercyjnych głowica pozostaje nieruchoma w osiach X i Y, natomiast urządzenie DispenseMate D593 porusza głowicą w osi X, co jest źródłem dodatkowych sił działających na kamerę. W związku z tym wykonano stałe mocowanie. Stałe stabilne mocowanie zostało zaprojektowane w oparciu o dane katalogowe producenta obiektywu wskazującego odległość pracy równą 57,5 mm oraz dostępne miejsce na

zamocowanie, dążąc do uzyskania mocowania o jak największym nachyleniu względem powierzchni. Odległość od końca dyszy do podłoża eksperymentalnie dobrano na 8mm – dalej jest ona niższa niż 10mm w której druk aerozolowy jedynie nieznacznie zmienia swoje właściwości wraz z odległością od dyszy, a jednocześnie pozwala na swobodną pracę ruchomej przesłony i prawidłową obserwację procesu. Na podstawie tych informacji i zmierzonych wymiarów geometrycznych stanowiska dobrano kąt 30 stopni i iteracyjnie wykonano mocowanie pozwalające na pewne zamocowanie kamery do stanowiska.



Rysunek 40 Stałe mocowanie kamery a) model b) zamocowane na stanowisku.

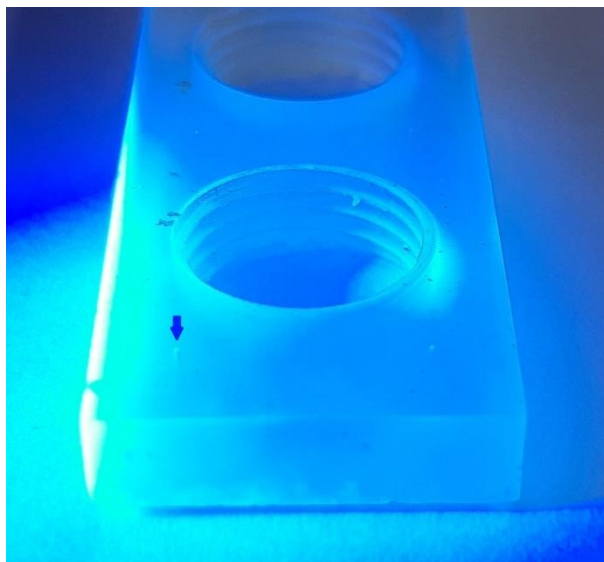
Wykonane mocowanie pozwala na ciągłą obserwację procesu podczas druku, a dodatkowe otwory mocujące dają możliwość dalszego rozszerzenia jego funkcjonalności przez montaż źródła światła.

Głowica mSLA

Znaczący koszt w stanowisku stanowi głowica do druku. Stanowiska wielogłowicowe są dość kosztowne i rzadko spotykane, a jeżeli używa się stanowiska wyposażonego w pojedynczą głowicę, przed użyciem kolejnego materiału trzeba ją dokładnie umyć co generuje dodatkowe straty czasowe i potencjalne zanieczyszczenie wydruku innym niż zamierzono materiałem. Odpowiedzią na ten problem jest możliwość wykonywania tanich głowic które można w łatwy sposób wymienić i używać osobnych do poszczególnych badanych materiałów. Na podstawie zdobytych doświadczeń w trakcie pracy doktorskiej podjęto decyzję o rozpoczęciu prac mających na celu wykonanie głowicy przy pomocy druku mSLA, pozwalającego na wykonanie precyzyjnych wydruków. Pierwszą próbą było wydrukowanie tych samych elementów co użyte podczas projektowania głowicy wykonanej z metalu.

Gwinty zamodelowano w oprogramowaniu do projektowania, a następnie wszystkie elementy wydrukowano. Elementy skręcane wymagały dodatkowego docierania aby ze sobą współpracowały, co świadczy o konieczności zmiany wymiarów gwintów by mogły ze sobą współpracować od razu po wydrukowaniu. W związku z powyższym przeprowadzono weryfikację gwintów wewnętrznych wskazującą o ile powinna być odsunięta ich płaszczyzna w głąb materiału przy użyciu funkcji odsuwania dostępnej w oprogramowaniu by współpracowały poprawnie z elementami gwintowanymi np. złączami pneumatycznymi. W próbie wykonano również otwory w celu określenia minimalnej wielkości otworów które można wykonać przy pomocy używanej drukarki i żywicy.

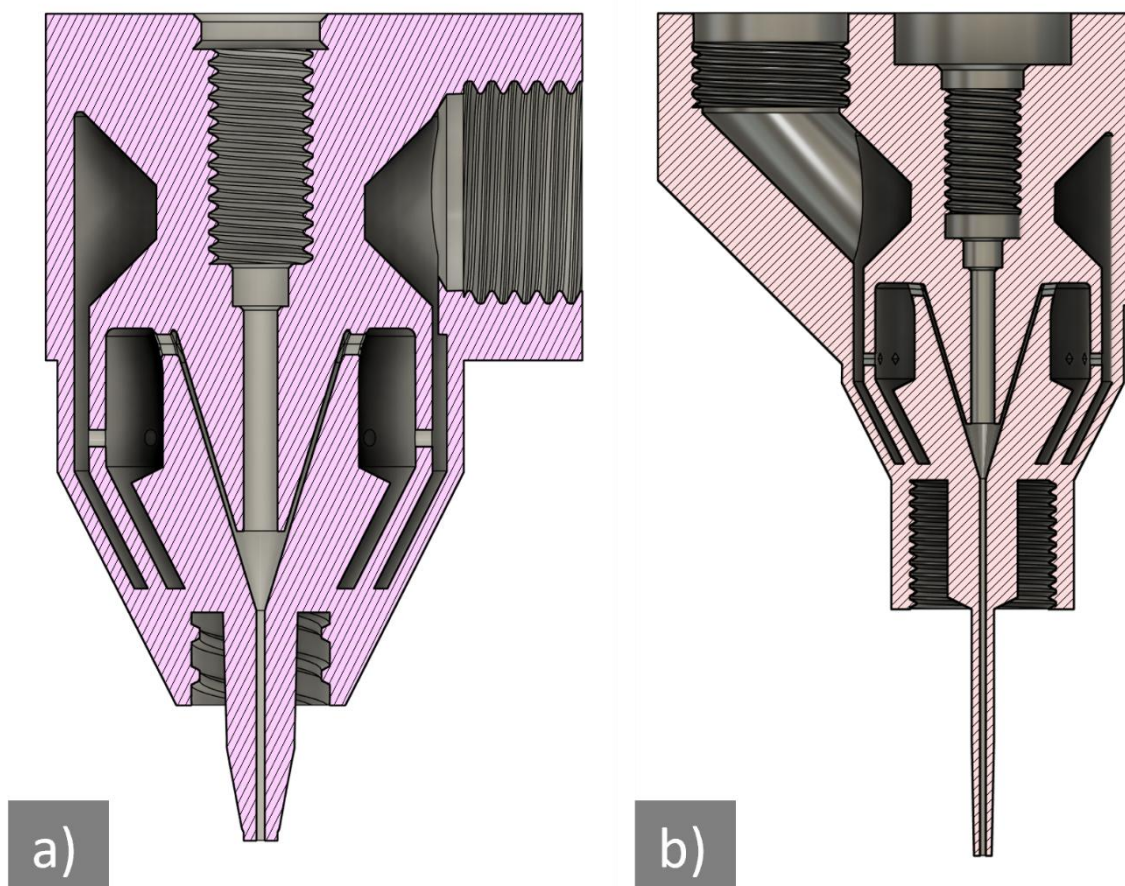
Weryfikację przeprowadzono przy wykorzystaniu parametrów wskazanych przez producenta dla użytkowanej żywicy, z wyjątkiem zwiększonej rozdzielczości w osi Z do grubości warstwy 0,01 mm. Wynikiem badania było zidentyfikowanie 0,2 mm odsunięcia płaszczyzny gwintów jako odległości wystarczającej by zapewnić płynną współpracę między wykonanym gwintem wewnętrznym, a metalowym gwintem zewnętrznym dla gwintu rurowego G1/4. Otwory o średnicach między 50, a 150 μm nie były widoczne, otwory o średnicy 200 μm były widoczne jedynie jako mała plamka na powierzchni, natomiast otwory o średnicy 250 μm były wykonane częściowo, co wskazano na Rysunku 41.



Rysunek 41 Wdruk SLA z wskazanym częściowo wykonanym kanałem o średnicy 250 μm

Całość konstrukcji wymaga również dodatkowej obróbki końcowej oraz zestawu uszczelek typu „o-ring” by móc być używana. By ograniczyć zużycie materiału, czas na obróbkę i konieczność zakupu uszczelek, podjęto próbę wykonania jednoelementowej głowicy. Założeniem do projektowania głowicy było użycie dyszy wykorzystującej złącze

luer lock, wzorując się na głowicy do druku aerozolowego firmy IDS. Dysze wykorzystujące złącze luer lock są niedrogie i łatwo dostępne, w przeciwieństwie do ceramicznej dyszy firmy Optomec wykorzystywanej w stanowisku do druku aerozolowego. Pierwsza wersja wydrukowanej głowicy po przekrojeniu miała zatkane kanały doprowadzające gaz nośny – żywica została zamknięta na samym dnie kanału pneumatycznego i nie mogąc być w sposób efektywny z tamtąd wymyta utwardziła się. W kolejnej wersji zastosowano już dodatkowe kanały ociekowe, pozwalające ociec nadmiarowi żywicy i pozostawić drożnymi kanały pneumatyczne (Rysunek 42a). Ten model głowicy miał jednak zasadnicze wady – na gnieździe luer lock wykonanym metodą stereolitografii przy pomocy zewnętrznej wtyczki do oprogramowania Fusion nie udało się wykonać instrukcji odsunięcia powierzchni, a do tego było one dość podatne na uszkodzenia, więc w kolejnej wersji głowicy założono użycie wkręcanej metalowej przejściówki M12 na złącze luer lock. Gwint na złącze pneumatyczne o osi równoległej do płaszczyzny ekranu również nie wydrukował się poprawnie, w związku z czym w kolejnej wersji głowicy założono wykonanie go w orientacji jego osi prostopadłej do ekranu drukarki.



Rysunek 42 Przekroje poprzeczne kolejnych modeli drukowanych głowic do druku aerozolowego a) z wdrukowanym złączem luer-lock b) z gwintem na metalową przejściówkę do złącza luer lock

Ten model, przedstawiony na Rysunku 42b, był podstawą do wykonania konsultowanej przez autora rozprawy pracy inżynierskiej pod tytułem „Projekt i wykonanie głowicy do druku aerozolowego z zastosowaniem technologii stereolitografii”, w której był on optymalizowany. Ostateczna wersja głowicy zamocowana na stanowisku do druku aerozolowego i wykorzystana w procesie druku zgodnym z uprzednio ustalonymi parametrami dla oryginalnej głowicy, umożliwiła nadruk ścieżki na podłożu papierowym, choć stopień koncentracji strugi jest niższy od osiąganego dla głowicy duraluminiowej używanej w drukarce aerozolowej.

W niniejszym rozdziale przedstawiono prace konstrukcyjne rozszerzające możliwości stanowiska do druku aerozolowego: atomizer umożliwił modyfikację zarówno położenia fiolki z tuszem jak i mocy źródła ultradźwięków, stół podciśnieniowo-grzewczy umożliwił trwałe zamocowanie i podgrzanie podłoża, a mocowanie kamery stabilną obserwację procesu podczas druku. Weryfikacja możliwości druku aerozolowego przy pomocy głowicy drukującej wytworzonej nisko-kosztowo techniką przyrostową wskazuje na potencjał takiej metody realizacji i modyfikacji głowic, zwłaszcza biorąc pod uwagę ciągły rozwój techniki druku mSLA, zarówno pod względem funkcjonalności urządzeń, rozdzielczości ekranów jak i właściwości samych żywic.

6. Anteny prostownicze

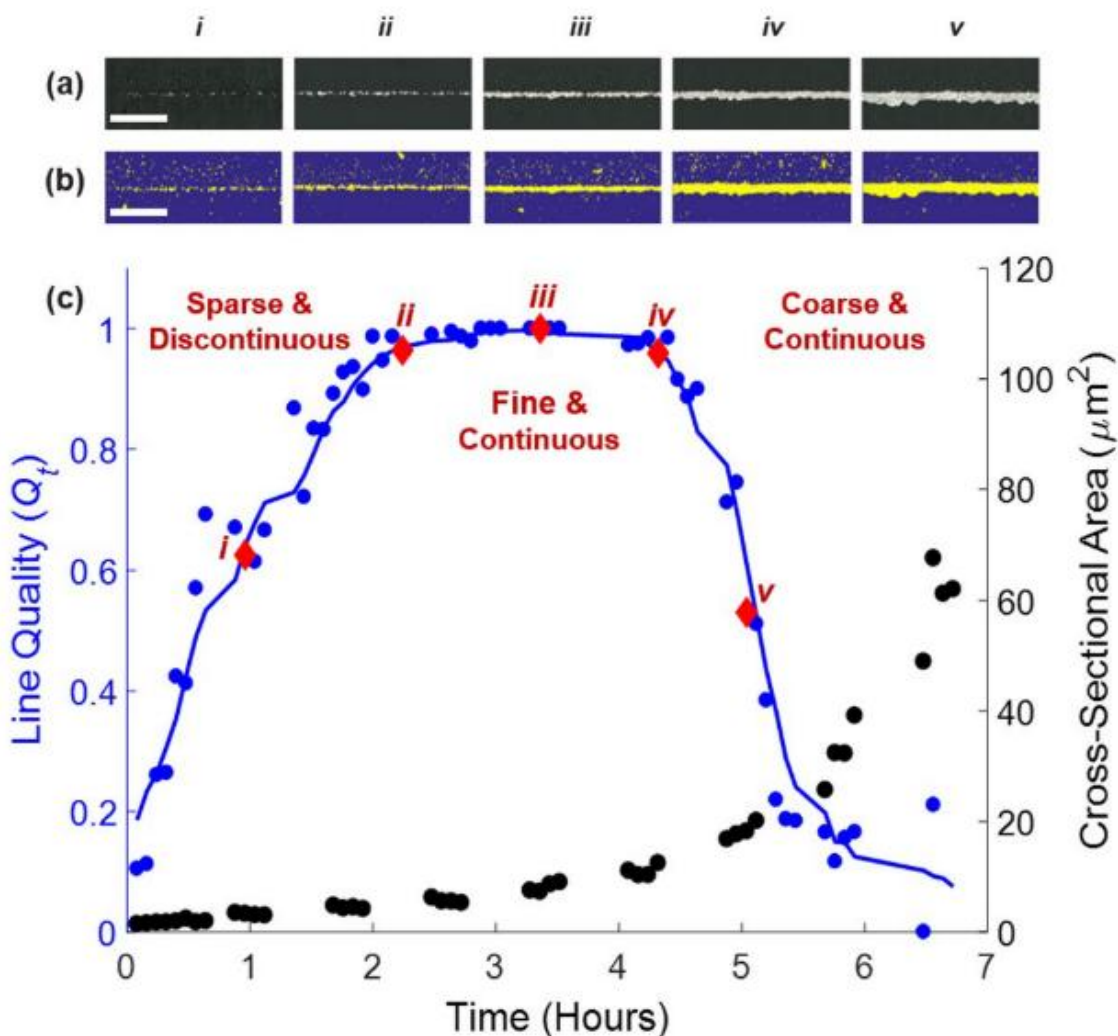
6.1. Prace technologiczne

Optymalizacja procesu

Pierwszym krokiem była optymalizacja procesu druku w celu uzyskania długotrwałej jednorodności. Nadruk anten pracujących w częstotliwości 2,45 GHz, nawet przy wykorzystaniu metody siatkowej, jest procesem długotrwałym. Klasycznie proces druku aerozolowego wg. obecnego stanu techniki składa się z etapów:

- Atomizacji tuszu – po ustawieniu atomizera w pozycji pozwalającej osiągnąć aerozol o dużej gęstości, należy pozwolić tuszowi odpowiednio się zhomogenizować i nagrzać by osiągnął właściwą technologicznie lepkość.
- Ukształtowania odpowiedniej strugi aerozolu – ustawia się wcześniej użyte parametry procesowe dla danego tuszu i zmienia je w nieznacznym stopniu w celu uzyskania odpowiedniej morfologii nadruku.
- Druku – wykonuje się nadruk kolejnych próbek. Pomiędzy poszczególnymi seriami próbek weryfikuje się zmiany w morfologii nadruków i w miarę potrzeb modyfikuje ustawienia parametrów przepływu gazów. Jeżeli nie zostały wykonane wszystkie zaplanowane próbki, ale modyfikacja parametrami druku nie pozwala już na uzyskanie odpowiedniego kształtu linii, dysza została zatkana lub też w rurce doprowadzającej tusz z atomizera do głowicy krople zaczynają spływać w dół w kierunku atomizera (powstaje tzw. *kropla*), konieczne jest zakończenie procesu druku. Brak zakończenia wydruku w tym momencie może prowadzić do popłynięcia dużej kropli do głowicy i zanieczyszczenia jej w środku oraz oblania materiału podłożowego tuszem.

Proces ten nadaje się do wykonywania wzorów wymagających krótkich nadruków, jednakże nie nadaje się on do nadruków trwających po parę godzin – nagłe rozpoczęcie rozlewania się tuszu ze strugi może mieć znaczący wpływ na cały układ. Występowanie optymalnego okna technologicznego w druku aerozolowym zostało opisane przez Yoo i in. [287] i przedstawione na Rysunku 43. Wskazuje on w swoich badaniach, że występują dwa istotne momenty podczas procesu druku – gdy linie osiągają ciągłość i gdy zaczynają być zbyt szerokie. Pierwszy z tych momentów występuje, gdy uformowana zostaje odpowiednia ścieżka, a drugi gdy wartość przekroju poprzecznego wydrukowanej ścieżki zaczyna gwałtownie wzrastać.



Rysunek 43 Zależność jakości (ang. Line quality, tu określona jako ciągłość w połączeniu z szerokością poniżej wartości większej od założonej przez autorów) i przekroju poprzecznego (ang. Cross-Sectional Area) uzyskanej aerosolowo linii od czasu nadruku [287].

Jednym z powodów występowania tej zmiany może być wzrost temperatury i schnięcie tuszu w fiolce umieszczonej w atomizerze [278]. Jednakże w przytoczonym wcześniej eksperymencie używany był nawilżacz gazu nośnego (ang. Bubbler) co ogranicza wpływ schnięcia. Natomiast jeżeli powodem jest temperatura należałoby po prostu wraz z czasem zmniejszać moc atomizera aż do uzyskania stabilizacji temperatury.

Przeprowadzono eksperymentalne próby takiego działania – rozpoczynano od wysokiej mocy atomizera, uzyskiwano odpowiednią morfologię linii i w momencie gdy linia zaczynała się rozpylać zmniejszano moc. Nie uzyskiwano jednak stabilizacji, gdyż wartości przepływu gazów osłonowego i nośnego prawidłowe dla początkowego przepływu aerozolu zawsze prowadziły do wystąpienia *kropli* – jak bardzo nie zmniejszałoby się mocy atomizera. W badaniu tym znaleziono jednakże optymalne ustawienie mocy dla nagrzanego atomizera –

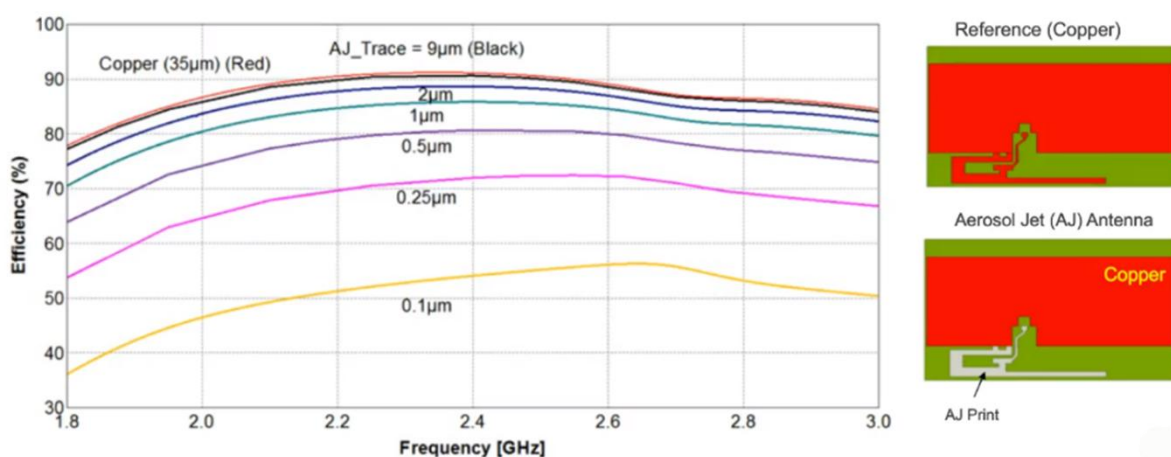
było to ok. 58% mocy maksymalnej układu ultradźwiękowego. Po włączeniu atomizera na tym ustawieniu nie dochodzi od razu do atomizacji – potrzeba na to od półtora do dwóch godzin w zależności od temperatury w laboratorium.

Kolejnym krokiem było ustalenie, czy obniżenie wartości przepływu gazu nośnego wpłynie na możliwość poszerzenia okna technologicznego. Po ustabilizowaniu się mgły aerozolowej przy niskiej wartości mocy atomizera najpierw ustawiano wysoką wartość przepływu gazu nośnego w celu uzyskania skoncentrowanej strugi aerozolu, a następnie gdy zaczynała się rozpylać tą wartość przepływu obniżano. Wielokrotnie powtarzany proces wskazał na wartość $11,2 \pm 0,8$ ml/min (lub ang. standard cubic centimeters per minute, sccm) jako taką, dla której przy szybkim reagowaniu na rozpylanie się linii, dla przepływu gazu nośnego 100 ml/min (korzystnego dla druku wąskich ścieżek) [440], uzyskiwano długotrwałą stabilizację. Jednakże temperatura podczas tego procesu była stała, a jedyną rzeczą zmieniającą się był stopień zabrudzenia rurki dostarczającej aerozol do głowicy. Jeżeli zbyt długo czekano z obniżeniem wartości przepływu gazu nośnego i w konsekwencji zbyt dużo tuszu osadziło się na ściankach rurki doprowadzającej tusz, to w takiej sesji drukarskiej nie udawało się osiągnąć stabilizacji. Uzyskana stabilizacja pozwalała na uzyskanie stabilnych pod względem jakościowym, weryfikowanym poprzez obserwację kamerą strugi aerozolu parametrów, przez okres do 8 godzin, niekiedy jedynie zmienianych przez nieregularne uzupełnianie wody dejonizowanej w atomizerze. Osadzanie się aerozolu na ściankach rurki, wcześniej unikane ze względu na możliwość wystąpienia kropli, stało się elementem kontrolowanym i pożądanym. W przypadku przerw między kolejnymi wydrukami trwających kilka dni nie było więc potrzeby czyszczenia całego układu przedmuchując tusz z rurki z powrotem do fiolki – można uszczelnić głowicę, myjąc jedynie dyszę, by przy kolejnej sesji drukarskiej w sposób przyspieszony osiągnąć stabilizację. Jeżeli w końcu zacznie się formować kropla, wystarczy odciąć dopływ gazu nośnego i poczekać aż kropla opadnie z powrotem do zbiornika, a następnie wznowić druk kontrolując jakość linii i w razie potrzeby czekając na nasycenie się ścianek rurki drobnymi kroplami aerozolu.

Powody występowania saturacji rurki aerozolowej przez tusz nie są do końca poznane. Osadzanie się aerozolu na ściankach rurki jest spowodowane zjawiskami takimi jak dyfuzja dla mniejszych kropli, sedymentacja dla większych i przyciąganie elektrostatyczne z powodu zastosowania nieuziemionej nieprzewodzącej rurki z tworzywa sztucznego [441]. Mimo iż potencjalnie może następować ograniczenie niektórych z tych zjawisk poprzez wytworzenie się warstwy aerozolu na powierzchni wewnętrznej ścianki oraz może następować ponowne

włączenie się osadzonego aerozolu do strumienia płynącego do głowicy, to jednak wartość przepływu gazu w rurce przekłada się na wartość liczby Webera o kilka rzędy wielkości za niską by wystąpiło odrywanie się kropeł z cieczy [442], a zjawiska tego typu nie są zwykle uwzględniane przy liczeniu strat w przepływie aerozolu przez rurki, gdzie założone jest ich okresowe czyszczenie [443].

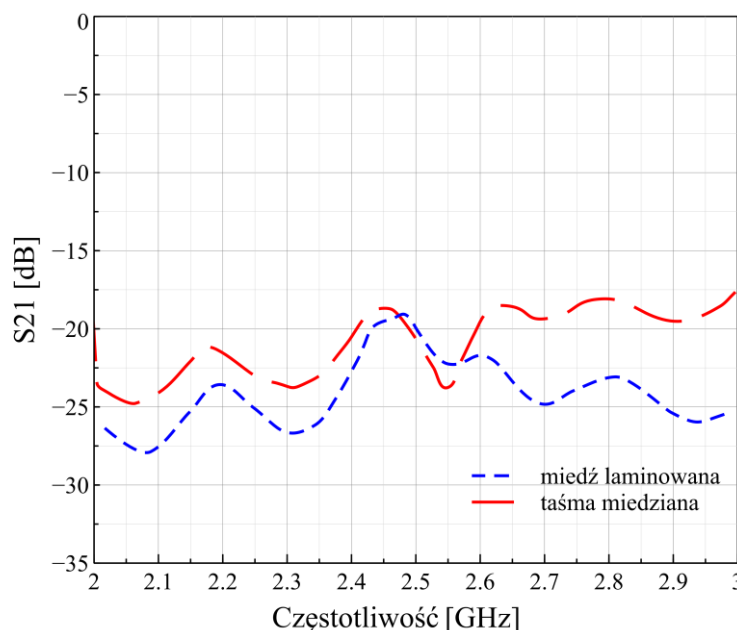
Na podstawie tych badań przyjęto nastawy stosowane w dalszych pracach na 100 ml/min przepływu gazu osłonowego i $11,2 \pm 0,8$ ml/min przepływu gazu nośnego. Prędkość drukowania wynosiła 1,5 mm/s – została ona wskazana w innych badaniach na odpowiednią do wielkości dyszy 150 μm [444], a zwiększenie tej prędkości w połączeniu z niską sztywnością urządzenia zwiększało prawdopodobieństwo wystąpienia nieprawidłowości wynikających z drgań głowicy drukującej. Szerokość pojedynczej sześciowarstwowej drukowanej linii Ag25Te wynosiła 30 ± 2 μm , a odległość między środkami linii dla realizacji szerszych wzorów wynosiła 20 μm . Liczba 6 warstw została dobrana na podstawie uprzednio realizowanych badań i eksperymentalnego doboru ilości warstw do realizacji anten przez firmę optomec, wskazanego w prezentacji dotyczącej realizacji wzorów antenowych przy pomocy druku aerozolowego (Rysunek 44).



Rysunek 44 Porównanie efektywności anteny Bluetooth typu F między miedzią (ang. Copper) a srebrną drukowaną aerozolowo (ang. Aerosol Jet antenna) w zależności od ilości naniesionych warstw (kolejne kolorowe linie od dołu, porównywalne wartości osiągnięto dla 6 warstw aerozolu) [305].

Montaż i układ pomiarowy

Zweryfikowano występującą w literaturze możliwość zastosowania taśmy miedzianej jako zamiennika miedziowanej warstwy nanoszonej na podłoże w celu łatwego przygotowania próbek. Wyprodukowano i zmierzono linię mikropaskową wykonaną na FR4 z laminowaną miedzią jako płaszczyzną uziemienia. Następnie warstwa miedzi została mechanicznie starta i zastąpiona taśmą miedzianą. Wyniki pokazano na rysunku 45.

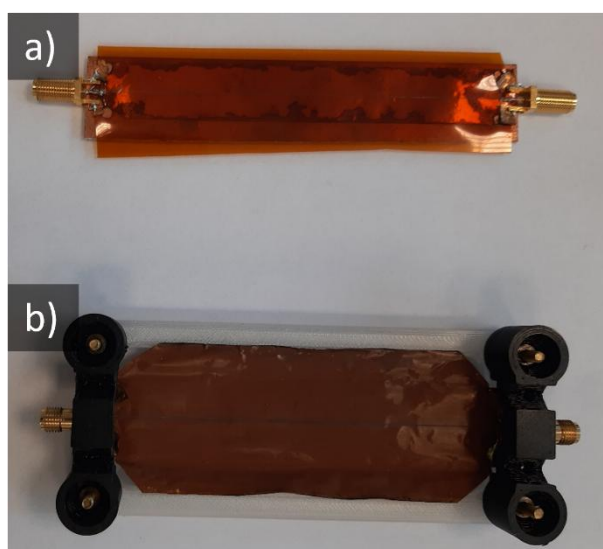


Rysunek 45 S_{21} linii mikropaskowej na FR4 o szerokości 300 μ m i długości 100 mm laminowanej miedzią i z taśmą miedzianą

Wartość S_{21} rośnie przy wykorzystaniu miedzianej taśmy przewodzącej, a jej rozkład nie jest mocno zmieniony. W związku z tym w niniejszych badaniach wykorzystano taśmę miedzianą jako równorzędny zamiennik dla laminowanej płaszczyzny uziemienia.

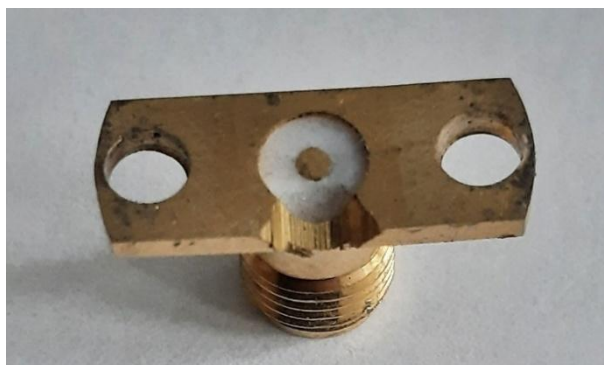
Początek badań próbek wydrukowanych dotyczył wyboru metody montażu do pomiaru próbek. Z racji na zakres pomiarów w dziedzinie częstotliwości radiowych do 18 GHz wykorzystano złącza typu SMA. Komercyjnie dostępne stanowiska do pomiarów linii transmisyjnych wskazywane w literaturze, np. Universal Test Fixture 3680-20 (ANRITSU, Japonia) odrzucono z powodów ekonomicznych. Standardem wykorzystywanym podczas pomiarów próbek układów mikrofalowych na płytkach PCB są złącza krawędziowe – dostosowane do grubości laminatów PCB (najczęściej do 1,58mm). Wykonano próbki układów wykorzystujących ten rodzaj złączy i folię Kapton naklejoną na płytkę PCB, której laminowana warstwa miedzi pełniła rolę płaszczyzny uziemienia (Rysunek 46a). Napotkano trudności w wykonywaniu próbek w ten sposób – próbka może zostać uszkodzona zarówno podczas wpychania złącza na płytkę, jak również podczas lutowania z użyciem stopów niskotemperaturowych na bazie bizmutu – mała powierzchnia styku krawędzi walcowej szpilki złącza z nadrukowanym polem lutowniczym powoduje powstanie znacznych sił podczas lutowania, co skutkuje delaminacją nadrukowanej warstwy od podłoża. W trakcie eksperymentów najwyższy procent udanych próbek nastąpił podczas lutowania próbek w suszarce komorowej w temperaturze 160 stopni, jednakże i tam nie wszystkie próbki wychodziły udane, a biorąc pod uwagę długi czas wykonywania próbek aerozolowych,

możliwość występowania różnic w próbkach z powodów różnic na etapie łączenia ich ze złączami, jak również trudności w symulacji tak sytuowanych względem próbek złączy w oprogramowaniu Ansys HFSS, stwierdzono konieczność zastosowania innego typu łączenia próbek. Kolejnym sposobem montażu był montaż skręcany, wzorując się na wykorzystaniu skręcanych złączy typu endpoint w technikach mikrofalowych, np. 292-05A-6 (Southwest Microwave, USA). Pierwsze elementy montażowe wykonano przy wykorzystaniu standardowego złącza kąтового SMA z wyrównanymi długościami nóżek za pomocą papieru ściernego i zamocowanego w obudowie wykonanej z polimeru PLA przy pomocy drukarki 3D FDM (Rysunek 46b).



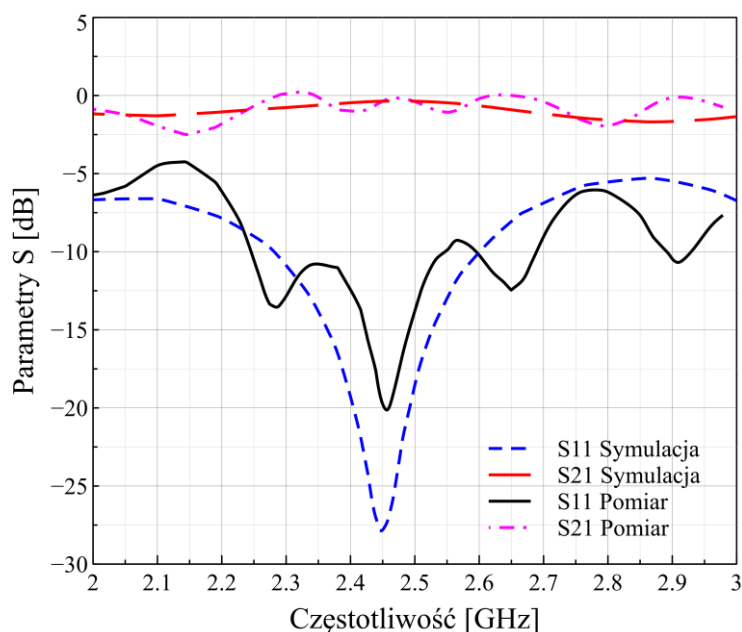
Rysunek 46 Linie transmisyjne a) przylutowane do złącz krawędziowych b) zaciśnięte między podłożem drukowanym i kątowymi gniazdami SMA.

Ten sposób montażu wymagał jednakowoż zakończenia próbek linii transmisyjnych przy użyciu bardzo wąskiego paska przy jednoczesnym naciągnięciu ich w celu zachowania odpowiedniej geometrii do pomiarów. W związku z znaczącym wpływem montażu w uchwycie na wynik pomiaru rezystancji (próbka niezamocowana $57,5 \pm 0,5 \Omega$, a zamocowana $127 \pm 15 \Omega$), wykorzystany został alternatywny sposób montażu skręcane, przy wykorzystaniu skręcanych złączy SMA RF2-44A-T-00-50-G (Adam Tech, USA), obrobionych mechanicznie w celu nadania im kształtu zbliżonego do trudnodostępnych złączy z łezkowym wyżłobieniem, np. 141-0701-231 (Johnson, USA). Dzięki wykorzystaniu tych złączy (Rysunek 47) przykręcanych do miedzianych bloków obrobionych przy pomocy papieru ściernego (tak miękkiego materiał nie nadaje się do dokładniejszych typów obróbki dokładnościowo-gładkościowej, np. docierania mechanicznego) uzyskano połączenia pozwalające na powtarzalny montaż zarówno anten jak i linii transmisyjnych.



Rysunek 47 Gniazdo SMA po obróbce pozwalającej na użycie go jako gniazda zaciskowego do badania elektroniki drukowanej w częstotliwościach radiowych.

Układ pomiarowy (VNA) został zweryfikowany do pomiarów drukowanych linii transmisyjnych przy użyciu linii transmisyjnej na podłożu Diclad 880 o grubości 0,51 mm. Wyniki symulacji linii transmisyjnej o szerokości 0,5 mm i długości elektrycznej 180° oraz wyniki pomiarów S11 i S21 pokazano na Rysunku 48.



Rysunek 48 Weryfikacja konfiguracji pomiarowej - symulowana i zmierzona linia transmisyjna o szerokości 0,5 mm na podłożu Diclad 880 o grubości 0,51 mm.

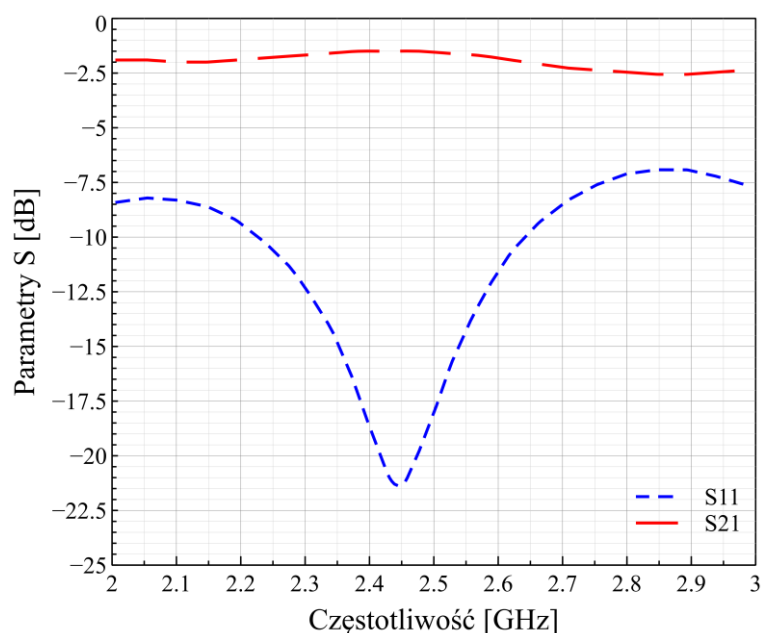
Wyniki S11 wykazują wysoki stopień zgodności między symulacją a pomiarem, a wartości S21 próbki o długości elektrycznej 180° i próbki o długości elektrycznej 90° są zgodne ($-0,5 \pm 0,1$ dB), co wskazuje na poprawne wykonanie próbek o wysokiej wartości współczynnika transmisji.

Zrealizowane w tym podrozdziale badania pozwalają na uzyskanie wystarczająco długiego czasu trwania okna technologicznego druku aerozolowego do realizacji potencjalnie

długotrwałych wzorów anten, a także weryfikują użyteczność pewnych rozwiązań pomiarowych i z zakresu sposobu realizacji układów do dalszych badań, pozwalając wybrać te umożliwiające realizację i pomiar w sposób najbardziej powtarzalny i minimalizujący ryzyko uszkodzenia próbek.

6.2. Drukowana aerozolowo siatkowa antena mikropaskowa typu „patch”

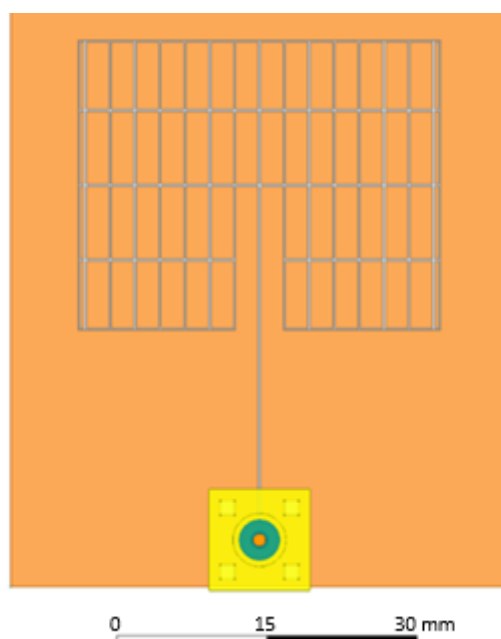
Iteracyjna symulacja drukowanej AJP linii mikropaskowej (grubość 10 μm , początkowa wartość przewodności wydrukowanych wzorów została ustawiona jako rząd wielkości mniejsza niż przewodność litego srebra) między dwoma portami falowymi doprowadziła do identyfikacji linii mikropaskowej o długości 106 mm i nominalnej szerokości 190 μm charakteryzującej się lokalnym minimum wartości S11 w częstotliwości 2,45 GHz (Rysunek 49). Linia ta została użyta jako linia transmisyjna łącząca pole kontaktowe z anteną oraz jako linia w siatkowej konstrukcji anteny. Wykonanie linii o takiej szerokości wiąże się z drukiem wielu linii aerozolowych obok siebie.



Rysunek 49 Symulacja drukowanej linii transmisyjnej AJP o szerokości 190 μm .

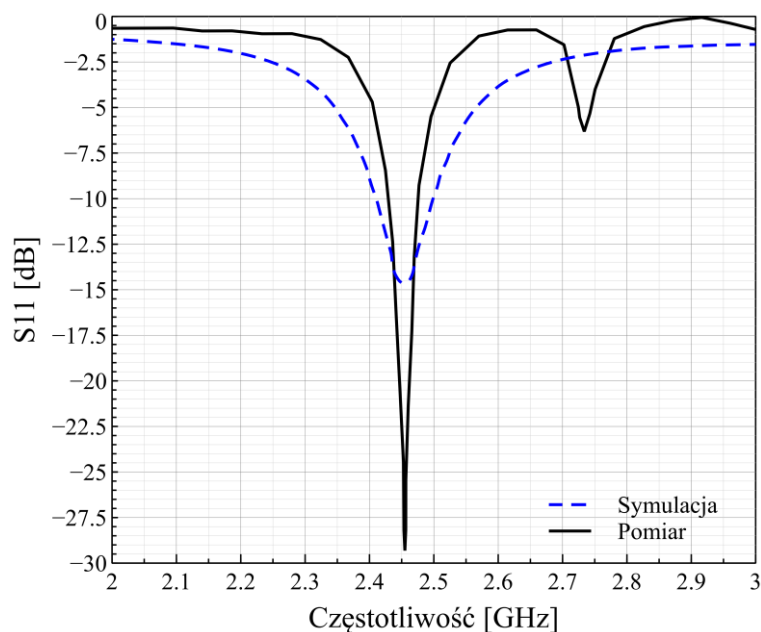
Iteracyjna symulacja drukowanej anteny siatkowej AJP rozpoczęła się od projektu opartego na wzorze anteny mikropaskowej typu „patch” dopasowanej do częstotliwości 2,45 GHz oraz siatce anteny pokazanej w badaniach nad drukowaną anteną DIW [76]. Częstotliwość środkowa takiej anteny była niższa niż 2,45 GHz, co jest charakterystyczne dla anten siatkowych [445], ze względu na spadek pojemności i wzrost indukcyjności [446]. Wymiary wzoru anteny oraz liczba linii pionowych i równoległych zostały zmienione, aby uzyskać jak najniższą wartość i lokalne minimum współczynnika odbicia w częstotliwości

2,45 GHz. W związku ze spodziewanym brakiem wpływu ograniczenia rozdzielczości modeli anten do 0,1 mm na wyniki symulacji i nie wskazywaniem w literaturze rozdzielczości projektowanych wzorów anten zdecydowano się na zastosowanie takiego ograniczenia, redukując wymagania sprzętowe symulacji modeli anten. Redukcja liczby linii horyzontalnych rzeczywiście była korzystna dla wartości S11 anteny, niemniej zarówno wzrost jak i spadek ilości linii wertykalnych (z odstępu 2,5mm do 1mm lub 5mm) powodował wzrost wartości S11. Geometrię ostatecznego projektu, charakteryzującego się teoretyczną przezroczystością optyczną 87,2%, pokazano na Rysunku 50. Wymiary anteny (36,4x29,1 mm) są mniejsze od wymiarów pełnej anteny miedzianej o częstotliwości środkowej 2,45 GHz na Kaptonie (40,8x32 mm). Stwierdzono, że odległość 2,5 mm między pionowymi liniami w połączeniu z trzema poziomymi liniami - jedną w środku i dwiema w odległości 7,5 mm od linii środkowej - skutkuje najniższą wartością S11 projektu przy częstotliwości 2,45 GHz.



Rysunek 50 Projekt anteny siatkowej

Wzór anteny został następnie wydrukowany w ciągu dziewięciu godzin (co wymaga dwóch sesji drukowania). Wyniki pomiaru S11 wydrukowanej próbki pokazano na Rysunku 51. Wartość S11 przy 2,45 GHz jest niższa niż w symulacji (-29,1 dB), a pasmo przenoszenia jest węższe. Ta wartość współczynnika odbicia jest wystarczająco niska by stwierdzić wykonanie anteny wysokiej jakości o parametrach spełniających cel pracy.

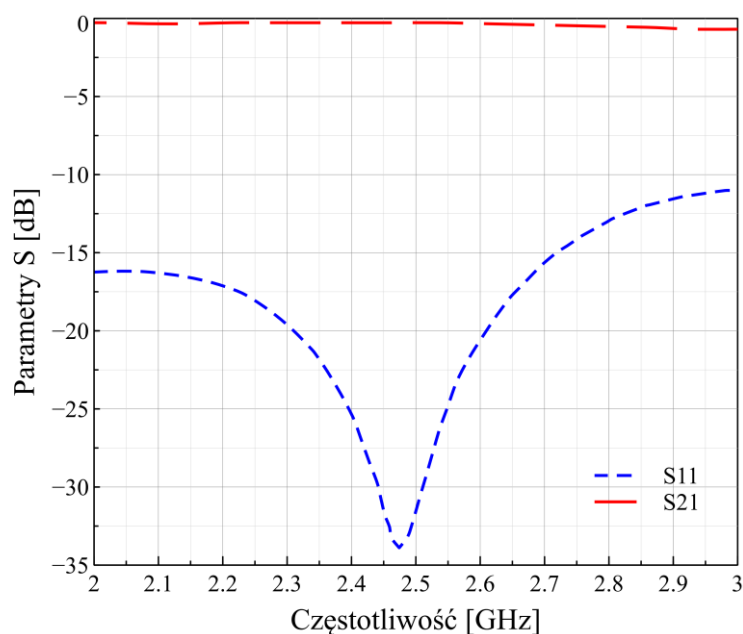


Rysunek 51 Symulowane i zmierzone S_{11} anteny siatkowej.

Dwie sesje drukarskie do wykonania jednej anteny to jednak zbyt wiele by można było stwierdzić dopasowanie wzoru do możliwości technologicznych druku aerozolowego. Jednakże, ze względu na stabilność parametrów, dziewięć godzin to zbyt dużo, by wyprodukować antenę w jednej sesji drukowania (do 8 godzin stabilnych parametrów [447]). W celu ograniczenia czasu trwania druku można zwiększyć średnicę dyszy, ale bez realizacji wzoru na podłożu niepłaskim nie ma sensu wykorzystywać AJP do wykonania takiego wzoru – porównywalną rozdzielczość można wtedy uzyskać za pomocą bezpośredniego druku tuszem lub druku strumieniowego, które są łatwiejsze w obsłudze, a jakość krawędzi wzoru wykonanego drukiem aerozolowym spada wraz ze wzrostem średnicy dyszy drukującej. W celu ograniczenia czasu wydruku zdecydowano się w dalszej pracy na weryfikację możliwości wykonania drukiem aerozolowym siatkowych linii transmisyjnych, które nie były dotąd wykonane technikami elektroniki drukowanej.

6.3. Drukowana aerozolowo siatkowa linia transmisyjna

Iteracyjna symulacja siatkowych linii transmisyjnych pozwoliła na identyfikację linii siatkowej, która uzyskuje jak najniższą wartość i lokalne minimum współczynnika odbicia w częstotliwości 2,45 GHz (Rysunek 52) jako linię składającą się z dwóch równoległych pojedynczych linii o szerokości 30 μm , których zewnętrzne krawędzie są oddalone od siebie o 190 μm , w jednej czwartej długości fali połączonych pojedynczą prostopadłą linią.



Rysunek 52 Symulacja siatkowej drukowanej linii transmisyjnej AJP.

Wstępna weryfikacja drukowanych próbek linii transmisyjnych została przygotowana przy użyciu: linii o nominalnej szerokości 190 μm , linii o nominalnej szerokości 80 μm , osiągającej minimum S11 w częstotliwości 2,45 GHz gdy w modelu symulacyjnym używane są złącza SMA, siatkowej linii transmisyjnej i pojedynczej drukowanej linii. Długość każdej próbki jest taka sama jak początkowej próbki o szerokości 190 μm , 106 mm. Pomiar S11 linii drukowanych dały wynik -4,35 dB dla linii o szerokości 190 μm , -11,7 dB dla linii o szerokości 80 μm , -16,7 dB dla linii siatkowej i -7,05 dB dla pojedynczej linii drukowanej. Wartości S11 dla linii 80 μm i linii siatkowej przy częstotliwości 2,45 GHz są najniższe i te dwie szerokości zostaną wykorzystane do dalszej analizy.

Dalsza analiza koncentruje się na wartościach S11 i S21 wydrukowanych próbek o różnej liczbie warstw. Aby odfiltrować wpływ złączy na wartości S21, analiza opiera się na różnicy między średnią wartością S21 próbek o długości 106 mm i próbek o długości 53 mm. Wyniki pomiarów przedstawiono w Tabeli 2.

Tabela 2 Parametry S drukowanych linii transmisyjnych

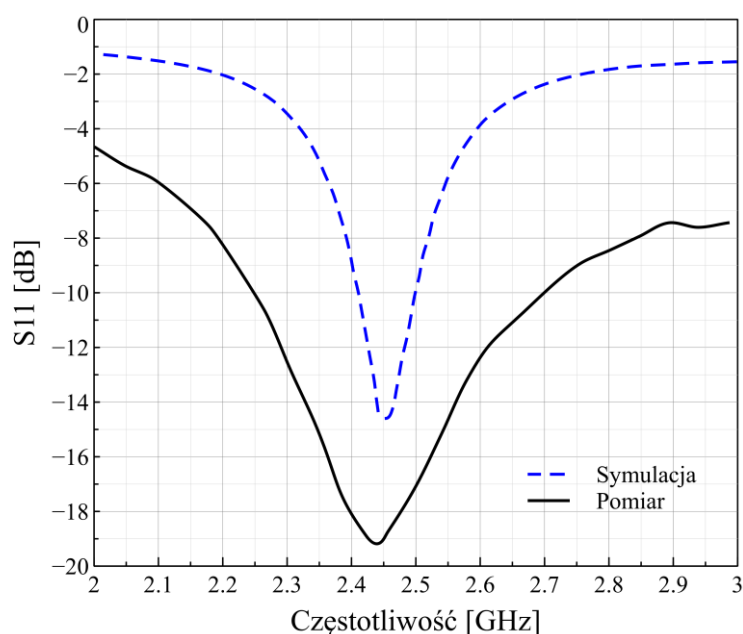
Liczba warstw	Linie transmisyjne szerokie na 80 μm		Siatkowe linie transmisyjne	
	S21 (dB)	S11 (dB)	S21 (dB)	S11 (dB)
6	-16,3 $\pm$ 0,8	-19,2 $\pm$ 6,5	-18,3 $\pm$ 2,7	-14,85 $\pm$ 2,35
8	-15,5 $\pm$ 0,4	-28 $\pm$ 7,8	-17,4 $\pm$ 2,8	-15,05 $\pm$ 1,35
10	-17 $\pm$ 1,1	-16,65 $\pm$ 3,0	-15,8 $\pm$ 1,5	-15,05 $\pm$ 0,15

12	-16,5±1,25	-15,65±2,8	-18,25±4,5	-9,6±0,2
14	-15,2±0,5	-11,8±1,5	-16,4±0,1	-13,3±1,4

Wyniki wskazują, że liczba wydrukowanych warstw wpływa zarówno na S11, jak i S21 i nie występuje korelacja liniowa. Minimalna liczba warstw dla których wartość S11 próbek jest najniższa przy zachowaniu wysokiego S21 wynosi 8 dla linii transmisyjnych o szerokości 80 μm i 10 dla siatkowych linii transmisyjnych. Czas potrzebny do wydrukowania linii o tych liczbach warstw jest o ok. 15% niższy dla siatkowych linii transmisyjnych.

6.4. Drukowane aerozolowo podwójnie siatkowe anteny mikropaskowe typu „patch”

Iteracyjnie zasymulowano i po wydrukach testowano wzory anten wykonanych za pomocą linii siatkowych. Wyniki ostatecznego wzoru, charakteryzującego się 96% teoretyczną przezroczystością optyczną i czasem wydruku ok. 2 godzin, pokazano na Rysunku 53. Antena miała taką samą szerokość jak antena siatkowa, jednakże jej długość uległa skróceniu (wymiary anteny 36,4x27,1 mm). Częstotliwość środkowa podwójnie siatkowej anteny jest taka sama dla zmierzonych i symulowanych wartości S11. Zmierzona wartość S11 jest niższa niż wartość symulowana (-18,9 dB), a pasmo przenoszenia jest szersze. Szersze pasmo przenoszenia było prawdopodobnym wynikiem nieznacznie obniżonego współczynnika jakości dla stosunkowo dużych próbek wydrukowanych jako siatka pojedynczych linii.

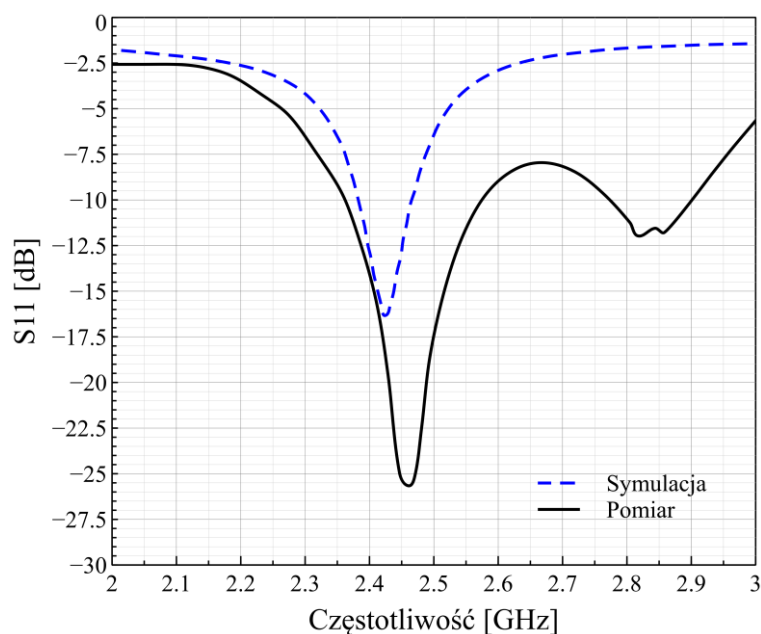


Rysunek 53 Symulowane i zmierzone S11 anteny podwójnie siatkowej anteny

Co ciekawe, odległość (między 80 μm a 300 μm), o jaką zewnętrzne krawędzie między liniami były rozmieszczone w liniach siatki włączonych do projektu anteny, nie miała wpływu na wyniki symulacji, o ile środek tych linii pozostawał w tym samym miejscu. Środek pojedynczych drukowanych linii może również znajdować się w tym samym miejscu, co środek linii siatkowej. Na tej podstawie podjęto decyzję by zweryfikować możliwość wykonania anteny z siatką z pojedynczych linii.

6.5. Drukowane aerozolowo anteny mikropaskowe typu „patch” z siatką z pojedynczych linii

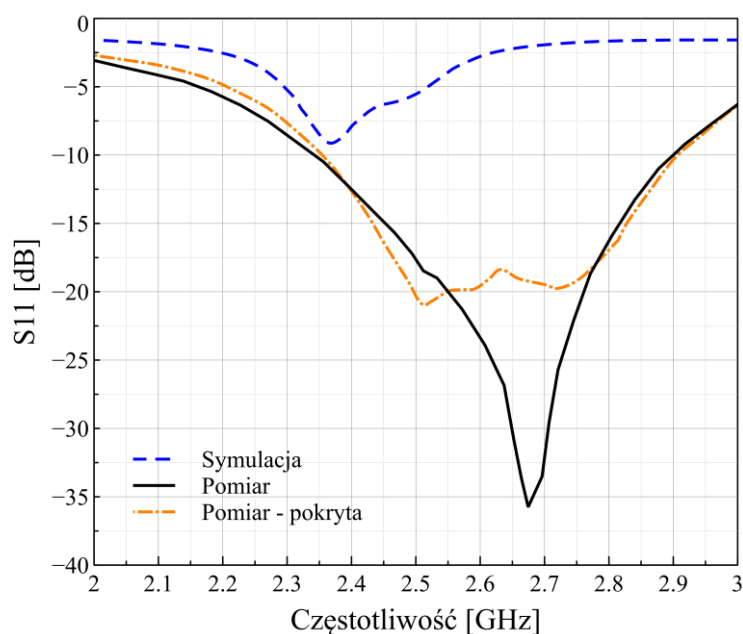
Anteny z siatką z pojedynczych linii, w odróżnieniu od wykonanej w rozdziale 6.2 anteny gdzie linie wzoru siatki były wykonane z wielu drukowanych obok siebie linii aerozolowych, zostały zasymulowane i wydrukowane w celu zweryfikowania możliwości dalszego skrócenia czasu drukowania (do ok. 1,5 godziny), charakteryzując się teoretyczną przezroczystością optyczną 97,32%. Wyniki symulacji i pomiarów przedstawiono na Rysunku 54. Wyniki symulacji pokazują niewielkie przesunięcie częstotliwości środkowej w kierunku niższych częstotliwości względem linii z siatką z linii siatkowych. Pomiary anteny wydrukowanej wykazały, że częstotliwość środkowa jest wyższa niż symulowana (taka sama jak w przypadku anten siatkowych i podwójnie siatkowych), a wartość S_{11} (-25,9 dB) jest niższa niż w przypadku anten symulowanych i podwójnie siatkowych.



Rysunek 54 Symulowane i zmierzone S_{11} anteny z siatką z pojedynczych linii.

Antena z siatką z pojedynczych linii została dodatkowo pokryta warstwą ochronną w celu zbadania wpływu powłoki na parametry anteny. Chociaż warstwa powłoki nie wpłynęła

na częstotliwość środkową, spowodowała czterokrotne zmniejszenie wartości S_{11} anteny. Aby zbadać czy ten sam efekt występuje w przypadku anteny z linią transmisyjną o niższej rezystancji, symulowano, wydrukowano, zmierzono przed i po pokryciu antenę z siatką z pojedynczych linii i linią transmisyjną 80 μm . Wyniki symulacji i pomiarów przedstawiono na Rysunku 55. Wyniki symulacji pokazują większe przesunięcie częstotliwości środkowej w kierunku niższych częstotliwości niż w przypadku symulacji anteny z pojedynczą linią siatkową. Pomimo wcześniejszych wyników dla anteny z siatką z pojedynczych linii pokazujących, że zmierzona częstotliwość może być tylko nieco wyższa niż symulowana, zmierzona wartość S_{11} anteny z linią transmisyjną o szerokości 80 μm ukazuje znaczny wzrost częstotliwości środkowej względem symulacji. Jego wartość przy 2,45 GHz jest jednak nadal stosunkowo niska. Powłoka powoduje wygładzenie charakterystyki, co skutkuje wzrostem wartości S_{11} w częstotliwości środkowej, ale przy 2,45 GHz powłoka zmniejsza wartość S_{11} (do -16,2 dB).



Rysunek 55 Symulowany i zmierzony S_{11} anteny z siatką z pojedynczych linii i linią transmisyjną 80 μm

6.6. Badania linii transmisyjnych i anten z zastosowaniem tuszu o wyższej zawartości fazy funkcjonalnej

Wszystkie próbki użyte w eksperymentach zostały wykonane przy użyciu tuszu UTDots Ag25Te. Te same wzory linii transmisyjnych i parametry druku aerozolowego zostały wykorzystane do wydrukowania linii transmisyjnych i anten przy użyciu alternatywnego tuszu Ag60Te, również wykonanego przez firmę UTDots, w celu oceny jego wpływu na parametry S wydruków. Ze względu na wyższą zawartość fazy funkcjonalnej i

zmodyfikowany kształt tusz ten miał zapewniać mniejszy *Overspray*. Wyniki pomiarów linii transmisyjnych przedstawiono w Tabeli 3. Minimalna liczba warstw z minimalną wartością S11 przy zachowaniu najwyższego S21 wynosi od 6 do 8 dla linii transmisyjnych o szerokości 80 μm i od 8 do 10 dla siatkowych linii transmisyjnych. Wartości S21 są wyższe dla linii transmisyjnych wykonanych przy użyciu tuszu Ag60Te niż przy użyciu tuszu Ag25Te.

Tabela 3 Parametry S drukowanych linii transmisyjnych Ag60Te

Liczba warstw	Linie transmisyjne szerokie na 80 μm		Siatkowe linie transmisyjne	
	S21 (dB)	S11 (dB)	S21 (dB)	S11 (dB)
6*	-3,7	-30,1	-1,8	-15,9
8	-0,8 $\pm$ 0,2	-12,567 $\pm$ 2,1	-0,7 $\pm$ 3	-16,4 $\pm$ 4,35
10	-1 $\pm$ 2,2	-9,5 $\pm$ 0,25	-1,6 $\pm$ 3,3	-18,267 $\pm$ 1,65
12	-0,6 $\pm$ 0,5	-8,6 $\pm$ 1,65	-5,8 $\pm$ 1,9	-4,9 $\pm$ 3,15
14	-0,333 $\pm$ 1,3	-10,267 $\pm$ 0,85	-4,23 $\pm$ 2,8	-5,6 $\pm$ 4,15

* Wykonano pojedyncze próbki

Wyniki pomiarów anteny wydrukowanej przy użyciu alternatywnego tuszu Ag60Te przedstawiono w Tabeli 4. Wyniki pokazują, że lepsza przewodność drukowanych linii skutkuje mniejszym zapotrzebowaniem na dużą liczbę warstw, aby osiągnąć najlepszą wartość S11 dla podwójnie siatkowych anten. Jednak sześć warstw to zbyt mało dla anteny z siatką z pojedynczych linii. Najwyższe wartości S11 są niższe niż te uzyskane przy użyciu tuszu Ag25Te, co może być efektem zmiany szerokości i morfologii linii i wymaga dalszej optymalizacji.

Tabela 4 Parametry S drukowanych anten Ag60Te

Typ anteny	S11 w 2,45 GHz (dB)
Podwójnie siatkowa antena, 10 warstw	-10.8
Antena z siatką z pojedynczych linii, 10 warstw	-10.5
Podwójnie siatkowa antena, 6 warstw	-13.0
Antena z siatką z pojedynczych linii, 6 warstw	-3.4

6.7. Zysk energetyczny

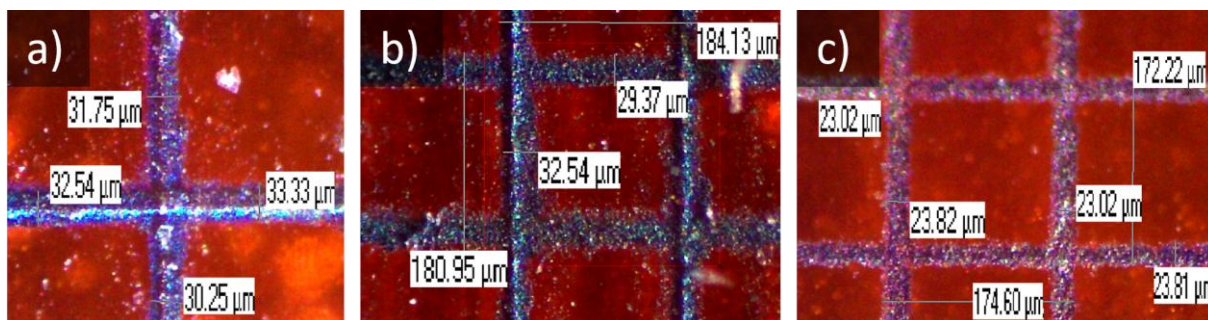
Dalsze porównanie anten użytych w tym badaniu przeprowadzono poprzez obliczenie ich średniego zysku energetycznego. Parametr S21 między antenami w dalekim polu zmierzono na torze antenowym przy użyciu komercyjnej anteny monopolowej 2,45 GHz YE0031AA (Quectel Wireless Solutions, Chiny) i wytrawionej miedzianej anteny

mikropaskowej typu „patch” na podłożu FR4 (wartość S11 -11,5 dB przy 2,45 GHz) jako odniesienia. Obliczone wyniki przedstawiono w Tabeli 5. Zarówno pomiary współczynnika transmisji w torze antenowym jak i przedstawione w podrozdziale 6.5 pomiary napięcia na obciążeniu anten prostowniczych zostały przeprowadzone przy użyciu 6-miesięcznych anten (Ag25Te) i 3-miesięcznych anten (Ag60Te) przechowywanych w środowisku otoczenia. Czas wpływa na antenę siatkową i podwójnie siatkową poprzez zwiększenie wartości S11, ale częstotliwość środkowa pozostaje niezmienna. Natomiast na antenę z siatką z pojedynczych linii czas wpłynął poprzez wzrost częstotliwości środkowej do 2,55 GHz. Nowe wartości S11 w częstotliwości 2,45 GHz są wskazane w tabeli.

Tabela 5 Średni maksymalny absolutny zysk energetyczny obliczony na podstawie wartości S21 między anteną kierunkową a testowanymi antenami drukowanymi.

Typ anteny	Średni maksymalny absolutny zysk energetyczny (dBi)
PCB Yagi antena	5,15
Komercyjna antena monopolowa	-2,12
PCB antena mikropaskowa typu „patch”	-1,89
Antena siatkowa (S11 -23,2 dB)	-4,25
Antena podwójnie siatkowa (S11 -11,6 dB)	-27,09
Antena z siatką z pojedynczych linii (S11 -10 dB)	-11,01
Antena z siatką z pojedynczych linii z powłoką (S11 -18,5 dB)	-22,47
Antena podwójnie siatkowa 6 warstw Ag60Te (S11 -12 dB)	-32,98
Antena z siatką z pojedynczych linii 10 warstw Ag60Te (S11 -9,7 dB)	-31,51

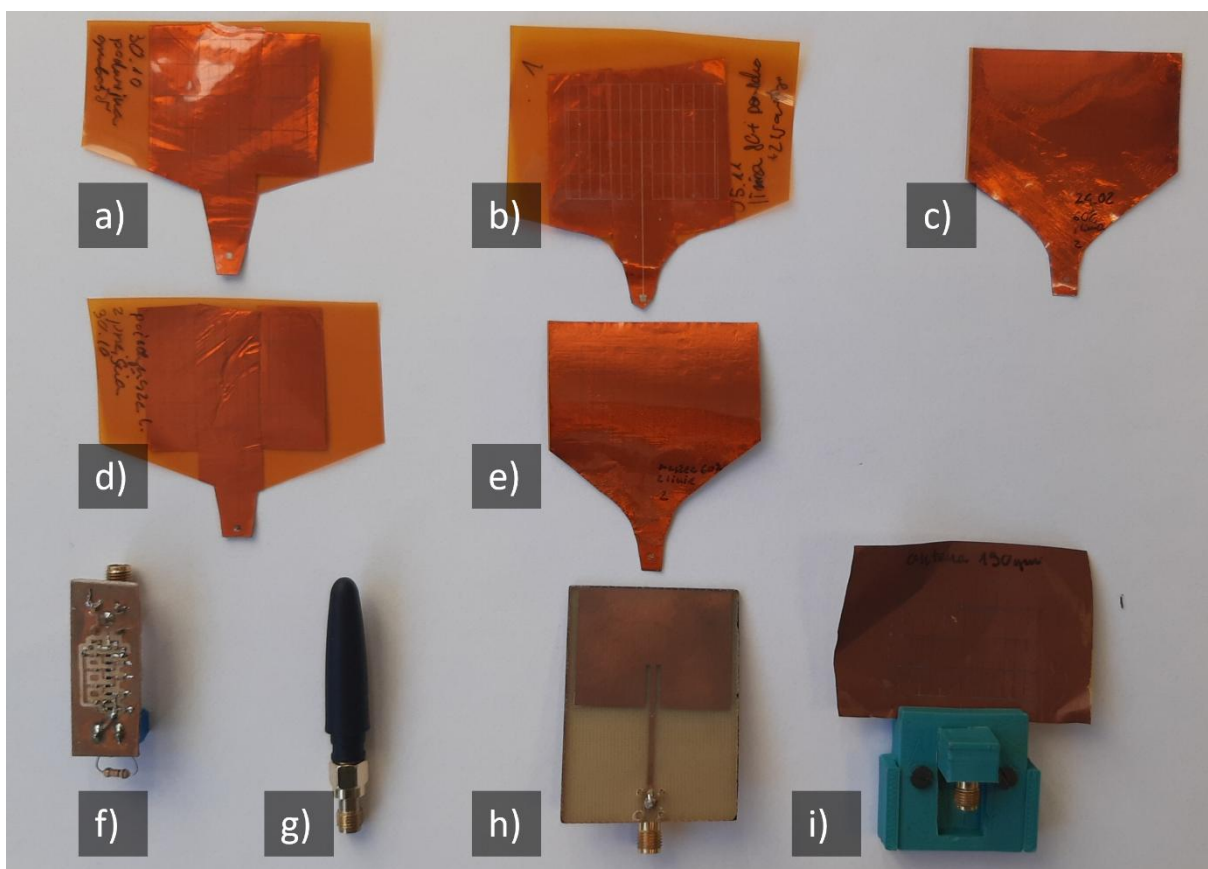
Wyniki wskazują, że zysk anteny siatkowej jest nieco niższy niż w przypadku anteny PCB i komercyjnej anteny monopolowej, ale tego samego rzędu wielkości. Antena Ag25Te podwójnie siatkowa charakteryzuje się wyższym zyskiem niż antena Ag60Te podwójnie siatkowa, pomimo podobnej wartości S11, a antena z siatką z pojedynczych linii zapewnia wysoki S21 pomimo wysokiego S11. Aby zrozumieć te wyniki, przeprowadzono analizę mikroskopową (Rysunek 56). Pomiar siatkowych linii Ag60Te wskazuje, że ich szerokość wynosi tylko 23 μm , co wpływa na parametry anteny. Redukcja *Overspray*’u jest również wyraźnie widoczna. Podczas inspekcji anteny podwójnie siatkowej zaobserwowano niższą jakość linii horyzontalnych tej anteny potwierdzoną pomiarem rezystancji, co wyjaśnia nieoczekiwane wyniki obliczeń zysku energetycznego.



Rysunek 56 Geometria linii w miejscu połączenia między linią transmisyjną a anteną: a) antena Ag25Te z siatką z pojedynczych linii, b) antena Ag25Te podwójnie siatkowa, c) antena Ag60Te podwójnie siatkowa

6.8. Anteny prostownicze

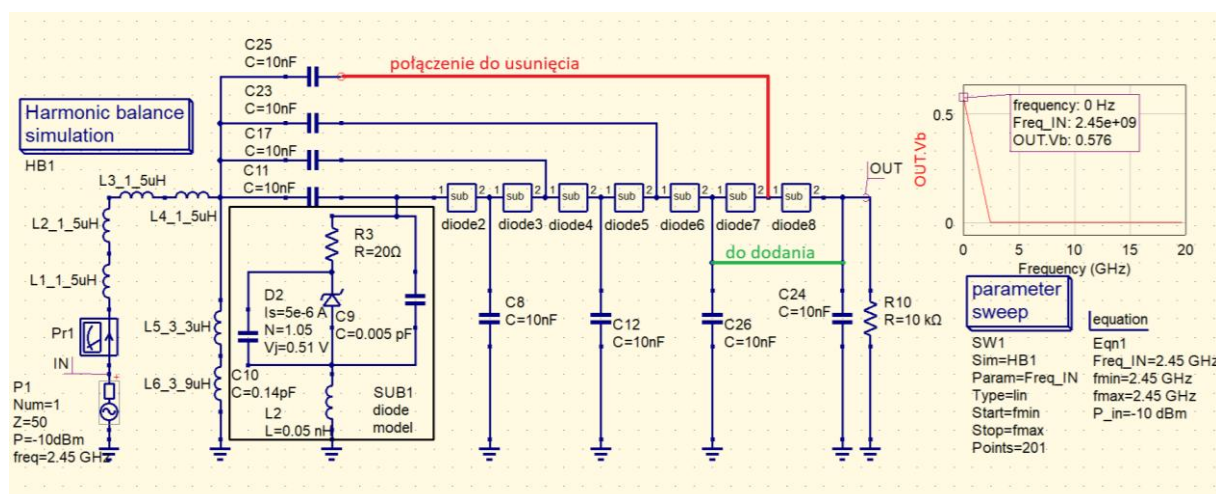
Ostateczne próbki anten zostały połączone z samodzielnie wykonanym prostownikiem i siecią dopasowania impedancyjnego dopasowującą wzmacniacz do anteny 50Ω w częstotliwości 2,45 GHz i porównane z uprzednio używanymi antenami (wytrawioną anteną mikropaskową typu „patch” na laminacie FR4 i komercyjną anteną monopoliową) pod względem napięcia na zaciskach obciążenia 10 k Ω (Rysunek 57).



Rysunek 57 Zbiorna ilustracja przedstawiająca komponenty użyte w badaniach a) antena podwójnie siatkowa, b) antena z siatką z pojedynczych linii z powłoką, c) antena z siatką z pojedynczych linii 10 warstw Ag60Te, d) antena z siatką z pojedynczych linii, e) antena z podwójną siatką Ag60Te f) prostownik, g) komercyjna antena monopoliowa, h) antena patch pcb, i) antena siatkowa

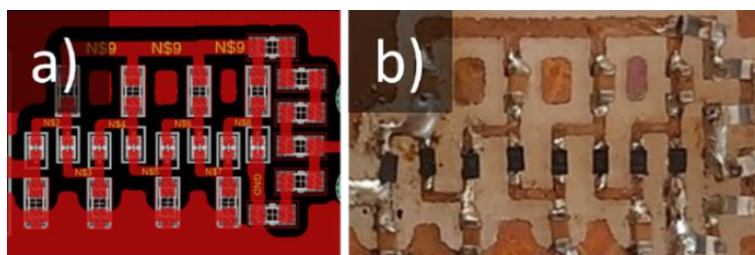
Prostownik został zaprojektowany tak, aby osiągnąć maksymalne napięcie dla sygnału wejściowego -10 dB i obciążenia 10 k Ω w celu zasymulowania rezystancji urządzenia do pozyskiwania energii ultra-niskiej mocy bq25570 (Texas Instruments, USA). Zastosowano diody Skyworks 7630 0402 ze względu na bardzo niską pojemność złącza. Dopasowanie między anteną o impedancji 50 Ω a prostownikiem zostało wykonane za pomocą cewek SMD do przyszłej potencjalnej realizacji za pomocą cewek AJP.

Modele diod zostały zaprojektowane uwzględniając parametry pasożytnicze na podstawie dokumentacji diod. Elementy sieci dopasowania impedancyjnego zostały zasymulowane wykorzystując modele spice dostarczone przez producenta (Würth Electronics, Niemcy). Zasymulowana wartość PCE wynosi $\sim 33\%$ dla 6 stopniowego wzmacniacza (do którego układ dopasowania impedancyjnego dopasował impedancję anten) i $\sim 18\%$ dla 8 stopniowego wzmacniacza. W celu weryfikacji wykonano najpierw 8 stopniowy wzmacniacz, a następnie go zmodyfikowano by uzyskać 6 stopniowy, co przedstawiono na Rysunku 58.



Rysunek 58 Schemat prostownika z układem dopasowania impedancyjnego – 8 stopniowego (z czerwoną linią bez zielonej) i 6 stopniowego (z zieloną linią bez czerwonej, dla niego wskazany wynik symulacji)

Układ został zaprojektowany z wykorzystaniem gniazda SMA na wejściu i złącza śrubowego na wyjściu układu. Rysunek układu i wykonanego wzmacniacza przedstawiono na Rysunku 59. Zgodnie z wynikami symulacji, zmierzone PCE niedopasowanego wzmacniacza 8 stopniowego było niższe (0,5%) niż wzmacniacza 6-stopniowego (15%), zarówno dla mocy sygnału wejściowego o wartości -10 dBm jak i 0 dBm.



Rysunek 59 Prostownik i sieć dopasowania impedancyjnego wykorzystujące komponenty SMT a) Układ PCB b) Wykonana płytką PCB

Aby zasymulować pozyskiwanie energii odpadowej w środowisku biurowym, pomiary maksymalnego napięcia stałego na obciążeniu ośmio- i sześć-stopniowego prostownika przeprowadzono z najczęściej dostępnymi w takim środowisku źródłami promieniowania 2,4-2,5 GHz (Tabela 6) - kuchenką mikrofalową o mocy 1200 W (podobne podejście przedstawiono w badaniach Kawahara i in. [448]) oraz biurowym routerem WiFi AC1200 (TP-LINK, Chiny). Napięcia osiągane przez anteny prostownicze siatkowe były tego samego rzędu wielkości, co uzyskiwane przez anteny prostownicze wykorzystujące komercyjne anteny monopolowe i miedziane anteny typu „patch”. Urządzenia do pozyskiwania energii bardzo niskich mocy wymagają pewnego minimalnego poziomu napięcia do rozpoczęcia działania, np. bq25570 wymaga min. 0,6 V, ADP5090 (Analog devices, USA) wymaga min. 0,38V, a AEM10941 (e-peas, Belgia) również wymaga 0,38V. Maksymalne napięcie osiągnięte przez wszystkie anteny wykonane przy użyciu tuszu Ag25Te w pobliżu kuchenki mikrofalowej przy użyciu prostownika 6 stopniowego jest wystarczająco wysokie, aby zasilić te urządzenia.

Tabela 6 Maksymalne napięcie DC na obciążeniu anteny prostowniczej zmierzone w pobliżu kuchenki mikrofalowej i routera WiFi

Nazwa próbki	Maksymalne napięcie DC na obciążeniu anteny prostowniczej (V)			
	Prostownik 6-stopniowy		Prostownik 8-stopniowy	
	Kuchenka mikrofalowa	Router WiFi	Kuchenka mikrofalowa	Router WiFi
Komercyjna antena monopolowa	1,355	0,303	0,221	0,127
PCB antena mikropaskowa typu „patch”	1,620	0,360	0,458	0,183
Antena siatkowa	1,409	0,444	0,623	0,276
Antena podwójnie siatkowa	0,841	0,136	0,132	0,049
Antena z siatką z pojedynczych linii	0,825	0,091	0,101	0,024

Antena z siatką z pojedynczych linii z powłoką	0,905	0,139	0,101	0,033
Antena podwójnie siatkowa 6 warstw Ag60Te	0,310	0,039	0,130	0,058
Antena z siatką z pojedynczych linii 10 warstw Ag60Te	0,744	0,103	-	-

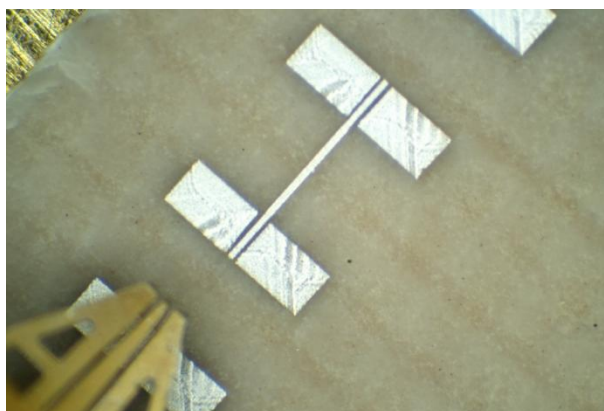
W niniejszym rozdziale wykonano przy pomocy druku aerozolowego mikropaskowe anteny typu „patch” zrealizowane jako anteny siatkowe. Taki rodzaj anten został po raz pierwszy zrealizowany przy pomocy druku aerozolowego. Przebadane zostały również linie mikropaskowe wykonane aerozolowo, w tym linie zrealizowane jako siatkowe, identyfikując ich parametry w zależności od liczby warstw i użytego materiału i używając ich podczas projektowania anten. Gotowe wzory anten zostały połączone z prostownikiem dopasowanym do nich układem dopasowania impedancyjnego, uzyskując tym samym antenę prostowniczą, po raz pierwszy zrealizowaną z wykorzystaniem anten drukowanych aerozolowo.

7. Badania aplikacyjne druku aerozolowego w sensorach mikrofalowych

W niniejszym rozdziale przedstawione są badania w ramach uczestnictwa autora rozprawy jako stypendysty w granie NCN Projekt Sonata BIS „Wysokowydajne elementy układów front-end pracujące w zakresie fal milimetrowych wykonane z zastosowaniem technologii addytywnego oraz hybrydowego wytwarzania do zastosowań w systemach komunikacyjnych i czujnikowych nowej generacji.”. Przedstawione rezultaty koncentrują się na zagadnieniach technologicznych wykonywania wzorów przy pomocy druku aerozolowego, gdyż projektowanie urządzeń w oprogramowaniu symulacyjnym i ich pomiar były wykonywane przez zespół z Instytutu Elektroniki Wydziału Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. Powodem realizacji zaprezentowanych w tym rozdziale prac była weryfikacja możliwości druku aerozolowego przy użyciu używanej przez autora drukarki aerozolowej do realizacji układów pracujących w szerokim zakresie częstotliwości i identyfikacja wyzwań technologicznych przy realizacji wzorów o wysokiej rozdzielczości.

7.1. Badania linii mikropaskowych w częstotliwościach do 43 GHz

Badania rozpoczęto od weryfikacji możliwości nadruku przy użyciu stanowiska do druku aerozolowego linii mikropaskowych o zakończeniach dopasowanych do pomiarów z użyciem koplanarnej sondy pomiarowej zgodnie ze wzorem przedstawionym na Rysunku 60. Ten wzór realizowany był wcześniej przez zespół z AGH w ramach badań na wydrukowanej na podłożu metalowym warstwie dielektrycznej [319].

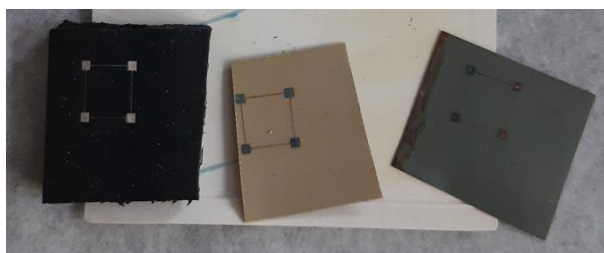


Rysunek 60 Zdjęcie wykonanego wzoru linii mikropaskowej wykonanej na stanowisku do druku aerozolowego.

Pierwszym etapem do realizacji wzorów była weryfikacja możliwości spiekania próbek, tak by wszystkie wykonane były przy możliwie jednakowych warunkach. Do wykonania testów na podłoża naniesiono wykorzystywany wcześniej wzór do weryfikacji

rezystancji – kwadrat o boku 10 mm i grubości 10 warstw z czterema kwadratowymi polami kontaktowymi o boku 0,5 mm umieszczonymi w rogach kwadratu. Używając spiekania fonicznego możliwe było wykonanie przewodzących ścieżek na metalizowanych foliach Kapton 1 i 2 mils, jednakże zarówno Kapton 4 mils i laminat beżowy uszkadzały się w czasie krótszym niż był potrzebny do spieczenia naniesionych na nich ścieżek.

Kapton 4 mils i laminat beżowy zostały w związku z tym poddane spiekaniu poprzez suszenie w suszarce komorowej. Do badania oprócz wcześniej badanych materiałów użyto wyciętego kawałka płyty ze spienionego ABS'u. Pierwsze spiekanie odbyło się w temperaturze 120 °C (jest to temperatura wskazana przez producenta jako minimalna temperatura spiekania tuszu) przez trzy godziny. Próbka spiekana na Kaptonie 4 mils przewodziła prąd, a uzyskana przewodność linii wynosiła $4,6 \pm 0,6 \Omega$, natomiast próbka na beżowym laminacie nie przewodziła. Drugie suszenie miało miejsce w temperaturze 140 stopni (Rysunek 61). Próbki zarówno na Kaptonie 4 mils ($3,4 \pm 0,6 \Omega$) jak i na beżowym laminacie ($5,4 \pm 1,7 \Omega$) przewodziły. W obu procesach nadruki na płycie z ABS'u nie przewodziły, a próbka wyginała się podczas procesu.

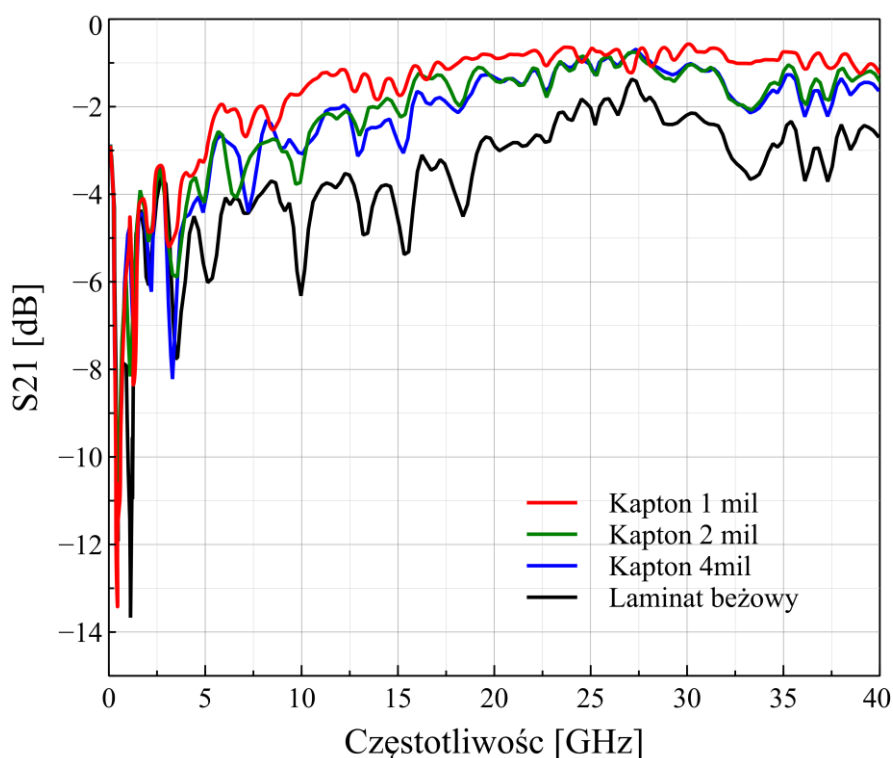


Rysunek 61 Próbki do pomiarów rezystancji linii (od lewej: płyta ABS, laminat beżowy, Kapton 4 mils) po spiekaniu w suszarce komorowej w temperaturze 140 stopni

Po doborze parametrów spiekania rozpoczęto drukowanie elementów wzorów. Wzór składa się z czterech prostokątów i z linii o zmiennej szerokości. Największą jednorodność nadruku prostokątów uzyskiwano drukując je czterema warstwami jako spiralę od środka – kluczowa dla realizacji wzoru krawędź zewnętrzna charakteryzowała się wtedy odchyleniem od linii prostej w zakresie 3 μm , w porównaniu do 10 μm dla druku spirali od zewnątrz i 7 μm w cyklu mieszanym – dwie warstwy od wewnątrz i dwie warstwy od zewnątrz. Z racji na bardzo niewielkie przesunięcia podczas realizacji linii konieczne było zidentyfikowanie z jaką dokładnością możliwe jest wyznaczanie punktów do przemieszczenia tak by podczas przesuwania głowicy maszyna nie rozstrajała się gubiąc kroki. Wyznaczona minimalna wartość wynosiła 10 μm w związku z czym opracowano wzór w którym możliwa była

realizacja wzoru wykorzystująca przesunięcia o co najmniej 10 μm . Kluczowym okazało się też spowolnienie ruchu szybkiego w nastawach urządzenia z 10 mm/s na 2 mm/s.

Linie mikropaskowe zostały wykonane na wszystkich 4 podłożach i spiekane w suszarce w temperaturze 140 stopni przez 3 godziny. Wyniki pomiarów parametru S21 linii zostały przedstawione na Rysunku 62.



Rysunek 62 Parametr S21 wydrukowanych aerozolowo linii transmisyjnych

Straty transmisyjne linii były wystarczająco niskie by można było potwierdzić możliwość wykorzystania nadrukowanych wzorów do wykonania funkcjonalnego czujnika pracującego w częstotliwościach do 43 GHz.

7.2. Wykonanie sensora poziomu glukozy w ślinie

Nieinwazyjne metody monitorowania poziomu glukozy we krwi jako alternatywa dla tradycyjnego, czasem niekomfortowego i bolesnego, pobierania próbek krwi są szczególnie ważne dla tych chorych na cukrzycę, którzy ten poziom muszą monitorować parokrotnie w ciągu dnia [449]. Jedną z metod jest analiza stężenia glukozy w płynie biologicznym - ślinie, dobrze skorelowanej z poziomem glukozy we krwi [450] wykorzystując jej interakcje z sygnałem mikrofalowym. Jednakże ze względu na niskie stężenie glukozy w ślinie konieczna jest konstrukcja wysokiej czułości czujnika. W niniejszej rozprawie przedstawiono wykorzystanie druku aerozolowego do nadrukowania czujnika stężenia glukozy w ślinie

pracującego w paśmie K, wykorzystując wysoką rozdzielczość i jednorodność krawędzi druku aerozolowego, jak również biorąc pod uwagę niskie zużycie materiału i łatwość zmiany wzoru ze względu na zastosowanie kontrolowanej cyfrowo techniki przyrostowej, korzystne przy wytwarzaniu małoseryjnych próbek. Sensor został wykonany w technice jednowarstwowego koplanarnego falowodu jako kondensator z wykorzystaniem łukowych naniesionych linii, z których najmniejsza charakteryzowała się promieniem wewnętrznym 50 μm .

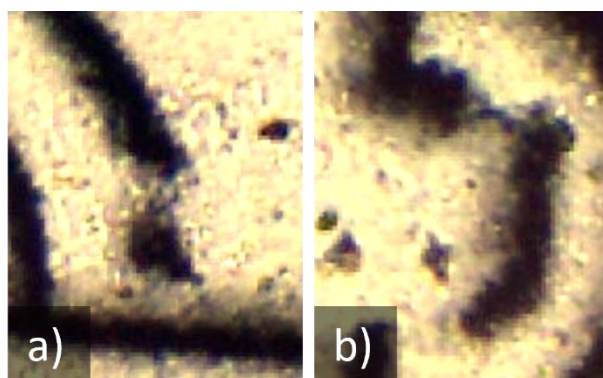
Pierwszym krokiem koniecznym do wykonania zaprojektowanego sensora była weryfikacja możliwości stanowiska drukarskiego do jednoczesnej realizacji linii o szerokości 50 μm i łuków o wewnętrznym promieniu 50 μm . Po wstępnej nieudanej próbie wykonania pojedynczych warstw łuków o promieniu środkowym 75 μm z prędkością standardową 1,5 mm/s, dokonano prób realizacji ich z prędkościami 0,1, 0,2, 0,5 i 1 mm/s (przykład przedstawiono na Rysunku 63). Najlepsze odwzorowanie wzoru zapewniła próbka drukowana z prędkością 0,2 mm/min – linie realizowane z wyższą prędkością przybliżają wzór liniami prostymi i nie zapewniają ciągłości linii, a te realizowane z niższą zbyt późno zakręcają w prawą stronę i charakteryzują się niższą powtarzalnością.



Rysunek 63 próbki pojedynczych warstw łuków wykonanych z prędkościami 0,1, 0,2, 0,5 i 1 mm/min.

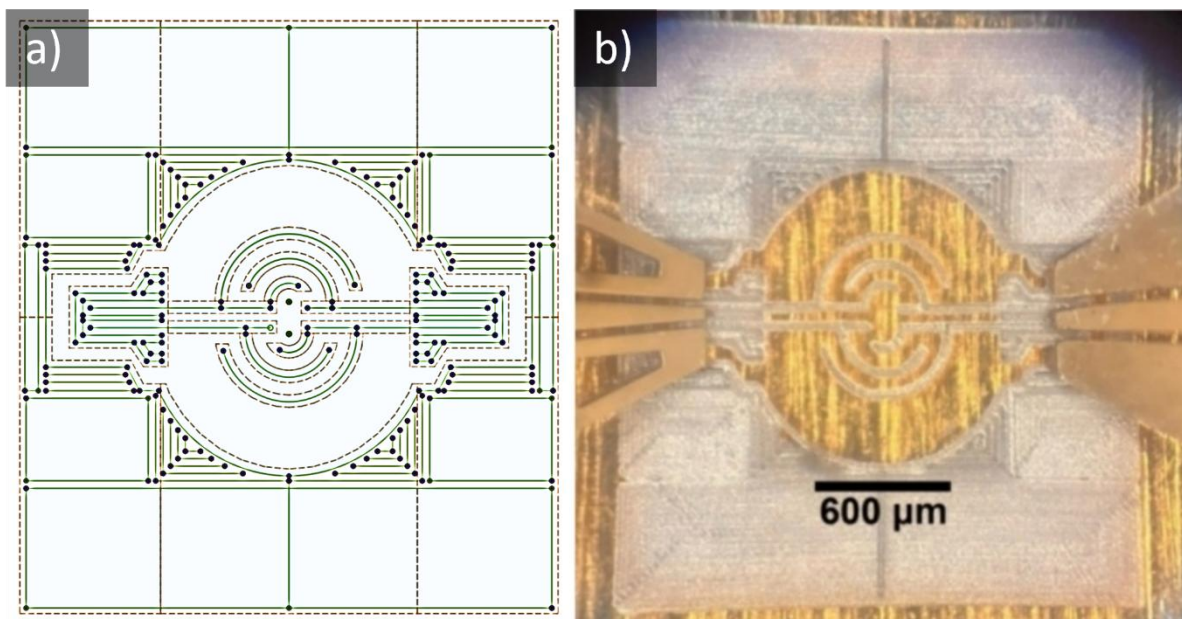
W związku z tym, że pojedyncza linia wydrukowana z prędkością 0,2 mm ma szerokość ok. 36 μm , sprawdzono ile warstw spowoduje wytworzenie linii o szerokości 50 μm i jaką będzie ona miała przewodność. Wykonano po trzy próbki dla ilości warstw od 6 do 1 składające się z linii prostej o długości 10 mm, półokręgu o promieniu 75 μm i dalszej linii o długości 10mm. Wyniki pomiarów rezystancji próbek wyszły następujące: 6 warstw 10,45 $\pm$ 0,05 Ω , 5 warstw 15,25 $\pm$ 1,75 Ω , 4 warstwy 14,25 $\pm$ 1,35 Ω , 3 warstwy 19,45 $\pm$ 1,25 Ω , 2 warstwy 39,55 $\pm$ 2,35 Ω , a dla jednej warstwy tylko jedna próbka przewodziła z rezystancją 140,20 Ω . Linia o szerokości najbliższej 50 μm była linia czterowarstwowa i to tą ilość warstw użyto do dalszych prac. Dalsza weryfikacja linii pozwoliła na zidentyfikowanie

występowania dwóch błędów w odwzorowaniu wzoru wymagających zmian w programie. Pierwszym było występowanie niejednorodności na samych końcach łuków (Rysunek 64a). Było to spowodowane wyhamowaniem głowicy pod koniec ruchu po łuku. By tego uniknąć zastosowano zaprogramowanie dłuższego łuku (półkola) z zamknięciem ruchomej przesłony w określonej długości przed jego końcem, co wyeliminowało ten problem. Drugim była niejednorodność wzorów podczas początku ruchu w kierunku dodatnim w osi X (Rysunek 64b), co rozwiązano przesuwając głowicę w osi X jedynie w kierunku ujemnym podczas realizacji wszystkich wzorów w których występował ten efekt



Rysunek 64 Błędy w odwzorowaniu geometrii łuku a) niejednorodność na końcu łuku b) niejednorodność na początku łuku przy ruchu w kierunku dodatnim w osi X stanowiska.

Po wyeliminowaniu wszystkich błędów przekształcono wzór sensora w zbiór linii i wypełnionych prostokątów oraz wyznaczono punkty względem których wykonano program w oprogramowaniu Fluidmove, co przedstawiono na Rysunku 65a. Gotowy sensor przedstawiono na rysunku 65b.



Rysunek 65 Sensor mikrofalowy do pomiaru stężenia glukozy w ślinie a) schemat technologiczny do druku aerozolowego b) wykonany sensor podczas pomiarów [451].

Wykonane sensory zostały z sukcesem wykorzystane przez zespół z Akademii Górniczo-Hutniczej do pomiaru zmian wartości parametru S_{21} pomiędzy czujnikiem pustym a pokrytym sztuczną śliną zawierającym glukozę w znanych stężeniach. Pozwoliło to na potwierdzenie możliwości pomiaru stężenia glukozy w ślinie przy pomocy tego czujnika [451].

Badania zrealizowane w tym rozdziale wskazują i adresują wyzwania technologiczne wykonywania precyzyjnych wydruków o złożonej geometrii przy pomocy druku aerozolowego, a także potwierdzają możliwość wykorzystania druku aerozolowego do realizacji układów pracujących w szerokim zakresie częstotliwości, co jest szczególnie interesujące ze względu na podwyższanie częstotliwości w kolejnych generacjach technologii mobilnej, np. do nieużywanej jeszcze w Polsce 26 GHz [452].

8. Alternatywne podejście do integracji drukowanych anten z obudowami urządzeń – druk FDM z zastosowaniem kompozytów przewodzących

Jedną z zalet druku aerozolowego jest możliwość bezpośredniego wydruku elementów anteny prostowniczej na obudowach urządzeń. Jest to rozwiązanie które w przypadku produktów seryjnych lub o geometrii jedynie mało zmieniającej się sprawdzi się bardzo dobrze, jednak przy jednostkowej produkcji spersonalizowanych obudów urządzeń może być nieefektywne zarówno czasowo jak i ekonomicznie. Obudowy takie można wykonywać metodami przyrostowymi, np. techniką FDM. Wykorzystywane w niej kompozyty przewodzące w zależności od osiąganego przewodności mogą samodzielnie być wykorzystywane do wykonywania układów pasywnych, bądź też służyć jako podłoże przewodzące do galwanizacji elektrochemicznej. Możliwość łączenia elementów dielektrycznych i przewodzących podczas jednego wydruku skracałaby czas potrzebny na wykonanie i eliminowałoby potrzebę pozycjonowania elementów względem siebie w kolejnych procesach. Prace zrealizowane w tym rozdziale zostały wykonane we współpracy z dr. Bartłomiejem Podsiadłym z Politechniki Warszawskiej, który drukował zaprojektowane przez autora niniejszej rozprawy wzory.

8.1. Symulacja i pomiar anten wykonanych drukiem 3D

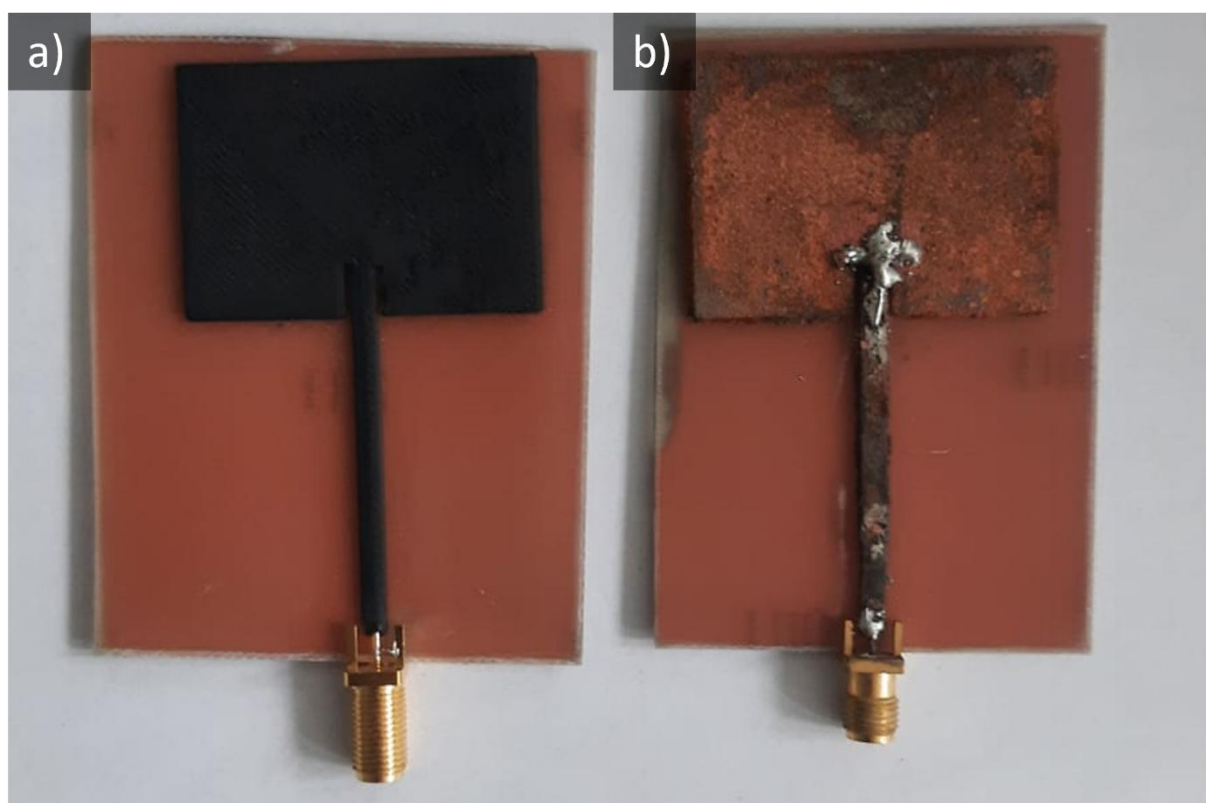
Anteny występujące w literaturze jako drukowane przy pomocy techniki FDM są w większości albo wykonywane konwencjonalnymi technikami na podłożach drukowanych, albo są to w rzeczywistości drukowane soczewki elektromagnetyczne [453], [454]. Niemniej są udokumentowane przypadki wykonania anten przy pomocy komercyjnych kompozytów wykorzystujących jako fazę funkcjonalną materiały węglowe (np. black magic) [455] czy miedź (Electrifi) [456]. Występują również badania wykorzystujące podłoża FDM i folię miedzianą do wykonywania anten do pozyskiwania energii z fal radiowych [457] oraz badania pokrywania elektrochemicznie miedzią przewodzących węglowych kompozytów [432]. Brak jednak badań w których antena wydrukowana byłaby pokrywana elektrolitycznie miedzią i użyta jako element anteny prostowniczej.

Do realizacji badań wybrano do wykonania antenę mikropaskową typu „patch” dopasowaną do częstotliwości 2,45 GHz. Pierwszym etapem było zaprojektowanie linii transmisyjnej do anteny. Weryfikacja rezystywności materiału i iteracyjna symulacja linii o długości 67mm, szerokości od 1 do 5mm i wysokości od 0,2 do 1mm pozwoliła na identyfikację przekroju 2,5x0,8 mm dla którego symulowana linia transmisyjna o powierzchni

pokrytej idealnym przewodnikiem osiągała najniższą wartość S_{11} (-44,5 dB) przy wysokim S_{12} (-0,2 dB).

Próbki wykonano i zmierzono. Wstępne próby nałożenia złączy kątowych na próbne linie transmisyjne na wcisk i przy pomocy srebrowego lakieru znacząco pogarszały uzyskaną rezystancję, w związku z czym wybrano połączenie wtapiane w pogrubione zakończenia próbki na gorąco. Wykonana próbka charakteryzowała się wyższą wartością S_{21} (-41,4 dB) od próbki zasymulowanej bez idealnego przewodnika na powierzchni linii transmisyjnej (-52,4 dB).

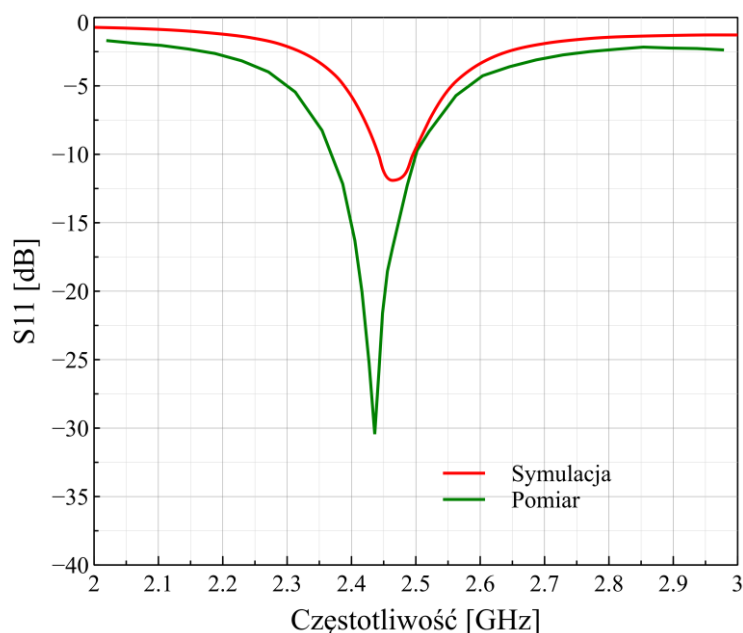
Wykorzystując linię transmisyjną 0,8x2,5mm iteracyjnie zasymulowano antenę mikropaskową typu „patch”. Odległość punktu przyłączenia linii transmisyjnej do anteny od jej krawędzi dobrano eksperymentalnie w celu minimalizacji strat odbiciowych. Antena została wykonana, a następnie pokryta elektrochemicznie warstwą miedzi (Rysunek 66).



Rysunek 66 Wydruk FDM anteny z kompozytu przewodzącego

Ze względu na wysoką rezystancję próbki, warstwa miedzi naniesiona była tylko w bliskiej odległości od najmniej oddalonego od źródła prądu punktu galwanizowanej próbki, zanurzonego w kąpeli galwanicznej. Proces wymagał pokrywania próbek „od góry” – zanurzając próbkę w kąpeli galwanicznej a następnie powoli ją wyciągając, używając bardzo niskiego natężenia prądu (0,01A), od którego zależała wartość napięcia utrzymywana jako

niższa od 12V. Wyższe natężenie prądu (rzędu 0,2A) powoduje wytworzenie gąbczastej struktury z miedzi na powierzchni próbki i odrywania się z powierzchni próbki „wąsów” z przewodzącego kompozytu. Próba galwanizacji od „dołu” (zanurzając jedynie koniec linii mikropaskowej w kąpeli galwanicznej) prowadziła do przegrzania się materiału, a w rezultacie jego delaminacji i utraty przewodności elektrycznej. Wyniki wartości parametru S_{11} zasymulowanej i wykonanej anteny przedstawiono na Rysunku 67. Wykonana antena charakteryzowała się wartością S_{11} równą -21,9 dB w częstotliwości 2,45 GHz.



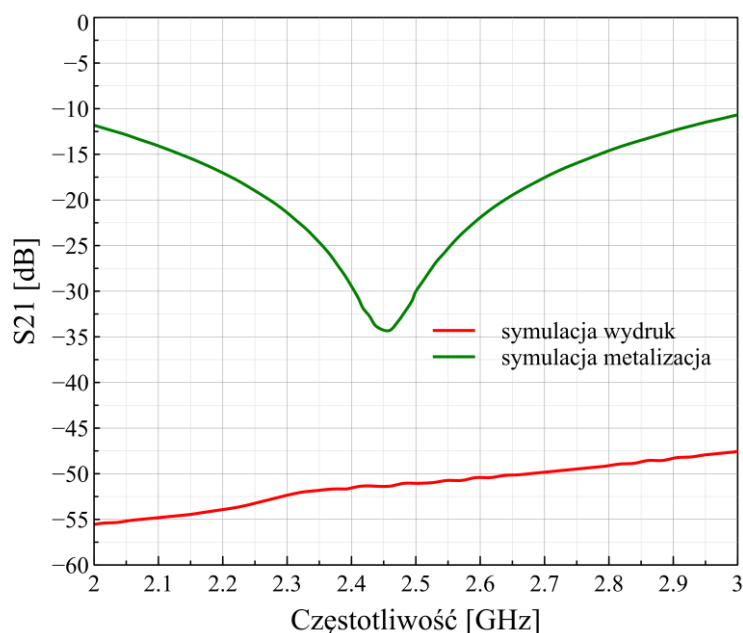
Rysunek 67 Symulowane i zmierzone S_{11} anteny FDM pokrytej miedzią

Weryfikację możliwości wykorzystania wykonanej anteny w antenie prostowniczej przeprowadzono analogicznie do sposobu wskazanego w rozdziale 6 – połączono z 6 stopniowym prostownikiem i zmierzono największe napięcie uzyskane w pobliżu kuchenki mikrofalowej 1200W. Uzyskano 1,223 V, co jest wartością porównywalną z napięciami uzyskiwanymi dla siatkowej anteny.

8.2. Symulacja i pomiar elementów układu dopasowania impedancyjnego wykonanych drukiem 3D

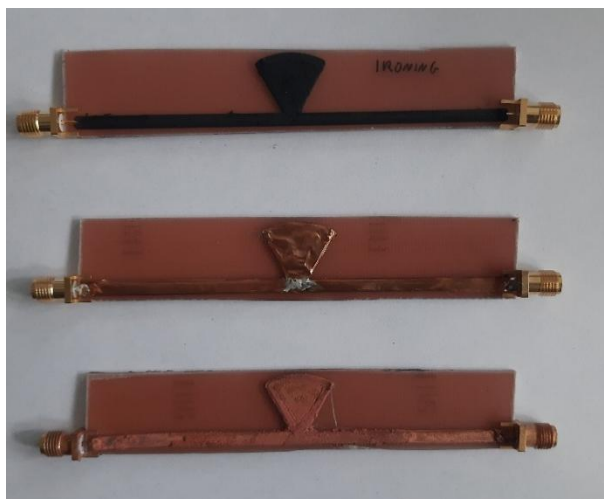
Jedną z metod wykorzystywanych do dopasowania impedancyjnego anteny i wzmacniacza jest wykorzystanie stroików impedancyjnych typu „stub” [85]. By umożliwić większą elastyczność w doborze rozmiarów drukowanych przy pomocy druku FDM anten, przy jednoczesnej możliwości podłączenia ich do komercyjnych prostowników przystosowanych do pracy z antenami o impedancji 50Ω , zbadano możliwość wykonania stroików impedancyjnych. W celu weryfikacji zgodności symulowanego układu z

wykonanymi próbkami wybrano filtr środkowozaporowy o częstotliwości środkowej 2,45 GHz. Do jego wykonania użyto tych samych materiałów do druku i podłożowych jak również tego samego sposobu montażu gniazd SMA co w rozdziale 8.1. Filtr został zaprojektowany jako linia transmisyjna zaprojektowana w poprzednim rozdziale z umieszczonym w połowie długości radialnym stroikiem, którego wielkość została dobrana podczas iteracyjnej symulacji by minimalna wartość S21 była osiągana przez tą strukturę pokrytą idealnym przewodnikiem w częstotliwości 2,45 GHz, co przedstawiono na rysunku 68.



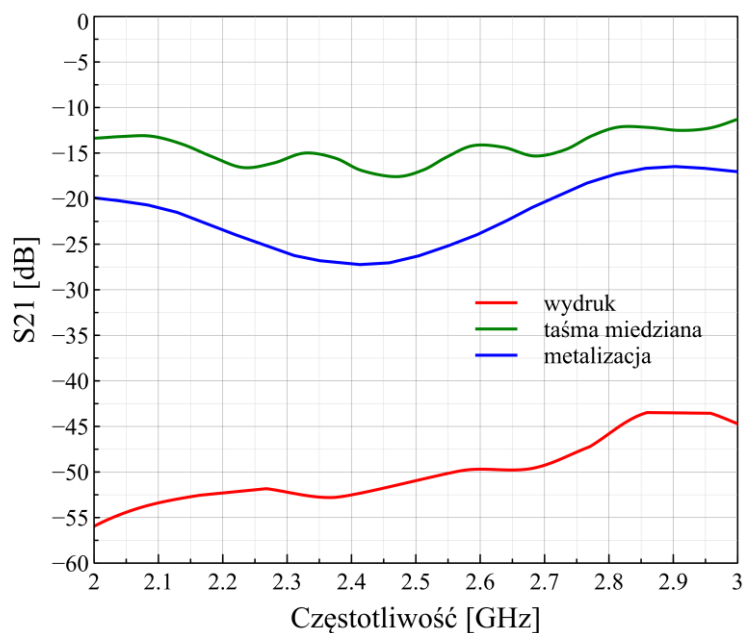
Rysunek 68 Wyniki symulacji anteny z samego kompozytu przewodzącego i pokrytej idealnym przewodnikiem.

Zasymulowane wzory wykonano najpierw jako próbkę z samego kompozytu przewodzącego, następnie próbkę z naklejoną warstwą taśmy miedzianej, by na końcu wykonać próbkę pokrytą elektrochemicznie miedzią. Wykonane w ten sposób próbki przedstawiono na Rysunku 69.



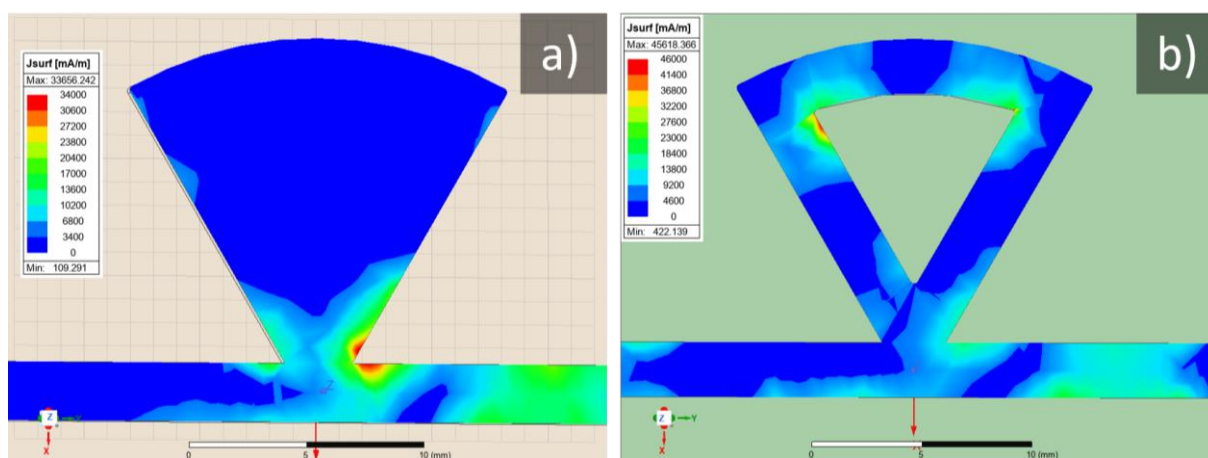
Rysunek 69 Zdjęcie filtrów wykorzystujących stroik impedancyjny typu stub a) próbka z samego kompozytu b) próbka z naniesioną folią miedzianą c) próbka z naniesioną elektrochemicznie warstwą miedzi

Wyniki pomiarów S_{21} wszystkich trzech rodzajów próbek przedstawiono na Rysunku 70. Uzyskane wyniki próbki z samego kompozytu przewodzącego są zgodne z symulacją układu bez warstwy idealnego przewodnika na powierzchni. Pomiary próbki zmodyfikowanej taśmą miedzianą, są zgodne z symulacją przeprowadzoną z idealnym przewodnikiem na powierzchni stroika w zakresie częstotliwości środkowej, choć wartość S_{21} jest wyższa, w rezultacie czego wykonany filtr mniej tłumiłby zaprojektowaną częstotliwość. Wartość S_{21} próbek pokrywanych miedzią jest niższa, niemniej dalej wyższa od wartości zasymulowanej.



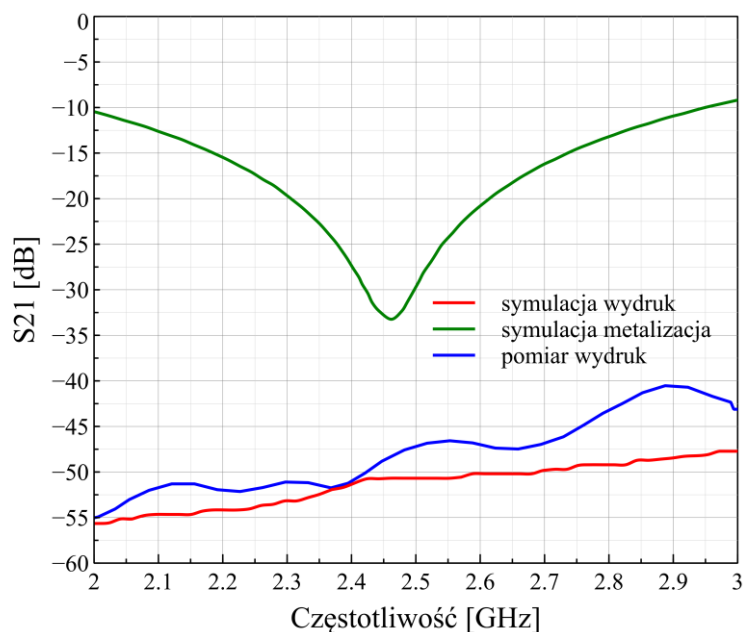
Rysunek 70 Wyniki pomiarów S_{21} próbek z samego kompozytu przewodzącego, pokrytego taśmą miedzianą i pokrytego warstwą miedzi.

W celu zmniejszenia zużycia przewodzącego kompozytu, zweryfikowano możliwość modyfikacji geometrii stroika, tak by częstotliwość środkowa filtra dalej pozostawała taka sama oraz wartość S21 nie zmieniała się w sposób znaczny. W tym celu zasymulowano rozkład gęstości prądu na górnej powierzchni. Wyższa gęstość prądu jest widoczna na zewnętrznych krawędziach stroika, w związku z czym zaproponowano modyfikację poprzez wykonanie szczelinowej konstrukcji. Pasuje ona do obszarów o wysokiej gęstości prądu i nie powinna zmieniać parametrów stroika [458]. Pętla stanowiąca szczelinowy stroik została wykonana z linii o takim samym przekroju jak linia transmisyjna. Zasymulowaną gęstość prądu na powierzchni stroika pełnego i szczelinowego przedstawiono na Rysunku 71.



Rysunek 71 Zasymulowana gęstość prądu na powierzchni stroika pełnego i szczelinowego

Symulacja parametrów S filtra wykorzystującego stroik szczelinowy wykazała brak zmiany częstotliwości środkowej i nieznaczny wzrost wartości S21 (z -34,5 do -33,4 dB). Próbkę z samego kompozytu wykonano i zmierzono, a uzyskane wartości S21 są nieznacznie większe od wartości zasymulowanych dla układu bez warstwy idealnego przewodnika na powierzchni. Wyniki symulacji i pomiaru przedstawiono na Rysunku 72.



Rysunek 72 Wyniki symulacji S_{21} próbek z samego kompozytu przewodzącego i pokrytego warstwą miedzi oraz pomiaru S_{21} próbki z samego kompozytu przewodzącego

W tym rozdziale przedstawiono wykonanie anteny i filtra wykorzystując technikę FDM i pokrywanie elektrochemiczne miedzią. Wytworzona antena charakteryzuje się zarówno niską wartością współczynnika odbicia w częstotliwości 2,45 GHz, jak również jako część anteny prostowniczej wartością maksymalnego napięcia na obciążeniu prostownika porównywalną z wartościami uzyskanymi dla anten komercyjnych i anteny siatkowej. Wykonany filtr wykorzystujący stroik impedancyjny osiąga wprowadzić minimalną wartość współczynnika transmisji w częstotliwości 2,45 GHz, ale jego charakterystyka jest spłaszczona w porównaniu do zasymulowanej. Wyniki symulacji i wstępnych pomiarów stroika szczelinowego ukazują go jako wartą rozważenia alternatywę dla stroika pełnego ze względu na jedynie nieznaczną zmianę charakterystyki na skutek ograniczenia zużycia przewodzącego kompozytu. Ograniczeniem w realizacji układów była niska przewodność używanego kompozytu, utrudniająca proces powlekania układu i uniemożliwiająca realizację go bez pokrywania miedzią ze względu na stratność linii mikropaskowej.

9. Prace perspektywiczne

Przegląd literaturowy wskazał szereg elementów RLC wykonanych drukiem aerozolowym, wskazanych w rozdziale 2.4.3 „Pozostałe drukowane elementy anten prostowniczych”. Chcąc rozszerzyć badania z rozdziału 6 „Anteny prostownicze” o możliwość wykonania całej anteny prostowniczej przy pomocy druku aerozolowego, koniecznym jest wykonanie elementów cewek lub kondensatorów jako elementów układu dopasowania impedancyjnego oraz kondensatorów i diod o parametrach pozwalających na pracę w wysokich częstotliwościach (np. diod Schottky’ego). W rozdziale 2.3.1 „Wybrane techniki elektroniki drukowanej” wskazano jako jedną z zasadniczych zalet druku aerozolowego możliwość druku na podłożach nie płaskich – teksturowanych, schodkowych lub zakrzywionych. W tym rozdziale przedstawiono badania wstępne wykonane w celu dążenia do wykonania anteny prostowniczej całkowicie przy pomocy druku aerozolowego, jak również weryfikujące możliwość nanoszenia na wybranych podłożach nie płaskich.

9.1. Zastosowanie druku aerozolowego do wykonywania cewek planarnych

Jedynym elementem z wskazanych we wstępie do rozdziału elementów anten prostowniczych mogącym być wykonanym jedynie przy wykorzystaniu przewodzącego srebrowego tuszu są cewki nazywane też induktorami. Podczas wykonywania próbnych cewek przyjęto następujące założenia:

- Ze względu na łatwość programowania cewki miały mieć kształt prostokątny
- Pola kontaktowe miały być wykonane w sposób umożliwiający lutowanie do nich elementów SMD, a ich rozstaw miał odpowiadać wielkości komponentów w obudowie metrycznej 3216.

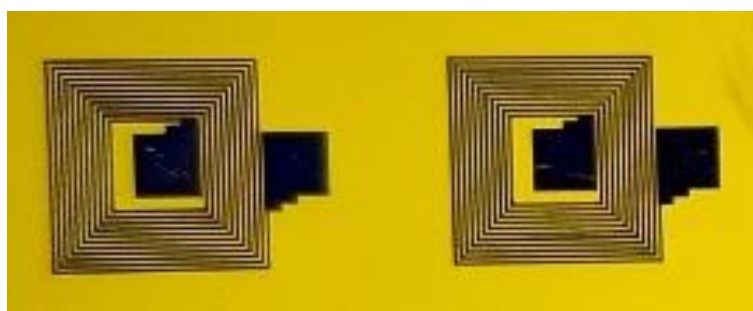
Cewkę zaprojektowano w taki sposób by między polami lutowniczymi zmieściło się jak najwięcej zwojów cewki, przy założeniu szerokości linii i odległości między środkami linii 100 μm . Zaprojektowana cewka spełniająca te wymagania charakteryzowała się wymiarem zewnętrznym 54,0 mm, wewnętrznym 23 mm i 11 zwojami. Korzystając z zmodyfikowanego wzoru Wheeler’a [459] obliczona wartość indukcyjności tak zaprojektowanej cewki wyniosła 0,65 μH .

Wydrukowano sześć czterowarstwowych cewek na folii Kapton i zmierzono miernikiem ich indukcyjność i rezystancję. Wyniki wyszły następujące:

A. 0,59 μH i 105 Ω

- B. 0,58 μH i 190 Ω
- C. 0,37 μH i 91 Ω
- D. 0,36 μH i 1,4 Ω
- E. 0,35 μH i 89 Ω
- F. 0,58 μH i 176 Ω

Cewki C, D i E miały niższą rezystancję i indukcyjność od cewek A, B i F. Weryfikacja kształtu pod mikroskopem pozwoliła na stwierdzenie występowania zwarć w cewkach C, D i E, co było powodem ich niższej rezystancji i indukcyjności. Prawidłowe cewki A, B i F miały powtarzalną indukcyjność, jednakże występowała wysoka różnica między wartościami ich rezystancji. Po wstawieniu wartości ich średniej indukcyjności do wcześniej użytego wzoru na indukcyjność, wartość ich efektywnej ilości zwojów wynosi 10,4 zwoju. Powodem obniżenia efektywnej ilości zwojów jest sposób łączenia pól lutowniczych z cewką, przedstawiony na Rysunku 73.



Rysunek 73 Prostokątne cewki wykonane przy pomocy druku aerozolowego.

9.2. Weryfikacja atomizowalności tuszy

Wytworzono trzy rodzaje tuszy, zaprojektowanych jako dielektryczny, przewodzący reaktywny i półprzewodnikowy. Ze względu na użycie drażniących rozpuszczalników, które miały możliwość dostawania się do oczu i układu oddechowego podczas badania atomizowalności tuszy, zaprojektowano i wykonano ruchomą przesłonę na stanowisko do atomizacji, umożliwiającą odprowadzenie oparów za stanowisko.

Tusz dielektryczny

Tusz dielektryczny może zostać wykorzystany jako warstwa dielektryczna w drukowanym kondensatorze [409]. Założeniami przyjętymi do jego wykonania była atomizowalność ultradźwiękowa i nanoszalność przy pomocy istniejącego stanowiska do druku AJP. Jako podstawę do jego wytworzenia przyjęto zalecane składły tuszy firmy Optomec, wskazujące na możliwość atomizacji ultradźwiękowej tuszu na bazie PMMA.

Pierwszym etapem było badanie możliwości atomizacyjnych różnych składów mieszaniny rozpuszczalników użytych w tuszu – acetonu i cykloheksanonu o czystości czda – gdyż atomizowalność późniejszego tuszu zależy w większości od jej atomizowalności. Wykonano próbki, po 3 dla każdego typu mieszaniny, w proporcjach masowych acetonu do cykloheksanonu:

- 4:5
- 1:1
- 2:1

Najwyższą średnią możliwością atomizacji wykazał się tusz w stężeniu 2:1 i rozpuszczalnik w takim stężeniu został później użyty do tworzenia tuszu. Do rozpuszczalnika dodano PMMA – 10% w stężeniu masowym w stosunku do masy acetonu i mieszano w mieszadle magnetycznym przez ponad 3 godziny.

Podczas próby atomizacji, pomimo wcześniejszej obserwacji całkowitego rozpuszczenia się PMMA w rozpuszczalniku, z tuszu wytrącały się cząstki PMMA, co uniemożliwiło atomizację i spowodowało osadzenie się warstwy polimeru na dnie pojemnika do atomizacji. Założono możliwe powody tego stanu rzeczy jako zbyt duże stężenie PMMA w tuszu lub zbyt krótki czas mieszania.

W kolejnym podejściu tusz mieszany był przez 72 godziny na mieszadle podgrzanym do 30 stopni. Na bazie powstałego tuszu wykonano próbki o stężeniach (masowych względem masy acetonu):

- A. 10%
- B. 5%
- C. 3,3(3)%
- D. 1,6(6)%

Każdą z próbek o niższych stężeniach uzyskiwano mieszając część próbki o wyższym stężeniu z dodatkową ilością rozpuszczalnika na mieszadle magnetycznym przez kolejne 4 godziny.

W przypadku próbek A i B nie uzyskano atomizacji. Próbka C atomizowała się uzyskując rzadką mgłę, natomiast dopiero próbka D pozwalała uzyskać gęstą mgłę aerozolową. Świeżą porcję Tuszu D spróbowano nanieść przy pomocy stanowiska do druku aerozolowego na folię Kapton. Podczas procesu napotkano trudności z oceną ilości tuszu

naniesionego na podłoże, ze względu na jego przezroczystość – możliwe było zaobserwowanie na powierzchni jedynie większych jego ilości. Tusz bardzo szybko tracił możliwości atomizacji w danym położeniu stanowiska do atomizacji i wymagał kalibracji co około 5 minut, co uniemożliwia stosowanie go bez zmiany w składzie. Prawdopodobnym powodem jest bardzo niska temperatura wrzenia użytej mieszaniny, co powoduje szybkie odparowanie tuszu podczas atomizacji.

Tusz przewodzący

Drugim tuszem był tusz projektowany jako przewodzący tusz reaktywny na bazie mrówczanu miedzi. Tusze reaktywne do druku aerozolowego osiągają parametry bliskie właściwościom litego materiału i wykazują niskie straty transmisyjne przy zastosowaniu do wykonania linii transmisyjnych [323], niemniej w dostępnej literaturze brak jest prób wykonania takiego tuszu z soli miedzi. Pierwszą próbą wytworzenia tuszu było zmieszanie 5,02 g mrówczanu miedzi z 20,10 g mieszaniny 90% butanolu i 10% metanolu. Tusz mieszano przez 12 godzin w mieszalniku magnetycznym. Mrówczan miedzi rozpuścił się jedynie w małym stopniu w mieszaninie alkoholi (Rysunek 74), gdyż w mieszaninie powinno się rozpuścić ok. 2,5% mrówczanu miedzi. Z tego też względu dokonano jego odwirowania i przefiltrowania przez filtr papierowy. Po przefiltrowaniu tusz atomizował się bardzo dobrze, jednakże po jego naniesieniu na folię Kapton nie zaobserwowano mrówczanu miedzi, co nie zmieniło się po wysuszeniu i spiekaniu podłoża. Druga próbka tuszu była wykonana na bazie 9,96 g nasyconego roztworu wodnego mrówczanu miedzi i 10g glikolu propylenowego w celu zwiększenia temperatury wrzenia mieszaniny. Tak przygotowana próbka tuszu nie atomizowała się.



Rysunek 74 Tusz na bazie mrówczanu miedzi podczas mieszania, widoczne nie pełne nasycenie roztworu mrówczanem miedzi.

Tusz półprzewodnikowy

Trzecim tuszem był tusz półprzewodnikowy na bazie nanocząstek IGZO. Tusz został przygotowany na bazie przepisu na wykonanie nanocząstek IGZO o wielkościach do 170 nm i tuszu wykorzystywanego w technice grawiury do wykonania drukowanych diod Schottky'ego [362]. Wytworzenie tuszu pozwalającego na wykonanie diody Schottky'ego jest konieczne do wykonania wydajnej w pełni drukowanej anteny prostowniczej przy pomocy druku aerozolowego, zastępując diody SMD. Nanocząstki o wielkości do 200 nm nadają się do wykorzystania w tuszach do druku aerozolowego [358], jednakże nieznana jest lepkość tuszu, konieczna była więc weryfikacja jego atomizowalności. Tusz o kolorze odpowiadającym opisanemu materiałowi (Rysunek 75) został wytworzony w ramach konsultowanej przez autora rozprawy pracy pt. „Wytworzenie i sprawdzenie właściwości tuszu półprzewodnikowego na bazie cząsteczek IGZO” z zastosowaniem surfaktantu AKM-0531. Podczas długotrwałej próby zatomizowania tuszu udało się uzyskać jedynie bardzo rzadką mgłę aerozolową, niewystarczającą do efektywnego druku aerozolowego takiego tuszu – w rzadkiej mgle aerozolowej zwykle atomizuje się prawie sam rozpuszczalnik, gdyż krople odrywające się od fali stojącej są zbyt małe by porwać cząstki fazy funkcjonalnej. Niemniej wartość rezystancji tuszu naniesionego na srebrną elektrodę na szkle i spieczonego w

temperaturze 150 °C w suszarce komorowej wyniosła 0,3 MΩ, co wskazuje na jej półprzewodnikowy charakter [460], a materiał nadaje się do dalszych testów.



Rysunek 75 Tusz IGZO po ujednordnieniu w atomizerze ultradźwiękowym.

Weryfikacja tuszu komercyjnego

Przeprowadzone zostały również próby atomizacji tuszy komercyjnych półprzewodnikowych. Tusze półprzewodnikowe zostały przebadane w celu potencjalnego wykorzystania ich do wytwarzania warstw aktywnych czujników, analogicznie do stosowanych w czujnikach z warstwą półprzewodnikową naparowaną próżniowo [201]. Zbadane zostały tusze o lepkości dostosowanej do atomizacji ultradźwiękowej, wykorzystujące jako fazę funkcjonalną SnO₂ - N31 (Avantama, Szwajcaria) o lepkości 3,2 cP i WO₃ – P10 (Avantama, Szwajcaria) o lepkości 2,4 cP. Tusz N31 obiecująco atomizował się na początku procesu atomizacji, jednakże po 40 minutach atomizacji o spadającej wydajności doszło do wytrącenia się z tuszu elastycznej zaglomerowanej fazy przedstawionej na Rysunku 76. Tusz P10 atomizował się natomiast bardzo dobrze (uzyskiwana jest jednorodna gęsta mgła która krąży w pojemniku podczas atomizacji) i podczas godzinnej atomizacji nie rozwarstwiał się.

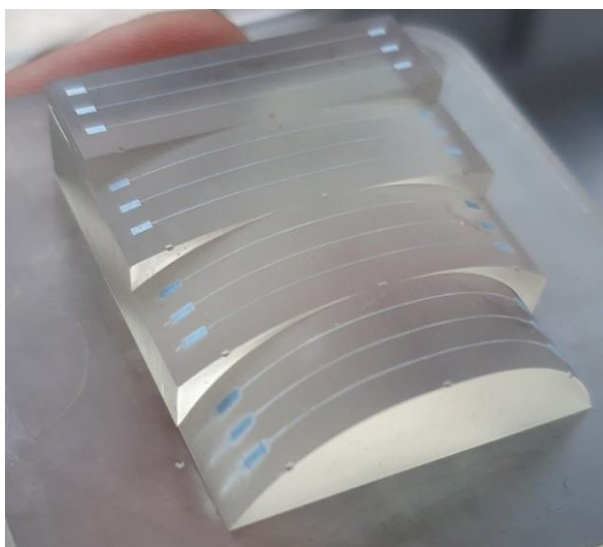


Rysunek 76 Rozwarstwienie tuszu podczas pierwszej nieudanej próby użycia tuszy półprzewodnikowych.

9.3. Nanoszenie wydruków na podłoża niepłaskie

Próby nanoszenia wzorów na podłoża niepłaskie wykonano na kształtkach żywicznych drukowanych mSLA. Pierwszą kształtką była płaska płyta, a wzorem nanoszonym była prosta linia o długości pięciu centymetrów zakończona prostokątnymi polami kontaktowymi. Próbka z naniesionymi sześcioma warstwami nie przewodziła, natomiast próbka z naniesionymi dziesięcioma warstwami charakteryzowała się rezystancją $98,7 \pm 3,3 \Omega$.

Do badań nanoszenia wzorów na powierzchnię łukowe przygotowano kształtkę zawierającą trzy zaokrąglenia i podłoże płaskie, przedstawioną na Rysunku 77. Wymiary podłoża zostały przygotowane w taki sposób, by linia zakończona prostokątnymi polami kontaktowymi naniesiona na każdy z łuków i podłoże płaskie miała taką samą długość (21,5mm), a zaokrąglenia kończyły się na kątach kolejno 15° , 30° i 45° . Dla największego kąta taka realizacja próbki skutkowała różnicą 4,19 mm między najwyższym a najniższym punktem nanoszonej linii, dla średniego 2,88, a dla najniższego 1,46 mm. Prędkość została dobrana tak by czas wykonania linii był taki sam dla wszystkich próbek, rozpoczynając od 1,1 mm/s dla linii na podłożu płaskim.



Rysunek 77 Zdjęcie wykonanego podłoża żywicznego z nadrukowanymi aerozolowo liniami testowymi.

Na wydrukowanym podłożu można było zaobserwować ślady kolejnych warstw naświetlanych podczas druku mSLA, pomimo wybrania najwyższej rozdzielczości w osi Z drukarki, co skutkowało brakiem przewodzenia dziesięciowarstwowych linii nanoszonych na łukach. By umożliwić naniesienie, próbkę podłoża poddano procesowi wygładzania w wygładzarce rotacyjnej, mierząc zmianę chropowatości po 3 i 12 godzinach. Chropowatość

Ra płaskiego podłoża przed wygładzaniem wynosiła $2,3 \pm 0,1 \mu\text{m}$, po 3 godzinach wygładzania $1,8 \pm 0,1 \mu\text{m}$, a po 12 godzinach $1,7 \pm 0,1 \mu\text{m}$. Próbkę zostały naniesione na tak przygotowane podłoże i spieczone fotonicznie przez 40 sekund (dłuższy czas spiekania uszkadzał podłoże, powodując wystąpienie pęknięć kształtki).

Rezystancja linii na podłożu płaskim wynosiła $52,2 \pm 3,8 \Omega$, na łuku do kąta 15° $48,7 \pm 2,5 \Omega$, na łuku do kąta 30° $66,9 \pm 0,1 \Omega$, łuku do kąta 45° $167,4 \pm 58,4 \Omega$. Próbkę na podłożu płaskim i o zaokrągleniu 15° charakteryzują się podobnymi wartościami rezystancji, która jest trochę niższa dla kąta 30 stopni i dużo niższa dla kąta 45 stopni.

W związku z niską odpornością żywicy na spiekanie fotoniczne, zbadano możliwość spiekania warstw nadrukowanych aerozolowo przy pomocy lutownicy na gorące powietrze. Pojedyncze linie o długości 55mm zakończone polami kontaktowymi nadrukowano na folii Kapton, a następnie najpierw do ich spiekania użyto stacji lutowniczej na gorące powietrze, a następnie próbkę spieczono fotonicznie. Wykonano również jedną próbkę referencyjną spiekana jedynie fotonicznie o rezystancji $11,3 \Omega$. Uzyskane wyniki przedstawiono w Tabeli 7.

Tabela 7 Wyniki pomiarów rezystancji próbek linii wydrukowanych aerozolowo po spiekaniu lutownicą powietrzną i następnie spiekaniu fotonicznym.

Temperatura powietrza z lutownicy ($^\circ\text{C}$)	Rezystancja po spiekaniu lutownicą powietrzną (Ω)	Rezystancja po spiekaniu fotonicznym (Ω)
170	NP.	12,7
180	NP.	13,7
190	NP.	15,7
200	680	15
220	88	15,4
240	38	15,7
260	13,5	9,7
280	15,8	12,7

*NP. – nie przewodzi

Temperaturą pozwalającą uzyskać przy pomocy lutownicy na gorące powietrze wyniki zbliżone do wyników uzyskiwanych przy pomocy spiekania fotonicznego jest 260°C . Wprawdzie punktowe nagrzewanie wydruku przy tej temperaturze może być realizowane jedynie przez 20 sekund by nie wystąpiła zmiana koloru i spękanie materiału, to badane

próbki spiekały się po jednorazowym powolnym przesunięciu dyszy stacji lutowniczej nad próbką, co trwało pojedyncze sekundy.

Innym przykładem druku na niepłaskich powierzchniach jest wytwarzanie połączeń na strukturach elektronicznych takich jak płytki PCB, gdzie warstwy przez które przebiega wydrukowana linia mają różne grubości. Łączenie druku aerozolowego z układami PCB jest szeroko omawiane w literaturze [170], [276], [280], [281], [284], [317], [318], [461], niemniej w związku ze zmianą wysokości pod ostrymi kątami realizacja takiego połączenia zwykle realizowana jest albo przy pomocy polimerowych powłok zapewniających gładkie przejście między linią wydrukowaną aerozolowo, a polami lutowniczymi lub komponentami SMD, często zagnieżdżonymi w podłożu, albo też nie jest opisana. Weryfikację możliwości wykonania bezpośredniego łączenia pól lutowniczych z wydrukami aerozolowymi zrealizowano poprzez nadruk linii o szerokości 100 μm i długości 14 mm między kwadratowymi miedzianymi polami kontaktowymi odległymi od siebie o 10 mm (odległość między krawędziami) z kolejnymi ilościami warstw – od 1 do 10. Próbki spiekano zarówno fotonicznie, jak i w suszarce w temperaturze 200°C przez 3 godziny. Niestety żadna z próbek nie przewodziła – podczas obserwacji mikroskopowych na krawędzi pola lutowniczego zaobserwowano wytworzenie się szyjki na srebrnej linii i brak ciągłości (Rysunek 78).



Rysunek 78 Linia srebrna nadrukowana poprzez krawędź miedzianego pola lutowniczego.

Kolejną próbą realizacji takiego połączenia było wykonanie dziesięciowarstwowych linii o szerokości 80 μm i prostokątnych sześciowarstwowych nadruków na krawędzi pola lutowniczego, spiekanych fotonicznie. Taka realizacja pozwoliła na wykonanie linii o powtarzalnej rezystancji $3,35 \pm 0,05 \Omega$, wskazując tym samym, że możliwa jest realizacja połączenia między polami kontaktowymi PCB o standardowej grubości 35 μm wykorzystując nadrukowane wzory jako warstwę pośredniczącą.

W niniejszym rozdziale wykonano cewki drukiem aerozolowym uzyskując wartość bliską wartości teoretycznej i zweryfikowano atomizowalności tuszy, wykazując potencjał tuszu P10 do zastosowania w druku aerozolowym. Wskazano również znaczne obniżenie przewodności nadruków linii aerozolowych podczas nadruków na podłożach wydrukowanych drukiem mSLA oraz brak zmian w parametrach linii wydrukowanych gdy nachylenie podłoża nie jest większe od 15° . Wskazano również na alternatywną metodę spiekania tuszu na powierzchniach wrażliwych na ciepło i potwierdzono możliwość realizacji linii aerozolowych między polami lutowniczymi PCB.

10. Podsumowanie i wnioski

W niniejszej rozprawie doktorskiej przedstawiono badania, które umożliwiały opracowanie technologii wytwarzania elementów systemu pozyskiwania i bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej z zastosowaniem techniki przyrostowej druku aerozolowego. Pozwala to wykorzystać druk aerozolowy do wykonywania elementów anten prostowniczych, czego efektem były zaprojektowane i wykonane anteny siatkowe wykorzystane jako element anteny prostowniczej.

Dokonano przeglądu stanu techniki w zakresie zastosowania technik elektroniki drukowanej do wykonywania elementów anten prostowniczych zastosowanych w układach pozyskiwania energii i bezprzewodowego transferu mocy na potrzeby IoT, z uwzględnieniem zarówno parametrów wytworzonych elementów istotnych pod względem realizacji układów mikrofalowych, jak również parametrów technologicznych procesu wytwarzania elementów. Opracowanie owego przeglądu zostało opublikowane w artykule pt. „Printed Electronics in Radiofrequency Energy Harvesters and Wireless Power Transfer Rectennas for IoT Applications” [356].

Analiza literatury światowej dotyczącej druku aerozolowego i drukowanych elementów anten prostowniczych wykonanych technikami elektroniki drukowanej wykazała brak badań dotyczących wykorzystania druku aerozolowego do wykonania anten prostowniczych i anten siatkowych. Na jej podstawie opracowano cel pracy, którym było opracowanie technologii wytwarzania elementów systemu pozyskiwania i bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej z zastosowaniem techniki przyrostowej druku aerozolowego ze szczególnym uwzględnieniem anten charakteryzujących się niską wartością współczynnika odbicia w częstotliwości 2,45 GHz, czasem wydruku dostosowanym do możliwości technologicznych użytej techniki drukarskiej i umożliwienie jako element anteny prostowniczej pozyskiwanie energii odpadowej. Postawiony cel pracy został osiągnięty.

Realizacja anten przy pomocy druku aerozolowego, ze względu na relatywnie długi czas wykonywania wzorów, wymagała przeprowadzenia prac konstrukcyjnych i badań technologicznych w celu zwiększenia czasu trwania okna technologicznego procesu druku aerozolowego pozwalającego na wytwarzanie jednorodnych struktur o powtarzalnej geometrii. Wykonano atomizer ultradźwiękowy umożliwiający płynną regulację zarówno położenia fiolki z tuszem jak i mocy, co ma kluczowe znaczenie dla osiągnięcia stabilnej długotrwałej atomizacji. Podczas wykorzystania stanowiska zauważono potencjał do dalszego

udoskonalenia atomizera - automatyczne uzupełnianie cieczy w zbiorniku dawałoby możliwość dłuższej stabilizacji druku, gdyż podczas długotrwałego osiągnięcia stanu nasycenia brak uzupełnienia zbiornika z cieczą przez operatora może doprowadzić do czasowego pogorszenia się jakości nadruku (co było najbardziej prawdopodobną przyczyną wyników anteny podwójnie siatkowej). Funkcja stabilizacji temperatury cieczy pośredniczącej w przekazywaniu ultradźwięków nie tylko umożliwiłaby szybsze uzyskanie satysfakcjonującej atomizacji, ale również umożliwiałaby używanie wyższych mocy atomizera przy braku wpływu termicznego na tusz, co może umożliwić bardziej wydajny druk. Zgadza się to z wynikami prac podczas których obniżenie temperatury cieczy ujednolodziło uzyskiwane parametry nadrukowanych warstw [462]. Stolik podciśnieniowo-grzejny umożliwił osiągnięcie temperatury podłoża z zakresu optymalnego do uzyskania wąskich linii, a mocowanie kamery umożliwiło możliwość stabilnej obserwacji procesu podczas jego wykonywania. Realizacja prac pozwoliła na ustalenie parametrów przepływu gazu osłonowego (100 ml/min) i nośnego ($11,2 \pm 0,8$ ml/min) dla których przy minimalnej mocy źródła ultradźwięków pozwalającego na atomizację tuszu możliwe było uzyskanie długotrwałych wydruków bez konieczności czyszczenia rurki dostarczającej aerozol do dyszy. Połączenie skręcane wybrane zostało jako najlepiej oddające rzeczywiste parametry badanych próbek wykonanych drukiem aerozolowym, oraz potwierdzone zostały użyteczność taśmy miedzianej jako płaszczyzny uziemienia i używanego analizatora sieci wektorowych.

Wykonanie anten siatkowych i mikropaskowych linii transmisyjnych do ich połączenia z pozostałymi elementami układu wymagało symulacji i pomiarów wzorów testowych pozwalających na wybranie parametrów procesowych pozwalających na uzyskanie wzorów o wysokiej jakości. Przebadane zostały linie mikropaskowe wykonane aerozolowo, w tym linie zrealizowane jako siatkowe, identyfikując ich parametry w zależności od liczby warstw i użytego materiału. Wyniki badań wskazują, że linie o szerokości 80 μm i siatkowe linie transmisyjne najlepiej odwzorowują symulację. Nie da się jednak zidentyfikować ani konkretnej ani minimalnej ilości warstw przy której każdy wzór wykonany aerozolowo osiągnie najlepsze parametry – jest to zależne od konkretnego materiału i konkretnego wzoru i wymaga weryfikacji eksperymentalnej. Wskazane zostały również wyższe współczynniki transmisji uzyskiwane dla linii mikropaskowych wykonanych przy pomocy tuszu o wyższej zawartości fazy funkcjonalnej. Zasymulowane i wykonane zostały też anteny siatkowe, wyznaczając ich teoretyczną przezroczystość optyczną i identyfikując ich współczynnik odbicia w częstotliwości 2,45 GHz oraz mierząc maksymalny absolutny zysk energetyczny.

Zaprojektowano i wykonano antenę siatkową z linii o szerokości 190 μm osiągając teoretyczną przezroczystość optyczną 87,2%, współczynnik odbicia -29,1 dB i maksymalny zysk energetyczny -4,29 dBi. Antena ta jednak nie była wykonywana w czasie jednej sesji drukarskiej, dlatego też zostały zaprojektowane i wykonane anteny: podwójnie siatkowa charakteryzująca się teoretyczną przezroczystością optyczną 96%, współczynnikiem odbicia 18,9 dB i maksymalnym zyskiem energetycznym -27,09 dB i z siatką z pojedynczych linii osiągając teoretyczną przezroczystość optyczną 97,32%, współczynnik odbicia -25,9 dB i maksymalny zysk energetyczny -11,01 dB. Zastosowanie powłok ochronnych na antenie skutecznie zmniejsza wpływ starzenia na parametry anteny w przypadku użycia bądź składowania anten w środowisku narażonym na wpływ czynników zewnętrznych, niemniej same nałożenie powłoki zmienia charakterystykę co powinno być uwzględnione podczas projektowania. Anteny wykonane przy pomocy tuszu Ag60Te charakteryzowały się gorszymi parametrami od anten wydrukowanych przy pomocy tuszu Ag25Te, czego najbardziej prawdopodobnym powodem jest zmiana geometrii wydrukowanych linii zaobserwowana podczas obserwacji mikroskopowych. Połączenie wykonanych anten z dopasowanym impedancyjnie prostownikiem pozwoliło na weryfikację funkcjonalności zrealizowanych w ten sposób anten prostowniczych. Pomiar napięcia podczas symulowanego pozyskiwania energii w środowisku biurowym wykazał porównywalne wyniki dla anteny siatkowej (1,4V) i komercyjnych anten, a wysokość pozyskanego maksymalnego napięcia dla wszystkich anten poza podwójnie siatkową z tuszu Ag60Te jest wystarczająco wysoka do zasilania niskomocowego układu do pozyskiwania energii elektrycznej.

W celu porównania parametrów z anteną drukowaną aerozolowo, do realizacji elementów systemu pozyskiwania i bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej w postaci anteny i stroika impedancyjnego wybrano alternatywną technikę pozwalającą na docelowe uzyskanie elementów funkcjonalnych zintegrowanych z obudowami urządzeń, czyli technikę druku FDM wykorzystującą kompozyty przewodzące. Ze względu na wysoką rezystywność użytych kompozytów uzyskane komponenty elektrochemiczne pokryto miedzią. Wykonano antenę charakteryzującą się zarówno niską wartością współczynnika odbicia (-21,9 dB) w częstotliwości 2,45 GHz, jak również jako część anteny prostowniczej wartością maksymalnego napięcia na obciążeniu prostownika (1,223 V) porównywalną z wartościami uzyskanymi dla anten komercyjnych i anteny siatkowej. Wykonano filtr wykorzystujący stroik impedancyjny osiągający minimalną wartość współczynnika transmisji w częstotliwości 2,45 GHz, choć jego wartość zarówno w części pasma którego miał nie

odfiltrowywać była niższa od symulacji, jak również w części pasma które miał odfiltrowywać była wyższa od symulacji. Symulacja stroika szczelinowego pozwalającego ograniczyć zużycie materiału wskazała na nieznaczny wpływ zmiany konstrukcji na parametry filtra. Wysoka rezystancja używanego kompozytu przewodzącego ograniczała zarówno realizację układu bez pokrywania miedzią, jak również doprowadzała do niejednorodności warstw miedzi którymi pokryto wzór. Badania wykorzystujące materiał kompozytowy o wyższej przewodności, np. wykorzystujący miedź jako fazę funkcjonalną mają potencjał do zaadresowania obu wskazanych ograniczeń używanego materiału.

W celu weryfikacji możliwości aplikacyjnych druku aerozolowego przy użyciu używanego stanowiska do realizacji układów pracujących w częstotliwościach wyższych niż zakres stosowania złączy SMA, zrealizowano linie transmisyjne na czterech rodzajach podłoży i czujnik stężenia glukozy w ślinie w ramach współpracy z Akademią Górniczo-Hutniczą. Wyniki badań linii mikropaskowych i realizacja funkcjonalnego czujnika potwierdzają aplikacyjność tej techniki w realizacji układów w paśmie Ka, a zaprezentowane prace technologiczne identyfikują możliwe wyzwania podczas realizacji miniaturowych układów o skomplikowanych kształtach i wskazują na możliwości ich rozwiązania.

Możliwość wykonania pozostałych elementów anten prostowniczych rozwinięto poprzez zaprojektowanie i wykonanie cewek oraz badania atomizowalności funkcjonalnych tuszy, weryfikujące możliwość ich użycia w druku aerozolowym z wykorzystaniem atomizacji ultradźwiękowej. Prawidłowo wykonane cewki zaprojektowane na indukcyjność $0,65 \mu\text{H}$ charakteryzowały się zmierzoną indukcyjnością $0,585 \pm 0,005$ ze względu na sposób realizacji pól lutowniczych zmniejszający efektywną ilość zwojów cewki. Spośród badanych materiałów, atomizującym się prawidłowo materiałem jest komercyjny tusz wykorzystujący tlenek wolframu jako fazę funkcjonalną. Weryfikacja wytworzonych materiałów stanowi natomiast podstawę do dalszych badań nad składami tuszy ze szczególnym uwzględnieniem użytych rozpuszczalników w celu uzyskania ich funkcjonalności.

Weryfikacja nanoszenia warstw aerozolowych na wybranych podłożach niepłaskich została ograniczona do łuków wydrukowanych mSLA o kątach 15° , 30° i 45° i pól lutowniczych na płytkach PCB. Wydruk na powierzchniach wykonanych techniką mSLA sam w sobie pogarszał przewodność nadrukowanych linii ze względu na chropowatość powierzchni, niemniej próbki nadrukowanych warstw wskazują na brak zmian w parametrach linii gdy pochylenie podłoża nie jest większe od 15° . Weryfikacji wymagałby też nadruk na

zaokrągleniach o mniejszych promieniach ze względu na mniejszą odległość końców wzorów od dyszy, co jednak jednocześnie zwiększyłoby chropowatość spowodowaną ograniczoną rozdzielczością osi Z drukarek. Pękanie podłoży żywicznych drukowanych mSLA podczas długotrwałego spiekania fotonicznego można ograniczyć poprzez zastosowanie lutownicy powietrznej do spiekania warstw w temperaturze 260 stopni, niemniej zmierzona rezystancja takich warstw, choć porównywalna do warstw spiekanych fotonicznie, pozostaje wyższa. Weryfikacja łączenia pól lutowniczych PCB linią drukowaną aerozolowo potwierdziła konieczność ich realizacji przy użyciu warstwy pośredniczącej wygładzającej zmianę wysokości, w tej rozprawie zrealizowanej z tego samego materiału co linia transmisyjna. Badania stanowią podstawę do rozszerzenia ich o identyfikację takiej realizacji przejścia linii transmisyjnej z warstwy miedzianej PCB na powierzchnię laminatu która najmniej zmienia parametry S linii w szerokim zakresie częstotliwości.

Zaprojektowano i wykonano funkcjonalną głowicę do druku aerozolowego przy pomocy techniki mSLA w praktyce weryfikując możliwość wykorzystania jej do druku aerozolowego. Choć stopień kolimacji wiązki wytworzonej głowicy jest jeszcze niższy niż obecnie wykorzystywanej duraluminiowej głowicy, to stanowi ona przykład wykorzystania możliwości druku 3D do realizacji kształtów niemożliwych do wytworzenia innymi metodami a prace kontynuowane przy użyciu nowoczesnych drukarek o wysokiej rozdzielczości i mniej penetrującym źródle światła wykorzystujących żywice zaprojektowane do wydruków w wysokich rozdzielczościach mają potencjał na realizację głowic nie odbiegających od obecnie wykorzystywanych w druku aerozolowym. Dałoby to możliwość nie tylko na ograniczenie kosztów i tym samym zwiększenie dostępności samego stanowiska, ale też na wykonywanie głowic przeznaczonych do pracy tylko z jednym rodzajem materiału, obniżając ryzyko zanieczyszczenia krzyżowego w następstwie niedokładnego czyszczenia urządzenia. Taka realizacja głowicy jest też szczególnie ciekawa ze względu na możliwość założenia we wzorze miejsca na dodatkowe systemy realizowane na głowicy, takie jak ogrzewające aerozol [463], czy akustycznie kolimujące strugę [369],

Do najważniejszych osiągnięć należy zaliczyć:

- Opracowanie metody wytwarzania siatkowych anten typu „patch” i siatkowych linii transmisyjnych metodą druku aerozolowego.
- Weryfikacja możliwości realizacji anteny prostowniczej z wykorzystaniem wykonanych drukiem aerozolowo elementów na przykładzie anten.

- Opracowanie pod względem technologicznym metody wytwarzania miniaturowych mikrofalowych sensorów stężenia glukozy w płynie fizjologicznym.
- Weryfikacja możliwości wykonania anten mikropaskowych typu „patch” i stroików impedancyjnych typu „stub” przy pomocy kompozytu przewodzącego o niskiej przewodności wydrukowanego techniką FDM i pokrywania elektrochemicznego miedzią.

Opracowana technologia wytwarzania anten siatkowych metodą druku aerozolowego jako elementów anten prostowniczych jest przedmiotem zgłoszenia patentowego P.450162 na wynalazek pt.: „System bezprzewodowego zasilania elektroniki noszonej”, z dnia 30.10.2024. Wyniki badań autora w obszarze tematyki precyzyjnego druku aerozolowego układów elektronicznych i systemów pozyskiwania energii opadowej zostały do tej pory opublikowane w 5 artykułach z listy JCR, z czego 3 są bezpośrednio powiązane z tematyką pracy. Ponadto wyniki zaprezentowano na konferencji IEEE Wireless Power Transfer Conference and Expo w 2023 roku. Za osiągnięcia naukowe, powstałe w trakcie realizacji niniejszej pracy w związku z uczestnictwem autora w projekcie „Functional heterophase materials for structural electronics” First TEAM/2016-1/7, FNP, autor został nagrodzony zespołową nagrodą Rektora Politechniki Warszawskiej pierwszego stopnia w 2024 roku.

Bibliografia

- [1] N. Buchanan, Y. H. Chan, H. Mardani, R. Dickie, F. Schoofs, and D. Zelenchuk, “Improved Cross-Helix Array with Efficient 360-Degree Steerable WPT for Solar Power Satellite,” *Proc. 2024 IEEE Wirel. Power Technol. Conf. Expo, WPTCE 2024*, no. May, pp. 96–100, 2024, doi: 10.1109/WPTCE59894.2024.10557339.
- [2] Eva Sophia Rosker, “Printed Radio Frequency Electronics: Achieving High Performance Using Additive Manufacturing,” UNIVERSITY OF CALIFORNIA, 2021.
- [3] S. Salahuddin *et al.*, “Roadmap on low-power electronics,” 2024, doi: 10.1063/5.0184774.
- [4] S. Sinha, “State of IoT 2024: Number of connected IoT devices growing 13% to 18.8 billion globally,” *IoT Analytics*, 2024. <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/> (accessed Dec. 18, 2024).
- [5] M. Magno and D. Boyle, “Wearable Energy Harvesting: From body to battery,” in *2017 12th International Conference on Design & Technology of Integrated Systems In Nanoscale Era (DTIS)*, Apr. 2017, pp. 1–6. doi: 10.1109/DTIS.2017.7930169.
- [6] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “Wireless sensor networks: a survey,” *Comput. Networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393–422, Mar. 2002, doi: 10.1016/S1389-1286(01)00302-4.
- [7] P. Bauer, M. Sichertiu, R. Isteanian, and K. Premaratne, “The mobile patient: wireless distributed sensor networks for patient monitoring and care,” in *Proceedings 2000 IEEE EMBS International Conference on Information Technology Applications in Biomedicine. ITAB-ITIS 2000. Joint Meeting Third IEEE EMBS International Conference on Information Technology Applications in Biomedicine (ITAB’00). Third Works*, 2000, pp. 17–21. doi: 10.1109/ITAB.2000.892341.
- [8] A. Mainwaring, D. Culler, J. Polastre, R. Szewczyk, and J. Anderson, “Wireless sensor networks for habitat monitoring,” in *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications*, Sep. 2002, pp. 88–97. doi: 10.1145/570738.570751.
- [9] I. Stoianov, L. Nachman, S. Madden, and T. Tokmouline, “PIPENET: A Wireless

- Sensor Network for Pipeline Monitoring,” in *2007 6th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, Apr. 2007, pp. 264–273. doi: 10.1109/IPSIN.2007.4379686.
- [10] J. G. D. Hester, J. Kimionis, and M. M. Tentzeris, “Printed Motes for IoT Wireless Networks: State of the Art, Challenges, and Outlooks,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 65, no. 5, pp. 1819–1830, May 2017, doi: 10.1109/TMTT.2017.2650912.
- [11] S. Li, L. Da Xu, and S. Zhao, “The internet of things: a survey,” *Inf. Syst. Front.*, vol. 17, no. 2, pp. 243–259, 2015, doi: 10.1007/s10796-014-9492-7.
- [12] S. Madakam, R. Ramaswamy, and S. Tripathi, “Internet of Things (IoT): A Literature Review,” *J. Comput. Commun.*, vol. 03, no. 05, pp. 164–173, 2015, doi: 10.4236/jcc.2015.35021.
- [13] R. H. Weber and R. Weber, *Internet of Things Legal Perspectives*, vol. 2019, no. July 2016. Springer, 2009. [Online]. Available: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-77492-3_16
- [14] J. A. Stankovic, “Research Directions for the Internet of Things,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 1, no. 1, pp. 3–9, Feb. 2014, doi: 10.1109/JIOT.2014.2312291.
- [15] S. Fang *et al.*, “An Integrated System for Regional Environmental Monitoring and Management Based on Internet of Things,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 10, no. 2, pp. 1596–1605, May 2014, doi: 10.1109/TII.2014.2302638.
- [16] H. Kopetz and W. Steiner, *Internet of Things BT - Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications*, 3rd ed. Springer Nature Switzerland AG, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-031-11992-7_13
- [17] D. O. M. Sanchez, “Sustainable Development Challenges and Risks of Industry 4.0: A literature review,” in *2019 Global IoT Summit (GIoTS)*, Jun. 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/GIOTS.2019.8766414.
- [18] B. N. Silva, M. Khan, and K. Han, “Towards sustainable smart cities: A review of trends, architectures, components, and open challenges in smart cities,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 38, pp. 697–713, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.scs.2018.01.053.
- [19] B. L. Risteska Stojkoska and K. V. Trivodaliev, “A review of Internet of Things for smart home: Challenges and solutions,” *J. Clean. Prod.*, vol. 140, pp. 1454–1464, Jan.

- 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.10.006.
- [20] O. Elijah, T. A. Rahman, I. Orikumhi, C. Y. Leow, and M. H. D. N. Hindia, “An Overview of Internet of Things (IoT) and Data Analytics in Agriculture: Benefits and Challenges,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 5, no. 5, pp. 3758–3773, Oct. 2018, doi: 10.1109/JIOT.2018.2844296.
 - [21] S. Luthra and S. K. Mangla, “Evaluating challenges to Industry 4.0 initiatives for supply chain sustainability in emerging economies,” *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 117, pp. 168–179, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.psep.2018.04.018.
 - [22] Graeme Purdy, “Miniature Solid State Batteries for MedTech,” in *IDTechEx Show 2019*, 2019.
 - [23] C. Kim *et al.*, “High-Power Aqueous Zinc-Ion Batteries for Customized Electronic Devices,” *ACS Nano*, vol. 12, no. 12, pp. 11838–11846, 2018, doi: 10.1021/acsnano.8b02744.
 - [24] H. H. R. Sherazi, L. A. Grieco, G. Boggia, and M. A. Imran, “Cost Efficiency Optimization for Industrial Automation,” in *Wireless Automation as an Enabler for the Next Industrial Revolution*, Wiley, 2020, pp. 141–171. doi: 10.1002/9781119552635.ch7.
 - [25] Y. Sui *et al.*, “A Reactive Inkjet Printing Process for Fabricating Biodegradable Conductive Zinc Structures,” *Adv. Eng. Mater.*, vol. 25, no. 1, p. 2200529, Jan. 2023, doi: 10.1002/adem.202200529.
 - [26] O. Galinina, H. Tabassum, K. Mikhaylov, S. Andreev, E. Hossain, and Y. Koucheryavy, “On feasibility of 5G-grade dedicated RF charging technology for wireless-powered wearables,” *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 23, no. 2, pp. 28–37, Apr. 2016, doi: 10.1109/MWC.2016.7462482.
 - [27] Y. Khan, A. Thielens, S. Muin, J. Ting, C. Baumbauer, and A. C. Arias, “A New Frontier of Printed Electronics: Flexible Hybrid Electronics,” *Adv. Mater.*, vol. 32, no. 15, pp. 1–29, 2020, doi: 10.1002/adma.201905279.
 - [28] P. Spies, M. Pollak, and L. Mateu, Eds., *Handbook of Energy Harvesting Power Supplies and Applications*. Jenny Stanford Publishing, 2015. doi: 10.1201/b18523.
 - [29] Z. Wang, V. Leonov, P. Fiorini, and C. Van Hoof, “Realization of a wearable

- miniaturized thermoelectric generator for human body applications,” *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 156, no. 1, pp. 95–102, Nov. 2009, doi: 10.1016/j.sna.2009.02.028.
- [30] G. J. Snyder, “Thermoelectric Energy Harvesting,” in *Energy Harvesting Technologies*, Boston, MA: Springer US, 2009, pp. 325–336. doi: 10.1007/978-0-387-76464-1_11.
- [31] M. Billinghamurst and D. Busse, “Rapid Prototyping for Wearables,” in *Proceedings of the Ninth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, Jan. 2015, pp. 505–508. doi: 10.1145/2677199.2683592.
- [32] M. K. Mishu *et al.*, “Prospective efficient ambient energy harvesting sources for iot-equipped sensor applications,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 9, no. 9, pp. 1–22, 2020. doi: 10.3390/electronics9091345.
- [33] M. Magno, G. A. Salvatore, P. Jokic, and L. Benini, “Self-Sustainable Smart Ring for Long-Term Monitoring of Blood Oxygenation,” *IEEE Access*, pp. 1–1, Jul. 2019, doi: 10.1109/access.2019.2928055.
- [34] Power Watch, “Now Available: PowerWatch Series 2, the First Full-Featured Smartwatch You Never Need to Charge,” 2019. <https://www.powerwatch.com/blogs/news/now-available-powerwatch-series-2-the-first-full-featured-smartwatch-you-never-need-to-charge>
- [35] EnOcean Alliance, “EnOcean – The World of Energy Harvesting Wireless Technology[White Paper],” 2016. [Online]. Available: <https://www.enocean.com/en/technology/white-papers/>
- [36] Hitachi, “Hitachi Rail’s digital sensors to spot track faults, cut rail disruption and improve safety,” 2022. <https://www.hitachirail.com/press/#!/pressreleases/hitachi-rails-digital-sensors-to-spot-track-faults-cut-rail-disruption-and-improve-safety-3164984>
- [37] Siemens Industry Inc., “Prepare for the unexpected – creating smart grids to meet current and future challenges [White paper],” Alpharetta, 2021. [Online]. Available: <https://www.siemens.com/global/en/products/energy/grid-software/operation/grid-control/advanced-distribution-management/white-paper-smart-grid.html>
- [38] A. Chen, D. Madan, P. K. Wright, and J. W. Evans, “Dispenser-printed planar thick-film thermoelectric energy generators,” *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 21,

- no. 10, p. 104006, Oct. 2011, doi: 10.1088/0960-1317/21/10/104006.
- [39] A. R. M. Siddique, R. Rabari, S. Mahmud, and B. Van Heyst, “Thermal energy harvesting from the human body using flexible thermoelectric generator (FTEG) fabricated by a dispenser printing technique,” *Energy*, vol. 115, pp. 1081–1091, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.09.087.
 - [40] N. Jaziri, A. Boughamoura, J. Müller, B. Mezghani, F. Tounsi, and M. Ismail, “A comprehensive review of Thermoelectric Generators: Technologies and common applications,” *Energy Reports*, vol. 6, pp. 264–287, 2020, doi: 10.1016/j.egy.2019.12.011.
 - [41] V. Leonov, “Thermoelectric Energy Harvesting of Human Body Heat for Wearable Sensors,” *IEEE Sens. J.*, vol. 13, no. 6, pp. 2284–2291, Jun. 2013, doi: 10.1109/JSEN.2013.2252526.
 - [42] S. El Oualid *et al.*, “High Power Density Thermoelectric Generators with Skutterudites,” *Adv. Energy Mater.*, vol. 11, no. 19, p. 2100580, May 2021, doi: 10.1002/aenm.202100580.
 - [43] A. C. Turkmen and C. Celik, “Energy harvesting with the piezoelectric material integrated shoe,” *Energy*, vol. 150, pp. 556–564, May 2018, doi: 10.1016/j.energy.2017.12.159.
 - [44] H. Song, S. Kim, H. S. Kim, D. Lee, C. Kang, and S. Nahm, “Piezoelectric Energy Harvesting Design Principles for Materials and Structures: Material Figure-of-Merit and Self-Resonance Tuning,” *Adv. Mater.*, vol. 32, no. 51, p. 2002208, Dec. 2020, doi: 10.1002/adma.202002208.
 - [45] H. S. Kim, J.-H. Kim, and J. Kim, “A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 12, no. 6, pp. 1129–1141, Dec. 2011, doi: 10.1007/s12541-011-0151-3.
 - [46] P. Jaffe and J. McSpadden, “Energy Conversion and Transmission Modules for Space Solar Power,” *Proc. IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1424–1437, Jun. 2013, doi: 10.1109/JPROC.2013.2252591.
 - [47] L. Fagiolari *et al.*, “Integrated energy conversion and storage devices: Interfacing solar cells, batteries and supercapacitors,” *Energy Storage Mater.*, vol. 51, pp. 400–434, Oct.

2022, doi: 10.1016/j.ensm.2022.06.051.

- [48] A. Khatibi, F. Razi Astaraci, and M. H. Ahmadi, “Generation and combination of the solar cells: A current model review,” *Energy Sci. Eng.*, vol. 7, no. 2, pp. 305–322, Apr. 2019, doi: 10.1002/ese3.292.
- [49] S. A. Hashemi, S. Ramakrishna, and A. G. Aberle, “Recent progress in flexible–wearable solar cells for self-powered electronic devices,” *Energy Environ. Sci.*, vol. 13, no. 3, pp. 685–743, 2020, doi: 10.1039/C9EE03046H.
- [50] Q. Zhang *et al.*, “Energy harvesting from shadow-effect,” *Energy Environ. Sci.*, vol. 13, no. 8, pp. 2404–2413, 2020, doi: 10.1039/d0ee00825g.
- [51] H. H. R. Sherazi, D. Zorbas, and B. O’flynn, “A Comprehensive Survey on RF Energy Harvesting: Applications and Performance Determinants,” *Sensors*, vol. 22, no. 8, pp. 1–36, 2022, doi: 10.3390/s22082990.
- [52] D. Matsuura, M. Shimizu, Z. Liu, and H. Yugami, “Optical rectenna with wide wavelength coverage from a hollow resonator coupled with a metal-insulator-metal tunnel diode,” *Appl. Phys. Express*, vol. 15, no. 6, p. 062001, Jun. 2022, doi: 10.35848/1882-0786/ac6c1b.
- [53] P. De Mil *et al.*, “Design and Implementation of a Generic Energy-Harvesting Framework Applied to the Evaluation of a Large-Scale Electronic Shelf-Labeling Wireless Sensor Network,” *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2010, no. 1, p. 343690, Dec. 2010, doi: 10.1155/2010/343690.
- [54] F. Yildiz, “Potential Ambient Energy-Harvesting Sources and Techniques,” *J. Technol. Stud.*, vol. 35, no. 1, pp. 40–48, 2009.
- [55] S. Kim, M. Tentzeris, and A. Georgiadis, “Hybrid Printed Energy Harvesting Technology for Self-Sustainable Autonomous Sensor Application,” *Sensors*, vol. 19, no. 3, p. 728, Feb. 2019, doi: 10.3390/s19030728.
- [56] J. G. Koomey, S. Berard, M. Sanchez, and H. Wong, “Implications of historical trends in the electrical efficiency of computing,” *IEEE Ann. Hist. Comput.*, vol. 33, no. 3, pp. 46–54, 2011, doi: 10.1109/MAHC.2010.28.
- [57] S. Bi, C. K. Ho, and R. Zhang, “Wireless powered communication: opportunities and challenges,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 4, pp. 117–125, Apr. 2015, doi:

10.1109/MCOM.2015.7081084.

- [58] D. W. K. Ng, E. S. Lo, and R. Schober, “Wireless Information and Power Transfer: Energy Efficiency Optimization in OFDMA Systems,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 12, no. 12, pp. 6352–6370, Dec. 2013, doi: 10.1109/TWC.2013.103113.130470.
- [59] L. G. Tran, H. K. Cha, and W. T. Park, “RF power harvesting: a review on designing methodologies and applications,” *Micro Nano Syst. Lett.*, vol. 5, no. 1, 2017, doi: 10.1186/s40486-017-0051-0.
- [60] A. Yaghjian, “An overview of near-field antenna measurements,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 34, no. 1, pp. 30–45, Jan. 1986, doi: 10.1109/TAP.1986.1143727.
- [61] M. Cansiz, D. Altinel, and G. K. Kurt, “Efficiency in RF energy harvesting systems: A comprehensive review,” *Energy*, vol. 174, pp. 292–309, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.02.100.
- [62] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljačić, “Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances,” *Science (80-.)*, vol. 317, no. 5834, pp. 83–86, Jul. 2007, doi: 10.1126/science.1143254.
- [63] X. Lu, D. Niyato, P. Wang, D. I. Kim, and Z. Han, “Wireless Charger Networking for Mobile Devices: Fundamentals, Standards, and Applications,” 2014, Accessed: Dec. 28, 2022. [Online]. Available: www.imsresearch.com
- [64] F. Rinanda Saputri, Sunarno, M. Motivanisman Waruwu, and R. Wijaya, “The wireless energy transfer (WET) using ultra high frequency (UHF) for human body implant recharging,” in *E3S Web of Conferences*, 2018, vol. 43. doi: 10.1051/e3sconf/201843101027.
- [65] M. Pinuela, D. C. Yates, S. Lucyszyn, and P. D. Mitcheson, “Maximizing DC-to-Load Efficiency for Inductive Power Transfer,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 5, pp. 2437–2447, May 2013, doi: 10.1109/TPEL.2012.2215887.
- [66] H. Shoki, “Issues and Initiatives for Practical Deployment of Wireless Power Transfer Technologies in Japan,” *Proc. IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1312–1320, Jun. 2013, doi: 10.1109/JPROC.2013.2248051.
- [67] D. Surender, M. A. Halimi, T. Khan, F. A. Talukdar, Nasimuddin, and S. R.

- Rengarajan, "5G/Millimeter-Wave Rectenna Systems for Radio-Frequency Energy Harvesting/Wireless Power Transmission Applications: An overview," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 65, no. 3, pp. 57–76, Jun. 2023, doi: 10.1109/MAP.2022.3208794.
- [68] M. Kumar, S. Kumar, and A. Sharma, "Dual-Purpose Planar Radial-Array of Rectenna Sensors for Orientation Estimation and RF-Energy Harvesting at IoT Nodes," *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 32, no. 3, pp. 245–248, Mar. 2022, doi: 10.1109/LMWC.2022.3145196.
- [69] M. Merenda, D. Spano, K. Rabaani, and F. G. Della Corte, "Optimized design procedure of rectenna impedance matching networks for IoT devices," in *2022 7th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*, Jul. 2022, pp. 1–5. doi: 10.23919/SpliTech55088.2022.9854212.
- [70] I. D. Bougas, M. S. Papadopoulou, A. D. Boursianis, K. Kokkinidis, and S. K. Goudos, "State-of-the-Art Techniques in RF Energy Harvesting Circuits," *Telecom*, vol. 2, no. 4, pp. 369–389, 2021, doi: 10.3390/telecom2040022.
- [71] U. Guler, M. S. E. Sendi, and M. Ghovanloo, "A dual-mode passive rectifier for wide-range input power flow," in *2017 IEEE 60th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*, Aug. 2017, vol. 2017-Augus, pp. 1376–1379. doi: 10.1109/MWSCAS.2017.8053188.
- [72] T. Soyata, L. Copeland, and W. Heinzelman, "RF Energy Harvesting for Embedded Systems: A Survey of Tradeoffs and Methodology," *IEEE Circuits Syst. Mag.*, vol. 16, no. 1, pp. 22–57, 2016, doi: 10.1109/MCAS.2015.2510198.
- [73] J.-P. Curty, N. Joehl, F. Krummenacher, C. Dehollain, and M. J. Declercq, "A model for μ -power rectifier analysis and design," *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, vol. 52, no. 12, pp. 2771–2779, Dec. 2005, doi: 10.1109/TCSI.2005.854294.
- [74] V. Marian, C. Menudier, M. Thevenot, C. Vollaie, J. Verdier, and B. Allard, "Efficient design of rectifying antennas for low power detection," in *2011 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, Jun. 2011, pp. 1–1. doi: 10.1109/MWSYM.2011.5973270.
- [75] R. E. Barnett, J. Liu, and S. Lazar, "A RF to DC Voltage Conversion Model for Multi-Stage Rectifiers in UHF RFID Transponders," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 44, no. 2, pp. 354–370, Feb. 2009, doi: 10.1109/JSSC.2008.2010991.

- [76] M. Wagih, A. S. Weddell, and S. Beeby, "Meshed High-Impedance Matching Network-Free Rectenna Optimized for Additive Manufacturing," *IEEE Open J. Antennas Propag.*, vol. 1, no. November, pp. 615–626, 2020, doi: 10.1109/OJAP.2020.3038001.
- [77] Y.-S. S. Chen and C.-W. W. Chiu, "Maximum achievable power conversion efficiency obtained through an optimized rectenna structure for RF energy harvesting," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, no. 5, pp. 2305–2317, May 2017, doi: 10.1109/TAP.2017.2682228.
- [78] N. Mirzababaei, F. Geran, and S. Mohanna, "A radio frequency energy harvesting rectenna for GSM, LTE, WLAN, and WiMAX," *Int. J. RF Microw. Comput. Eng.*, vol. 31, no. 6, pp. 1–11, Jun. 2021, doi: 10.1002/mmce.22630.
- [79] J. Zhang and J. Wei, Xue Bai, Wan-yang Han, Bu-hui Zhao, Lei-jun Xu, "The design of radio frequency energy harvesting and radio frequency-based wireless power transfer system for battery-less self-sustaining applications," *Int. J. RF Microw. Comput. Eng.*, vol. 29, 2019.
- [80] J. O. McSpadden, Lu Fan, and Kai Chang, "Design and experiments of a high-conversion-efficiency 5.8-GHz rectenna," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 46, no. 12, pp. 2053–2060, 1998, doi: 10.1109/22.739282.
- [81] W. Lin and R. W. Ziolkowski, "High Performance Electrically Small Huygens Rectennas Enable Wirelessly Powered Internet of Things Sensing Applications: A Review," *Engineering*, vol. 11, pp. 42–59, 2022, doi: 10.1016/j.eng.2021.08.025.
- [82] T. Lee, *The Design of Radio-Frequency Integrated Circuits. Second Edition.*, vol. 2, no. 2011–01. 2004.
- [83] J. H. Harlow, Ed., *ELECTRIC POWER TRANSFORMER ENGINEERING*. New York: CRC Press, 2004.
- [84] Texas Instruments, "Ultra Low power Harvester power Management IC with boost charger, and Nanopower Buck Converter." <https://www.ti.com/product/BQ25570> (accessed Jul. 27, 2025).
- [85] D. M. Pozar, *Microwave Engineering, 4th Edition*. 2012.

- [86] M. Arrawatia, M. S. Baghini, and G. Kumar, "Differential Microstrip Antenna for RF Energy Harvesting," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 63, no. 4, pp. 1581–1588, Apr. 2015, doi: 10.1109/TAP.2015.2399939.
- [87] S. Shen, C.-Y. Chiu, and R. D. Murch, "A Dual-Port Triple-Band L-Probe Microstrip Patch Rectenna for Ambient RF Energy Harvesting," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 16, pp. 3071–3074, 2017, doi: 10.1109/LAWP.2017.2761397.
- [88] A. D. Boursianis *et al.*, "Smart Irrigation System for Precision Agriculture—The AREThOU5A IoT Platform," *IEEE Sens. J.*, vol. 21, no. 16, pp. 17539–17547, Aug. 2021, doi: 10.1109/JSEN.2020.3033526.
- [89] A. D. Boursianis *et al.*, "Multiband Patch Antenna Design Using Nature-Inspired Optimization Method," *IEEE Open J. Antennas Propag.*, vol. 2, pp. 151–162, 2021, doi: 10.1109/OJAP.2020.3048495.
- [90] Sobolewski Paweł, "Wybrane zagadnienia integracji układów sub-terahercowych," Politechnika Warszawska, 2022.
- [91] S. Khang, J. W. Yu, and W. Lee, "Compact folded dipole rectenna with RF-based energy harvesting for IoT smart sensors," *Electron. Lett.*, vol. 51, no. 12, pp. 926–928, Jun. 2015, doi: 10.1049/el.2015.0138.
- [92] H. Saghlatoon, T. Bjorninen, L. Sydanheimo, M. M. Tentzeris, and L. Ukkonen, "Inkjet-printed wideband planar monopole antenna on cardboard for RF energy-harvesting applications," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 14, pp. 325–328, 2015, doi: 10.1109/LAWP.2014.2363085.
- [93] M. Zeng, A. S. Andrenko, X. Liu, Z. Li, and H.-Z. Tan, "A Compact Fractal Loop Rectenna for RF Energy Harvesting," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 16, pp. 2424–2427, 2017, doi: 10.1109/LAWP.2017.2722460.
- [94] H. Kamoda, S. Kitazawa, N. Kukutsu, and K. Kobayashi, "Loop Antenna Over Artificial Magnetic Conductor Surface and Its Application to Dual-Band RF Energy Harvesting," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 63, no. 10, pp. 4408–4417, Oct. 2015, doi: 10.1109/TAP.2015.2459132.
- [95] H. Sun, Y. Guo, M. He, and Z. Zhong, "A Dual-Band Rectenna Using Broadband Yagi Antenna Array for Ambient RF Power Harvesting," *IEEE Antennas Wirel. Propag.*

- Lett.*, vol. 12, pp. 918–921, 2013, doi: 10.1109/LAWP.2013.2272873.
- [96] P. Soboll, V. Wienstroer, and R. Kronberger, “Stacked Yagi-Uda Array for 2.45-GHz Wireless Energy Harvesting,” *IEEE Microw. Mag.*, vol. 16, no. 1, pp. 67–73, Feb. 2015, doi: 10.1109/MMM.2014.2367858.
- [97] Y.-Y. Hu, S. Sun, and H. Xu, “Compact Collinear Quasi-Yagi Antenna Array for Wireless Energy Harvesting,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 35308–35317, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2974815.
- [98] S. Shen, Y. Zhang, C.-Y. Chiu, and R. Murch, “An Ambient RF Energy Harvesting System Where the Number of Antenna Ports is Dependent on Frequency,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 67, no. 9, pp. 3821–3832, Sep. 2019, doi: 10.1109/TMTT.2019.2906598.
- [99] S. Agrawal, R. D. Gupta, M. S. Parihar, and P. N. Kondekar, “A wideband high gain dielectric resonator antenna for RF energy harvesting application,” *AEU - Int. J. Electron. Commun.*, vol. 78, pp. 24–31, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.aeue.2017.05.018.
- [100] H. S. Khaliq, M. Awais, W. Ahmad, and W. T. Khan, “A high gain six band frequency independent dual CP planar log periodic antenna for ambient RF energy harvesting,” in *2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - FALL)*, Nov. 2017, pp. 3024–3028. doi: 10.1109/PIERS-FALL.2017.8293652.
- [101] U. Baroudi, “Management of RF Energy Harvesting: A Survey,” in *2019 16th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*, Mar. 2019, no. March, pp. 44–49. doi: 10.1109/SSD.2019.8893169.
- [102] M. H. Reddy, D. Siddle, and D. Sheela, “Design and implementation of a beam-steering antenna array using butler matrix feed network for X-band applications,” *AEU - Int. J. Electron. Commun.*, vol. 147, p. 154147, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.aeue.2022.154147.
- [103] M. Mathur, A. Agrawal, G. Singh, and S. K. Bhatnagar, “A COMPACT COPLANAR WAVEGUIDE FED WIDEBAND MONOPOLE ANTENNA FOR RF ENERGY HARVESTING APPLICATIONS,” *Prog. Electromagn. Res. M*, vol. 63, pp. 175–184, 2018, doi: 10.2528/PIERM17101201.
- [104] T. Sharma and G. Saini, “Microstrip Antenna Array for RF Energy Harvesting

- System,” *Int. J. Adv. Inf. Sci. Technol. ISSN*, vol. 5, no. 1, pp. 145–149, 2016, doi: 10.15693/ijaist/2016.v5i1.145-149.
- [105] C. A. Balanis, *Modern antenna handbook*. John Wiley & Sons, 2011.
- [106] M. U. Khan, M. S. Sharawi, and R. Mittra, “Microstrip patch antenna miniaturisation techniques: A review,” *IET Microwaves, Antennas Propag.*, vol. 9, no. 9, pp. 913–922, 2015, doi: 10.1049/iet-map.2014.0602.
- [107] A. Ali, R. Eid, D. E. Manaseer, H. K. AbuJaber, and A. Ware, “Dual-Band 802.11 RF Energy Harvesting Optimization for IoT Devices with Improved Patch Antenna Design and Impedance Matching,” *Sensors*, vol. 25, no. 4, p. 1055, Feb. 2025, doi: 10.3390/s25041055.
- [108] R. B. Green *et al.*, “Optically transparent antennas and filters: A smart city concept to alleviate infrastructure and network capacity challenges,” *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 61, no. 3, pp. 37–47, 2019, doi: 10.1109/MAP.2019.2907895.
- [109] O. Yurduseven, D. Smith, N. Pearsall, I. Forbes, and D. Johnston, “A meshed multiband solar patch array antenna,” *LAPC 2012 - 2012 Loughbrgh. Antennas Propag. Conf.*, no. November, pp. 1–5, 2012, doi: 10.1109/LAPC.2012.6403083.
- [110] T. W. Turpin and R. Baktur, “Meshed patch antennas integrated on solar cells,” *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 8, pp. 693–696, 2009, doi: 10.1109/LAWP.2009.2025522.
- [111] T. Yasin and R. Baktur, “Inkjet printed patch antennas on transparent substrates,” *2010 IEEE Int. Symp. Antennas Propag. CNC-USNC/URSI Radio Sci. Meet. - Lead. Wave, AP-S/URSI 2010*, pp. 1–4, 2010, doi: 10.1109/APS.2010.5562275.
- [112] C. Ellinger *et al.*, “Transparent Multiband Antenna Designed by HRL and Manufactured by Kodak,” 2018.
- [113] J. R. Saberlin, C. Furse, T. Yasin, and R. Baktur, “Passive feed methods for meshed antennas,” *2010 IEEE Int. Symp. Antennas Propag. CNC-USNC/URSI Radio Sci. Meet. - Lead. Wave, AP-S/URSI 2010*, vol. 84103, no. 1, pp. 1–4, 2010, doi: 10.1109/APS.2010.5561188.
- [114] T. Yekan and R. Baktur, “Conformal Integrated Solar Panel Antennas: Two effective integration methods of antennas with solar cells,” *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol.

- 59, no. 2, pp. 69–78, 2017, doi: 10.1109/MAP.2017.2655577.
- [115] T. W. Turpin *et al.*, “Meshed Patch Antennas Integrated on Solar Cell - A Feasibility Study and Optimization,” *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 9, no. c, pp. 689–692, 2010.
- [116] M. Y. Abdelatty *et al.*, “Empirical Model and Experimental Validation of Meshed Ground Impact on RF Performance of Flexible Microstrip Lines for Bending Applications,” *IEEE J. Flex. Electron.*, vol. 3, no. 8, pp. 1–1, 2024, doi: 10.1109/jflex.2024.3406498.
- [117] M. Li, T. Li, and Y. Tang, “A universal and convenient optimization design method of meshed transmission lines using parameter extraction,” *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 65, no. 2, pp. 462–468, 2023, doi: 10.1002/mop.33516.
- [118] Z. J. Silva, C. R. Valenta, and G. D. Durgin, “Design and Characterization of Meshed Microstrip Transmission Lines,” *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, vol. 2019-June, no. 4, pp. 811–814, 2019, doi: 10.1109/mwsym.2019.8700894.
- [119] Q. H. Dao, L. Grundmann, and B. Geck, “Optically Transparent 24 GHz Analog Front-End Based on Meshed Microstrip Lines for the Integration in a Self-Sufficient RFID Sensor Tag,” *IEEE J. Radio Freq. Identif.*, vol. 4, no. 2, pp. 83–92, 2020, doi: 10.1109/JRFID.2019.2954471.
- [120] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, and Z. Han, “Wireless networks with rf energy harvesting: A contemporary survey,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 17, no. 2, pp. 757–789, 2015, doi: 10.1109/COMST.2014.2368999.
- [121] S. Agrawal, S. Pandey, J. Singh, and P. N. Kondekar, “An Efficient RF Energy Harvester with Tuned Matching Circuit,” 2013, pp. 138–145. doi: 10.1007/978-3-642-42024-5_17.
- [122] Z. Hameed and K. Moez, “Design of impedance matching circuits for RF energy harvesting systems,” *Microelectronics J.*, vol. 62, pp. 49–56, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.mejo.2017.02.004.
- [123] B. Wilson, *Introduction to Physical Electronics*. Houston: CONNEXIONS, 2007. [Online]. Available: <http://cnx.org/content/col10114/1.4/>
- [124] H. Sun and W. Geyi, “A New Rectenna Using Beamwidth-Enhanced Antenna Array

- for RF Power Harvesting Applications,” *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 16, pp. 1451–1454, 2017, doi: 10.1109/LAWP.2016.2642124.
- [125] L. Yang, Y. J. Zhou, C. Zhang, X. M. Yang, X.-X. Yang, and C. Tan, “Compact Multiband Wireless Energy Harvesting Based Battery-Free Body Area Networks Sensor for Mobile Healthcare,” *IEEE J. Electromagn. RF Microwaves Med. Biol.*, vol. 2, no. 2, pp. 109–115, Jun. 2018, doi: 10.1109/JERM.2018.2817364.
- [126] J. Semple, D. G. Georgiadou, G. Wyatt-Moon, G. Gelinck, and T. D. Anthopoulos, “Flexible diodes for radio frequency (RF) electronics: A materials perspective,” *Semiconductor Science and Technology*, vol. 32, no. 12. 2017. doi: 10.1088/1361-6641/aa89ce.
- [127] G. Gosset and D. Flandre, “Fully-Automated and Portable Design Methodology for Optimal Sizing of Energy-Efficient CMOS Voltage Rectifiers,” *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Circuits Syst.*, vol. 1, no. 2, pp. 141–149, Jun. 2011, doi: 10.1109/JETCAS.2011.2158357.
- [128] J. Tissier and M. Latrach, “Appropriate Conventional Rectifier Topology for Low-Power RF Energy Harvesting,” in *2022 Wireless Power Week (WPW)*, Jul. 2022, pp. 644–648. doi: 10.1109/WPW54272.2022.9853989.
- [129] M. T. Penella-López and M. Gasulla-Forner, “Radiofrequency Energy Harvesting,” in *Powering Autonomous Sensors*, Dordrecht: Springer Netherlands, 2011, pp. 125–147. doi: 10.1007/978-94-007-1573-8_6.
- [130] A. Nimo, J. Albesa, and L. M. Reindl, “Investigating the effects of parasitic components on wireless RF energy harvesting,” in *2014 IEEE 11th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD14)*, Feb. 2014, no. August, pp. 1–6. doi: 10.1109/SSD.2014.6808853.
- [131] J. Jose, S. George, L. Bosco, J. Bhandari, F. Fernandes, and A. Kotrashetti, “A review of RF energy harvesting systems in India,” in *2015 International Conference on Technologies for Sustainable Development (ICTSD)*, Feb. 2015, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICTSD.2015.7095838.
- [132] R. Berges, L. Fadel, L. Oyhenart, V. Vigneras, and T. Taris, “Conformable dual-band wireless energy harvester dedicated to the urban environment,” *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 62, no. 11, pp. 3391–3400, Nov. 2020, doi: 10.1002/mop.32461.

- [133] H. Jabbar, Y. Song, and T. Jeong, "RF energy harvesting system and circuits for charging of mobile devices," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 56, no. 1, pp. 247–253, Feb. 2010, doi: 10.1109/TCE.2010.5439152.
- [134] M. Arrawatia, Maryam Shojaei Baghini, and G. Kumar, "RF energy harvesting system from cell towers in 900MHz band," in *2011 National Conference on Communications (NCC)*, Jan. 2011, pp. 1–5. doi: 10.1109/NCC.2011.5734733.
- [135] T. Galchev, J. McCullagh, R. L. Peterson, K. Najafi, and A. Mortazawi, "Energy harvesting of radio frequency and vibration energy to enable wireless sensor monitoring of civil infrastructure," Mar. 2011, p. 798314. doi: 10.1117/12.880174.
- [136] K. Xie, Y.-M. Liu, H.-L. Zhang, and L.-Z. Fu, "Harvest the Ambient AM Broadcast Radio Energy for Wireless Sensors," *J. Electromagn. Waves Appl.*, vol. 25, no. 14–15, pp. 2054–2065, Jan. 2011, doi: 10.1163/156939311798072144.
- [137] C. Mikeka, H. Arai, A. Georgiadis, and A. Collado, "DTV band micropower RF energy-harvesting circuit architecture and performance analysis," in *2011 IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications*, Sep. 2011, pp. 561–567. doi: 10.1109/RFID-TA.2011.6068601.
- [138] R. J. Vyas, B. B. Cook, Y. Kawahara, and M. M. Tentzeris, "E-WEHP: A Batteryless Embedded Sensor-Platform Wirelessly Powered From Ambient Digital-TV Signals," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 61, no. 6, pp. 2491–2505, Jun. 2013, doi: 10.1109/TMTT.2013.2258168.
- [139] V. Talla, B. Kellogg, B. Ransford, S. Naderiparizi, J. R. Smith, and S. Gollakota, "Powering the next Billion devices with wi-fi," *Commun. ACM*, vol. 60, no. 3, pp. 83–91, Feb. 2017, doi: 10.1145/3041059.
- [140] B. Kellogg, A. Parks, S. Gollakota, J. R. Smith, and D. Wetherall, "Wi-fi backscatter," in *Proceedings of the 2014 ACM conference on SIGCOMM*, Aug. 2014, pp. 607–618. doi: 10.1145/2619239.2626319.
- [141] M. Tahir, B. Ramis Ferrer, and J. Martinez Lastra, "An Approach for Managing Manufacturing Assets through Radio Frequency Energy Harvesting," *Sensors*, vol. 19, no. 3, p. 438, Jan. 2019, doi: 10.3390/s19030438.
- [142] S. El Hassani, H. El Hassani, and N. Boutammachte, "Overview on 5G Radio

- Frequency Energy Harvesting,” *Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J.*, vol. 4, no. 4, pp. 328–346, 2019, doi: 10.25046/aj040442.
- [143] J. A. Paradiso and T. Starner, “Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics,” *IEEE Pervasive Comput.*, vol. 4, no. 1, pp. 18–27, Jan. 2005, doi: 10.1109/MPRV.2005.9.
- [144] A. P. Sample, D. J. Yeager, P. S. Powledge, and J. R. Smith, “Design of a Passively-Powered, Programmable Sensing Platform for UHF RFID Systems,” in *2007 IEEE International Conference on RFID*, 2007, pp. 149–156. doi: 10.1109/RFID.2007.346163.
- [145] A. Sample and J. R. Smith, “Experimental results with two wireless power transfer systems,” in *2009 IEEE Radio and Wireless Symposium*, Jan. 2009, pp. 16–18. doi: 10.1109/RWS.2009.4957273.
- [146] M. Piñuela, P. D. Mitcheson, and S. Lucyszyn, “Ambient RF energy harvesting in urban and semi-urban environments,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 61, no. 7, pp. 2715–2726, 2013, doi: 10.1109/TMTT.2013.2262687.
- [147] A. Khemar, A. Kacha, H. Takhedmit, and G. Abib, “Design and experiments of a dual-band rectenna for ambient RF energy harvesting in urban environments,” *IET Microwaves, Antennas Propag.*, vol. 12, no. 1, pp. 49–55, Jan. 2018, doi: 10.1049/iet-map.2016.1040.
- [148] U. Olgun, C.-C. Chen, and J. L. Volakis, “Wireless power harvesting with planar rectennas for 2.45 GHz RFIDs,” in *2010 URSI International Symposium on Electromagnetic Theory*, Aug. 2010, pp. 329–331. doi: 10.1109/URSI-EMTS.2010.5637008.
- [149] A. S. Bakhtiar, M. S. Jalali, and S. Mirabbasi, “An RF power harvesting system with input-tuning for long-range RFID tags,” in *Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, May 2010, pp. 4085–4088. doi: 10.1109/ISCAS.2010.5537624.
- [150] P. Mhatre, R. Duche, S. Nawale, and P. Patil, “RF power harvesting system for RFID applications in multiband systems,” in *2015 6th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, Jul. 2015, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICCCNT.2015.7395226.

- [151] X. Jia, Q. Feng, T. Fan, and Q. Lei, “RFID technology and its applications in Internet of Things (IoT),” in *2012 2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet)*, Apr. 2012, pp. 1282–1285. doi: 10.1109/CECNet.2012.6201508.
- [152] Aeterlink, “Empowering Zero-Wiring Society,” 2020. <https://aeterlink.com>
- [153] C. J. Robert F., D. M. Sylvar, and J. L. Ulcek, “Evaluating compliance with FCC guidelines for human exposure to radiofrequency electromagnetic fields,” *FCC OET Bull.* 65, no. August, pp. 1–79, 1997, Accessed: Dec. 21, 2022. [Online]. Available: <http://rfcec.com/RFCEC/Section-3 - Fundamentals of RF Communication-Electronics/29 - SAFETY/04A - FCC OET Bulletin 65 Supplement C - Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields.pdf>
- [154] IEEE International Committee on Electromagnetic Safety, *IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz*, vol. 2020. 2020.
- [155] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), “Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz),” *Health Phys.*, vol. 118, no. 5, pp. 483–524, May 2020, doi: 10.1097/HP.0000000000001210.
- [156] S. R. Khan, S. K. Pavuluri, G. Cummins, and M. P. Y. Desmulliez, “Wireless power transfer techniques for implantable medical devices: A review,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 12, pp. 1–58, 2020, doi: 10.3390/s20123487.
- [157] K. Karipidis, R. Mate, D. Urban, R. Tinker, and A. Wood, “5G mobile networks and health—a state-of-the-science review of the research into low-level RF fields above 6 GHz,” *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*, vol. 31, no. 4, pp. 585–605, 2021, doi: 10.1038/s41370-021-00297-6.
- [158] C. Song *et al.*, “Advances in Wirelessly Powered Backscatter Communications: From Antenna/RF Circuitry Design to Printed Flexible Electronics,” *Proc. IEEE*, vol. 110, no. 1, pp. 171–192, 2022, doi: 10.1109/JPROC.2021.3125285.
- [159] A. Eid, J. G. D. Hester, and M. M. Tentzeris, “5G as a wireless power grid,” *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–9, 2021, doi: 10.1038/s41598-020-79500-x.

- [160] A. Eid, J. Hester, and M. M. Tentzeris, “Extending the Range of 5G Energy Transfer: Towards the Wireless Power Grid,” in *2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Mar. 2022, pp. 1–4. doi: 10.23919/EuCAP53622.2022.9769572.
- [161] D. Surender, M. A. Halimi, T. Khan, F. A. Talukdar, and Y. M. M. Antar, “Circularly Polarized DR-Rectenna for 5G and Wi-Fi Bands RF Energy Harvesting in Smart City Applications,” *IETE Tech. Rev.*, vol. 39, no. 4, pp. 880–893, Jul. 2022, doi: 10.1080/02564602.2021.1923079.
- [162] G. Kim and S. Kim, “Design and Analysis of Dual Polarized Broadband Microstrip Patch Antenna for 5G mmWave Antenna Module on FR4 Substrate,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 64306–64316, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3075495.
- [163] T. H. Lin, R. Bahr, M. Tentzeris, R. M. Pulugurtha, V. Sundaram, and R. Tummala, “Novel 3D-/Inkjet-Printed Flexible On-package Antennas, Packaging Structures, and Modules for Broadband 5G Applications,” *Proc. - Electron. Components Technol. Conf.*, vol. 2018-May, pp. 214–220, 2018, doi: 10.1109/ECTC.2018.00041.
- [164] P. Njogu, B. Sanz-Izquierdo, A. Elibiary, S. Y. Jun, Z. Chen, and D. Bird, “3D Printed Fingernail Antennas for 5G Applications,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 228711–228719, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3043045.
- [165] S. N. H. Sa’Don, M. H. Bin Jamaluddin, M. R. Kamarudin, F. Ahmad, and S. H. Dahlan, “A 5G graphene antenna produced by screen printing method,” *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 15, no. 2, pp. 950–955, 2019, doi: 10.11591/ijeecs.v15.i2.pp950-955.
- [166] P. Njogu, B. Sanz-Izquierdo, S. Jun, Z. Chen, and S. Gao, “3D Printed Millimeter wave Antenna Integrated into a Ring for 5G Applications,” in *2022 Microwave Mediterranean Symposium (MMS)*, May 2022, vol. 2022-May, pp. 1–5. doi: 10.1109/MMS55062.2022.9825614.
- [167] Jakubowska M, *Techniki drukarskie w elektronice: materiały i technologie*. Warsaw: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2013.
- [168] M. Słoma, *Additive Manufacturing of Structural Electronics*. Berlin, Boston: De Gruyter, 2024.

- [169] Y. Zhang, C. Liu, and D. Whalley, “Direct-write techniques for maskless production of microelectronics: A review of current state-of-the-art technologies,” *2009 Int. Conf. Electron. Packag. Technol. High Density Packag. ICEPT-HDP 2009*, pp. 497–503, Aug. 2009, doi: 10.1109/ICEPT.2009.5270702.
- [170] B. H. King and M. J. Renn, “Aerosol Jet® Direct Write Printing for Mil-Aero Electronic Applications,” *Optomec Inc.*, 2008. https://www.optomec.com/wp-content/uploads/2014/04/Optomec_Aerosol_Jet_Direct_Write_Printing_for_Mil_Aero_Electronic_Apps.pdf (accessed Feb. 06, 2019).
- [171] M. Słoma, *Nanomateriały węglowe w technologii elektroniki drukowanej*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2018.
- [172] R. Herbert, H. R. Lim, S. Park, J. H. Kim, and W. H. Yeo, “Recent Advances in Printing Technologies of Nanomaterials for Implantable Wireless Systems in Health Monitoring and Diagnosis,” *Adv. Healthc. Mater.*, vol. 10, no. 17, pp. 1–18, 2021, doi: 10.1002/adhm.202100158.
- [173] W. Wu, “Inorganic nanomaterials for printed electronics: A review,” *Nanoscale*, vol. 9, no. 22, pp. 7342–7372, 2017, doi: 10.1039/c7nr01604b.
- [174] A. Kamyshny and S. Magdassi, “Conductive Nanomaterials for Printed Electronics,” *Small*, vol. 10, no. 17, pp. 3515–3535, Sep. 2014, doi: 10.1002/sml.201303000.
- [175] D. McCoul, W. Hu, M. Gao, V. Mehta, and Q. Pei, “Recent Advances in Stretchable and Transparent Electronic Materials,” *Adv. Electron. Mater.*, vol. 2, no. 5, p. 1500407, May 2016, doi: 10.1002/aelm.201500407.
- [176] K. D. Harris, A. L. Elias, and H.-J. Chung, “Flexible electronics under strain: a review of mechanical characterization and durability enhancement strategies,” *J. Mater. Sci.*, vol. 51, no. 6, pp. 2771–2805, Mar. 2016, doi: 10.1007/s10853-015-9643-3.
- [177] S. Park, M. Vosguerichian, and Z. Bao, “A review of fabrication and applications of carbon nanotube film-based flexible electronics,” *Nanoscale*, vol. 5, no. 5, p. 1727, 2013, doi: 10.1039/c3nr33560g.
- [178] J. Zaumseil, “Single-walled carbon nanotube networks for flexible and printed electronics,” *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 30, no. 7, p. 074001, Jul. 2015, doi: 10.1088/0268-1242/30/7/074001.

- [179] A. E. Jakus, E. B. Secor, A. L. Rutz, S. W. Jordan, M. C. Hersam, and R. N. Shah, “Three-Dimensional Printing of High-Content Graphene Scaffolds for Electronic and Biomedical Applications,” *ACS Nano*, vol. 9, no. 4, pp. 4636–4648, Apr. 2015, doi: 10.1021/acsnano.5b01179.
- [180] D.-M. Sun, C. Liu, W.-C. Ren, and H.-M. Cheng, “A Review of Carbon Nanotube- and Graphene-Based Flexible Thin-Film Transistors,” *Small*, vol. 9, no. 8, pp. 1188–1205, Apr. 2013, doi: 10.1002/sml.201203154.
- [181] Y. Xia *et al.*, “Confined Formation of Ultrathin ZnO Nanorods/Reduced Graphene Oxide Mesoporous Nanocomposites for High-Performance Room-Temperature NO₂ Sensors,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 8, no. 51, pp. 35454–35463, Dec. 2016, doi: 10.1021/acsami.6b12501.
- [182] W. Clemens, W. Fix, J. Ficker, A. Knobloch, and A. Ullmann, “From polymer transistors toward printed electronics,” *J. Mater. Res.*, vol. 19, no. 7, pp. 1963–1973, Jul. 2004, doi: 10.1557/JMR.2004.0263.
- [183] B. Weng, R. L. Shepherd, K. Crowley, A. J. Killard, and G. G. Wallace, “Printing conducting polymers,” *Analyst*, vol. 135, no. 11, p. 2779, 2010, doi: 10.1039/c0an00302f.
- [184] C.-Y. Yang *et al.*, “A high-conductivity n-type polymeric ink for printed electronics,” *Nat. Commun.*, vol. 12, no. 1, p. 2354, Apr. 2021, doi: 10.1038/s41467-021-22528-y.
- [185] E. N. Dattoli and W. Lu, “ITO nanowires and nanoparticles for transparent films,” *MRS Bull.*, vol. 36, no. 10, pp. 782–788, Oct. 2011, doi: 10.1557/mrs.2011.212.
- [186] Y. Kashiwagi *et al.*, “Direct transparent electrode patterning on layered GaN substrate by screen printing of indium tin oxide nanoparticle ink for Eu-doped GaN red light-emitting diode,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 105, no. 22, p. 223509, Dec. 2014, doi: 10.1063/1.4903234.
- [187] J. Song, S. A. Kulinich, J. Li, Y. Liu, and H. Zeng, “A General One-Pot Strategy for the Synthesis of High-Performance Transparent-Conducting-Oxide Nanocrystal Inks for All-Solution-Processed Devices,” *Angew. Chemie*, vol. 127, no. 2, pp. 472–476, Jan. 2015, doi: 10.1002/ange.201408621.
- [188] A. Kim, Y. Won, K. Woo, C.-H. Kim, and J. Moon, “Highly Transparent Low

- Resistance ZnO/Ag Nanowire/ZnO Composite Electrode for Thin Film Solar Cells,” *ACS Nano*, vol. 7, no. 2, pp. 1081–1091, Feb. 2013, doi: 10.1021/nn305491x.
- [189] M. M. Rehman, G. U. Siddiqui, J. Z. Gul, S.-W. Kim, J. H. Lim, and K. H. Choi, “Resistive Switching in All-Printed, Flexible and Hybrid MoS₂-PVA Nanocomposite based Memristive Device Fabricated by Reverse Offset,” *Sci. Rep.*, vol. 6, no. 1, p. 36195, Dec. 2016, doi: 10.1038/srep36195.
- [190] J. J. Schneider *et al.*, “Zinc oxide derived from single source precursor chemistry under chimie douce conditions: formation pathway, defect chemistry and possible applications in thin film printing,” *J. Mater. Chem.*, vol. 19, no. 10, p. 1449, 2009, doi: 10.1039/b816376f.
- [191] J. Sun *et al.*, “Printed Four Key-Device Units for Unified Platform of Wireless Anti-Counterfeiting Label to Bridge in Blockchain,” *Adv. Mater. Technol.*, vol. 7, no. 5, pp. 1–9, 2022, doi: 10.1002/admt.202100969.
- [192] A. Bakytbekov, T. Q. Nguyen, C. Huynh, K. N. Salama, and A. Shamim, “Fully printed 3D cube-shaped multiband fractal rectenna for ambient RF energy harvesting,” *Nano Energy*, vol. 53, no. September, pp. 587–595, 2018, doi: 10.1016/j.nanoen.2018.09.022.
- [193] S. Kim, “Inkjet-printed electronics on paper for rf identification (RFID) and sensing,” *Electron.*, vol. 9, no. 10, pp. 1–22, 2020, doi: 10.3390/electronics9101636.
- [194] N. Turan, M. Saeidi-Javash, J. Chen, M. Zeng, Y. Zhang, and D. B. Go, “Atmospheric Pressure and Ambient Temperature Plasma Jet Sintering of Aerosol Jet Printed Silver Nanoparticles,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 13, no. 39, pp. 47244–47251, Oct. 2021, doi: 10.1021/acsami.1c14049.
- [195] Q. Chen *et al.*, “A Dual Approach in Direct Ink Writing of Thermally Cured Shape Memory Rubber Toughened Epoxy,” *ACS Appl. Polym. Mater.*, vol. 2, no. 12, pp. 5492–5500, 2020, doi: 10.1021/acsapm.0c00839.
- [196] B. H. Kwon *et al.*, “Organic/Inorganic Hybrid Thin-Film Encapsulation Using Inkjet Printing and PEALD for Industrial Large-Area Process Suitability and Flexible OLED Application,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 13, no. 46, pp. 55391–55402, 2021, doi: 10.1021/acsami.1c12253.

- [197] J. Park and J. M. Jacobson, “All printed bistable reflective displays: Printable electrophoretic ink and all printed Metal-Insulator-Metal Diodes,” in *Materials Research Society Symposium - Proceedings*, 1998, vol. 508, pp. 211–217. doi: 10.1557/proc-508-211.
- [198] A. C. Arias, J. Daniel, B. Krusor, S. Ready, V. Sholin, and R. Street, “All-additive ink-jet-printed display backplanes: Materials development and integration,” *J. Soc. Inf. Disp.*, vol. 15, no. 7, p. 485, 2007, doi: 10.1889/1.2759554.
- [199] M. Bariya *et al.*, “Roll-to-Roll Gravure Printed Electrochemical Sensors for Wearable and Medical Devices,” *ACS Nano*, vol. 12, no. 7, pp. 6978–6987, 2018, doi: 10.1021/acsnano.8b02505.
- [200] S. Li, J. G. Park, S. Wang, R. Liang, C. Zhang, and B. Wang, “Working mechanisms of strain sensors utilizing aligned carbon nanotube network and aerosol jet printed electrodes,” *Carbon N. Y.*, vol. 73, pp. 303–309, Jul. 2014, doi: 10.1016/j.carbon.2014.02.068.
- [201] W. Andrysiewicz, J. Krzeminski, K. Skarżynski, K. Marszalek, M. Sloma, and A. Rydosz, “Flexible Gas Sensor Printed on a Polymer Substrate for Sub-ppm Acetone Detection,” *Electron. Mater. Lett.*, vol. 16, no. 2, pp. 146–155, Mar. 2020, doi: 10.1007/s13391-020-00199-z.
- [202] K. Fukuda and T. Someya, “Recent Progress in the Development of Printed Thin-Film Transistors and Circuits with High-Resolution Printing Technology,” *Adv. Mater.*, vol. 29, no. 25, p. 1602736, Jul. 2017, doi: 10.1002/adma.201602736.
- [203] M. Rother *et al.*, “Aerosol-Jet Printing of Polymer-Sorted (6,5) Carbon Nanotubes for Field-Effect Transistors with High Reproducibility,” *Adv. Electron. Mater.*, vol. 3, no. 8, p. 1700080, Aug. 2017, doi: 10.1002/aelm.201700080.
- [204] D. Janczak *et al.*, “Stretchable and washable electroluminescent display screen-printed on textile,” *Nanomaterials*, vol. 9, no. 9, pp. 1–8, 2019, doi: 10.3390/nano9091276.
- [205] G. Grau and V. Subramanian, “Fully High-Speed Gravure Printed, Low-Variability, High-Performance Organic Polymer Transistors with Sub-5 V Operation,” *Adv. Electron. Mater.*, vol. 2, no. 4, p. 1500328, Apr. 2016, doi: 10.1002/aelm.201500328.
- [206] S. Il Park *et al.*, “Soft, stretchable, fully implantable miniaturized optoelectronic

- systems for wireless optogenetics,” *Nat. Biotechnol.*, vol. 33, no. 12, pp. 1280–1286, Dec. 2015, doi: 10.1038/nbt.3415.
- [207] T. S. Tran, N. K. Dutta, and N. R. Choudhury, “Graphene inks for printed flexible electronics: Graphene dispersions, ink formulations, printing techniques and applications,” *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 261, pp. 41–61, 2018, doi: 10.1016/j.cis.2018.09.003.
- [208] Y. Chu, C. Qian, P. Chahal, and C. Cao, “Printed Diodes: Materials Processing, Fabrication, and Applications,” *Adv. Sci.*, vol. 6, no. 6, 2019, doi: 10.1002/advs.201801653.
- [209] P. Calvert, “Inkjet Printing for Materials and Devices,” *Chem. Mater.*, vol. 13, no. 10, pp. 3299–3305, Oct. 2001, doi: 10.1021/cm0101632.
- [210] P. Mariani, L. Vesce, and A. Di Carlo, “The role of printing techniques for large-area dye sensitized solar cells,” *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 30, no. 10, p. 104003, Oct. 2015, doi: 10.1088/0268-1242/30/10/104003.
- [211] M. Singh, H. M. Haverinen, P. Dhagat, and G. E. Jabbour, “Inkjet Printing-Process and Its Applications,” *Adv. Mater.*, vol. 22, no. 6, pp. 673–685, Feb. 2010, doi: 10.1002/adma.200901141.
- [212] P. F. Moonen, I. Yakimets, and J. Huskens, “Fabrication of Transistors on Flexible Substrates: from Mass-Printing to High-Resolution Alternative Lithography Strategies,” *Adv. Mater.*, vol. 24, no. 41, pp. 5526–5541, Nov. 2012, doi: 10.1002/adma.201202949.
- [213] Z. Pu *et al.*, “A flexible enzyme-electrode sensor with cylindrical working electrode modified with a 3D nanostructure for implantable continuous glucose monitoring,” *Lab Chip*, vol. 18, no. 23, pp. 3570–3577, 2018, doi: 10.1039/C8LC00908B.
- [214] E. B. Secor, P. L. Prabhumirashi, K. Puntambekar, M. L. Geier, and M. C. Hersam, “Inkjet Printing of High Conductivity, Flexible Graphene Patterns,” *J. Phys. Chem. Lett.*, vol. 4, no. 8, pp. 1347–1351, Apr. 2013, doi: 10.1021/jz400644c.
- [215] F. C. Krebs, “Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 93, no. 4, pp. 394–412, Apr. 2009, doi: 10.1016/j.solmat.2008.10.004.

- [216] R. Herbert, J.-H. Kim, Y. Kim, H. Lee, and W.-H. Yeo, “Soft Material-Enabled, Flexible Hybrid Electronics for Medicine, Healthcare, and Human-Machine Interfaces,” *Materials (Basel)*, vol. 11, no. 2, p. 187, Jan. 2018, doi: 10.3390/ma11020187.
- [217] M. Gao, L. Li, and Y. Song, “Inkjet printing wearable electronic devices,” *J. Mater. Chem. C*, vol. 5, no. 12, pp. 2971–2993, 2017, doi: 10.1039/C7TC00038C.
- [218] L. Nayak, S. Mohanty, S. K. Nayak, and A. Ramadoss, “A review on inkjet printing of nanoparticle inks for flexible electronics,” *J. Mater. Chem. C*, vol. 7, no. 29, pp. 8771–8795, 2019, doi: 10.1039/C9TC01630A.
- [219] K.-S. Kwon, M. K. Rahman, T. H. Phung, S. Hoath, S. Jeong, and J. S. Kim, “Review of digital printing technologies for electronic materials,” *Flex. Print. Electron.*, vol. 5, no. 4, p. 043003, Nov. 2020, doi: 10.1088/2058-8585/abc8ca.
- [220] J.-W. Song, J. Kim, Y.-H. Yoon, B.-S. Choi, J.-H. Kim, and C.-S. Han, “Inkjet printing of single-walled carbon nanotubes and electrical characterization of the line pattern,” *Nanotechnology*, vol. 19, no. 9, p. 095702, Mar. 2008, doi: 10.1088/0957-4484/19/9/095702.
- [221] M. M. Belhaj, Wei Wei, E. Pallecchi, C. Mismer, I. Roch-jeune, and H. Happy, “Inkjet printed flexible transmission lines for high frequency applications up to 67 GHz,” in *2014 44th European Microwave Conference*, Oct. 2014, pp. 1528–1531. doi: 10.1109/EuMC.2014.6986740.
- [222] V. Subramanian *et al.*, “High-Speed Printing of Transistors: From Inks to Devices,” *Proc. IEEE*, vol. 103, no. 4, pp. 567–582, Apr. 2015, doi: 10.1109/JPROC.2015.2408321.
- [223] W. L. Zhang, H. J. Choi, H.-S. Ko, and K.-S. Kwon, “Ink-jetting and rheological behavior of a silica particle suspension,” *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 22, pp. 120–126, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.jiec.2014.06.032.
- [224] L. Huang, Y. Huang, J. Liang, X. Wan, and Y. Chen, “Graphene-based conducting inks for direct inkjet printing of flexible conductive patterns and their applications in electric circuits and chemical sensors,” *Nano Res.*, vol. 4, no. 7, pp. 675–684, Jul. 2011, doi: 10.1007/s12274-011-0123-z.

- [225] K. Woo, D. Jang, Y. Kim, and J. Moon, “Relationship between printability and rheological behavior of ink-jet conductive inks,” *Ceram. Int.*, vol. 39, no. 6, pp. 7015–7021, Aug. 2013, doi: 10.1016/j.ceramint.2013.02.039.
- [226] G. Tomaszewski, P. Jankowski-Mihułowicz, J. Potencki, A. Pietrikova, and P. Lukacs, “Inkjet-printed HF antenna made on PET substrate,” *Microelectron. Reliab.*, vol. 129, no. December 2021, 2022, doi: 10.1016/j.microrel.2021.114473.
- [227] L. Feng, C. Jiang, H. Ma, X. Guo, and A. Nathan, “All ink-jet printed low-voltage organic field-effect transistors on flexible substrate,” *Org. Electron.*, vol. 38, pp. 186–192, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.orgel.2016.08.019.
- [228] F. Mathies, H. Eggers, B. S. Richards, G. Hernandez-Sosa, U. Lemmer, and U. W. Paetzold, “Inkjet-Printed Triple Cation Perovskite Solar Cells,” *ACS Appl. Energy Mater.*, vol. 1, no. 5, pp. 1834–1839, 2018, doi: 10.1021/acsaem.8b00222.
- [229] C. Madigan, S. Van Slyke, and E. Vronsky, “Inkjet printing equipment for organic LED mass production,” *SPIE Newsroom*, Jul. 2015, doi: 10.1117/2.1201506.005940.
- [230] A. M. Gaikwad, A. C. Arias, and D. A. Steingart, “Recent Progress on Printed Flexible Batteries: Mechanical Challenges, Printing Technologies, and Future Prospects,” *Energy Technol.*, vol. 3, no. 4, pp. 305–328, 2014, doi: 10.1002/ente.201402182.
- [231] B. S. Cook and A. Shamim, “Inkjet Printing of Novel Wideband and High Gain Antennas on Low-Cost Paper Substrate,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 9, pp. 4148–4156, Sep. 2012, doi: 10.1109/TAP.2012.2207079.
- [232] Y. Zheng, Z. He, Y. Gao, and J. Liu, “Direct Desktop Printed-Circuits-on-Paper Flexible Electronics,” *Sci. Rep.*, vol. 3, no. 1, p. 1786, Dec. 2013, doi: 10.1038/srep01786.
- [233] B. Y. Ahn *et al.*, “Omnidirectional Printing of Flexible, Stretchable, and Spanning Silver Microelectrodes,” *Science (80-.)*, vol. 323, no. 5921, pp. 1590–1593, Mar. 2009, doi: 10.1126/science.1168375.
- [234] Q. Li and J. A. Lewis, “Nanoparticle Inks for Directed Assembly of Three-Dimensional Periodic Structures,” *Adv. Mater.*, vol. 15, no. 19, pp. 1639–1643, Oct. 2003, doi: 10.1002/adma.200305413.
- [235] J. A. Lewis, “Direct Ink Writing of 3D Functional Materials,” *Adv. Funct. Mater.*, vol.

- 16, no. 17, pp. 2193–2204, Nov. 2006, doi: 10.1002/adfm.200600434.
- [236] M. Łysień *et al.*, “High-resolution deposition of conductive and insulating materials at micrometer scale on complex substrates,” *Sci. Rep.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–18, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-13352-5.
- [237] N. Zhou, C. Liu, J. A. Lewis, and D. Ham, “Gigahertz Electromagnetic Structures via Direct Ink Writing for Radio-Frequency Oscillator and Transmitter Applications,” *Adv. Mater.*, vol. 29, no. 15, p. 1605198, Apr. 2017, doi: 10.1002/adma.201605198.
- [238] M. Wagih, “Direct-Write Dispenser Printing for Rapid Antenna Prototyping on Thin Flexible Substrates,” in *2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Mar. 2020, pp. 1–4. doi: 10.23919/EuCAP48036.2020.9135625.
- [239] Z. Wang *et al.*, “Integration of dispenser-printed ultra-low-voltage thermoelectric and energy storage devices,” *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 22, no. 9, p. 094001, Sep. 2012, doi: 10.1088/0960-1317/22/9/094001.
- [240] D. Madan, A. Chen, P. K. Wright, and J. W. Evans, “Dispenser printed composite thermoelectric thick films for thermoelectric generator applications,” *J. Appl. Phys.*, vol. 109, no. 3, p. 034904, Feb. 2011, doi: 10.1063/1.3544501.
- [241] K. Sun, T.-S. Wei, B. Y. Ahn, J. Y. Seo, S. J. Dillon, and J. A. Lewis, “3D Printing of Interdigitated Li-Ion Microbattery Architectures,” *Adv. Mater.*, vol. 25, no. 33, pp. 4539–4543, Sep. 2013, doi: 10.1002/adma.201301036.
- [242] C. C. Ho, J. W. Evans, and P. K. Wright, “Direct write dispenser printing of a zinc microbattery with an ionic liquid gel electrolyte,” *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 20, no. 10, p. 104009, Oct. 2010, doi: 10.1088/0960-1317/20/10/104009.
- [243] Y. Li, R. Torah, Y. Wei, N. Grabham, and J. Tudor, “Dispenser-printed sound-emitting fabrics for applications in the creative fashion and smart architecture industry,” *J. Text. Inst.*, vol. 110, no. 1, pp. 1–9, Jan. 2019, doi: 10.1080/00405000.2018.1453685.
- [244] M. de Vos, R. Torah, and J. Tudor, “Dispenser printed electroluminescent lamps on textiles for smart fabric applications,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 25, no. 4, p. 045016, Apr. 2016, doi: 10.1088/0964-1726/25/4/045016.
- [245] Z. Ahmed, Y. Wei, R. Torah, and J. Tudor, “Actively actuated all dispenser printed

- thermochromic smart fabric device,” *Electron. Lett.*, vol. 52, no. 19, pp. 1601–1603, Sep. 2016, doi: 10.1049/el.2016.1073.
- [246] Y. Wei, X. Wang, R. Torah, and J. Tudor, “Dispenser printing of electrochromic display on textiles for creative applications,” *Electron. Lett.*, vol. 53, no. 12, pp. 779–781, Jun. 2017, doi: 10.1049/el.2017.0119.
- [247] H. Lee, H. Cho, S. J. Kim, Y. Kim, and J. Kim, “Dispenser printing of piezo-resistive nanocomposite on woven elastic fabric and hysteresis compensation for skin-mountable stretch sensing,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 27, no. 2, p. 025017, Feb. 2018, doi: 10.1088/1361-665X/aaa5e3.
- [248] Y. Wei, R. Torah, Y. Li, and J. Tudor, “Dispenser printed capacitive proximity sensor on fabric for applications in the creative industries,” *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 247, pp. 239–246, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.sna.2016.06.005.
- [249] D. E. E. Riemer, “The Theoretical Fundamentals of the Screen Printing Process,” *Microelectron. Int.*, vol. 6, no. 1, pp. 8–17, Jan. 1989, doi: 10.1108/eb044350.
- [250] W. J. Hyun, E. B. Secor, M. C. Hersam, C. D. Frisbie, and L. F. Francis, “High-Resolution Patterning of Graphene by Screen Printing with a Silicon Stencil for Highly Flexible Printed Electronics,” *Adv. Mater.*, vol. 27, no. 1, pp. 109–115, Jan. 2015, doi: 10.1002/adma.201404133.
- [251] S. Khan, L. Lorenzelli, and R. S. Dahiya, “Technologies for Printing Sensors and Electronics Over Large Flexible Substrates: A Review,” *IEEE Sens. J.*, vol. 15, no. 6, pp. 3164–3185, Jun. 2015, doi: 10.1109/JSEN.2014.2375203.
- [252] D. A. Pardo, G. E. Jabbour, and N. Peyghambarian, “Application of Screen Printing in the Fabrication of Organic Light-Emitting Devices,” *Adv. Mater.*, vol. 12, no. 17, pp. 1249–1252, Sep. 2000, doi: 10.1002/1521-4095(200009)12:17<1249::AID-ADMA1249>3.0.CO;2-Y.
- [253] K. Suganuma, “Introduction,” in *Introduction to Printed Electronics. SpringerBriefs in Electrical and Computer Engineering*, New York: Springer, 2014, pp. 1–22. doi: 10.1007/978-1-4614-9625-0_1.
- [254] R. Søndergaard, M. Hösel, D. Angmo, T. T. Larsen-Olsen, and F. C. Krebs, “Roll-to-roll fabrication of polymer solar cells,” *Mater. Today*, vol. 15, no. 1–2, pp. 36–49, Jan.

- 2012, doi: 10.1016/S1369-7021(12)70019-6.
- [255] M. Wagih, A. Komolafe, and N. Hillier, “Screen-Printable Flexible Textile-Based Ultra-Broadband Millimeter-Wave DC-Blocking Transmission Lines Based on Microstrip-Embedded Printed Capacitors,” *IEEE J. Microwaves*, vol. 2, no. 1, pp. 162–173, 2021, doi: 10.1109/jmw.2021.3126927.
- [256] M. Horibe and M. Yoshida, “Reliability of transmission lines fabricated by screen printing for on-wafer measurements at millimeter-wave,” in *2015 European Microwave Conference (EuMC)*, Sep. 2015, pp. 1007–1010. doi: 10.1109/EuMC.2015.7345936.
- [257] N. Zavanelli and W.-H. H. Yeo, “Advances in Screen Printing of Conductive Nanomaterials for Stretchable Electronics,” *ACS Omega*, vol. 6, no. 14, pp. 9344–9351, Apr. 2021, doi: 10.1021/acsomega.1c00638.
- [258] Z. Bao, Y. Feng, A. Dodabalapur, V. R. Raju, and A. J. Lovinger, “High-Performance Plastic Transistors Fabricated by Printing Techniques,” *Chem. Mater.*, vol. 9, no. 6, pp. 1299–1301, Jun. 1997, doi: 10.1021/cm9701163.
- [259] H. D. Goldberg, R. B. Brown, D. P. Liu, and M. E. Meyerhoff, “Screen printing: a technology for the batch fabrication of integrated chemical-sensor arrays,” *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 21, no. 3, pp. 171–183, Sep. 1994, doi: 10.1016/0925-4005(94)01249-0.
- [260] S. Ito *et al.*, “Fabrication of screen-printing pastes from TiO₂ powders for dye-sensitised solar cells,” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 15, no. 7, pp. 603–612, Nov. 2007, doi: 10.1002/pip.768.
- [261] A. E. Ostfeld, I. Deckman, A. M. Gaikwad, C. M. Lochner, and A. C. Arias, “Screen printed passive components for flexible power electronics,” *Sci. Rep.*, vol. 5, pp. 1–11, 2015, doi: 10.1038/srep15959.
- [262] Q. Huang and Y. Zhu, “Printing Conductive Nanomaterials for Flexible and Stretchable Electronics: A Review of Materials, Processes, and Applications,” *Advanced Materials Technologies*, vol. 4, no. 5. 2019. doi: 10.1002/admt.201800546.
- [263] P. Kopola *et al.*, “High efficient plastic solar cells fabricated with a high-throughput gravure printing method,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 94, no. 10, pp. 1673–

- 1680, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.solmat.2010.05.027.
- [264] G. Hernandez-Sosa *et al.*, “Rheological and Drying Considerations for Uniformly Gravure-Printed Layers: Towards Large-Area Flexible Organic Light-Emitting Diodes,” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 23, no. 25, pp. 3164–3171, Jul. 2013, doi: 10.1002/adfm.201202862.
- [265] E. Kemppinen, P. Mikkonen, P. E. Collander, and S. Leppävuori, “Performance of Cu- and Ag-based microstrips up to millimetre wave frequencies,” *Microelectron. Int.*, vol. 15, no. 2, pp. 11–15, 1998, doi: 10.1108/13565369810370319.
- [266] M. Välimäki *et al.*, “R2R-printed inverted OPV modules – towards arbitrary patterned designs,” *Nanoscale*, vol. 7, no. 21, pp. 9570–9580, 2015, doi: 10.1039/C5NR00204D.
- [267] G. Grau, J. Cen, H. Kang, R. Kitsomboonloha, W. J. Scheideler, and V. Subramanian, “Gravure-printed electronics: recent progress in tooling development, understanding of printing physics, and realization of printed devices,” *Flex. Print. Electron.*, vol. 1, no. 2, p. 023002, Jun. 2016, doi: 10.1088/2058-8585/1/2/023002.
- [268] J. Noh, S. Kim, K. Jung, J. Kim, S. Cho, and G. Cho, “Fully Gravure Printed Half Adder on Plastic Foils,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 32, no. 11, pp. 1555–1557, Nov. 2011, doi: 10.1109/LED.2011.2165695.
- [269] K. Skarżyński, J. Krzemiński, M. Jakubowska, and M. Słoma, “Highly conductive electronics circuits from aerosol jet printed silver inks,” *Sci. Reports 2021 111*, vol. 11, no. 1, pp. 1–9, Sep. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-97312-5.
- [270] N. J. Wilkinson, M. A. A. Smith, R. W. Kay, and R. A. Harris, “A review of aerosol jet printing—a non-traditional hybrid process for micro-manufacturing,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 105, no. 11, pp. 4599–4619, 2019, doi: 10.1007/s00170-019-03438-2.
- [271] M. S. Onses, E. Sutanto, P. M. Ferreira, A. G. Alleyne, and J. A. Rogers, “Mechanisms, Capabilities, and Applications of High-Resolution Electrohydrodynamic Jet Printing,” *Small*, vol. 11, no. 34, pp. 4237–4266, Sep. 2015, doi: 10.1002/smll.201500593.
- [272] B. Y. Y., “Physical Mechanism of the Acoustic Atomization of a Liquid,” *Sov. Phys. Acoust.*, vol. 15, pp. 14–21, 1969, Accessed: Aug. 29, 2025. [Online]. Available:

<https://cir.nii.ac.jp/crid/1573105976193832576.bib?lang=ja>

- [273] B. Karl Sollner, “T H E MECHANISM OF T H E FORMATION O F FOGS BY ULTRASONIC WAVES,” *Trans. Faraday Soc.*, vol. 32, pp. 1532–1536, 1936, Accessed: Apr. 03, 2019. [Online]. Available: <https://pubs-1rsc-1org-1000098mi0744.eczyt.bg.pw.edu.pl/en/content/articlepdf/1936/tf/tf9363201532>
- [274] J. C. Simon, O. A. Sapozhnikov, V. A. Khokhlova, L. A. Crum, and M. R. Bailey, “Ultrasonic atomization of liquids in drop-chain acoustic fountains,” *J Fluid Mech.*, vol. 766, pp. 129–146, 2015, doi: 10.1017/jfm.2015.11.
- [275] M. E. Morales-Rodriguez, P. C. Joshi, J. R. Humphries, P. L. Fuhr, and T. J. McIntyre, “Fabrication of low cost surface acoustic wave sensors using direct printing by aerosol inkjet,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 20907–20915, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2824118.
- [276] M. Renn, “Aerosol Jet Process Development Techniques,” 2010.
- [277] S. Agarwala, G. L. Goh, and W. Y. Yeong, “Optimizing aerosol jet printing process of silver ink for printed electronics,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 191, no. 1, p. 012027, Apr. 2017, doi: 10.1088/1757-899X/191/1/012027.
- [278] J. M. Hoey, A. Lutfurakhmanov, D. L. Schulz, and I. S. Akhatov, “A Review on Aerosol-Based Direct-Write and Its Applications for Microelectronics,” *J. Nanotechnol.*, vol. 2012, pp. 1–22, 2012, doi: 10.1155/2012/324380.
- [279] M. Smith, Y. S. Choi, C. Boughey, and S. Kar-Narayan, “Controlling and assessing the quality of aerosol jet printed features for large area and flexible electronics,” *Flex. Print. Electron.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–11, Mar. 2017, doi: 10.1088/2058-8585/aa5af9.
- [280] A. Mahajan, C. D. Frisbie, and L. F. Francis, “Optimization of aerosol jet printing for high-resolution, high-aspect ratio silver lines,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 5, no. 11, pp. 4856–4864, Jun. 2013, doi: 10.1021/am400606y.
- [281] J. Navratil, A. Hamacek, J. Reboun, and R. Soukup, “Perspective methods of creating conductive paths by Aerosol Jet Printing technology,” in *2015 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, May 2015, vol. 38, pp. 36–39. doi: 10.1109/ISSE.2015.7247957.
- [282] R. Eckstein, M. Alt, T. Rödlmeier, P. Scharfer, U. Lemmer, and G. Hernandez-Sosa,

- “Digitally Printed Dewetting Patterns for Self-Organized Microelectronics,” *Adv. Mater.*, vol. 28, no. 35, pp. 7708–7715, Sep. 2016, doi: 10.1002/adma.201602082.
- [283] M. T. Rahman, J. McCloy, C. V. Ramana, and R. Panat, “Structure, electrical characteristics, and high-temperature stability of aerosol jet printed silver nanoparticle films,” *J. Appl. Phys.*, vol. 120, no. 7, p. 075305, Aug. 2016, doi: 10.1063/1.4960779.
- [284] T. Seifert, M. Baum, F. Roscher, M. Wiemer, and T. Gessner, “Aerosol Jet Printing of Nano Particle Based Electrical Chip Interconnects,” *Mater. Today Proc.*, vol. 2, no. 8, pp. 4262–4271, 2015, doi: 10.1016/j.matpr.2015.09.012.
- [285] A. Martinez-Acosta, R. R. Tafoya, S. A. Quinones, and E. B. Secor, “Modular motion control software development to support a versatile, low-cost aerosol jet platform for printed electronics,” *Addit. Manuf.*, vol. 40, no. February, p. 101932, 2021, doi: 10.1016/j.addma.2021.101932.
- [286] P. V. Arsenov, A. A. Efimov, and V. V. Ivanov, “Optimizing Aerosol Jet Printing Process of Platinum Ink for High-Resolution Conductive Microstructures on Ceramic and Polymer Substrates,” *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 6, p. 918, Mar. 2021, doi: 10.3390/polym13060918.
- [287] D. Yoo *et al.*, “Mapping drift in morphology and electrical performance in aerosol jet printing,” *Prog. Addit. Manuf.*, vol. 6, no. 2, pp. 257–268, 2021, doi: 10.1007/s40964-021-00165-7.
- [288] S. Lu, J. Zheng, J. A. Cardenas, N. X. Williams, Y. C. Lin, and A. D. Franklin, “Uniform and Stable Aerosol Jet Printing of Carbon Nanotube Thin-Film Transistors by Ink Temperature Control,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 12, no. 38, pp. 43083–43089, 2020, doi: 10.1021/acsami.0c12046.
- [289] M. Alhendi, R. S. Sivasubramony, D. L. Weerawarne, J. Iannotti, P. Borgesen, and M. D. Poliks, “Assessing Current-Carrying Capacity of Aerosol Jet Printed Conductors,” *Adv. Eng. Mater.*, vol. 22, no. 11, pp. 1–9, 2020, doi: 10.1002/adem.202000520.
- [290] H. Zhang, J. P. Choi, S. K. Moon, and T. H. Ngo, “A hybrid multi-objective optimization of aerosol jet printing process via response surface methodology,” *Addit. Manuf.*, vol. 33, no. February, p. 101096, 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101096.
- [291] H. Zhang, S. K. Moon, T. H. Ngo, J. Tou, and M. A. Bin Mohamed Yusoff, “Rapid

- Process Modeling of the Aerosol Jet Printing Based on Gaussian Process Regression with Latin Hypercube Sampling,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 21, no. 1, pp. 127–136, 2020, doi: 10.1007/s12541-019-00237-3.
- [292] H. Zhang, J. P. Choi, S. K. Moon, and T. H. Ngo, “A multi-objective optimization framework for aerosol jet customized line width printing via small data set and prediction uncertainty,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 285, no. June 2019, p. 116779, 2020, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116779.
- [293] N. Dalal, Y. Gu, G. Chen, D. R. Hines, A. Dasgupta, and S. Das, “Effect of gas flow rates on quality of aerosol jet printed traces with nanoparticle conducting ink,” *J. Electron. Packag. Trans. ASME*, vol. 142, no. 1, pp. 1–11, 2020, doi: 10.1115/1.4044960.
- [294] Y. Li, H. Sun, X. Deng, C. Zhang, H. P. Wang, and R. Jin, “Manufacturing quality prediction using smooth spatial variable selection estimator with applications in aerosol jet® printed electronics manufacturing,” *IIE Trans.*, vol. 52, no. 3, pp. 321–333, 2020, doi: 10.1080/24725854.2019.1593556.
- [295] B. Wang, H. Zhang, J. P. Choi, S. K. Moon, B. Lee, and J. Koo, “A post-treatment method to enhance the property of aerosol jet printed electric circuit on 3d printed substrate,” *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 24, pp. 1–12, 2020, doi: 10.3390/ma13245602.
- [296] K. Y. Hung, Y. T. Chang, C. H. Chien, C. F. Ding, M. C. Tsai, and H. T. Young, “Investigation of ink modification for aerosol jet printing process on FR-4 substrate,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 111, no. 3–4, pp. 1147–1156, 2020, doi: 10.1007/s00170-020-06186-w.
- [297] P. Lall, K. Goyal, N. Kothari, B. Leever, and S. Miller, “Additively printed multilayer substrate using aerosol-jet technique,” *J. Electron. Packag. Trans. ASME*, vol. 142, no. 4, 2020, doi: 10.1115/1.4047473.
- [298] R. Kaindl *et al.*, “Aerosol Jet Printing of Graphene and Carbon Nanotube Patterns on Realistically Rugged Substrates,” *ACS Omega*, vol. 6, no. 50, pp. 34301–34313, 2021, doi: 10.1021/acsomega.1c03871.
- [299] R. R. Tafoya, A. W. Cook, B. Kaehr, J. R. Downing, M. C. Hersam, and E. B. Secor, “Real-Time Optical Process Monitoring for Structure and Property Control of Aerosol

- Jet Printed Functional Materials,” *Adv. Mater. Technol.*, vol. 5, no. 12, pp. 1–6, 2020, doi: 10.1002/admt.202000781.
- [300] C. Crump, V. Gjokaj, B. Wright, J. Papapolymerou, J. D. Albrecht, and P. Chahal, “UV Flash Sintering of Aerosol Jet Printed Silver Conductors for Microwave Circuit Applications,” *IEEE Trans. Components, Packag. Manuf. Technol.*, vol. 11, no. 2, pp. 342–350, 2021, doi: 10.1109/TCPMT.2020.3047055.
- [301] E. B. Secor, “Light scattering measurements to support real-time monitoring and closed-loop control of aerosol jet printing,” *Addit. Manuf.*, vol. 44, no. April, p. 102028, 2021, doi: 10.1016/j.addma.2021.102028.
- [302] K. A. Ohiri, N. M. Nowicki, T. J. Montalbano, M. Presley, and N. S. Lazarus, “Electroplating of Aerosol Jet-Printed Silver Inks,” *Adv. Eng. Mater.*, vol. 23, no. 10, pp. 1–6, 2021, doi: 10.1002/adem.202100362.
- [303] T. Seifert, E. Sowade, F. Roscher, M. Wiemer, T. Gessner, and R. R. Baumann, “Additive manufacturing technologies compared: Morphology of deposits of silver ink using inkjet and aerosol jet printing,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 54, no. 2, pp. 769–779, 2015, doi: 10.1021/ie503636c.
- [304] P. Sarobol *et al.*, “Additive Manufacturing of Hybrid Circuits,” *Annu. Rev. Mater. Res.*, vol. 46, no. 1, pp. 41–62, Jul. 2016, doi: 10.1146/annurev-matsci-070115-031632.
- [305] Optomec, *A New Approach to Designing Simulating and Manufacturing RF Devices and Antennas with Printed Electronics*, (2021). Accessed: May 27, 2022. [Online]. Available: <https://optomec.com/3d-printing-webinars/webinar-a-new-approach-to-designing-simulating-and-manufacturing-rf-devices-and-antennas-with-printed-electronics/>
- [306] C. S. Jones, X. Lu, M. Renn, M. Stroder, and W. S. Shih, “Aerosol-jet-printed, high-speed, flexible thin-film transistor made using single-walled carbon nanotube solution,” *Microelectron. Eng.*, vol. 87, no. 3, pp. 434–437, 2010, doi: 10.1016/j.mee.2009.05.034.
- [307] M. A. Ali *et al.*, “Sensing of COVID-19 Antibodies in Seconds via Aerosol Jet Nanoprinted Reduced-Graphene-Oxide-Coated 3D Electrodes,” *Adv. Mater.*, vol. 33, no. 7, 2021, doi: 10.1002/adma.202006647.

- [308] Y. Zhu, L. Yu, D. Wu, W. Lv, and L. Wang, “A high-sensitivity graphene ammonia sensor via aerosol jet printing,” *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 318, p. 112434, 2021, doi: 10.1016/j.sna.2020.112434.
- [309] K. Parate *et al.*, “Aerosol-jet-printed graphene electrochemical histamine sensors for food safety monitoring,” *2D Mater.*, vol. 7, no. 3, 2020, doi: 10.1088/2053-1583/ab8919.
- [310] A. Glushkova *et al.*, “Ultrasensitive 3D Aerosol-Jet-Printed Perovskite X-ray Photodetector,” *ACS Nano*, vol. 15, no. 3, pp. 4077–4084, 2021, doi: 10.1021/acsnano.0c07993.
- [311] V. Ivanov *et al.*, “Aerosol Dry Printing for SERS and Photoluminescence-Active Gold Nanostructures Preparation for Detection of Traces in Dye Mixtures,” *Nanomaterials*, vol. 12, no. 3, 2022, doi: 10.3390/nano12030448.
- [312] S. Lu *et al.*, “Flexible, Print-in-Place 1D-2D Thin-Film Transistors Using Aerosol Jet Printing,” *ACS Nano*, vol. 13, no. 10, pp. 11263–11272, 2019, doi: 10.1021/acsnano.9b04337.
- [313] A. A. Gupta, M. H. Rahmani, M. C. M. Soer, S. G. Cloutier, and R. Izquierdo, “Aerosol Jet Printed, Microwave Microstrip Ring Resonators for System-In-Package Applications,” *IEEE Trans. Components, Packag. Manuf. Technol.*, vol. 10, no. 11, pp. 1913–1920, 2020, doi: 10.1109/TCPMT.2020.3025186.
- [314] R. R. Sarreal and P. Bhatti, “Characterization and miniaturization of silver-nanoparticle microcoil via aerosol jet printing techniques for micromagnetic cochlear stimulation,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 21, pp. 1–13, 2020, doi: 10.3390/s20216087.
- [315] A. Shastri *et al.*, “3D printing of millimetre wave and low-terahertz frequency selective surfaces using aerosol jet technology,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 177341–177350, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3024584.
- [316] C. Cao, J. B. Andrews, and A. D. Franklin, “Completely Printed, Flexible, Stable, and Hysteresis-Free Carbon Nanotube Thin-Film Transistors via Aerosol Jet Printing,” *Adv. Electron. Mater.*, vol. 3, no. 5, pp. 1–10, 2017, doi: 10.1002/aelm.201700057.
- [317] M. Pantouvaki *et al.*, “Aerosol-Jet Printed Interconnects for 60-Gb/s CMOS Driver and Microring Modulator Transmitter Assembly,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 30,

- no. 22, pp. 1944–1947, Nov. 2018, doi: 10.1109/lpt.2018.2873056.
- [318] F. Vogeler’ -Wesley and V.-A. V.-H. Valkenaers, “An Initial Study of Aerosol Jet® Printed Interconnections on Extrusion-Based 3D-Printed Substrates,” *Stroj. vestnik- Journal Mech. Eng.*, vol. 59, pp. 689–696, 2013, doi: 10.5545/sv-jme.2013.999.
- [319] I. Piekarz, J. Sorocki, M. T. Craton, K. Wincza, S. Gruszczynski, and J. Papapolymerou, “Application of aerosol jet 3-d printing with conductive and nonconductive inks for manufacturing mm-wave circuits,” *IEEE Trans. Components, Packag. Manuf. Technol.*, vol. 9, no. 3, pp. 586–595, 2019, doi: 10.1109/TCPMT.2018.2889698.
- [320] S. Stoukatch *et al.*, “Evaluation of Aerosol Jet Printing (AJP) technology for electronic packaging and interconnect technique,” in *2012 4th Electronic System-Integration Technology Conference*, Sep. 2012, pp. 1–5. doi: 10.1109/ESTC.2012.6542067.
- [321] J. R. Deneault *et al.*, “Conductivity and radio frequency performance data for silver nanoparticle inks deposited via aerosol jet deposition and processed under varying conditions,” *Data Br.*, vol. 33, p. 106331, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.dib.2020.106331.
- [322] X. Konstantinou, M. T. Craton, J. D. Albrecht, and J. Papapolymerou, “Ultra-Wideband Transmission Lines on Complex Structures via Extendable Aerosol Jet 3D-Printing,” in *2021 IEEE International Conference on Microwaves, Antennas, Communications and Electronic Systems (COMCAS)*, Nov. 2021, pp. 103–106. doi: 10.1109/COMCAS52219.2021.9629015.
- [323] E. S. Rosker, M. T. Barako, T. Tran, E. Nguyen, M. S. Goorsky, and J. Tice, “Ultralow RF Signal Loss in Aerosol Jet Printed Silver Microstrip Lines up to 18 GHz,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 32973–32980, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3160885.
- [324] S. Sivapurapu *et al.*, “Multi-physics Modeling Characterization of Aerosol Jet Printed Transmission Lines,” in *2018 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO)*, Aug. 2018, pp. 1–4. doi: 10.1109/NEMO.2018.8503509.
- [325] M. K. Mukminin and N. Nurhayati, “Literature Study of Harvesting Energy with Resources Radio Frequency,” *Ina. Indones. J. Electr. Eletronics Eng.*, vol. 3, no. 2, pp. 48–55, 2020, doi: 10.26740/inajeee.v3n2.p48-55.

- [326] H. Zhu *et al.*, “A gravure printed antenna on shape-stable transparent nanopaper,” *Nanoscale*, vol. 6, no. 15, pp. 9110–9115, 2014, doi: 10.1039/c4nr02036g.
- [327] S. Y. Yang and J. Kim, “Wireless power transmission using dipole rectennas made on flexible cellulose membrane,” *IET Microwaves, Antennas Propag.*, vol. 6, no. 7, pp. 756–760, 2012, doi: 10.1049/iet-map.2011.0326.
- [328] J. Machiels *et al.*, “Screen printed antennas on fiber-based substrates for sustainable HF RFID assisted E-fulfilment smart packaging,” *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 19, 2021, doi: 10.3390/ma14195500.
- [329] H. Alsuradi and J. Yoo, “Screen Printed Passives and Interconnects on Bio-Degradable Medical Hydrocolloid Dressing for Wearable Sensors,” *Sci. Rep.*, vol. 9, no. 1, pp. 1–12, 2019, doi: 10.1038/s41598-019-53033-4.
- [330] W. Wang, C. Asci, W. Zeng, and S. Sonkusale, “Zero-power screen printed flexible RFID sensors for Smart Home,” *J. Ambient Intell. Humaniz. Comput.*, vol. 14, no. 4, pp. 3995–4004, Apr. 2023, doi: 10.1007/s12652-022-04466-9.
- [331] A. G. Cherevko, Y. V. Morgachev, I. A. Kotin, E. A. Yakimchuk, R. A. Soots, and I. V. Antonova, “Graphene Antenna on a Biodegradable Substrate for Frequency Range of Cellular Operators,” in *2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)*, Oct. 2018, no. Figure 2, pp. 312–314. doi: 10.1109/APEIE.2018.8545820.
- [332] S. Agarwala and W. Y. Yeong, “Aerosol jet fabricated biodegradable antenna for bioelectronics application,” *Trans. Addit. Manuf. Meets Med. Trans. AMMM*, vol. 1, no. 1, pp. 2–02, 2019, doi: 10.18416/AMMM.2019.1909S02T02.
- [333] S. K. Kang *et al.*, “Biodegradable thin metal foils and spin-on glass materials for transient electronics,” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 25, no. 12, pp. 1789–1797, 2015, doi: 10.1002/adfm.201403469.
- [334] Y. K. Lee, J. Kim, Y. Kim, J. W. Kwak, Y. Yoon, and J. A. Rogers, “Room Temperature Electrochemical Sintering of Zn Microparticles and Its Use in Printable Conducting Inks for Bioresorbable Electronics,” *Adv. Mater.*, vol. 29, no. 38, p. 1702665, Oct. 2017, doi: 10.1002/adma.201702665.
- [335] S. Feng, Z. Tian, J. Wang, S. Cao, and D. Kong, “Laser Sintering of Zn Microparticles

- and Its Application in Printable Biodegradable Electronics,” *Adv. Electron. Mater.*, vol. 5, no. 3, pp. 1–7, 2019, doi: 10.1002/aelm.201800693.
- [336] M. Vaseem, F. A. Ghaffar, M. F. Farooqui, and A. Shamim, “Iron Oxide Nanoparticle-Based Magnetic Ink Development for Fully Printed Tunable Radio-Frequency Devices,” *Adv. Mater. Technol.*, vol. 3, no. 4, p. 1700242, Apr. 2018, doi: 10.1002/admt.201700242.
- [337] N. Fumeaux and D. Briand, “Zinc hybrid sintering for printed transient sensors and wireless electronics,” *npj Flex. Electron.*, vol. 7, no. 1, p. 14, Mar. 2023, doi: 10.1038/s41528-023-00249-0.
- [338] M. Atreya, K. Dikshit, G. Marinick, J. Nielson, C. Bruns, and G. L. Whiting, “Poly(lactic acid)-Based Ink for Biodegradable Printed Electronics with Conductivity Enhanced through Solvent Aging,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 12, no. 20, pp. 23494–23501, 2020, doi: 10.1021/acsami.0c05196.
- [339] B. Wałpuski and M. Słoma, “Accelerated Testing and Reliability of FDM-Based Structural Electronics,” *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 3, 2022, doi: 10.3390/app12031110.
- [340] A. Joe Lopes, E. MacDonald, and R. B. Wicker, “Integrating stereolithography and direct print technologies for 3D structural electronics fabrication,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 18, no. 2, pp. 129–143, Mar. 2012, doi: 10.1108/13552541211212113.
- [341] D. Espalin, D. W. Muse, E. MacDonald, and R. B. Wicker, “3D Printing multifunctionality: Structures with electronics,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 72, no. 5–8, pp. 963–978, Mar. 2014, doi: 10.1007/S00170-014-5717-7/METRICS.
- [342] G. Giordano, “Plastics Get Flexible for Electronics,” *Plast. Eng.*, vol. 72, no. 2, pp. 14–21, Feb. 2016, doi: 10.1002/J.1941-9635.2016.TB01473.X.
- [343] E. S. Rosker, R. Sandhu, J. Hester, M. S. Goorsky, and J. Tice, “Printable Materials for the Realization of High Performance RF Components: Challenges and Opportunities,” *Int. J. Antennas Propag.*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/9359528.
- [344] B. Podsiadły, A. Skalski, B. Wałpuski, and M. Słoma, “Heterophase materials for fused filament fabrication of structural electronics,” *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 30, no. 2, pp. 1236–1245, Jan. 2019, doi: 10.1007/s10854-018-0391-4.
- [345] P. F. Flowers, C. Reyes, S. Ye, M. J. Kim, and B. J. Wiley, “3D printing electronic

- components and circuits with conductive thermoplastic filament,” *Addit. Manuf.*, vol. 18, no. 2017, pp. 156–163, 2017, doi: 10.1016/j.addma.2017.10.002.
- [346] R. Salazar, F. Pizarro, D. Vasquez, and E. Rajo-Iglesias, “Assessment of 3D-printed waveguides using conductive filaments and a chloroform-based smoothing process,” *Addit. Manuf.*, vol. 51, no. June 2021, p. 102593, 2022, doi: 10.1016/j.addma.2022.102593.
- [347] J. A. Paulsen, M. Renn, K. Christenson, and R. Plourde, “Printing conformal electronics on 3D structures with Aerosol Jet technology,” in *2012 Future of Instrumentation International Workshop (FIIW) Proceedings*, Oct. 2012, pp. 1–4. doi: 10.1109/FIIW.2012.6378343.
- [348] M. Alhendi *et al.*, “Printed electronics for extreme high temperature environments,” *Addit. Manuf.*, vol. 54, no. February, p. 102709, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.addma.2022.102709.
- [349] Y. Gu, D. Park, D. Bowen, S. Das, and D. R. Hines, “Direct-Write Printed, Solid-Core Solenoid Inductors with Commercially Relevant Inductances,” *Adv. Mater. Technol.*, vol. 4, no. 1, p. 1800312, Jan. 2019, doi: 10.1002/admt.201800312.
- [350] J. Kimionis, M. Isakov, B. S. Koh, A. Georgiadis, and M. M. Tentzeris, “3D-Printed Origami Packaging with Inkjet-Printed Antennas for RF Harvesting Sensors,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 63, no. 12, pp. 4521–4532, 2015, doi: 10.1109/TMTT.2015.2494580.
- [351] T. Rahman, L. Renaud, D. Heo, M. Renn, and R. Panat, “Aerosol based direct-write micro-additive fabrication method for sub-mm 3D metal-dielectric structures,” *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 25, no. 10, p. 107002, Oct. 2015, doi: 10.1088/0960-1317/25/10/107002.
- [352] M. Li, Y. Yang, F. Iacopi, J. Nulman, and S. Chappel-Ram, “3D-Printed Low-Profile Single-Substrate Multi-Metal Layer Antennas and Array with Bandwidth Enhancement,” *IEEE Access*, vol. 8, no. 3, pp. 217370–217379, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3041232.
- [353] I. Marasco *et al.*, “Compact and flexible meander antenna for Surface Acoustic Wave sensors,” *Microelectron. Eng.*, vol. 227, no. April, p. 111322, 2020, doi: 10.1016/j.mee.2020.111322.

- [354] P. Nintanavongsa, “A survey on RF energy harvesting: Circuits and protocols,” *Energy Procedia*, vol. 56, no. C, pp. 414–422, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.07.174.
- [355] S. K. Behera and N. C. Karmakar, “Chipless RFID Printing Technologies: A State of the Art,” *IEEE Microw. Mag.*, vol. 22, no. 6, pp. 64–81, 2021, doi: 10.1109/MMM.2021.3064099.
- [356] K. Skarżyński and M. Słoma, “Printed Electronics in Radiofrequency Energy Harvesters and Wireless Power Transfer Rectennas for IoT Applications,” *Adv. Electron. Mater.*, vol. 9, no. 8, pp. 1–25, 2023, doi: 10.1002/aelm.202300238.
- [357] M. A. K. Purbayanto, V. Presser, K. Skarżyński, M. Słoma, M. Naguib, and A. M. Jastrzębska, “MXenes: Multifunctional Materials for the Smart Cities of Tomorrow,” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 35, no. 10, pp. 1–24, Mar. 2025, doi: 10.1002/adfm.202409953.
- [358] D. Zhao *et al.*, “Conductivity enhancement of aerosol-jet printed electronics by using silver nanoparticles ink with carbon nanotubes,” *Microelectron. Eng.*, vol. 96, pp. 71–75, 2012, doi: 10.1016/j.mee.2012.03.004.
- [359] N. Karim, S. Afroj, S. Tan, K. S. Novoselov, and S. G. Yeates, “All Inkjet-Printed Graphene-Silver Composite Ink on Textiles for Highly Conductive Wearable Electronics Applications,” *Sci. Rep.*, vol. 9, no. 1, pp. 1–10, 2019, doi: 10.1038/s41598-019-44420-y.
- [360] D. Li, W. Y. Lai, F. Feng, and W. Huang, “Post-Treatment of Screen-Printed Silver Nanowire Networks for Highly Conductive Flexible Transparent Films,” *Adv. Mater. Interfaces*, vol. 8, no. 13, pp. 1–5, 2021, doi: 10.1002/admi.202100548.
- [361] N. Sani *et al.*, “All-printed diode operating at 1.6 GHz,” *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 111, no. 33, pp. 11943–11948, 2014, doi: 10.1073/pnas.1401676111.
- [362] Y. Jung *et al.*, “A Printed Wireless Triangle-Wave Generator via a Smartphone,” *Adv. Eng. Mater.*, vol. 24, no. 1, pp. 1–10, 2022, doi: 10.1002/adem.202100896.
- [363] D. J. Winarski *et al.*, “Photoconductive ZnO Films Printed on Flexible Substrates by Inkjet and Aerosol Jet Techniques,” *J. Electron. Mater.*, vol. 47, no. 2, pp. 949–954, Feb. 2018, doi: 10.1007/s11664-017-5903-0.
- [364] S. Vasquez *et al.*, “Cost-effective, mask-less, and high-throughput prototyping of

- flexible hybrid electronic devices using dispense printing and conductive silver ink,” *2021 5th IEEE Electron Devices Technol. Manuf. Conf. EDTM 2021*, pp. 2021–2023, 2021, doi: 10.1109/EDTM50988.2021.9420858.
- [365] L. Pimpolari *et al.*, “Fully Printed and Flexible Schottky Diodes Based on Carbon Nanomaterials Operating Up to 5 MHz,” *IEEE J. Flex. Electron.*, vol. 1, no. 3, pp. 153–158, 2022, doi: 10.1109/jflex.2022.3215928.
- [366] W. J. Hyun, S. Lim, B. Y. Ahn, J. A. Lewis, C. D. Frisbie, and L. F. Francis, “Screen Printing of Highly Loaded Silver Inks on Plastic Substrates Using Silicon Stencils,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 7, no. 23, pp. 12619–12624, 2015, doi: 10.1021/acsami.5b02487.
- [367] K. Schneider, “Innovative Fine-Line Screen Printing Metallization Reduces Silver Consumption for Solar Cell Contacts Together with their project partners, scientists at the Photovoltaic Technology Evaluation Center PV-TEC at the Fraunhofer Institute for Solar Energy Sys,” 2019. [Online]. Available: www.ise.fraunhofer.de
- [368] G. Li *et al.*, “Precision Control of Aerosol Jet Printing for Conformal Electronics Fabrication with Ultra-Fine and Wide-Range Resolution,” *Adv. Mater. Technol.*, vol. 2402114, pp. 1–12, 2025, doi: 10.1002/admt.202402114.
- [369] T. Ma *et al.*, “Enhanced aerosol-jet printing using annular acoustic field for high resolution and minimal overspray,” *Nat. Commun.*, vol. 15, no. 1, pp. 1–13, 2024, doi: 10.1038/s41467-024-50789-w.
- [370] A. H. Alshehri *et al.*, “Enhanced electrical conductivity of silver nanoparticles for high frequency electronic applications,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 4, no. 12, pp. 7007–7010, 2012, doi: 10.1021/am3022569.
- [371] B. Xu *et al.*, “Aerosol jet printing on radio frequency identification tag applications,” *Key Eng. Mater.*, vol. 562–565, pp. 1417–1421, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.562-565.1417.
- [372] J. Bito, J. G. Hester, and M. M. Tentzeris, “Ambient RF Energy Harvesting from a Two-Way Talk Radio for Flexible Wearable Wireless Sensor Devices Utilizing Inkjet Printing Technologies,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 63, no. 12, pp. 4533–4543, 2015, doi: 10.1109/TMTT.2015.2495289.

- [373] M. Bissannagari, T. H. Kim, J. G. Yook, and J. Kim, “All inkjet-printed flexible wireless power transfer module: PI/Ag hybrid spiral coil built into 3D NiZn-ferrite trench structure with a resonance capacitor,” *Nano Energy*, vol. 62, no. May, pp. 645–652, 2019, doi: 10.1016/j.nanoen.2019.05.075.
- [374] M. Wagih, A. Komolafe, and B. Zaghari, “Wearable Wireless Power Transfer using Direct-Write Dispenser Printed Flexible Coils,” in *2020 IEEE International Conference on Flexible and Printable Sensors and Systems (FLEPS)*, Aug. 2020, pp. 1–4. doi: 10.1109/FLEPS49123.2020.9239595.
- [375] S. Wagih, Mahmoud; Komolafe, Abiodun; Weddell, Alex S.; Beeby, “A Wearable All-Printed Textile-Based 6 . 78 MHz 15 W-Output Wireless Power Transfer System and its Screen-Printed Joule Heater Application,” *TechRxiv. Prepr.*, 2022, doi: 10.36227/techrxiv.21402000.v1.
- [376] H. Park, H. Kang, Y. Lee, Y. Park, J. Noh, and G. Cho, “Fully roll-to-roll gravure printed rectenna on plastic foils for wireless power transmission at 13.56MHz,” *Nanotechnology*, vol. 23, no. 34, 2012, doi: 10.1088/0957-4484/23/34/344006.
- [377] H. Kang *et al.*, “Fully roll-to-roll gravure printable wireless (13.56 MHz) sensor-signage tags for smart packaging,” *Sci. Rep.*, vol. 4, pp. 2–8, 2014, doi: 10.1038/srep05387.
- [378] V. Le, P. Moser, U. Lemmer, and E. Mackensen, “A Comparison of Printed Flexible RFID/NFC Antennas for a Microelectronic Measurement System,” in *2019 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA)*, Sep. 2019, pp. 49–54. doi: 10.1109/RFID-TA.2019.8892040.
- [379] A. Kordzadeh, D. Holzmann, A. Binder, T. Moldaschl, J. Sturm, and A. Roshanghias, “Miniaturized On-Chip NFC Antenna versus Screen-Printed Antenna for the Flexible Disposable Sensor Strips,” *IoT*, vol. 1, no. 2, pp. 309–319, 2020, doi: 10.3390/iot1020018.
- [380] Y. Kim, B. Lee, S. Yang, I. Byun, I. Jeong, and S. M. Cho, “Use of copper ink for fabricating conductive electrodes and RFID antenna tags by screen printing,” *Curr. Appl. Phys.*, vol. 12, no. 2, pp. 473–478, 2012, doi: 10.1016/j.cap.2011.08.003.
- [381] K. Jaakkola, H. Sandberg, M. Lahti, and V. Ermolov, “Near-Field UHF RFID Transponder with a Screen-Printed Graphene Antenna,” *IEEE Trans. Components*,

- Packag. Manuf. Technol.*, vol. 9, no. 4, pp. 616–623, 2019, doi: 10.1109/TCPMT.2019.2902322.
- [382] P. Kopyt *et al.*, “Graphene-Based Dipole Antenna for a UHF RFID Tag,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 64, no. 7, pp. 2862–2868, Jul. 2016, doi: 10.1109/TAP.2016.2565696.
- [383] N. U. Khan, E. Mantini, F. Galliani, C. H. Joseph, T. Björninen, and A. Merla, “Flexible 4-Element Array for On-body RF Energy Harvesting Applications Using Aerosol Jet Printing,” *EuCAP 2025 - 19th Eur. Conf. Antennas Propag.*, pp. 1–5, 2025, doi: 10.23919/EuCAP63536.2025.10999836.
- [384] M. Pavec, J. Navratil, R. Soukup, and A. Hamacek, “A Bowtie Antenna Prepared by Aerosol Jet and Embroidering Technology,” in *2018 41st International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, May 2018, vol. 2018-May, pp. 1–4. doi: 10.1109/ISSE.2018.8443699.
- [385] Yuxiao He, C. Oakley, P. Chahal, J. Albrecht, and J. Papapolymerou, “Aerosol Jet printed 24 GHz end-fire quasi-Yagi-Uda antenna on a 3-D printed cavity substrate,” in *2017 International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas, Innovative Structures, and Applications (iWAT)*, 2017, pp. 179–182. doi: 10.1109/IWAT.2017.7915352.
- [386] F. P. Chietera *et al.*, “Laser-Induced Graphene, Fused Filament Fabrication, and Aerosol Jet Printing for Realizing Conductive Elements of UHF RFID Antennas,” *IEEE J. Radio Freq. Identif.*, vol. 6, pp. 601–609, 2022, doi: 10.1109/JRFID.2022.3167518.
- [387] P. V. Arsenov, A. S. Sobolev, A. A. Efimov, and V. V. Ivanov, “Double slot aerosol jet printed antenna for X-band applications,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2086, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2086/1/012047.
- [388] S. D. Joseph, B. E. G. Davies, M. M. J. Davies, E. A. Ball, and J. R. Willmott, “Aerosol Jet Printing on Kapton for Affordable Millimeter Wave Antenna Prototyping,” *2024 IEEE Microwaves, Antennas, Propag. Conf. MAPCON 2024*, pp. 1–4, 2024, doi: 10.1109/MAPCON61407.2024.10923518.
- [389] R. Saad, B. Davies, and S. Henthorn, “Enabling Shape Morphing Communications at mmWave With Spray On Antenna Arrays,” *18th Eur. Conf. Antennas Propagation*,

EuCAP 2024, pp. 1–3, 2024, doi: 10.23919/EuCAP60739.2024.10501533.

- [390] T. Cheng, K. J. Nicholson, T. Cheng, and K. J. Nicholson, “Advanced Manufacturing : Polymer & Composites Science Characterization of aerosol jet printed features at microwave frequencies Characterization of aerosol jet printed features at microwave frequencies,” *Adv. Manuf. Polym. Compos. Sci.*, vol. 11, no. 1, p., 2025, doi: 10.1080/20550340.2024.2448406.
- [391] P. Li, J. Fleischer, E. Quinn, and D. Park, “Fabrication of an Optically Transparent Planar Inverted-F Antenna Using PEDOT-Based Silver Nanowire Clear Ink with Aerosol-Jet Printing Method towards Effective Antennas,” *J. Manuf. Mater. Process.*, vol. 8, no. 1, 2024, doi: 10.3390/jmmp8010039.
- [392] M. Wagih, A. S. Weddell, and S. Beeby, “Meshed Microstrip Printed Antenna for Matching Network-Free RF Energy Harvesting,” in *2021 51st European Microwave Conference (EuMC)*, Apr. 2022, no. April, pp. 761–764. doi: 10.23919/EuMC50147.2022.9784278.
- [393] M. Wagih, A. S. Weddell, and S. Beeby, “Dispenser Printed Flexible Rectenna for Dual-ISM Band High-Efficiency Supercapacitor Charging,” in *2021 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*, Jun. 2021, no. Wptc, pp. 1–4. doi: 10.1109/WPTC51349.2021.9458070.
- [394] A. B. Gok, D. Masotti, and A. Costanzo, “Co-Location of PV Panel With Meshed Antenna Array for Inter-Satellite Energy Transmission,” *IEEE J. Radio Freq. Identif.*, vol. 8, pp. 516–525, 2024, doi: 10.1109/JRFID.2024.3397575.
- [395] M. Skinner, “3-D Printed 2.4 GHz Rectifying Antenna For Wireless Power Transfer Applications,” University of Massachusetts Lowell, 2017.
- [396] A. Alex-Amor, Á. Palomares-Caballero, J. Moreno-Núñez, A. Tamayo-Domínguez, C. García-García, and J. M. Fernández-González, “Ultrawideband <sc>inkjet-printed</sc> monopole antennas for energy harvesting application,” *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 63, no. 6, pp. 1719–1726, Jun. 2021, doi: 10.1002/mop.32803.
- [397] T. A. Elwi, “A Further Realization of a Flexible Metamaterial-Based Antenna on Nickel Oxide Polymerized Palm Fiber Substrates for RF Energy Harvesting,” *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 115, no. 2, pp. 1623–1634, 2020, doi: 10.1007/s11277-020-

- [398] T.-H. Lin, S. N. Daskalakis, A. Georgiadis, and M. M. Tentzeris, “Achieving Fully Autonomous System-on-Package Designs: An Embedded-on-Package 5G Energy Harvester within 3D Printed Multilayer Flexible Packaging Structures,” in *2019 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, Jun. 2019, vol. 2019-June, pp. 1375–1378. doi: 10.1109/MWSYM.2019.8700931.
- [399] D. Godlinski, R. Zichner, V. Zöllmer, and R. R. Baumann, “Printing technologies for the manufacturing of passive microwave components: antennas,” *IET Microwaves, Antennas Propag.*, vol. 11, no. 14, pp. 2010–2015, 2017, doi: 10.1049/iet-map.2017.0042.
- [400] T. Bjorninen, J. Virkki, L. Sydanheimo, and L. Ukkonen, “Possibilities of 3D direct write dispensing for textile UHF RFID tag manufacturing,” in *2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, Jul. 2015, vol. 2015-Octob, pp. 1316–1317. doi: 10.1109/APS.2015.7305047.
- [401] T. Bjorninen, J. Virkki, L. Sydanheimo, and L. Ukkonen, “Manufacturing of antennas for passive UHF RFID tags by direct write dispensing of copper and silver inks on textiles,” in *2015 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, Sep. 2015, pp. 589–592. doi: 10.1109/ICEAA.2015.7297183.
- [402] T. Björninen, S. Merilampi, L. Ukkonen, L. Sydänheimo, and P. Ruuskanen, “The Effect of Fabrication Method on Passive UHF RFID Tag Performance,” *Int. J. Antennas Propag.*, vol. 2009, no. 1, pp. 1–8, 2009, doi: 10.1155/2009/920947.
- [403] B. O. Choi, C. H. Kim, and D. S. Kim, “Manufacturing ultra-high-frequency radio frequency identification tag antennas by multilayer printings,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 224, no. 1, pp. 149–156, 2010, doi: 10.1243/09544062JMES1610.
- [404] D. Y. Shin, Y. Lee, and C. H. Kim, “Performance characterization of screen printed radio frequency identification antennas with silver nanopaste,” *Thin Solid Films*, vol. 517, no. 21, pp. 6112–6118, 2009, doi: 10.1016/j.tsf.2009.05.019.
- [405] S.-E. Adami, D. Zhu, Yi Li, E. Mellios, B. H. Stark, and S. Beeby, “A 2.45 GHz rectenna screen-printed on polycotton for on-body RF power transfer and harvesting,” in *2015 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*, May 2015, pp. 1–4. doi:

10.1109/WPT.2015.7140161.

- [406] J. Antonio Estrada *et al.*, “RF-Harvesting Tightly Coupled Rectenna Array Tee-Shirt with Greater Than Octave Bandwidth,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 68, no. 9, pp. 3908–3919, 2020, doi: 10.1109/TMTT.2020.2988688.
- [407] X. Lan *et al.*, “Ultra-wideband microwave components fabricated using low-cost aerosol-jet printing technology,” in *2015 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)*, Jan. 2015, vol. 2015-June, no. June, pp. 156–158. doi: 10.1109/RWS.2015.7129749.
- [408] C. E. Folgar, C. Suchicital, and S. Priya, “Solution-based aerosol deposition process for synthesis of multilayer structures,” *Mater. Lett.*, vol. 65, no. 9, pp. 1302–1307, 2011, doi: 10.1016/j.matlet.2011.01.069.
- [409] A. A. Gupta, A. Bolduc, S. G. Cloutier, and R. Izquierdo, “Aerosol Jet Printing for printed electronics rapid prototyping,” in *2016 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, May 2016, vol. 2016-July, pp. 866–869. doi: 10.1109/ISCAS.2016.7527378.
- [410] G. McKerricher, M. Vaseem, and A. Shamim, “Fully inkjet-printed microwave passive electronics,” *Microsystems Nanoeng.*, vol. 3, no. September 2016, 2017, doi: 10.1038/micronano.2016.75.
- [411] J. Park *et al.*, “Printing of wirelessly rechargeable solid-state supercapacitors for soft, smart contact lenses with continuous operations,” *Sci. Adv.*, vol. 5, no. 12, pp. 1–9, 2019, doi: 10.1126/sciadv.aay0764.
- [412] Y. Ge *et al.*, “All-printed capacitors with continuous solution dispensing technology,” *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 32, no. 9, 2017, doi: 10.1088/1361-6641/aa78c9.
- [413] U. R. Dominguez, “3D Printed Impedance Elements By Micro-Dispensing,” University of Texas at El Paso, 2013.
- [414] G. Ashebir, S. Zambou, U. Männl, R. Setshedi, M. Härting, and D. T. Britton, “Fully screen printed LRC resonant circuit,” *Microelectron. Eng.*, vol. 162, pp. 6–11, 2016, doi: 10.1016/j.mee.2016.04.021.
- [415] O. J. Arenas, E. L. De La Jarrige, and F. Boone, “Creating screen-printed passive components for microwave applications,” *Microelectron. Int.*, vol. 27, no. 2, pp. 84–92, 2010, doi: 10.1108/13565361011034768.

- [416] G. McKerricher, J. G. Perez, and A. Shamim, "Fully inkjet printed RF inductors and capacitors using polymer dielectric and silver conductive ink with through vias," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 62, no. 3, pp. 1002–1009, 2015, doi: 10.1109/TED.2015.2396004.
- [417] A. G. Martinez-Lopez *et al.*, "Electrical characterization of schottky diodes based on inkjet-printed TiO₂ films," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 39, no. 12, pp. 1940–1943, 2018, doi: 10.1109/LED.2018.2874380.
- [418] N. Marjanovic *et al.*, "Inkjet printing and low temperature sintering of CuO and CdS as functional electronic layers and Schottky diodes," *J. Mater. Chem.*, vol. 21, no. 35, pp. 13634–13639, 2011, doi: 10.1039/c1jm11237f.
- [419] E. Persson, "Printed Schottky Diodes based upon Zinc Oxide Materials," 2013. [Online]. Available: <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A694402&dswid=-8630>
- [420] F. A. Viola *et al.*, "A 13.56 MHz Rectifier Based on Fully Inkjet Printed Organic Diodes," *Adv. Mater.*, vol. 32, no. 33, p. 2002329, Aug. 2020, doi: 10.1002/adma.202002329.
- [421] K. Y. Mitra *et al.*, "Potential up-scaling of inkjet-printed devices for logical circuits in flexible electronics," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1646, no. February 2015, pp. 106–114, 2014, doi: 10.1063/1.4908590.
- [422] H. F. Castro *et al.*, "All-inkjet-printed low-pass filters with adjustable cutoff frequency consisting of resistors, inductors and transistors for sensor applications," *Org. Electron.*, vol. 38, pp. 205–212, 2016, doi: 10.1016/j.orgel.2016.08.025.
- [423] M. Ha, W. Zhang, D. Braga, M. J. Renn, C. H. Kim, and C. D. Frisbie, "Aerosol-jet-printed, 1 volt h-bridge drive circuit on plastic with integrated electrochromic pixel," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 5, no. 24, pp. 13198–13206, 2013, doi: 10.1021/am404204q.
- [424] J. Kimionis, A. Collado, M. M. Tentzeris, and A. Georgiadis, "Octave and Decade Printed UWB Rectifiers Based on Nonuniform Transmission Lines for Energy Harvesting," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 65, no. 11, pp. 4326–4334, 2017, doi: 10.1109/TMTT.2017.2697851.

- [425] P. S. Heljo, M. Li, K. E. Lilja, H. S. Majumdar, and D. Lupo, “Printed half-wave and full-wave rectifier circuits based on organic diodes,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 60, no. 2, pp. 870–874, 2013, doi: 10.1109/TED.2012.2233741.
- [426] K. E. Lilja, T. G. Bäcklund, D. Lupo, T. Hassinen, and T. Joutsenoja, “Gravure printed organic rectifying diodes operating at high frequencies,” *Org. Electron.*, vol. 10, no. 5, pp. 1011–1014, 2009, doi: 10.1016/j.orgel.2009.04.008.
- [427] S. R. Ghali, B. Prudhvi Nadh, P. R. Kumar, M. Alathbah, and B. T. P. Madhav, “Design and Optimization Analysis of Srichakra Shaped Conformal Antenna for Off-Body Communication Applications,” *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 139, no. 4, pp. 2131–2160, 2024, doi: 10.1007/s11277-024-11708-w.
- [428] S. Masihi *et al.*, “Rapid Prototyping of a Tunable and Compact Microstrip Antenna by Laser Machining Flexible Copper Tape,” *FLEPS 2019 - IEEE Int. Conf. Flex. Printable Sensors Syst. Proc.*, pp. 10–12, 2019, doi: 10.1109/FLEPS.2019.8792295.
- [429] J. G. D. Hester and M. M. Tentzeris, “Inkjet-printed flexible mm-wave van-atta reflectarrays: A solution for ultralong-range dense multitag and multisensing chipless RFID implementations for IoT smart skins,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 64, no. 12, pp. 4763–4773, 2016, doi: 10.1109/TMTT.2016.2623790.
- [430] J. Coonrod, “Choosing Circuit Materials for Millimeter Wave Applications,” *High Frequency Design Circuit Materials*, 2013. https://highfrequencyelectronics.com/Archives/Jul13/1307_HFE_CircuitMaterials.pdf
- [431] M. Margraf, “QucsStudio – A Free and Powerful Circuit Simulator.” [Online]. Available: <https://qucsstudio.de>
- [432] K. Angel, H. H. Tsang, S. S. Bedair, G. L. Smith, and N. Lazarus, “Selective electroplating of 3D printed parts,” *Addit. Manuf.*, vol. 20, no. February, pp. 164–172, 2018, doi: 10.1016/j.addma.2018.01.006.
- [433] N. Hunt, J. Scott, and L. Streeter, “Nano Versus Commercial [Educator’s Corner],” *IEEE Microw. Mag.*, vol. 24, no. 4, pp. 88–95, 2023, doi: 10.1109/MMM.2022.3233500.
- [434] Q. Wang, W. Che, G. Monti, and M. Mongiardo, “Measurements for Wireless Power Transfer by Using NanoVNA,” *2021 34th Gen. Assem. Sci. Symp. Int. Union Radio*

- Sci. URSI GASS* 2021, no. September, pp. 4–6, 2021, doi: 10.23919/URSIGASS51995.2021.9560402.
- [435] N. Phumirin, K. Sukpreecha, K. Phaebua, A. Boonpoonga, and T. Lertwiriayaprapa, “Low-cost Automatic Antenna Polarization Measurement system,” *Proc. - 2022 Res. Invent. Innov. Congr. Innov. Electr. Electron. RI2C* 2022, pp. 263–266, 2022, doi: 10.1109/RI2C56397.2022.9910296.
- [436] M. Tomov, K. Tramantzas, D. Kazolis, K. Angelov, and B. Arsov, “Local Two-Way Amplifying System for Mobile Networks,” *CIEES 2024 - IEEE Int. Conf. Commun. Information, Electron. Energy Syst.*, pp. 1–5, 2024, doi: 10.1109/CIEES62939.2024.10811130.
- [437] L. Hendershot, M. Hodek, P. Chahal, J. Albrecht, and J. Papapolymerou, “Ku-Band Patch Antenna on Thick, Aerosol Jet Printed Substrate,” *IEEE Antennas Propag. Soc. AP-S Int. Symp.*, no. 1, pp. 411–412, 2024, doi: 10.1109/AP-S/INC-USNC-URSI52054.2024.10687178.
- [438] J. Szóstka, *FALE I ANTENY*. Warszawa: Wydawnictwo Komunikacji i Łączności sp. z o.o., 2001.
- [439] E. Committee, I. Power, and E. Society, “IEEE Recommended Practice for Antenna Measurements,” vol. 2004, no. June. IEEE, Piscataway, NJ, USA, Sep. 23, 2021. doi: 10.1109/IEEESTD.2022.9714428.
- [440] R. (Ross) Salary, J. P. Lombardi, D. L. Weerawarne, P. Rao, and M. D. Poliks, “A Computational Fluid Dynamics Investigation of Pneumatic Atomization, Aerosol Transport, and Deposition in Aerosol Jet Printing Process,” *J. Micro Nano-Manufacturing*, vol. 9, no. 1, Mar. 2021, doi: 10.1115/1.4049958.
- [441] B. Y. H. Liu, D. Y. H. Pui, K. L. Rubow, and W. W. Szymanski, “Electrostatic effects in aerosol sampling and filtration,” *Ann. Occup. Hyg.*, vol. 29, no. 2, pp. 251–269, 1985, doi: 10.1093/annhyg/29.2.251.
- [442] C. Berna, A. Escrivá, J. L. Muñoz-Cobo, and L. E. Herranz, “Review of droplet entrainment in annular flow: Characterization of the entrained droplets,” *Prog. Nucl. Energy*, vol. 79, pp. 64–86, 2015, doi: 10.1016/j.pnucene.2014.11.011.
- [443] S. L. Von Der Weiden, F. Drewnick, and S. Borrmann, “Particle Loss Calculator - A

- new software tool for the assessment of the performance of aerosol inlet systems,” *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 2, no. 2, pp. 479–494, 2009, doi: 10.5194/amt-2-479-2009.
- [444] J. Krzemiński, “Opracowanie Technologii Wysokoprzewodzących Nanosrebrowych Tuszów Do Wytwarzania Elementów Elektronicznych Metodą Druku Aerozolowego : Praca Doktorska,” Warsaw University of Technology, 2019.
- [445] G. Clasen and R. Langley, “Meshed patch antennas,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 52, no. 6, pp. 1412–1416, 2004, doi: 10.1109/TAP.2004.830251.
- [446] Z. J. Silva, C. P. Hunter, C. R. Valenta, and G. D. Durgin, “2.5 GHz meshed inset-fed patch antenna,” *2019 IEEE Int. Symp. Antennas Propag. Usn. Radio Sci. Meet. APSURSI 2019 - Proc.*, pp. 843–844, 2019, doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8888758.
- [447] “IDS Nanojet principles,” 2024. <https://www.idsnm.com/products/> (accessed Oct. 24, 2024).
- [448] Y. Kawahara, X. Bian, R. Shigeta, R. Vyas, M. M. Tentzeris, and T. Asami, “Power harvesting from microwave oven electromagnetic leakage,” *UbiComp 2013 - Proc. 2013 ACM Int. Jt. Conf. Pervasive Ubiquitous Comput.*, pp. 373–381, 2013, doi: 10.1145/2493432.2493500.
- [449] A. Rydosz, *Diabetes Without Needles*. Elsevier, 2022. doi: 10.1016/C2021-0-00443-0.
- [450] Y. Cui, H. Zhang, J. Zhu, Z. Liao, S. Wang, and W. Liu, “Correlations of Salivary and Blood Glucose Levels among Six Saliva Collection Methods,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 19, no. 7, p. 4122, Mar. 2022, doi: 10.3390/ijerph19074122.
- [451] I. Piekarz *et al.*, “Additively manufactured microwave sensor for glucose level detection in saliva,” *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–13, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-79867-1.
- [452] “European Commission to harmonise the last pioneer frequency band needed for 5G deployment,” *European Commission*, 2019. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/european-commission-harmonise-last-pioneer-frequency-band-needed-5g-deployment>
- [453] M. Aziz, A. El Hassan, M. Hussein, E. Zanelidin, A. H. Al-Marzouqi, and W. Ahmed, “Characteristics of antenna fabricated using additive manufacturing technology and the

- potential applications,” *Heliyon*, vol. 10, no. 6, p. e27785, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e27785.
- [454] Y. Wang *et al.*, “3D Printed Antennas for 5G Communication: Current Progress and Future Challenges,” *Chinese J. Mech. Eng. Addit. Manuf. Front.*, vol. 2, no. 1, p. 100065, 2023, doi: 10.1016/j.cjmeam.2023.100065.
- [455] U. Hasni, R. Green, A. V. Filippas, and E. Topsakal, “One-step 3D-printing process for microwave patch antenna via conductive and dielectric filaments,” *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 61, no. 3, pp. 734–740, 2019, doi: 10.1002/mop.31607.
- [456] D. Mitra *et al.*, “A Fully 3D-Printed Conformal Patch Antenna using Fused Filament Fabrication Method,” *2020 IEEE Int. Symp. Antennas Propag. North Am. Radio Sci. Meet. IEEECONF 2020 - Proc.*, pp. 1405–1406, 2020, doi: 10.1109/IEEECONF35879.2020.9329909.
- [457] P. U. Linge *et al.*, “Evaluation of Polylactic Acid Polymer as a Substrate in Rectenna for Ambient Radiofrequency Energy Harvesting,” *J. Low Power Electron. Appl.*, vol. 13, no. 2, 2023, doi: 10.3390/jlpea13020034.
- [458] H. Krishna, P. K. Singh, D. Sharma, and A. K. Tiwary, “Dual-Band Stop Filter with Controllable Stop-Bands Based on Defect in Shunt Radial Stub,” *Lect. Notes Networks Syst.*, vol. 426, pp. 165–175, 2022, doi: 10.1007/978-981-19-0745-6_18.
- [459] S. S. Mohan, M. D. M. Hershenson, S. P. Boyd, and T. H. Lee, “Simple accurate expressions for planar spiral inductances,” *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 34, no. 10, pp. 1419–1420, 1999, doi: 10.1109/4.792620.
- [460] J. Zhang, Y. Li, B. Zhang, H. Wang, Q. Xin, and A. Song, “Flexible indium-gallium-zinc-oxide Schottky diode operating beyond 2.45 GHz,” *Nat. Commun.*, vol. 6, no. May, pp. 1–7, 2015, doi: 10.1038/ncomms8561.
- [461] P. Lizette *et al.*, “Aerosol Jet Printing for 3-D Multilayer Passive Microwave Circuitry,” in *Proceedings of the 44th European Microwave Conference*, no. 1, 2011, pp. 1–13. doi: 10.1109/EuMC.2014.6986483.
- [462] S. Ramesh, Z. Xu, I. V. Rivero, and D. R. Cormier, “Computational fluid dynamics and experimental validation of aerosol jet printing with multi-stage flow focusing lenses,” *J. Manuf. Process.*, vol. 95, no. December 2022, pp. 312–329, 2023, doi:

10.1016/j.jmapro.2023.03.035.

- [463] B. I. Gyll, L. D. Petersen, C. L. Pint, and E. B. Secor, “Enhanced Resolution, Throughput, and Stability of Aerosol Jet Printing via In Line Heating,” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 34, no. 28, pp. 1–9, 2024, doi: 10.1002/adfm.202316426.