

Autoreferat

1. Imię i nazwisko

Andrzej Przemysław Ziółkowski

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem podmiotu nadającego stopnień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy

- tytuł zawodowy **magistra inżyniera** na kierunku **Fizyka Techniczna** w specjalności Optoelektronika i Fizyka Materiałów, **04.07.2002** (Wydział Elektryczny, Politechnika Szczecińska)
- stopień **doktora nauk fizycznych** w zakresie **fizyki**, **26.06.2008**, nadany uchwałą Rady Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej na podstawie **wyróżnionej** rozprawy pt. „Nieliniowa propagacja światła w fotorefrakcyjnym falowodzie planarnym na wielokrotnych studniach kwantowych”
- tytuł zawodowy **magistra** na kierunku **Psychologia**, **10.06.2018**, dyplom uzyskany z **wyróżnieniem** (SWPS Uniwersytet Humanistycznospołeczny, Wydział Zamiejscowy w Poznaniu).

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych

od 01.10.2007 do 31.12.2008	asystent w Zakładzie Telekomunikacji Optycznej i Fotoniki, Instytut Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki na Wydziale Elektrycznym Politechniki Szczecińskiej
od 01.01.2009 do 31.01.2010	adiunkt w Zakładzie Telekomunikacji Optycznej i Fotoniki, Instytut Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki na Wydziale Elektrycznym Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie
od 01.02.2010	adiunkt w Katedrze Telekomunikacji i Fotoniki na Wydziale Elektrycznym Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 Ustawy.

Cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach naukowych pt. ”Szybka nieliniowość fotorefrakcyjna dla obszarów spektralnych wykorzystywanych w urządzeniach optoelektronicznych i optotelekomunikacyjnych.”

Na cykl składają się następujące publikacje (wymienione w porządku chronologicznym):

- [1] M. Wichtowski, A. Ziółkowski, E. Weinert-Rączka, *A general approach to the space-charge field solution in photorefractive materials in a TWM geometry*, Journal of Optics, vol. 12(6), 065201 (2010) DOI: 10.1088/2040-8978/12/6/065201;
- [2] A. Ziółkowski, *Temporal analysis of solitons in photorefractive semiconductors*, Journal of Optics, vol. 14(3), 035202 (2012) DOI: 10.1088/2040-8978/14/3/035202;
- [3] M. Wichtowski, A. Ziółkowski, *Interband photorefractive effect in semiconductors with hot-electron transport at arbitrary modulation depth*, Optics Communications, vol. 300, pp. 257-264 (2013) DOI: 10.1016/j.optcom.2013.03.011;
- [4] A. Ziółkowski, *Numerical approach to nonlinear propagation of light in photorefractive media*, Computer Physics Communications, vol. 185(2), pp. 504-511 (2014) DOI: 10.1016/j.cpc.2013.08.029;
- [5] A. Ziółkowski, *Self-bending of light in semiconductors with hot-electron effect*, Optics Express 22(4): pp. 4599-4605 (2014) DOI: 10.1364/OE.22.004599;
- [6] A. Ziółkowski, *Numerical method for an analysis of nonlinear light propagation in photorefractive media - time nonlocal approach*, Optics Express vol. 22(S7), pp. A1907 – A1925 (2014) DOI: 10.1364/OE.22.0A1907;
- [7] M. Wichtowski, A. Ziółkowski, *Temporal analysis of optical beams in biased photorefractive materials in the context of solitonic solutions: microscopic and macroscopic approach*, Applied Physics B: Laser and Optics, vol. 122(9), 239 (2016) DOI: 10.1007/s00340-016-6506-9;
- [8] E. Miśkiewicz, A. Ziółkowski, M. Wichtowski, E. Weinert-Rączka, *Thermally induced changes of the electro-optical properties of semi-insulating GaAs/AlGaAs multiple quantum well structures*, Optical Materials, vol. 89, pp. 231–236 (2019) DOI: 10.1016/j.optmat.2019.01.016;
- [9] A. Ziółkowski, M. Wichtowski, *Fast self-trapping of light in photorefractive semiconductors*, Journal of Optics, vol. 21(12), 125501 (2019) DOI: 10.1088/2040-8986/ab4dcc;
- [10] A. Ziółkowski, E. Weinert-Rączka, *Oscillations of charge carrier domains in photorefractive bipolar semiconductors*, Optics Express, vol. 28(21), pp. 30810-30823 (2020) DOI: 10.1364/OE.404302;
- [11] M. Wichtowski, A. Ziółkowski, *Improved spatial soliton theory on the example of photorefractive gallium arsenide*, Applied Physics B: Laser and Optics, vol. 127(9), 134 (2021) DOI: 10.1007/s00340-021-07678-7;
- [12] A. Ziółkowski, E. Weinert-Rączka, *Influence of modeling of nonlinear electron transport on light propagation in photorefractive semiconductors*, Optics and Laser Technology, vol. 155, 108348 (2022) DOI: 10.1016/j.optlastec.2022.108348.

Tabela 1. Analiza cyklu publikacji pod względem wytycznych oceny wg MNiSW i MEiN oraz wskaźnika Impact Factor.

Nr	Nazwa czasopisma	Punkty wg MNiSW i MEiN	Impact factor
[1]	Journal of Optics	32 (2007-2010, cz. A, poz. na liście: 5166)	1,662
[2]	Journal of Optics	30 (2011-2012, cz. A, poz. na liście: 6151)	1,990
[3]	Optics Communications	25 (2013-2018, cz. A, poz. na liście: 9110)	1,542
[4]	Computer Physics Communications	45 (2013-2018, cz. A, poz. na liście: 2594)	3,112
[5]	Optics Express	45 (2013-2018, cz. A, poz. na liście: 9111)	3,488
[6]	Optics Express	45 (2013-2018, cz. A, poz. na liście: 9111)	3,488
[7]	Applied Physics B: Laser and Optics	30 (2013-2018, cz. A, poz. na liście: 964)	1,696
[8]	Optical Materials	70 (2019-2021, poz. na liście: 15485)	2,779
[9]	Journal of Optics	70 (2019-2021, poz. na liście: 12115)	2,379
[10]	Optics Express	140 (2019-2021, poz. na liście: 15493);	3,894
[11]	Applied Physics B: Laser and Optics	70 (2019-2021, poz. na liście: 1501)	2,070
[12]	Optics and Laser Technology	100 (2019-2021, poz. na liście: 15489)	3,867
-	Łącznie	702	31,967

Wartości wskaźnika Impact Factor zostały powtórzone za bazą Journal Citation Reports, punktacja MNiSW i MEiN na podstawie listy czasopism punktowanych odpowiedniej dla roku publikacji (wg poniższej tabeli).

Tabela 2. Listy czasopism punktowanych odpowiednie dla roku publikacji.

Rok publikacji artykułu	Lista czasopism
2007-2010	Ujednolicona lista czasopism z dn. 25.06.2010
2011-2012	Wykaz czasopism naukowych z dn. 20.12.2012
2012-2018	Wykaz czasopism naukowych z dn. 25.01.2017
2019-2022	Wykaz czasopism naukowych i recenzowanych materiałów z konferencji międzynarodowych z dn. 01.12.2021

Omówienie cyklu publikacji

Choć nie zawsze jest to zauważalne, zjawiska nieliniowe są silnie wpisane w naturę fizycznych układów otaczającego nas świata. W rezultacie odgrywają ważną rolę w wielu gałęziach współczesnej nauki i techniki. Poszukiwanie i charakteryzacja nowych, nieliniowych materiałów optycznych jest wyzwaniem, którego realizacji podejmuje się wiele grup badawczych na całym świecie. Moja aktywność w tym obszarze skupiona jest na materiałach fotorefrakcyjnych. Ośrodki fotorefrakcyjne to media o wielu unikalnych właściwościach fizycznych pozwalających na wytwarzanie rekonfigurowalnych obwodów optycznych oraz na efektywne przełączanie i przetwarzanie sygnałów świetlnych. W grupie ośrodków optycznych, materiały fotorefrakcyjne posiadają mocno ugruntowaną pozycję jako jedne z najbardziej czułych mediów nieliniowych¹. Wydaje się jednak, że praktyczne wykorzystanie tych ośrodków jest hamowane przez ich podstawową i istotną wadę związaną z długim czasem reakcji. Poszukiwanie materiału, który pozwalałby wykorzystać zalety mediów fotorefrakcyjnych i jednocześnie pozbawiony byłby ich podstawowej wady było główną motywacją prac badawczych, których wyniki zostały przedstawione w cyklu publikacji naukowych pt. „*Szybka nieliniowość fotorefrakcyjna dla obszarów spektralnych wykorzystywanych w urządzeniach optoelektronicznych i optotelekomunikacyjnych.*”

Przedstawiony do oceny dorobek obejmuje szereg podjętych przeze mnie przedsięwzięć badawczych, których główną osią tematyczną była analiza mechanizmu fotorefrakcyjnego zachodzącego w wybranych materiałach półprzewodnikowych. W swoich pracach skoncentrowałem się na dwóch grupach materiałowych: ośrodkach objętościowych takich jak GaAs, AlGaAs i InP oraz na strukturach wielokrotnych studni kwantowych wytwarzanych w oparciu o te materiały. Wszystkie wymienione ośrodki charakteryzują się relatywnie wysoką ruchliwością nośników. Ma to istotne znaczenie w procesach transportu nośników i może ostatecznie prowadzić do znacznego skrócenia czasu przełączania i przetwarzania sygnałów optycznych. Dodatkową zaletą badanych przeze mnie mediów jest ich czułość w zakresie bliskiej podczerwieni, która wykorzystywana jest w telekomunikacji optycznej oraz możliwość integracji z innymi elementami optycznych układów scalonych. Aby poddać analizie interesujące mnie ośrodki rozwinąłem szereg zaawansowanych narzędzi numerycznych umożliwiających wgląd w dynamikę procesów nieliniowych zachodzących w fotorefrakcyjnych półprzewodnikach. Wykorzystanie tych narzędzi pozwoliło mi szczegółowo opisać mechanizm fotorefrakcyjny wybranych ośrodków, odkryć nowe, nieraportowane dotychczas zjawiska oraz ocenić możliwości zastosowania badanych materiałów do szybkiego przełączania sygnałów optycznych.

W dalszej części autoreferatu omówiłem szczegółowo uzyskane przeze mnie wyniki, opisując swój wkład w opublikowane prace. Podzieliłem opublikowane w ramach cyklu prace na dwie grupy zawierające wyniki dotyczące:

- zjawisk zachodzących podczas nieliniowej propagacji światła, w tym:
 - rozwiniętych przeze mnie metod numerycznych (prace [4], [6]),
 - procesów fizycznych zachodzących podczas samopułpkowania światła, w szczególności procesów związanych z propagacją optycznych solitonów przestrzennych (prace [2], [5], [7], [9-12]),

¹ D. D. Nolte, *Photorefractive effects and materials*, Springer Science & Business Media, New York, (2013).

- zjawisk występujących w układach wykorzystujących fotorefrakcyjne mieszanie fal (prace [1], [3], [8]).

Zjawiska zachodzące podczas nieliniowej propagacji światła

Metody numeryczne

Teoretyczny opis propagacji światła w fotorefrakcyjnych materiałach półprzewodnikowych jest złożonym problemem nieliniowym. Przybliżenia analityczne stosowane przy opisie materiałów o prostszej charakterystyce nie znajdują zastosowania w przypadku półprzewodników. Jeśli porównamy półprzewodniki z innymi członkami fotorefrakcyjnej rodziny, zauważymy, że cechami wyróżniającymi te ośrodki są przede wszystkim bipolarny charakter transportu nośników oraz wynikające z nieliniowego transportu elektronów zjawisko ujemnej rezystancji różniczkowej². W kwestii analizy, cechy te czynią półprzewodniki jednymi z najbardziej wymagających mediów fotorefrakcyjnych. Z formalnego punktu widzenia do opisu mechanizmu fotorefrakcji wykorzystać można tak zwany model PDDT (od ang. Photogeneration-Drift-Diffusion-Trapping). W przypadku półprzewodników model ten zawiera sześć nieliniowych, sprzężonych równań różniczkowych opisujących generację, transport i pułapkowanie nośników. Jeśli celem analizy jest zbadanie propagacji wiązki światła, równania te należy dodatkowo uzupełnić sprzężonym z nimi nieliniowym równaniem falowym. Rozwiązanie tak sformułowanego zagadnienia daje wgląd w czasowo-przestrzenną ewolucję rozkładu natężenia światła propagującej się wiązki optycznej oraz w dynamikę zaindukowanych optycznie rozkładów: koncentracji nośników ładunku, pola elektrycznego i koncentracji zjonizowanych pułapek.

Rozwinięte przeze mnie metody numeryczne daje się podzielić na dwie zasadnicze grupy:

- metody jednowymiarowe – pozwalające na analizę procesów fizycznych indukowanych przez jednowymiarowy rozkład natężenia światła,
- metody dwuwymiarowe – pozwalające na analizę procesów fizycznych indukowanych propagującą się w rozważanym medium wiązką optyczną.

Pierwsze oparte są na rozwiązaniu układu równań opisanego modelem PDDT, natomiast drugie odnoszą się do zagadnienia propagacji i oparte są na rozwiązaniu zarówno układu równań modelu PDDT jak i sprzężonego z nim nieliniowego równania falowego. Algorytm metody jednowymiarowej stanowi zatem segment algorytmu dwuwymiarowego. Szczegóły opracowanej przeze mnie metody numerycznej służącej do analizy propagacji wiązki w fotorefrakcyjnych półprzewodnikach przedstawiłem w autorskiej pracy:

- [4] A. Ziółkowski, *Numerical approach to nonlinear propagation of light in photorefractive media*, Computer Physics Communications, vol. 185(2), pp. 504-511 (2014).

Główne osiągnięcia przytoczonej pracy obejmują:

² S.M. Sze, Kwok K. Ng, *Physics of semiconductor devices*, John Wiley & Sons, wyd. 3 (2006).

- zaproponowanie opartego na metodzie różnic skończonych algorytmu numerycznego służącego do analizy nieliniowej propagacji światła w mediach półprzewodnikowych charakteryzujących się bipolarnym transportem nośników oraz nieliniowym transportem elektronów,
- optymalizacja algorytmu pod względem wydajności obliczeniowej poprzez zrównoleglenie obliczeń w zakresie równania ciągłości dla elektronów i równania ciągłości dla dziur,
- wykazanie elastyczności opracowanego podejścia poprzez zademonstrowanie jego przydatności do analizy mediów półprzewodnikowych takich jak objętościowy GaAs jak również w analizie typowych materiałów fotorefrakcyjnych, takich jak fotorefrakcyjny kryształ SBN.

Zaproponowane w pracy [4] narzędzie numeryczne posiada duży potencjał badawczy szczególnie w przypadku, kiedy analizie poddawane są ośrodki o charakterystyce bardziej złożonej niż ośrodki typowe. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że zaprezentowana metoda posiada ograniczenie tak zwanego „*przybliżenia czasowo-lokalnego*”. Proces budowania pola ładunku przestrzennego w danym przekroju kryształu fotorefrakcyjnego (wzdłuż osi propagacji z) zależy od dynamiki procesów zachodzących w kryształach w miejscach wcześniejszych (dla $z' < z$)^{3,4}. Zjawisko to określane mianem „*czasowej nielokalności*” ma wpływ na czas osiągnięcia stanu stacjonarnego oraz na przebieg procesu formowania fotorefrakcyjnych solitonów przestrzennych. Aby uwzględnić efekt czasowej nielokalności, procedura obliczeniowa przedstawiona w pracy [4] została przeze mnie zmodyfikowana. Wyniki prac nad nową wersją algorytmu numerycznego, zoptymalizowanego pod kątem nielokalnych zjawisk czasowych, zostały zaprezentowane w autorskiej pracy:

- [6] A. Ziółkowski, *Numerical method for an analysis of nonlinear light propagation in photorefractive media - time nonlocal approach*, Optics Express vol. 22(S7), pp. A1907–A1925 (2014).

Przedstawiona w pracy [6] koncepcja modyfikacji opracowanej wcześniej procedury obliczeniowej wydaje się prosta. Polega ona na odwróceniu kolejności rozdzielonego całkowania w dziedzinach czasu i przestrzeni, względem tej, którą zastosowano w pracy [4]. Można to jednak zrobić na dwa różne sposoby, co w rezultacie pozwoliło mi opracować dwa nowe algorytmy, stanowiące oryginalne osiągnięcie omawianej pracy:

- algorytm podstawowy – w którym całkowanie w dziedzinie czasu odbywa się w jednym bloku obejmującym zarówno dynamikę nośników ładunku jak i równanie falowe,
- algorytm zoptymalizowany – w którym całkowanie w dziedzinie czasu zostało rozdzielone i wykonane z różnymi parametrami, dobranymi odpowiednio dla: ewolucji nośników ładunku i równania falowego.

³ C. Dari-Salisburgo, E. DelRe, E. Palange, “Molding and Stretched Evolution of Optical Solitons in Cumulative Nonlinearities,” *Phys. Rev. Lett.* **91**(26): 263903 (2003).

⁴ E. DelRe, E. Palange, “Optical nonlinearity and existence conditions for quasi-steady-state photorefractive solitons,” *J. Opt. Soc. Am. B* **23**(11): 2323 – 2327 (2006).

Przy prawidłowo dobranych parametrach algorytm zoptymalizowany pozwala uzyskać dużo krótszy czas obliczeniowy niż algorytm podstawowy. Wydaje się, że ma to duże znaczenie, szczególnie w przypadku analizy nieliniowej propagacji światła w mediach tak złożonych jak fotorefrakcyjne półprzewodniki.

Analiza nieliniowej propagacji światła

Motywacją badań nad nieliniową propagacją światła, a w szczególności nad propagacją przestrzennych solitonów optycznych jest potencjalna możliwość tworzenia za ich pomocą rekonfigurowalnych obwodów optycznych⁵. Wśród wielu obiecujących możliwości rodzących się w tym obszarze badawczym szczególne miejsce zajmują zjawiska zachodzące w mediach fotorefrakcyjnych. Nieliniowość fotorefrakcyjna oferuje między innymi możliwość optycznego indukowania kanałów falowodowych⁶ oraz możliwość sterowania trajektorią wiązki optycznej, która ulegać może zakrzywieniu⁷. Zjawisko sterowania trajektorią wiązki laserowej jest w przypadku mediów fotorefrakcyjnych związane ze zjawiskiem transportu nośników ładunku. Optycznie wzbudzone nośniki mogą przemieszczać się w ośrodku fotorefrakcyjnym na skutek dryfu w zewnętrznym polu elektrycznym i/lub w wyniku dyfuzji. Jeżeli pole elektryczne jest silne, wpływ dyfuzji nośników można pominąć. Zaindukowane optycznie zmiany współczynnika załamania uzyskują wtedy symetryczny rozkład przestrzenny. W przypadku pól elektrycznych o niewielkich natężeniach lub przy zastosowaniu wiązek o niewielkich rozmiarach, zjawisko dyfuzji nośników nabiera znaczenia. Wywołuje ono niewielką asymetrię w rozkładzie zmian współczynnika załamania, która jest przyczyną zakrzywiania trajektorii propagującej się wiązki optycznej.

Jednym z pierwszych przedsięwzięć badawczych, podjętych przeze mnie po opracowaniu opisanych wcześniej narzędzi numerycznych było przeprowadzenie szczegółowej analizy nieliniowej propagacji światła w materiałach półprzewodnikowych charakteryzujących się bipolarnym transportem nośników i nieliniowym transportem elektronów. Głównym rezultatem tych badań było odkrycie nowego, nie wynikającego ze zjawiska dyfuzji, mechanizmu zakrzywiania wiązki optycznej. Szczegóły przeprowadzonych przeze mnie w tym zakresie prac badawczych zostały przedstawione w kolejnej autorskiej publikacji:

- [5] A. Ziółkowski, *Self-bending of light in semiconductors with hot-electron effect*, *Optics Express* 22(4): pp. 4599-4605, (2014).

Najważniejsze osiągnięcia przytoczonej pracy to:

- wykazanie możliwości samo-pułapkowania wiązek optycznych w półprzewodnikach charakteryzujących się bipolarnym transportem nośników oraz nieliniowym transportem elektronów,

⁵ Y. S. Kivshar and G. I. Stegeman, "Spatial optical solitons: Guiding light for future technologies," *Optics & Photonics News* 13(2): 59–63 (2002).

⁶ S. Lan, E. Delre, Z. G. Chen, M. F. Shih, and M. Segev, "Directional coupler with soliton-induced waveguides," *Opt. Lett.* 24(7): 475–477 (1999).

⁷ K. Pismennaya, O. Kashin, V. Matusevich, A. Kiessling, and R. Kowarschik, "Beam self-trapping and self-bending dynamics in a strontium barium niobate crystal," *J. Opt. Soc. Am. B* 25(2): 136–139 (2008).

- wykazanie możliwości zakrzywiania trajektorii wiązki optycznej poprzez asymetrię rozkładu współczynnika załamania, której źródłem jest zjawisko nieliniowego transportu elektronów oraz tak zwany efekt współzawodnictwa elektronów i dziur,
- wykazanie, że złożona ewolucja czasowo-przestrzenna rozkładów koncentracji elektronów i dziur jest przyczyną wydłużenia czasu potrzebnego do osiągnięcia stanu stacjonarnego (jeśli porównać go z czasem dla materiału charakteryzującego się liniowym transportem unipolarnym).

Powołując się na standardowy model mechanizmu fotorefrakcji można stwierdzić, że uzyskanie krótkiego czasu odpowiedzi może zostać zrealizowane w oparciu o dwie strategie. Poprzez dobór medium, które charakteryzuje się wysoką wartością ruchliwości nośników i/lub wykorzystanie wysokich natężeń propagującej się wiązki. W pracy [5] wykorzystano strategię pierwszą. Zarówno objętościowy arsenek galu jak i struktury studni kwantowych GaAs/AlGaAs to w rodzinie ośrodków fotorefrakcyjnych media charakteryzujące się wysokimi wartościami ruchliwości. Rezultaty badań przedstawione w pracy [5] wykazały jednak, że odpowiedź rozważanych mediów jest relatywnie złożona, prowadząc do efektów wychodzących poza ramy najprostszych modeli mechanizmu fotorefrakcji. Skutkiem tego, najkrótszy uzyskany w badaniach czas, potrzebny do uformowania bezdyfrakcyjnie propagującej się wiązki optycznej to czas kilkudziesięciu mikrosekund. Naturalnym sposobem uzyskania krótszych czasów jest zastosowanie obu wymienionych strategii równocześnie. Badanie zjawisk nieliniowych, które towarzyszą propagacji wysoko-natężeniowych impulsów optycznych, stało się zatem naturalnym przedłużeniem analizy opisanego w pracy [5]. Aby taka analiza była możliwa, oba rozwinięte wcześniej narzędzia numeryczne (metoda jednowymiarowa i metoda dwuwymiarowa), zostały przystosowane do pracy z wysoko-natężeniowymi, pikosekundowymi impulsami optycznymi. Rezultaty przeprowadzonych badań opisane zostały w pracy:

- [9] A. Ziółkowski, M. Wichtowski, *Fast self-trapping of light in photorefractive semiconductors*, Journal of Optics, vol. 21(12), 125501 (2019).

Wymiernym skutkiem opisanych w przytoczonym artykule prac badawczych było oszacowanie poziomu szybkości procesów samopułapkowania światła jaki można osiągnąć w objętościowym arsenku galu lub w strukturach wielokrotnych studni kwantowych GaAs/AlGaAs. Wspólnie z dr. inż. Markiem Wichtowskim opracowaliśmy założenia tego projektu badawczego oraz przeprowadziliśmy interpretację uzyskanych wyników. Mój wkład dodatkowo obejmował: sformułowanie przybliżonego podejścia analitycznego, zaproponowanie metody numerycznej oraz przeprowadzenie za jej pomocą analiz, których najważniejsze rezultaty to:

- wykazanie możliwości samopułapkowania światła propagującego się w postaci impulsów optycznych, których czas trwania mieści się w zakresie pojedynczych pikosekund,
- opis ewolucji czasowej propagujących się impulsów, a w szczególności wykazanie, że jej przebieg zależy od koncentracji pułapek, która wpływa na wartości długości drogi dryfu elektronów i dziur,

- wykazanie, że jeżeli długości dróg dryfu nośników są niewielkie w porównaniu z szerokością propagującej się wiązki optycznej, to proces samopułapkowania można przeprowadzić w ramach propagacji pojedynczego impulsu o czasie trwania około 8 ps i natężeniu światła rzędu 10 MW/cm^2 ,
- wykazanie, że w przypadku kiedy długość drogi dryfu elektronów jest relatywnie duża, proces samopułapkowania związany jest ze zjawiskiem silnego zakrzywienia trajektorii wiązki optycznej, a jego czas trwania jest dłuższy i wymaga zastosowania serii kilkunastu impulsów pikosekundowych,
- wskazanie potencjalnej możliwości przełączania sygnału optycznego pomiędzy portami wyjściowymi analizowanej próbki, które może być realizowane w subnanosekundowym oknie czasowym, przy zastosowaniu impulsów o natężeniu 1 MW/cm^2 .

Jest powszechnie wiadome, że charakterystyczny dla półprzewodników, nieliniowy transport elektronów posiada szerokie zastosowania w obszarze elektroniki. Zjawisko to jest przyczyną formowania się wysoko-natężeniowych domen pola elektrycznego czyli tak zwanych domen Gunna⁸ i jest podstawą konstrukcji wysoko-częstotliwościowych oscylatorów elektronicznych. W kontekście zagadnień objętych niniejszym cyklem publikacji interesujące wydaje się zjawisko nazywane fotorefrakcyjnym efektem Gunna⁹. W ramach tego zjawiska zsynchronizowane z przesuującym się wzorem interferencyjnym domeny pola elektrycznego mogą wydajnie wzmacniać indukowane optycznie, periodyczne zmiany współczynnika załamania. Fotorefrakcyjny efekt Gunna stanowił dla mnie inspirację do badawczej eksploracji zagadnienia niestabilności domen, która może występować podczas nieliniowej propagacji światła w półprzewodnikach takich jak arsenek galu lub w strukturach wielokrotnych studni kwantowych opartych na materiałach GaAs/AlGaAs.

Korzystając z rozwiniętej przeze mnie jednowymiarowej metody numerycznej odkryłem nowe zjawisko mające swoje źródło w charakterystycznym dla omawianych materiałów, nieliniowym transporcie elektronów. Opisujący efekt polega na formowaniu, wywołanych przez zlokalizowaną wiązkę światła, domen nośników ładunku. Nie mamy tu do czynienia z wyodrębnioną, podróżującą domeną Gunna, obserwujemy natomiast wzbudzone za pomocą światła, lokalne (nie wydostające się do obwodu zewnętrznego) oscylujące domeny elektronów i dziur, które sprzężone są z lokalnymi oscylacjami ładunku przestrzennego i pola elektrycznego. Wyniki prac badawczych przeprowadzonych w tym zakresie przedstawione zostały w kolejnej publikacji omawianego cyklu:

- [10] A. Ziółkowski, E. Weinert-Rączka, *Oscillations of charge carrier domains in photorefractive bipolar semiconductors*, Optics Express, vol. 28(21), pp. 30810-30823 (2020).

Zakres i założenia pracy [10] opracowałem wspólnie z prof. Ewą Weinert-Rączką, przy czym mój wkład obejmował dodatkowo przeprowadzenie badań numerycznych oraz interpretację uzyskanych wyników. Oryginalne rezultaty uzyskane w ramach pracy [10] to:

⁸ J. B. Gunn, "Instabilities of current in III-V semiconductors," *IBM J. Res. Dev.* **8**(2): 141–59 (1964).

⁹ M. Segev, B. Collings, D. Abraham, "Photorefractive gunn effect," *Phys. Rev. Lett.* **76**(20): 3798–801 (1996).

- wykazanie możliwości optycznego generowania domen nośników ładunku, które podróżując w stronę elektrody o wyższym potencjale, pokonują dystans kilku szerokości wiązki optycznej, zatrzymują się i wpadają w ruch oscylacyjny,
- wyodrębnienie podstawowych parametrów, które mają wpływ na pojawienie się oscylacji domen oraz na ich charakter. Zbiór wyodrębnionych w badaniach wielkości obejmuje:
 - wartość natężenia zewnętrznego pola elektrycznego, która określa stopień nieliniowości transportu elektronów,
 - stosunek koncentracji elektronów do koncentracji dziur,
 - wartość natężenia wiązki optycznej, która generuje domeny nośników ładunku.
- określenie zakresu częstotliwości obserwowanych oscylacji, który w przybliżeniu rozciąga się od setek herców do kilku kiloherców.

Przyjmując formalny punkt widzenia, nieliniowy transport elektronów związany jest z nieliniową relacją między prędkością dryfu elektronów, a wartością pola elektrycznego. Odnosząc się do omawianego cyklu publikacji należy zaznaczyć, że analiza problemu propagacji przedstawiona w pracy [5] przeprowadzona została przy zastosowaniu innego, niż w pracy [10] podejścia do modelowania transportu elektronów. Skupiając się na różnicach o charakterze formalnym można powiedzieć, że podejście zastosowane w pracy [5] (dalej określane jako Model 1) prowadzi do krzywej opisującej prędkość dryfu elektronów, która wraz ze wzrastającym polem elektrycznym przechodzi przez lokalne minimum. Charakterystyka prędkości dryfu zastosowana w pracy [10] (odnosząca się do Modelu 2) nie posiada lokalnego minimum. W obszarze pól elektrycznych o wyższych wartościach, prędkość ta nasycza się, co w konsekwencji prowadzi do spłaszczenia krzywej dryfu. Ponieważ sposób modelowania transportu elektronów, którego wybór nie jest jednoznacznie określony przez wyniki doświadczalne, może wpływać na zjawiska obserwowane podczas nieliniowej propagacji światła, kolejnym podjętym przeze mnie zagadnieniem była analiza problemu propagacji wykonana w oparciu o drugi sposób modelowania. W ramach badań sformułowano dwa cele. Pierwszym było sprawdzenie czy zaprezentowany w pracy [5], efekt zakrzywienia trajektorii wiązki optycznej jest obecny również w przypadku, kiedy do opisu transportu elektronów wykorzystany zostanie Model 2. Ponieważ sposób modelowania transportu elektronów związany jest z opisany w pracy [10] efektem oscylacji domen nośników ładunku, drugim celem badawczym była analiza wpływu tego zjawiska na propagację światła. Wyniki przeprowadzonej analizy zaprezentowano i omówiono w publikacji:

- [12] A. Ziółkowski, E. Weinert-Rączka, *Influence of modeling of nonlinear electron transport on light propagation in photorefractive semiconductors*, Optics and Laser Technology, vol. 155, 108348 (2022).

Podobnie jak poprzednio zakres i założenia tej publikacji opracowałem wspólnie z prof. Ewą Weinert-Rączką. Mój wkład obejmował dodatkowo przeprowadzenie badań numerycznych oraz interpretację uzyskanych wyników. Przedstawione w pracy [12] zasadnicze rezultaty przeprowadzonych przeze mnie badań obejmują:

- potwierdzenie, że oba rozważane w zakresie modelowania transportu elektronów podejścia, dają możliwość samopułapkowania światła, oraz możliwość zakrzywania trajektorii propagującej się wiązki optycznej,
- wykazanie, że przy odpowiednio dobranych parametrach, stosując Model 2, zaobserwować można zjawisko „poszerzonego ekranowania” zewnętrznego pola elektrycznego, które sprawia, że efekt samopułapkowania posiada charakter przejściowy, to znaczy występuje jedynie w krótkim oknie czasowym,
- wykazanie, że występujące w ramach Modelu 2, indukowane optycznie oscylacje domen nośników ładunku mogą manifestować się w postaci oscylacji natężenia propagującej się wiązki optycznej.

Propagacja optycznych solitonów przestrzennych

Istotnym aspektem dociekań naukowych związanych z nieliniową propagacją światła są badania dotyczące propagacji solitonów i fal solitonowych. Z matematycznego punktu widzenia solitony i fale solitonowe różnią się między sobą. Solitony stanowią rozwiązania całkowalnych równań falowych, podczas gdy równania opisujące fale solitonowe całkowalne nie są. Z praktycznego punktu widzenia opisują one jednak to samo - zlokalizowane zaburzenia falowe, których postać nie ulega zmianie podczas propagacji¹⁰.

Zjawisko samopułapkowania światła, do którego odwołują się prace [5], [9] i [12] związane jest z procesem znoszenia naturalnego poszerzenia dyfrakcyjnego wiązki optycznej. Warto jednak zauważyć, że celem opisanych w tych pracach analiz nie było poszukiwanie rozwiązań stricte solitonowych. Zagadnienie dotyczące oceny możliwości uzyskania propagacji solitonowej w rozważanych przeze mnie półprzewodnikach oraz analiza właściwości fal solitonowych propagujących się w tych mediach była tematem kolejnych publikacji omawianego cyklu.

Aby rozwiązać problem propagacji solitonowej w ośrodku fotorefrakcyjnym, należy postawić dwa pytania badawcze. Pierwsze dotyczy formy jaką posiada zależność indukowanych optycznie zmian współczynnika załamania od rozkładu natężenia światła. Drugie związane jest z analizą otrzymanej zależności w kontekście podtrzymywania propagacji solitonowej. Ponieważ w materiałach fotorefrakcyjnych, zmiany współczynnika załamania posiadają swoje źródło w efekcie elektrooptycznym, ważne jest aby ustalić jaki rodzaj zjawiska elektro-optycznego dostępny jest w badanych mediach.

Przyglądając się zjawisku elektrooptycznemu, można zauważyć, że w przypadku rozważanych półprzewodników dostępne są dwie opcje. Najbardziej oczywista, to wykorzystanie efektu liniowego występującego zarówno w objętościowych kryształach GaAs jak i strukturach studni kwantowych GaAs/AlGaAs. Efekt ten jest dostępny w szerokim zakresie spektralnym, w którym łatwo znaleźć punkt charakteryzujący się niewielkim, umożliwiającym propagację, współczynnikiem absorpcji. Należy jednak zaznaczyć, że wartość liniowego współczynnika elektro-optycznego jest w rozważanych mediach relatywnie niska, co związane jest z koniecznością stosowania silnych pól elektrycznych. W oparciu o liniowy efekt elektrooptyczny przeprowadzono analizy opisane w pracach [5], [9] i [12]. Drugą opcją jest możliwość związana z wykorzystaniem występującego w rozważanych mediach, kwadratowego efektu elektrooptycznego. W

¹⁰ M. Segev and G. I. Stegeman, “Self-trapping of optical beams: spatial solitons,” *Physics Today* **51**(8): 42-48 (1998).

przypadku objętościowego arsenku galu, efekt ten jest wynikiem obecnego w okolicy krawędzi absorpcji zjawiska Franzta-Keldysza¹¹, natomiast w przypadku struktur studni kwantowych jego źródłem jest zjawisko blisko-rezonansowej elektroabsorpcji ekscytonowej¹². Siła efektu kwadratowego jest większa, jednak jego wykorzystanie jest związane z obecnością silniejszej absorpcji.

Analiza procesu formowania fal solitonowych w oparciu o kwadratowy efekt elektro-optyczny występujący w falowodzie planarnym, którego warstwą prowadzącą jest struktura wielokrotnych studni kwantowych GaAs/AlGaAs, została podjęta w kolejnej autorskiej pracy cyklu:

- [2] A. Ziółkowski, *Temporal analysis of solitons in photorefractive semiconductors*, Journal of Optics, vol. 14(3), 035202 (2012).

Ponieważ w zakresie spektralnym, w którym występuje zjawisko blisko-rezonansowej elektroabsorpcji ekscytonowej, zmiany współczynnika załamania mają charakter rozogniskowujący, przeprowadzona przeze mnie analiza dotyczyła zjawiska formowania się solitonów ciemnych. Wśród ważniejszych rezultatów przeprowadzonych przeze mnie badań, wymienić można:

- szczegółowy, przeprowadzony za pomocą metod numerycznych, opis dynamiki procesów fizycznych indukowanych jednowymiarową, zlokalizowaną wiązką optyczną oświetlającą strukturę wielokrotnych studni kwantowych GaAs/AlGaAs. W szczególności opis dwuetapowej, charakteryzującej się różnymi stałymi czasowymi, ewolucji rozkładów koncentracji swobodnych nośników,
- wykazanie, że w rozważanym ośrodku, przy odpowiednio dobranych parametrach materiałowych, uzasadnione jest stosowanie przybliżonej, analitycznej relacji opisującej dynamikę formowania indukowanych optycznie zmian współczynnika załamania,
- rozwiązanie problemu dynamiki ciemnych solitonów przestrzennych, indukowanych w ośrodkach z kwadratowym efektem elektro-optycznym, poprzez numeryczne rozwiązanie równania falowego, w którym człon nieliniowy zależy od czasu.

Zastosowane w omówionej wyżej pracy podejście służące do analizy stanów solitonowych jest powszechnie przyjęte i nazwane standardowym. Podobny sposób postępowania wykorzystano wcześniej w ramach badań nad solitonami w materiałach typowych, takich jak na przykład fotorefrakcyjne ferroelektryki^{13,14}. Warto jednak zwrócić uwagę na fakt, że rozkład zmian współczynnika załamania wyprowadzony w ramach takiego podejścia został uzyskany poprzez tak zwane przybliżenie fenomenologiczne. W konsekwencji stosowania takiej strategii otrzymujemy równanie solitonowe, które nie

¹¹ A. Partovi, E. M. Garmire, "Band-edge photorefractivity in semiconductors: Theory and experiment," *J. Appl. Phys.* **69**(10): 6885 (1991).

¹² D. D. Nolte, "Semi-insulating semiconductor heterostructures: Optoelectronic properties and applications," *J. Appl. Phys.* **85**(9): 6259 (1999).

¹³ K. Lu et al., "Temporal development of spatial solitons in biased photorefractive- photovoltaic materials," *Journal of Modern Optics* **55**(10): 1571–1585 (2008).

¹⁴ Q. Jiang, Y. Su, X. Ji, "Temporal analysis of low-amplitude screening spatial solitons due to two-photon photorefractive effect," *Optics & Laser Technology* **43**: 91–94 (2011).

zawiera parametrów mikroskopowych takich jak na przykład koncentracje pułapek. To z kolei może sugerować, że uzyskane rozwiązanie jest uniwersalne i może być stosowane w takiej samej formie w analizie różnych materiałów fotorefrakcyjnych. Mimo, że w pewnych przypadkach wykorzystanie tego typu podejścia jest uzasadnione, możliwe jest rozszerzenie standardowej teorii tak, aby równanie solitonowe uwzględniało charakterystyczne dla różnych materiałów parametry mikroskopowe. Wspólnie z dr. inż. Markiem Wichtowskim przeprowadziliśmy szereg prac badawczych, w wyniku których tak zwane standardowe podejście do opisu solitonów fotorefrakcyjnych zostało poszerzone. Rozszerzony model solitonów fotorefrakcyjnych, omówiony został w dwóch kolejnych pracach cyklu:

- [7] M. Wichtowski, A. Ziółkowski, *Temporal analysis of optical beams in biased photorefractive materials in the context of solitonic solutions: microscopic and macroscopic approach*, Applied Physics B: Laser and Optics, vol. 122(9), 239 (2016).
- [11] M. Wichtowski, A. Ziółkowski, *Improved spatial soliton theory on the example of photorefractive gallium arsenide*, Applied Physics B: Laser and Optics, vol. 127(9), 134, (2021).

Praca [7] podobnie jak praca [2] podejmuje temat dynamiki solitonów fotorefrakcyjnych. W pracy tej, posługując się podejściem mikroskopowym wyprowadzono i omówiono skorygowaną, czasową zależność indukowanych przez zlokalizowaną wiązkę optyczną zmian współczynnika załamania. Analiza przedstawiona w pracy [7] przeprowadzona została dla materiałów z liniowym, unipolarnym transportem nośników, jednak zakres stosowalności przedstawionego podejścia obejmuje również media o bardziej złożonej charakterystyce. Tematem podjętym w pracy [11] były stacjonarne, tak zwane „ekranujące” solitony przestrzenne, propagujące się w objętościowym arsenku galu. Analizie poddana została w tym przypadku sytuacja, w której podobnie jak w pracy [7] wykorzystano liniowy efekt elektrooptyczny, ale w mechanizmie fotorefrakcji uwzględniono bipolarny transport nośników i nieliniowy transport elektronów.

Mój wkład w przypadku obu przytoczonych prac polegał na opracowaniu wraz z dr. inż. Wichtowskim założeń i zakresu badań oraz na przeprowadzeniu, w oparciu o stworzone przeze mnie narzędzie numeryczne, obliczeń, których celem była weryfikacja proponowanego przez nas, nowego podejścia analitycznego. Obliczenia numeryczne stanowiły w opisanych pracach również podstawę do analizy modelu standardowego i zakresu jego stosowalności. W oparciu o uzyskane rezultaty stwierdzono, że podejście standardowe poprawnie opisuje propagację solitonów jasnych, nie sprawdza się natomiast w przypadku solitonów ciemnych, do opisu których należy stosować, nowy, zaproponowany przez nas model. Wniosek ten ma szczególne znaczenie w przypadku rozważanych przeze mnie półprzewodników. Fotorefrakcyjne solitony ciemne w porównaniu z jasnymi są mniej wymagające w kwestii koniecznej do ich propagacji siły nieliniowości. To w konsekwencji daje możliwość stosowania w przypadku solitonów ciemnych, pól elektrycznych o niższych wartościach niż w przypadku solitonów jasnych.

Zjawiska występujące w układach wykorzystujących fotorefrakcyjne mieszanie fal

Badania dotyczące nieliniowej propagacji światła zazwyczaj związane są z oddziaływaniem, między pojedynczą falą świetlną i ośrodkiem, w którym ta fala się rozchodzi. W przypadku zagadnienia siatek fotorefrakcyjnych, oddziaływanie ma charakter wielofalowy. Fotorefrakcyjne mieszanie fal, stanowi istotny aspekt dynamicznej holografii i współczesnej optyki nieliniowej, nabierając szczególnego znaczenia jeśli jako medium rozważamy struktury wielokrotnych studni kwantowych. Dzięki zjawisku rezonansowej elektroabsorpcji ekscytonowej struktury te oferują najwyższą czułość wśród wszystkich materiałów fotorefrakcyjnych¹⁵ i jedną z najwyższych dynamicznych wydajności dyfrakcyjnych (liczoną na długość interakcji) wśród wszystkich znanych materiałów optycznych^{16,17}. Z fundamentalnego punktu widzenia, interesujące są również koncepcje, które łączą wykorzystanie siatek fotorefrakcyjnych i zjawisko propagacji solitonowej. Przykład stanowią badania nad tak zwanymi solitonami „sztywnymi” (ang. *rigid solitons*)¹⁸, czyli falami, które charakteryzują się podwójnym balansem, odpowiednio pomiędzy dyfrakcją i samoogniskowaniem oraz tłumieniem i wzmocnieniem. Efektywne wzmocnienie fali solitonowej, może być w tym przypadku realizowane w oparciu o fotorefrakcyjne mieszanie dwufalowe, dzięki czemu charakterystyczna dla zjawiska fotorefrakcji absorpcja nie powoduje spadku intensywności propagującej się wiązki.

Uwzględniając opisany kontekst, można stwierdzić, że teoretyczny opis procesu indukowania siatki fotorefrakcyjnej jest istotnym zagadnieniem badawczym. Najczęściej stosowanym podejściem w analizie tego problemu jest metoda linearyzacji równań materiałowych tworzących model PDDT¹⁹. W ramach strategii linearyzacji zakłada się, że wszystkie występujące w modelu zmienne posiadają rozkłady będące repliką rozkładu natężenia światła, powstającego poprzez interferencję wiązek zapisujących siatkę. W konsekwencji, zadowalające wyniki uzyskuje się jedynie dla małej głębokości modulacji wzoru interferencyjnego. Sytuacja, w której mamy do czynienia z wysokim kontrastem prążków interferencyjnych jest jednak ważna i często stosowana w praktyce w celu podniesienia wydajności dyfrakcyjnej. Zagadnienie związane z opisem procesu indukowania siatki fotorefrakcyjnej, który wychodzi poza ograniczenie małego kontrastu prążków, zostało podjęte w ramach kolejnych prac omawianego cyklu publikacji:

- [1] M. Wichtowski, A. Ziółkowski, E. Weinert-Rączka, *A general approach to the space-charge field solution in photorefractive materials in a TWM geometry*, Journal of Optics, vol. 12(6), 065201 (2010).

¹⁵ D. D. Nolte, T. Cubel, L. J. Pyrak-Nolte, and M. R. Melloch, „Adaptive beam combining and interferometry with photorefractive quantum wells,” *J. Opt. Soc. Am. B* **18**(2): 195–205 (2001).

¹⁶ D. D. Nolte and M. R. Melloch, “Photorefractive Quantum Wells and Thin Films,” in *Photorefractive Effects and Materials*, edited by D. D. Nolte (Springer Science & Business Media, New York, 2013).

¹⁷ K. M. Kwolek, M. R. Melloch, D. D. Nolte, G. A. Brost, “Photorefractive asymmetric Fabry–Pérot quantum wells: Transverse-field geometry,” *Appl. Phys. Lett.* **67**(6): 736–738 (1995).

¹⁸ J. Liu, “Existence and property of spatial solitons in a photorefractive dissipative system,” *J. Opt. Soc. Am. B* **20**(8): 1732–1738 (2003).

¹⁹ D. D. Nolte, “Photorefractive Transport and Multiwave Mixing,” in *Photorefractive Effects and Materials*, edited by D. D. Nolte (Springer Science & Business Media, New York, 2013).

- [3] M. Wichtowski, A. Ziółkowski, *Interband photorefractive effect in semiconductors with hot-electron transport at arbitrary modulation depth*, Optics Communications, vol. 300, pp. 257-264 (2013).

W pracy [1] przedstawiono nowe, ogólne podejście teoretyczne, służące do wyznaczenia rozkładu pola ładunku przestrzennego siatki fotorefrakcyjnej, generowanej podczas zjawiska mieszania dwufalowego. Przedstawiona, w części oparta na metodzie perturbacyjnej strategia, może być stosowana do szerokiego spektrum materiałów fotorefrakcyjnych i dla dowolnej głębokości modulacji wzoru interferencyjnego. Mimo, że podejście to znajduje zastosowanie w ramach modeli uwzględniających bipolarny transport nośników, nie możemy wykorzystać go w analizie odpowiedzi fotorefrakcyjnej w zakresie pól elektrycznych, dla których transport elektronów ma charakter nieliniowy. Badania obejmujące swoim zakresem zagadnienie nieliniowego transportu elektronów podjęte zostały w pracy [3]. Można powiedzieć, że w kontraście do pracy [1], której oś stanowiły obliczenia analityczne, ze względu na złożoność modelu, sednem pracy [3] były obliczenia numeryczne. W tym przypadku, skupiono się na jednym medium, którym była cienka struktura półizolacyjnych, wielokrotnych studni kwantowych. Celem naszej pracy było przedstawienie dokładnego, pełnego, numerycznego opisu odpowiedzi fotorefrakcyjnej oferowanej przez rozważany ośrodek. W pracy przeanalizowano zarówno odpowiedź stacjonarną jak i dynamikę procesu indukowania siatki, dla pełnego zakresu głębokości modulacji wzoru interferencyjnego.

Mój wkład w przypadku obu omawianych prac, polegał na opracowaniu wraz ze współautorami tych prac, założeń analiz badawczych oraz na przeprowadzeniu obliczeń numerycznych. W przypadku pracy [1], obliczenia numeryczne posłużyły do oceny dokładności zaproponowanej przez nas metody analitycznej. W przypadku pracy [3] stanowiły zasadnicze źródło informacji na temat analizowanego przez nas medium i siatek fotorefrakcyjnych w nim indukowanych. W obu pracach, badania numeryczne przeprowadziłem za pomocą zmodyfikowanej wersji, rozwiniętej przeze mnie numerycznej metody jednowymiarowej.

Efekty nieliniowe występujące w strukturach wielokrotnych studni kwantowych mają swoje źródło w zjawiskach ekscytonowych. W odróżnieniu od materiałów objętościowych, wpływ kwantowo uwięzionych ekscytonów jest obserwowany w widmach absorpcyjnych w temperaturze pokojowej. W zależności od tego, w jakim kierunku przyłożone jest do struktury pole elektryczne, obserwuje się w niej różne zjawiska elektroabsorpcyjne. W tak zwanej geometrii Franza-Keldysha pole elektryczne przyłożone jest w płaszczyźnie studni kwantowych. W tym przypadku pole prowadzi do jonizacji uwięzionych kwantowo ekscytonów, skracając ich czas życia. Zjawisko to manifestuje się w poszerzeniu i obniżeniu obserwowanych w widmie absorpcji pików ekscytonowych. Naturalne wydaje się więc stwierdzenie, że wpływ ekscytonów na widmo absorpcji struktur kwantowych silnie zależy od temperatury. Wątek wpływu temperatury na właściwości struktur kwantowych jest podejmowany przez badaczy, ale zazwyczaj w kontekście niskich temperatur, od bliskich 0K do temperatury pokojowej. Warto jednak zauważyć, że urządzenia fotoniczne pracują zazwyczaj w wyższych temperaturach, szczególnie jeśli przepływa przez nie rozgrzewający je prąd. Wspólnie z członkami grupy kierowanej przez prof. Ewę Weinert-Rączkę, podjęliśmy próbę dostarczenia informacji na temat właściwości elektrooptycznych struktur wielokrotnych studni kwantowych pracujących w

zakresie temperatur od 20° C do 80° C. Rezultaty przeprowadzonych przez nas prac badawczych przedstawione zostały w ostatniej publikacji omawianego cyklu:

- [8] E. Miśkiewicz, A. Ziółkowski, M. Wichtowski, E. Weinert-Rączka, *Thermally induced changes of the electro-optical properties of semi-insulating GaAs/AlGaAs multiple quantum well structures*, *Optical Materials*, vol. 89, pp. 231–236 (2019).

Praca [8] to praca o charakterze eksperymentalnym, w ramach której zaobserwowaliśmy silną, temperaturową zależność właściwości optycznych i elektrooptycznych struktur studni kwantowych wytworzonych w oparciu o układ materiałowy GaAs/AlGaAs. W ramach badań stwierdzono, że pozycje pików ekscytonowych (dla lekkich i ciężkich dziur) silnie zależą od temperatury, przesuwając się w stronę niższych energii. Temperaturową zależność długości fal pików ekscytonowych określono jako liniową, z nachyleniem odpowiednio: 0.38 nm/K dla dziur lekkich i 0.4 nm/K dla dziur ciężkich. Zaobserwowano również, że wzrost temperatury powoduje obniżenie pików ekscytonowych, przy czym, co istotne, nawet dla najwyższej badanej temperatury właściwości elektroabsorpcyjne struktury ciągle istnieją. Fakt ten umożliwia wykorzystanie właściwości nieliniowych badanego medium w przesuniętym zakresie spektralnym. Możliwe jest również termiczne dostrajanie się do odpowiedniej długości fali. Przedstawione w pracy [8] wyniki mogą okazać się pomocne w procesie projektowania urządzeń fonicznych i optoelektronicznych.

Mój wkład w omawianą pracę polegał na opracowaniu jej założeń, wykonaniu pierwszych, wstępnie potwierdzających przyjęte założenia pomiarów oraz na szczegółowej analizie uzyskanych wyników eksperymentalnych. Warto dodać, że przeprowadzone przez nas prace badawcze wykorzystywały struktury półprzewodnikowe, które wytworzone zostały w ramach projektu Narodowego Centrum Nauki pn. „Szybka nieliniowość fotorefrakcyjna w światłowodach półprzewodnikowych do zastosowań w elementach optoelektroniki zintegrowanej i telekomunikacji optycznej” (nr 2011/01/B/ST7/06234). Badane przez nas struktury wielokrotnych studni kwantowych wytworzono metodą MOCVD (Metalorganic Chemical Vapor Deposition) w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych w Warszawie przy współpracy z Zakładem Fizyki Jonów i Implantacji Instytutu Fizyki UMCS w Lublinie. Warto także dodać, że w roku 2017 zostałem powołany przez Radę Wydziału Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej do roli promotora pomocniczego pracy doktorskiej mgr inż. Elizy Miśkiewicz. Praca [8] stanowi część aktywności badawczej prowadzonej przez Panią Miśkiewicz w ramach przygotowywanej przez nią rozprawy, której tematem są właściwości elektrooptycznych struktur półizolacyjnych studni kwantowych.

Podsumowanie

Wyniki przedstawione w niniejszym cyklu publikacji wskazują na interesujące możliwości wykorzystania fotorefrakcyjnych półprzewodników takich jak objętościowy GaAs i struktury wielokrotnych studni kwantowych GaAs/AlGaAs do kontrolowania i przetwarzania sygnałów świetlnych. Podsumowując przedstawione osiągnięcie, za najważniejsze, oryginalne dokonania uważam:

- opracowanie numerycznych narzędzi służących do analizy procesów fizycznych, indukowanych przez wiązkę optyczną lub wzór interferencyjny w fotorefrakcyjnych półprzewodnikach charakteryzujących się bipolarnym transportem nośników i nieliniowym transportem elektronów,
- odkrycie nowych zjawisk fizycznych, takich jak: (i) zjawisko zakrzywiania trajektorii wiązki optycznej wywołane współzawodnictwem elektronowo-dziurowym oraz nieliniowym transportem elektronów; (ii) zjawisko optycznego indukowania domen nośników ładunku oraz ich lokalnych oscylacji; (iii) silne, termiczne przesunięcie pików ekscytonowych w stronę niższych energii w widmie absorpcji półizolacyjnych struktur wielokrotnych studni kwantowych,
- szczegółowy opis dynamiki procesów fizycznych zachodzących podczas oddziaływania wiązki światła oraz wzoru interferencyjnego z fotorefrakcyjnymi półprzewodnikami takimi jak GaAs i struktury GaAs/AlGaAs,
- teoretyczny opis propagacji przestrzennych solitonów optycznych w fotorefrakcyjnych mediach półprzewodnikowych, charakteryzujących się bipolarnym transportem nośników i nieliniowym transportem elektronów,
- wykazanie możliwości samopułapkowania światła propagującego się w fotorefrakcyjnych półprzewodnikach w postaci impulsów optycznych, których czas trwania mieści się w zakresie pojedynczych pikosekund.

Tematyka badawcza dotycząca możliwości przełączania i kontrolowania sygnałów optycznych jest ciągle bardzo aktualna. Nabyte przeze mnie doświadczenie pozwala mi myśleć o realizacji kolejnych, nowych przedsięwzięć naukowych, wśród których do najciekawszych zaliczam ocenę możliwości wykorzystania falowodów na wielokrotnych studniach kwantowych do generacji supercontinuum, w zakresie spektralnym wykorzystywanym w telekomunikacji optycznej oraz do budowy szybkich fotodetektorów optycznych.

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

Ważnym przejawem mojej aktywności naukowej jest działalność, którą realizowałem w instytucjach innych niż Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie. Wśród ośrodków, z którymi współpracowałem wymienić można m.in. Sieć Badawczą Łukasiewicz – Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki w Warszawie (dawniej Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych w Warszawie), Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej oraz Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk w Warszawie. Współpraca obejmowała realizację wspólnych projektów naukowych, staże naukowe, zaproszone wykłady wygłoszone w ramach seminariów oraz krótkie wizyty i konsultacje naukowe.

Do istotnych działań realizowanych we współpracy z innymi ośrodkami zaliczam aktywność, którą prowadziłem w ramach projektu Narodowego Centrum Nauki:

„Szybka nieliniowość fotorefrakcyjna w światłowodach półprzewodnikowych do zastosowań w elementach optoelektroniki zintegrowanej i telekomunikacji optycznej”, realizowanego w latach 2011-2014 w ramach umowy nr UMO-2011/01/B/ST7/06234.

W przedsięwzięciu tym uczestniczyłem wraz z kierującą nim prof. Ewą Weinert-Rączką, jako główny wykonawca ściśle współpracując między innymi z dr. inż. Włodzimierzem Strupińskim i dr. hab. inż. Lechem Dobrzańskim z Instytutu Technologii Materiałów Elektronicznych (ITME) w Warszawie. Zakres tej współpracy obejmował proces projektowania i testowania próbek struktur wielokrotnych studni kwantowych opartych na układzie materiałowym GaAs/AlGaAs, które w oparciu o przygotowane przeze mnie projekty wytwarzano w ITME metodą MOCVD (Metalorganic Chemical Vapor Deposition). Pół-izolacyjne, a w konsekwencji fotorefrakcyjne właściwości tego typu struktur uzyskaliśmy wykorzystując technikę kilkukrotnej implantacji protonami, których odpowiednio dobrane energie i dawki pozwalają na precyzyjną kontrolę rozkładu koncentracji głębokich defektów. Implantacja wykonanych w ITME struktur przeprowadzana była w ramach naszej współpracy z dr. hab. Jerzym Żukiem z Zakładu Fizyki Jonów i Implantacji Instytutu Fizyki UMCS w Lublinie. Warto dodać, że współpracę z Instytutem Technologii Materiałów Elektronicznych po raz pierwszy nawiązałem jeszcze w okresie przygotowywania rozprawy doktorskiej. Prowadziłem wtedy prace o zbliżonym charakterze do opisanych wyżej w ramach projektu Komitetu Badań Naukowych:

„Całkowicie optyczne przełączanie w światłowodach zawierających fotorefrakcyjne studnie kwantowe”, realizowanego w latach 2004-2007 w ramach grantu o numerze 3T11B07626.

Współpracę realizowaną w ramach projektów naukowych prowadziłem także wykonując prace badawcze jako wykonawca w projekcie Narodowego Centrum Badań i Rozwoju:

„*Nanostrukturalne światłowody fotoniczne do kilkumodowej propagacji nowej generacji*”, realizowanego w latach 2016-2022 w ramach programu „Strategiczny program badań naukowych i prac rozwojowych *Nowoczesne technologie materiałowe – TECHMATSTRATEG*”

(TECHMATSTRATEG1/348438/16/NCBR/2018).

Projekt ten realizowany był przez konsorcjum czterech instytucji: InPhoTech Sp. z o.o., Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie, Politechnikę Warszawską oraz Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie. Prace badawcze, za które byłem odpowiedzialny w ramach tego projektu dotyczyły badań zjawisk nieliniowych występujących podczas propagacji światła w światłowodach kilkumodowych nowej generacji. Badania te były prowadzone we współpracy z Zespołem Optyki Nieliniowej z Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej.

Główną osią opisaną wyżej aktywności naukowej były prace o charakterze eksperymentalnym. Badania o charakterze teoretycznym, związane z rozwojem moich zainteresowań **metodami numerycznymi** rozwijam we współpracy z dr. inż. Tomaszem Barcińskim z Centrum Badań Kosmicznych PAN w Warszawie. W ramach tej współpracy odbyłem dwa krótkie **staże naukowe**:

- tygodniowy staż naukowy od 28.03.2022 - 04.04.2022 w Laboratorium Mechatroniki i Robotyki Satelitarnej, Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk w Warszawie;
- trzytygodniowy staż naukowy od 27.06.2022 do 18.07.2022 w Laboratorium Mechatroniki i Robotyki Satelitarnej, Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk w Warszawie.

Prace badawcze prowadzone we współpracy z dr. inż. Tomaszem Barcińskim związane są z analizą tłumienia energii podczas zderzenia struktury mechanicznej łądownika kosmicznego ze sztywnym podłożem. Aktualnie przygotowywana jest przez nas publikacja z tego zakresu. Obszar badań, za który jestem odpowiedzialny obejmuje w tym przypadku realizowaną w ramach uproszczonego modelu analizę numeryczną fal naprężeń powstających podczas kontaktu łądownika kosmicznego z podłożem w trakcie procedury lądowania.

Przejawem mojej współpracy z krajowymi i zagranicznymi ośrodkami naukowymi są również **zaproszone wykłady** wygłoszone w ramach seminariów oraz krótkie **wizyty i konsultacje naukowe**. Do najistotniejszych zaliczam:

- seminarium na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej na zaproszenie prof. dr. hab. Mirosława Karpierza, 5 XII 2005;
- seminarium w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych w Warszawie na zaproszenie dr. hab. inż. Leszka Dobrzańskiego, 5 VII 2006;
- seminarium w Instytucie Geofizyki Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego na zaproszenie prof. Katarzyny Chałasińskiej-Macukow, 28 II 2008;
- seminarium w Instytucie Fizycznej i Teoretycznej Chemii Politechniki Wrocławskiej na zaproszenie prof. dr. hab. Marka Samocia, 14 V 2009;
- wizyta w laboratoriach Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej, na zaproszenie prof. dr. hab. Mirosława Karpierza, 15 V 2009;

- wizyta w laboratoriach Instytutu Fizyki Politechniki Wrocławskiej, na zaproszenie prof. dr. hab. inż. Jana Misiewicza, 10 IX 2009;
- wizyta w laboratoriach Instytutu Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej, na zaproszenie dr. inż. Mirosława Szczurka, 18 II 2010;
- wizyta w laboratoriach Instytutu Technologii Materiałów Elektronicznych w Warszawie, na zaproszenie dr. inż. Włodzimierza Strupińskiego, 9 II 2013;
- wizyta na Politechnice Berlińskiej na zaproszenie profesora Klausa Petermanna, Hochfrequenztechnik-Photonics Institut für Hochfrequenz-und Halbleiter-Systemtechnologien, 21 VI 2013.

6. Informacja o osiągnięciach organizacyjnych, dydaktycznych oraz popularyzujących naukę

6.1 Działalność organizacyjna

Bezpośrednio po obronie pracy doktorskiej wyszedłem z inicjatywą rozbudowy istniejącej bazy laboratoryjnej Wydziału Elektrycznego ZUT w Szczecinie. W następstwie tej inicjatywy pod kierownictwem prof. dr hab. Ewy Weinert-Rączki wraz z kolegami z zespołu przygotowaliśmy studium wykonalności oraz wnioski o dofinansowanie budowy na Wydziale Elektrycznym laboratorium o profilu związanym z fotoniką i telekomunikacją optyczną. Projekt o wartości prawie 10 mln zł, pod nazwą:

„Laboratorium Technologii Teleinformatycznych i Fotoniki” dofinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka 2007-2013 (umowa o numerze POIG.02.01.00-32-024/08-00),

został rekomendowany do wsparcia a jego realizacja stanowiła jedno z moich głównych przedsięwzięć organizacyjnych w latach 2009 – 2012. Moim głównym zadaniem w ramach tego projektu była organizacja przestrzeni pod utworzenie w budowanym laboratorium **Pracowni Urządzeń Fonicznych**, a w ramach tej pracowni dobór odpowiedniej aparatury badawczej, jej instalacja i konserwacja. Obecnie pełnię obowiązki kierownika tej pracowni. Wysiłek podjęty podczas realizacji tego projektu został doceniony nagrodą zespołową Rektora ZUT za osiągnięcia organizacyjne w roku 2011.

Inicjatywy o charakterze organizacyjnym, których podejmowałem się w swojej pracy obejmują także działania w **komitetach organizacyjnych konferencji naukowych**. Za najistotniejszą w tym zakresie, uważam pomoc w organizacji następujących konferencji o zasięgu krajowym:

- 9 Sympozjum Techniki Laserowej, Świnoujście, 21 – 25 IX 2009;
- I Polska Konferencja Optyczna, Będlewo, 27 VI – 1 VII 2009;
- II Polska Konferencja Optyczna, Międzyzdroje, 27 VI – 1 VII 2011;
- III Polska Konferencja Optyczna, Sandomierz, 30 VI – 4 VII 2013;
- IV Polska Konferencja Optyczna, Legnica, 28 VI – 2 VII 2015;

- V Polska Konferencja Optyczna, Gniezno, 2 – 6 VII 2017; oraz warsztatów naukowych o zasięgu międzynarodowym:
- IX International Workshop Nonlinear Optics Applications, Świnoujście, 17–20 V 2007;
- Nonlinear Photonics and Optical Telecommunication, Szczecin, XI 2010.

Ponadto w ramach działalności organizacyjnej prowadzonej na Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym w Szczecinie:

- jestem członkiem **rady dyscypliny naukowej automatyka, elektronika i elektrotechnika** - przedstawicielem z grona nauczycieli akademickich nie będących samodzielnymi pracownikami naukowymi,
- 8-krotnie byłem członkiem **komisji hospitacyjnej** weryfikującej jakość kształcenia na Wydziale Elektrycznym ZUT w Szczecinie (w latach akademickich: 2016/17, 2019/20, 2020/21, 2021/22, 2022/23),
- byłem członkiem **komisji programowej** do spraw wydziałowych ram kwalifikacji dla kierunku Elektronika i Telekomunikacja (w latach 2011-2015).

6.2 Działalność dydaktyczna

Aktywność dydaktyczna jest ważną częścią mojej działalności akademickiej. W ramach obowiązków dydaktycznych prowadziłem zajęcia na czterech kierunkach studiów realizowanych na Wydziale Elektrycznym Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Od momentu zatrudnienia do chwili obecnej prowadziłem łącznie: **wykłady z 7 przedmiotów oraz ćwiczenia audytoryjne, laboratoryjne i projektowe z 19 przedmiotów**. Zakres tematyczny prowadzonych przeze mnie zajęć obejmował: *fizykę, podstawy elektroniki półprzewodnikowej, optoelektronikę i fotonikę* jak również obszar *metod numerycznych i narzędzi komputerowych stosowanych we współczesnej optoelektronice i telekomunikacji optycznej*. Szczegółowe zestawienie wszystkich prowadzonych przeze mnie kursów przedstawiłem w Tabeli 3.

Oprócz przedmiotów w języku polskim, w latach akademickich: 2016/17, 2017/18 oraz 2019/20 w ramach zajęć ze studentami z wymiany międzynarodowej prowadziłem kurs obejmujący wykład oraz ćwiczenia projektowe pod nazwą *Elements of laser optics* w języku angielskim.

Po uzyskaniu stopnia doktora wielokrotnie byłem członkiem komisji egzaminów dyplomowych. W okresie od roku 2010 do roku 2021 **wypromowałem 15 inżynierów i 8 magistrów** oraz recenzowałem 11 prac inżynierskich i 4 prace magisterskie. Aktualnie pełnię rolę **promotora pomocniczego** w przewodzie doktorskim Pani mgr inż. Elizy Miśkiewicz, który został wszczęty przez Radę Wydziału Elektroniki i Technik Informatycznych na Politechnice Warszawskiej.

W latach 2012–2015 pełniłem funkcję **opiekuna studenckiego koła naukowego Radius**, którego członkowie realizowali projekty naukowo-techniczne z obszaru optoelektroniki i fotoniki. Ponieważ aktywność dydaktyczna zawsze stanowiła istotny aspekt mojej pracy zawodowej, swoje umiejętności w tym zakresie rozwijałem dodatkowo na magisterskich studiach z psychologii.

Tabela 3. Zestawienie prowadzonych kursów dydaktycznych w latach akademickich od 2010/11 do 2021/22

Kurs	forma ²⁰	stopień studiów	kierunek studiów ²¹
2009/2010			
Komputerowe metody w optoelektronice	W, P	II	ET
Podstawy elektroniki półprzewodnikowej	C	I	ET
Optoelektronika	L	I	ET
Technika światłowodowa	L	II	ET
Łączność optyczno-radiowa	L	II	ET
Elementy techniki światłowodowej w automatyce	L	I	AR
2010/2011			
Komputerowe metody w optoelektronice	W, P	II	ET
Podstawy elektroniki półprzewodnikowej	C	I	ET
Fizyka 2	C	I	AR
Optoelektronika	L	I	ET
Metody obliczeniowe we współczesnej telekomunikacji optycznej	W, P	II	ET
Technika światłowodowa	L	II	ET
2011/2012			
Podstawy elektroniki półprzewodnikowej	C	I	ET
Fizyka 2	C	I	ET, AR, T
Systemy optoelektroniczne	L	II	ET
Technika światłowodowa	L	II	ET
2012/2013			
Fizyka	C	I	ET, E
Fizyka 1	C	I	AR
Fizyka 2	C	I	AR
Podstawy elektroniki półprzewodnikowej	C	I	ET
Wprowadzenie do elektroniki i telekomunikacji	L	I	ET
Materiały elektroniczne i fotoniczne	W, C	II	ET
Zastosowanie fizyki w elektronice i telekomunikacji	C	I	ET
2013/2014			
Fizyka 1	C	I	AR
Fizyka 2	C	I	AR
Układy fotoniczne	W, L, P	II	ET
Optoelektronika	W, L	I	ET
2014/2015			
Fizyka	C	I	E
Fizyka 1	C	I	AR
Fizyka 2	C	I	AR
Komputerowe metody w optoelektronice	L, P	I	ET
2015/2016			
Fizyka 1	C	I	AR

²⁰ W – wykład, C – ćwiczenia, L – laboratorium, P - projekt²¹ E – Elektrotechnika, ET – Elektronika i Telekomunikacja, AR – Automatyka i Robotyka, T - Teleinformatyka

Fizyka 2	C	I	AR
Urządzenia i systemy optoelektroniczne w automatyce i robotyce	L	I	AR
Transmisja w układach światłowodowych i fonicznych	L	I	T
2016/2017			
Fizyka 1	C	I	AR
Fizyka 2	L	I	AR
Narzędzia komputerowego wspomaganie projektowania sieci telekomunikacyjnych	W, L	II	T
Teleinformatyczne systemy i sieci foniczne	L	I	AR, T
Fotonika	L	I	T
2017/2018			
Fizyka 1	C	I	AR
Fotonika	C	I	T
Wybrane zagadnienia optoelektroniki	L	I	T
2018/2019			
Fizyka	L	I	E
Fizyka 1	C	I	AR
Fizyka 2	C	I	AR
Zastosowanie fotoniki w elektrotechnice	W	II	E
2019/2020			
Fizyka	L	I	E
Fizyka 1	C	I	AR
Fizyka 2	C	I	AR
Fotonika	C	I	T
Zastosowanie fotoniki w elektrotechnice	W	II	E
Urządzenia i systemy optoelektroniczne w automatyce i robotyce	L	I	AR
2020/2021			
Fizyka	L	I	E
Fizyka 1	C	I	AR
Fizyka 2	C	I	AR
Fotonika	C	I	T
Zastosowanie fotoniki w elektrotechnice	W	II	E
Czujniki foniczne i systemy światłowodowe w automatyce i robotyce	L	I	AR
2021/2022			
Fizyka	L	I	E
Fizyka 1	C	I	AR
Fizyka 2	C	I	AR
Fotonika	C	I	T
Zastosowanie fotoniki w elektrotechnice	W	II	E
Czujniki foniczne i systemy światłowodowe w automatyce i robotyce	L	I	AR

6.3 Działalność popularyzująca naukę

Obszar działań popularyzujących naukę to obszar, w który również wielokrotnie angażowałem się w swojej pracy. W ramach działalności popularyzującej naukę:

- na przestrzeni lat 2009–2014 regularnie brałem udział w **pokazach laboratoryjnych oraz wykładach** realizowanych w ramach Festiwalu Nauki i Nocy Naukowców na Wydziale Elektrycznym,
- w roku 2010 brałem udział w promocji nowo powstałego Laboratorium Technologii Teleinformatycznych i Fotoniki w ramach **wystawy innowacji WIPRO 2010** na Uniwersytecie Technologiczno-Przyrodniczym w Bydgoszczy,
- w roku 2011 prowadziłem **warsztaty naukowe** zorganizowane dla studentów kierunku Elektronika i Telekomunikacja Politechniki Gdańskiej,
- w roku 2013 wspólnie z kolegami z zespołu kierowanego przez prof. Ewę Weinert-Rączkę organizowałem **popularyzujący fotonikę konkurs** dla młodzieży szkół średnich pn. „Fotonika – Technologia Przyszłości”,
- kilkakrotnie gościłem w **szczecińskich szkołach średnich**, wygłaszając wykłady na temat współczesnych technologii optycznych.

.....
(podpis wnioskodawcy)