



Wojskowa
Akademia
Techniczna

Instytut
Optoelektroniki 

Warszawa, dn. *14.11.2022* r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Mateusza Słowikowskiego

pt. „Zintegrowane interrogatory fotoniczne do zastosowań w światłowodowych systemach czujnikowych”

Podstawa prawna:

1. pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika prof. dr. hab. inż. Tomasza Stareckiego z Politechniki Warszawskiej z dnia. 08.07.2022 r.;
2. rozprawa doktorska mgr. inż. Mateusza Słowikowskiego pt. „Zintegrowane interrogatory fotoniczne do zastosowań w światłowodowych systemach czujnikowych”;
3. Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2020 r., poz.85);
4. Ustawa z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz. U. z 2018 r., poz., 1669).

1. Ocena rozprawy doktorskiej

1.1 Wprowadzenie

Celem rozprawy było zaprojektowanie i zbadanie właściwości interrogatorów fotonicznych wytworzonych w technologii generycznej fotoniki scalonej, przeznaczonych do odczytu sygnałów z sieci siatek Bragga monitorujących parametry życiowe pacjentów, w szczególności pacjentów poddawanych procedurom diagnostyki obrazowej MRI. Autor rozprawy sformułował następującą tezę: **generyczna technologia fotoniki scalonej na platformie z fosforu indu pozwala na wytworzenie w pełni funkcjonalnych układów scalonych interrogatorów fotonicznych, możliwych do zastosowania w rzeczywistych systemach**

czujnikowych. W rozprawie autor rozwija postawioną tezę i rozszerza rozprawę o prace projektowo-technologiczne nad nową platformą z azotku krzemu. Rozprawa posiada charakter badawczy oraz technologiczny. Podstawowy zakres rozprawy dotyczący interrogatorów fotonicznych na platformie z fosforku indu obejmuje pełny cykl prototypowania układów fotoniki scalonej oraz przeprowadzenie badań w warunkach laboratoryjnych i odzwierciedlających rzeczywiste warunki eksploatacyjne. Struktura rozprawy jest prawidłowa. Podzielono ją na 12 rozdziałów przedstawionych na 160 stronach. Bibliografia rozprawy przedstawia 213 pozycji, włączając w to strony www i materiały informacyjne firm rynkowych. Autor zamieścił również wykaz własnych publikacji dotyczących tematyki rozprawy. Lista obejmuje 15 pozycji, w tym 4 artykuły współautorskie (jeden z doktorantem na pierwszym miejscu) i 11 wystąpień konferencyjnych (w 7 doktorant jest pierwszym miejscem). W rozprawie zamieszczono również imponujący wykaz całego dorobku publikacyjnego autora obejmujący 67 pozycji i 5 patentów oraz zastrzeżeń topografii.

1.2 Ocena ogólna

Opiniowana rozprawa dotyczy jednego z najnowszych obszarów współczesnej optoelektroniki – fotoniki scalonej, a stanowiące temat rozprawy interrogatory należą do podstawowych elementów fotonicznych układów scalonych. Komunikują się z siecią czujników pomiarowych i umożliwiają odczyt wyników z każdego sensora. Na rynku sensorów fotonicznych kluczową pozycję zajmują światłowodowe czujniki z siatkami Bragga. Chociaż początki fotoniki scalonej datowane są na przełom lat 60-tych i 70-tych, to jej dynamiczny rozwój możliwy był dopiero w latach 90-tych. Syntetycznie wybrane kamienie milowe rozwoju fotonicznych układów scalonych w latach 1988-2022 doktorant przedstawił w formie tabeli w rozdziale 3 rozprawy. W Polsce technologie generyczne fotoniki scalonej rozwijane są głównie na Politechnice Warszawskiej w Zakładzie Optoelektroniki IMiO, kierowanym przez dr. hab. inż. Ryszarda Piramidowicza, prof. PW. Na świecie technologie te rozwijane są w czołowych ośrodkach naukowych i firmach high-tech. Należą do nich Technische Universiteit Eindhoven, imec, Fraunhofer Heinrich Hertz Institut oraz firmy Intel, Infinera, SMART Photonics, LioniX, Ligentec, HHI i inne. W rozprawie doktorant dość szczegółowo przedstawia poruszaną tematykę, co świadczy o dobrym opanowaniu przez doktoranta ogólnej wiedzy teoretycznej w zakresie fotoniki scalonej oraz praktycznej realizacji pełnego cyklu prototypowania obejmującego projektowanie topografii fotonicznych układów scalonych, przygotowywanie masek, wytwarzanie układów i pełną charakteryzację optyczną oraz wykonanie elektroniki sterującej, montaż i badania. W ramach rozwijania własnych, krajowych możliwości technologicznych doktorant rozszerzył rozprawę o prace nad nową platformą z azotku krzemu realizowane we współpracy z krajowymi partnerami technologicznymi, takimi jak CEZAMAT. Podnosi to istotnie wartość opiniowanej rozprawy. **Ustawowy warunek prezentacji ogólnej wiedzy teoretycznej doktoranta został wypełniony z nadmiarem.**

Układ rozprawy doktorskiej jest klasyczny. Po krótkim wprowadzeniu w tematykę rozprawy i określeniu celu pracy doktorant w rozdziale drugim postawił tezę, że generyczna technologia fotoniki scalonej na platformie z fosforku indu pozwala na

wytworzenie w pełni funkcjonalnych układów scalonych interrogatorów fonicznych, możliwych do zastosowania w rzeczywistych systemach czujnikowych.

Rozdział trzeci obejmuje rys historyczny rozwoju technologii fonicznych układów scalonych, główne obszary ich zastosowań oraz analizę podstawowych platform technologicznych z analizą możliwości aplikacyjnych związanych z ich parametrami i właściwościami. W rozdziale czwartym przedstawiono podstawowe bloki funkcjonalne i omówiono generyczną koncepcję wytwarzania fonicznych układów scalonych. W rozdziale piątym przeanalizowano różne warianty interrogatorów scalonych, a w rozdziale szóstym określono wymagania funkcjonalne interrogatorów w kontekście planowanej aplikacji i specyfiki pracy optycznych systemów czujnikowych z siatkami Bragga. Na szczególną uwagę zasługują walory dydaktyczne przytoczonych rozdziałów. Autor logicznie i zwięźle przedstawia możliwości, zasady pracy, wady i zalety omawianych rozwiązań. Zasadnicza część rozprawy rozpoczyna się w rozdziale siódmym, w którym autor porusza aspekty projektowania fonicznych interrogatorów scalonych, dokonując również uzasadnienia wyboru komercyjnej platformy fosforu indu do realizacji celu rozprawy. Ponieważ obecny stan technologii nie pozwala na wytwarzanie monolitycznie zintegrowanych elementów aktywnych na platformach krzemowych, a rozwiązania hybrydowej integracji źródeł i detektorów nie spełniają wymagań scalonego układu interrogatora, autor dokonuje wyboru platformy fosforu indu InP potwierdzając przyjętą tezę rozprawy. Rozważając i analizując dwie platformy InP, doktorant dokonuje wyboru platformy SMART Photonics z uwagi na bogatszą i dostępną parametryzowaną bibliotekę sprzęgaczy siatkowych AWG, niezbędnych do generacji topografii wejściowej demultipleksera. Demultiplekser siatkowy AWG stanowi kluczowy element opracowywanego interrogatora siatek Bragga. Udostępniona przez SMART Photonics biblioteka bloków funkcjonalnych ułatwiła projektowanie fonicznego układu scalonego zgodnego z procesami technologicznymi wytwórcy i technologii MPW – Multi Project Wafer. Projekt topografii układu wykonano w oprogramowaniu OptoDesigner firmy Synopsys pozwalającym na zaimplementowanie biblioteki bloków funkcjonalnych SMART Photonics, a całość dostosowano do wymogów packagingu generycznego. Dodatkowo w ramach rozwijania własnych kompetencji w zakresie fotoniki scalonej opracowano topografię demultiplekserów AWG dla platformy fonicznej azotku krzemu (Si_xN_y) rozwijanej w Centrum Zaawansowanych Materiałów i Technologii CEZAMAT Politechniki Warszawskiej. Dokonano również optymalizacji zaprojektowanych topografii w środowisku symulacyjnym EPIPROP firmy PhotonDesign. W rozdziale ósmym doktorant prezentuje bardzo dobrą znajomość procesów technologicznych dla dwóch platform fotoniki scalonej – fosforu indu i azotku krzemu, a wyniki prac technologicznych zostały opublikowane i prezentowane na konferencjach. W rozdziale dziewiątym przedstawiono wyniki badań demultiplekserów AWG wykonanych dla obydwu platform technologicznych. Dla platformy z fosforu indu pomiary wykonano w zakresie bliskiej podczerwieni, a dla platformy azotku krzemu (Si_xN_y) w zakresie widzialnym. Uzyskano wyniki zgodne z oczekiwaniami, a przedstawione w rozdziale rezultaty opublikowano w trzech artykułach i dwóch komunikatach konferencyjnych. Rozdział dziesiąty dotyczy zagadnień packagingu optoelektrycznego, integracji z elektroniką sterującą i światłowodami. Autor potwierdza bardzo dobrą znajomość zagadnień związanych z tym etapem technologii i wykazuje się

doświadczeniem elektronika i naukowca. Rozdział jedenasty prezentuje wyniki eksperymentalnych badań parametrów wytworzonych fonicznych interrogatorów scalonych i ich charakteryzację. Uzyskane wyniki pozwoliły na wytypowanie układów do pełnego packagingu i przeprowadzenia badań potwierdzających zakładaną tezę. Opracowane i wykonane foniczne interrogatory scalone spełniają wymagania i mogą zostać zastosowane do monitorowania oddechu pacjentów poddawanych procedurom diagnostyki obrazowej MRI. Rezultaty badań opublikowano w artykułach i komunikatach konferencyjnych. Rozdział dwunasty stanowi podsumowanie uzyskanych wyników. Głównym osiągnięciem zrealizowanej rozprawy jest opracowany autorsko 36 kanałowy interrogator siatek bragga wykonany w generycznej technologii fotoniki scalonej, gotowy do aplikacji w zakresie monitorowania pacjentów podlegających diagnostyce MRI. Dodatkowo realizacja rozprawy doktorskiej umożliwiła przeprowadzenie w centrum CEZAMAT prac projektowo-technologicznych nad nową platformą fotoniki scalonej z azotku krzemu (Si_xN_y) i przygotowanie własnej biblioteki procesów technologicznych pozwalających na wytwarzanie całego szeregu fonicznych elementów scalonych i eksperymentalne konstruowanie układów fotoniki scalonej w widzialnym zakresie widma promieniowania elektromagnetycznego. Przedstawione wyniki **potwierdzają, że doktorant wykazuje znakomite umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, co jest wymagane odnośną ustawą.**

1.3 Uwagi krytyczne

Generalnie recenzent nie widzi błędów w przedstawionej rozprawie. Oceniana praca jest bardzo dobrze napisana, choć udało się znaleźć kilka drobnych potknięć edytorskich, literówek i błędów językowych :

- na stronie 32 mamy: „nad warstwami falowodowymi jest wzrastany odpowiednio fosforek indu” proponuję nanoszona jest w technologiiwarstwa fosforu indu
- na stronie 40 odniesienie do rysunku dotyczy rys. 4.9, a nie rys.9
- na stronie 41 mamy czułość 0,85/W zamiast 0,85 A/W
- na stronie 88 mamy: przesłuchy międzykanałowe są lepsze niż -15 dB, cokolwiek to oznacza
- stosowane w pracy bezpośrednio tłumaczenie zakresu swobodnej dyspersji Free Spectral Range (FSR) na wolny zakres widmowy nie wydaje się właściwe.

Największym jednak potknięciem są błędy występujące w rozdziale siódmym dotyczącym projektowania interrogatorów scalonych. Na rys. 7.2 mało czytelne są oznaczenia występujące w opisie pod rysunkiem, a bardzo ważny w pracy rys. 7.3 w ogóle nie posiada oznaczeń wymienionych w opisie. Omówienie rys. 7.4 jest niezrozumiałe i trudne do interpretacji.

Oczywiście drobne błędy znalezione w rozprawie nie mają wpływu na ocenę całkowitą rozprawy i uzyskanych wyników.

1.4 Podsumowanie i wnioski

Oceniana rozprawa doktorska stanowi bardzo istotny wkład w rozwój fotonicznych układów scalonych i opanowanie technologii fotonicznych układów scalonych w kraju. Poruszana tematyka jest również istotna z praktycznego punktu widzenia. Opracowane fotoniczne elementy układów scalonych, opanowane technologie, opracowany innowacyjny 36 kanałowy interrogator scalony dają wkład do własnej biblioteki danych i rozwijają możliwość powielania opanowanych elementów w nowych projektach podzespołów i urządzeń wykonanych w technologiach fotonicznych. Należy podkreślić, że **rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego – opracowania i wykonania interrogatorów wykonanych w generycznej technologii fotoniki scalonej na platformie fosforu indu InP wypełniając wymagania stawiane odnośną ustawą.**

Rozprawa obejmuje również realizację prac projektowo-technologicznych i badawczych nad nową platformą azotku krzemu dla układów fotoniki scalonej na zakres widzialny widma optycznego.

2. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa stanowi istotny wkład mgr. inż. Mateusza Słowikowskiego do problematyki fotonicznych układów scalonych. Otrzymane rezultaty mogą być zastosowane w praktyce i rozwijają potencjał technologiczny centrum CEZAMAT.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. Inż. Mateusza Słowikowskiego. pt. „Zintegrowane interrogatory fotoniczne do zastosowań w światłowodowych systemach czujnikowych” spełnia z nadmiarem ustawowe wymogi stawiane pracom doktorskim w odniesieniu do oryginalności problemu naukowego, umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz wiedzy teoretycznej. W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie Pana mgr. Inż. Mateusza Słowikowskiego do publicznej obrony rozprawy doktorskiej. Jednocześnie wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgr. Inż. Mateusza Słowikowskiego.



dr hab. inż. Krzysztof Kopczyński, prof. WAT

