

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Rozprawa doktorska

Dyscyplina Nauki Fizyczne
Dziedzina Nauk Ścisłych i Przyrodniczych

mgr inż.

Mateusz Surma

Miniaturyzacja terahercowych odbiciowych układów skanujących
z wykorzystaniem optycznych struktur dyfrakcyjnych

Promotor

dr hab. inż. **Agnieszka Siemion**, prof. PW

Warszawa 2025

Podziękowania

Firmie Orteh – za udostępnienie oprogramowania LightSword 6.0, wykorzystanego w numerycznej symulacji propagacji promieniowania elektromagnetycznego, dostępnego w Laboratorium Informatyki Optycznej na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej.

Instytutowi Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej – za możliwość przeprowadzenia pomiarów struktur segmentowych.

Kindze Surmie – za bycie przy mnie zawsze, kiedy Cię potrzebowałem, i za motywację do dalszego działania. Bez Ciebie nie byłbym w miejscu, w którym jestem.

Agnieszce Siemion – za lata współpracy i cierpliwości. Pod Twoimi skrzydłami miałem możliwość dorastać zarówno jako człowiek, jak i naukowiec, za co z całego serca jestem Ci wdzięczny.

Rodzicom i przyjaciołom – za wsparcie w gorszych chwilach i wspólne świętowanie w tych lepszych.

Finansowanie

Badania finansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu LIDER (LIDER/11/0036/L-9/17/NCBR/2018).

Streszczenie

Szybkie tempo rozwoju technologii terahercowych jest widoczne nie tylko w dziedzinie emisji i detekcji promieniowania, ale również w sferze zastosowań. Aplikacje promieniowania terahercowego sięgają od badań nieniszczących przez telekomunikację, obserwację astronomiczną, środki bezpieczeństwa, obrazowanie medyczne, aż po badania właściwości molekuł. Dzięki właściwościom niejonizującym stosowane jest również do badania próbek biologicznych, które ze względu na dużą zawartość wody są silnie tłumiące. Wykorzystywane jest między innymi w obrazowaniu zmian nowotworowych tkanek skóry i piersi, badaniach nawodnienia tkanek, a nawet w analizie dynamiki biomolekuł. Z powodu wysokiej absorpcji promieniowania terahercowego w wielu rodzajach próbek, w szczególności próbek biologicznych, często konieczne jest stosowanie układów odbiciowych. Jednym z najczęściej wykorzystywanych urządzeń pomiarowych w dziedzinie technologii terahercowych jest układ do terahercowej spektroskopii w dziedzinie czasu. Zwykle układ ten wymaga kosztownych komponentów oraz dużej ilości przestrzeni. W celu zwiększenia możliwości szybkiego i powszechnego zastosowania technologii terahercowych konieczne jest opracowanie, potencjalnie wyspecjalizowanych, układów redukujących zarówno cenę całego systemu, jak i jego rozmiar. Optyka dyfrakcyjna w zakresie promieniowania terahercowego pozwala spełnić oba te warunki. Stąd niniejsza praca opisuje terahercowy układ odbiciowy wykorzystujący struktury dyfrakcyjne. Układ umożliwia skanowanie, a także obrazowanie różnych materiałów, w tym próbek silnie tłumiących. Przeanalizowane zostały dwa możliwe podejścia do stworzenia układu skanującego: przez oświetlenie punktowe oraz przez oświetlenie jednorodnej większej powierzchni próbki. Po określeniu możliwości opracowanych struktur stworzony został demonstrator z wykorzystaniem struktur oświetlających punktowo. Wybrane struktury tworzyły pozaosiowe oświetlenie punktowe w bliskiej odległości, które po odbiciu od próbki było przekierowane i skupione w płaszczyźnie detektora. Wyniki eksperymentalne pomiarów próbek o różnych właściwościach optycznych uzyskane z wykorzystaniem zbudowanego demonstratora zostały zaprezentowane w niniejszej pracy.

Słowa kluczowe: promieniowanie terahercowe, struktury dyfrakcyjne, odbiciowe układy skanujące, badanie materiałów silnie tłumiących, terahercowy fantom skóry

Abstract

The rapid development of terahertz technologies is evident not only in the field of radiation emission and detection but also in their applications. Terahertz radiation finds use in areas ranging from non-destructive testing, telecommunications, astronomical observation, security systems, and medical imaging, to studies of molecular properties. Due to its non-ionizing nature, it is also employed for examining biological samples, which, owing to their high water content, exhibit strong attenuation. Applications include imaging of cancerous tissues in the skin and breast, studies of tissue hydration, and even analyses of biomolecular dynamics. Because of the high absorption of terahertz radiation in many types of samples, particularly biological ones, reflective systems are often required. One of the most widely used measurement devices in the field of terahertz technology is the terahertz time-domain spectroscopy system, which typically requires costly components and significant amount of space. To enable faster and more widespread use of terahertz technologies, it is necessary to develop potentially specialized systems that reduce both the cost and size of the setup. Diffractive optics in the terahertz range offers a way to meet these requirements. This work therefore presents a reflective terahertz system based on diffractive structures. The system enables scanning and imaging of various materials, including strongly attenuating samples. Two approaches to building a scanning setup were analyzed: point illumination and uniform illumination of a larger sample area. After evaluating the performance of the designed structures, a demonstrator based on point illumination structures was developed. The selected structures produced off-axis point illumination at a short distance, which, after reflecting from the sample, was redirected and focused onto the detector plane. Experimental results obtained with the demonstrator for samples with different optical properties are presented in this work.

Keywords: terahertz radiation, diffractive optical elements, reflective scanning setup, examination of highly attenuating materials, terahertz skin phantom

Spis treści

1	Wstęp i motywacja	11
2	Cel, zakres oraz teza rozprawy	15
3	Wprowadzenie teoretyczne	19
3.1	Dyfrakcyjne elementy optyczne	19
3.1.1	Techniki projektowania struktur dyfrakcyjnych	22
3.1.2	Materiały oraz wykonywanie DOE dla promieniowania terahercowego	22
3.2	Terahercowa spektroskopia w dziedzinie czasu	24
3.3	Badania nowotworów z wykorzystaniem promieniowania terahercowego	27
3.3.1	Fantomy tkanek biologicznych	29
4	Metodyka	31
4.1	Oświetlenie próbki w układzie odbiciowym za pomocą struktur dyfrakcyjnych	31
4.2	Projektowanie struktur dyfrakcyjnych	31
4.2.1	Struktury skupiające w punkt z optymalizacją pracy pozaosiowej: parametry projektowe	33
4.2.2	Struktury segmentowane: opis segmentacji, kombinacji struktur oraz parametry projektowe	35
4.3	Wykonanie struktur dyfrakcyjnych	39
4.3.1	Wybrane metody wykonania elementów dyfrakcyjnych	42
4.3.2	Wybór materiałów	42
4.3.3	Modelowanie 3D	45
4.3.4	Rachunek strat	47

5	Charakteryzacja struktur segmentowych	51
5.1	Układ eksperymentalny oraz protokół pomiarowy	51
5.2	Charakteryzacja numeryczna	53
5.3	Wyniki charakteryzacji	55
5.3.1	Analiza jakościowa	55
5.3.2	Analiza ilościowa	57
5.4	Podsumowanie uzyskanych wyników	60
6	Charakteryzacja pozaosiowych struktur punktowych	63
6.1	Układ oraz protokół pomiarowy	63
6.1.1	Elementy układu pomiarowego	63
6.1.2	Protokół pomiarowy	65
6.2	Wyniki charakteryzacji	66
6.2.1	Analiza wykonania struktur	66
6.2.2	Wyniki eksperymentalne	66
6.3	Podsumowanie uzyskanych wyników	74
7	Demonstrator	75
7.1	Opis układu demonstratora	75
7.2	Opis oraz przygotowanie próbek	76
7.2.1	Wyniki eksperymentalne	77
7.3	Wnioski	82
8	Wnioski i podsumowanie	83
	Bibliografia	91

Rozdział 1

Wstęp i motywacja

Zakres promieniowania terahercowego w ostatnich kilku dekadach cieszy się szczególnym zainteresowaniem badaczy, w szczególności w potencjalnych zastosowaniach powiązanych z materiałami biologicznymi oraz dielektrykami. Promieniowanie terahercowe jest terminem określającym zakres promieniowania elektromagnetycznego pomiędzy 0,1 THz, a 10 THz (za Y. S. Lee [1]). Jego spektrum jest zatem otoczone od strony niższych częstotliwości promieniowaniem mikrofalowym i promieniowaniem podczerwonym od wyższych. Jest to promieniowanie niejonizujące, przez co może być wykorzystywane w nieinwazyjny dla badanej próbki sposób. W połączeniu z wysoką absorpcją i dyspersją w wodzie, wyłania się potencjalne zastosowanie promieniowania terahercowego w badaniu tkanek biologicznych. Metale w tym zakresie promieniowania charakteryzują się wysokim współczynnikiem odbicia, a dielektryki dużą transparentnością – relatywnie niskie współczynniki załamania i absorpcji [1].

Bazując na interakcji promieniowania terahercowego z próbkami biologicznymi, powstały liczne prace wykorzystujące je do badania właściwości takich próbek. Z racji zakresu częstotliwości promieniowanie to jest niejonizujące. Przeprowadzono też badania nad bezpiecznymi dawkami tego promieniowania [2–7]. Jednocześnie, jak w przypadku innych zakresów promieniowania, wykazano pewne negatywne efekty w przypadku długotrwałego oddziaływania promieniowania z próbkami biologicznymi lub oddziaływania promieniowania o wysokim natężeniu [8,9]. W kategorii badania próbek biologicznych często poruszonym tematem jest detekcja zmian nowotworowych. Do tej pory badano raka skóry (rak podstawnokomórkowy skóry, ang. *basal cell carcinoma*) [10–13], raka piersi [14–16], szyjki macicy [17, 18] i jelita grubego [19–21]. W badaniach wykryto inne współczynniki załamania i absorpcji tkanek ze zmianami nowotworowymi,

potencjalnie pozwalając na wyznaczenie granicy między tkanką zdrową, a nowotworową. Promieniowanie terahercowe zostało również wykorzystane w badaniu rogówki [22, 23], nawodnienia tkanki skórnej [24] oraz przy diagnozie cukrzycy [25, 26]. W zastosowaniach pozamedycznych, badane jest również zastosowanie w detekcji zanieczyszczenia jedzenia [27], badaniach dynamiki biomolekuł i rozwoju bioczuJNIKÓW [28].

Promieniowanie terahercowe może być również zastosowane do badania próbek dla tego promieniowania przezroczystych lub próbek będących kombinacją materiałów przezroczystych i odbijających. Z tego powodu często jest ono wykorzystywane w zastosowaniach bezpieczeństwa [29–31], zwykle w kontekście wykrywania celowo maskowanych obiektów niebezpiecznych jak np. broń pod ubraniami. Jest również stosowane w przypadku badań obiektów archeologicznych oraz dzieł sztuki [32–36], wykorzystując możliwość badania wewnętrznych warstw lub struktury obiektów. Podobne zastosowanie znajduje w badaniach nieniszczących obiektów warstwowych lub w poszukiwaniu defektów wewnętrznych [37–39]. Korzystając z przezroczystości materiałów dielektrycznych, badane są one również pod względem zastosowania w układach terahercowych. Powstają prace związane z elementami pasywnymi takimi jak falowody [40], optyczne elementy refrakcyjne i dyfrakcyjne [41], kryształy fotoniczne [42], czy metastruktury [43].

W powyższych pracach analizowano wykorzystanie promieniowania terahercowego jako zakresu spektralnego zarówno w rozwiązaniach spektroskopowych, jak i obrazujących. W obu przypadkach dla próbek silnie tłumiących niezbędne jest zastosowanie układu odbiciowego. Metody spektroskopowe wymagają złożonego układu składającego się z wyspecjalizowanych, a przez to drogich elementów [44]. Układy spektroskopowe oferowane są również w formie gotowych komercyjnych urządzeń do zastosowań laboratoryjnych, które nie tylko są drogie, ale również potrzebują obsługi wykwalifikowanego technika przy przenoszeniu. To wszystko sprawia, że proste układy posiadające aktywne oświetlenie i rejestrujące odbiciową odpowiedź próbki mają większą szansę na zastosowanie w szerszej skali, na przykład na liniach produkcyjnych. Mimo znaczącej poprawy w ilości emitowanej mocy przez źródła terahercowe w ostatnich latach, warto podkreślić, że większość z nich nadal pozostaje poniżej 1 mW [45]. Podobnie w przypadku dostępnych detektorów, istnieją już pierwsze komercyjnie dostępne kamery terahercowe, jednak przeważnie ich macierze są powierzchniowo rozległe i mają niską rozdzielczość. Natomiast kamery posiadające duże rozdzielczości przy małej powierzchni przeważnie charakteryzują się niską czułością. Stąd nadal istnieje zapotrzebowanie na układy wykorzystujące skanowanie próbek. Ze względu na potrzebę miniaturyzacji nowych układów terahercowych, zastosowanie

odpowiedniego rodzaju optyki jest niezbędne. W tym zakresie struktury dyfrakcyjne mogą znaleźć swoje zastosowanie przez ich niespotykane szeroki zakres kontroli nad uzyskiwanym rozkładem promieniowania [46], ich kompaktowość, małą objętość oraz małą wagę.

Wraz z rozwojem dziedziny, jaką jest technologia terahercowa, niezbędne jest ukierunkowanie na zastosowanie, a więc komercjalizację rozwiązań. W związku z tym, w przypadku zastosowań biologicznych, konieczne jest opracowanie układów działających w reżimie odbiciowym. Równie istotna z perspektywy praktycznego zastosowania tych układów jest ich miniaturyzacja. Przedstawione powyżej rozważania składają się na motywację niniejszej pracy.

Rozdział 2

Cel, zakres oraz teza rozprawy

Podkreślona w poprzednim rozdziale miniaturyzacja ma dwojakie znaczenie. Z jednej strony odnosi się ona do urządzeń związanych z generacją i detekcją promieniowania. Tutaj możemy wymienić wielkość poszczególnych elementów oraz wspomagających ich urządzeń niezbędnych do spełnienia zadań generacji i detekcji. Drugim aspektem jest tor optyczny określający bieg promieniowania między źródłem, detektorem, a próbką oraz za formowanie rozkładu tego promieniowania. W tej kategorii rozważamy zwykle optykę refrakcyjną, odbiciową i dyfrakcyjną wraz z nowszymi rozwiązaniami, na przykład w postaci metastruktur. Niniejsza praca skupia się nad aspektem związanym z optyką i formowaniem wiązki w zaprojektowanym torze optycznym. Na potrzeby dalszych rozważań należy również zaznaczyć, że rozpatrywane jest zastosowanie elementów dyfrakcyjnych do układu o stosunkowo krótkiej odległości między elementem optycznym, a mierzoną próbką. Zakłada się odległość rzędu kilku centymetrów, co w odniesieniu do długości fali promieniowania terahercowego uzmysławia trudność proponowanego w pracy rozwiązania.

Elementy optyczne bazujące na optyce refrakcyjnej są relatywnie prostym rozwiązaniem. Niestety w przypadku krótkich ogniskowych, elementy te zaczynają mieć nieporęcznie duży wymiar wzdłuż osi optycznej (grubość elementów) [47]. Zależnie od zastosowanego materiału może to wpływać negatywnie na ilość przepuszczanego promieniowania ze względu na współczynnik absorpcji. Kolejną opcją jest zastosowanie zwierciadeł. Elementy odbiciowe w zakresie promieniowania terahercowego, z racji relatywnie dużej długości fali w porównaniu do promieniowania widzialnego, pozwalają na wykonywanie ich z mniejszą precyzją. Dodatkowo w celu uzyskania powierzchni o wysokim współczynniku odbicia, wystarczy zastosować pokrycie odpo-

wiednio ukształtowanej powierzchni za pomocą warstwy metalizującej [48]. Elementy odbiciowe wymagają jednak więcej wolnej przestrzeni do operacji, ograniczając ich zastosowanie w aplikacjach wymagających miniaturyzacji. Metamateriały, a w szczególności metapowierzchnie, są w ostatnich latach bardzo popularną kategorią elementów pozwalających na kontrolę i formowanie promieniowania z różnych zakresów spektralnych. Składają się one z subfalowych mikrostruktur, pozwalających na uzyskiwanie wartości przenikalności elektrycznej oraz przenikalności magnetycznej, niedostępnych przy wykorzystaniu klasycznie stosowanych materiałów. Metapowierzchnie zwykle składają się z powierzchniowych mikrorezonatorów wykonanych z metalu lub dielektryków o wysokim współczynniku załamania [49]. Znikoma grubość mikrostruktur sprawia, że są one prawdziwie płaskie. Pojawiły się również badania nad materiałami aktywnymi, które pozwalają na dostrajanie właściwości struktury do konkretnych parametrów [50]. Produkcja tych struktur jest jednak ograniczona przez kosztowne technologie niezbędne do ich wykonania, takie jak fotolitografia z macierzą mikrosoczewek czy litografia wiązką elektronową [51, 52]. Wpływa to negatywnie na możliwość szybkiego prototypowania i dostosowywania rozwiązań do praktycznych zastosowań. Ostatnią analizowaną kategorią są struktury dyfrakcyjne. Bazujące na zasadach optyki dyfrakcyjnej, struktury te mają grubości rzędu długości fali. Pozwalając na szeroką kontrolę nad modulacją przechodzącego przez nie promieniowania, wykorzystywane są nie tylko do tworzenia prostych elementów optycznych jak soczewki, ale również do tworzenia bardziej skomplikowanych struktur czy hologramów tworzących dowolne obrazy, wliczając w tworzenie obrazów w wielu płaszczyznach naraz [53]. Ponieważ zakres sub-terahercowy charakteryzuje się długościami fali rzędu milimetrów, a powszechnie dostępne materiały do druku 3D mają odpowiednio niskie współczynniki absorpcji i załamania, struktury dyfrakcyjne mogą być tworzone z wykorzystaniem komercyjnie dostępnych drukarek 3D [46, 54]. Wpływa to pozytywnie na możliwość szybkiego prototypowania nowych struktur do dedykowanych zastosowań. Głównym mankamentem jest jednak ich wąskopasmowość, albowiem struktury projektowane są dla konkretnej długości fali. W pewnym stopniu problem ten jest redukowany przez zastosowanie kinoformów wyższego rzędu [55]. Ze względu na wszechstronność oraz łatwą dostępność materiałów i technologii produkcji, poniższa praca skupia się wokół zastosowania struktur dyfrakcyjnych. Z powodów praktycznych, wyjaśnionych w dalszej części pracy, projektową długość fali wyznaczono na 1,15 mm, co odpowiada częstotliwości promieniowania 260 GHz.

Do badania próbek biologicznych, które często są wysokoabsorbujące w zakresie terahercowym, konieczne jest wykorzystanie układu odbiciowego. Dodatkowo, aby wykorzystać ograni-

czone zasoby promieniowania dostarczane przez źródła terahercowe, niezbędne jest optymalne ukształtowanie rozkładu promieniowania na próbce. Wskazuje to na potencjał do wykorzystania układu skanującego oraz struktur dyfrakcyjnych. Dlatego teza niniejszej pracy brzmi następująco: **Możliwe jest zbudowanie układu skanującego dla zakresu promieniowania terahercowego w konfiguracji odbiciowej z użyciem struktur dyfrakcyjnych.**

Głównym celem prac badawczych jest opracowanie demonstratora układu wykorzystującego struktury dyfrakcyjne. Rozprawa realizuje dwa cele poboczne, które pozwolą na zweryfikowanie jej tezy. Cele poboczne odpowiadają przebadaniu dwóch możliwych konfiguracji układu skanującego. Pierwsze podejście badało zastosowanie unikatowej metody tworzenia struktur dyfrakcyjnych do uzyskania jednorodnego rozkładu natężenia na kwadratowej powierzchni. Drugie podejście sprawdzało zestaw struktur zbierających promieniowanie ze źródła i przekierowujących je w plamkę leżącą poza główną osią optyczną elementu, a następnie odbierające sygnał odbity przez próbkę w celu skupienia promieniowania na detektorze. Po przebadaniu struktur wybrano podejście dające najlepsze efekty w celu zbudowania demonstratora. Zbudowany demonstrator wykorzystany został do zarejestrowania promieniowania odbitego od kilku próbek, w tym próbki fantomu skóry. Zakres niniejszej pracy obejmuje projektowanie oraz wytwarzanie wspomnianych wcześniej struktur, a także ich eksperymentalną ewaluację.

Wyniki badań zaprezentowanych w poniższej pracy zostały opublikowane w następujących artykułach naukowych:

- **Surma, M. J.**, Kałuża, M., Komorowski, P., i Siemion, A., „Segmentation of THz holograms for homogenous illumination”, *Scientific Reports* 14, (2024),
- **Surma, M. J.**, Kałuża, M., Czerwińska, P., Komorowski, P., i Siemion, A., „Neural-network based approach to optimize THz computer generated holograms”, *Photonics Letters of Poland*, 13(4), (2021),
- Siemion, A., Komorowski, P., **Surma, M. J.**, Ducin, I., Sobotka, P., Walczakowski, M., i Czerwińska, E., „Terahertz diffractive structures for compact in-reflection inspection setup”, *Optics Express* 28, (2020).

Praca została podzielona na siedem rozdziałów. Pierwszy rozdział pt. „Wstęp i motywacja” określa obszar wiedzy, w którym umiejscowiona jest poniższa praca. W drugim rozdziale zatytułowanym „Cel, zakres oraz teza rozprawy” określony jest ciąg wniosków związanych z przedstawionym wcześniej kontekstem, które ograniczają zakres pracy. Ciąg ten zakończony jest tezą oraz

zdefiniowaniem, jakie cele zostały przedstawione w pracy. Następny rozdział „Wprowadzenie teoretyczne” obejmuje wymagane podstawy teoretyczne związane z poruszaną tematyką. Opisane zostały struktury dyfrakcyjne, sposoby ich projektowania oraz dobór materiałów w zakresie terahercowym. Następnie wprowadzono podstawową metodę wyznaczania właściwości optycznych materiałów w zakresie terahercowym, jaką jest terahercowa spektroskopia w dziedzinie czasu. Pod koniec rozdziału skupiono się na specyfice badania próbek nowotworowych promieniowaniem terahercowym oraz powiązanej tematyce fantomów tkanek biologicznych. Rozdział czwarty o nazwie „Metodyka” skupia się na sposobie projektowania oraz wytworzenia struktur dyfrakcyjnych. Zaczyna się on ogólnym opisem metod projektowania, by później przejść do szczegółowego wyjaśnienia podejść zastosowanych przy projektowaniu konkretnych struktur. Część związana z wykonaniem struktur opisuje wybraną metodę druku 3D, dobór materiałów na struktury, sposób przejścia od projektu struktury do modelu pozwalającego na jej wytworzenie oraz rozważania odnośnie właściwości optycznych wybranych materiałów. Następujące po metodyce rozdziały skupiają się na badaniach opracowanych struktur oraz opracowanego demonstratora: rozdział piąty „Charakteryzacja struktur segmentowych” opisuje struktury do oświetlenia jednorodnego, rozdział szósty „Charakteryzacja pozaosiowych struktur punktowych” opisuje struktury punktowe pozaosiowe i rozdział siódmy „Demonstrator” opisuje wyniki otrzymane z wykorzystaniem zbudowanego demonstratora. Rozprawa jest zakończona rozdziałem ósmym „Wnioski i podsumowanie”, podsumowującym otrzymane wyniki, przedstawiającym wnioski wyciągnięte z przeprowadzonych badań oraz zakreślającym horyzonty na kolejne badania.

Rozdział 3

Wprowadzenie teoretyczne

Niniejsza praca koncentruje się na analizie potencjalnych zastosowań dyfrakcyjnych elementów optycznych w układach odbiciowych dla zakresu promieniowania terahercowego. Wprowadzenie rozpoczyna się od przedstawienia ogólnej definicji dyfrakcyjnych struktur optycznych. Następnie omówiono metody projektowania tych struktur oraz charakterystykę materiałów stosowanych w ich wytwarzaniu z uwzględnieniem specyfiki widma terahercowego. Kolejna część poświęcona jest opisowi terahercowej spektroskopii w dziedzinie czasu (THz-TDS) jako powszechnie stosowanego narzędzia do wyznaczania właściwości optycznych materiałów w zakresie terahercowym. Na zakończenie przedstawiono aktualne podejścia badawcze dotyczące analiz tkanek nowotworowych oraz metod wytwarzania fantomów skóry, służących do symulacji tych tkanek. Wykorzystanie fantomu skóry, jako modelowego przykładu, umożliwia ocenę charakterystyk opracowywanego układu optycznego oraz weryfikację jego funkcjonalności.

3.1 Dyfrakcyjne elementy optyczne

Poniższa praca skupia się na zastosowaniu dyfrakcyjnych elementów optycznych (ang. *diffractive optical elements*, DOE) w konkretnym układzie optycznym, mającym służyć jako demonstrator skanera ludzkiej skóry, umożliwiający w przyszłości wykrywanie zmian nowotworowych. Pojęcie DOE obejmuje szeroki zakres elementów optycznych, wykorzystujących jako podstawę swojego działania dyfrakcję (czyli ugięcie fali na krawędzi). W interpretacji falowej promieniowanie jest opisywane przez dwa ogólne parametry: amplitudę i fazę. Modele najczęściej wykorzystywane do zarówno projektowania, jak i symulacji działania DOE bazują na optyce skalarnej, a więc na

podejściu nieuwzględniającym polaryzacji fali. Elementy dyfrakcyjne wstawione na drodze propagującej się fali, wprowadzają odpowiednie przesunięcia fazy padającego frontu falowego w celu zmodyfikowania jego rozkładu na pożądany. Wpływ DOE definiowany jest przez ich zespoloną transmitancję, opisującą wpływ struktury na amplitudę i fazę frontu falowego.

DOE można podzielić na dwa rodzaje ze względu na wpływ transmitancji na parametry fali – tzw. kodowanie struktury. W przypadku struktury w kodowaniu amplitudowym, modulowana jest amplituda struktury. Oznacza to, że powierzchnia struktury składa się z obszarów o różnej przezroczystości dla promieniowania. W przypadku DOE kodowanych fazowo, transmitancja struktury nie wpływa na amplitudę fali, ale moduluje jej fazę. Uzyskuje się je przez dostosowywanie grubości materiału transparentnego o znanym współczynniku załamania. Ponieważ struktury w kodowaniu fazowym muszą wprowadzać w padającym froncie falowym odpowiednie opóźnienia fazy wielkości do pełnego cyklu fazy, to ich grubość wzdłuż kierunku propagacji (często nazywana wysokością struktury) jest rzędu wielkości długości fali. Grubość struktury w danym punkcie można wyznaczyć za pomocą wzoru [56]:

$$h(x, y) = \frac{\lambda \cdot \phi(x, y)}{2\pi \cdot (n_2 - n_1)}, \quad (3.1)$$

gdzie λ to długość fali, $\phi(x, y)$ to mapa opóźnień fazowych struktury, n_2 to współczynnik załamania materiału, z którego wykonana jest struktura, który jest określony dla wybranej długości fali, a n_1 to współczynnik załamania otoczenia (dla powietrza $n_1 = 1$). Wyjątkiem od tej reguły są struktury w rodzaju kinoformów wyższego rzędu, które intencjonalnie wprowadzają przesunięcie fazowe rzędu wielokrotności długości fali. Kodowanie binarne ma prostszą postać z perspektywy wykonania struktury, ponieważ metoda wykonania musi pozwolić na rozróżnienie między tylko dwoma stanami – wprowadzającymi dwa różne przesunięcia fazowe 0 oraz π . Negatywną stroną tego podejścia jest jednak ograniczona wydajność dyfrakcyjna. Dlatego w zastosowaniach dla promieniowania terahercowego, gdzie wytwarzanie elementów optycznych jest relatywnie proste oraz niskokosztowe, preferowane jest stosowanie kodowania fazowego ciągłego (w postaci kinoformu) i takie jest stosowane w poniższej pracy. Tabela 3.1 przedstawia podsumowanie wydajności dyfrakcyjnych dla różnych rodzajów kodowań.

Elementy dyfrakcyjne dają możliwość bardzo dużej kontroli nad kształtowaniem rozkładu promieniowania. Wynika to głównie z braku ograniczenia, jaki występuje dla elementów refrakcyjnych, które posiadają ciągłą powierzchnię określającą ich kształt. W przypadku elementów

Tabela 3.1: Rodzaje kodowania struktur dyfrakcyjnych wraz z ich maksymalnymi wydajnościami. Źródło: [46]

Sposób kodowania fazowego	Wydajność dyfrakcyjna w pierwszym rzędzie	Wydajność dyfrakcyjna w m-tym rzędzie
Kinoform (pierwszego rzędu)	100%	$\text{sinc}^2(1 - m)$
Kinoform (p-tego rzędu)	100%	$\text{sinc}^2(p - m)$
Fazowe n-poziomowe	do 100%	$\text{sinc}^2(\frac{m}{N})$
Fazowe 16-poziomowe	99%	$\text{sinc}^2(\frac{m}{16})$
Fazowe 8-poziomowe	95%	$\text{sinc}^2(\frac{m}{8})$
Fazowe 4-poziomowe	81%	$\text{sinc}^2(\frac{m}{4})$
Fazowe binarne (2-poziomowe ze współczynnikiem wypełnienia a)	do 40.4%	$\frac{4}{(\pi m)^2} \text{sinc}^2(\frac{\phi}{2}) \text{sinc}^2(\pi m a)$
Fazowe sinusoidalne	do 33.8%	$J_1^2(\frac{\phi}{2})$
Amplitudowe binarne (ze współczynnikiem wypełnienia a)	do 10.1%	$\frac{\sin^2(\frac{\pi a m}{2})}{(\pi m)^2}$
Amplitudowe sinusoidalne	do 6.3%	$(\frac{\Delta h}{2})^2$

dyfrakcyjnych, dowolność wprowadzania odpowiedniej modulacji fazy w płaszczyźnie struktury pozwala między innymi kompensować wejściowy rozkład promieniowania. Przez to, że na ogół są elementami działającymi w transmisji, w przeciwieństwie do elementów odbiciowych, są dużo łatwiejsze w justowaniu wewnątrz układu. Kolejnym pozytywnym aspektem DOE jest poruszany wyżej rozmiar. DOE są elementami cienkimi i lekkimi w porównaniu z ich refrakcyjnymi odpowiednikami, a jednocześnie umożliwiają tworzenie elementów optycznych o małych aperturach numerycznych.

Struktury dyfrakcyjne nie są jednak elementami nieposiadającymi żadnych ograniczeń. Przez powiązanie grubości struktur z długością fali, są one na ogół elementami wąskopasmowymi. Wyjątkiem oczywiście są kinoformy wyższego rzędu [55]. Problemem jest również efekt cienia (ang. *shadow effect*), występujący, gdy detale oświetlonej pod kątem struktury zastaniają się nawzajem [57]. Istnieje również ograniczenie związane z dużymi efektami dyfrakcyjnymi na krawędziach struktur o małych rozmiarach apertury, dotykające praktycznie wszystkich terahercowych elementów optycznych, wynikające z dużej długości fali, małych rozmiarów apertur oraz bliskich odległości propagacji [46]. Prowadzi to do konieczności zastosowania większych apertur niż standardowo dostępne. Dzięki niskiej grubości struktur dyfrakcyjnych wpływa to korzystnie na

ich potencjalne zastosowanie w porównaniu z innymi rodzajami elementów optycznych, takimi jak elementy refrakcyjne i odbiciowe.

3.1.1 Techniki projektowania struktur dyfrakcyjnych

Istnieje wiele metod pozwalających na obliczenie rozkładu transmitancji struktury dyfrakcyjnej. Można wydzielić dwie generalne kategorie metod projektowania DOE [58]: analityczne oraz numeryczne. Metody analityczne definiują transformacje współrzędnych między wejściowym i wyjściowym rozkładem natężenia. Następnie obliczona transformacja jest przeliczana na odpowiadającą modulację fazy [58]. Termin metody numeryczne zawiera w sobie szeroki zakres podejść, zajmujących się modyfikacją modulacji fazy w iteracyjnych krokach, z każdym krokiem zmieniając modulację fazy struktury w celu uzyskania z niej rekonstrukcji natężenia obrazu spełniającego założenia.

Metody iteracyjne pozwalają na uzyskanie transmitancji DOE bez wiedzy o analitycznej postaci funkcji formującej pożądany rozkład natężenia w wybranej odległości. Po publikacji jednego z pierwszych tego typu algorytmów, algorytmu Gerchberga-Saxtona [59], powstała szeroka gama różnych rozwiązań. Ponieważ wszystkie sprowadzają się do problemu optymalizacyjnego, wykorzystano również między innymi algorytmy symulowanego wyżarzania (ang. *simulated annealing*) [60] oraz algorytmy genetyczne (ang. *genetic algorithms*) [61]. W niniejszej pracy stosowane są algorytmy iteracyjne bazujące na propagacji pomiędzy płaszczyznami. Zostały one szczegółowo opisane w rozdziale 4.2.

3.1.2 Materiały oraz wykonywanie DOE dla promieniowania terahercowego

Ze względu na swoje właściwości optyczne w zakresie promieniowania terahercowego, do produkcji elementów dyfrakcyjnych dostępne są materiały nie tylko powszechnie stosowane dla krótszych długości fali, ale również dostępny jest szereg materiałów wyjątkowych dla tego zakresu. W zastosowaniach terahercowych można spotkać materiały o współczynniku załamania około 2 lub większym, takie jak german, krzem, arsenek galu, szafir, kwarc, topiona krzemionka czy bardzo często stosowany krzem [46]. Szeroka gama polimerów charakteryzuje się wartością współczynnika załamania około 1,5, jednocześnie posiadając relatywnie niskie wartości

współczynnika absorpcji [1]. Można tu wymienić polietyleny (polietylen o wysokiej gęstości – ang. *high-density polyethylene* HDPE oraz niskiej gęstości – ang. *low-density polyethylene* LDPE), teflon (ang. *Polytetrafluoroethylene*, PTFE), polipropylen (ang. *polypropylene*, PP), polimetylopenten (ang. *polymethylpentene*, popularnie nazywany TPX) lub Tsurupica. Istnieje również duża liczba materiałów wykorzystywana w druku 3D, które posiadają relatywnie niską dyspersję przy współczynniku załamania poniżej 2 [62]. Niestety, rosnący wraz z częstotliwością współczynnik absorpcji oznacza ograniczenie możliwości ich wykorzystania do zakresu bliskich 1 THz. Niemniej materiały te są wykorzystywane z powodzeniem przy tworzeniu elementów optycznych, na przykład poliamid 12 (ang. *polyamide 12*, PA12) [63] lub kopolimer cykloolefinowy (ang. *cyclic olefin copolymer*, COC lub TOPAS) [64–69]. Można również wymienić materiały egzotyczne, takie jak papier [70], parafina [47], kamień [71], karmelizowana sacharoza [72] czy czekolada [73]. Podstawą do określenia parametrów materiałów do wytworzenia struktur, czyli określenia ich właściwości optycznych w przypadku materiałów drukowanych dla promieniowania terahercowego, były badania terahercową spektroskopią w dziedzinie czasu. W dalszych rozdziałach przedstawiony jest zbiór danych zarejestrowanych dla różnych materiałów [74].

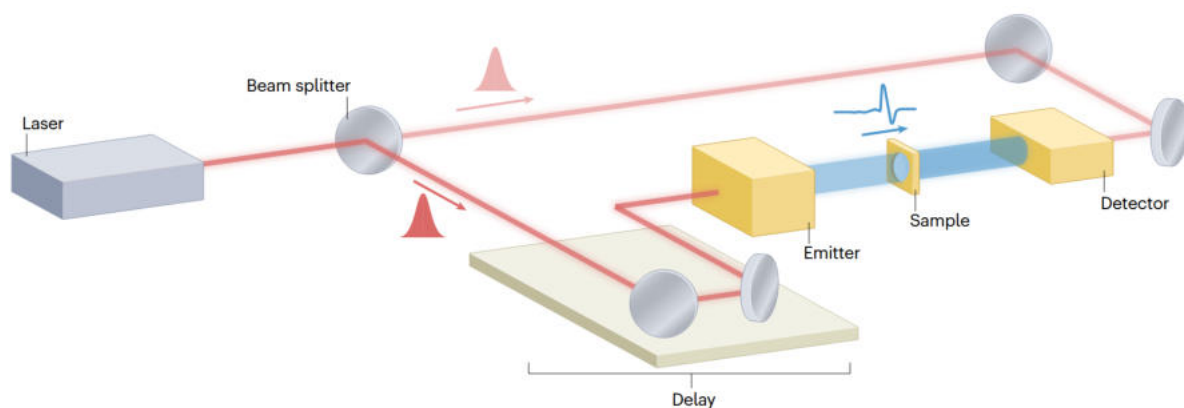
Biorąc pod uwagę zakres sub-terahercowy, istnieje wiele metod pozwalających na wykonanie struktur dyfrakcyjnych. Z powodu długości fali rzędu milimetra, możliwe jest zastosowanie metod niedostępnych dla promieniowania widzialnego czy podczerwonego. Dla krótszych długości fali wykonanie detali struktur jest niemożliwe z powodu braku wystarczającej precyzji. Dodatkowo w przypadku struktur dyfrakcyjnych w zakresie sub-terahercowym zwykle mamy do czynienia z aperturami wielkości kilku lub kilkunastu centymetrów. Możliwe jest zastosowanie droższych rozwiązań, takich jak ablacja laserowa [75] czy wytrawianie w krzemie [76]. Istnieją jednak tańsze metody, jak frezowanie [77], wycinanie laserowe [78] i oczywiście druk 3D w kilku technologiach [62, 63, 79]. To ostatnie podejście ma przewagę nad pozostałymi z powodu szerokiej dostępności i niskiej ceny, zarówno drukarek, jak i wykorzystywanych materiałów. Wpływa to pozytywnie na możliwość szybkiego prototypowania rozwiązań.

Poniższa praca wykorzystuje druk 3D do wytwarzania struktur dyfrakcyjnych. Szczegóły dotyczące wyboru materiałów oraz procesów drukowania i modelowania zostały przedstawione w podrozdziale 4.3.

3.2 Terahercowa spektroskopia w dziedzinie czasu

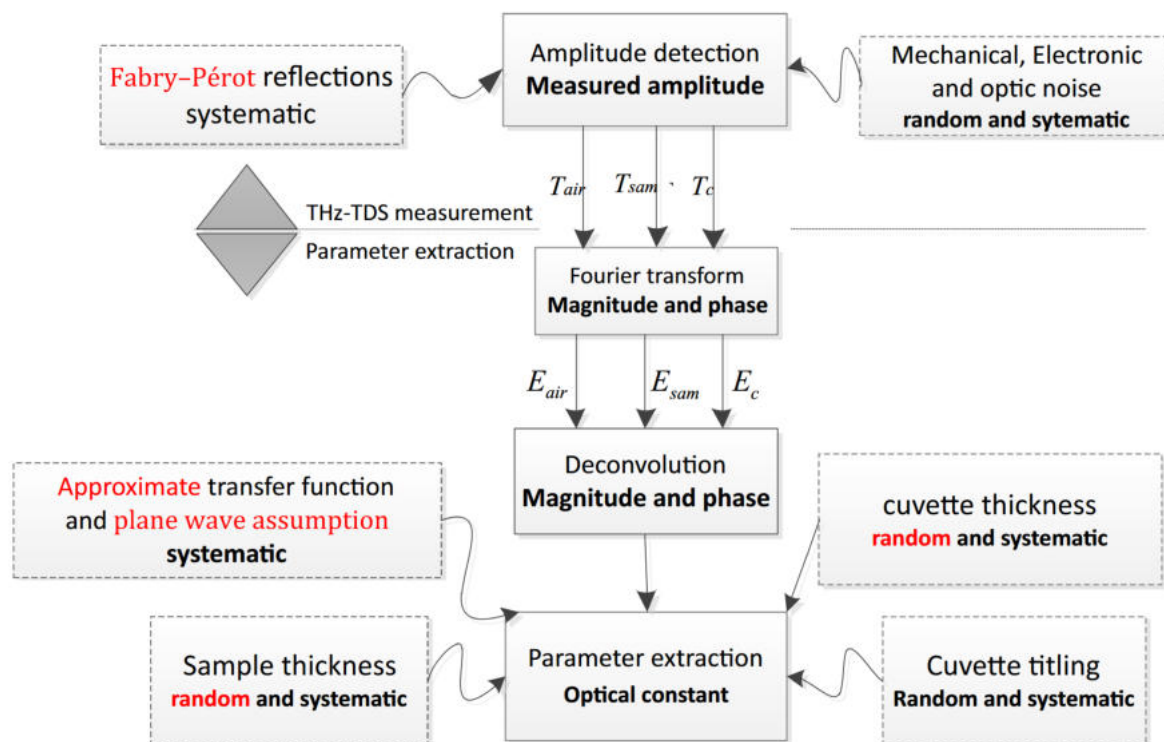
Jednym z najbardziej popularnych pomiarów w dziedzinie technologii terahercowych jest terahercowa spektroskopia w dziedzinie czasu (ang. *terahertz time-domain spectroscopy*, THz-TDS). Umożliwia ona badanie właściwości optycznych materiałów dzięki możliwości wyznaczenia zespolonej przenikalności elektrycznej danego materiału. Powszechnie stosowane układy do THz-TDS składają się z femtosekundowego pulsacyjnego źródła laserowego, terahercowego emitera, terahercowego detektora oraz linii opóźniającej [44, 80]. Wizualizacja przykładowego układu THz-TDS jest zaprezentowana na rys. 3.1. Przeważnie jako źródło laserowe stosuje się laser tytanowo-szafirowy z synchronizacją modów lub – popularniejsze we współczesnych układach, a w szczególności układach komercyjnych – lasery światłowodowe domieszkowane pierwiastkami ziem rzadkich [44]. Wiązka z lasera jest rozdzielana z wykorzystaniem zwierciadła światłodzielącego, aby uzyskać dwie wiązki, mogące jednocześnie oświetlić terahercowe źródło oraz detektor. Najczęściej stosowane źródła oraz detektory wykorzystują anteny fotoprzewodzące lub kryształy elektrooptyczne [80]. Zasady generacji oraz detekcji w obu przypadkach zostały w skrócie przedstawione w pracy [44] oraz szerzej opisane w pracy [80]. Krótki impuls optyczny z lasera femtosekundowego próbkuje promieniowanie terahercowe padające na detektor terahercowy, a linia opóźniająca pozwala na przesunięcie czasu dotarcia impulsu optycznego względem impulsu terahercowego, umożliwiając stopniowe zmierzenie całego impulsu terahercowego. Zwykle linia opóźniająca składa się z pary zwierciadeł umieszczonych na ruchomej platformie. Przesuwając położenie zwierciadeł, możliwa jest zmiana drogi optycznej w jednej z wiązek optycznych układu. Istnieją również metody pomiaru niewymagające zwierciadeł, ale oparte na wykorzystaniu dwóch laserów o nieco różniącej się częstotliwości powtarzania impulsów [81, 82] lub przez zmianę częstotliwości powtarzania impulsów pojedynczego lasera [83]. THz-TDS umożliwia zwykle pomiary w zakresie od 0,1 THz do ok 3 THz [44, 80]. Ponieważ THz-TDS rejestruje sygnał proporcjonalny do pola elektrycznego, pozwala to na zarejestrowanie amplitudy i fazy promieniowania, wyznaczenia zespolonej przenikalności elektrycznej, a co za tym idzie – wyliczenie współczynnika załamania i współczynnika absorpcji materiału, przez który przechodzi impuls terahercowy [80].

Mimo iż układ THz-TDS może być przedstawiony w uproszczony sposób za pomocą kilku elementów, cały proces dokonywania pomiaru jest dość złożony. Jest to dobrze widoczne w analizie błędów i niepewności pomiarowych THz TDS. Cały proces pomiaru stałych optycznych



Rysunek 3.1: Schematyczna wizualizacja przykładowego układu terahercowej spektroskopii w dziedzinie czasu. Źródło: [44]. Beam-splitter - pl. *zwierciadło światłdzielące*; Delay - pełna nazwa „Delay line” po polsku *linia opóźniająca*; Emitter - pl. *emiter* lub *źródło*; Sample - pl. *próbka*; Detector - pl. *detektor*.

można podzielić na kroki: zmierzenie amplitudy zespolonej, transformata Fouriera amplitudy, splot i wyznaczenie stałych optycznych. Aż do momentu, w którym wykonywany jest splot, mamy do czynienia jednocześnie z dwoma sygnałami: referencyjnym i próbki. Zidentyfikowano wiele źródeł błędów losowych i systematycznych związanych z każdym z kroków [84]. Dla samego procesu rejestracji zespolonej amplitudy terahercowej można wymienić błędy losowe, takie jak fluktuacje natężenia lasera, szum optyczny i elektroniczny lub tzw. jitter linii opóźniającej, i błędy systematyczne, np. szum przy odczycie z linii opóźniającej czy dryft mechaniczny linii opóźniającej. Przykład źródeł błędów pomiarowych w procesie wyliczania stałych optycznych został zaprezentowany na rys. 3.2. Istotne źródła błędów związane są również z mierzoną próbką. W przypadku próbek stałych zakłada się, że są one wykonane z jednorodnego materiału z równoległymi płaskimi powierzchniami [84]. Pomiarów próbek płynnych wymagają uwzględnienia wpływu kuwetki utrzymującej badany płyn [85]. Rozbieżności wywołane błędami wpływają na niepewność uzyskanych wartości stałych optycznych. Stwierdzono, że dominującym czynnikiem wpływającym na tę niepewność pomiarową jest wariancja amplitudy [86]. THz-TDS znajduje szerokie zastosowania głównie związane z pomiarami stałych optycznych materiałów. Może być stosowana nie tylko dla próbek transparentnych, ale również w konfiguracji odbiciowej, w tym do badania próbek warstwowych [87]. W połączeniu z możliwością przesunięcia próbki względem układu, możliwe jest obrazowanie w głąb próbki [88]. Bardziej zaawansowane układy umożliwiają wykorzystanie THz-TDS w układzie tomograficznym [89] lub w układzie pompa-sonda [90,91]. THz-TDS jednocześnie jest wykorzystywana do badania gazów, cieczy, ciekłych kryształów oraz wielu ciał stałych takich jak półprzewodniki, nadprzewodniki czy kryształy molekularne [44].



Rysunek 3.2: Schemat źródeł błędów pomiarowych w pomiarach cieczy za pomocą THz-TDS zaproponowany przez Yang i in. [85]. Random – pełna nazwa „random error” pl. *błąd losowy*; systematic – pełna nazwa „systematic error” pl. *błąd systematyczny*; Magnitude and phase – pl. *amplituda i faza*; Fabry-Pérot reflections – odbicia od równoległych powierzchni płaskiej płytki (tutaj w znaczeniu odbić od powierzchni kuwety z ciekłą próbką przy kącie padania wiązki innym niż kąt prosty do powierzchni wejściowej); Amplitude detection (Measured amplitude) – pl. *Pomiar amplitudy zespolonej (Zmierzona amplituda zespolona)*; Mechanical, Electronic and optic noise – pl. *szum mechaniczny, elektroniczny i optyczny*; THz-TDS measurement – pl. *pomiar THz-TDS*; Parameter extraction – pl. *wyznaczenie parametrów*; Fourier transform – pl. *transformata Fouriera*; Approximate transfer function and plane wave assumption – pl. *przybliżona transmitancja i założenie oświetlenia falą płaską*; Deconvolution – pl. *proces odwrotny do splotu funkcji*; cuvette thickness – pl. *grubość ścianek kuwety próbki*; Sample thickness – pl. *grubość próbki*; Optical constant – pl. *stała optyczna*; Cuvette tilting – pl. *wychylenie kuwety względem wiązki*.

3.3 Badania nowotworów z wykorzystaniem promieniowania terahercowego

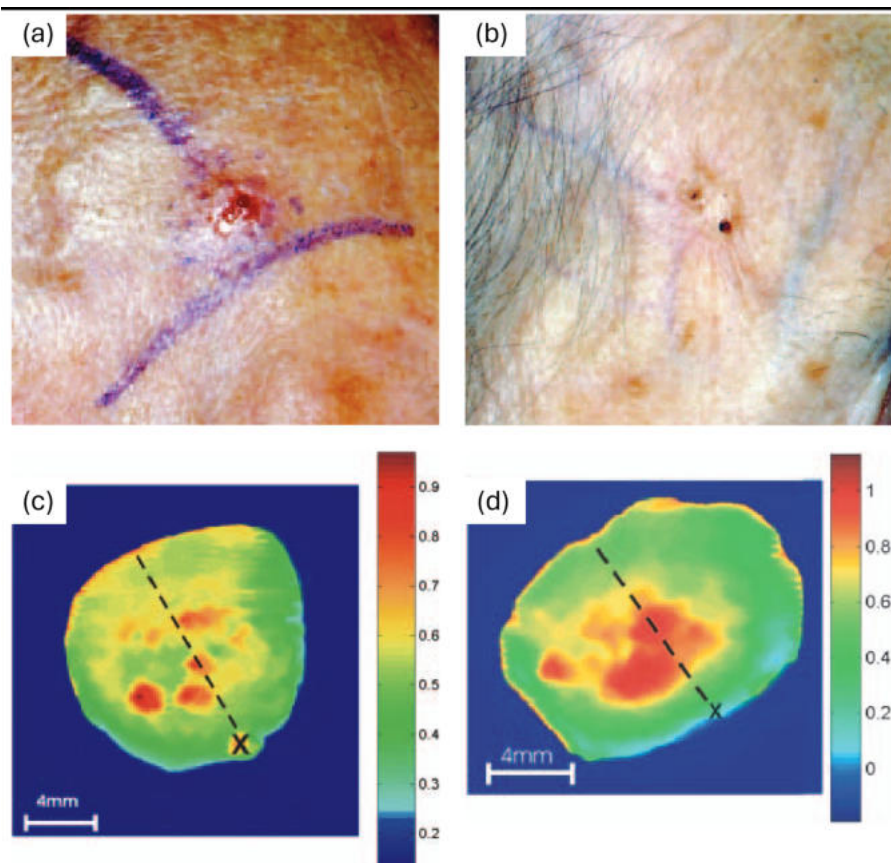
Jak wspomniano we wstępie, promieniowanie terahercowe może być wykorzystywane do badania tkanek wykazujących zmiany nowotworowe. Jednym z potencjalnych zastosowań promieniowania terahercowego jest identyfikacja nowotworu skóry [92]. Najbardziej wydajnym sposobem na usunięcie nowotworu jest chirurgiczne wycięcie tkanek ze zmianami (na przykład przez tzw. chirurgię mikrograficzną Mohsa) [1]. W pewnym sensie na popularność tego typu badań wpływa możliwość wyznaczenia *in vivo* granicy między tkanką nowotworową i zdrową [93], co może pozwolić na ograniczenie ilości wyciętej zdrowej tkanki.

W przypadku raka skóry najczęściej występującym wśród białej populacji [94] jest rak podstawnokomórkowy (ang. *basal cell carcinoma*, BCC). Przedstawione zostały prace obrazujące tkanki z BCC z wykorzystaniem promieniowania terahercowego [93, 95] (przykłady na rys. 3.3). Należy zwrócić uwagę, że do takich próbek stosowane są układy odbiciowe i zwykle wykorzystują układ THz-TDS [96].

W badaniach porównujących próbki zdrowej tkanki z tkanką BCC na zakresie od 0,1 THz do 2 THz widać następujące generalne zależności [13, 97, 98]:

- oba rodzaje tkanek wykazują rosnącą wartość współczynnika absorpcji wraz ze wzrostem częstotliwości oraz malejące wartości współczynnika załamania wraz ze wzrostem częstotliwości,
- w całym analizowanym zakresie tkanki z BCC wykazują większe wartości dla obu stałych optycznych,
- dla częstotliwości 260 GHz tkanka zdrowa osiąga współczynnik załamania między 2,25, 2,4 oraz współczynnik absorpcji około 75 cm^{-1} ,
- dla częstotliwości 260 GHz i tkanki BCC współczynnik załamania jest wyższy o około 0,1, a współczynnik absorpcji jest wyższy o około 20 cm^{-1} .

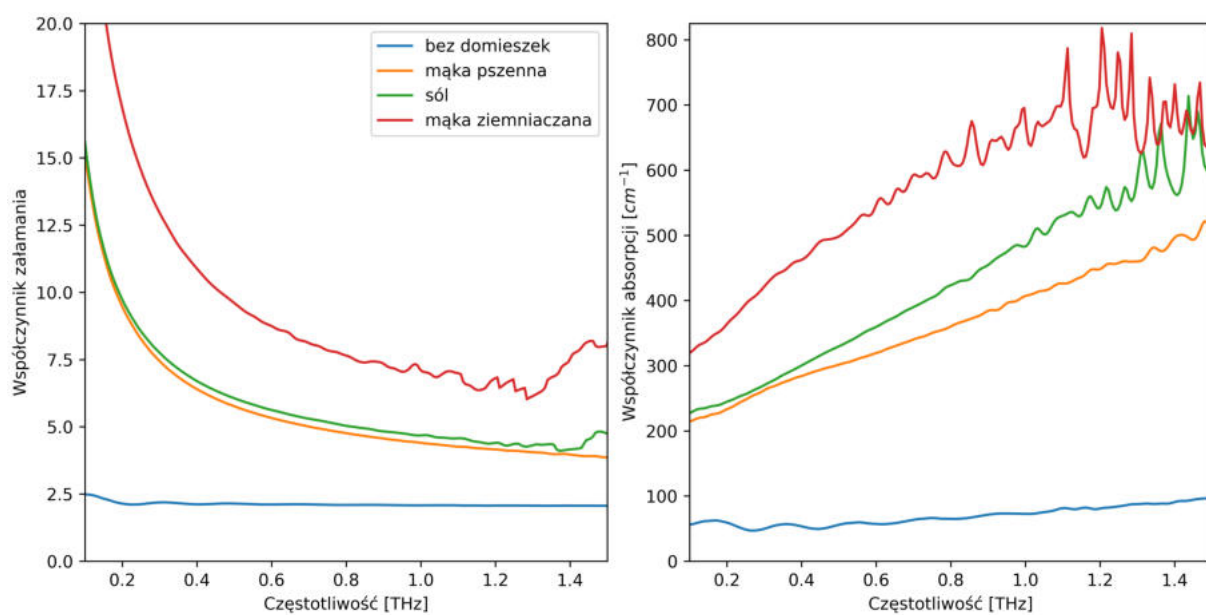
Wskazuje to na potencjał do wykorzystania prostszych terahercowych układów optycznych niż układy bazujące na spektroskopii w dziedzinie czasu.



Rysunek 3.3: Dwa przykładowe zdjęcia BCC przed operacją wycięcia (a i b) oraz odpowiadające im obrazy terahercowe wykonane po operacji (odpowiednio c i d). Źródło: [93].

3.3.1 Fantomy tkanek biologicznych

Wykorzystanie sztucznego modelu tkanki, nazywanego również fantomem, pozwala na przeprowadzanie badań bez wykorzystania faktycznych próbek biologicznych. Zmniejsza to ilość dodatkowej pracy, która jest niezbędna w badaniu na próbkach biologicznych, takich jak przystosowanie laboratorium oraz przeszkolenie personelu do pracy z materiałem biologicznym, czy konieczność zdobycia zgody komisji bioetycznej. Przeprowadzono badania nad różnymi podejściami do tworzenia fantomów tkanek zdrowych oraz nowotworowych. Corridon i in. [99] zaproponowali zastosowanie matryc do regeneracji skóry Integra. W artykule porównano wyniki spektroskopowe dwu- i jednowarstwowe matryce w wersji suchej i nawilżonej wodą destylowaną oraz roztworem soli fizjologicznej. Autorzy stwierdzili znaczną zgodność odpowiedzi spektralnej próbek z próbkami skóry. Kolejny artykuł [100] przedstawił podejście do tworzenia fantomów skóry i piersi z białka (soja), tłuszczu (olej roślinny) i wody w różnych proporcjach. Materiały po zhomogenizowaniu były umieszczone w próżniowych pojemnikach. Przedstawiono również model pozwalający na symulowanie wyników otrzymanych fantomów. Niestety, praca nie wskazuje bezpośredniego porównania z tkankami biologicznymi. Powstało również kilka prac wykorzystujących proszek zestalający TX-151 [101, 102]. Fantomy zostały wykonane z wykorzystaniem mieszaniny TX-151 z wodą i dodatkami, np. tłuszczami, pozwalając na symulowanie różnych tkanek. Powstały w ten sposób m. in. fantomy tkanek skóry i piersi. Próbkami fantomów wykazywały zgodność z próbkami biologicznymi w zakresie terahercowych stałych optycznych. Na podstawie wcześniejszych badań [103] oraz z powodów praktycznych w niniejszej pracy do produkcji fantomu wykorzystana została mieszanina wody oraz proszku TX-151 w proporcjach wagowych 5:1. Zastosowanie mniejszej ilości wody utrudnia uzyskanie jednorodnej mieszaniny stanowiącej badana próbkę. Właściwości optyczne mieszaniny TX-151 z wodą w we wspomnianych proporcjach zostały zbadane wraz z opcjonalnymi domieszkami (wyniki przedstawiono na rys. 3.4). Zarówno współczynnik załamania, jak i współczynnik absorpcji czystej mieszaniny jest bliski wymaganym wartościom dla próbek skóry. Zaprezentowane wyniki są częścią badań przeprowadzonych w ramach poszukiwań materiału na fantomy skóry ze zmianami nowotworowymi. Badania te przeprowadzono w ramach powiązanego z doktoratem projektu.



Rysunek 3.4: Wykresy współczynników załamania (po lewej) oraz współczynników absorpcji (po prawej) badanych materiałów na bazie proszku TX-151 oraz wody z domieszkami i bez.

Rozdział 4

Metodyka

4.1 Oświetlenie próbki w układzie odbiciowym za pomocą struktur dyfrakcyjnych

W opisywanych w rozprawie badaniach wykorzystano dwa różne podejścia do budowy odbiciowych dyfrakcyjnych układów skanujących. Obie metody z założenia mają wykorzystywać pojedyncze źródło promieniowania i pojedynczy detektor, zmniejszając koszt wykonania takiego układu oraz jego całkowity rozmiar. Pierwsza metoda wykorzystuje skanowanie punkt po punkcie. Pozwala na uzyskanie wyższej rozdzielczości pomiaru kosztem czasu pomiaru. Drugie podejście zakłada możliwość jednorodnego oświetlenia większej powierzchni i odpowiednie zobrazowanie w płaszczyźnie detektora, pozwalając na przyspieszenie pomiarów. Ze względu na dużą koherencję źródeł terahercowych, metoda ta wykorzystuje podział powierzchni struktur na segmenty, każdy mogący spełniać różne funkcje, w celu zminimalizowania niepożądanych interferencji w oświetlanej płaszczyźnie próbki.

4.2 Projektowanie struktur dyfrakcyjnych

Algorytmy wykorzystane przy projektowaniu struktur bazują na wcześniejszych algorytmach iteracyjnych. Jednym z najpopularniejszych algorytmów z tej rodziny jest algorytm IFTA (ang. *Iterative Fourier Transform Algorithm*) szczególny przypadek algorytmu Gerchberga i Saxtona [104]. Gerchberg i Saxton przedstawili swój algorytm jako narzędzie do odtwarzania rozkładu fazy obiektu z mikroskopii elektronowej (proces analityczny), podczas gdy Fienup [105] zaprezentował

wersję tego algorytmu do tworzenia hologramów komputerowych (proces syntetyczny). W każdej iteracji algorytm IFTA stosuje transformatę Fouriera do przejść między dwoma płaszczyznami oraz zastępuje obecny rozkład amplitudy w każdej z nich obrazem pożądanym. Wyznaczone płaszczyzny to płaszczyzna struktury dyfrakcyjnej (można ją również nazwać płaszczyzną struktury lub hologramu) oraz płaszczyzna obrazowa. W płaszczyźnie struktury dyfrakcyjnej algorytm wprowadza jednolitą amplitudę, a w płaszczyźnie obrazowej amplitudę pożądanego obrazu – to powoduje przesunięcie informacji o obrazie z rozkładu amplitudy do rozkładu fazy. W kroku wstępnym rozkład fazy w płaszczyźnie struktury dyfrakcyjnej jest losowy. Cały algorytm bazuje na modyfikacji rozkładu fazy przez transformatę Fouriera, a zastosowanie stałego rozkładu fazy może w niektórych przypadkach prowadzić do braku zmiany rozkładu fazy po wykonaniu operacji transformaty Fouriera [104]. Jednocześnie wstępny losowy rozkład fazy pozwala na zapisanie informacji o obrazie na całej powierzchni obliczeniowej. W wyniku algorytmu IFTA otrzymujemy hologram Fouriera. Algorytm ping-pong [106] można interpretować jako modyfikację algorytmu IFTA (pojęcie „algorytm ping-pong” wykorzystali oni do nazwania dowolnego algorytmu iteracyjnego stosującego obliczenia do przejść pomiędzy płaszczyznami; w niniejszej pracy termin „algorytm ping-pong” będzie stosowany konkretnie do takiego podejścia). Zamiast transformaty Fouriera wykorzystuje on propagację Fresnela. W wymienionym artykule autorzy wykorzystują dwie płaszczyzny obrazowe, oddalone od siebie o pewną odległość wzdłuż osi optycznej, i prowadzą iteracje między nimi. Po zakończeniu iteracji wynikowy rozkład fazy był traktowany jako hologram.

W poniższej pracy wykorzystano kombinację obu podejść. Algorytm przechodzi między dwiema płaszczyznami: płaszczyzną struktury dyfrakcyjnej i płaszczyzną obrazową. Do przejścia wykorzystywana jest propagacja Fresnela, opisana za pomocą zmodyfikowanej metody splotowej [107] (zaimplementowana w oprogramowaniu Light Sword 6.0 oraz we własnych skryptach). Propagacja Fresnela, opisana metodą splotową, wykorzystuje macierz z wejściowym rozkładem amplitudy zespolonej, która jest splatana z drugą macierzą – tak zwanym kernelem, odpowiadającym za propagację rozkładu na określoną odległość. W praktyce jest to realizowane z wykorzystaniem twierdzenia o splocie, a więc mnożone są transformaty Fouriera obu macierzy, a następnie zastosowana jest odwrócona transformata Fouriera w celu uzyskania wyjściowego rozkładu amplitudy zespolonej. Zmodyfikowana metoda splotowa wykorzystywana jest w niniejszej pracy również do odtwarzania rozkładów natężenia, ukształtowanych za pomocą wykonanych struktur w konkretnej płaszczyźnie obrazowej. W każdej z płaszczyzn dochodzi do modyfikacji

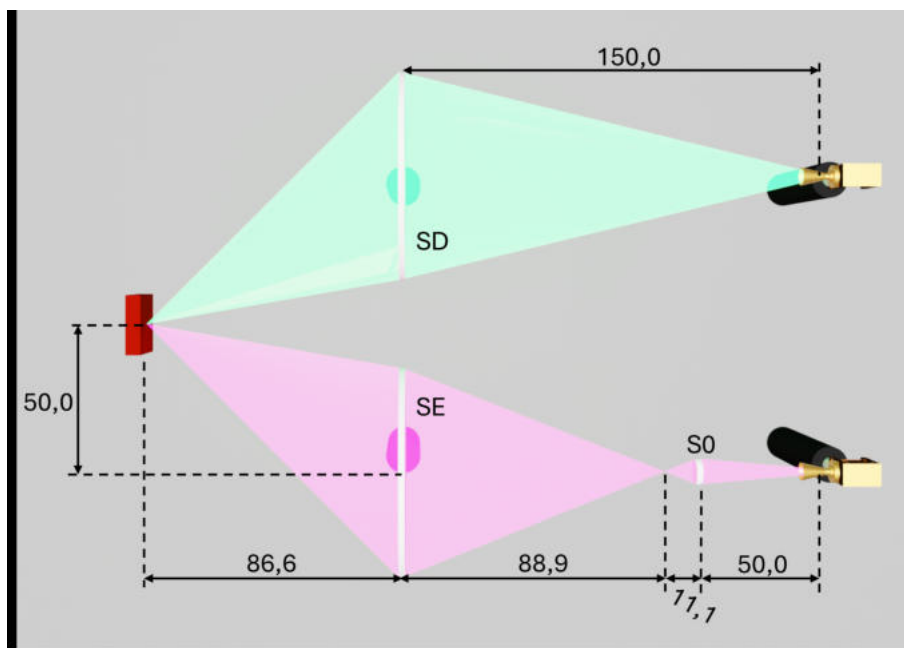
amplitudy zespolonej. W płaszczyźnie struktury amplituda fali jest zastępowana amplitudą fali płaskiej (ustalenie wartości amplitudy w całej macierzy na 1). Natomiast w płaszczyźnie obrazowej amplituda odpowiada amplitudzie oczekiwanego obrazu wyjściowego. Ponieważ tekst ten opisuje dwa typy struktur, punktowe struktury pozaosiowe oraz segmentowane struktury ujednorodniające, przedstawiany dotychczas proces jest dodatkowo dostosowywany do danego typu struktury. Po dokonaniu odpowiedniej liczby iteracji – 20 iteracji [108] – rozkład fazy fali w płaszczyźnie struktury jest transformowany do mapy opóźnień fazowych, a następnie wykorzystany do wytworzenia fizycznej kopii struktury (proces opisany w podrozdziale 4.3). Dalsza część tego podrozdziału przedstawia zastosowanie opisanej wyżej metody do zaprojektowania konkretnych struktur wraz z ewentualnymi modyfikacjami.

4.2.1 Struktury skupiające w punkt z optymalizacją pracy pozaosiowej: parametry projektowe

Opracowano zestaw trzech struktur: soczewki skupiającej w punkt (dalej oznaczana S0), strukturę emiterową (SE) oraz strukturę detektorową (SD). Są one ewolucją układu przedstawionego w jednym z poprzednich artykułów [63], który opisywał po raz pierwszy konfigurację układu odbiciowego stosowanego do skanowania fantomów skóry. Cały układ jest przeznaczony do przeprowadzenia wiązki promieniowania od źródła, przez odbicie od próbki, aż do detektora. Pierwsza soczewka skupiająca miała za zadanie zebranie promieniowania ze źródła o wąskim kącie rozbieżności wiązki w celu skupienia promieniowania blisko struktury i późniejszego uformowania wiązki rozbieżnej, zapewniającej oświetlenia całej struktury SE. Jednocześnie doprowadziło to do skrócenia całkowitej długości układu. Następnie struktura SE skupiała promieniowanie w punkcie daleko poza ośią optyczną na powierzchni odbijającej próbki. Promieniowanie po odbiciu od próbki było zbierane przez strukturę SD i skupiane na detektorze.

Następujące odległości zostały wykorzystane w projektowaniu struktur (przedstawione również na rys. 4.1):

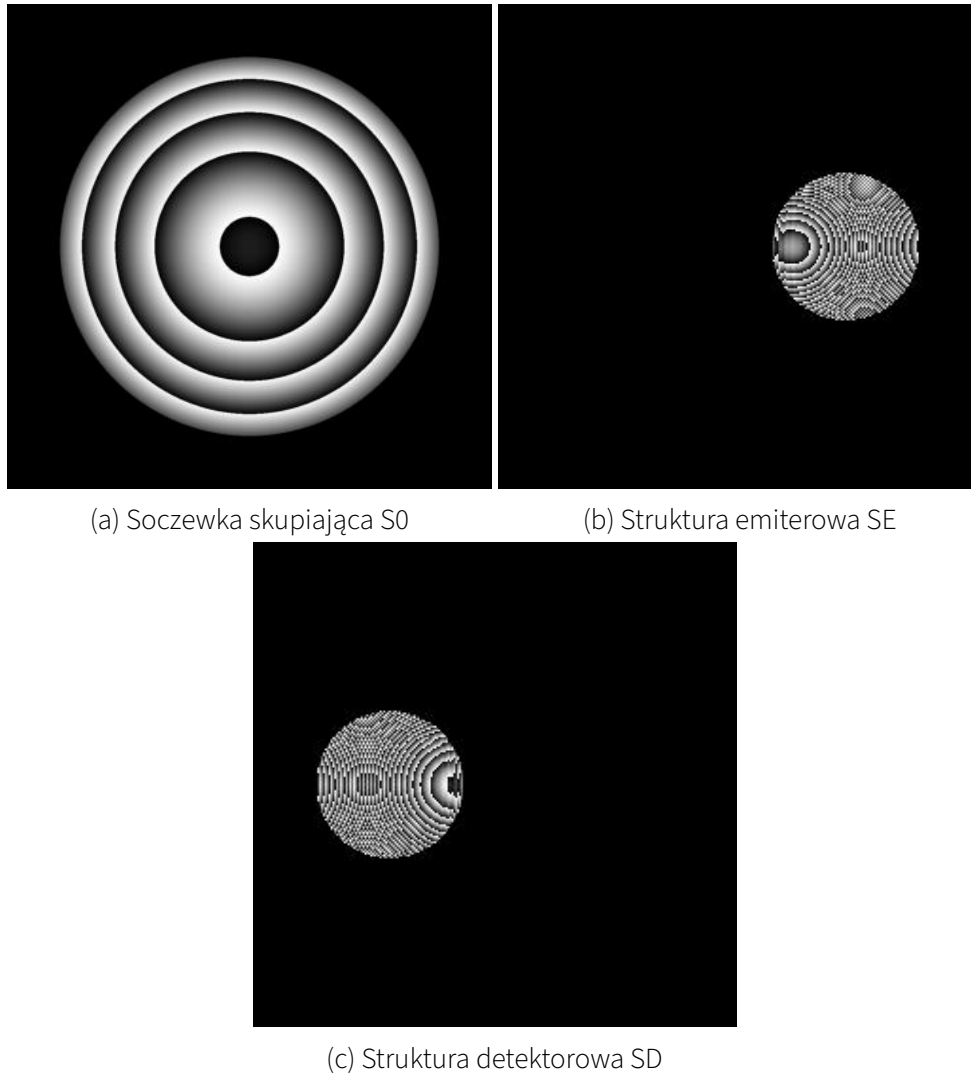
- źródło (punkt rozbieżności) – soczewka skupiająca S0: 50,0 mm;
- soczewka skupiająca S0 – ognisko soczewki S0: 11,1 mm;
- ognisko soczewki S0 – struktura SE: 88,9 mm;



Rysunek 4.1: Wizualizacja położenia struktur punktowych oraz ich ognisk zgodnie z projektem. Odległości podane w milimetrach.

- struktura SE – powierzchnia próbki oraz powierzchnia próbki – struktura SD: ognisko wysunięte 50,0 mm od osi prostopadłej do płaszczyzny struktury SE/SD, na płaszczyźnie równoległej i oddalonej o 86,6 mm od płaszczyzny struktury SE/SD (skupienie pozaosiowe pod kątem 30 stopni);
- struktura SD – detektor: 150,0 mm.

Jako projektową długość fali wybrano 1,15 mm, co odpowiada częstotliwości 260 GHz dostępnego źródła. Każda z tych trzech struktur była projektowana osobno z wykorzystaniem opisanego wcześniej zmodyfikowanego algorytmu ping-pong. W każdym przypadku rozkładem wejściowym był rozkład promieniowania w płaszczyźnie danej struktury, powstały w wyniku propagacji odpowiednio oddalonego źródła punktowego. Średnica soczewki S0 została ograniczona do 20 mm z powodu niskiego kąta rozbieżności wiązki. Zastosowano macierz o wielkości 1024 x 1024 pikseli oraz odległość próbkowania 0,25 mm, aby zapewnić wysoką rozdzielczość konieczną do poprawnego wykonania struktur dyfrakcyjnych. W przypadku struktur SE oraz SD średnica apertury została wyznaczona na 70 mm. Obie struktury zaprojektowano na macierzach 256 x 256 pikseli z odległością próbkowania 0,9 mm. Ze względu na fakt, że obie struktury wymagały skupienia pozaosiowego, zostały one umieszczone z boku macierzy, tak aby punkt skupienia/źródło punktowe spoza osi optycznej (stanowiące promieniowanie odbite od próbki) znajdowało się



Rysunek 4.2: Rozkłady fazy zaprojektowanych struktur.

w centrum macierzy. Dla każdej ze struktur wykonanych zostało 10 iteracji algorytmu. Chociaż, jak zostało pokazane we wspomnianym artykule [63], struktury zbiegały do rozwiązania znacznie szybciej. Punktem referencyjnym do stwierdzenia osiągnięcia zbieżności był limit dyfrakcyjny, wyznaczony wielkością plamki Airy'ego. Uzyskane rozkłady fazy reprezentujące opracowane struktury przedstawiono na Rys. 4.2.

4.2.2 Struktury segmentowane: opis segmentacji, kombinacji struktur oraz parametry projektowe

Przedstawiona metodologia została opublikowana w artykule [109]. Celem, jaki został wyznaczony przy projektowaniu poniższych struktur, było stworzenie struktur, które będą w stanie zwiększyć

Tabela 4.1: Podsumowanie parametrów projektowych struktur punktowych.

Strukt.	Częstotliwość / Długość fali	Promieniowanie wejściowe	Promieniowanie wyjściowe
S0	260 GHz / 1,15 mm	Źródło punktowe umieszczone 50,0 mm przed strukturą.	Ognisko w odległości ok. 11,1 mm za strukturą.
SE	260 GHz / 1,15 mm	Źródło punktowe umieszczone ok. 86,6 mm przed strukturą.	Ognisko położone ok. 50,0 mm poza oś optyczną w odległości ok. 88,9 mm za strukturą (powierzchnia próbki).
SD	260 GHz / 1,15 mm	Źródło punktowe umieszczone ok. 88,9 mm przed strukturą i wysunięte o 50,0 mm poza oś optyczną (płaszczyzna próbki).	Ognisko położone ok. 150,0 mm za strukturą (powierzchnia detektora).

Tabela 4.2: Podsumowanie parametrów symulacji struktur punktowych.

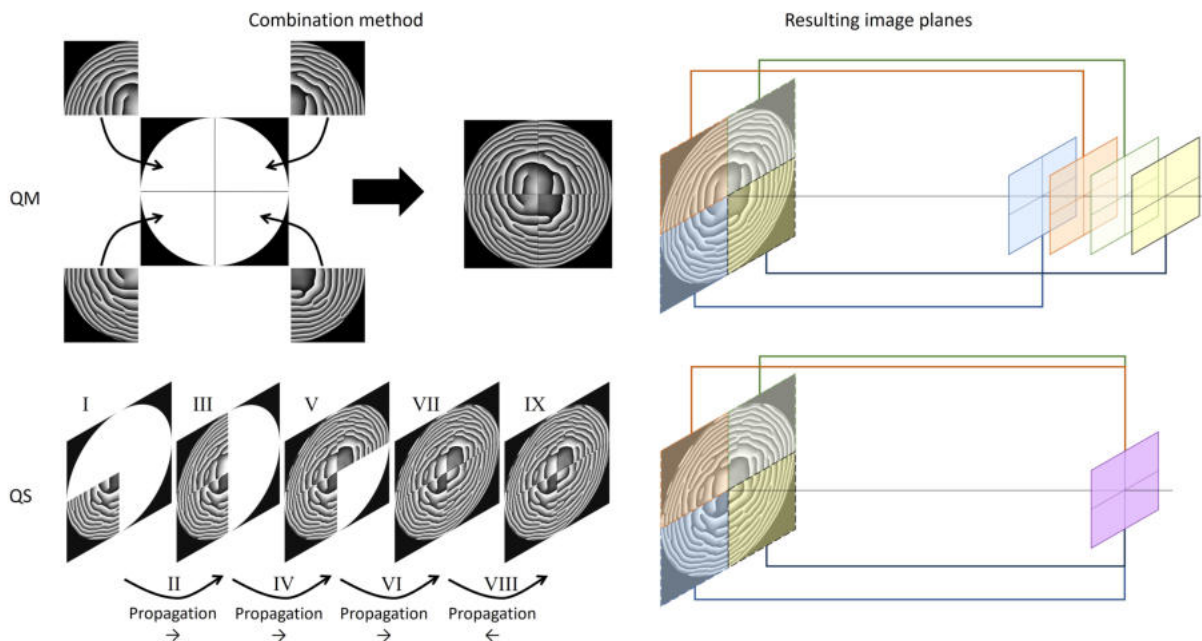
Strukt.	Rozmiar macierzy obliczeniowej	Odległość próbki
S0	1024 x 1024	0,25 mm
SE	256 x 256	0,9 mm
SD	256 x 256	0,9 mm

jednorodność oświetlenia nie-punktowego obszaru o zadanym kształcie. W celu uniknięcia niepożądanych interferencji w strukturach dyfrakcyjnych, zaproponowany został podział na segmenty, aby każdy fragment tworzył inny rozkład spekli i interferencji. Powierzchnia mapy opóźnień fazowych została podzielona na części (segmenty) projektowane w różny sposób lub posiadające różne parametry. Na początku zdefiniowano cztery segmenty dla każdej struktury, które obrazowały ten sam obiekt (kwadrat o boku 40 mm), ale w nieco różnych odległościach: 490 mm, 495 mm, 500 mm i 505 mm. Segmenty te mogą mieć różne kształty oraz można je organizować na wiele sposobów na powierzchni struktury dyfrakcyjnej, co stanowi dodatkowe stopnie swobody w tej metodzie projektowania.

Preferowany podział powierzchni struktury wykorzystuje całą jej aperturę. Wymóg tworzenia uzupełniających się rozkładów fazy sprowadza się do problemu parkietażu (również nazywanego kafelkowaniem lub teselacją; ang. *tiling* lub *tesselation*). Pojęcie to odnosi się właśnie do podziału powierzchni za pomocą przylegających i nienakładających się na siebie wielokątów (lub innych dowolnych kształtów). Zależnie od rozwiązywanego problemu, w parkietażu można zastosować jeden lub wiele wielokątów. W układzie skanującym zastosowanie jednego uzupełniającego się wielokąta jest preferowane, ze względu na brak konieczności modyfikacji rozkładu fazy struktury dyfrakcyjnej.

Jednorodny rozkład wyjściowy również musi posiadać kształt kompatybilny z układem skanującym, a więc również dostosowany do problemu parkietażu w przypadku skanowania większych powierzchni niż oświetlone pole. Prowadzi to do wymogu uzyskania rozkładu w kształcie innym niż powszechnie spotykany w optyce okrąg. Wydaje się to wprost wskazywać na potencjalne zastosowanie struktur dyfrakcyjnych, pozwalających na formowanie dowolnych rozkładów natężenia w zadanych płaszczyznach. Jako pole wyjściowe wybrany został kwadrat o boku 40 mm, czyli najprostszy wielokąt foremny spełniający powyższe wymagania bez konieczności obracania oraz zmiany kroku skanu.

Każdy segment reprezentuje oddzielną część całego rozkładu modulacji fazy i można go obliczać osobno, a następnie wykonywać propagację dla każdego z nich. W ten sposób, rozkład fazy wprowadzony przez jeden segment może być propagowany na małą odległość, a następnie połączony z rozkładem fazy wprowadzanym przez inny segment. Dzięki temu cała struktura dyfrakcyjna może obrazować w wybranej odległości (pojedyncza płaszczyzna), nawet jeśli zaprojektowane segmenty mają różne odległości obrazowania. Możliwe jest również połączenie wszystkich segmentów, obrazujących w różnych odległościach, w jednej płaszczyźnie struktury,



Rysunek 4.3: Dwa sposoby łączenia segmentów. W pierwszym wierszu przedstawione jest łączenie segmentów w tej samej płaszczyźnie (oznaczone jako QM) oraz uzyskane położenia płaszczyzn obrazowych. W drugim wierszu pokazane jest podejście, w którym propagacja wykorzystana jest do dostosowania odległości płaszczyzn obrazowych segmentów do jednej wspólnej odległości. Z artykułu [109]. Combination method – pl. *sposób łączenia segmentów*; Resulting image planes – pl. *wynikowy rozkład płaszczyzn obrazowych*; Propagation – pl. *propagacja rozkładu fali*.

co skutkuje wieloma płaszczyznami obrazowymi naraz. Powstanie wielu płaszczyzn obrazowych zmienia rozkład niechciany interferencji, potencjalnie powodując ich uśrednienie. Oba podejścia są schematycznie pokazane na rysunku 4.3.

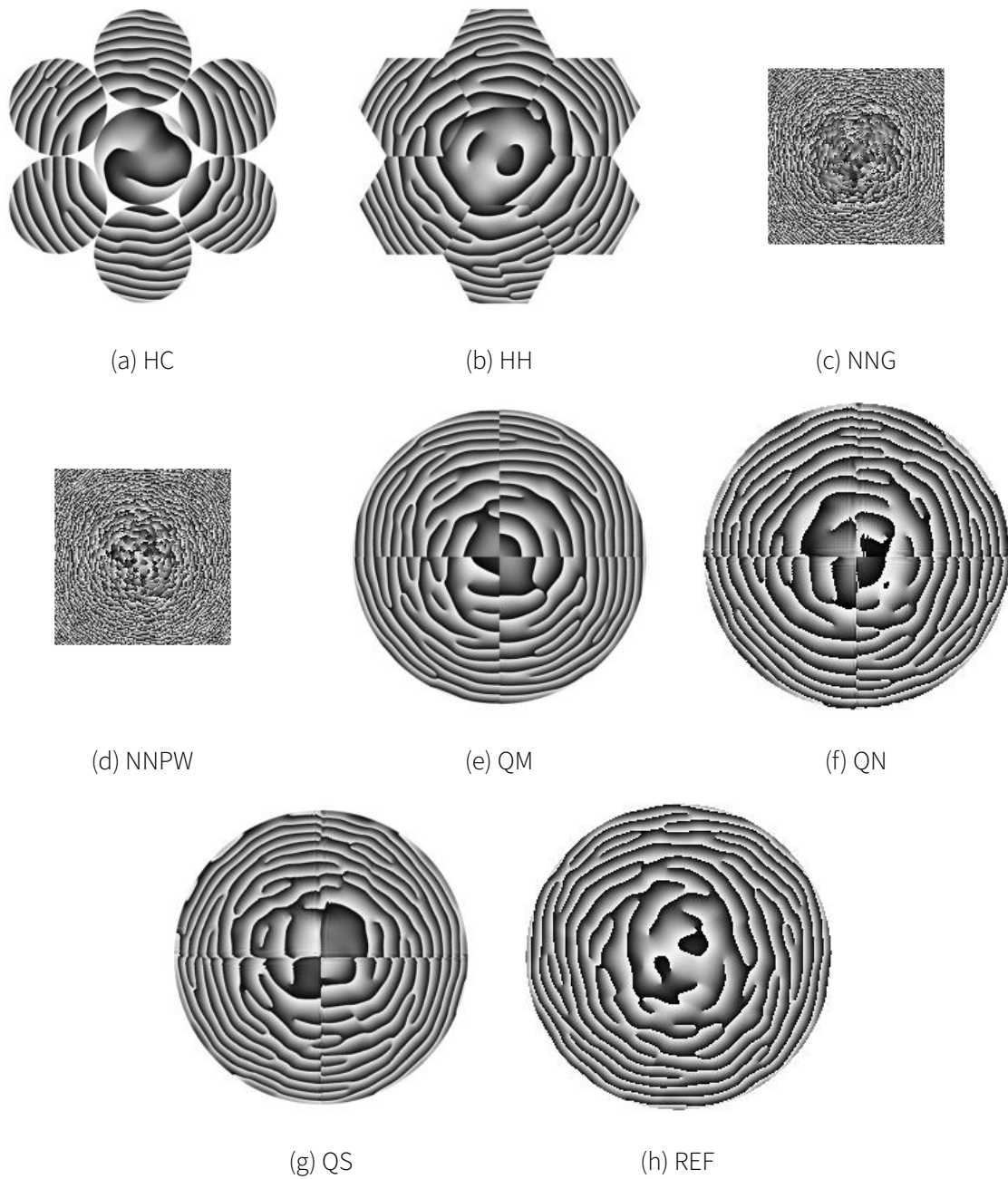
Przy projektowaniu struktur założono ich oświetlenie falą płaską. Tak jak w przypadku struktur punktowych, struktury tworzące jednorodny rozkład promieniowania o zadanym kształcie zaprojektowano dla promieniowania o długości 1,15 mm (co odpowiada częstotliwości 260 GHz). Opracowano łącznie osiem struktur. Rysunek 4.4 przedstawia uzyskane rozkłady fazy wszystkich struktur. Strukturę referencyjną (na rysunku oraz w dalszej części tekstu oznaczona jako REF, oznaczenie pochodzące od ang. *RE*ference) zaprojektowano bez podziału na segmenty i z jedną płaszczyzną obrazową. Projekt wykonany był dla macierzy 1024 x 1024 punktów z odległością próbkowania 0,9 mm. Całkowity rozmiar struktury REF był równy 210 mm. Zaprojektowano również dwie struktury z wykorzystaniem sieci neuronowych z założeniem oświetlenia falą płaską (NNPW, od ang. *Neural-Network-based* oraz *Plane Wave*) oraz oświetlenia falą z amplitudą o profilu Gaussowskim (NNG, od ang. *Neural-Network-based* oraz *Gaussian*). Obie struktury sieciowe powstały z wykorzystaniem algorytmu przedstawionego w artykule [110], bez podziału na seg-

menty, z jedną płaszczyzną obrazową, projektowane na macierzach 128 x 128 pikseli z odległością próbkowania 0,9 mm (całkowity rozmiar struktury: 125,2 mm). Algorytm ten również jest algorytmem iteracyjnym, tak jak algorytm ping-pong. Wykorzystuje on jednak znaną z sieci neuronowych propagację wsteczną błędu (nie mylić z propagacją promieniowania elektromagnetycznego) różnicy między rozkładem uzyskanym ze struktury w danym kroku.

W strukturach segmentowych wykorzystano podział powierzchni na kwadraty ze wspólną aperturą kołową (struktury QM – od ang. *Quarter* oraz *Multiple image planes*, QS – od ang. *Quarter* oraz *Single image plane* i QN – od ang. *Quarter* oraz *Neural-network-based*) oraz segmenty ułożone w formie przypominającej plaster miodu (HC – struktura z okrągłymi aperturami segmentów, nazwana od ang. *Honeycomb* oraz *Circle*, HH – struktura z sześciokątnymi aperturami segmentów, od ang. *Honeycomb* oraz *Hexagon*). Segmenty struktury QM zostały tak połączone, aby odtwarzać obrazy jednocześnie w wielu płaszczyznach obrazowych, nieco przesuniętych wzdłuż osi optycznej, podczas gdy struktury QS tak, aby powstała jedna płaszczyzna obrazowa dla obrazów tworzonych przez wszystkie segmenty. Struktury HC oraz HH, podobnie jak QM, tworzyły wiele płaszczyzn obrazowych. Struktury QM, QS, HC i HH zostały zaprojektowane na macierzach 4096 x 4096 pikseli z odległością próbkowania 0,117 mm (całkowity rozmiar struktury 210 mm). Struktura QN została zaprojektowana jako porównanie do struktur projektowanych z wykorzystaniem sieci neuronowych, a więc odtwarzała obraz w jednej płaszczyźnie oraz została zaprojektowana na macierzy 1024 x 1024 pikseli z odległością próbkowania 0,9 mm (całkowity rozmiar struktury 210 mm).

4.3 Wykonanie struktur dyfrakcyjnych

Mapa opóźnień fazowych stanowi podstawę do wytworzenia struktury dyfrakcyjnej. Definiuje ona rozkład opóźnień fazowych wprowadzanych przez strukturę, przez którą przechodzi wejściowy front falowy. Znając niezbędne opóźnienie fazy w danym punkcie struktury, długość fali oświetlenia oraz współczynnik załamania wykorzystanego materiału, możliwe jest wyznaczenie wysokości struktury w tym punkcie – jak zostało to opisane w rozdziale 3.1. Następnym krokiem jest wykonanie elementu, który, po oświetleniu przewidzianym w procesie projektowania rozkładem promieniowania, odtwarza oczekiwany obraz.



Rysunek 4.4: Rozkłady faz zaprojektowanych struktur segmentowych oraz struktury referencyjnej.

Tabela 4.3: Podsumowanie parametrów projektowych struktur segmentowych.

Strukt.	Częstotliwość / Długość fali	Promieniowanie wejściowe	Promieniowanie wyjściowe	Metoda projektowania
HC	260 GHz / 1,15 mm	Fala płaska	Jednorodny kwadrat o boku 40 mm w odległości ok 500 mm za strukturą	Segmentowa
HH	— —	Fala płaska	— —	Segmentowa
QS	— —	Fala płaska	— —	Segmentowa
QM	— —	Fala płaska	— —	Segmentowa
QN	— —	Fala płaska	— —	Segmentowa
NNG	— —	Gausowski rozkład amplitudy	— —	Na podstawie sieci neuronowych
NNPW	— —	Fala płaska	— —	Na podstawie sieci neuronowych
REF	— —	Fala płaska	— —	Ping-pong

Tabela 4.4: Podsumowanie parametrów symulacji struktur segmentowych.

Strukt.	Rozmiar macierzy obliczeniowej	Odległość próbkowa- nia	Kształt apertury i segmentów	Ułożenie płaszczyzn obrazowych (zależne od sposobu składania segmentów)
HC	4096 x 4096	0,117 mm	Sześciokątne segmenty w strukturze plastra miodu	Przesunięte płaszczyzny obrazowe
HH	4096 x 4096	0,117 mm	Okrągłe segmenty w strukturze plastra miodu	Przesunięte płaszczyzny obrazowe
QS	4096 x 4096	0,117 mm	Apertura okrągła z podziałem na 4 segmenty	Wspólna płaszczyzna obrazowa
QM	4096 x 4096	0,117 mm	Apertura okrągła z podziałem na 4 segmenty	Przesunięte płaszczyzny obrazowe
QN	1024 x 1024	0,9 mm	Apertura okrągła z podziałem na 4 segmenty	Wspólna płaszczyzna obrazowa
NNG	128 x 128	0,9 mm	Kwadratowa	Jedna płaszczyzna
NNPW	128 x 128	0,9 mm	Kwadratowa	Jedna płaszczyzna
REF	1024 x 1024	0,9 mm	Okrągła	Jedna płaszczyzna

4.3.1 Wybrane metody wykonania elementów dyfrakcyjnych

Druk 3D staje się popularną metodą produkcji elementów optycznych w zakresie terahercowym. Wyróżnia go sprzyjający szybkiemu prototypowaniu relatywnie krótki czas wykonania (od pomysłu do wykonanego obiektu), niskie koszty produkcji oraz powszechna dostępność zarówno drukarek 3D, jak i wielu różnych materiałów. Dodatkowo wiele materiałów możliwych do wykorzystania w druku 3D ma właściwości optyczne sprzyjające tworzeniu elementów optycznych w zakresie promieniowania terahercowego. Mimo iż istnieje wiele metod druku 3D, które zawierają w sobie wiele sposobów na precyzyjne wykonywanie obiektów z modeli 3D, można stwierdzić, że najpowszechniejszą metodą jest osadzanie topionego materiału (ang. *Fused Deposition Modeling* (FDM) lub *Fused Filament Fabrication* (FFF)). Technologia FDM polega na wytłaczaniu termoplastycznego filamentu przez podgrzewaną dyszę, która topi materiał. Drukarka osadza stopiony filament linia po linii, warstwa po warstwie na platformie roboczej, gdzie filament stygnie, tworząc trójwymiarowy obiekt. Ograniczenia technologiczne wpływają na szerokość oraz wysokość pojedynczej linii. Warto jednak zwrócić uwagę, że w przypadku promieniowania terahercowego długość fali jest rzędu milimetrów, co oznacza, że precyzja wykonania pojedynczej linii w technologii FDM jest wystarczająca do produkcji terahercowych elementów optycznych. Istnieją również inne metody druku 3D, takie jak selektywne spiekanie polimerowego proszku (ang. *Selective Laser Sintering* – SLS), utwardzanie żywic światłoczułych za pomocą światła z projektora (ang. *Digital Light Processing* – DLP) lub lasera (ang. *Stereolithography* lub *Stereolithographic Apparatus* – SLA), czy natryskiwania żywic światłoczułych (ang. *Polymer Jetting* – Polyjet), które charakteryzują się większą rozdzielczością przestrzenną wykonywanych obiektów [111]. Niestety, metody te nie są aż tak popularne jak FDM oraz wiążą się z większymi kosztami produkcji elementów. Dodatkowo w przypadku żywic światłoczułych mamy do czynienia z materiałami silnie absorbującymi promieniowanie terahercowe. Nadal jednak mogą one znaleźć zastosowanie w elementach nietransparentnych [111]. Analizując wszystkie opisane aspekty różnych metod druku 3D, metoda FDM została wybrana jako sposób wykonania struktur opisanych w tej pracy.

4.3.2 Wybór materiałów

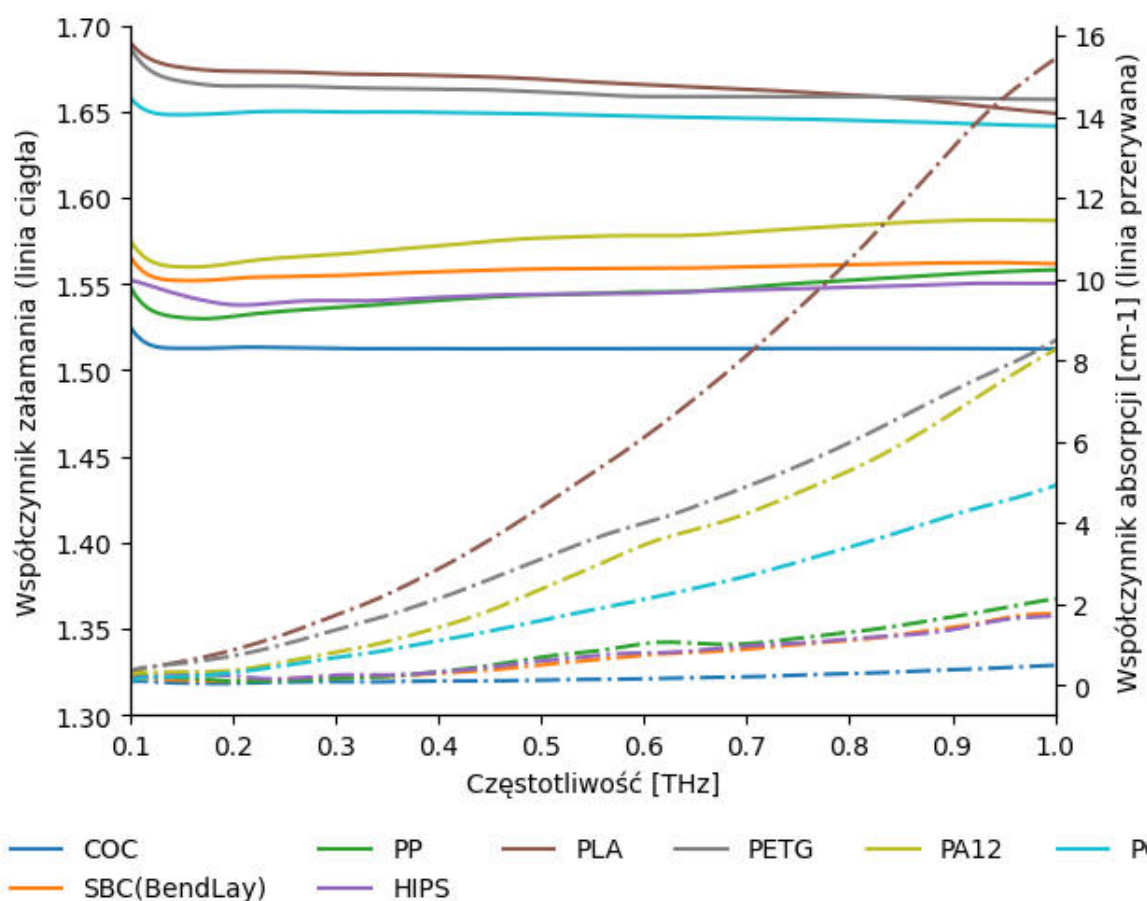
Biorąc pod uwagę właściwości optyczne różnych materiałów wykorzystywanych do produkcji elementów dyfrakcyjnych, również w zakresie promieniowania terahercowego, należy wziąć pod

uwagę dwa kluczowe parametry: współczynnik załamania oraz współczynnik absorpcji. Oba parametry wykazują zależność od długości fali (lub odpowiednio częstotliwości) promieniowania, dla którego dany element jest projektowany.

W zakresie terahercowym istnieje szereg materiałów o pożądanymi właściwościami optycznymi, niskim współczynniku załamania (poniżej 2, a najlepiej w okolicy 1,5) oraz jak najniższym współczynniku absorpcji. Można tutaj wymienić materiały takie jak kwarc, szkło kwarcowe, różnego rodzaju polimery, czy parafiny, a także szczególnie egzotyczne materiały z perspektywy optyki promieniowania widzialnego, takich jak np. papier, naturalnie występujący kamień, skarmelizowana sacharoza lub czekolada [46]. Parametry optyczne materiałów w zakresie terahercowym wyznaczane są za pomocą terahercowej spektroskopii w dziedzinie czasu (THz TDS), opisanej w podrozdziale 3.2.

Filamenty wykorzystywane w druku 3D metodą FDM składają się z polimerów lub mieszanek polimerów z różnymi dodatkami, które w wielu przypadkach są przezroczyste dla promieniowania terahercowego. Właściwości optyczne różnych materiałów w zakresie promieniowania THz można wyznaczyć za pomocą THz spektroskopii w dziedzinie czasu.

Dzięki wykonanym pomiarom, udało się wyznaczyć najlepsze materiały do wykonania struktur dyfrakcyjnych. W przypadku struktur punkowych użyty został materiał COC/TOPAS firmy Creamelt, podczas gdy do struktur segmentowych wykorzystano materiał SBC (ang. *styrene butadiene copolymer*) firmy Orbi-Tech GmbH (nazywany również BendLay). Oba materiały wyróżniają się niskim tłumieniem oraz relatywnie stabilnymi parametrami optycznymi w szerokim zakresie częstotliwości poniżej 1 THz. Ich współczynnik absorpcji osiąga wartość poniżej 2 cm^{-1} oraz współczynniki załamania w okolicach 1,55 w przypadku SBC oraz 1,50 dla COC. Parametry te pozwalają na projektowanie nie tylko standardowych, monochromatycznych struktur dyfrakcyjnych, ale również struktur dla wielu długości fali. Dla projektowanej długości fali (1,15 mm) SBC ma współczynnik załamania 1,56 oraz współczynnik absorpcji $0,162 \text{ cm}^{-1}$, a COC współczynnik załamania 1,51 oraz współczynnik absorpcji $0,085 \text{ cm}^{-1}$. Charakterystyki obu materiałów wraz z kilkoma również transparentnymi materiałami – PP oraz HIPS (ang. *high impact polystyrene*) – oraz kilkoma materiałami popularnymi w dziedzinie druku 3D – PLA (ang. *polylactic acid*), PETG (ang. *polyethylene terephthalate glycol*), PA12, PC (ang. *polycarbonate*) – zostały zaprezentowane na rycinie 4.5.



Rysunek 4.5: Właściwości optyczne wybranych materiałów do druku 3D. Wykres przedstawia współczynniki załamania oraz współczynniki absorpcji kilku materiałów w zakresie 0,1 – 1 THz. Materiały COC oraz SBC zostały wykorzystane do druku struktur zaprezentowanych w tej pracy. Materiały PP oraz HIPS przedstawiają alternatywne, transparentne w tym zakresie opcje. Dla kontrastu, materiały PLA, PETG, PA12 oraz PC są popularnymi materiałami wykorzystywanymi w druku 3D, ale charakteryzują się zdecydowanie gorszymi właściwościami optycznymi.

4.3.3 Modelowanie 3D

Zakończenie procesu projektowania związane jest z wygenerowaniem macierzy z rozkładem fazowym określającym konkretne opóźnienia fazowe wywołane przez wytworzoną strukturę. Obliczony rozkład fazy zostaje poddany segmentacji 8-bitowej – odpowiadającej podzieleniu zmian fazy znajdującym się w zakresie pomiędzy 0 a 2π zostają na 256 poziomów. Z uwagi na metody produkcji struktur dyfrakcyjnych podział na określone poziomy jest niezbędny. Dotyczy to w szczególności metody druku FDM. Dodatkowo, zabieg segmentacji 8-bitowej pozwala na przechowywanie dużych macierzy za pomocą bezstratnego formatu obrazowego BMP. Pliki w formie obrazów są łatwe w organizacji dzięki ograniczeniu wielkości zajmowanej przestrzeni dyskowej (liczby całkowite zamiast liczb zmiennoprzecinkowych) oraz możliwości wizualnego podejrzania zawartości (systemy operacyjne zwykle posiadają przeglądarki obrazów wspierające ten format).

Pierwszym krokiem w produkcji struktur dyfrakcyjnych za pomocą druku 3D po segmentacji 8-bitowej jest wykonanie modelowania 3D. Modelowanie ma na celu przeniesienie informacji z płaszczyzny do formy trójwymiarowej bryły. Konkretnie punkty obrazu (piksele) otrzymują wysokość wynikającą z mapy opóźnień fazowych, współczynnika załamania wybranego materiału oraz długości fali, dla której struktura jest projektowana. W celu utworzenia bryły konieczne jest wyznaczenie ścianek łączących punkty zawieszane na odpowiednich wysokościach. W grafice 3D oraz druku 3D do łączenia tych punktów powszechnie wykorzystywana jest siatka trójkątów. Jednak bezpośrednie łączenie punktów trójkątami prowadzi do powstawania pochyłych krawędzi oraz płaszczyzn na granicach między punktami o różnej wysokości. Dlatego na potrzeby testu wpływu tych zmian wykorzystano dwie metody modelowania otrzymanych map opóźnień fazowych:

1. Metoda podstawowa (opisana wyżej). Każdy piksel otrzymuje własną wysokość i sąsiadujące piksele są łączone krawędziami trójkątów. Prowadzi to do liniowego przybliżenia na granicach obszarów o różnych wysokościach. Metoda ta może być stosowana do dowolnej struktury.
2. Metoda „stłupkowa”. Każdy piksel obrazu BMP odpowiada kwadratowi o boku długości odległości próbkowania. Następnie każdy kwadrat jest wyciągany do wyznaczonej wysokości. Efektywnie struktura jest reprezentowana przez zestaw przylegających do siebie

prostokątów o podstawie kwadratu. Wpływa to na dokładniejsze odwzorowanie posegmentowanej na poziomy mapy opóźnień fazowych. Ze względu na liczbę dodatkowych punktów i ścian powstających przy tej metodzie, jest ona preferowana do macierzy o mniejszej rozdzielczości i większej odległości próbkowania. Jednocześnie szerokie słupki tworzą trwalsze i lepiej odwzorowane wysokości dla struktur z dużą lokalną zmianą fazy (np. nagły przeskok fazy od 0 do prawie 2π) i odpowiadają rozdzielczości wydruku FDM.

Metoda słupkowa została wykorzystana w strukturach QN, NNG, NNPW oraz REF.

Zgodnie z podrozdziałem opisującym projektowanie struktur (4.2), we wszystkich przedstawianych strukturach długość fali projektowej została ustalona na 1,15 mm (co odpowiada częstotliwości 260 GHz). Zgodnie ze wzorem 3.1, maksymalna wysokość struktur została wyznaczona na 2,07 mm (co odpowiada zmianie fazy od 0 do 2π). Ponieważ struktury dyfrakcyjne mogą również wprowadzać lokalnie brak opóźnienia fazowego (0π) konieczne było dodanie podłoża o stałej wysokości. Dodatkowo podłoże wzmacnia mechaniczną odporność struktur, dlatego w procesie modelowania dodano podkład o stałej wysokości 1,50 mm w strukturach segmentowych oraz 1 mm w strukturach punktowych. Łączna maksymalna wysokość struktury po procesach projektowania oraz modelowania miała wartość 3,57 mm dla struktur segmentowych oraz 3,07 mm dla struktur punktowych.

Modele struktur zostały tak zaprojektowane, aby posiadały dodatkowe ramki o przekroju kwadratu i rozmiarze 5 mm w strukturach segmentowych, a w strukturach punktowych o przekroju prostokątów o wysokości 4 mm i szerokości 2 mm dla soczewki skupiającej S0 oraz wysokości 4 mm i szerokości 3 mm dla pozostałych. Zastosowanie ramki zwiększa odporność struktury na deformacje oraz ułatwia jej umiejscowienie w elementach mocujących układu eksperymentalnego. Ramki nie wpływają na wydajność działania struktur.

W procesie druku pojedyncza linia wydruku miała grubość $400\ \mu\text{m}$ oraz wysokość $100\ \mu\text{m}$. Wyjątkiem jest jednak struktura punktowa S0, która została wydrukowana linią o grubości $250\ \mu\text{m}$ z powodu zastosowania mniejszej dyszy ze względu na wymaganą większą precyzję wydruku. Wartości te bezpośrednio wpływają na rozdzielczość druku na płaszczyźnie oraz grubość pojedynczej warstwy. Pozostałe parametry druku zostały wyznaczone, tak aby zapewnić jednorodność materiału wewnątrz struktur.

Parametry wykonanych modeli zostały podsumowane w tabelach 4.5 (dla struktur punktowych) oraz 4.6 (dla struktur segmentowych).

Tabela 4.5: Podsumowanie parametrów modelowych struktur punktowych.

Strukt.	Materiał	Parametry druku	Wymiary wydruku
S0	COC	Wysokość linii: 100 μm Szerokość linii: 250 μm	Apertura: okrągła o średnicy 20 mm Przekrój ramki: 2 mm x 4 mm Grubość podkładu: 1 mm
SE	— " —	Wysokość linii: 100 μm Szerokość linii: 400 μm	Apertura: okrągła o średnicy 70 mm Przekrój ramki: 3 mm x 4 mm Grubość podkładu: 1 mm
SD	— " —	Wysokość linii: 100 μm Szerokość linii: 400 μm	Apertura: okrągła o średnicy 70 mm Przekrój ramki: 3 mm x 4 mm Grubość podkładu: 1 mm

4.3.4 Rachunek strat

Na podstawie parametrów materiałowych możliwe jest oszacowanie spodziewanych strat natężenia wywołanych przez sam materiał. Biorąc pod uwagę współczynnik absorpcji materiału i grubość struktury, maksymalną absorpcję (przy największej grubości) można oszacować za pomocą prawa Beera-Lamberta, traktując współczynnik absorpcji jako współczynnik tłumienia. Przyjmując ogólną postać prawa Beera-Lamberta:

$$I = I_0 e^{-\mu l},$$

gdzie I to natężenie przepuszczone przez materiał absorbujący, I_0 to natężenie początkowe, μ współczynnik absorpcji, l to grubość materiału, to procent utraconego natężenia z powodu absorpcji możemy określić jako:

$$\left(1 - \frac{I}{I_0}\right) \cdot 100\% = (1 - e^{-\mu l}) \cdot 100\%. \quad (4.1)$$

Korzystając ze wzoru 4.1 możemy oszacować maksymalny i minimalny procent strat wywołanych absorpcją w materiale dla każdej ze struktur. Maksymalne straty spowodowane absorpcją wyznaczmy dla maksymalnej możliwej wysokości struktur – grubość podkładu + grubość struktury dla opóźnienia fazowego 2π – oraz minimalne straty dla minimalnej wysokości – grubość samego podkładu).

Ponadto, wykonane struktury mają jedną płaszczyznę zupełnie płaską, dla której jesteśmy

Tabela 4.6: Podsumowanie parametrów modelowych struktur segmentowych.

Strukt.	Materiał	Parametry druku	Wymiary wydruku
HC	SBC	Wysokość linii: 100 μu Szerokość linii: 400 μu Metoda tworzenia mapy: podstawowa	Apertura: okrągła o średnicy 200 mm Rozmiar ramki: 5 mm x 5 mm Grubość podkładu: 1,5 mm
HH	— —	Wysokość linii: 100 μu Szerokość linii: 400 μu Metoda tworzenia mapy: podstawowa	Apertura: okrągła o średnicy 200 mm Rozmiar ramki: 5 mm x 5 mm Grubość podkładu: 1,5 mm
QS	— —	Wysokość linii: 100 μu Szerokość linii: 400 μu Metoda tworzenia mapy: podstawowa	Apertura: okrągła o średnicy 200 mm Rozmiar ramki: 5 mm x 5 mm Grubość podkładu: 1,5 mm
QM	— —	Wysokość linii: 100 μu Szerokość linii: 400 μu Metoda tworzenia mapy: podstawowa	Apertura: okrągła o średnicy 200 mm Rozmiar ramki: 5 mm x 5 mm Grubość podkładu: 1,5 mm
QN	— —	Wysokość linii: 100 μu Szerokość linii: 400 μu Metoda tworzenia mapy: stupkowa	Apertura: okrągła o średnicy 200 mm Rozmiar ramki: 5 mm x 5 mm Grubość podkładu: 1,5 mm
NNG	— —	Wysokość linii: 100 μu Szerokość linii: 400 μu Metoda tworzenia mapy: stupkowa	Apertura: kwadratowa o boku 115 mm Rozmiar ramki: 5 mm x 5 mm Grubość podkładu: 1,5 mm
NNPW	— —	Wysokość linii: 100 μu Szerokość linii: 400 μu Metoda tworzenia mapy: stupkowa	Apertura: kwadratowa o boku 115 mm Rozmiar ramki: 5 mm x 5 mm Grubość podkładu: 1,5 mm
REF	— —	Wysokość linii: 100 μu Szerokość linii: 400 μu Metoda tworzenia mapy: stupkowa	Apertura: okrągła o średnicy 200 mm Rozmiar ramki: 5 mm x 5 mm Grubość podkładu: 1,5 mm

Tabela 4.7: Oszacowanie strat struktur wywołanych właściwościami optycznymi.

Struktury	Materiał	Straty z absorpcji [%]	Straty z odbicia [%]	Sumaryczne straty [%]
S0, SE, SD	COC	2,72	4,17	6,89
HC, HH, QS, QM, QN, NNG, NNPW, REF	SBC	5,61	4,74	10,36

w stanie oszacować teoretyczne straty wywołane odbiciem na granicy ośrodków. Współczynnik odbicia dla materiałów niemagnetycznych określają równania Fresnela:

$$R_s = \left| \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2}}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2}} \right|^2,$$

$$R_p = \left| \frac{n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2} - n_2 \cos \theta_i}{n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2} + n_2 \cos \theta_i} \right|^2,$$

gdzie $R_{s/p}$ to współczynnik odbicia dla polaryzacji s/p , $n_{1/2}$ współczynnik załamania dla ośrodka 1 (wejściowego) lub 2 (wyjściowego). Przyjmując oświetlenie normalne do płaszczyzny oraz przejście promieniowania z powietrza (przyjęty współczynnik załamania równy 1) do materiału wzory te upraszczają się do postaci:

$$R_s = \left| \frac{1 - n_2}{1 + n_2} \right|^2,$$

$$R_p = \left| \frac{1 - n_2}{1 + n_2} \right|^2.$$

Efektywny współczynnik odbicia jest średnią arytmetyczną współczynników dla obu polaryzacji. Dlatego ostateczne oszacowanie procentowe odbitego promieniowania określa wzór:

$$\left(\frac{R_s + R_p}{2} \right) \cdot 100\% = \left| \frac{1 - n_2}{1 + n_2} \right|^2 \cdot 100\%. \quad (4.2)$$

Wyniki oszacowania strat wynikających z właściwości optycznych materiału wyznaczone przez równania 4.1 oraz 4.2 dla materiałów wykorzystanych w wykonanych strukturach znajdują się w tabeli 4.7.

Rozdział 5

Charakteryzacja struktur segmentowych

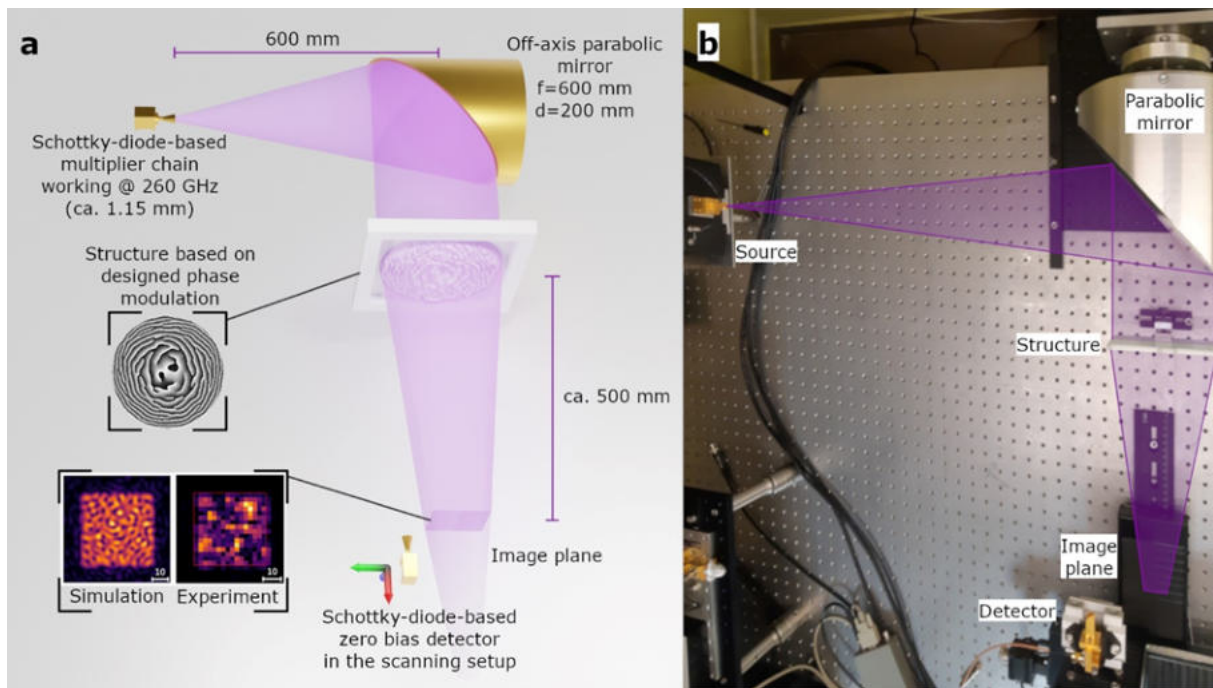
W przypadku struktur segmentowych przeprowadzono badania w zakresie możliwości uzyskania jednorodnego rozkładu promieniowania.

Wydrukowane struktury wymagają eksperymentalnej weryfikacji. W tym celu zaprojektowano układ eksperymentalny oraz przygotowano numeryczną analizę wyników. Przeprowadzono również symulacje odtworzeń ze struktur, które następnie porównano jakościowo.

5.1 Układ eksperymentalny oraz protokół pomiarowy

W układzie eksperymentalnym zastosowano źródło oraz detektor firmy VDI. Źródło, składające się z powielaczy częstotliwości bazujących na diodach Schottky'ego, wyposażone w antenę rożkową, generowało promieniowanie o częstotliwości 260 GHz. Jako detektor służył układ na bazie niespolaryzowanej diody Schottky'ego (tzw. zero bias) o czułości 1500 V/W (dla DWL). Napięcie powstające w trakcie pomiaru na detektorze mierzone było z wykorzystaniem woltomierza fazoczułego (nazywanego również wzmacniaczem typu Lock-In) Stanford Research SR830. Odczytywane napięcie było wprost proporcjonalne do natężenia (mocy) padającego na detektor. Detektor został umieszczony na trzech platformach przesuwnych, wyposażonych w silniki firmy Thorlabs model NRT150. Platformy zmontowano pod kątami prostymi, pozwalając na przemieszczanie detektora w trzech wymiarach, a w szczególności na skanowanie płaszczyzny obrazowej.

Aby uzyskać płaski front falowy, źródło promieniowania zostało umieszczone w odległości 600 mm od pozaosiowego zwierciadła parabolicznego. Wykorzystano zwierciadło aluminiowe



Rysunek 5.1: Obrazy przedstawiające układ eksperymentalny do charakteryzacji wykonanych struktur. Panel a – wizualizacja układu. Panel b – zdjęcie przygotowanego układu. Promieniowanie ze źródła jest kolimowane z wykorzystaniem zwierciadła parabolicznego. Następnie wiązka pada na badaną strukturę, która obrazuje kwadrat o boku 40 mm w odległości około 500 mm dalej. Źródło: [109]. Schottky-diode-based multiplier chain working @ 260 GHz (ca. 1,15 mm) - pl. powielacz częstotliwości na bazie diod Schottky'ego generujący promieniowanie o częstotliwości 260 GHz (ok. 1,15 mm), off-axis parabolic mirror $f=600$ mm $d=200$ mm - pl. pozaosiowe zwierciadło paraboliczne o ogniskowej 600 mm oraz średnicy 200 mm, structure based on designed phase modulation - pl. struktura wykonana na podstawie zaprojektowanego rozkładu modulacji fazy, simulation - pl. symulacja, experiment - pl. eksperyment, image plane - pl. płaszczyzna obrazowa, Schottky-diode-based zero bias detector in the scanning setup - pl. detektor na bazie niespolaryzowanej diody Schottky'ego umieszczony w układzie skanującym, source - pl. źródło promieniowania, parabolic mirror - pl. zwierciadło paraboliczne, structure - pl. struktura, detector - pl. detektor.

o ogniskowej 600 mm oraz średnicy 200 mm. Skolimowana wiązka następnie została skierowana na badaną strukturę, a więc struktury były oświetlane płaskim frontem falowym o profilu natężenia odpowiadającemu wycinkowi rozkładu Gaussa.

Struktury do pomiaru były wstawiane w przygotowany uchwyt zaciskowy. Pozwala to na sprawną wymianę badanych elementów. Przy umieszczaniu struktur w układzie zapewniono oświetlenie wiązką padającą pod kątem prostym do powierzchni struktury. Detektor z platformami przesuwными umieszczono tak, aby móc przeskanować płaszczyznę obrazową umieszczoną około 500 mm za strukturą. Rysunek 5.1 przedstawia wizualizację schematu wraz ze zdjęciem układu złożonego na stole optycznym.

W procesie symulowania struktur z wykorzystaniem metody skalarnej nieuwzględniana jest

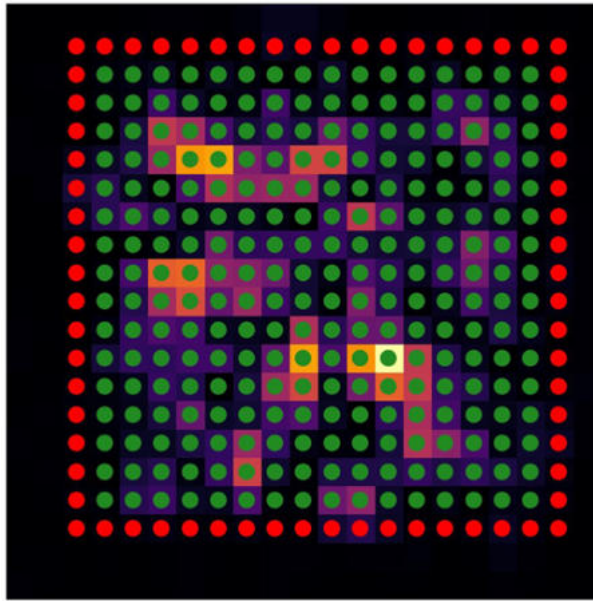
fizyczna grubość struktur – struktura reprezentowana jako macierze amplitudy oraz fazy nie ma grubości. Powoduje to brak konkretnej płaszczyzny do wyznaczenia położenia płaszczyzny obrazowej. W związku z tym wyznaczono położenie optymalne dla struktury referencyjnej, znajdującej w odległości około 500 mm od struktury. Wyznaczona w ten sposób płaszczyzna pomiarowa została wykorzystana do pomiaru wszystkich pozostałych struktur.

Detektor w trakcie pojedynczego skanu zbierał punkty pomiarowe w kwadratowym obszarze o boku 60 mm z krokiem 2,5 mm. Odpowiada to 676 punktom pomiarowym w pojedynczym skanie. Sygnał dla każdego punktu pomiarowego odpowiada sygnałowi uśrednionemu przez 0,3 sekundy. Całkowity czas pojedynczego skanu zajmował około 45 minut, z czego większość czasu związana była z przemieszczaniem detektora do kolejnej pozycji. Ze względu na aperturę anteny różkowej detektora oraz jej kąt akceptacji, obszary, w których sąsiadujące punkty pomiarowe były rejestrowane, nachodzą na siebie.

5.2 Charakteryzacja numeryczna

Na potrzeby analizy numerycznej każdy skan traktowany jest jako osobny zbiór wartości liczbowych. Zbiory zostały znormalizowane (przeskalowane), dzieląc przez maksymalną wartość liczbową w danym skanie, a więc zastosowano osobną normalizację dla każdej struktury. Zastosowanie powyższej metody normalizacji miało na celu zmniejszenie wpływu spekli na porównanie struktur oraz uwzględnienie różnych rozmiarów powierzchni aktywnych struktur. Wysoka koherencja źródła wpływa na wysoką częstotliwość powstawania spekli, podczas gdy różne rozmiary struktur wynikają z różnych metod ich projektowania.

Pojedynczy skan składa się z punktów pomiarowych wewnątrz odtworzonego obrazu tzw. obszaru zainteresowania (nazywane dalej ROI od ang. *region of interest*) oraz tła (dalej oznaczane jako BG od ang. *background*). ROI został określony jako kwadrat o boku 40 mm – zgodnie z parametrami projektowymi rozkładu wyjściowego. Przykład podziału na ROI i BG został zaprezentowany na rysunku 5.2. W przypadku idealnym, zbiór punktów stanowiących skan jest ograniczony do dwóch wartości: 1 dla ROI oraz 0 dla BG. W przypadku bardziej realistycznym, oczekiwany histogram punktów powinien składać się z pojedynczego maksimum, wskazującego na większość jasnych punktów w okolicach wartości 1, oraz resztę punktów rozłożoną dookoła maksimum, zależnie od tego, jak szybko natężenie promieniowania spada do wartości bliskich 0 na brzegach ROI. W celu zapewnienia identycznych warunków dla każdego skanu, ROI zostały

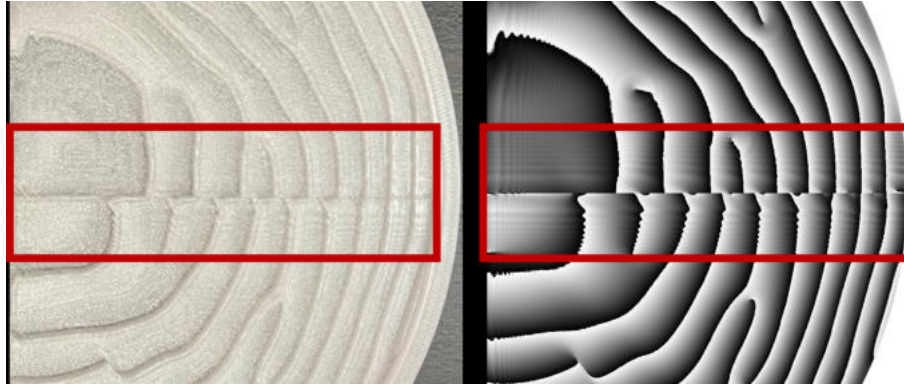


Rysunek 5.2: Przykład podziału punktów pomiarowych na obszar zainteresowania (ROI; zielone kropki) oraz tło (BG, czerwone kropki). Źródło: [109].

tak wyznaczone, aby składały się z takiej samej liczby punktów. Podobnie w przypadku punktów obszaru BG, każdy zbiór ma tę samą moc.

Do analizy numerycznej wykorzystano miary położenia oraz miary zmienności. Jako miary położenia wybrano średnią oraz medianę. Rozstęp międzykwartyłowy (ang. *Interquartile Range* – IQR) i odchylenie standardowe (ang. *standard deviation* – Std. Dev.) zostały wykorzystane jako miary zmienności. Średnia oraz mediana mają za zadanie przedstawić położenie największej części punktów pomiarowych w rozkładzie oraz określić w pewnym stopniu asymetrię rozkładu. Miary zmienności przedstawiają rozrzut punktów pomiarowych. IQR skupia się na różnicy między pierwszym, a trzecim kwartyłem dla danego ROI, zatem reprezentuje 50 % środkowych pomiarów wokół mediany (pomija bardzo wysokie oraz bardzo niskie wartości). Odchylenie standardowe natomiast reprezentuje rozrzut wartości względem wartości średniej.

Aby pokazać różnicę między ilością natężenia wewnątrz ROI i na zewnątrz (BG), wyznaczono również współczynnik sygnału do szumu (ang. *Signal to Noise ratio* – SNR). Określono go jako średnia wartość punktów zbioru ROI, podzielona przez średnią wartość punktów zbioru BG.



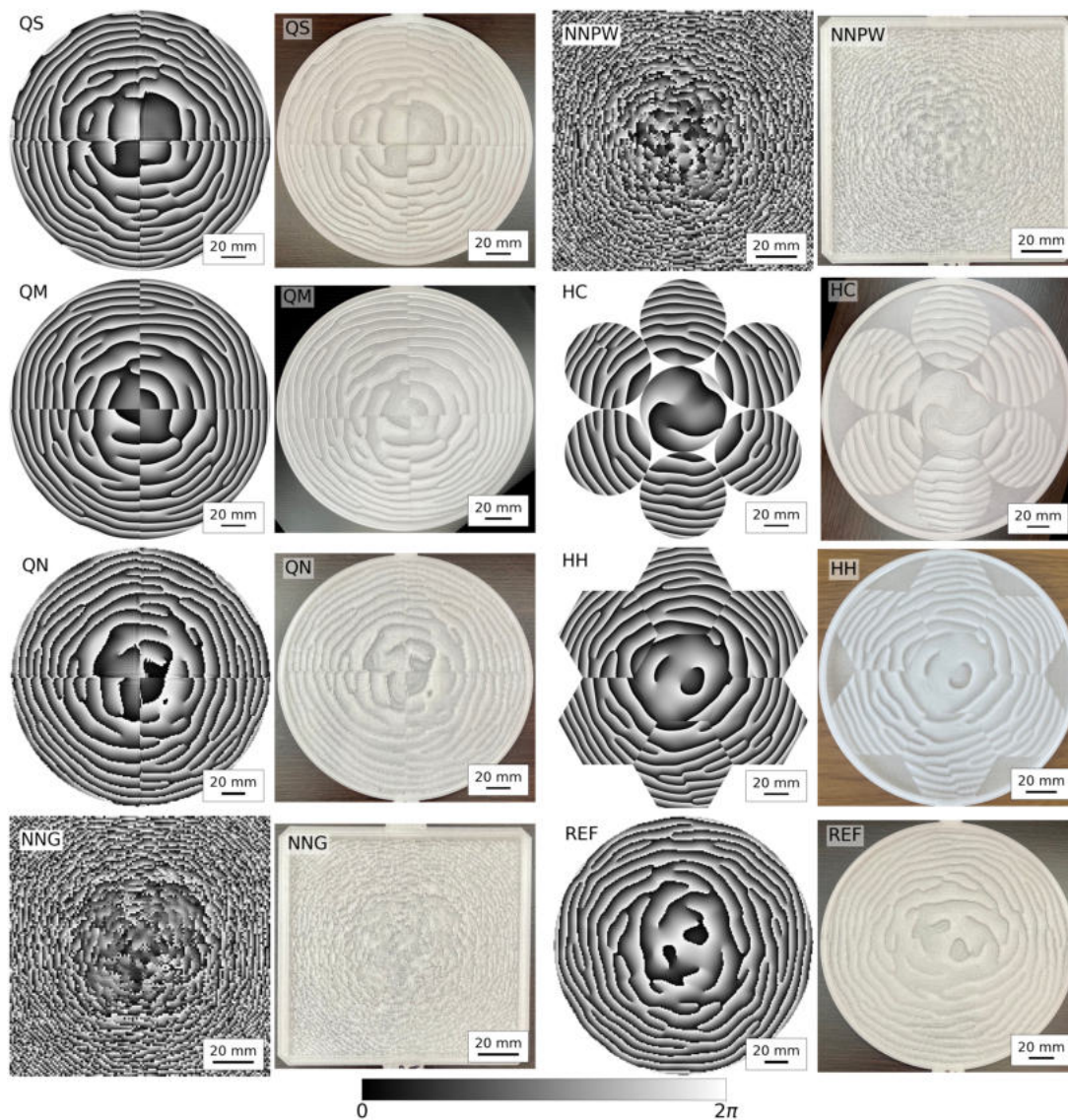
Rysunek 5.3: Zafalowania na krawędziach segmentów struktury QS. Po lewej zbliżenie na wydrukowaną strukturę, a po prawej zbliżenie na rozkład modulacji fazy.

5.3 Wyniki charakteryzacji

5.3.1 Analiza jakościowa

Uzyskane z procesu projektowania rozkłady faz struktur wraz z wykonanymi na ich podstawie strukturami są zaprezentowane na rysunku 5.4. Wizualna analiza gotowych struktur pozwala stwierdzić, iż wykorzystane metody opracowania modeli oraz wykonania struktur są wystarczające do odtworzenia najbardziej znaczących zmian fazy przedstawionych przez odpowiadające rozkłady faz. Jedynie detale, które nie zostały dokładnie odwzorowane, to niewielkie zaburzenie gradientu („zafalowania”) widoczne na strukturach QN oraz QS. Rys. 5.3 przedstawia zbliżenie fragmentu rozkładu fazy oraz odpowiadającego fragmentu struktury, w których występuje lub, w przypadku struktury, powinno występować „zafalowanie”. To zaburzenie jest wynikiem metody łączenia segmentów przez propagowanie ich w przód przed połączeniem z kolejnymi segmentami. Wydruki struktur sieciowych (NNG oraz NNPW), mimo stosunkowo chaotycznego charakteru rozkładów fazy, również nie odbiegają znacząco od ich odpowiedników w rozkładach fazy. Jednocześnie należy zaznaczyć, że mimo znacznych rozmiarów, struktury nie uległy istotnemu odkształceniu po wystygnięciu, co mogłoby wprowadzić dodatkowe niedokładności w uzyskiwanym rozkładzie promieniowania.

Analizując uzyskane symulacje i wyniki eksperymentalne, których wizualizacje zaprezentowano na rys. 5.5, można dostrzec istotne różnice między uzyskanymi rozkładami. Jednak zarówno w przypadku symulacji, jak i wyników eksperymentalnych, uzyskane rozkłady natężenia tworzą wyraźne kwadraty odznaczające się względem tła. W przypadku eksperymentu pozwoliło to na



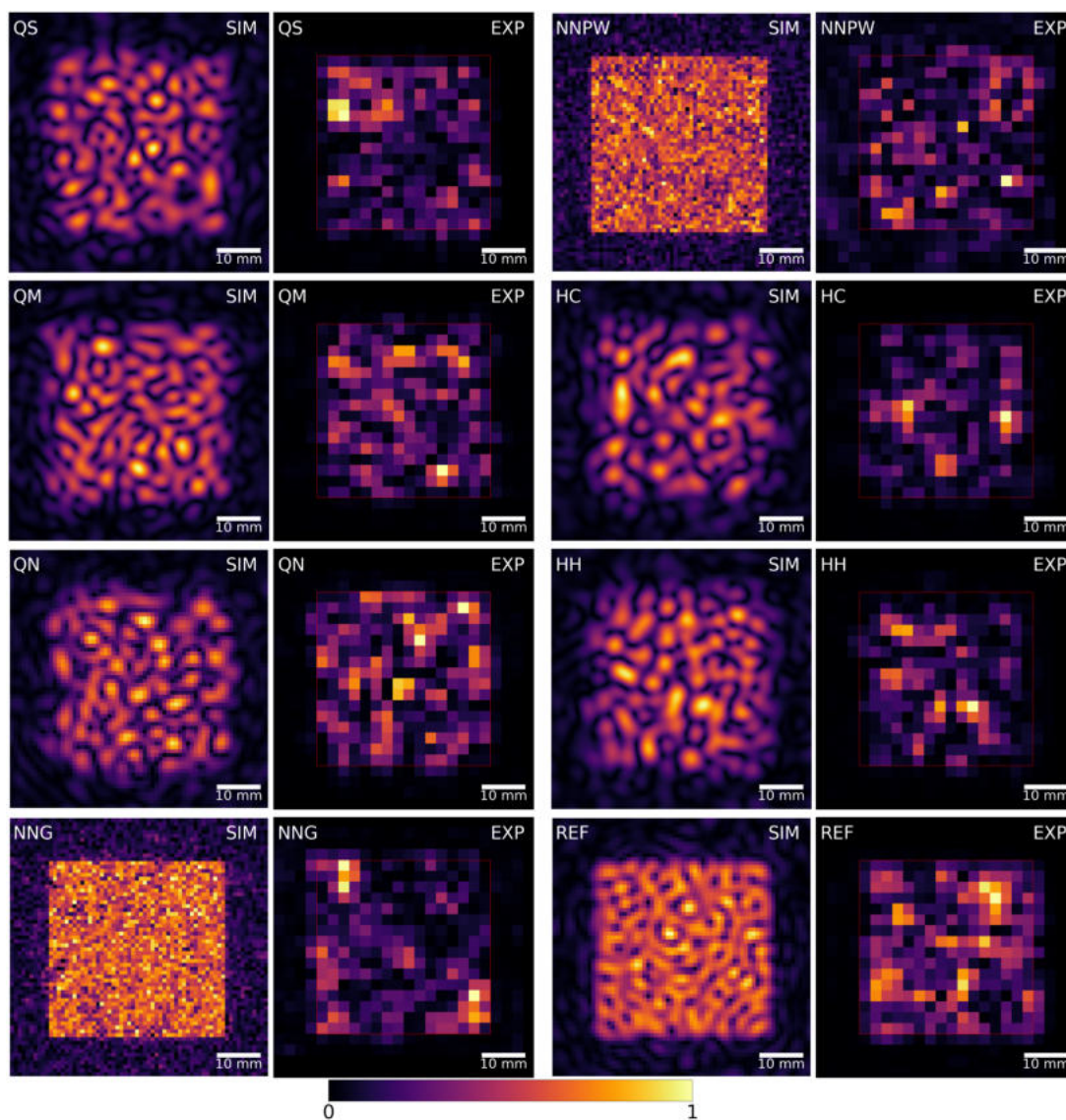
Rysunek 5.4: Rozkłady fazy uzyskane w procesie projektowania (kolumny pierwsza i trzecia) oraz zdjęcia wykonanych struktur (kolumny druga i czwarta).

łatwe odseparowanie punktów pomiarowych wchodzących w zbiór ROI (na wynikach eksperymentalnych na rys. 5.5 ROI otoczony jest czerwoną ramką). Wykorzystane metody projektowania, druku oraz eksperymentalne doprowadziły do różnych rozdzielczości między wynikami z symulacji i eksperymentu. W przypadku symulacji, wyższa rozdzielczość bezpośrednio wynika z potrzeby wytworzenia map fazowych o wysokiej rozdzielczości do druku 3D. Relatywnie niska rozdzielczość wyników eksperymentalnych wynika z wielkości apertury wykorzystanej anteny oraz bardzo długiego czasu wykonania pojedynczego skanu. Różne rozdzielczości utrudniają bezpośrednie porównanie numeryczne między symulacjami, a wynikami eksperymentalnymi. Mimo różnych rozdzielczości, jesteśmy w stanie zaobserwować zdecydowanie większe „ziarna” spekli w wynikach eksperymentalnych. W przypadku porównywania samych symulacji, może rzucać się również w oczy różnorodność wyników struktur NNPW oraz NNG. Należy tutaj zaznaczyć, że były one symulowane inną metodą niż pozostałe struktury (propagacja z wykorzystaniem algorytmu sieciowego). Analiza wizualna pozwala założyć, że pomiar dla struktury referencyjnej będzie się odznaczał większym średnim natężeniem w porównaniu z resztą struktur.

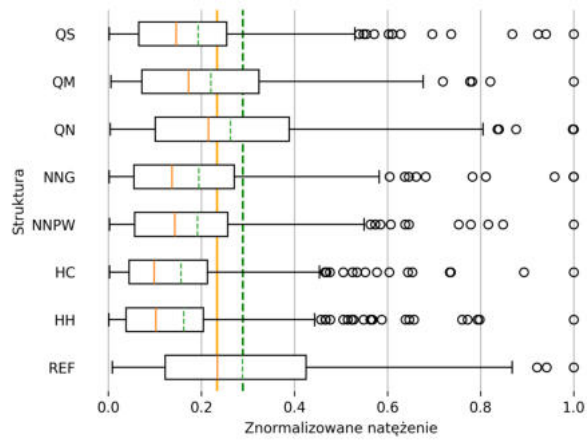
5.3.2 Analiza ilościowa

Struktura REF odznacza się najwyższą wartością średniej oraz mediany. Możemy zatem stwierdzić, że struktura REF jest średnio „najjaśniejszą” z wykonanych struktur. Struktury QN oraz QM wartości średniej i mediany mają nieco mniejsze niż struktura REF. Celem opracowania tych struktur było jednak uzyskanie lepszej jednorodności rozkładu wyjściowego. Odchylenie standardowe (przedstawione na panelu na rys. 5.6 (b)) ma najniższe wartości dla struktur (w kolejności od najniższej) HC, HH, NNPW. Struktura HC wykazuje się tutaj znaczącą przewagą nad pozostałymi. Podobnie rozstęp międzykwartyłowy (IQR; wykres pudełkowy na rys. 5.6 (a)) przedstawia najmniejsze wartości (najmniejszą rozbieżność środkowych 50% danych) dla struktur HC oraz HH (różnica na trzecim miejscu po przecinku) a następnie dla struktury QS. Współczynnik sygnału do szumu SNR (przedstawiony na rys. 5.6 (c)) struktury HH, HC oraz QM uzyskały na podobnym, wysokim poziomie w porównaniu do reszty struktur.

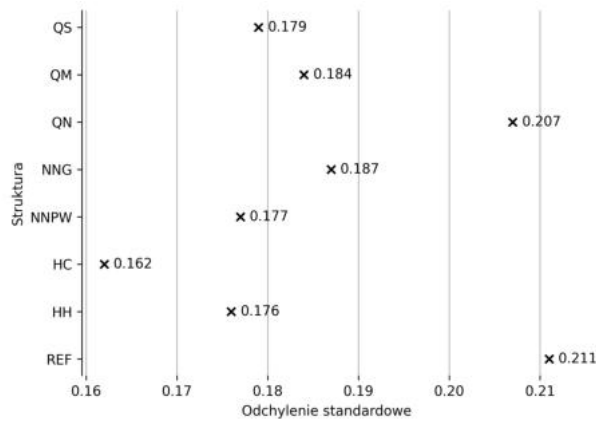
Wykorzystanie podziału na segmenty umożliwiło uzyskanie wielu kombinacji struktur. Stąd struktury QM i QS różnią się sposobem łączenia segmentów, a w wyniku czego również wspólnym (QS) lub różnymi (QM) położeniami płaszczyzn obrazowych. QS charakteryzuje się mniejszym rozrzutem wartości względem QM (3% mniejsze odchylenie standardowe oraz 25% mniejsze IQR)



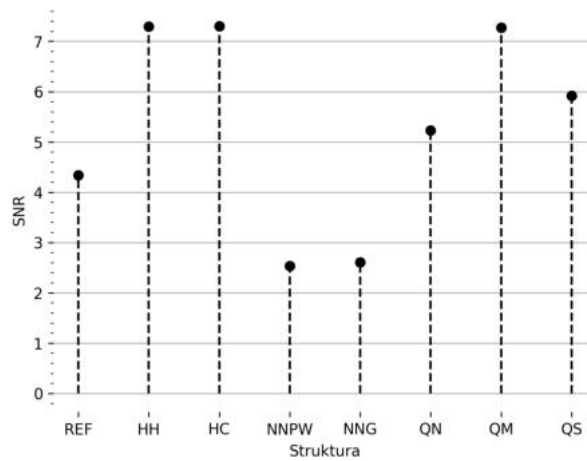
Rysunek 5.5: Rozkłady natężenia uzyskany z symulacji (kolumna pierwsza i trzecia) oraz eksperymentu (kolumna druga i czwarta). Każdy wynik posiada miarkę wielkości, oznaczenie struktury oraz oznaczenie źródła danych do wykresu (SIM – symulacja, EXP – eksperyment). Dodatkowo wyniki eksperymentalne pokazują zaznaczony obszar ROI (czerwony kwadrat).



(a) Wykres pudełkowy



(b) Odchylenie standardowe



(c) Stosunek sygnału do szumu (SNR)

Rysunek 5.6: Wykresy podsumowujące wykorzystane miary: (a) wykres pudełkowy pokazujący IQR, średnie (linia ciągła pomarańczowa) oraz mediany (linia przerywana zielona), (b) odchylenie standardowe, (c) SNR.

jednak kosztem mniejszej wartości średniej (13% mniej) oraz nieco zmniejszonym SNR (o 19%).

Porównując struktury sieciowe (NNG i NNPW) ze strukturą o tej samej odległości próbkowania (QN), widzimy znaczną poprawę rozrzutu wartości (struktury sieciowe mają IQR mniejszy o nawet 31%, a odchylenie standardowe o 14%). Niestety, również w tym przypadku, poprawiona zmienność przychodzi kosztem obniżonej wartości średniej (przynajmniej o 26%) oraz SNR (przynajmniej o 52%). Patrząc na ogół przebadanych struktur można dostrzec pewną zależność wokół metody wykonywania modelu. Struktury wykonane metodą słupkową z odległością próbkowania 0,9 mm (QN i REF) względem struktur wykonanych metodą podstawową z odległością próbkowania 0,117 mm (QS, QM, HC oraz HH) wyróżniają się wyższymi wartościami miar położenia (średnia i mediana), ale również wyższą zmiennością i niższym SNR. Ta zależność nie ma miejsca w przypadku struktur sieciowych, które to są wykonane metodą słupkową. Ich miary zmienności, a także miary położenia, są usytuowane pomiędzy wynikami struktur wykonanych metodą podstawową i wyróżniają się najniższym wynikiem SNR z badanego zestawu struktur.

Każdy z segmentów struktur na planie plastra miodu (HC oraz HH) zajmuje obszar symetryczny względem osi optycznej (co nie ma miejsca w przypadku pozostałych segmentowanych struktur). Struktury z symetrycznymi segmentami jeszcze bardziej obniżają wartości miar zmienności, również kosztem wartości miar położenia. Jednocześnie utrzymują one jednak wysoką wartość SNR. Zastosowanie różnych kształtów apertur w tym przypadku nie spowodowało znaczących zmian.

5.4 Podsumowanie uzyskanych wyników

Zastosowanie segmentacji struktur dyfrakcyjnych pozwoliło na uzyskanie lepszej jednorodności (mniejsza rozbieżność punktów rozkładu natężenia). Porównując ze strukturą referencyjną uzyskano nawet 17% niższe odchylenie standardowe oraz 45% mniejsze IQR. Niestety, jednocześnie spowodowało to znaczne spadki miar położenia (wartości średnie do 46% oraz mediany do 58%), które możemy rozpatrywać jako miary „jasności” uzyskanego rozkładu. Mimo przypadków skrajnych, takich jak struktury HC i HH wyróżniające się najmniejszą zmiennością i jednocześnie najniższymi miarami położenia, jesteśmy w stanie wybrać struktury segmentowe, które są w stanie poprawić zmienność rozkładów, nie powodując znaczących strat w miarach położenia (np. struktury QS czy QM). Przebadane struktury segmentowe również pokazują lepsze uformowanie rozkładu natężenia przez zwiększone SNR o nawet 68% w porównaniu ze strukturą referencyjną.

Niestety, w tej kategorii struktury sieciowe uzyskały gorszy wynik (redukcja SNR do 42% względem referencji).

Mimo uzyskania lepszej jednorodności rozkładu natężenia, obecność spekli jest nadal znacząca. To powoduje, że zastosowanie zaprezentowanych metod projektowania do układów skanujących nie jest wskazane.

Część zaprezentowanych w tym rozdziale wyników została opublikowana w artykule opublikowanym w czasopiśmie *Scientific Reports* [109].

Rozdział 6

Charakteryzacja pozaosiowych struktur punktowych

W przypadku układu punktowego możliwe było opracowanie całego układu pracującego w trybie pozaosiowym. W poniższym rozdziale przedstawiony jest proces oraz wyniki charakteryzacji wykonanych struktur. Celem charakteryzacji było ocenienie jakości uzyskiwanego rozkładu natężenia pod względem zastosowania struktur w układzie odbiciowym.

6.1 Układ oraz protokół pomiarowy

6.1.1 Elementy układu pomiarowego

W pomiarach struktur punktowych jako źródło promieniowania wykorzystano układ oscylatora na bazie granatu itrowo-żelazowego (ang. *Yttrium Iron Garnet*, w skrócie YIG), napędzającego zintegrowany powielacz częstotliwości WM-710 (WR-2.8) AMC-I firmy VDI. Układ oscylator-powielacz pozwalał na modulację częstotliwości emitowanego promieniowania w zakresie od 0,26 THz do 0,4 THz. Niższe zakresy częstotliwości charakteryzują się wyższą mocą generowanego promieniowania. Dlatego na potrzeby pomiarów struktur punktowych układ źródła został ustawiony na emisję częstotliwości około 0,26 THz.

Jako detektor wykorzystano mikrobolometry Luvitera THz mini – cztero-pikselową linijkę szerokopasmowych bolometrów ze zintegrowanymi antenami dla zakresu promieniowania THz (bolometry zostały opisane przez Qi i in. w [112]). Każda z anten zajmuje powierzchnię kwadratu o boku ok. 2,5 mm. Deklarowany przez producenta zakres częstotliwości roboczej sięga od 0,1

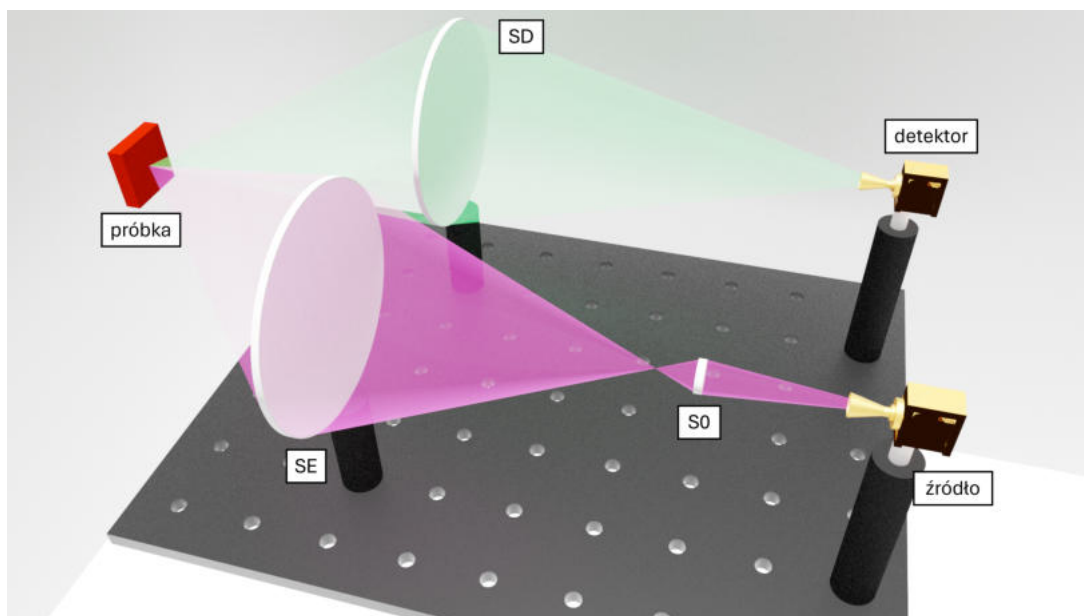
THz do 1,1 THz. Detektor ten pracuje wyłącznie w trybie pomiaru seryjnego. Oznacza to, że każdy odczyt z detektora odpowiada serii pojedynczych pomiarów z możliwością ustawienia liczby próbek oraz częstotliwości próbkowania. Warto również zwrócić uwagę na to, iż prostokątna apertura detektora może potencjalnie wpływać na nierówne oświetlenie anten detektora przy zbyt dużym kącie oświetlenia. Dlatego w trakcie pomiarów wykorzystywano jedną ze środkowych anten.

Ze względu na poprawę wartości stosunku sygnału do szumu rejestrowanego promieniowania, zastosowano filtrację polegającą na rejestrowaniu sygnału o konkretnej modulacji. W tym celu wykorzystuje się transformatę Fouriera otrzymanej serii próbek, której sygnał jest modulowany. Dlatego do układu dołączono chopper optyczny Thorlabs MC2000, z którego wykorzystaniem wiązka była modulowana amplitudowo z częstotliwością 500 Hz. Zgodnie z twierdzeniem o próbkowaniu, taki sygnał musi być próbkowany z częstotliwością przynajmniej dwukrotnie większą niż najwyższa częstotliwość widma sygnału. Z tego powodu próbkowanie detektora zostało ustawione na 1000 próbek pobieranych z częstotliwością 10 kHz. Dodatkowo częstotliwość próbkowania była wyższa niż wymagane minimum, co skróciło czas wykonywania pomiarów. Wartości pomiarowe zwracane przez detektor są wprost proporcjonalne do mierzonego natężenia promieniowania.

Do zmian położenia detektora (ruch skanujący) wykorzystano zestaw trzech stolików przesuwnych z wbudowanym kontrolerem Thorlabs LTS300C/M oraz LTS300/M, każdy o zasięgu skanowania 300 mm. Stoliki złożone zostały w konfiguracji pozwalającej na skanowanie w trzech ortogonalnych osiach.

W celu umożliwienia dokonywania pomiarów skanujących z wykorzystaniem detektora oraz stolików, niezbędne było również przygotowanie oprogramowania (www.github.com/surmi/pylabscanner). Opracowano aplikację pozwalającą na:

- synchronizację zmian położenia platformy stolika przesuwneego z odczytywaniem pomiarów z detektora,
- zapis uzyskiwanych pomiarów wraz z wynikami transformaty Fouriera, metadanymi pomiaru oraz szybkimi wizualizacjami skanu,
- możliwość odczytu pomiarów wykonywanych w pętli (pozwala na obserwację na żywo zmian natężenia na detektorze; w aplikacji nazwano tę funkcjonalność *live view*) oraz



Rysunek 6.1: Schemat układu demonstratora.

- interakcję z oprogramowaniem za pomocą interfejsu wiersza poleceń (ang. *Command-Line Interface*, w skrócie CLI).

6.1.2 Protokół pomiarowy

Struktury były mierzone w sekwencjach występowania w układzie (wizualizacja układu demonstratora na rys. 6.1):

1. soczewka skupiająca S0 – badany rozkład promieniowania formowany przez soczewkę skupiającą,
2. soczewka skupiająca S0 i struktura emiterowa SE – badany rozkład promieniowania formowany przez strukturę emiterową,
3. soczewka skupiająca S0, struktura emiterowa SE i struktura detektorowa SD – badany rozkład promieniowania formowany przez strukturę detektorową.

Podział na sekcje pozwolił na zbadanie rozkładów promieniowania w konkretnych częściach układu, uwzględniając sumaryczny wpływ kolejnych elementów.

W poniższych rozważaniach przyjęto następujące oznaczenie osi:

- oś z – położona na prostej normalnej do powierzchni badanej struktury (w przypadku struktur S0 oraz SD jest ona zgodna z osią optyczną),

- oś y – położona na prostej normalnej do stołu pomiarowego,
- oś x – położona na prostej prostopadłej do pozostałych, a więc równoległej do stołu pomiarowego.

Dodatkowo oznaczenie osi z może występować z indeksem dolnym oznaczającym położenie względem najbliższej płaszczyzny struktury – przykładowo położenia skanów ogniska struktury S0 będą określane względem tej struktury i oznaczane przez z_0 , a dla struktury SE będzie to z_e .

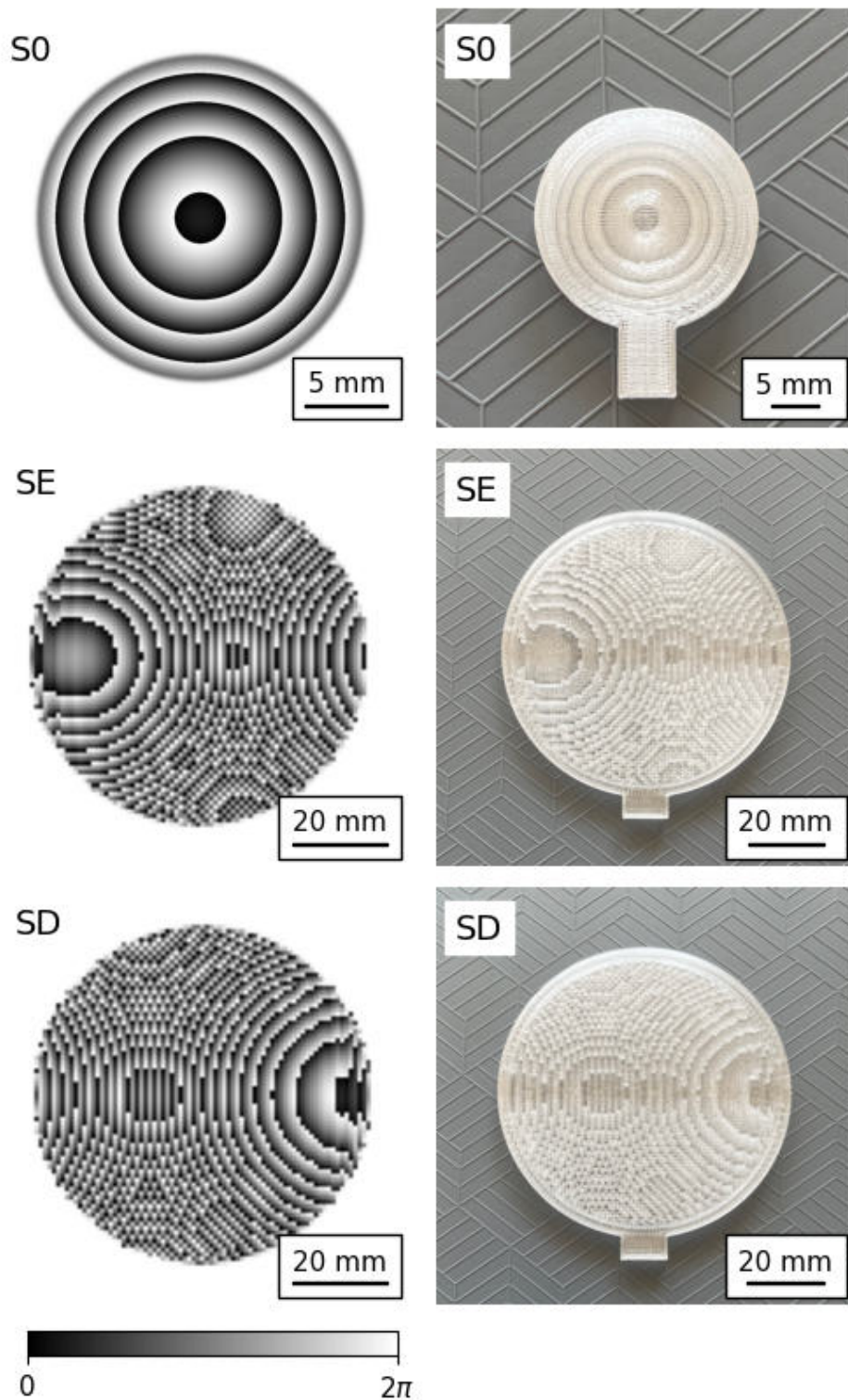
6.2 Wyniki charakteryzacji

6.2.1 Analiza wykonania struktur

Wykonane struktury poprawnie odzwierciedlają zaprojektowane rozkłady fazy. Dla wizualnego porównania rozkłady fazy i odpowiadające im struktury zostały zestawione na rysunku 6.2. Modulacje rozkładu fazy struktur SE oraz SD charakteryzowały się dużymi zmianami. Jednak brakowało w nich lokalnych maksimum, odosobnionych punktów o wysokiej różnicy wysokości względem otoczenia, które z racji wykorzystanej metody druku 3D mogłyby być wyjątkowo trudne do odtworzenia. Struktura S0 z racji symetryczności i ciągłości rozkładu modulacji również nie stanowiła istotnego kłopotu w odwzorowaniu kształtu za pomocą wybranej metody druku 3D. Dodatkowo, kształt struktury S0 pozwolił na łatwiejsze odwzorowanie modulacji z wykorzystaniem mniejszej dyszy – 250 μm , podczas gdy struktury SE oraz SD wyprodukowane zostały z wykorzystaniem dyszy o średnicy 400 μm .

6.2.2 Wyniki eksperymentalne

Ponieważ wykorzystywana metoda projektowania nie bierze pod uwagę fizycznego rozmiaru, grubości tworzonych struktur oraz faktu, że rozmiary tworzonych struktur są znaczące względem spodziewanych położenia ognisk, porównanie faktycznych ogniskowych z odległościami wynikającymi z projektu jest w znacznym stopniu ograniczone. Stąd projektowe odległości powstawania ognisk wykorzystywane są jako wskazówka do wstępnego określenia ich faktycznych położenia w eksperymencie, i to właśnie wyniki eksperymentalne są finalnym wyznacznikiem jakości uzyskiwanego rozkładu. Dlatego wartości projektowe ogniskowych służą jedynie jako zgrubny wyznacznik poprawności.



Rysunek 6.2: Zestawienie rozkładów fazy (lewa kolumna) ze zdjęciami wykonanych struktur (prawa kolumna).

Ewaluacja soczewki wstępnej – struktura S0

Soczewka S0, zgodnie z projektem, posiadała bardzo krótką ogniskową o długości około 11 mm. Dlatego na potrzeby identyfikacji położenia ogniska, niezbędne było skanowanie detektorem w bardzo bliskim położeniu względem struktury. Poszukiwanie ogniska zaczęto od skanów w płaszczyźnie xy w najbliższej możliwej pozycji około 10 mm od najbliższej powierzchni struktury i następnie powtórzono w kilku dalszych położeniach. Z racji rozmiaru anteny detektora, krok ruchu skanującego został ustalony na 2,5 mm. Położenie największego natężenia zostało określone z wykorzystaniem oprogramowanej funkcjonalności live view, co pozwoliło na wyznaczenie zakresów skanowania.

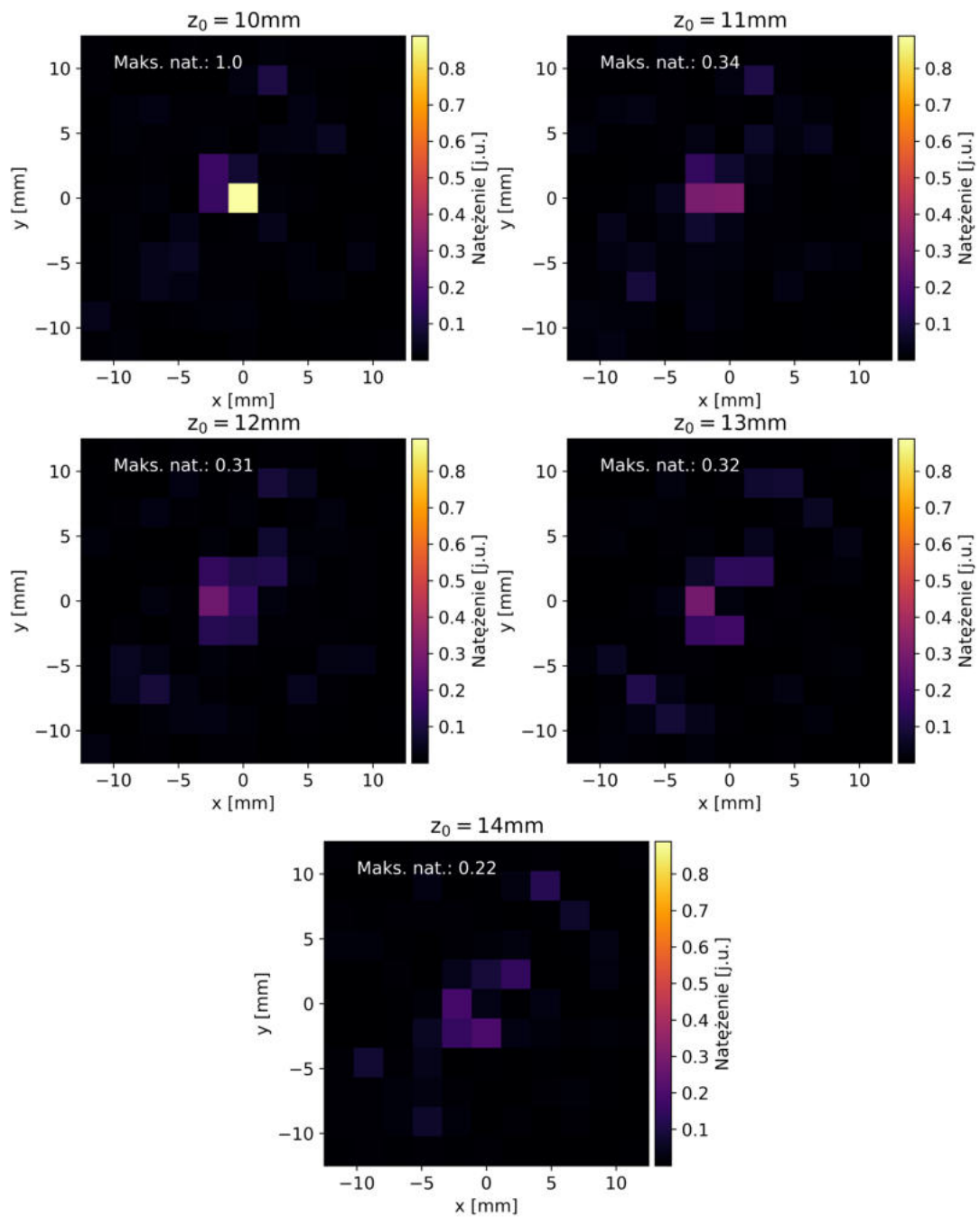
Rozkłady natężenia uzyskane ze skanowania zostały zaprezentowane na rys. 6.3. W celu uwydatnienia różnic natężeń pomiędzy kolejnymi pomiarami wykorzystano wspólną skalę koloru. Początki układów współrzędnych wykresów zostały ustalone na położenie punktu o najwyższym natężeniu spośród rozważanych pomiarów. Znaczący spadek natężenia pomiędzy skanem dla $z_0 = 10$ mm oraz następnym skanem dla $z_0 = 11$ mm wskazuje na położenie ogniska w okolicach $z_0 = 10$ mm.

Dodatkowo zastosowano skany w płaszczyznach xz_0 oraz yz_0 (w okolicach szacowanej osi optycznej), a ich wyniki zaprezentowano na rys. 6.4. Potwierdzają one położenie punktu najwyższego natężenia w okolicach $z_0 = 10$ mm. Jednocześnie ukształtowanie rozkładu natężenia w dalszych położeniach osi optycznej wykazuje lekką asymetrię – przesunięcie w kierunku dodatnich wartości osi x oraz y. Może to wskazywać na lekkie przesunięcie struktury względem oświetlającej wiązki.

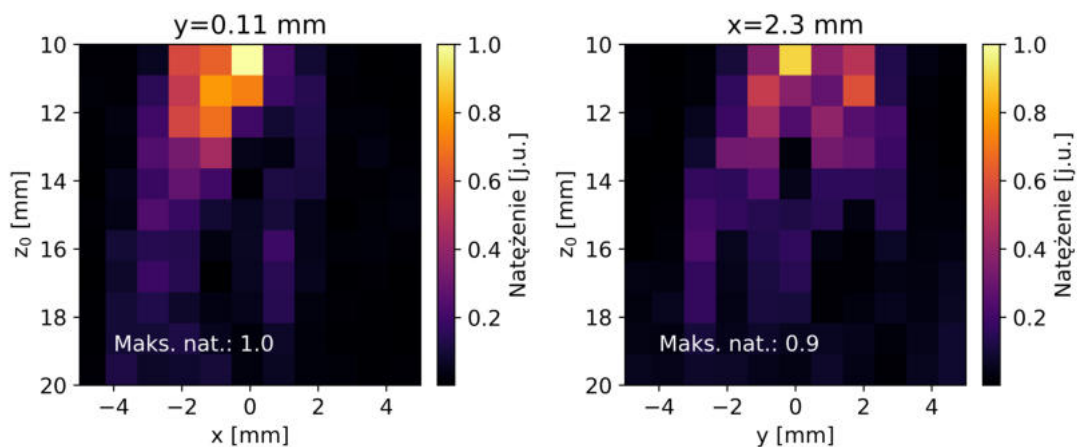
Ewaluacja struktury skupiającej na próbce – struktura SE

Zgodnie z projektem struktura S0 została wykorzystana do oświetlenia umieszczonej około 100 mm dalej struktury SE (około 89 mm za ogniskiem S0). Następnym krokiem było znalezienie położenia ogniska struktury SE. Korzystając dalej z danych ustalonych w projekcie, położenie ogniska struktury SE powinno znajdować się na płaszczyźnie równoległej do płaszczyzny struktury SE oddalonej o około 86,6 mm (wzdłuż osi z) i przesunięte o około 50 mm po osi x.

Pierwszy skan został dokonany w osiach z i x na wysokości y, odpowiadającej wysokości ogniska poprzedniej struktury (zakładając brak przesunięcia struktur S0 oraz SE w pionie względem siebie). Skan ten został wykonany na większym zakresie w obu osiach, jednocześnie zwiększając



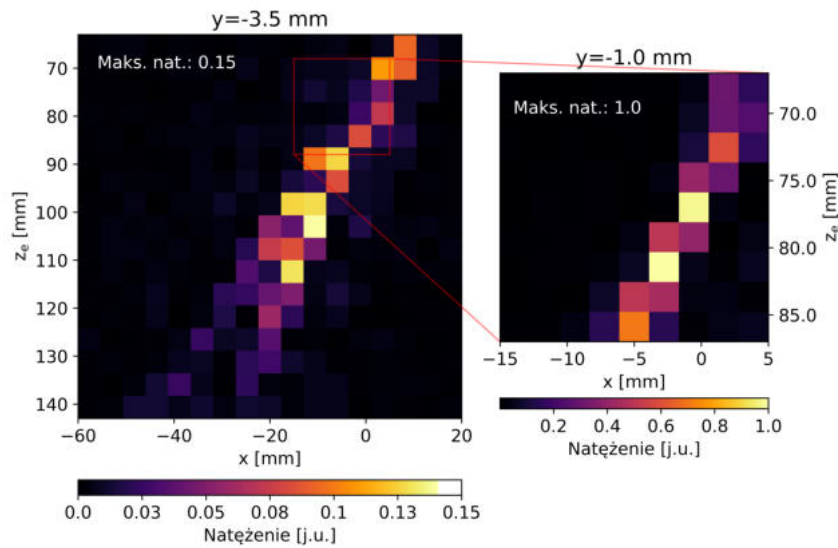
Rysunek 6.3: Poprzeczne przekroje natężenia wiązki za strukturą S_0 . Każdy z przekrojów odpowiada innej odległości z_0 względem struktury. Skala kolorystyczna i numeryczna każdego z paneli została dostosowana do najjaśniejszego pomiaru ($z_0 = 10\text{ mm}$)



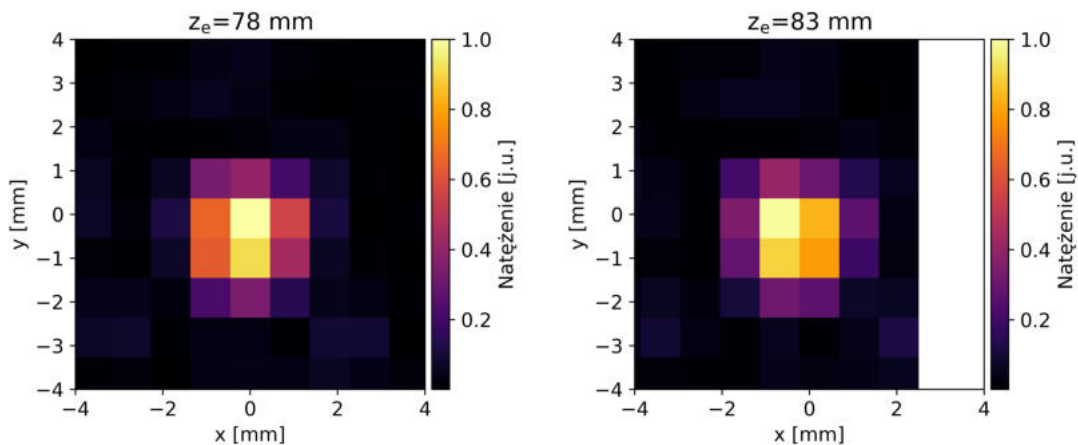
Rysunek 6.4: Skany natężenia wiązki wzdłuż osi optycznej za soczewką S0. Położenia wzdłuż osi optycznej (osie pionowe na wykresach) wyznaczone są względem najbliższej płaszczyzny soczewki S0. Oba wykresy korzystają ze wspólnej skali kolorystycznej.

krok do 5 mm. Wynik skanowania został zaprezentowany na lewym panelu rys. 6.5.

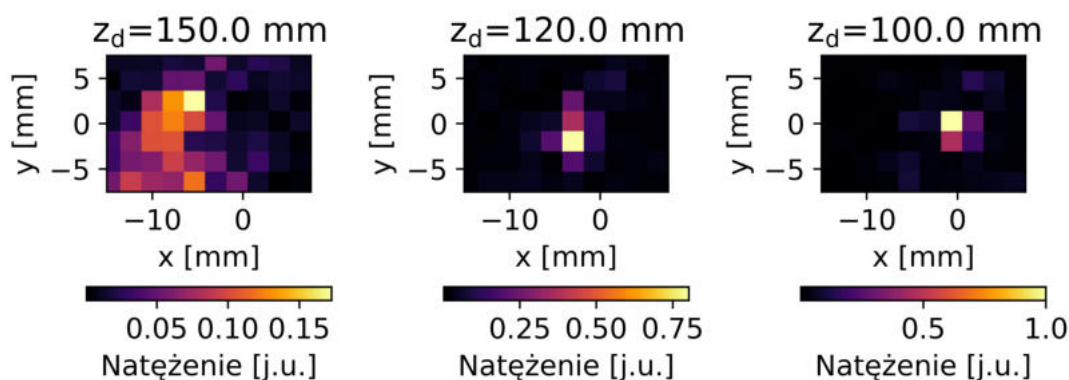
Położenia dalsze niż 86 mm od struktury SE na skanie zgrubnym xz wskazywały na większe natężenie. Jednak kształt rozkładu od odległości około $z_e = 90$ mm wykazywał znaczne poszerzenie mogące występować za potencjalnym ogniskiem. Korzystając z funkcjonalności live view, zidentyfikowano położenie znacznie wyższego natężenia w okolicach $z_e = 80$ mm w położeniu wyższym o około 2,5 mm (w osi y). Korzystając z wyznaczonego położenia w osi y wykonano bardziej precyzyjny skan – o kroku 2,5 mm. Wynik tego skanu umieszczono na prawym panelu rys. 6.5. Lewy panel tego obrazu zawiera również orientacyjne położenie (czerwony kwadrat) dla skanu precyzyjnego. Z racji dużo większego natężenia uzyskanego na skanie precyzyjnym, oba skany xz mają osobne skale kolorystyczne, ale wartości liczbowe na skali skanu zgrubnego zostały odniesione do wartości pomiaru skanu precyzyjnego. Wykorzystanie wspólnej skali kolorystycznej powodowało znaczące pogorszenie widoczności rozkładu na lewym panelu. Precyzyjny skan xz wykazał dwa potencjalne położenia ogniska. Korzystając ponownie z funkcjonalności live view, zidentyfikowano dwa położenia wysokiego natężenia $z_e = 78$ mm oraz $z_e = 83$ mm w różnych położeniach w osi y, które następnie wykorzystano do skanów w płaszczyźnie xy. Otrzymane skany xy zostały zaprezentowane na rys. 6.6. Oba skany wykazywały taki sam poziom natężenia w punkcie najwyższego natężenia. Jako eksperymentalne, orientacyjne położenie ogniska wyznaczono odległość $z_e = 80$ mm.



Rysunek 6.5: Rozkłady natężenia w płaszczyźnie xz za strukturą SE. Położenia wzdłuż osi optycznej (osie pionowe na wykresach) wyznaczone są względem najbliższej płaszczyzny soczewki SE. Po lewej stronie pierwszy, zgrubny skan, a po prawej dokładniejsze zbliżenie na poprawionej pozycji y . Na lewym panelu został również zaznaczony orientacyjnie obszar, w którym dokonano pomiaru precyzyjnego. Oba skany mają osobne skale kolorystyczne, ale wartości numeryczne dla skanu zgrubnego są odniesione do maksymalnej wartości uzyskanej w skanie precyzyjnym.



Rysunek 6.6: Rozkłady natężenia w płaszczyźnie xy w położeniach potencjalnego ogniska – $z_e = 78 \text{ mm}$ (lewy panel) oraz $z_e = 83 \text{ mm}$ (prawy panel). Oba panele mają wspólną skalę kolorystyczną oraz liczbową. Położenie zer osi zostało ustalone na położenie maksymalnego natężenia lewego panelu.



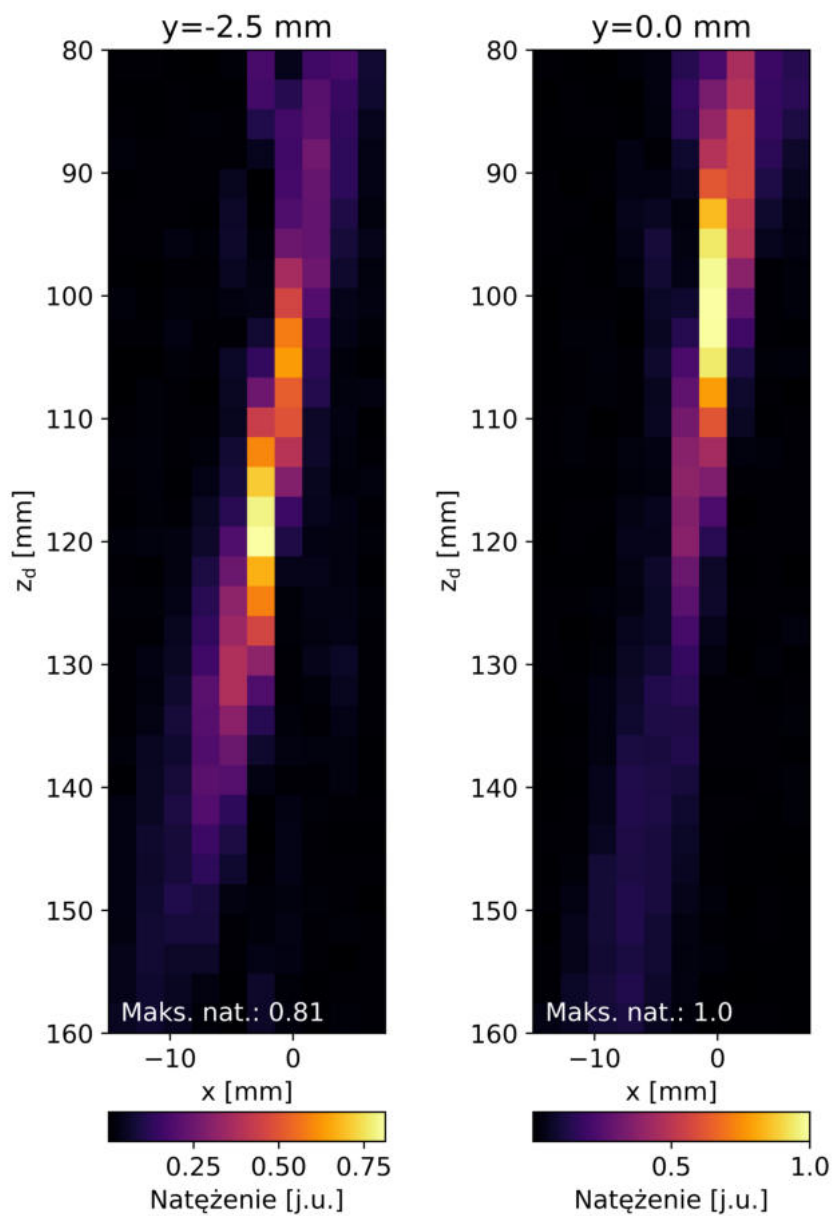
Rysunek 6.7: Rozkład natężenia w płaszczyźnie xy w położeniach potencjalnego ogniska struktury SD, od lewej: $z_d = 150$ mm, $z_d = 120$ mm oraz $z_d = 100$ mm. Panele mają osobne skale kolorystyczne i wspólną liczbową. Położenia zer osi zostały ustalone na położenie maksymalnego natężenia prawego panelu.

Ewaluacja struktury zbierającej promieniowanie z próbki – struktura SD

W zaprojektowanym układzie pomiarowym próbka powinna zostać umieszczona w płaszczyźnie ogniska struktury SE. Na potrzeby ewaluacji zestawu struktur możliwe jest ustawienie zwierciadła płaskiego w miejscu próbki. Niestety, z uwagi na geometrię układu oraz rozmiar detektora, przeskanowanie detektorem rozkładu powstającego za strukturą SD jest niemożliwe. Dlatego do ewaluacji struktury SD ustawiono ją na przedłużeniu wiązki pochodzącej ze struktury SE, zmieniając układ z odbiciowego na transmisyjny. Struktura SD została umiejscowiona symetrycznie względem otrzymanego ogniska struktury SE – czyli w odległości dwukrotnie większej niż odległość między strukturą SE a jej ogniskiem (podwójne przesunięcie o około 50 mm w osi x i 80 mm w osi z).

Ewaluację struktury SD rozpoczęto od skanów rozkładów natężenia w płaszczyznach xy umiejscowionych w różnych odległościach wzdłuż potencjalnej osi optycznej. Skany xy powtarzano co około 5 mm od odległości około $z_d = 160$ mm do $z_d = 80$ mm. Wyniki dla położenia ogniska zgodnie z projektem ($z_d = 150$ mm) oraz dwóch położen z najwyższym zmierzonym natężeniem ($z_d = 120$ mm i $z_d = 100$ mm) przedstawiono na rys. 6.7.

Oba skany przedstawiające najwyższe wartości natężenia zostały zanotowane na nieco różnych wysokościach. Dlatego wykonano również dwa skany w płaszczyznach xz, po jednym w obu pozycjach. Rys. 6.8 prezentuje wizualizację obu.



Rysunek 6.8: Rozkład natężenia xz wzdłuż geometrycznej osi optycznej struktury SD. Skany wykonano w płaszczyznach przesuniętych o 2,5 mm. Oba skany wykorzystują odrębne skale kolorystyczne i wspólne skale liczbowe.

Tabela 6.1: Podsumowanie położeń ognisk za strukturami zgodnie z projektem oraz wynikające z eksperymentu. Odległości podano w milimetrach. Odległości dla eksperymentu podane względem najbliższej płaszczyzny struktury.

	S0	SE	SD
Projekt	11,1	86,6	150,0
Eksperyment	10,0	80,0	100,0/120,0

6.3 Podsumowanie uzyskanych wyników

Jak zostało to wcześniej wspomniane, porównanie wyników eksperymentu z projektem jest obciążone nieodłącznym błędem wynikającym z braku fizycznego rozmiaru struktur wzdłuż osi propagacji („grubość” struktury) w procesie projektowania. O ile w przypadku struktur dla światła widzialnego odległości obrazowania wielkości milimetrów są znacznie większe niż niezbędne grubości struktur, tak dla promieniowania sub-terahercowego i terahercowego dla tych samych odległości obrazowania proporcje są znacznie większe.

Przedstawione skany rozkładów natężenia w płaszczyźnie xy potencjalnych ognisk struktur pokazują pojedyncze punkty wysokiego – względem mierzonego otoczenia – natężenia. Punkty wykazywały wielkości do 2,5 mm (wielkość pojedynczej anteny detektora). Skany wzdłuż osi z pozwoliły na wstępne określenie położeń potencjalnych ognisk. Podsumowanie otrzymanych w eksperymencie położeń potencjalnych ognisk wraz z odpowiadającymi odległościami projektowymi zostało umieszczone w tabeli 6.1. Porównane odległości wykazują rosnące przesunięcie między spodziewanym położeniem ognisk, a oszacowanym z eksperymentu. Położenia uzyskane dla struktur S0 oraz SE mogą wynikać z potencjalnych błędów położenia elementów w układzie. Wartość dla struktury SD została przyjęta na podstawie maksymalnego zarejestrowanego natężenia. O ile w przypadku struktur S0 oraz SE kształt rozkładu mógł wskazywać na położenie potencjalnego ogniska (przewężenie), tak w przypadku struktury SD otrzymano pochyłą linię natężenia z dwoma potencjalnymi kandydatami na ognisko, wynikającymi wyłącznie z wartości natężenia. Z perspektywy wykorzystania struktur w odbiciowym układzie skanującym, położenie maksymalnego natężenia jest istotne. Wyznacza ono miejsce położenia detektora w układzie odbiciowym. Ze względu na potencjalne straty wywołane właściwościami mierzonego materiału w odbiciowym układzie skanującym, wykorzystanie maksymalnego potencjalnego natężenia jest niezbędne w celu zwiększenia dynamiki pomiaru. Pochylenie linii natężenia za strukturą SD wynika najpewniej z drobnego przesunięcia struktury oraz niepoosiowego charakteru struktury.

Rozdział 7

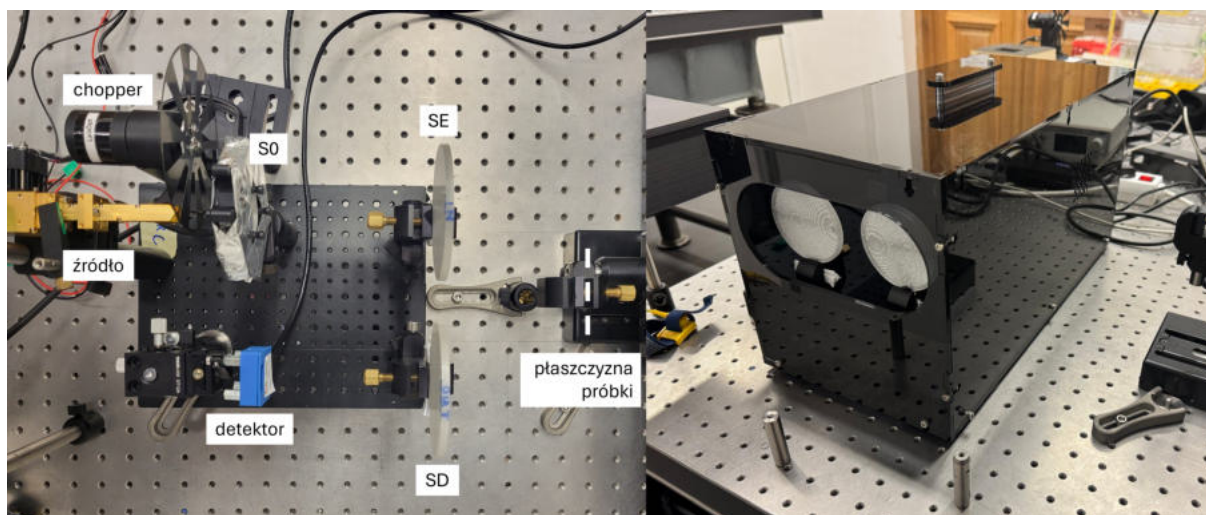
Demonstrator

Na podstawie przeanalizowanych w rozdziale 5 pomiarów możemy stwierdzić, iż rozkłady natężenia uzyskane ze struktur segmentowych nie są wystarczająco jednorodne, aby znaleźć zastosowanie w układzie skanującym. Dużego rozmiaru spekle oraz niechciane interferencje powodowałyby uzyskiwanie z próbki odpowiedzi zależnej od rozkładu spekli i interferencji struktury oświetlającej – zależność natężenia od położenia wewnątrz oświetlonej powierzchni. Pozostaje również potencjalny problem z mocą wykorzystywanego źródła i rozłożeniem jej na większej powierzchni próbki. Dlatego do budowy demonstratora wykorzystano pozaosiowe struktury punktowe przebadane w rozdziale 6.

Po zestawieniu elementów demonstratora przeprowadzono skany kilku obiektów: zwierciadło metalizowane, metalowa płytką z prostokątnymi otworami określonych rozmiarów, pastylka materiału polimerowego wydrukowana za pomocą drukarki 3D oraz fantom skóry z zatopionymi wydrukowanymi pastylkami polimeru.

7.1 Opis układu demonstratora

Układ pomiarowy wykorzystany w budowie demonstratora wykorzystuje elementy układu pomiarowego z rozdziału 6. Zbudowany demonstrator jest układem pracującym w reżimie odbiciowym. Promieniowanie wytworzone przez zestaw oscylator-powielacz po modulacji przez chopper jest skupiane w punkt za strukturą S0, aby następnie oświetlić strukturę SE. Struktura SE tworzy pozaosiowo oświetlenie punktowe w płaszczyźnie próbki. Przez umieszczenie próbki na stolikach przesuwnych możliwe jest skanowanie powierzchni próbki. Sygnał powstały z odbicia od próbki



Rysunek 7.1: Po lewej zdjęcie układu na stole laboratoryjnym z opisanymi elementami układu. Po prawej demonstrator w obudowie.

jest następnie zbierany przez strukturę SD, która skupia go na detektorze. Do układu demonstratora została również zaprojektowana obudowa. Rys. 7.1 prezentuje zdjęcie układu demonstratora na stole laboratoryjnym oraz zdjęcie demonstratora w zaprojektowanej obudowie.

7.2 Opis oraz przygotowanie próbek

W układzie przebadano następujące próbki:

1. Zwierciadło poztłacane o średnicy 3 cali (zdjęcie na rysunku 7.2 (a)).
2. Metalowa płytką z prostokątnymi otworami imitująca wzorec USAF (zdjęcie na rysunku 7.3 (a)) ze szczelinami w rozmiarach 5 mm, 4 mm oraz 3 mm. Szczeliny oddalone są o tę samą odległość, co odpowiadające im szerokością szczeliny.
3. Pastyłka polimeru drukowanego, przymocowana na taśmie aluminiowej (zdjęcie na rysunku 7.4 (a)). Taśma została przyklejona do płaskiej płytki, również wydrukowanej za pomocą drukarki 3D. Pastyłka o średnicy 13 mm została wykonana z materiału ASA marki Rosa3D.
4. Fantom (zdjęcie na rysunku 7.5 (a)) wykonany z mieszaniny TX-151 z wodą umieszczonych w foremce. W mieszaninie zatopione zostały również pastylki z materiałów wykorzystywanych do druku 3D o średnicy 13 mm. Pastyłki (w kolejności z rysunku lewa góra, lewa dół,

prawa) wykonano z PC (od OrbiTech), BVOH (od Fiberlogy), oraz PP Pegasus (od Form-Futura). Proszek TX-151 został wymieszany z wodą w proporcjach wagowych 1:5. Ramka miała wysokość i grubość 10 mm, wewnętrzny wymiar był równy 35 x 45 mm i została ona wykonana z filamentu ASA (od Fiberlogy). Na ramce umieszczono dodatkowo dwa kawałki taśmy aluminiowej różnej długości. Aluminiowa taśma pozwalała na identyfikację położenia ramki na skanie rozkładu natężenia – wysoki współczynnik odbicia aluminium przekłada się na wysokie natężenie zarejestrowane na skanie. Głównym celem zarejestrowania odbicia od tej próbki było przedstawienie możliwości układu w kategorii rozróżniania obiektów o różnych (ale zbliżonych do siebie) właściwościach optycznych.

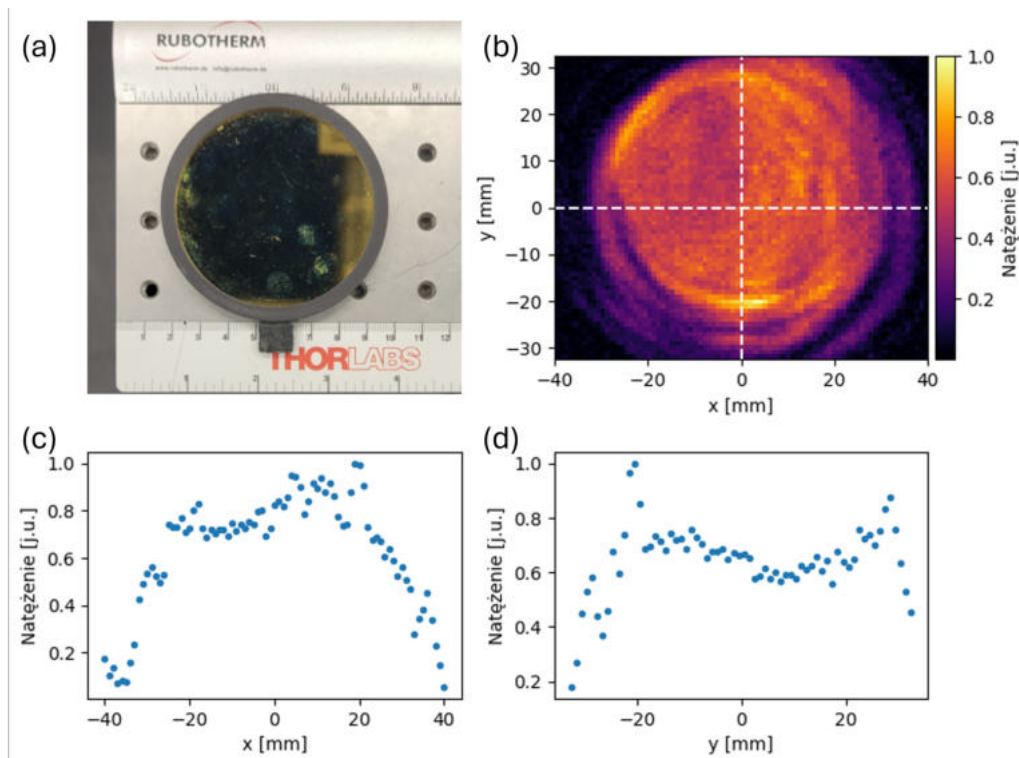
Zwierciadło zostało zastosowane jako próbka referencyjna. Pozwala ona na zweryfikowanie działania układu na płaskiej powierzchni o bardzo wysokim współczynniku odbicia. Płytką imitująca wzorec USAF, zgodnie z zastosowaniem oryginału, wykorzystana została do oszacowania rozdzielczości pomiaru. Pastylka na taśmie aluminiowej została wykonana w celu rejestracji sygnału odbitego od pojedynczej pastylki. Fantom TX-151 z pastylkami miał prezentować przykład fantomu skóry ze zmianami nowotworowymi.

Próbki fantomu na bazie wody charakteryzują się pewnego rodzaju niestabilnością – bez poprawnego ich zabezpieczenia, zawartość wody w próbce ulega zmianie w czasie przez parowanie. Dlatego próbka musi zostać przebadana jak najszybciej po jej wytworzeniu. W przypadku konieczności przechowywania próbki niezbędne jest jej zabezpieczenie na przykład za pomocą plastikowej folii opakowaniowej, która chroni próbkę przed utratą wody, a jest przezroczysta dla promieniowania THz. Dodatkowo, ze względu na sposób przygotowania próbek, ramka jest zabezpieczona od spodu fragmentem folii polipropylenowej.

7.2.1 Wyniki eksperymentalne

Wszystkie skany rozkładów natężenia rejestrowanych próbek zaprezentowane w tej sekcji zostały wykonane z krokiem 1 mm. Tak samo jak w przypadku pomiarów charakteryzujących punktowe struktury pozaosiowe (sekcja 6.1.1), zastosowano oświetlenie promieniowaniem o częstotliwości 260 GHz (długość fali 1,15 mm), z modulacją oświetlenia o częstotliwości 500 Hz za pomocą choppera, a detektor ustawiono na pobieranie 1000 próbek z częstotliwością próbkowania 10 kHz.

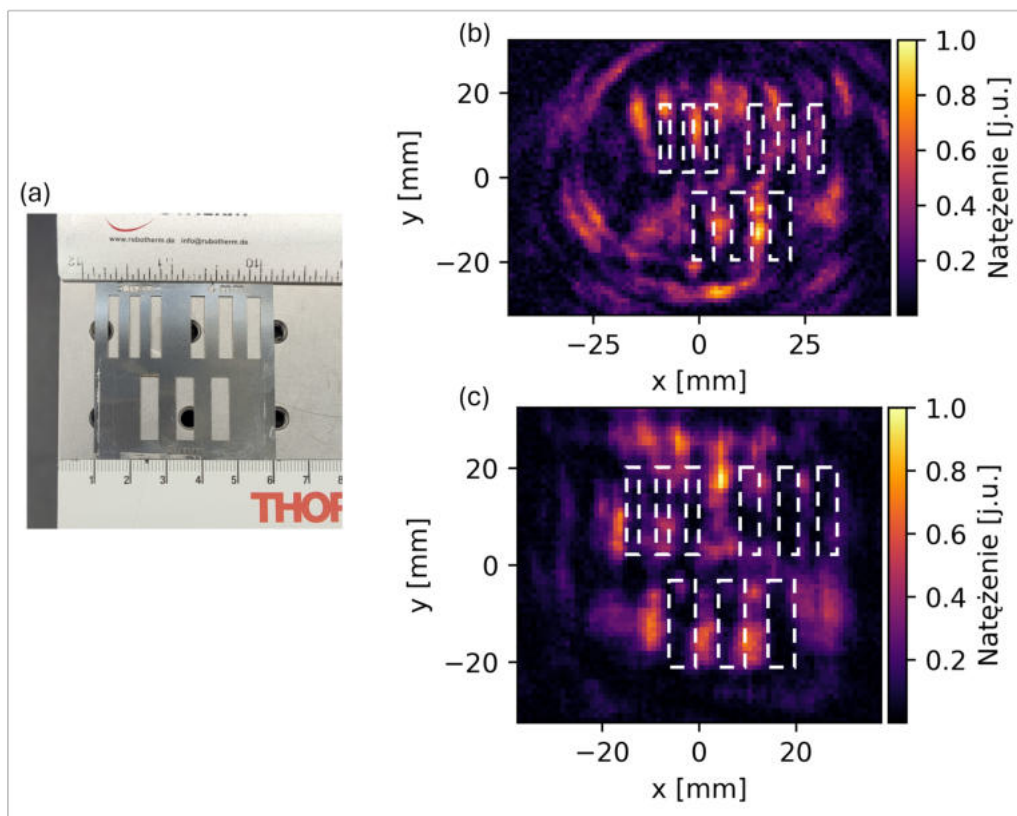
Pierwszą mierzoną próbką było 3-calowe poślacane zwierciadło. Rysunek 7.2 (a) przedsta-



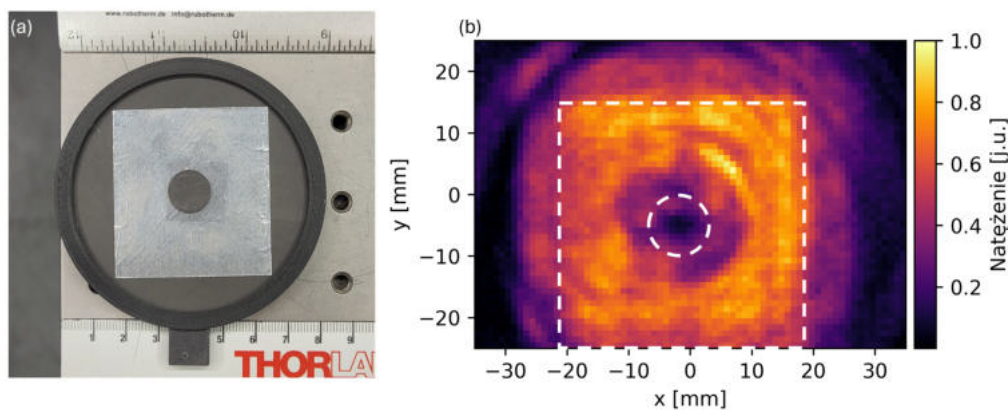
Rysunek 7.2: (a) Zdjęcie badanego pozlacanego zwierciadła w wydrukowanej ramce. (b) Skan rozkładu natężenia uzyskany za pomocą demonstratora (białe linie wyznaczają miejsca przekrojów wzdłuż osi x oraz y). (c) Przekrój wzdłuż osi x. (d) Przekrój wzdłuż osi y.

wia zdjęcie zmierzonego zwierciadła. Skan obejmował prostokątny obszar o bokach 80 mm na 65 mm. Na skanie rozkładu natężenia (rys. 7.2 (b)) widoczne są efekty dyfrakcyjne, wynikające z okrągłej apertury uchwytu. Mają one postać okrągłych interferencji najsilniej występujących na krawędziach. Przedstawiony skan powstał po kilku poprawkach, związanych z równoległością zwierciadła względem skanowanej płaszczyzny. W przypadku odchylenia zwierciadła, widoczny był gradient natężenia występujący w kierunku odchylenia. Jako dodatkową weryfikację poprawności położenia kąтового zwierciadła, wyznaczono również przekroje przez środek skanu (rys. 7.2 (c) oraz (d)). Symetryczność rozkładów wskazuje na poprawność ustawienia zwierciadła.

Kolejnym krokiem było wyznaczenie możliwej rozdzielczości pomiarowej układu. Wykorzystano do tego metalową płytkę (zaprezentowaną na rys. 7.3(a)) z prostokątnymi zestawami otworów o stałych rozmiarach, rozmieszczonych w stałych odległościach. Płytkę wzorowana jest na teście rozdzielczości USAF. Płytkę zawierała zestawy otworów o szerokości 5 mm, 4 mm oraz 3 mm (podczas gdy długość fali używanego promieniowania to 1,15 mm). Przeprowadzono dwa pomiary płytki typu USAF: z płytką umieszczoną na krążku wydrukowanym z materiału silnie absorbującego, umieszczonego w okrągłym uchwycie (zaprezentowany na rys. 7.3 (b)), oraz



Rysunek 7.3: (a) Zdjęcie próbki – metalowej płytki imitującej wzorzec USAF; lewa kolumna. (b) Skan wykonany przez demonstrator z próbką umieszczoną w uchwycie okrągłym z dopasowanymi kształtami i proporcjami otworów na płytce (oznaczone białymi, przerywanymi liniami). (c) Skan wykonany przez demonstrator z próbką umieszczoną na kwadratowej podstawie (brak okrągłej apertury) z dopasowanymi kształtami i proporcjami otworów na płytce (oznaczone białymi, przerywanymi liniami).



Rysunek 7.4: (a) Zdjęcie pastylki z materiału ASA na folii aluminiowej w okrągłym uchwycie. (b) Skan rozkładu natężenia tej próbki wykonany przez demonstrator z kształtami folii aluminiowej i pastylki zaznaczonymi białymi przerywanymi liniami.

z płytką umieszczoną na dużym prostokątnym kawałku PP (rys. 7.3 (c)).

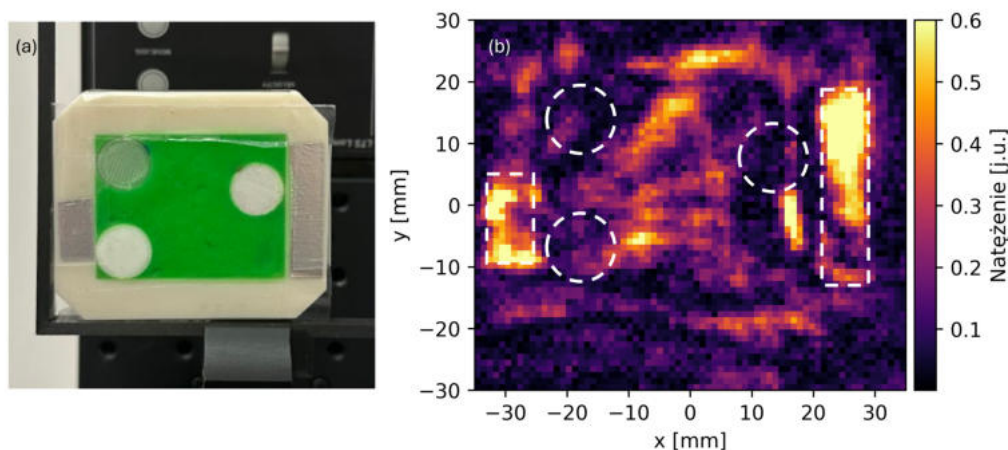
Skan w okrągłym uchwycie obejmował prostokątny obszar o bokach 90 mm na 65 mm. Na skanie widoczne są podobne efekty dyfrakcyjne jak w przypadku skanu zwierciadła. Próba dopasowania kształtów otworów płytki z odpowiadającymi im proporcjami pozwoliła na dobre dopasowanie otworów o wielkości 5 mm. Otwory o wielkości 4 mm oraz 3 mm są dobrze dopasowane na środku skanu, jednak odbiegają mocniej od dopasowania w położeniach bliższych krawędzi. Ponieważ mniej dopasowane otwory znajdowały się dalej od środka niż cała sekcja otworów o wielkości 5 mm, rozbieżność mogła być skutkiem efektów dyfrakcyjnych z okrągłej apertury.

Na potrzeby kolejnego skanu płytka metalowa została umieszczona na prostokątnym kawałku PP bez konkretnej apertury mogącej wpływać na wyniki pomiaru. Skan obejmował prostokątny obszar o bokach 75 mm na 65 mm. Zgodnie z założeniami, zarejestrowany rozkład natężenia charakteryzował się brakiem okrężnych interferencji. Otwory o szerokości 5 mm również w tym przypadku zostały odzwierciedlone najlepiej. Odzwierciedlenie otworów o wielkości 4 mm wyglądało lepiej niż w poprzednim przypadku. Dla szerokości 3 mm nie wszystkie otwory zostały poprawnie odzwierciedlone – środkowy otwór w tej serii otworów nie ma dobrego dopasowania. Prawa strona skanu wydaje się jednak ciemniejsza niż lewa strona, co może wskazywać na lekkie odchylenie próbki w osi pionowej i mogło również wpłynąć na dokładność rejestracji skrajnych otworów.

Następna próbka składała się z pastylki materiału ASA o średnicy 13 mm, przytwierdzonej do powierzchni pokrytej folią aluminiową. Eksperyment ten miał sprawdzić, czy z wykorzystaniem

Tabela 7.1: Właściwości optyczne materiałów wykorzystanych w skanowanych próbkach dla częstotliwości 260 GHz.

Materiał	Współczynnik załamania	Współczynnik absorpcji [cm^{-1}]
ASA	1,60	1,06
BVOH	1,64	1,21
PC	1,65	0,51
PP	1,34	0,12
woda + TX-151 (5:1)	2,14	47,09



Rysunek 7.5: (a) Fantom skóry z pastylkami materiałów drukowanych. (b) Skan fantomu wykonany demonstratorem z natężeniem przeskalowanym do 60% maksymalnego zarejestrowanego natężenia. Pozwala to na lepszą widoczność środka próbki, względem kawałków folii aluminiowej używanej do pozycjonowania, ale bardzo dużo odbijającej padającego promieniowania. Materiały pastylek: PC (lewa góra), BVOH (lewa dół) oraz PP (prawa). Na skanie zaznaczono białą, przerywaną linią położenia pastylek oraz taśmy aluminiowej.

demonstratora możliwe jest wyróżnienie elementu o znanych właściwościach optycznych. Współczynnik załamania oraz absorpcji materiału ASA zostały podane w tabeli 7.1. Zdjęcie przygotowanej próbki zostało zaprezentowane na rys. 7.4 (a). Na skanie rozkładu natężenia przedstawionym na rys. 7.4 (b) kształt pastylki jest dobrze widoczny. Niestety, krawędzie są nieco rozmazane, co wynika z wielkości plamki ogniskowej (według obliczeń wynikających z odległości teoretycznych i zarejestrowanych eksperymentalnie – plamka ogniskowa ma wielkość poniżej 3,5 mm). Rozmycie może być dodatkowo spowodowane wpływem okrągłej apertury, która wprowadza dodatkowe efekty dyfrakcyjne. Warto zauważyć, że kwadrat wyklejony z aluminium również jest łatwo zauważalny na tle plastikowego krążka, służącego za podstawkę, oraz okrągłej ramki. Skan obejmował prostokątny obszar o bokach 70 mm na 50 mm.

Ostatnia mierzona próbka składała się z zestawu pastylek różnych materiałów wykorzystywanych do druku 3D zatopionych w mieszaninie proszku TX-151 z wodą w proporcjach 1:5 imitującej

skórę. Pastylki wykonano z materiałów PC, BVOH oraz PP. Ich właściwości optyczne umieszczono w tabeli 7.1. Na ramce fantomu zostały umieszczone dwa kawałki taśmy aluminiowej ułatwiające orientację położenia elementów fantomu na skanie. Skan rozkładu natężenia uzyskany z demonstratora został umieszczony na rys. 7.5 (b) z natężeniem przeskalowanym do 60% maksymalnego zarejestrowanego natężenia. Skan obejmował prostokątny obszar o bokach 70 mm na 60 mm. Ponieważ próbka była zabezpieczona od strony skanowanej cienką folią PP, odkształcenia folii oraz nierówności pod folią są mocno widoczne w środku skanowanego obszaru. Położenia paszków aluminiowej taśmy były łatwo dostrzegalne. Położenia pastylek PC oraz PP są widoczne dzięki lokalnemu zmniejszeniu natężenia. W przypadku pastylki BVOH obniżenie natężenia nie jest aż tak znaczące. Należy podkreślić, że wszystkie pastylki posiadają mniejszy współczynnik załamania niż mieszanina proszku TX-151 z wodą, a zatem odbijają mniej promieniowania, co widać na zarejestrowanych rozkładach natężenia.

7.3 Wnioski

Zbudowany demonstrator pozwala na rejestrowanie obiektów wykonanych z materiałów o wysokim współczynniku odbicia, takich jak metal. Pozwala on również na rejestrowanie skanów obiektów złożonych z elementów o znaczących różnicach współczynników załamania i absorpcji, takich jak pastylki wykonane z materiałów stosowanych do druku 3D oraz substancji będącej mieszaniną proszku TX-151 oraz wody. Obrazy powstające ze skanowania rozkładów natężeń z wykorzystaniem demonstratora posiadają zakłócenia wynikające z efektów dyfrakcyjnych, występujących na używanych aperturach. Na podstawie wykonanych pomiarów możemy określić, że rozdzielczość demonstratora jest na poziomie od 3 do 4 mm. Jak już zostało wcześniej wspomniane, długość fali używanego promieniowania była równa 1,15 mm, natomiast wielkość plamki ogniskowej miała średnicę poniżej 3,5 mm. Rozdzielczość uzyskiwanych obrazów może zostać poprawiona przez zmniejszenie ogniska w płaszczyźnie próbki, stosując krótsze ogniskowe elementów dyfrakcyjnych albo zwiększając długość fali w układzie skanującym. Kątowe ustawienie powierzchni skanowanej próbki ma znaczący wpływ na jakość uzyskiwanego skanu, jednak pozwala na uzyskanie mniejszego układu optycznego.

Rozdział 8

Wnioski i podsumowanie

Powyższa praca zbadała możliwość wykorzystania struktur dyfrakcyjnych w odbiciowych układach terahercowych, wykorzystywanych do skanowania skóry w celu detekcji nowotworów. Opisano proces projektowania oraz wykonania zaprojektowanych struktur. Następnie przedstawiono w szczególności procedurę pomiarową wraz z wynikami ewaluacji eksperymentalnej wykonanych struktur. Na koniec przedstawiono układ demonstratora zbudowany na bazie jednego z zestawów wcześniej opisanych struktur oraz pomiary wykonane z jego wykorzystaniem.

Zaprojektowano i wykonano dwa rodzaje struktur: zestaw struktur mających na celu ukształtowanie promieniowania w znaczących rozmiarów kwadratowy rozkład jednorodnego natężenia oraz zestaw struktur skupiających promieniowanie w punkt na płaszczyźnie próbki (znajdującej się poza osią optyczną) oraz zbierających promieniowanie odbite od próbki w celu skupienia go na detektorze.

Powstało łącznie osiem struktur do oświetlenia jednorodnego, w tym jedna z nich pełniąca rolę struktury referencyjnej. Dwie ze wspomnianych struktur wykorzystywały zaprezentowany wcześniej algorytm opracowany z wykorzystaniem sieci neuronowych. Pozostałe pięć struktur zostało zaprojektowanych z wykorzystaniem autorskiej metody, dzielącej powierzchnię struktury na segmenty.

Do oświetlenia punktowego zaprojektowano i wykonano zestaw trzech struktur. Pierwsza struktura, soczewka o średnicy 20 mm, pozwalała na skrócenie układu przy jednoczesnym utrzymaniu pełnego oświetlenia struktury emiterowej. Struktura emiterowa skupiała promieniowanie na płaszczyźnie oddalonej o około 80 mm, ale w obszarze pozaosiowym. Ostatnia struktura, detektorowa, zbierała promieniowanie odbite od próbki w symetrycznej geometrii do struktury

emiterowej, aby skupić promieniowanie na detektorze umieszczonym za nią.

Na podstawie wyników z charakteryzacji wszystkich struktur, wybrano zestaw struktur punktowych do wykonania układu demonstratora. Demonstrator został skonstruowany z wykorzystaniem elementów układu pomiarowego wykorzystanych do charakterystyki struktur punktowych. Właściwości demonstratora zostały przebadane eksperymentalnie.

Przebadane struktury do oświetlenia jednorodnego pozwoliły na zwiększenie jednorodności uzyskiwanego rozkładu natężenia. Niestety, nie pozwoliły jednocześnie uzyskać wystarczającej redukcji spekli, aby zastosować je w układzie odbiciowym. Pomiarów struktur punktowych umożliwiły zweryfikowanie położenia powstających punktów ogniskowych. Pozwoliło to na zastosowanie ich w układzie demonstratora układu odbiciowego. Ostatecznie cały proces oraz wyniki eksperymentalne otrzymane z charakteryzacji układu demonstratora pozwalają stwierdzić, że została dowiedziona prawdziwość tezy, że: **możliwe jest zbudowanie układu skanującego dla zakresu promieniowania terahercowego w konfiguracji odbiciowej z użyciem struktur dyfrakcyjnych.**

Zaprezentowany układ demonstratora pozwala na obrazowanie próbek przez skanowanie. W przeciwieństwie do popularnych w publikacjach układów spektroskopowych, nie pozwala na zarejestrowanie pełnej informacji o odbitej fali terahercowej [80] – amplitudy i fazy. W zamian za to oferuje zwiększenie szybkości pomiaru przez brak konieczności próbkowania impulsu terahercowego, który jest integralną częścią pomiaru spektroskopowego. Dodatkowo mniejsza ilość komponentów pozwala na łatwiejsze zminiaturyzowanie układu. Jednocześnie przez zastosowanie przestrajanego źródła oraz szerokopasmowego detektora, możliwe jest opracowanie zestawu struktur dla różnych częstotliwości, a przez to praca na kilku zakresach z wykorzystaniem tego samego układu. Odbiciowy charakter zbudowanego układu pozwala na badanie potencjalnych próbek biologicznych [28]. Na podstawie zaprezentowanych pomiarów można stwierdzić, że układ pozwala na skanowanie obiektów o detalach większych niż 3 mm. Zgadza się to z teoretycznie wyznaczoną wielkością plamki o średnicy nieco poniżej 3,5 mm. W zdecydowany sposób można stwierdzić, że przy projektowej długości fali 1,15 mm oraz wielkości przystony rzędu 1,14, detale wielkości 4 mm są rozróżnialne.

Przedstawiona metoda projektowania struktur z segmentowaniem jest rozszerzeniem wcześniej znanych metod iteracyjnych. Podobnie jak w przypadku algorytmu Gerchberga-Saxtona [104] oraz algorytmu Fienupa [105] przedstawiony algorytm wykorzystuje koncept przejścia między dwoma płaszczyznami – układami współrzędnych. W przeciwieństwie do algorytmów

Gerchberga-Saxtona i Fienupa, zaproponowany algorytm do przejścia między płaszczyznami wykorzystuje propagację, tak jak algorytm opisany przez Dorscha i in. [106]. Do przeprowadzenia propagacji wykorzystano zmodyfikowaną propagację Fresnela zaproponowaną przez prof. Sypka [107]. Ostatnią zastosowaną modyfikacją był podział powierzchni struktury na segmenty, z których każdy mógł być optymalizowany osobno. Zaprezentowany algorytm był wcześniej opublikowany. [109]. Wyniki eksperymentalne wskazują na wzrost jednorodności – uzyskano 17% niższe odchylenie standardowe oraz 45% mniejsze IQR względem opracowanej struktury referencyjnej. Struktury segmentowe wykazały również lepsze uformowanie rozkładu przez zwiększoną wartość SNR nawet do 68%. Jednocześnie zastosowanie struktur segmentowych zmniejszyło średnią wartość zarejestrowanego natężenia nawet o 54%.

W procesie projektowania struktur segmentowych wydzielone segmenty były od siebie niezależne. Uzyskane z wykorzystaniem tych struktur rozkłady natężenia wykazują dość duże spekle. Ponieważ efekt ten jest zależny częściowo od losowego rozkładu fazy używanego na wejściu procesu optymalizacyjnego, istnieje możliwość, że wzajemne uzależnienie kierunku optymalizacji modulacji fazy konkretnych segmentów od rozkładów natężenia uzyskiwanych z pozostałych segmentów mogłoby wpłynąć pozytywnie na zmniejszenie efektu spekowego.

Z uwag praktycznych odnośnie demonstratora, należy wziąć pod uwagę uściślenie położenia konkretnych komponentów oraz płaszczyzny pomiarowej. Położenie płaszczyzny próbki, a tym samym punktu skupienia na niej natężenia, jest konkretnie określone. Ponieważ położenie to znajduje się w wolnej przestrzeni za strukturą emiterową, niezbędne jest właściwe umiejscowienie próbki. W przypadku wykorzystania układu w postaci głowicy skanującej, odległość może być określona z wykorzystaniem odpowiedniego uchwytu lub, narażając układ na zmniejszenie wydajności przez odbicia Fresnelowskie, zastosowanie okienka, choć z drugiej strony zastosowanie okienka może pomóc w zwiększeniu rozdzielczości. Elementy układu również wymagają poprawnego ustawienia nie tylko w odpowiedniej pozycji względem siebie, ale również pod względem kątowym. W trakcie ustawiania elementów optycznych dla promieniowania widzialnego, możliwe jest posługiwanie się widoczną wiązką. W zakresach podczerwonym i ultrafioletowym dostępne są karty do podglądu rozkładu promieniowania w przestrzeni. Niestety, promieniowanie teraherrowe nie doczekało się jeszcze takich urządzeń. W związku z tym konieczne jest opracowanie zestawu mocowań redukujących część stopni swobody przy wstawianiu elementów w układ – w szczególności obrotu elementów względem osi optycznej.

Niniejsza praca pozwala wyznaczyć potencjalne kierunki rozwoju na przyszłe badania. W pro-

jektowaniu struktur segmentowych wartym uwagi jest zaprezentowany pomysł uniezależnienia poszczególnych segmentów. Kolejnym interesującym tematem jest sam podział struktur na segmenty o konkretnych kształtach. Ponieważ segmenty mogą mieć dowolne kształty, wartym rozważenia jest podział na pierścienie w przypadku oświetlenia struktury symetrycznym i niepłaskim frontem falowym. Rozmiary pierścieni mogą być również zależne od ilości natężenia dostępnego w danych obszarze – np. dla oświetlenia o profilu gaussowskim, obszar można podzielić na pierścienie ograniczone okręgami o promieniach będącymi wielokrotnościami odchylenia standardowego od średniej σ . W przypadku demonstratora i układu punktowego, wartym dalszego badania jest próba zbudowania zestawu wymiennych struktur pozwalających na rozszerzenie badanego zakresu spektralnego. Ponadto warto również rozszerzyć zbiór przebadanych próbek wliczając w to różne modele fantomów oraz porównanie wyników pomiarowych z THz-TDS wykonanych na tej samej próbce.

Jak wspomniano w rozdziale 2, badania przedstawione w powyższej pracy zostały opublikowane w artykułach naukowych:

- **Surma, M. J.**, Kałuża, M., Komorowski, P., i Siemion, A., „Segmentation of THz holograms for homogenous illumination” *Scientific Reports*, 14, (2024),
- **Surma, M. J.**, Kałuża, M., Czerwińska, P., Komorowski, P., i Siemion, A., „Neural-network based approach to optimize THz computer generated holograms”, *Photonics Letters of Poland*, 13(4), (2021),
- Siemion, A., Komorowski, P., **Surma, M. J.**, Ducin, I., Sobotka, P., Walczakowski, M., i Czerwińska, E., „Terahertz diffractive structures for compact in-reflection inspection setup”, *Optics Express*, 28, (2020).

Ponadto badania te przyczyniły się również do powstania następujących artykułów pokonferencyjnych:

- **Surma, M. J.**, Kałuża, M., Komorowski, P., i Siemion, A., „Segmentation of THz holograms for homogenous illumination. *Scientific Reports*”, 14, (2024).

Część badań zawartych w tej pracy była przeprowadzona w ramach projektu pt. „Terahercowe wielozadaniowe dyfrakcyjne urządzenie poprawiające obrazowanie nowotworów skóry (T-SKIN)” w ramach programu LIDER (LIDER/11/0036/L-9/17/NCBR/2018), w którym brałem udział jako wykonawca.

Doświadczenie zdobyte w pracy zostało również wykorzystane przy stworzeniu artykułów naukowych:

- Kałuża, M., Komorowski, P., **Surma, M. J.**, Nieradka, A., Zagrajek, P., i Siemion, A., „Advanced diffractive optical elements implementing multiple-input spatial multiplexing of terahertz radiation”, *Optics and Lasers in Engineering*, 184(1), (2025),
- Komorowski, P., Zagrajek, P., Kałuża, M., Kołodziejczyk, A., Ertman, S., Nieradka, A., **Surma, M. J.**, i Siemion, A., „Subwavelength Imaging in Sub-THz Range Using Dielectric Waveguide”, *Sensors*, 25(2), (2025),
- Komorowski, P., Kałuża, M., **Surma, M. J.**, i Siemion, A., „3D printed diffractive lenses operating at 1 THz”, *Lithuanian Journal of Physics*, 63(3), (2023),
- Komorowski, P., Czerwińska, P., Kałuża, M., **Surma, M. J.**, Zagrajek, P., Sobczyk, A., Ciurapiński, W., Piramidowicz, R., i Siemion, A., „Frequency Division Multiplexing of Terahertz Waves Realized by Diffractive Optical Elements”, *Applied Sciences-Basel*, 11(14), (2021),
- Komorowski, P., Czerwińska, P., **Surma, M. J.**, Zagrajek, P., Piramidowicz, R., i Siemion, A., „Three-focal-spot terahertz diffractive optical element-iterative design and neural network approach”, *Optics Express*, 29(7), (2021),
- Siemion, A., **Surma, M. J.**, Komorowski, P., Zagrajek, P., Walczakowski, M., Melaniuk, A., Ducin, I., Sobotka, P., i Czerwińska, E., „Paraffin diffractive lens for sub-terahertz range simple and cost efficient solution”, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 11(4), (2021),
- Komorowski, P., **Surma, M. J.**, Walczakowski, M., Zagrajek, P., i Siemion, A., „Off-axis diffractive optics for compact terahertz detection setup”, *Applied Sciences-Basel*, 10(23), (2020),
- **Surma, M. J.**, Komorowski, P., Neneman, M., i Siemion, A., „Chocolate terahertz fresnel lens”, *Photonics Letters of Poland*, 12(4), (2020).

Pośrednio, doświadczenie z powyższej pracy przyczyniło się również do powstania następujących artykułów pokonferencyjnych:

- Kałuża, M., Komorowski, P., Nieradka, A., **Surma, M. J.**, Zagrajek, P., i Siemion, A., „MIMO Systems for 6G THz Data Transmission Links”, Proceedings of 25th International Microwave and Radar Conference (MIKON 2024),
- Nieradka, A., Komorowski, P., Kałuża, M., **Surma, M. J.**, i Siemion, A., „Terahertz optical setups using spatial filtering methods to image low-absorbing samples”, Proceedings of SPIE: Terahertz Photonics III,
- Kałuża, M., **Surma, M. J.**, Komorowski, P., Zagrajek, P., i Siemion, A., „3D printed diffractive optical elements for THz spatial multiplexing”, 48th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, IRMMW-THz 2023,
- **Surma, M. J.**, Kałuża, M., Czerwińska, P., Komorowski, P., Zagrajek, P., i Siemion, A., „Iterative design of multiple-input-single-output structures for THz signal multiplexing”, 48th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, IRMMW-THz 2023 - Proceedings,
- Kałuża, M., **Surma, M. J.**, Komorowski, P., Walczakowski, M., i Siemion, A., „THz optical properties of different 3D printing polymer materials in relation to FTIR, Raman, and XPS evaluation techniques”, 47th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, IRMMW-THz 2022 - Proceedings,
- **Surma, M. J.**, Kałuża, M., Pawel, K., Zagrajek, P., i Siemion, A., „Terahertz hologram for homogeneous illumination”, 47th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, IRMMW-THz 2022 - Proceedings,
- Siemion, A., **Surma, M. J.**, Komorowski, P., Ducin, I., i Sobotka, P., „Terahertz diffractive optics: Different way of thinking”, SPIE Proceedings: Terahertz Emitters, Receivers, and Applications XI,
- Siemion, A., Melaniuk, A., Zagrajek, P., Komorowski, P., Walczakowski, M., **Surma, M. J.**, Sobotka, P., Ducin, I., i Czerwinska, E., „THz diffractive lens manufactured using 3D printer working for 0.6 THz”, 2020 23rd International Microwave and Radar Conference (MIKON),
- Grabowski, D., i **Surma, M. J.**, „Feasibility of UV induced decomposition of High Test Peroxide in spacecraft propulsion”, Proceedings of the International Astronautical Congress.

Badania te pozwoliły także na zdobycie doświadczenia niezbędnego do udziału w innych projektach naukowych:

- „Optyczny terahercowy układ typu MIMO – algorytmy generacji i badanie funkcjonowania kompaktowych struktur dyfrakcyjnych i hybrydowych”, w ramach projektu OPUS 2019/35/B/ST7/03909 – wykonawca,
- „Wykorzystanie właściwości spolaryzowanego oświetlenia i metody pola jasnego i pola ciemnego do terahercowego obrazowania fantomu tkanek zdrowych i zmienionych nowotworowo”, FOTECH-1 – wykonawca,
- „Metoda kontrastu fazowego w THz układzie obrazującym”, grant RND Nauki Fizyczne Politechniki Warszawskiej 2022 – kierownik,
- „Terahercowe właściwości optyczne materiałów do druku 3D do wykorzystania w soczewce typu dublet achromatyczny”, grant RND Nauki Fizyczne Politechniki Warszawskiej 2021 – kierownik.

Bibliografia

- [1] Y.-S. Lee, *Principles of terahertz science and technology*, vol. 170. Springer Science & Business Media, 2009.
- [2] E. Berry, G. C. Walker, A. J. Fitzgerald, N. N. Zinov'ev, M. Chamberlain, S. W. Smye, R. E. Miles, and M. A. Smith, "Do in vivo terahertz imaging systems comply with safety guidelines?," *Journal of Laser Applications*, vol. 15, no. 3, pp. 192–198, 2003.
- [3] N. Bourne, R. H. Clothier, M. D'Arienzo, and P. Harrison, "The effects of terahertz radiation on human keratinocyte primary cultures and neural cell cultures," *Alternatives to Laboratory Animals*, vol. 36, no. 6, pp. 667–684, 2008.
- [4] O. Zeni, G. P. Gallerano, A. Perrotta, M. Romanò, A. Sannino, M. Sarti, M. D'Arienzo, A. Doria, E. Giovenale, A. Lai, G. Messina, and M. R. Scarfi, "Cytogenetic observations in human peripheral blood leukocytes following in vitro exposure to THz radiation: a pilot study," *Health Physics*, vol. 92, no. 4, p. 349, 2007.
- [5] H. Hintzsche, C. Jastrow, B. Heinen, K. Baaske, T. Kleine-Ostmann, M. Schwerdtfeger, M. K. Shakfa, U. Kärst, M. Koch, T. Schrader, and H. Stopper, "Terahertz radiation at 0.380 THz and 2.520 THz does not lead to DNA damage in skin cells in vitro," *Radiation Research*, vol. 179, no. 1, pp. 38–45, 2012.
- [6] S. Koyama, E. Narita, Y. Shimizu, T. Shiina, M. Taki, N. Shinohara, and J. Miyakoshi, "Twenty four-hour exposure to a 0.12 THz electromagnetic field does not affect the genotoxicity, morphological changes, or expression of heat shock protein in HCE-t cells," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 13, no. 8, p. 793, 2016. Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

- [7] R. Williams, A. Schofield, G. Holder, J. Downes, D. Edgar, P. Harrison, M. Siggel-King, M. Surman, D. Dunning, S. Hill, D. Holder, F. Jackson, J. Jones, J. McKenzie, Y. Saveliev, N. Thomsen, P. Williams, and P. Weightman, "The influence of high intensity terahertz radiation on mammalian cell adhesion, proliferation and differentiation," *Physics in Medicine & Biology*, vol. 58, no. 2, p. 373, 2012. Publisher: IOP Publishing.
- [8] G. J. Wilmink, B. D. Rivest, B. L. Ibey, C. L. Roth, J. Bernhard, and W. P. Roach, "Quantitative investigation of the bioeffects associated with terahertz radiation," in *Optical Interactions with Tissues and Cells XXI*, vol. 7562, pp. 139–148, SPIE, 2010.
- [9] G. J. Wilmink and J. E. Grundt, "Invited review article: Current state of research on biological effects of terahertz radiation," *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, vol. 32, no. 10, pp. 1074–1122, 2011.
- [10] R. M. Woodward, B. E. Cole, V. P. Wallace, R. J. Pye, D. D. Arnone, E. H. Linfield, and M. Pepper, "Terahertz pulse imaging in reflection geometry of human skin cancer and skin tissue," *Physics in Medicine & Biology*, vol. 47, no. 21, p. 3853, 2002.
- [11] R. M. Woodward, V. P. Wallace, B. E. Cole, R. J. Pye, D. D. Arnone, E. H. Linfield, and M. Pepper, "Terahertz pulse imaging in reflection geometry of skin tissue using time-domain analysis techniques," in *Clinical Diagnostic Systems: Technologies and Instrumentation*, vol. 4625, pp. 160–169, SPIE, 2002.
- [12] C. J. Strachan, P. F. Taday, D. A. Newnham, K. C. Gordon, J. A. Zeitler, M. Pepper, and T. Rades, "Using terahertz pulsed spectroscopy to quantify pharmaceutical polymorphism and crystallinity," *Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 94, no. 4, pp. 837–846, 2005. _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/jps.20281>.
- [13] V. P. Wallace, A. J. Fitzgerald, E. Pickwell, R. J. Pye, P. F. Taday, N. Flanagan, and T. Ha, "Terahertz pulsed spectroscopy of human basal cell carcinoma," *Applied Spectroscopy*, vol. 60, no. 10, pp. 1127–1133, 2006. Publisher: Society for Applied Spectroscopy.
- [14] P. C. Ashworth, E. Pickwell-MacPherson, E. Provenzano, S. E. Pinder, A. D. Purushotham, M. Pepper, and V. P. Wallace, "Terahertz pulsed spectroscopy of freshly excised human breast cancer," *Optics Express*, vol. 17, no. 15, pp. 12444–12454, 2009. Publisher: Optica Publishing Group.

- [15] A. J. Fitzgerald, V. P. Wallace, M. Jimenez-Linan, L. Bobrow, R. J. Pye, A. D. Purushotham, and D. D. Arnone, "Terahertz pulsed imaging of human breast tumors," *Radiology*, vol. 239, no. 2, pp. 533–540, 2006. Publisher: Radiological Society of North America.
- [16] H. Chen, T.-H. Chen, T.-F. Tseng, J.-T. Lu, C.-C. Kuo, S.-C. Fu, W.-J. Lee, Y.-F. Tsai, Y.-Y. Huang, E. Y. Chuang, Y.-J. Hwang, and C.-K. Sun, "High-sensitivity in vivo THz transmission imaging of early human breast cancer in a subcutaneous xenograft mouse model," *Optics Express*, vol. 19, no. 22, pp. 21552–21562, 2011. Publisher: Optica Publishing Group.
- [17] E.-A. Jung, M.-H. Lim, K.-W. Moon, Y.-W. Do, S.-S. Lee, H.-W. Han, H.-J. Choi, K.-S. Cho, and K.-R. Kim, "Terahertz pulse imaging of micro-metastatic lymph nodes in early-stage cervical cancer patients," *Journal of the Optical Society of Korea*, vol. 15, no. 2, pp. 155–160, 2011. Publisher: Optical Society of Korea.
- [18] W. Shi, Y. Wang, L. Hou, C. Ma, L. Yang, C. Dong, Z. Wang, H. Wang, J. Guo, S. Xu, and J. Li, "Detection of living cervical cancer cells by transient terahertz spectroscopy," *Journal of Biophotonics*, vol. 14, no. 1, p. e202000237, 2021. _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/jbio.202000237>.
- [19] L. H. Eadie, C. B. Reid, A. J. Fitzgerald, and V. P. Wallace, "Optimizing multi-dimensional terahertz imaging analysis for colon cancer diagnosis," *Expert Systems with Applications*, vol. 40, no. 6, pp. 2043–2050, 2013.
- [20] F. Wahaia, G. Valusis, L. M. Bernardo, A. Almeida, J. A. Moreira, P. C. Lopes, J. Macutkevici, I. Kasalynas, D. Seliuta, R. Adomavicius, R. Henrique, and M. Lopes, "Detection of colon cancer by terahertz techniques," *Journal of Molecular Structure*, vol. 1006, no. 1, pp. 77–82, 2011.
- [21] G. Reese, C. Reid, R. Goldin, M.-A. Tran-Dang, A. Fitzgerald, P. Tekkis, and V. P. Wallace, "Using terahertz pulsed imaging (TPI) to identify colonic pathology.," in *2008 33rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, pp. 1–1, 2008. ISSN: 2162-2035.
- [22] S. Sung, S. Selvin, N. Bajwa, S. Chantra, B. Nowroozi, J. Garritano, J. Goell, A. D. Li, S. X. Deng, E. R. Brown, W. S. Grundfest, and Z. D. Taylor, "THz imaging system for in vivo human cornea," *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 8, no. 1, pp. 27–37, 2018.

- [23] D. B. Bennett, Z. D. Taylor, P. Tewari, R. S. Singh, M. O. Culjat, W. S. G. M.d, D. J. Sassoon, R. D. Johnson, J.-P. Hubschman, and E. Brown, "Terahertz sensing in corneal tissues," *Journal of Biomedical Optics*, vol. 16, no. 5, p. 057003, 2011. Publisher: SPIE.
- [24] J. Y. Suen, P. Tewari, Z. D. Taylor, W. S. Grundfest, H. Lee, E. R. Brown, M. O. Culjat, and R. S. Singh, "Towards medical terahertz sensing of skin hydration," in *Medicine Meets Virtual Reality 17*, pp. 364–368, IOS Press, 2009.
- [25] G. G. Hernandez-Cardoso, S. C. Rojas-Landeros, M. Alfaro-Gomez, A. I. Hernandez-Serrano, I. Salas-Gutierrez, E. Lemus-Bedolla, A. R. Castillo-Guzman, H. L. Lopez-Lemus, and E. Castro-Camus, "Terahertz imaging for early screening of diabetic foot syndrome: A proof of concept," *Scientific Reports*, vol. 7, no. 1, p. 42124, 2017. Publisher: Nature Publishing Group.
- [26] G. G. Hernandez-Cardoso, L. F. Amador-Medina, G. Gutierrez-Torres, E. S. Reyes-Reyes, C. A. Benavides Martínez, C. Cardona Espinoza, J. Arce Cruz, I. Salas-Gutierrez, B. O. Murillo-Ortíz, and E. Castro-Camus, "Terahertz imaging demonstrates its diagnostic potential and reveals a relationship between cutaneous dehydration and neuropathy for diabetic foot syndrome patients," *Scientific Reports*, vol. 12, no. 1, p. 3110, 2022. Publisher: Nature Publishing Group.
- [27] A. Alomainy, Ke Yang, M. A. Imran, Xin-Wei Yao, and Q. H. Abbasi, "Terahertz (THz) application in food contamination detection," in *Nano-Electromagnetic Communication at Terahertz and Optical Frequencies: Principles and Applications*, pp. 77–100, Institution of Engineering and Technology, 2019.
- [28] A. G. Markelz and D. M. Mittleman, "Perspective on terahertz applications in bioscience and biotechnology," *ACS Photonics*, vol. 9, no. 4, pp. 1117–1126, 2022. Publisher: American Chemical Society.
- [29] W. R. Tribe, D. A. Newnham, P. F. Taday, and M. C. Kemp, "Hidden object detection: security applications of terahertz technology," in *Terahertz and Gigahertz Electronics and Photonics III*, vol. 5354, pp. 168–176, SPIE, 2004.
- [30] K. Cooper, R. Dengler, N. Llombart, T. Bryllert, G. Chattopadhyay, E. Schlecht, J. Gill, C. Lee, A. Skalare, I. Mehdi, and P. Siegel, "Penetrating 3-d imaging at 4- and 25-m range using a submillimeter-wave radar," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 56, no. 12, pp. 2771–2778, 2008.

- [31] M. Kowalski, "Hidden object detection and recognition in passive terahertz and mid-wavelength infrared," *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, vol. 40, no. 11, pp. 1074–1091, 2019. Company: Springer Distributor: Springer Institution: Springer Label: Springer Publisher: Springer US.
- [32] T. Yasui, T. Yasuda, K.-i. Sawanaka, and T. Araki, "Terahertz paintmeter for noncontact monitoring of thickness and drying progress in paint film," *Applied Optics*, vol. 44, no. 32, pp. 6849–6856, 2005. Publisher: Optica Publishing Group.
- [33] J. J.B., M. M., W. J.F., D. I. I.N., W. S.L., M. M., and M. G.A., "Terahertz imaging for non-destructive evaluation of mural paintings," *Optics Communications*, vol. 281, no. 4, pp. 527–532, 2008. Publisher: North-Holland.
- [34] A. J. L. Adam, P. C. M. Planken, S. Meloni, and J. Dik, "TeraHertz imaging of hidden paint layers on canvas," *Optics Express*, vol. 17, no. 5, pp. 3407–3416, 2009. Publisher: Optica Publishing Group.
- [35] A. Cosentino, "Terahertz and cultural heritage science: Examination of art and archaeology," *Technologies*, vol. 4, no. 1, p. 6, 2016. Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [36] C. Moffa, D. Francescone, A. Curcio, A. C. Felici, M. Bellaveglia, L. Piersanti, M. Migliorati, and M. Petrarca, "Deciphering hidden layers's images through terahertz spectral fingerprints," *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol. 343, p. 126510, 2025.
- [37] N. Karpowicz, H. Zhong, C. Zhang, K.-I. Lin, J.-S. Hwang, J. Xu, and X.-C. Zhang, "Compact continuous-wave subterahertz system for inspection applications," *Applied Physics Letters*, vol. 86, no. 5, p. 054105, 2005.
- [38] F. Rutz, M. Koch, S. Khare, M. Moneke, H. Richter, and U. Ewert, "Terahertz quality control of polymeric products," *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, vol. 27, no. 4, pp. 547–556, 2006. Company: Springer Distributor: Springer Institution: Springer Label: Springer Publisher: Kluwer Academic Publishers-Plenum Publishers.
- [39] J. Dong, B. Kim, A. Locquet, P. McKeon, N. Declercq, and D. S. Citrin, "Nondestructive evaluation of forced delamination in glass fiber-reinforced composites by terahertz and ultrasonic waves," *Composites Part B: Engineering*, vol. 79, pp. 667–675, 2015.

- [40] S. Atakaramians, S. A. V, T. M. Monro, and D. Abbott, “Terahertz dielectric waveguides,” *Advances in Optics and Photonics*, vol. 5, no. 2, pp. 169–215, 2013. Publisher: Optica Publishing Group.
- [41] A. Siemion, “Terahertz diffractive optics—smart control over radiation,” *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, vol. 40, no. 5, pp. 477–499, 2019.
- [42] R. Kakimi, M. Fujita, M. Nagai, M. Ashida, and T. Nagatsuma, “Capture of a terahertz wave in a photonic-crystal slab,” *Nature Photonics*, vol. 8, no. 8, pp. 657–663, 2014. Publisher: Nature Publishing Group.
- [43] R. T. Ako, A. Upadhyay, W. Withayachumnankul, M. Bhaskaran, and S. Sriram, “Dielectrics for terahertz metasurfaces: Material selection and fabrication techniques,” *Advanced Optical Materials*, vol. 8, no. 3, p. 1900750, 2020. Publisher: John Wiley & Sons, Ltd.
- [44] M. Koch, D. M. Mittleman, J. Ornik, and E. Castro-Camus, “Terahertz time-domain spectroscopy,” *Nature Reviews Methods Primers*, vol. 3, no. 1, p. 48, 2023.
- [45] G. Valušis, A. Lisauskas, H. Yuan, W. Knap, and H. G. Roskos, “Roadmap of terahertz imaging 2021,” *Sensors*, vol. 21, no. 12, p. 4092, 2021. Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [46] A. Siemion, “The Magic of Optics—An Overview of Recent Advanced Terahertz Diffractive Optical Elements,” *Sensors*, vol. 21, p. 100, Jan. 2021.
- [47] A. Siemion, M. Surma, P. Komorowski, P. Zagrajek, M. Walczakowski, A. Melaniuk, I. Ducin, P. Sobotka, and E. Czerwinska, “Paraffin diffractive lens for subterahertz range—simple and cost efficient solution,” *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 11, no. 4, pp. 396–401, 2021.
- [48] B. Yan, Z. Wang, X. Zhao, L. Lin, X. Wang, C. Gong, and W. Liu, “Printing special surface components for THz 2d and 3d imaging,” *Scientific Reports*, vol. 10, no. 1, p. 20867, 2020. Publisher: Nature Publishing Group.
- [49] X. Zang, B. Yao, L. Chen, J. Xie, X. Guo, A. V. Balakin, A. P. Shkurinov, and S. Zhuang, “Metasurfaces for manipulating terahertz waves,” *Light: Advanced Manufacturing*, vol. 2, no. 2, pp. 148–172, 2021. Publisher: Light: Advanced Manufacturing.

- [50] S. Lee, S. Baek, T.-T. Kim, H. Cho, S. Lee, J.-H. Kang, and B. Min, "Metamaterials for enhanced optical responses and their application to active control of terahertz waves," *Advanced Materials*, vol. 32, no. 35, p. 2000250, 2020. Publisher: John Wiley & Sons, Ltd.
- [51] H. Tao, N. I. Landy, C. M. Bingham, X. Zhang, R. D. Averitt, and W. J. Padilla, "A metamaterial absorber for the terahertz regime: design, fabrication and characterization," *Optics Express*, vol. 16, no. 10, p. 7181, 2008.
- [52] N. R. Han, Z. C. Chen, C. S. Lim, B. Ng, and M. H. Hong, "Broadband multi-layer terahertz metamaterials fabrication and characterization on flexible substrates," *Optics Express*, vol. 19, no. 8, pp. 6990–6998, 2011. Publisher: Optica Publishing Group.
- [53] M. Surma, I. Ducin, P. Zagrajek, and A. Siemion, "Sub-terahertz computer generated hologram with two image planes," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 4, p. 659, 2019.
- [54] W. D. Furlan, V. Ferrando, J. A. Monsoriu, P. Zagrajek, E. Czerwińska, and M. Szustakowski, "3d printed diffractive terahertz lenses," *Optics Letters*, vol. 41, no. 8, pp. 1748–1751, 2016. Publisher: Optica Publishing Group.
- [55] J. Suszek, A. M. Siemion, N. Błocki, M. Makowski, A. Czerwiński, J. Bomba, A. Kowalczyk, I. Ducin, K. Kakarenko, N. Pałka, P. Zagrajek, M. Kowalski, E. Czerwińska, C. Jastrzebski, K. Świtkowski, J.-L. Coutaz, A. Kolodziejczyk, and M. Sypek, "High order kinoforms as a broadband achromatic diffractive optics for terahertz beams," *Optics Express*, vol. 22, no. 3, pp. 3137–3144, 2014. Publisher: Optica Publishing Group.
- [56] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier optics*. Fourier optics, McGraw-Hill, 2nd ed. ed., 1996.
- [57] J. Suszek, M. Sypek, M. Makowski, F. Garet, I. Ducin, K. Kakarenko, J. Bomba, and J.-L. Coutaz, "Evaluation of the shadow effect in terahertz kinoform gratings," *Optics Letters*, vol. 38, no. 9, pp. 1464–1466, 2013. Publisher: Optica Publishing Group.
- [58] H. Aagedal, M. Schmid, S. Egner, J. Müller-Quade, T. Beth, and F. Wyrowski, "Analytical beam shaping with application to laser-diode arrays," *JOSA A*, vol. 14, no. 7, pp. 1549–1553, 1997. Publisher: Optica Publishing Group.

- [59] R. W. Gerchberg and W. O. Saxton, "A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures," *Optik*, vol. 35, no. 2, pp. 237–246, 1972.
- [60] Z. Zhou and T. Drabik, "Optimized binary, phase-only, diffractive optical element with subwavelength features for 1.55 μm ," *Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*, vol. 12, no. 5, pp. 1104–1112, 1995.
- [61] G. Zhou, Y. Chen, Z. Wang, and H. Song, "Genetic local search algorithm for optimization design of diffractive optical elements," *Applied Optics*, vol. 38, no. 20, pp. 4281–4290, 1999. Publisher: Optical Society of America.
- [62] A. D. Squires and R. A. Lewis, "Feasibility and characterization of common and exotic filaments for use in 3d printed terahertz devices," *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, vol. 39, no. 7, pp. 614–635, 2018.
- [63] A. Siemion, P. Komorowski, M. Surma, I. Ducin, P. Sobotka, M. Walczakowski, and E. Czerwińska, "Terahertz diffractive structures for compact in-reflection inspection setup," *Optics Express*, vol. 28, no. 1, pp. 715–723, 2020. Publisher: Optical Society of America.
- [64] S. F. Busch, M. Weidenbach, J. C. Balzer, and M. Koch, "THz optics 3d printed with TOPAS," *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, vol. 37, no. 4, pp. 303–307, 2016. Company: Springer Distributor: Springer Institution: Springer Label: Springer Publisher: Springer US.
- [65] M. Surma, M. Kaluza, P. Czerwińska, P. Komorowski, and A. Siemion, "Neural-network based approach to optimize thz computer generated holograms," *Photonics Letters of Poland*, vol. 13, p. 88–90, Dec. 2021.
- [66] P. Komorowski, M. Kaluza, M. Surma, and A. Siemion, "3d printed diffractive lenses operating at 1 thz," *Lithuanian Journal of Physics*, vol. 63, Nov. 2023.
- [67] P. Komorowski, M. Kurowska, M. Kaluza, P. Czerwińska, P. Zagrajek, and A. Siemion, "Neural network-based design of two-focal-spot terahertz diffractive optical elements," *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 14, p. 228–237, Mar. 2024.
- [68] M. Kaluza, M. Walczakowski, and A. Siemion, "Exploring the impact of 3d printing parameters on the thz optical characteristics of coc material," *Materials*, vol. 17, p. 5104, Jan. 2024.

- [69] M. Kaluza, P. Komorowski, A. Nieradka, P. Zagrajek, and A. Siemion, “Implementing terahertz spatial multiplexing and frequency demultiplexing systems using diffractive optical elements for 6g telecommunications applications,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 73, p. 6037–6048, Sept. 2025.
- [70] A. Siemion, A. Siemion, M. Makowski, J. Suszek, J. Bomba, A. Czerwiński, F. Garet, J.-L. Coutaz, and M. Sypek, “Diffractive paper lens for terahertz optics,” *Optics Letters*, vol. 37, no. 20, pp. 4320–4322, 2012.
- [71] D. Han, K. Lee, J. Lim, S. S. Hong, Y. K. Kim, and J. Ahn, “Terahertz lens made out of natural stone,” *Applied Optics*, vol. 52, no. 36, pp. 8670–8675, 2013. Publisher: Optica Publishing Group.
- [72] L. A. Sterczewski, M. Grzelczak, K. Nowak, and E. F. Plinski, “Cast terahertz lenses made of caramelized sucrose,” *Optical Engineering*, vol. 55, no. 9, p. 090505, 2016. Publisher: SPIE.
- [73] M. Surma, P. Komorowski, M. Neneman, and A. Siemion, “Chocolate terahertz fresnel lens,” *Photonics Letters of Poland*, vol. 12, no. 4, p. 103, 2020.
- [74] M. Kałuża, P. Komorowski, M. Walczakowski, A. Nieradka, and A. Siemion, “Optical properties of materials in the terahertz spectral range,” 2025.
- [75] L. Minkevičius, S. Indrišiūnas, R. Šniaukas, B. Voisiat, V. Janonis, V. Tamošiūnas, I. Kašalynas, G. Račiukaitis, and G. Valušis, “Terahertz multilevel phase fresnel lenses fabricated by laser patterning of silicon,” *Optics Letters*, vol. 42, no. 10, p. 1875, 2017.
- [76] E. D. Walsby, S. Wang, J. Xu, T. Yuan, R. Blaikie, S. M. Durbin, X.-C. Zhang, and D. R. S. Cumming, “Multilevel silicon diffractive optics for terahertz waves,” *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, vol. 20, no. 6, pp. 2780–2783, 2002.
- [77] S. Tofani, D. C. Zografopoulos, M. Missori, R. Fastampa, and R. Beccherelli, “Terahertz focusing properties of polymeric zone plates characterized by a modified knife-edge technique,” *JOSA B*, vol. 36, no. 5, pp. D88–D96, 2019. Publisher: Optica Publishing Group.

- [78] A. Siemion, A. Siemion, J. Suszek, A. Kowalczyk, J. Bomba, A. Sobczyk, N. Palka, P. Zagrajek, A. Kolodziejczyk, and M. Sypek, "THz beam shaping based on paper diffractive optics," *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 6, no. 4, pp. 568–575, 2016.
- [79] J. Sun and F. Hu, "Three-dimensional printing technologies for terahertz applications: A review," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 30, no. 1, p. e21983, 2020. _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/mmce.21983>.
- [80] Jean-Louis Coutaz, Frédéric Garet, and Vincent Wallace, *Principles of Terahertz Time-Domain Spectroscopy*. Pan Stanford Publishing, 2018.
- [81] R. J. B. Dietz, N. Vieweg, T. Puppe, A. Zach, B. Globisch, T. Göbel, P. Leisching, and M. Schell, "All fiber-coupled THz-TDS system with kHz measurement rate based on electronically controlled optical sampling," *Optics Letters*, vol. 39, no. 22, pp. 6482–6485, 2014. Publisher: Optica Publishing Group.
- [82] T. Yasui, E. Saneyoshi, and T. Araki, "Asynchronous optical sampling terahertz time-domain spectroscopy for ultrahigh spectral resolution and rapid data acquisition," *Applied Physics Letters*, vol. 87, no. 6, p. 061101, 2005.
- [83] R. Wilk, T. Hochrein, M. Koch, M. Mei, and R. Holzwarth, "OSCAT: Novel technique for time-resolved experiments without moveable optical delay lines," *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, vol. 32, no. 5, pp. 596–602, 2011.
- [84] W. Withayachumnankul, B. M. Fischer, H. Lin, and D. Abbott, "Uncertainty in terahertz time-domain spectroscopy measurement," *Journal of the Optical Society of America B*, vol. 25, p. 1059, June 2008.
- [85] F. Yang, L. Liu, M. Song, F. Han, L. Shen, P. Hu, and F. Zhang, "Uncertainty in terahertz time-domain spectroscopy measurement of liquids," *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, vol. 38, no. 2, pp. 229–247, 2017.
- [86] W. Withayachumnankul and M. Naftaly, "Fundamentals of measurement in terahertz time-domain spectroscopy," *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, vol. 35, no. 8, pp. 610–637, 2014.

- [87] S. Krimi, J. Klier, J. Jonuscheit, G. Von Freymann, R. Urbansky, and R. Beigang, "Highly accurate thickness measurement of multi-layered automotive paints using terahertz technology," *Applied Physics Letters*, vol. 109, no. 2, p. 021105, 2016.
- [88] Q. Wang, L. Xie, and Y. Ying, "Overview of imaging methods based on terahertz time-domain spectroscopy," *Applied Spectroscopy Reviews*, vol. 57, no. 3, pp. 249–264, 2022.
- [89] J. P. Guillet, B. Recur, L. Frederique, B. Bousquet, L. Canioni, I. Manek-Hönninger, P. Desbarats, and P. Mounaix, "Review of terahertz tomography techniques," *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, vol. 35, no. 4, pp. 382–411, 2014.
- [90] J. Hebling, M. C. Hoffmann, H. Y. Hwang, K.-L. Yeh, and K. A. Nelson, "Observation of nonequilibrium carrier distribution in ge, si, and GaAs by terahertz pump–terahertz probe measurements," *Physical Review B*, vol. 81, no. 3, p. 035201, 2010.
- [91] P. A. George, J. Strait, J. Dawlaty, S. Shivaraman, M. Chandrashekar, F. Rana, and M. G. Spencer, "Ultrafast optical-pump terahertz-probe spectroscopy of the carrier relaxation and recombination dynamics in epitaxial graphene," *Nano Letters*, vol. 8, no. 12, pp. 4248–4251, 2008. Publisher: American Chemical Society.
- [92] C. Yu, S. Fan, Y. Sun, and E. Pickwell-MacPherson, "The potential of terahertz imaging for cancer diagnosis: A review of investigations to date," *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, vol. 2, no. 1, pp. 33–45, 2012.
- [93] V. Wallace, A. Fitzgerald, S. Shankar, N. Flanagan, R. Pye, J. Cluff, and D. Arnone, "Terahertz pulsed imaging of basal cell carcinoma ex vivo and in vivo," *British Journal of Dermatology*, vol. 151, no. 2, pp. 424–432, 2004. Publisher: John Wiley & Sons, Ltd.
- [94] U. Leiter, T. Eigentler, and C. Garbe, "Epidemiology of skin cancer," in *Sunlight, Vitamin D and Skin Cancer* (J. Reichrath, ed.), pp. 120–140, Springer, 2014.
- [95] A. Rahman, A. K. Rahman, and B. Rao, "Early detection of skin cancer via terahertz spectral profiling and 3d imaging," *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 82, pp. 64–70, 2016.
- [96] H. Lindley-Hatcher, R. I. Stantchev, X. Chen, A. I. Hernandez-Serrano, J. Hardwicke, and E. Pickwell-MacPherson, "Real time THz imaging—opportunities and challenges for skin cancer detection," *Applied Physics Letters*, vol. 118, no. 23, p. 230501, 2021.

- [97] E. Pickwell, A. Fitzgerald, P. Taday, B. Cole, R. Pye, T. Ha, M. Pepper, and V. Wallace, "Terahertz imaging and spectroscopy of skin cancer," in *Infrared and Millimeter Waves, Conference Digest of the 2004 Joint 29th International Conference on 2004 and 12th International Conference on Terahertz Electronics, 2004.*, pp. 821–822, IEEE, 2004.
- [98] E. Pickwell, A. J. Fitzgerald, B. E. Cole, P. F. Taday, R. J. Pye, T. Ha, M. Pepper, and V. P. Wallace, "Simulating the response of terahertz radiation to basal cell carcinoma using ex vivo spectroscopy measurements," *Journal of Biomedical Optics*, vol. 10, no. 6, p. 064021, 2005. Publisher: SPIE.
- [99] P. M. Corridon, R. Ascázubi, C. Krest, and I. Wilke, "Time-domain terahertz spectroscopy of artificial skin," in *Advanced Biomedical and Clinical Diagnostic Systems IV*, vol. 6080, pp. 43–54, SPIE, 2006.
- [100] O. A. Smolyanskaya, Q. Cassar, M. S. Kulya, N. V. Petrov, K. I. Zaytsev, A. I. Lepeshkin, J.-P. Guillet, P. Mounaix, and V. V. Tuchin, "Interaction of terahertz radiation with tissue phantoms: numerical and experimental studies," *EPJ Web of Conferences*, vol. 195, p. 10012, 2018. Publisher: EDP Sciences.
- [101] G. C. Walker, E. Berry, S. W. Smye, and D. S. Brettle, "Materials for phantoms for terahertz pulsed imaging," *Physics in Medicine & Biology*, vol. 49, no. 21, p. N363, 2004. Publisher: IOP Publishing.
- [102] A. Walter, T. Bowman, and M. El-Shenawee, "Development of breast cancer tissue phantoms for terahertz imaging," in *Design and Quality for Biomedical Technologies IX*, vol. 9700, pp. 7–14, SPIE, 2016.
- [103] Marta Robak, "Odbicie promieniowania terahercowego od modelu tkanki," phdthesis, Politechnika Warszawska, 2023.
- [104] R. W. Gerchberg and W. O. Saxton, "A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures," *Optik*, vol. 35, no. 2, pp. 237–246, 1972.
- [105] J. R. Fienup, "Iterative Method Applied To Image Reconstruction And To Computer-Generated Holograms," *Optical Engineering*, vol. 19, p. 193297, June 1980.

- [106] R. G. Dorsch, A. W. Lohmann, and S. Sinzinger, “Fresnel ping-pong algorithm for two-plane computer-generated hologram display,” *Applied Optics*, vol. 33, pp. 869–875, Feb. 1994.
- [107] M. Sypek, “Light propagation in the Fresnel region. New numerical approach,” *Optics Communications*, vol. 116, pp. 43–48, Apr. 1995.
- [108] M. Makowski, I. Ducin, K. Kakarenko, A. Kowalczyk, M. Bieda, and J. Suszek, “Optimized computation method for real-time holographic formation of color images,” *Photonics Letters of Poland*, vol. 6, no. 3, pp. 81–83, 2014.
- [109] M. Surma, M. Kaluza, P. Komorowski, and A. Siemion, “Segmentation of THz holograms for homogenous illumination,” *Scientific Reports*, vol. 14, p. 12733, June 2024.
- [110] P. Komorowski, M. Kurowska, M. Kaluza, P. Czerwińska, P. Zagrajek, and A. Siemion, “Neural Network-Based Design of Two-Focal-Spot Terahertz Diffractive Optical Elements,” *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 14, pp. 228–237, Mar. 2024.
- [111] W. J. Otter and S. Lucyszyn, “Hybrid 3-D-Printing Technology for Tunable THz Applications,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, pp. 756–767, Apr. 2017.
- [112] L. Qi, L. Minkevičius, A. Urbanowicz, A. Švigelj, I. Grigelionis, I. Kašalynas, J. Trontelj, and G. Valušis, “Antenna-coupled titanium microbolometers: Application for precise control of radiation patterns in terahertz time-domain systems,” *Sensors*, vol. 21, no. 10, p. 3510, 2021.