

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Jaroszewicz
Centralna Izba Pomiarów Telekomunikacyjnych (Z-12)
Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Szachowa 1, 04-894 Warszawa
e-mail [REDACTED]

ul. Szachowa 1
04-894 Warszawa
tel.: [+48 22] 512 81 00
fax: [+48 22] 512 86 25
e-mail: info@il-pib.pl
www.il-pib.pl

Warszawa, dnia 19 października 2022 roku

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Mateusza Słowikowskiego p.t. „Zintegrowane interrogatory fotoniczne do zastosowań w światłowodowych systemach czujnikowych”

Pan mgr inż. Mateusz Słowikowski w swojej rozprawie doktorskiej noszącej tytuł „Zintegrowane interrogatory fotoniczne do zastosowań w światłowodowych systemach czujnikowych” jako główny jej cel obrał wykazanie możliwości zastosowania generycznej technologii fotoniki scalonej opartej na platformie fosforu indu do wykonania scalonych układów interrogatorów fotonicznych dających się zastosować w działających systemach czujnikowych.

Rozprawa liczy 160 stron, jest podzielona na 16 rozdziałów i zawiera wiele wykresów, schematów i rysunków, dzięki czemu jej lektura staje się bardziej przejrzysta, a tok wyводу łatwiejszy do śledzenia. Bibliografia pracy liczy 213 pozycji, a ich wybór jest reprezentatywny dla dziedziny będącej treścią rozprawy.

Pierwszy rozdział jest wprowadzeniem do rozprawy i zawiera omówienie stanu rozwoju nowej dziedziny fotoniki, jaką są fotoniczne układy scalone ze szczególnym uwzględnieniem czujników światłowodowych opartych na siatkach Bragga oraz interrogatorów, czyli układów odczytu informacji zbieranej przez czujniki.

W drugim rozdziale zostaje postawiony cel rozprawy oraz przedstawione jej tezy. Zgodnie ze słowami autora celem rozprawy jest: „zaprojektowanie i zbadanie właściwości interrogatorów przeznaczonych do pracy z sieciami siatek Bragga (fiber Bragg gratings, FBG) i wytworzonych z wykorzystaniem generycznej technologii fotoniki scalonej”. Z kolei teza pracy

brzmi następująco: „generyczna technologia fotoniki scalonej na platformie fosforku indu pozwala na wytworzenie w pełni funkcjonalnych układów scalonych interrogatorów fotonicznych, możliwych do zastosowania w rzeczywistych systemach czujnikowych”. Przyjęty zakres pracy jest bardzo szeroki, począwszy od zaprojektowania odpowiednich fotonicznych układów scalonych poprzez ich wytworzenie i pomiar parametrów aż do montażu końcowego urządzenia i stwierdzenia ich przydatności poprzez zbadanie ich działania w warunkach zbliżonych do rzeczywistych.

Kolejne trzy rozdziały, od trzeciego do szóstego stanowią punkt wyjścia oraz podstawę całej rozprawy i zostały poświęcone przedstawieniu historii fotonicznych układów scalonych, jak również rozwojowi ich zastosowań, pomiędzy którymi jako najważniejsze wymieniono telekomunikację, transmisję danych, czujniki, Internet Rzeczy (IoT), lotnictwo, motoryzację i biomedycynę. Wspólnym elementem przy wielu z powyższych aplikacji okazuje się interrogator, czyli element do akwizycji danych optycznych z układów detekcji współdziałający z sensorami optycznymi. Następnie autor przedstawia przegląd najczęściej stosowanych platform technologicznych, między którymi wymienia platformy krzemowe, azotku krzemu, germanowe, fosforku indu, arsenku galu oraz polimerowe i spośród których do dalszych badań wybiera platformę fosforku indu, a to ze względu na prostą przerwę zabronioną w tym materiale, co pozwala na monolityczne wytworzenie wszystkich elementów układu fotoniki scalonej włącznie ze źródłami światła. W dalszej kolejności pan mgr inż. Mateusz Słowikowski opisuje podstawowe bloki funkcjonalne układów fotoniki scalonej, tj. falowody planarne, przewężenia, sprzęgacze, zwierciadła Bragga i demultipleksery siatkowe należące do elementów pasywnych oraz wzmacniacze optyczne, fotodetektory i modulatory elektrooptyczne będące elementami aktywnymi. Następny, piąty rozdział tej części rozprawy omawia architekturę interrogatorów i przedstawia rozwiązania modeli, które są już dostępne komercyjnie. Ogólna zasada działania powinna zostać dopasowana do przyszłego zastosowania układu i stąd ostatni, szósty rozdział tej części rozprawy dotyczy przedstawienia tego problemu i jego możliwych rozwiązań.

Kolejne rozdziały odnoszą się już bezpośrednio do prac przeprowadzonych przez pana mgr inż. Mateusza Słowikowskiego. W siódmym rozdziale autor omawia proces projektowania interrogatorów, dostępne narzędzia projektowe, użyte platformy technologiczne (oprócz platformy fosforku indu projektowano także demultipleksery AWG (arrayed waveguide gratings) na platformie azotku krzemu) i ograniczenia narzucone przez przewidywane zastosowania oraz wymagania packagingu. Ósmy rozdział jest poświęcony omówieniu procesów technologicznych wymaganych przy wytwarzaniu fotonicznych układów scalonych, tj. otrzymaniu odpowiednich warstw epitaksjalnych i wprowadzeniu zaprojektowanego wzoru przy pomocy technik litograficznych. Na podkreślenie zasługuje tu

szereg usprawnień opracowanych przez autora, a mających na celu lepszą jakość całego procesu. Za jeden z przykładów może tu posłużyć opracowanie korekty efektu sąsiedztwa.

Dziewiąty rozdział przedstawia wyniki badań parametrów demultiplekserów AWG na bazie fosforu indu i azotku krzemu, które zostały otrzymane przy pomocy metod opisanych w poprzednim rozdziale. Te pierwsze były przeznaczone do pracy w zakresie widma bliskiej podczerwieni 1545-1570 nm, podczas gdy te drugie były przeznaczone do pracy w zakresie widma widzialnego dla zakresu 570-630 nm.

W dziesiątym rozdziale zwrócono uwagę na wymagania packagingu i ograniczenia przezeń narzucone, jak również zostały przedstawione sposoby pozwalające na sprostanie owym wymogom.

Rozdział jedenasty, najdłuższy w całej rozprawie, zawiera wyniki badań przeprowadzonych nad wytworzonymi fonicznymi interrogatorami scalonymi. W szczególności sprawdzono, że układ składający się z interrogatora i siatki Bragga pracującej jako czujnik może posłużyć do monitorowania oddechu człowieka poprzez pomiar zmiany częstotliwości sygnału optycznego odbitego od siatki Bragga na skutek zmian mechanicznych spowodowanych ruchem klatki piersiowej.

Ostatni dwunasty rozdział zawiera podsumowanie i omówienie otrzymanych wyników, jak również stwierdzenie osiągnięcia założonego celu rozprawy i dowiedzenie postawionej w niej tezy. Następne rozdziały od trzynastego do szesnastego obejmują kolejno wykaz publikacji z tematyki rozprawy pana mgr inż. Mateusza Słowikowskiego, wykaz jego całkowitego dorobku naukowego, wykaz patentów i zastrzeżeń topografii i na koniec bibliografię rozprawy.

Nie mam uwag dotyczących układu pracy, bądź też sposobu potraktowania tematu. Sam cel postawiony w rozprawie został osiągnięty pomyślnie, a jej tezy należy uznać za dowiedzione i to w o wiele szerszym zakresie, niż wskazywałyby na to ich treść. Na uznanie zasługuje szeroki zakres przedsięwziętych prac eksperymentalnych i ich skrupulatna i staranna realizacja oraz doprowadzenie przedsięwziętych badań do pomyślnego końca, tj. do wytworzenia interrogatorów i wykazania ich użyteczności w rzeczywiście działających układach czujnikowych i pomiarowych. Wprawdzie chętnie przeczytałbym pod koniec rozprawy nieco więcej na temat dalszych prac, które mogłyby powstać w przyszłości w następstwie osiągniętych rezultatów, ale uwaga ta ma charakter raczej redakcyjny i co więcej, jestem przekonany, że autor wyczerpująco na nią odpowie w trakcie obrony swojej pracy.

W rozprawie autor podaje pełny wykaz swoich publikacji naukowych i komunikatów konferencyjnych w liczbie sześćdziesięciu siedmiu oraz ponadto pięć wniosków patentowych i zastrzeżeń do typografii. Z tej liczby piętnaście pozycji autor wlicza jako bezpośrednio mających związek z tematyką rozprawy. Zapewne ze względów formalnych autor musiał poczynić takie rozróżnienie, tym niemniej uważam, że w pracy takiej jak niniejsza rozprawa, która w dużej mierze opiera się na rozwoju i opanowaniu umiejętności technologicznych, należy również wziąć pod uwagę pozostałe publikacje, które po części miały przecież również na celu nabycie sprawności posługiwania się sprzętem foto- i elektronolitograficznym. Co więcej, zdobycie kompetencji w dziedzinie wytwarzania elementów dyfrakcyjnych i fotonicznych stanowi trudną do przecenienia wartość dla całego środowiska optycznego, które dzięki temu nabywa możliwość ich wytwarzania na potrzeby swoich prac badawczych i stosowanych i w czym upatruję dodatkową i równie ważną zaletę rozprawy. Spośród wspomnianych publikacji w bazie Web of Knowledge znajduje się dziewiętnaście prac pana mgr inż. Mateusza Słowikowskiego, z których czternaście to artykuły opublikowane w czasopiśmie z tzw. listy filadelfijskiej, trzy artykuły zostały opublikowane w Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers i po jednym opublikowanym odpowiednio w materiałach Optical Society of America Technical Digest oraz Institute of Electrical and Electronics Engineers:

1. A. Ziółowicz, M. Szymanski, Ł. Szostkiewicz, T. Tenderenda, M. Napierala, M. Murawski, Z. Holdynski, L. Ostrowski, P. Mergo, K. Poturaj, M. Makara, M. Słowikowski, K. Pawlik, T. Stanczyk, K. Stepien, K. Wysokiński, M. Broczkowska, and T. Nasilowski, "Hole-assisted multicore optical fiber for next generation telecom transmission systems", *Appl. Phys. Lett.* **105**, 081106 (2014).
2. K. Stępień, M. Słowikowski, T. Tenderenda, M. Murawski, M. Szymanski, Ł. Szostkiewicz, M. Becker, M. Rothhardt, H. Bartelt, P. Mergo, L. R. Jaroszewicz, and T. Nasilowski, "Fiber Bragg gratings in hole-assisted multicore fiber for space division multiplexing," *Opt. Lett.* **39**, 3571-3574 (2014).
3. K. Wysokiński, T. Stańczyk, K. Gibała, T. Tenderenda, A. Ziółowicz, M. Słowikowski, M. Broczkowska, and T. Nasilowski, "New Methods of Enhancing the Thermal Durability of Silica Optical Fibers," *Materials*, **7**, 6947-6964, (2014).
4. T. Stańczyk, K. Wysokiński, M. Filipowicz, T. Tenderenda, K. Gibała, H. Krisch, M. Słowikowski, A. Ziółowicz, M. Broczkowska, and T. Nasilowski, "Electrolytic Joints Between Metal Surfaces and Metal-Coated Fibers for Application

in High Temperature Optical Fiber Sensors," *J. Lightwave Technol.* **33**, 2480-2485 (2015).

5. P. Sai, D.B. But, I. Yahniuk, M. Grabowski, M. Sakowicz, P. Kruszewski, P. Prystawko, A. Khachapuridze, K. Nowakowski-Szkudlarek, J. Przybytek, P. Wiśniewski, B. Stonio, M. Słowikowski, S.L. Romyantsev, W. Knap and G. Cywiński, "AlGaIn/GaN field effect transistor with two lateral Schottky barrier gates towards resonant detection in sub-mm range," *Semicond. Sci. Technol.* **34**, 024002 (2019).
6. M. Murawski, G. Stępniewski, T. Tenderenda, M. Napierała, Z. Hołdyński, Ł. Szostkiewicz, M. Słowikowski, M. Szymanski, L. Ostrowski, L. R. Jaroszewicz, R. Buczyński, and T. Nasiłowski, "Low loss coupling and splicing of standard single mode fibers with all-solid soft-glass microstructured fibers for supercontinuum generation," *Proc. SPIE* **8982**, 898228 (2014) (Optical components and materials XI, 3-5 February 2014, San Francisco, California, United States).
7. A. Kaźmierczak, M. Słowikowski, K. Pavlov, M. Filipiak, M. Vervaeke, C. Tyszkiewicz, H. Ottevaere, R. Piramidowicz, and P. Karasiński, "Efficient, low-cost optical coupling mechanism for TiO₂-SiO₂ sol-gel derived slab waveguide surface grating coupler sensors," *Opt. Appl.* **50**, 539-549, (2020).
8. M. Słowikowski, A. Kaźmierczak, S. Stopiński, M. Bieniek, S. Szostak, K. Matuk, L. Augustin, and R. Piramidowicz, "Photonic Integrated Interrogator for Monitoring the Patient Condition during MRI Diagnosis," *Sensors* **21**, 4238 (2021).
9. S. Baczyński, P. Sobotka, K. Marchlewicz, M. Słowikowski, M. Juchniewicz, A. Dybko, and K.A. Rutkowska, "Orientation of Liquid Crystalline Molecules on PDMS Surfaces and within PDMS Microfluidic Systems," *Appl. Sci.* **11**, 11593 (2021).
10. A. Kaźmierczak, A. Jusza, M. Słowikowski, S. Stopiński, and R. Piramidowicz, "Integrated interrogator circuits for fiber optic sensor network in generic InP photonic integrated circuit technology", *Proc. SPIE* **10680**, 106800M (2018) (Optical Sensing and Detection V, SPIE Photonics Europe, 22-26 April 2018, Strasbourg, France).
11. M. Lelit, M. Słowikowski, M. Filipiak, M. Juchniewicz, B. Stonio, B. Michalak, K. Pavlov, M. Myśliwiec, P. Wiśniewski, A. Kaźmierczak, K. Anders, S. Stopiński, R.B. Beck, and R. Piramidowicz, "Passive Photonic Integrated Circuits Elements Fabricated on a Silicon Nitride Platform," *Materials*, **15**, 1398 (2022).
12. A. Kaźmierczak, M. Słowikowski, K. Pavlov, M. Filipiak, and R. Piramidowicz, "Polymer micro-lenses as a long-coupling-distance interfacing layer in

the low-cost optical coupling solution between optical fibers and photonic integrated waveguide circuits," *Photonics Lett. Poland*, **11**, 121-123 (2019).

13. K. Markowski, K. Jędrzejewski, M. Słowikowski, and T. Osuch, "Self-Apodization Effect in Tapered Fiber Bragg Gratings," *J. Lightwave Technol.* **36**, 2882-2887 (2018).

14. P. Sai, D.B. But, K. Nowakowski-Szkudlarek, J. Przybytek, P. Prystawko, I. Yahniuk, P. Wiśniewski, B. Stonio, M. Słowikowski, S.L. Rumyantsev, W. Knap, and G. Cywinski "AlGaIn/GaN Field Effect Transistors Based on Lateral Schottky Barrier Gates as Millimeter Wave Detectors," *Proceedings of the 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, 2018, pp. 1-2.

15. M. Murawski, T. Tenderenda, M. Napierała, Ł. Szostkiewicz, A. Lukowski, Z. Hołdyński, M. Szymanski, M. Słowikowski, Ł. Ostrowski, P. Maré, L.R. Jaroszewicz, and T. Nasiłowski, "Influence of the mode field diameter on the strain sensitivity of different fibers," *Proc. SPIE* **8982**, 89821B (2014) (Optical components and materials XI, 3-5 February 2014, San Francisco, California, United States).

16. J. Starobrat, S. Fiderkiewicz, A. Kołodziejczyk, M. Sypek, R. Beck, K. Pavlov, M. Słowikowski, A. Kowalczyk, J. Suszek, and M. Makowski, "Suppression of spurious image duplicates in Fourier holograms by pixel apodization of a spatial light modulator," *Opt. Express* **29**, 40259-40273 (2021).

17. A. Kaźmierczak, M. Słowikowski, T. Osuch, S. Stopiński, and R. Piramidowicz, "Analysis of Operation of Photonic Integrated Interrogators for Fiber Optic Sensor Networks," in *2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and European Quantum Electronics Conference*, OSA Technical Digest (Optica Publishing Group, 2019), paper ch_p_34.

18. B. Stonio, N. Kwietniewski, P. Firek, M. Słowikowski, K. Pavlov, M. Sochacki, and J. Szmidt, "Wpływ materiału maskującego na jakość odwzorowania w procesie suchego trawienia węgla krzemu 4H-SiC w plazmie chlorowej," *Przegląd Elektrotechniczny* **95**, 158–161 (2019).

19. B. Stonio, N. Kwietniewski, P. Firek, M. Słowikowski, K. Pavlov, P. Caban, M. Sochacki, and J. Szmidt, "Wpływ reaktywnego trawienia jonowego wspomaganego plazmą BCl₃ na jakość powierzchni węgla krzemu 4H-SiC," *Przegląd Elektrotechniczny* **95**, 175–177 (2019).

Liczba cytowań wymienionych wyżej prac w bazie Web of Knowledge wynosi na dzień dzisiejszy sto dwadzieścia osiem, a ukazały się one w stu sześciu publikacjach. Z kolei liczba cytowań w pracach innych autorów jest równa sto dwadzieścia pięć i znajdują się one w stu trzech różnych artykułach. Z kolei indeks Hirscha wynosi pięć. Najwyżej cytowana z prac, tj. A. Ziółowicz, M. Szymanski, Ł. Szostkiewicz, T. Tenderenda, M. Napierała, M. Murawski, Z. Hołdyński, L. Ostrowski, P. Mergo, K. Poturaj, M. Makara, M. Słowikowski, K. Pawlik, T. Stańczyk, K. Stępień, K. Wysokiński, M. Broczkowska, and T. Nasiłowski, "Hole-assisted multicore optical fiber for next generation telecom transmission systems", Appl. Phys. Lett. **105**, 081106 (2014) zebrała już trzydzieści dziewięć cytowań.

Następnie baza Scopus zawiera dwadzieścia publikacji autora ze stu sześćdziesięcioma cytowaniami, które znajdują się w stu trzydziestu cytujących artykułach i z wartością indeksu Hirscha równą sześć. Wspomniana poprzednio najwyżej cytowana praca jest tu wymieniana pięćdziesiąt cztery razy.

Dorobek publikacyjny autora należy uznać za imponujący. Rzadko się zdarza, a szczerze mówiąc, mi nigdy nie zdarzyło się widzieć rozprawy tak licznie popartej wcześniejszymi publikacjami.

Prace p. mgr inż. Mateusza Słowikowskiego wpisują się w nowy kierunek rozwoju fotoniki, jakim stają się interrogatory, są koniecznym krokiem przejściowym do ich praktycznych zastosowań i stanowią istotny wkład do nowej i szybko rozwijającej się dziedziny szeroko rozumianej optyki, jaką stały się w ostatnich latach foniczne układy scalone. Z tego też powodu należy się spodziewać, że liczba odniesień do prac autora dysertacji będzie w przyszłości szybko rosła. Ponadto należy dodać, że publikacje p. mgr inż. Mateusza Słowikowskiego w większości przypadków ukazały się w renomowanych czasopismach o wysokich wartościach wskaźnika impact factor, co z jednej strony stanowi dodatkowy argument świadczący o ich wysokiej wartości, a z drugiej niewątpliwie przyczyni się do dalszego wzrostu liczby ich cytowań. Niezależnie od czysto akademickiej wartości rozprawy należy podkreślić znaczenie praktyczne osiągniętych wyników, a nawet uznać je za ważniejsze, a jest nim opracowanie procedur technologicznych wytwarzania interrogatorów na platformach fosforu indu i azotku krzemu. Pozwolę też sobie jeszcze raz powtórzyć argument o korzyściach ze zdobytych umiejętności technologicznych nie tylko dla samego doktoranta, ale także dla całego środowiska naukowego.

W mojej opinii tezy rozprawy zostały pomyślnie i z sukcesem dowiedzione. Wziąwszy pod uwagę przytoczone powyżej powody uważam, że rozprawa p. mgr inż. Mateusza Słowikowskiego zasługuje na wyróżnienie.

W konkluzji stwierdzam, że przedstawiona mi do oceny rozprawa doktorska p. mgr inż. Mateusza Słowikowskiego p.t. „Zintegrowane interrogatory fotoniczne do zastosowań w światłowodowych systemach czujnikowych” zawiera rozwiązanie oryginalnego problemu naukowego i tym samym spełnia wymogi ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. (Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz. U. 2018 poz. 1668 z późn. zm.) i na tej podstawie wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony oraz o uznanie jej za wyróżniającą.

ul.Szachowa 1
04-894 Warszawa
tel.: [+48 22] 512 81 00
fax: [+48 22] 512 86 25
e-mail: info@il-pib.pl
www.il-pib.pl



Zbigniew Jaroszewicz