

Katedra Teorii Pola, Układów Elektronicznych i Optoelektroniki
Wydział Elektroniki
Politechnika Wrocławska

Autoreferat

Grzegorz Sobon

Wrocław 2017



Spis treści

| | |
|---|----|
| 1. Imię i nazwisko | 3 |
| 2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe | 3 |
| 3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych | 3 |
| 4. Wskazanie osiągnięcia naukowego stanowiącego podstawę postępowania habilitacyjnego | 3 |
| 4.1. Uzasadnienie podjęcia tematyki badawczej i celu badawczego..... | 5 |
| 4.2. Omówienie osiągniętych wyników prac badawczych..... | 9 |
| 4.2.1. Generacja impulsów ultrakrótkich z laserów domieszkowanych tulem | 9 |
| 4.2.2. Źródła wykorzystujące światłowody nieliniowe: generacja superkontinuum oraz solitonów Ramanowskich | 20 |
| 4.2.3. Generacja częstotliwości różnicowej w kryształach nieliniowych | 26 |
| 4.3. Podsumowanie | 30 |
| 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych | 31 |
| 5.1. Działalność naukowa przed uzyskaniem stopnia doktora | 31 |
| 5.2. Działalność naukowa po uzyskaniu stopnia doktora..... | 32 |
| 5.3. Lista publikacji naukowych (nie wchodzących w skład cyklu omówionego w pkt 4) | 35 |
| 5.3.1. Publikacje z listy JCR po uzyskaniu stopnia doktora | 35 |
| 5.3.2. Publikacje z listy JCR przed uzyskaniem stopnia doktora | 37 |
| 5.4. Podsumowanie dorobku naukowego | 39 |
| 5.3.1. Dane bibliometryczne | 39 |
| 5.3.2. Informacje nt. wyróżnień publikacji naukowych | 39 |



1. Imię i nazwisko

Grzegorz Soboń

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

- 15.07.2013 Doktor nauk technicznych
 Politechnika Wroclawska, Wydział Elektroniki
 Dyscyplina: Telekomunikacja
 Tytuł rozprawy: „Światłowodowe układy typu MOPA do generacji i wzmacniania ultrakrótkich impulsów laserowych w III oknie telekomunikacyjnym” (promotor: prof. dr hab. inż. Krzysztof M. Abramski)
- 18.06.2010 Magister inżynier
 Politechnika Wroclawska, Wydział Elektroniki
 Kierunek: Elektronika i telekomunikacja
 Tytuł pracy: „Wzmacniacz światłowodowy erbowo-iterbowy bazujący na włóknie double-clad typu LMA” (promotor: dr inż. Paweł Kaczmarek)

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/ artystycznych

- 1.02.2014 – obecnie Politechnika Wroclawska, Wydział Elektroniki
 Stanowisko: adiunkt naukowy
- 10.10.2016 – 28.04.2017 Umeå Universitet, Institutionen för Fysik, Umeå, Szwecja
 Stanowisko: post-doktor
- 2.11.2012 – 31.01.2014 Politechnika Wroclawska, Wydział Elektroniki
 Stanowisko: asystent naukowy
- 02.11.2009 – 31.05.2011 Politechnika Wroclawska, Wydział Elektroniki
 Stanowisko: referent inżynierjno-techniczny

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.):

Osiągnięciem naukowym wynikającym z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.) w obszarze dyscypliny *elektronika* jest cykl powiązanych tematycznie publikacji naukowych pt.:

Szerokopasmowe źródła promieniowania optycznego w średniej podczerwieni na bazie femtosekundowych laserów światłowodowych

Cykl publikacji stanowiący podstawę ubiegania się o stopień doktora habilitowanego składa się z siedemnastu pozycji (szesnaście artykułów w czasopismach indeksowanych w bazie JCR oraz jeden rozdział w monografii) o sumarycznym współczynniku wpływu **IF = 53,431***:

- [H1] **G. Soboń**, J. Sotor, I. Pasternak, A. Krajewska, W. Strupinski, K. M. Abramski, “Thulium-doped all-fiber laser mode-locked by CVD-graphene/PMMA saturable absorber”, *Optics Express* 21, 12797-12802 (2013), **IF₂₀₁₃ = 3,525**.
- [H2] **G. Soboń**, J. Sotor, I. Pasternak, A. Krajewska, W. Strupinski, K. M. Abramski, “All-polarization maintaining, graphene-based femtosecond Tm-doped all-fiber laser”, *Optics Express* 23, 9339-9346 (2015), **IF₂₀₁₅ = 3,148**.
- [H3] J. Sotor, **G. Soboń**, M. Kowalczyk, W. Macherzynski, P. Paletko, K. M Abramski, “Ultrafast thulium-doped fiber laser mode locked with black phosphorus”, *Optics Letters* 40, 3885-3888 (2015), **IF₂₀₁₅ = 3,040**.
- [H4] **G. Soboń**, J. Sotor, I. Pasternak, A. Krajewska, W. Strupinski, K. M. Abramski, “260 fs and 1 nJ pulse generation from a compact, mode-locked Tm-doped fiber laser”, *Optics Express* 23, 31446-31451 (2015), **IF₂₀₁₅ = 3,148**.
- [H5] **G. Soboń**, J. Sotor, I. Pasternak, A. Krajewska, W. Strupinski, K. M. Abramski, “Multilayer graphene-based saturable absorbers with scalable modulation depth for mode-locked Er- and Tm-doped fiber lasers”, *Optical Materials Express* 5, 2884-2894 (2015), **IF₂₀₁₅ = 2,657**.
- [H6] **G. Soboń**, A. Duzynska, M. Świniarski, J. Judek, J. Sotor, M. Zdrojek, “CNT-based saturable absorbers with scalable modulation depth for Thulium-doped fiber lasers operating at 1.9 μm”, *Scientific Reports* 7, 45491 (2017), **IF₂₀₁₅ = 5,228**.
- [H7] **G. Soboń**, J. Sotor, T. Martynkien, K. M. Abramski, “Ultra-broadband dissipative soliton and noise-like pulse generation from a normal dispersion mode-locked Tm-doped all-fiber laser”, *Optics Express* 24, 6156-6161 (2016), **IF₂₀₁₅ = 3,148**.
- [H8] **G. Soboń**, J. Sotor, I. Pasternak, A. Przewłoka, W. Strupiński, K. M. Abramski “Amplification of noise-like pulses generated from a graphene-based Tm-doped all-fiber laser”, *Optics Express* 24, 20359-20364 (2016), **IF₂₀₁₅ = 3,148**.
- [H9] J. Sotor, J. Bogusławski, T. Martynkien, P. Mergo, A. Krajewska, A. Przewłoka, W. Strupiński, **G. Soboń**, “All-polarization-maintaining, stretched-pulse Tm-doped fiber laser, mode-locked by a graphene saturable absorber”, *Optics Letters* 42, 1592-1595 (2017), **IF₂₀₁₅ = 3,040**.
- [H10] **G. Soboń**, “Mode-locking of fiber lasers using novel two-dimensional nanomaterials: graphene and topological insulators [Invited]”, *Photonics Research* 3, A56-A63 (2015), **IF₂₀₁₅ = 3,179**.
- [H11] **G. Soboń**, “Application of 2D materials to ultrashort laser pulse generation”, P.K. Nayak (red.), *Two-dimensional Materials - Synthesis, Characterization and Potential Applications*, InTech, Rijeka, Chorwacja (2016), ISBN 978-953-51-4813-5
- [H12] **G. Soboń**, M. Klimczak, J. Sotor, K. Krzempek, D. Pysz, R. Stepien, T. Martynkien, K. M. Abramski, R. Buczynski, “Infrared supercontinuum generation in soft-glass photonic crystal fibers pumped at 1560 nm”, *Optical Materials Express* 4, 7-15 (2014), **IF₂₀₁₄ = 2,844**.
- [H13] M. Klimczak, **G. Soboń**, K. Abramski, R. Buczyński, “Spectral coherence in all-normal dispersion supercontinuum in presence of Raman scattering and direct seeding from sub-picosecond pump”, *Optics Express* 22, 31635-31645 (2014), **IF₂₀₁₄ = 3,488**.
- [H14] M. Klimczak, **G. Soboń**, R. Kasztelanic, K. Abramski, R. Buczyński, “Direct comparison of shot-to-shot noise performance of all normal dispersion and anomalous dispersion supercontinuum pumped with sub-picosecond pulse fiber-based laser”, *Scientific Reports* 6, 19284 (2016), **IF₂₀₁₅ = 5,228**.

- [H15] **G. Soboń**, T. Martynkien, K. Tarnowski, P. Mergo, J. Sotor, "Generation of sub-100 fs pulses tunable from 1700 to 2100 nm from a compact frequency-shifted Er-fiber laser", *Photonics Research* 5, 151-155 (2017), **IF₂₀₁₅ = 3,179**.
- [H16] K. Krzempek, **G. Soboń**, J. Sotor, K. M. Abramski, "A dual-wavelength amplifier that enables the simultaneous chirped-pulse amplification of femtosecond 1562 nm pulses and continuous wave 1064 nm radiation for applications in difference frequency generation", *Laser Physics Letters* 13, 105107 (2016), **IF₂₀₁₅ = 2,391**.
- [H17] **G. Soboń**, T. Martynkien, P. Mergo, L. Rutkowski, A. Foltynowicz, "High-power frequency comb source tunable from 2.7 to 4.2 μm based on difference frequency generation pumped by an Yb-doped fiber laser", *Optics Letters* 42, 1748-1751 (2017), **IF₂₀₁₅ = 3,040**.

* ze względu na fakt, iż współczynnik Impact Factor jest naliczany z opóźnieniem (współczynniki za rok 2016 zostaną opublikowane w lipcu 2017 r.), w przypadku prac z lat 2016-2017 wskazano najnowszy współczynnik IF dostępny w bazie Journal Citation Reports w momencie składania dokumentacji habilitacyjnej (tj. za rok 2015). W przypadku prac z lat 2013-2015 podano współczynnik za rok opublikowania.

4.1. Uzasadnienie podjęcia tematyki badawczej i celu badawczego

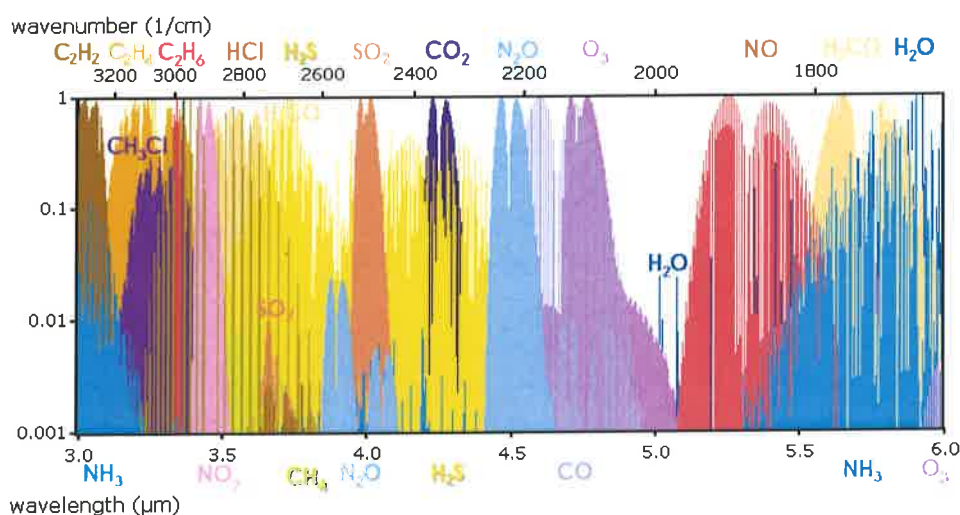
Szerokopasmowe źródła promieniowania w średniej podczerwieni (ang. *mid-infrared*, MIR), tj. zakresie długości fal rozciągającym się od około 2 μm wzwyż są bez wątpienia jednym z najdynamiczniej obecnie rozwijających się działów techniki laserowej¹. Rozwój źródeł w tym zakresie spektralnym jest motywowany licznymi aplikacjami, przede wszystkim w spektroskopii laserowej, badaniach podstawowych, bezprzewodowej łączności, medycynie, bądź też zastosowaniach militarnych.

Zainteresowanie tego typu źródłami wynika przede wszystkim z obecności tym zakresie pasm absorpcyjnych liczych molekuł, związanych z ich wzbudzeniami rotacyjno-wibracyjnymi² (**Rys. 1**), w tym np. gazów cieplarnianych (metan, dwutlenek węgla, podtlenek azotu), a także substancji silnie trujących (np. cyjanowodór). Aby umożliwić czułą, selektywną i nieinwazyjną detekcję śladowych ilości tych związków, a także precyzyjny pomiar ich stężeń, wymagane jest zastosowanie laserów o odpowiednich parametrach. W przypadku klasycznej spektroskopii absorpcyjnej, wykorzystywane są przede wszystkim wąskopasmowe i przestrajalne lasery pracy ciągłej. W technikach spektroskopowych takich jak: TDLAS (ang. *tunable diode laser absorption spectroscopy*), WMS (ang. *wavelength modulation spectroscopy*), NICE-OHMS (ang. *noise-immune cavity-enhanced optical heterodyne molecular spectroscopy*), czy QEPAS (ang. *quartz-enhanced photo-acoustic spectroscopy*) wykorzystywane są głównie lasery półprzewodnikowe: kwantowe lasery kaskadowe (ang. *quantum cascade lasers*, QCL) lub międzypasmowe lasery kaskadowe (ang. *interband cascade lasers*, ICL), zapewniające koherentne promieniowanie ciągle o dużej mocy oraz szeroką gamę dostępnych długości fali (od 2 do 10 μm). Niemniej jednak, ze względu na wąskopasmowy charakter emisji tego typu laserów, detekcja ogranicza się w praktyce do pomiaru tylko jednej, konkretnej linii absorpcyjnej jednej molekuly. Jest to

¹ D. D. Hudson, "Invited paper: Short pulse generation in mid-IR fiber lasers," *Opt. Fiber Technol.* **20**, 631-641 (2014).

² A. Kosterev, G. Wysocki, Y. Bakhrkin, S. So, R. Lewicki, M. Fraser, F. Tittel, R.F. Curl, "Application of quantum cascade lasers to trace gas analysis", *Appl. Phys. B* **90**, 165-176 (2008).

w zupełności wystarczające dla wielu praktycznych aplikacji, np. przy monitorowaniu emisji konkretnego gazu w procesie produkcyjnym. Jednakże, obecny rozwój technik spektroskopowych dąży do opracowywania rozwiązań polegających na obserwację wielu linii kilku molekuł jednocześnie, a w idealnym przypadku – akwizycji szerokopasmowego widma absorpcyjnego z dużą rozdzielczością w krótkim czasie³. Do tego celu niezbędne są szerokopasmowe, koherentne źródła promieniowania w średniej podczerwieni o wysokiej jasności spektralnej, mające charakter tzw. „grzebienia” w dziedzinie częstotliwości optycznych – czyli w praktyce lasera z synchronizacją modów podłużnych. Rozwój tego typu źródeł umożliwił powstanie licznych technik spektroskopowych opartych na grzebieniach częstotliwości, takich jak bezpośrednia spektroskopia z użyciem grzebienia wspomaganą wnęką (ang. *cavity-enhanced optical frequency comb spectroscopy*), czy też przeżywająca obecnie prawdopodobnie najdynamiczniejszy rozwój spektroskopia z użyciem dwóch grzebieni optycznych (ang. *dual comb spectroscopy*, DCS).



Rys. 1. Pasma absorpcyjne wybranych molekuł w średniej podczerwieni. Źródło: <http://www.nanoplus.com>.

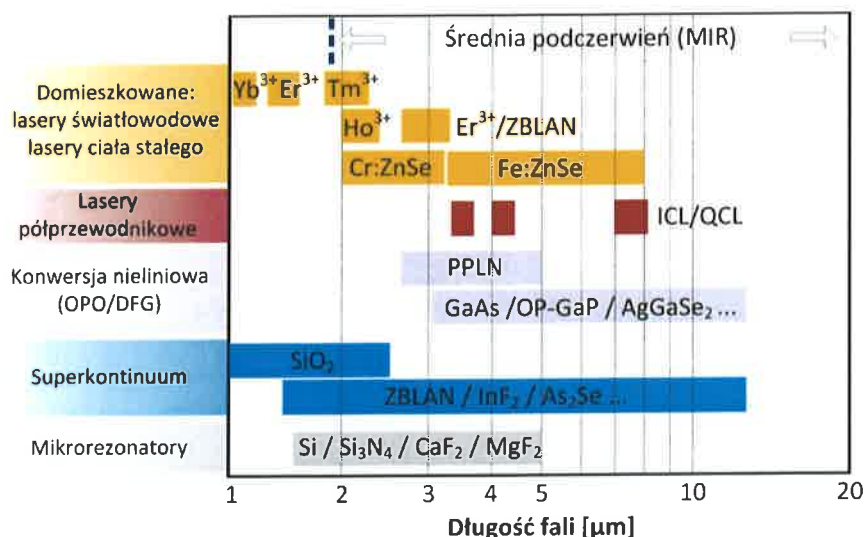
Drugim głównym czynnikiem motywacyjnym do rozwoju tego typu laserów stanowią ich liczne potencjalne aplikacje w medycynie i dermatologii. Zakres spektralny powyżej $1,9\ \mu\text{m}$ to zakres silnej absorpcji wody⁴. Dzięki temu, głębokość penetracji tkanki biologicznej przy takim promieniowaniu jest niewielka (na poziomie kilkuset mikrometrów w przypadku lasera tulowego z zakresu $1,9 - 2\ \mu\text{m}$). Silna absorpcja wody powoduje podgrzewanie jedynie bardzo niewielkich obszarów, dzięki temu możliwe jest precyzyjne nacinanie bądź selektywne usuwanie tkanek przy użyciu lasera emitującego fale o tej długości⁵.

Źródła szerokopasmowego promieniowania w średniej podczerwieni można sklasyfikować w kilka podstawowych grup: lasery oparte na ośrodkach domieszkowanych jonami ziem rzadkich (lasery światłowodowe bądź ciała stałego); lasery półprzewodnikowe; źródła oparte na efektach nieliniowych i parametrycznych w kryształach nieliniowych; źródła superkontinuum, oraz tzw. „grzebień Kerra” (ang. *Kerr combs*), czyli źródła wykorzystujące mikrorezonatory optyczne. Pokrycie spektralne (wg aktualnego stanu wiedzy) wszystkich wymienionych rodzajów źródeł zilustrowano na Rys. 2.

³ M. Vainio, L. Halonen, “Mid-infrared optical parametric oscillators and frequency combs for molecular spectroscopy”, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **18**, 4266-4294 (2016).

⁴ K. Scholle, S. Lamrini, P. Koopmann and P. Fuhrberg, “ $2\ \mu\text{m}$ Laser Sources and Their Possible Applications”, in: “Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics”, B. Pal (Ed.), InTech, 2010

⁵ N. Fried, K. Murray, “High-Power Thulium Fiber Laser Ablation of Urinary Tissues at $1.94\ \mu\text{m}$ ”, *J. Endourol.* **19**, 25-31 (2005)



Rys. 2. Pokrycie spektralne różnych rodzajów źródeł w średniej podczerwi. Opracowano na podstawie^{6,7}.

Najbardziej oczywistym sposobem generacji promieniowania MIR wydaje się być bezpośrednia generacja z ośrodków domieszkowanych jonami ziem rzadkich. W zakresie średniej podczerwi swoje pasma emisyjne posiadają jony tulu (około 1,8 – 2,05 μm), holmu (ok. 2 – 2,1 μm) oraz erbu (ok. 2,8 – 3,3 μm). W ostatnich latach ogromne zainteresowanie poświęcone jest laserom tulowym⁸. Pasma emisji promieniowania z laserów tulowych pokrywa się z tzw. zakresem długości fal bezpiecznych dla oka ludzkiego, gdyż promieniowanie to jest absorbowane w rogówce i ciele szklistym oka, nie docierając do siatkówki. Dlatego też dla tego typu laserów otwierają się nowe możliwości ich zastosowania, np. w dalmierzach, czujnikach, czy też w bezprzewodowej łączności optycznej. Oprócz możliwości zastosowania w medycynie, istnieje również możliwość użycia tego typu laserów bezpośrednio w spektroskopii laserowej. W zakresie 1,9 – 2,0 μm swoje linie absorpcyjne posiadają dwa podstawowe gazy cieplarniane wywołujące zmiany klimatu – dwutlenek węgla (CO_2) oraz podtlenek azotu (N_2O). Zatem, badania nad generacją szerokopasmowego promieniowania pokrywającego zakres 1,9 – 2,0 μm mogą istotnie przyczynić się do rozwoju bardzo czułych systemów detekcji śladowych ilości molekuł w atmosferze. Rozwój laserów tulowych przyczynia się również do rozwoju optycznych grzebieni częstotliwości w sposób pośredni. Otóż, stanowią one najbardziej optymalne źródła pompujące dla oscylatorów parametrycznych (ang. *optical parametric oscillator*, OPO) pracujących w zakresie 3 – 5 μm , chętnie wykorzystywanych w spektroskopii⁹. Mogą one również zostać wykorzystane jako pompy w procesie generacji częstotliwości różnicowej (ang. *difference frequency generation*, DFG), do generacji promieniowania z zakresu powyżej 10 μm ¹⁰.

Szczególnie interesującym z punktu widzenia spektroskopii laserowej zakresem spektralnym jest pasmo 3 – 3,7 μm , w którym znajdują się silne pasma absorpcyjne węglowodorów^{3,6}: metanu, etanu, propanu, acetyleny, etc. Zakres ten może być osiągnięty bezpośrednio z laserów światłowodowych domieszkowanych erbem, jednakże, wymaga to zastosowania odpowiednich

⁶ A. Schliesser, N. Picqué, T. W. Hänsch, "Mid-infrared frequency combs", *Nature Photonics* **6**, 440-449 (2012).

⁷ C. W. Rudy, "Mid-IR Lasers: Power and pulse capability ramp up for mid-IR lasers", *Laser Focus World* 05/02/2014

⁸ C. W. Rudy, M. J. F. Digonnet, R. L. Byer, "Advances in 2- μm Tm-doped mode-locked fiber lasers", *Opt. Fiber Technol.* **20**, 642-649 (2014).

⁹ A. Khodabakhsh, et al., "Fourier transform and Vernier spectroscopy using an optical frequency comb at 3–5.4 μm ", *Opt. Lett.* **41**, 2541-2544 (2016)

¹⁰ C. R. Phillips, et al., "Widely tunable midinfrared difference frequency generation in orientation-patterned GaAs pumped with a femtosecond Tm-fiber system," *Opt. Lett.* **37**, 2928-2930 (2012)

szkieł (np. fluorkowych) posiadających okno transmisyjne w tym zakresie spektralnym. Opracowanie światłowodów fluorkowych domieszkowanych erbem jest złożonym problemem technologicznym, stąd tą tematyką zajmuje się tylko kilka wysoce wyspecjalizowanych ośrodków na świecie. Najefektywniejszym sposobem dotarcia do tego zakresu spektralnego jest wykorzystanie efektów nieliniowych w całej gamie dostępnych kryształów optycznych, np. niobianu litu (ang. *periodically poled lithium niobate*, PPLN), arsenku galu (GaAs), fosforu galu (GaP), selenku srebrno-galowego (AgGaSe₂) i innych.

Osobną grupę źródeł promieniowania w średniej podczerwieni, o najszerszym pokryciu spektralnym (ale i najmniejszej mocy w przeliczeniu na pojedynczy mod) stanowią źródła superkontinuum. W przypadku superkontinuum generowanego w światłowodach krzemionkowych (pompowanego na ogół na długościach fali 1 μm lub 1,56 μm) zakres spektralny limitowany jest do ok. 2,5 – 2,6 μm, ze względu na okno transmisyjne szkła kwarcowego. Dalszy zakres może być osiągnięty z użyciem szkieł wieloskładnikowych lub fluorkowych (np. typu ZBLAN). Dla przykładu, w 2015 roku zademonstrowano superkontinuum rozciągające się aż do 13 μm w światłowodzie chalcogenidkowym¹¹.

Stosunkowo najmłodszym działem techniki laserowej są źródła oparte na tzw. mikrorezonatorach pierścieniowych, generujących promieniowanie o charakterze grzebienia optycznego (*micro-combs*). Od czasu pierwszych demonstracji w 2009 roku nastąpił bardzo szybki rozwój tej technologii, co pozwoliło na osiągnięcie zakresów średniej podczerwieni (aż do około 5 μm)¹². Ostatnie intensywne badania nad synchronizacją modów w kwantowych laserach kaskadowych (QCL) oraz międzypasmowych laserach kaskadowych (ICL) również zaowocowały demonstracjami grzebieni częstotliwości w średniej podczerwieni. Jednakże, pewne istniejące ograniczenia fizyczne (np. krótki czas życia górnego poziomu laserowego w QCL) póki co uniemożliwiają efektywną generację ultrakrótkich impulsów z tego typu laserów.

Nie istnieje zatem jedno, uniwersalne rozwiązanie na efektywną generację szerokopasmowego promieniowania w zakresie średniej podczerwieni. Wybór odpowiedniej technologii jest zawsze uzależniony od wymagań konkretnej aplikacji. Motywacją habilitanta był rozwój oraz opracowanie nowych rodzajów źródeł w zakresie średniej podczerwieni, opartych na laserach femtosekundowych.

Postawione cele badawcze można zdefiniować następująco:

1) **Badania i rozwój femtosekundowych laserów tulowych,**

w szczególności laserów całkowicie światłowodowych, wykorzystujących nowe nanomateriały jako nasycalny absorber (grafen, czarny fosfor, nanorurki węglowe), a także laserów z zarządzaną dyspersją. W momencie podjęcia tej tematyki przez habilitanta, na świecie dokonano jedynie dwóch demonstracji laserów tulowych wykorzystujących grafen. Celem habilitanta było zastosowanie technologii grafenu epitaksjalnego w laserach tulowych, jak również badanie wpływu parametrów nasycalnego absorbera na działanie laserów.

Ponadto, rozwijane na świecie lasery ultraszybkie z zarządzaną dyspersją chromatyczną cechowały się dużą złożonością, ze względu na użycie objętościowych mechanizmów kompensacji dyspersji. Celem habilitanta było opracowanie kompaktowych, całkowicie światłowodowych laserów tulowych generujących impulsy ultrakrótkie.

¹¹ C. Rosenberg Petersen et al., "Mid-infrared supercontinuum covering the 1.4–13.3 μm molecular fingerprint region using ultra-high NA chalcogenide step-index fibre", *Nature Photonics* **8**, 830-834 (2014).

¹² A. G. Griffith et al., "Silicon-chip mid-infrared frequency comb generation", *Nature Communications* **6**, 6299 (2015)

2) Rozwój technik generacji superkontinuum przy użyciu sub-pikosekundowych laserów pompujących

Szczególnym zainteresowaniem naukowców cieszy się generacja superkontinuum w światłowodach o dyspersji normalnej, cechujące się wysoką koherencją i wysoką stabilnością. Według stanu wiedzy w czasie podjęcia badań przez habilitanta uważano, iż koherencja superkontinuum zostaje zdegradowana w momencie pobudzenia relatywnie długimi impulsami laserowymi. W pracach wykazano, iż możliwe jest generowanie koherentnego superkontinuum przy użyciu impulsów o czasie trwania ok. 400 fs, co może mieć ogromne znaczenie dla potencjalnych zastosowań.

3) Rozwój optycznych grzebieni częstotliwości w zakresie średniej podczerwieni z wykorzystaniem efektu generacji częstotliwości różnicowej

Generacja częstotliwości różnicowej jest znaną i opanowaną techniką generacji impulsowego promieniowania w średniej podczerwieni, jednakże do głównych jej wad zaliczano niską sprawność procesu i niewielką osiągalną moc wyjściową. Prace habilitanta zaowocowały powstaniem źródła DFG o najwyższej kiedykolwiek osiągniętej mocy wyjściowej i największym dotychczas zademonstrowanym zakresie przestrajania w tej klasie układów (wykorzystujących kryształ niobianu litu).

4.2. Omówienie osiągniętych wyników prac badawczych

Cykl prac powiązanych tematycznie stanowiących podstawę wniosku o nadanie stopnia doktora habilitowanego stanowi rezultat badań prowadzonych przez habilitanta w latach 2013 – 2017 nad szerokopasmowymi, impulsowymi źródłami promieniowania w średniej podczerwieni. Badania te dotyczyły trzech rodzajów źródeł:

1. Ultraszybkie lasery światłowodowe domieszkowane tulem z pasywną synchronizacją modów, w tym lasery na bazie nanomateriałów: grafenu, nanorurek węglowych, czarnego fosforu,
2. Źródła promieniowania superkontinuum oraz solitonów Ramanowskich, generowanych w światłowodach nieliniowych, pompowanych femtosekundowymi laserami światłowodowymi,
3. Źródła oparte na efekcie generacji częstotliwości różnicowych w kryształach nieliniowych, pompowanych femtosekundowymi laserami światłowodowymi.

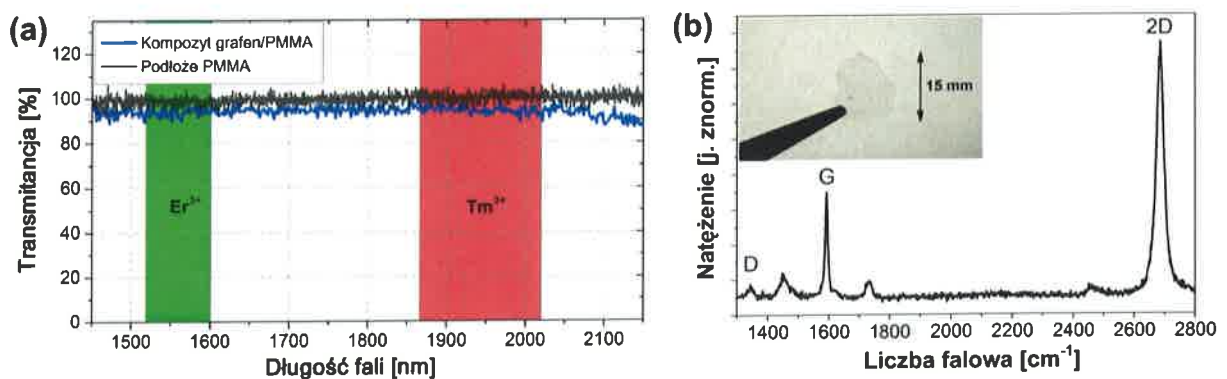
Kolejne podrozdziały zawierają omówienie osiągniętych wyników prac badawczych dotyczących poszczególnych rodzajów źródeł promieniowania.

4.2.1. Generacja impulsów ultrakrótkich z laserów domieszkowanych tulem

Prace badawcze nad światłowodowymi laserami domieszkowanymi tulem zainicjowałem tuż po złożeniu pracy doktorskiej w 2013 roku. Celem było zastosowanie grafenu otrzymanego epitaksjalnie w laserze tulowym. Efektem badań jest pierwsza praca cyklu:

[H1] **G. Sobon**^(40%), J. Sotor^(35%), I. Pasternak^(10%), A. Krajewska^(5%), W. Strupinski^(5%), K. M. Abramski^(5%), “Thulium-doped all-fiber laser mode-locked by CVD-graphene/PMMA saturable absorber”, *Optics Express* 21, 12797-12802 (2013), **IF₂₀₁₃ = 3,525**.

Była to pierwsza na świecie demonstracja wykorzystania w laserze tulowym grafenu otrzymanego drogą epitaksji, przeniesionego na podłoża polimerowe z polimetakrylanu metylu (PMMA). Dotychczas tego typu nasycalne absorbery wykorzystywano do pasywnej synchronizacji modów w laserach pracujących w zakresie bliskiej podczerwieni. Jednakże wykazano, iż polimer PMMA jest wciąż wysoce transmisyjny w zakresie spektralnym średniej podczerwieni aż do 2200 nm (**Rys. 3**). Otworzyło to możliwości zastosowania tych absorberów w laserach tulowych. W momencie opublikowania pracy [H1], na świecie znane były jedynie dwie demonstracje laserów tulowych wykorzystujących grafen. W obu przypadkach był to grafen płatkowy, eksfoliowany w sposób chemiczny z proszku grafitowego^{13,14}. W laserach tych uzyskano impulsy o czasie trwania 3,6 ps oraz 2,1 ps. Grafen epitaksjalny na podłożu PMMA jest zdecydowanie lepszym rozwiązaniem, przede wszystkim ze względu na kontrolowaną w procesie wzrostu ilość warstw grafenu i relatywnie łatwy proces nanoszenia na pożądane podłoże – w tym przypadku końcówkę złącza światłowodowego. Warstwy grafenu użyte w badaniach zostały wytworzone w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych (ITME) w Warszawie, w grupie dra inż. Włodzimierza Strupińskiego.



Rys. 3. Transmitancja polimeru PMMA oraz kompozytu grafen/PMMA w zakresie podczerwieni (a), widmo rozpraszania Ramana podwójnej warstwy grafenu na podłożu PMMA (b).

W eksperymencie zestawiono całkowicie światłowodowy laser tulowy, pompowany laserem o długości fali 1570 nm. Wygenerowano impulsy o czasie trwania 1,2 ps, o szerokości spektralnej 4 nm (na środkowej długości fali 1884 nm). Była to pierwsza demonstracja wykorzystania kompozytu grafen/PMMA w laserze tulowym, jak i najkrótszy na tamten czas impuls wygenerowany z lasera tulowego wykorzystującego nasycalny absorber grafenowy.

Z punktu widzenia praktycznej aplikacji, laser femtosekundowy powinien cechować się: stabilną pracą niewrażliwą na czynniki zewnętrzne (takie jak wibracje, czy zmiana położenia), samostartującym trybem pracy (synchronizacja modów dostępna natychmiastowo po włączeniu lasera pompującego, bez konieczności dostrajania i justowania), oraz liniową polaryzacją wiązki wyjściowej. Aby spełnić te warunki, rezonator musi zostać skonstruowany z użyciem wyłącznie z komponentów i światłowodów utrzymujących stan polaryzacji (ang. *polarization maintaining*, PM). Ze względu na aplikacyjny charakter prowadzonych badań, zauważyłem potrzebę opracowywania tego typu rozwiązania. Naturalną konsekwencją rezultatów otrzymanych w pracy

¹³ M. Zhang, et al., "Tm-doped fiber laser mode-locked by graphene-polymer composite," *Opt. Express* **20**, 25077-25084 (2012)

¹⁴ Q. Wang, T. Chen, B. Zhang, M. Li, Y. Lu, K. P. Chen, "All-fiber passively mode-locked thulium-doped fiber ring laser using optically deposited graphene saturable absorbers," *Appl. Phys. Lett.* **102**, 131117 (2013)

[H1] był oryginalny pomysł generacji impulsów liniowo spolaryzowanych z lasera tulowego typu PM, czemu poświęcona jest druga praca cyklu [H2]:

[H2] **G. Sobon**^(70%), J. Sotor^(10%), I. Pasternak^(5%), A. Krajewska^(5%), W. Strupinski^(5%), K. M. Abramski^(5%), “All-polarization maintaining, graphene-based femtosecond Tm-doped all-fiber laser”, *Optics Express* 23, 9339-9346 (2015), **IF₂₀₁₅ = 3,148**.

W eksperymencie ponownie wykorzystano kompozyt grafen/PMMA jako nasycalny absorber wymuszający pasywną synchronizację modów. W porównaniu do poprzedniego układu, w celu zmniejszenia całkowitej dyspersji i umożliwić uzyskanie krótszych impulsów, zestawiono rezonator o ponad dwukrotnie mniejszej długości. W efekcie uzyskano generację impulsów o czasie trwania 603 fs, na środkowej długości fali 1876 nm i szerokości spektralnej 6,6 nm. Opisany laser był pierwszym na świecie laserem tulowym wykorzystującym grafen, zrealizowanym całkowicie w technologii PM. Po raz kolejny pobito również rekord czasu trwania impulsu wyjściowego z laserów opartych na grafenie w tym zakresie spektralnym.

W 2015 roku, wspólnie z dr hab. inż. Jarosławem Sotorem zainicjowano nowy wątek badawczy polegający na wykorzystaniu zupełnie nowego materiału dwuwymiarowego – czarnego fosforu, jako nasycalnego absorbera w laserach światłowodowych. Fosfor, podobnie jak węgiel, posiada bardzo trwałą formę alotropową, zwaną czarnym fosforem, o dobrze zdefiniowanej strukturze warstwowej (zbliżonej do struktury grafitu)¹⁵. Materiał ten może zostać eksfoliowany do pojedynczej warstwy atomowej, zwanej fosforenem (przez analogię do grafenu). W przeciwieństwie do grafenu, fosforen posiada energetyczną przerwę wzbronioną, której szerokość może być kontrolowana grubością materiału (od 1,5 eV dla pojedynczej warstwy do 0,3 eV dla materiału objętościowego)¹⁶. Dlatego też rozpatrywany jest jako alternatywa dla grafenu w aplikacjach elektronicznych, wymagających przerwy wzbronionej. Z punktu widzenia optoelektroniki, czarny fosfor charakteryzuje się również szerokopasmową nasycalną absorpcją, stąd zdecydowano się podjąć badań nad zastosowaniem tego materiału w technice laserowej. W 2015 roku dokonano jednej z pierwszych na świecie demonstracji lasera erbowego z czarnym fosforem emitującego impulsy na długości fali 1560 nm¹⁷. Naturalną konsekwencją osiągniętego sukcesu na długości fali 1,55 μm był oryginalny pomysł próby wykorzystania tego obiecującego materiału w laserze tulowym. Temu zagadnieniu poświęcona jest praca [H3] cyklu:

[H3] J. Sotor^(40%), **G. Sobon**^(40%), M. Kowalczyk^(5%), W. Macherzynski^(5%), P. Paletko^(5%), K. M. Abramski^(5%), “Ultrafast thulium-doped fiber laser mode locked with black phosphorus”, *Optics Letters* 40, 3885-3888 (2015), **IF₂₀₁₅ = 3,040**.

W eksperymencie użyto czarnego fosforu eksfoliowanego mechanicznie do warstw o grubości ok. 200-300 nm, co potwierdzono przy użyciu mikroskopii sił atomowych. Nasycalny absorber wykazywał szerokopasmową absorpcję (w liniowym zakresie pracy), od ok. 1000 do 2200 nm. Parametry nieliniowe zostały scharakteryzowane na długości fali 1560 nm i potwierdziły nasycalną

¹⁵ F. Xia, H. Wang, Y. Jia, “Rediscovering black phosphorus as an anisotropic layered material for optoelectronics and electronics,” *Nature Communications* 5, 4458 (2014).

¹⁶ Y. Cai, G. Zhang, Y-W. Zhang, “Layer-dependent band alignment and work function of few-layer phosphorene,” *Scientific Reports* 4, 6677 (2014).

¹⁷ J. Sotor, G. Sobon, W. Macherzynski, P. Paletko, K. M. Abramski, “Black phosphorus saturable absorber for ultrashort pulse generation”, *Applied Physics Letters* 107, 051108 (2015).

absorbpcję z głębokością modulacji na poziomie 4%. W układzie lasera tulowego uzyskano generację impulsów o czasie trwania 739 fs, o centralnej długości fali 1910 nm i paśmie połówkowym 5,8 nm. Jest to rezultat bardzo obiecujący, gdyż była to pierwsza demonstracja uzyskania pracy impulsowej w laserze tulowym z wykorzystaniem czarnego fosforu, a osiągnięty czas trwania impulsu był krótszy niż np. pokazany w pierwszej demonstracji lasera z grafenem w 2009 roku¹⁸. Opracowanie technologii wytwarzania fosforenu i kontroli ilości warstw z pewnością pozwoli na uzyskanie jeszcze lepszych parametrów generacji. Publikacja w czasopiśmie *Optics Letters* została wyróżniona w bazie Web of Science znakiem „**Highly cited paper**”, przyznawanym często cytowanym publikacjom, mieszczącym się w 1% najczęściej cytowanych prac na świecie w dziedzinie fizyki.

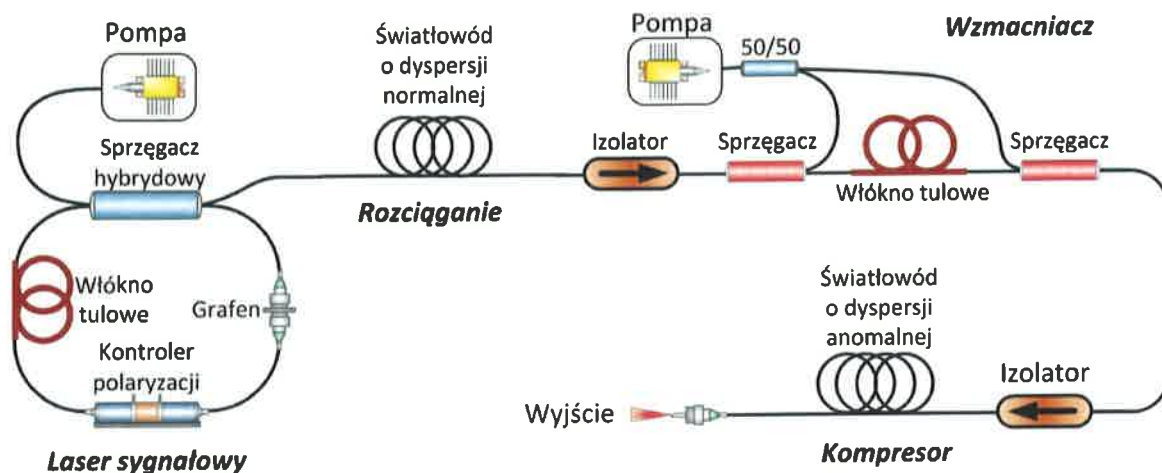
Lasery opisane w powyższych pracach są konstrukcjami w pełni światłowodowymi, zapewniającymi generację ultrakrótkich impulsów w paśmie 1,9 μm . Są to lasery o dyspersji całkowicie anomalnej, tj. generujące impulsy będące solitonami optycznymi. Lasery tego typu oferują wysoką stabilność i pozwalają na generację bardzo krótkich impulsów (o czasie trwania bliskim limitowi Fourierowskiemu), jednakże ich średnia moc wyjściowa zazwyczaj nie przekracza pojedynczych miliwatów, a osiągnane energie impulsów są na poziomie poniżej 100 pJ. Podwyższenie mocy wyjściowej pozwoliłoby na rozszerzenie możliwości praktycznej aplikacji tego typu laserów. Ze względu na wiele czynników, takich jak zakres stabilności solitonów optycznych ograniczony efektami nieliniowymi, czy wytrzymałość optyczna nasycalnych absorberów, moce uzyskiwane wprost z rezonatorów laserowych nie mogą fizycznie być dużo wyższe. Stąd istnieje realna konieczność wzmacniania promieniowania już poza rezonatorem lasera. Wzmacnianie impulsów femtosekundowych stanowi złożony problem naukowy i techniczny. Odbywa się ono z wykorzystaniem techniki wzmacniania impulsów rozciągniętych (ang. *Chirped Pulse Amplification*, CPA), polegającej na czasowym wydłużeniu ultrakrótkiego impulsu z lasera femtosekundowego, wzmocnieniu go, a następnie skróceniu do pierwotnego czasu trwania w układzie kompresora optycznego¹⁹. W 2015 roku zainicjowałem prace badawcze nad wzmacnianiem impulsów femtosekundowych w zakresie spektralnym 1,9 – 2,1 μm . Głównym celem tych badań jest opracowanie skutecznej techniki wzmacniania w monolitycznych układach całkowicie światłowodowych, tj. takich, w których zarówno rozciąganie, jak i wzmacnianie i kompresja odbywać się będzie w odpowiednio dobranych włóknach optycznych. Podejście to ogranicza wprawdzie maksymalną możliwą do osiągnięcia moc wyjściową, aczkolwiek jest jedyną drogą prowadzącą do opracowania całkowicie stabilnych, niewrażliwych na czynniki zewnętrzne, niewymagających justowania bądź innej ingerencji użytkownika (bezobsługowych) źródeł promieniowania femtosekundowego w średniej podczerwieni. Badania nad takim układem przedstawiono w kolejnej pracy cyklu:

[H4] **G. Sobon**^(70%), J. Sotor^(10%), I. Pasternak^(5%), A. Krajewska^(5%), W. Strupinski^(5%), K. M. Abramski^(5%), “260 fs and 1 nJ pulse generation from a compact, mode-locked Tm-doped fiber laser”, *Optics Express* 23, 31446-31451 (2015), **IF**₂₀₁₅ = **3,148**.

W pracy [H4] zademonstrowano monolityczny układ CPA, zilustrowany na **Rys. 4**, generujący impulsy o energii przekraczającej 1 nJ i czasie trwania 260 fs.

¹⁸ Q. Bao, H. Zhang, Y. Wang, Z. Ni, Y. Yan, Z.X. Shen, K.P. Loh, D.Y. Tang, “Atomic-Layer Graphene as a Saturable Absorber for Ultrafast Pulsed Lasers”, *Advanced Functional Materials* 19, 3077-3083 (2009)

¹⁹ D. Strickland, G. Mourou, “Compression of amplified chirped optical pulses”, *Opt. Commun.* 56, 219-221 (1985)



Rys. 4. Całkowicie światłowodowy układ CPA generujący impulsy o energii 1,1 nJ i czasie trwania 260 fs [H4].

Układ składa się kolejno z: lasera sygnałowego, światłowodu rozciągającego impulsy, wzmacniacza oraz odcinka światłowodu jednomodowego (SMF-28) pełniącego funkcję kompresora impulsów. Jako oscylator sygnałowy wykorzystano laser oparty na światłowodzie domieszkowanym talem, z nasycalnym absorberem grafenowym. W przeprowadzonym eksperymencie laser sygnałowy generował impulsy o czasie trwania 656 fs, częstotliwości repetycji 100 MHz i mocy średniej 8 mW. Następnie impulsy wprowadzono do odcinka światłowodu o dużej dyspersji normalnej (wynoszącej ok. $0,033 \text{ ps}^2/\text{m}$ na długości fali 1970 nm). W efekcie uzyskano wydłużenie impulsów do około 12 ps. Następnie, impulsy wzmocniono w układzie wzmacniacza tulowego pompowanego obustronnie. Po wzmocnieniu, impulsy zostały wprowadzone do odcinka standardowego światłowodu SMF-28, który posiada dyspersję anomalną (ok. $-0,081 \text{ ps}^2/\text{m}$ na 1970 nm), dzięki czemu możliwe było ich skompresowanie. Długość światłowodu kompresującego dobrano eksperymentalnie, skracając systematycznie odcinek światłowodu aż do uzyskania najkrótszego czasu trwania impulsu. Przy optymalnej długości uzyskano na wyjściu impulsy o czasie trwania 260 fs i mocy średniej 110 mW. Energia impulsów wyjściowych osiąga wartość 1,1 nJ. Oznacza to, iż uzyskano ok. 14-krotne zwiększenie energii impulsu przy jednoczesnym 2,5-krotnym skróceniu czasu trwania. Należy zaznaczyć, iż w momencie opublikowania była to najwyższa energia impulsu uzyskana z całkowicie światłowodowego źródła generującego impulsy femtosekundowe w tym zakresie spektralnym. Badania nad tego typu układami są obecnie kontynuowane w ramach projektu „Światłowodowe wzmacniacze impulsów ultrakrótkich w zakresie średniej podczerwieni” (finansowanego ze środków Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego), którego realizację rozpoczęto na Politechnice Wrocławskiej w lutym 2017 r, w którym pełnię funkcję kierownika.

Kolejne prace cyklu [H5,H6] dotyczą badań nad wpływem parametrów nasycalnego absorbera na działanie laserów z pasywną synchronizacją modów. W pierwszej kolejności podjęto badania nad nasycalnymi absorberami grafenowymi w laserach zarówno tulowych jak i erbowych [H5]. Następna praca dotyczy laserów tulowych wykorzystujących absorbera na bazie nanorurek węglowych, wytworzonych w zespole dra hab. inż. Mariusza Zdrojka z Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej [H6].

W piątej pracy cyklu:

[H5] **G. Sobon**^(65%), J. Sotor^(10%), I. Pasternak^(5%), A. Krajewska^(5%), W. Strupinski^(5%), K. M. Abramski^(5%), “Multilayer graphene-based saturable absorbers with scalable modulation depth for mode-locked Er- and Tm-doped fiber lasers”, *Optical Materials Express* 5, 2884-2894 (2015), **IF₂₀₁₅ = 2,657**.

badano własności liniowe i nieliniowe wielowarstwowych kompozytów grafen/PMMA wytworzonych w ITME, tj. transmitancję w funkcji ilości warstw oraz wpływ ilości warstw na głębokość modulacji światła. Następnie zbadano wpływ grubości absorbera na działanie laserów (erbowego i tulowego). Zgodnie z przewidywaniami teoretycznymi, w przypadku lasera o dyspersji całkowicie anomalnej, większa głębokość modulacji powinna przełożyć się na poszerzenie spektrum impulsów²⁰. Niemniej jednak, założone warunki symulacji nie odzwierciedlają dokładnie warunków rzeczywistego eksperymentu. Mimo, iż do roku 2015 w literaturze pojawiło się wiele prac dotyczących wykorzystania grafenu do synchronizacji modów laserów światłowodowych, brakowało prac prezentujących rzeczywisty wpływ parametrów nasycalnego absorbera na własności promieniowania generowanego przez laser. Zauważyłem potrzebę przeprowadzenia systematycznego cyklu eksperymentów polegających na zbadaniu, w pierwszej kolejności, zależności optycznych parametrów nieliniowych od ilości warstw grafenu, a następnie – zweryfikowaniu w jaki sposób zmiana ilości warstw grafenu wpływa na zachowanie lasera. W ramach nawiązanej bliskiej współpracy z ITME została wytworzona seria kompozytów grafen/PMMA o różnych ilościach warstw grafenu: 9, 12, 24, 37 oraz 48 (powstała poprzez złożenie dwóch folii 24-warstwowych). Z dostępnych warstw wykonano nasycalne absorbery (poprzez wycięcie i nałożenie fragmentu folii na czoło złączki światłowodowej) i w pierwszej kolejności zmierzono ich transmitancję w liniowym zakresie pracy. Transmitancja wielowarstwowej struktury grafenowej opisana może być zależnością²¹:

$$T(N) = \left(1 + \frac{1,13 \cdot \pi \alpha N}{2}\right)^{-2}, \quad (1)$$

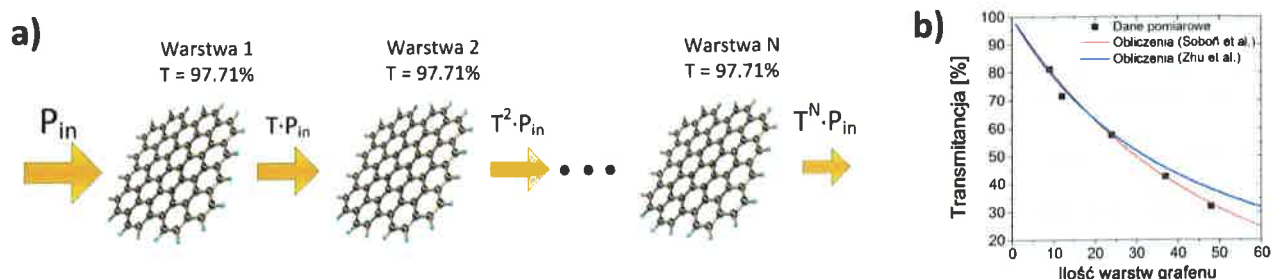
gdzie N jest ilością warstw grafenu, natomiast α oznacza stałą struktury subtelnej ($\approx 1/137$). Jednakże, formuła (1) dotyczy jedynie przypadku, gdy w materiale występuje oddziaływanie pomiędzy poszczególnymi warstwami materiału, np. w przypadku grafenu wytwarzanego na podłożu niklowym (możliwy jest wtedy wzrost nawet kilkudziesięciu warstw na jednym podłożu w jednym procesie). W przypadku wzrostu grafenu na podłożu miedzianym, otrzymywana struktura jest zawsze monowarstwą (lub ewentualnie podwójną warstwą) węgla. Warstwy te są następnie układane w stos i przenoszone na podłoże polimerowe. Wytwarzane kompozyty wielowarstwowe należy zatem rozpatrywać jako szeregowe połączenie N warstw grafenu (zilustrowane na **Rys. 5a**), w których nie występuje żadne oddziaływanie pomiędzy warstwami, gdyż nie są one ze sobą powiązane żadnymi siłami (ich ułożenie względem siebie, tzw. *stacking*, jest zupełnie przypadkowe). Przeprowadzony pomiar wykazał, że transmitancja nasycalnego absorbera opisana jest zależnością:

$$T(N) = (1 - \pi \alpha)^N. \quad (2)$$

²⁰ J. Jeon, J. Lee, J.-H. Lee, “Numerical study on the minimum modulation depth of a saturable absorber for stable fiber laser mode locking”, *J. Opt. Soc. Am. B* 32, 31-37 (2015).

²¹ S.-E. Zhu, S. Yuan, G.C.A.M. Janssen, “Optical transmittance of multilayer graphene”, *Europhys. Lett.* 108, 17007 (2014)

Na **Rys. 5b** przedstawiono porównanie pomiędzy transmitancją wyznaczoną przy użyciu obu wzorów oraz wynikami eksperymentalnymi.



Rys. 5. Ilustracja transmisji światła przez wiele warstw grafenu (a), zmierzona oraz obliczona transmitancja grafenu w zależności od ilości warstw (b).

Pomiar parametrów nieliniowych wykazał, że głębokość modulacji skaluje się wraz z ilością warstw grafenu w nasycalnym absorberze i wynosi od 3% (9 warstw) do 7,5% (37 warstw). W przypadku kompozytu 2x24 zaobserwowano optyczne zniszczenie próbki przed jej nasyceniem, w związku z czym zmierzona głębokość modulacji wyniosła niespełna 7%. W celu określenia wpływu parametrów absorbera na generację impulsów, zestawiono dwa lasery światłowodowe (erbowy i tulowy), oba w konfiguracji pierścieniowej, całkowicie światłowodowej, z wykorzystaniem komponentów i włókien PM.

Przeprowadzone badania wykazały, że w przypadku lasera erbowego (o częstotliwości repetycji 54 MHz) najkrótsze impulsy (345 fs) i najszersze pasmo generacji (10,1 nm) osiągnięto z użyciem kompozytu 37-warstwowego. Taka ilość warstw zapewnia najlepszy balans pomiędzy głębokością modulacji a stratami w zestawionym układzie lasera. Dalsze zwiększanie ilości warstw powodowało zwiększenie strat wprowadzonych do rezonatora, wydłużenie impulsu i zawężenie pasma, a także przesunięcie się spektrum w kierunku fal krótszych (co jest konsekwencją większych strat). W przypadku lasera tulowego (o częstotliwości repetycji 28 MHz), najlepszą wydajność (impulsy o czasie 737 fs i paśmie 5,8 nm) uzyskano z użyciem 24 warstw. W obu przypadkach modulacja wprowadzana przez absorber 9-warstwowo była zbyt mała, aby wymusić synchronizację modów.

W kolejnej pracy cyklu:

[H6] **G. Sobot**^(55%), A. Duzynska^(15%), M. Świniarski^(5%), J. Judek^(5%), J. Sotor^(10%), M. Zdrojek^(10%), “CNT-based saturable absorbers with scalable modulation depth for Thulium-doped fiber lasers operating at 1.9 μm ”, Scientific Reports 7, 45491 (2017), **IF**₂₀₁₅ = **5,228**

zaproponowałem przeprowadzenie podobnej analizy, lecz dotyczącej nasycalnych absorberów na bazie nanorurek węglowych. Nanorurki węglowe (ang. *carbon nanotubes*, CNT), w szczególności jednościenne (ang. *single-walled carbon nanotubes*, SWCNT) stanowią bardzo interesujący materiał do zastosowań w elektronice i fotonice. Pierwsza demonstracja wykorzystania nanorurek do generacji ultrakrótkich impulsów laserowych miała miejsce w 2003 roku w laserze erbowym²². Pierwszy laser tulowy oparty na nanorurkach został opisany w 2008 r.²³ Od tamtej pory

²² S. Y. Set, et al., “Mode-locked Fiber Lasers based on a Saturable Absorber Incorporating Carbon Nanotubes”, Optical Fiber Communication Conference (OFC’2003), postdeadline paper PD44.

²³ M. A. Solodyankin, et al., “Mode-locked 1.93 μm thulium fiber laser with a carbon nanotube absorber”, Opt. Lett. **33**, 1336-1338 (2008)

w literaturze pojawiło się wiele prac poświęconych laserom z nasycalnymi absorberami na bazie nanorurek, jednakże, wszystkie badania dotyczyły eksperymentów z warstwą nanorurek o konkretnej, arbitralnie wybranej grubości. W momencie podjęcia tej tematyki, nie istniały prace analizujące wpływ grubości warstwy nanorurek węglowych na liniowe i nieliniowe parametry optyczne, jak również na parametry lasera. Pojawiła się zatem realna potrzeba uzupełnienia tej luki i przeprowadzenia takowej analizy.

W badaniach wykorzystano nasycalne absorbery z warstwami nanorurek o grubościach 50, 100, 150 i 200 nm, wytworzone na Politechnice Warszawskiej w zespole dra hab. inż. Mariusza Zdrojka. Nieliniowe parametry optyczne charakteryzowano na długości fali 1560 nm, ze względu na dostępność mierników mocy oraz źródła impulsów femtosekundowych o odpowiednio dużej energii, wystarczającej do zaobserwowania efektu nasycenia. Pomiar nasycalnej absorpcji wykazał, iż warstwy nanorurek grubsze niż 50 nm cechują się dość dużą głębokością modulacji (od 8,1% do 9,1% dla warstw 100 – 200 nm). Obliczone krzywe teoretyczne (korzystając z modelu szybkiego nasycalnego absorbera) wskazują, iż nawet przy najwyższej dostępnej mocy absorpcja nie była w pełni nasycona. Oznacza to, że rzeczywista głębokość modulacji jest zdecydowanie wyższa (nawet do 17,3%). Następnie zbadano wpływ parametrów absorbera na generację impulsów w tulowym laserze światłowodowym w konfiguracji PM. Podobnie jak w przypadku grafenu, optymalne warunki pracy występują tylko dla jednej grubości – 100 nm. Dla tej warstwy uzyskano generację impulsów o czasie 501 fs i paśmie 8,5 nm, na środkowej długości fali 1928 nm. Praca opublikowana w Scientific Reports [H6] stanowi pierwsze tego typu porównanie parametrów nasycalnych absorberów wykonanych na bazie warstw nanorurek węglowych o różnej grubości. Jest to również pierwsza na świecie demonstracja tulowego lasera femtosekundowego w konfiguracji PM wykorzystującego nanorurki węglowe jako nasycalny absorber.

Opisane powyżej prace [H1-H6] dotyczyły laserów tulowych generujących impulsy będące tzw. solitonami optycznymi. Ten reżim pracy lasera występuje jedynie w układach charakteryzujących się całkowicie anomálną dyspersją rezonatora. Jest to najpowszechniejszy i najlepiej poznany reżim synchronizacji modów, zapewniający uzyskanie impulsów o czasach trwania bliskich limitowi wynikającym z transformacji czasowo-częstotliwościowej. Jednakże, w przypadku tego typu laserów energia pojedynczego impulsu jest silnie ograniczona przez teorię pola solitonu²⁴. W przypadku próby uzyskania większej mocy wyjściowej (poprzez silniejsze pompowanie lasera) mamy do czynienia z generacją solitonów wyższego rzędu, które mają tendencję do rozpadu na wiele impulsów (obserwowane wtedy jest zjawisko tzw. harmonicznej synchronizacji modów). Zwiększenie mocy wyjściowej lub poszerzenie generowanego spektrum możliwe jest poprzez zastosowanie wzmacniaczy (co wykazano w pracy [H4]), jednakże, możliwa jest poprawa uzyskanych parametrów poprzez wymuszenie innego reżimu synchronizacji modów.

Reżim pracy lasera femtosekundowego jest determinowany przez wypadkową dyspersję rezonatora. Rozróżnia się trzy podstawowe tryby pracy: reżim dyspersji całkowicie anomálnej (generowane są wtedy impulsy o charakterze konwencjonalnych solitonów optycznych), wypadkowej dyspersji normalnej (generowane są wtedy tzw. solitony dyssypujące, o dłuższym czasie trwania i dużej energii) oraz tzw. reżim dyspersji zbalansowanej, w którym całkowita wypadkowa dyspersja jest bliska zeru (generowane są wtedy impulsy o ultrakrótkim czasie trwania i szerokim spektrum optycznym, w wyniku naprzemiennej propagacji przez ośrodki o przeciwnych znakach dyspersji). W 2014 roku zainicjowałem prace nad nowym wątkiem badawczym

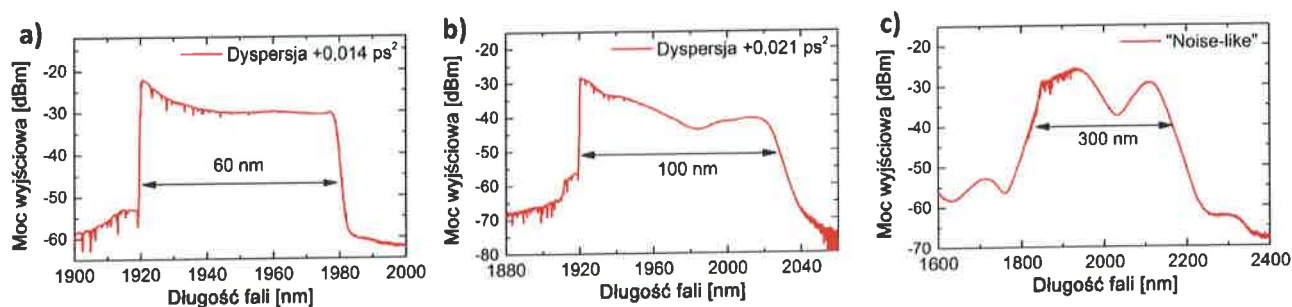
²⁴ G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 3rd Ed. (Academic Press, 2001).

na Politechnice Wrocławskiej, mianowicie nad badaniem możliwości generacji impulsów ultrakrótkich z laserów światłowodowych domieszkowanych tujem, pracujących w różnych reżimach dyspersyjnych, wykorzystujących dostępne nasycalne absorbery (np. nieliniowa rotacja polaryzacji oraz grafen). Głównym celem było opracowanie laserów całkowicie światłowodowych, nie wymagających konieczności stosowania elementów optyki objętościowej. Badania prowadzone są w ramach projektu badawczego (z programu SONATA Narodowego Centrum Nauki), którego jestem kierownikiem.

Pierwszą z prac dotyczących generacji impulsów w laserach z zarządzaną dyspersją jest praca [H7]:

[H7] **G. Sobon**^(80%), J. Sotor^(10%), T. Martynkien^(5%), K.M. Abramski^(5%), “Ultra-broadband dissipative soliton and noise-like pulse generation from a normal dispersion mode-locked Tm-doped all-fiber laser”, *Optics Express* 24, 6156-6161 (2016), **IF₂₀₁₅ = 3,148**.

Zademonstrowano całkowicie światłowodowy laser, w którym anomalna dyspersja światłowodów standardowych (tj. pasywnych SMF-28 oraz aktywnego domieszkowanego tujem) jest kompensowana światłowodem typu DCF (ang. *dispersion compensating fiber*). W eksperymencie użyto światłowodu komercyjnego (OFS, model DCF-2000) o współczynniku dyspersji prędkości grupowej (ang. *group velocity dispersion*, GVD) równym $0,0246 \text{ ps}^2/\text{m}$ na długości fali 1950 nm. W celu wygenerowania solitonów dyssypujących, wypadkowa dyspersja rezonatora musi być normalna²⁵. W związku z tym obliczono minimalną wymaganą długość włókna DCF-2000 tak, by przeważała dyspersję anomalną pozostałych światłowodów. Jako mechanizm synchronizacji modów wykorzystano nieliniową rotację polaryzacji, który jest klasyfikowany jako szybki nasycalny absorber²⁶. Możliwość generacji solitonów dyssypujących badano dla dwóch wypadkowych dyspersji rezonatora: $+0,014 \text{ ps}^2$ oraz $+0,021 \text{ ps}^2$. W pierwszym przypadku uzyskano emisję bardzo szerokiego spektrum, rozciągającego się od 1920 do 1980 nm (zilustrowane na **Rys. 6c**), o charakterystycznym dla solitonów dyssypujących kształcie ze stromymi zboczami. Na wyjściu lasera uzyskano impulsy o energii 0,32 nJ, czyli około dziesięciokrotnie wyższej niż w przypadku typowych laserów solitonowych. Ze względu na dużą normalną dyspersję wewnątrz lasera, impulsy bezpośrednio na wyjściu posiadają dodatni *chirp*, tj., są rozciągnięte w czasie i mogą zostać skrócone przy zastosowaniu odpowiedniego mechanizmu kompresji.



Rys. 6. Porównanie widm optycznych wygenerowanych z lasera tulowego dla różnych dyspersji chromatycznych rezonatora [H7].

²⁵ P. Grelu, N. Akhmediev, “Dissipative solitons for mode-locked lasers”, *Nature Photonics* 6, 84 (2012)

²⁶ T. Lei, C. Tu, F. Lu, X. Deng, E. Li, “Numerical study on self-similar pulses in mode-locking fiber laser by coupled Ginzburg-Landau equation model”, *Opt. Express* 17, 585-591 (2009)

Celem eksperymentu było również pokazanie, iż możliwe jest skrócenie impulsu bez konieczności używania kompresorów objętościowych (opartych na siatkach dyfrakcyjnych bądź pryzmatach). Jako kompresora użyto zatem odcinka (3,5 m) światłowodu SMF-28 o dyspersji anomalnej. Finalnie osiągnięto impulsy o czasie trwania 198 fs. W drugim przypadku wydłużono światłowód DCF-2000 w laserze, uzyskując wypadkową dyspersję $+0,021 \text{ ps}^2$. Uzyskano generację jeszcze szerszego pasma, rozciągającego się od 1920 do niemal 2040 nm (**Rys. 6b**). Są to najszersze spektra generowane do tej pory z lasera tulowego zademonstrowane kiedykolwiek na świecie. Kompresja w światłowodzie SMF-28, pomimo starannego doboru długości odcinka, pozwoliła na skrócenie impulsów do 371 fs. Uzyskana energia impulsu była na poziomie 0,56 nJ.

W tym samym rezonatorze laserowym, przy relatywnie dużej normalnej dyspersji ($+0,021 \text{ ps}^2$) oraz dużych mocach pompujących (powyżej 1,1 W, czyli większej niż wymaganej do generacji solitonów dyssypujących) zaobserwowano reżim pracy zwany generacją impulsów szumopodobnych (ang. *noise-like pulses*, NLP). Cechą charakterystyczną tego trybu pracy jest generacja grup impulsów (zamiast pojedynczego impulsu). Amplituda oraz faza impulsów w grupie mogą znacząco fluktuować w czasie, stąd też nazwanie ich *szumopodobnymi*. Jednakże, emisja NLP charakteryzuje się bardzo szerokim i gładkim spektrum, rozciągającym się na dziesiątki nanometrów, o dość łagodnych zboczach. W eksperymencie uzyskano generację spektrum o szerokości 300 nm (1850 – 2150 nm) i energii pojedynczej paczki impulsów na poziomie 1,3 nJ. Są to zdecydowanie najszersze spektralnie impulsy szumopodobne generowane na świecie (do momentu publikacji, najszersze raportowane spektrum wynosiło 60 nm^{27}). Wygenerowane spektrum przedstawiono na **Rys. 6c**.

Dzięki swoim własnościom (szerokie i gładkie spektrum oraz duża energia impulsów) źródła NLP znalazły zastosowanie np. w interferometrii²⁸, lub jako pompy do generacji superkontinuum²⁹. Tematyka generacji impulsów szumopodobnych okazała się na tyle interesująca, iż postanowiłem kontynuować badania nad laserami tego typu. W kolejnej pracy [H8] cyklu:

[H8] **G. Soboń**^(70%), J. Sotor^(10%), I. Pasternak^(5%), A. Przewłoka^(5%), W. Strupiński^(5%), K. M. Abramski^(5%), “Amplification of noise-like pulses generated from a graphene-based Tm-doped all-fiber laser”, *Optics Express* 24, 20359-20364 (2016), **IF₂₀₁₅ = 3,148**

zademonstrowano, po raz pierwszy na świecie, laser tulowy pracujący w trybie NLP wymuszonym nasycalnym absorberem na bazie grafenu. Laser (w układzie całkowicie światłowodowym) generował impulsy o szerokości spektralnej przekraczającej 60 nm. Dodatkowo, postanowiono wzmocnić promieniowanie wyjściowe z lasera w całkowicie światłowodowym wzmacniaczu tulowym. Pozwoliło to na uzyskanie średniej mocy wyjściowej rzędu 1,21 W przy częstotliwości repetycji 23,5 MHz, co odpowiada energii pojedynczej grupy impulsów na poziomie 51,5 nJ. Jest to zdecydowanie wyższa energia niż najwyższa raportowana do tej pory z lasera tulowego³⁰. Dzięki bardzo szerokiemu pokryciu spektralnemu i monolitycznej konstrukcji, układ tego typu może

²⁷ X. He, et al., “60 nm Bandwidth, 17 nJ Noiselike Pulse Generation from a Thulium-Doped Fiber Ring Laser”, *Appl. Phys. Express* **6**, 112702 (2013)

²⁸ S. Keren, M. Horowitz, “Interrogation of fiber gratings by use of low-coherence spectral interferometry of noiselike pulses”, *Opt. Lett.* **26**, 328–330 (2001).

²⁹ A. Zaytsev, et al., “Supercontinuum generation by noise-like pulses transmitted through normally dispersive standard single-mode fibers”, *Opt. Express* **21**, 16056–16062 (2013).

³⁰ S. Liu, et al., “Noise-like femtosecond pulse in passively mode-locked Tm-doped NALM-based oscillator with small net anomalous dispersion”, *J. Opt.* **18**, 015508 (2016).

stanowić bardzo dobre źródło światła do pomiarów dyspersji chromatycznej światłowodów w zakresie średniej podczerwieni, jako alternatywa dla np. źródeł światła białego³¹.

Głównym celem zainicjowanych prac nad laserami tulowymi z zarządzaną dyspersją było opracowanie i uruchomienie lasera wykorzystującego mechanizm synchronizacji modów inny niż nieliniowa rotacja polaryzacji. Naturalnym kandydatem do roli nasycalnego absorbera jest grafen, którego wykorzystaniem w laserach zajmowałem się już od 2011 roku. Rezultaty badań zawarto w pracy [H9] cyklu:

[H9] J. Sotor^(40%), J. Bogusławski^(10%), T. Martynkien^(5%), P. Mergo^(5%), A. Krajewska^(5%), A. Przewłoka^(5%), W. Strupiński^(5%), **G. Soboń**^(25%), “All-polarization-maintaining, stretched-pulse Tm-doped fiber laser, mode-locked by a graphene saturable absorber”, *Optics Letters* 42, 1592-1595 (2017), **IF₂₀₁₅ = 3,040**.

W pracy tej zademonstrowano pierwszy na świecie światłowodowy laser tulowy ze zbalansowaną dyspersją (typu *stretched-pulse*) wykorzystujący grafen jako nasycalny absorber. Ponadto, rezonator lasera zrealizowano całkowicie w technologii PM, co zapewnia stabilną pracę długoterminową. Światłowod PM o dyspersji normalnej na zakres 2 μm został wytworzony na Uniwersytecie Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie, w zespole dra Pawła Mergo. W momencie podjęcia badań nie były dostępne komercyjnie włókna tego typu. Jako nasycalny absorber wykorzystano epitaksjalny grafen wielowarstwowy na podłożu PMMA. Zastosowano kompozyt o 35 warstwach, wykazujący głębokość modulacji na poziomie 8%. Na wyjściu lasera uzyskano generację impulsów o szerokości pasma 27,5 nm i czasie trwania 560 fs, które następnie skompresowano w odcinku włókna jednomodowego do 205 fs. Badania potwierdziły użyteczność grafenu w laserach z zarządzaną dyspersją, w których energia impulsu krążącego we wnętrzu jest w ogólnym przypadku wyższa, niż w laserach solitonowych. Należy zaznaczyć, iż do tej pory opracowanie takiego lasera nie udało się żadnej grupie badawczej na świecie.

Pewnego rodzaju ukoronowaniem prowadzonych badań nad wykorzystaniem nanomateriałów do generacji ultrakrótkich impulsów laserowych, a także potwierdzeniem międzynarodowej rozpoznawalności i dużego wpływu prowadzonych badań na dyscyplinę była propozycja napisania artykułu zaproszonego, złożona przez edytorów czasopisma *Photonics Research*. Praca [H10]:

[H10] **G. Soboń**^(100%), “Mode-locking of fiber lasers using novel two-dimensional nanomaterials: graphene and topological insulators [Invited]”, *Photonics Research* 3, A56-A63 (2015), **IF₂₀₁₅ = 3,179**

stanowi artykuł przeglądowy na temat pasywnej synchronizacji modów w laserach światłowodowych z użyciem grafenu oraz izolatorów topologicznych. Artykuł został opublikowany w specjalnym wydaniu czasopisma *Photonics Research*, zatytułowanym: „*Photonics Based on Two Dimensional Materials*”, poświęconym tematyce zastosowań nowych materiałów dwuwymiarowych w fotonice. W pracy opisano osiągnięcia nauki dotyczące laserów opartych na grafenie (ze szczególnym podkreśleniem laserów tulowych), jak również przedstawiono aktualny

³¹ P. Hlubina, T. Martynkien, W. Urbańczyk, “Dispersion of group and phase modal birefringence in elliptical-core fiber measured by white-light spectral interferometry”, *Opt. Express* 11, 2793-2798 (2003).

przeгляд demonstrowanych w literaturze laserów światłowodowych wykorzystujących izolatory topologiczne (takie jak Bi_2Te_3 , Bi_2Se_3 , Sb_2Te_3). Artykuł ten został umieszczony na trzecim miejscu na liście dziesięciu najlepiej cytowanych artykułów czasopisma *Photonics Research* za lata 2014-2015.

Dopełnieniem poprzedniego artykułu oraz pewnego rodzaju podsumowaniem prac zespołu habilitanta nad laserami światłowodowymi wykorzystującymi nanomateriały jako nasycalny absorber jest praca [H11]:

[H11] G. Sobon^(100%), “Application of 2D materials to ultrashort laser pulse generation”, P.K. Nayak (red.), *Two-dimensional Materials - Synthesis, Characterization and Potential Applications*, InTech, Rijeka, Chorwacja, ISBN: 978-953-51-4813-5

będąca rozdziałem w monografii zatytułowanej „*Two-dimensional Materials - Synthesis, Characterization and Potential Applications*”. W pracy zawarto przegląd metod pasywnej synchronizacji modów w laserach i technologii wykonywania nasycalnych absorberów, jak również opisano metody ich charakteryzacji. Podsumowano aktualne światowe osiągnięcia w zakresie generacji ultrakrótkich impulsów laserowych na różnych długościach fali w laserach zarówno światłowodowych, jak i ciała stałego, wykorzystujących nasycalne absorbery nanomateriałowe: grafen, izolatory topologiczne, dichalkogenki metali przejściowych oraz czarny fosfor.

4.2.2. Źródła wykorzystujące światłowody nieliniowe: generacja superkontinuum oraz solitonów Ramanowskich

W 2013 roku, tuż po obronie pracy doktorskiej, zapoczątkowałem na Politechnice Wrocławskiej badania nad generacją superkontinuum w światłowodach nieliniowych, pompowanych przy użyciu femtosekundowych źródeł CPA pracujących na długości fali 1,56 μm . Impulsem do podjęcia tej tematyki było nawiązanie bardzo bliskiej współpracy naukowej z zespołem prof. Ryszarda Buczyńskiego z Zakładu Szkieleń ITME, który w tamtym czasie prowadził prace nad wytwarzaniem nieliniowych światłowodów fotonicznych ze szkieleń wieloskładnikowych, posiadających okno transmisyjne rozciągające się w zakresie bliskiej i średniej podczerwieni. Już pierwsze próby generacji superkontinuum dały bardzo dobre rezultaty, potwierdzając, że opracowywane we Wrocławiu femtosekundowe lasery stanowią znakomite źródła pompujące do inicjowania zjawisk nieliniowych. Efektem owocnej współpracy są trzy publikacje włączone w cykl habilitacyjny, tj. prace [H12-H14]. W następnych latach nawiązano współpracę z kolejnymi grupami badawczymi zajmującymi się projektowaniem światłowodów fotonicznych oraz modelowaniem zjawisk nieliniowych (zespół prof. Wacława Urbańczyka z Wydziału Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej), jak i wytwarzaniem takich światłowodów ze szkieleń krzemionkowych (zespół dra Pawła Mergo z Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie). W efekcie tej współpracy powstały publikacje [H9,H15,H17].

Pierwszą z prac dotyczących generacji szerokopasmowego promieniowania w średniej podczerwieni w światłowodach nieliniowych jest praca [H12]:

[H12] **G. Sobon**^(30%), M. Klimczak^(30%), J. Sotor^(5%), K. Krzempek^(5%), D. Pysz^(5%), R. Stepień^(5%), T. Martynkien^(5%), K. M. Abramski^(5%), R. Buczynski^(10%), "Infrared supercontinuum generation in soft-glass photonic crystal fibers pumped at 1560 nm", *Optical Materials Express* 4, 7-15 (2014), **IF₂₀₁₄ = 2,844**

poświęcona badaniom nad generacją superkontinuum w krótkich odcinkach (5 – 6 cm) włókien wieloskładnikowych (ołowiowo-bizmutowo-galowych), wytworzonych w Zakładzie Szkieleń ITME. W eksperymencie zaproponowałem zbadanie efektywności generacji superkontinuum dla dwóch różnych warunków pobudzenia na długości fali 1,56 μm : impulsami o czasie trwania 400 fs, maksymalnej mocy szczytowej i energii równej odpowiednio 30 kW i 12 nJ (układ CPA z laserem sygnałowym na bazie nieliniowej rotacji polaryzacji), oraz dla pobudzenia impulsami o czasie trwania ok. 800 fs, mocy szczytowej 25 kW i energii 20 nJ (laser sygnałowy wykorzystujący grafen). W obu przypadkach uzyskano generację superkontinuum rozciągającego się na ponad oktawę (przyjmując dynamikę 20 dB). W przypadku pobudzenia impulsami o wyższej energii (laser wykorzystujący grafen) wygenerowane superkontinuum rozciągało się w paśmie od 1000 do ponad 2400 nm. Eksperyment potwierdził, iż wzmocnione impulsy sub-pikosekundowe są wystarczające do wzbudzenia generacji superkontinuum szerokiego na ponad oktawę. Otwiera to drogę do budowy bezwzględnie stabilizowanych grzebieni częstotliwości, z wykorzystaniem tzw. interferometru $f-2f$ do detekcji częstotliwości obwiednia-nośna (ang. *carrier-envelope offset frequency, f_{CEO}*) lasera. Artykuł opisujący uzyskane wyniki znalazł się w zestawieniu najczęściej czytanych publikacji w czasopiśmie *Optical Materials Express* w grudniu 2013 r.

Źródła promieniowania superkontinuum można sklasyfikować w dwie podstawowe grupy: generowane we włóknach o dyspersji całkowicie normalnej (ang. *all normal dispersion, ANDi*), oraz generowane we włóknach o dyspersji anomalnej, w których zero dyspersji (ang. *zero dispersion wavelength, ZDW*) ulokowane jest możliwie blisko długości fali lasera pompującego. Wykorzystanie włókien o dyspersji anomalnej jest metodą historycznie najstarszą. Podejście to pozwala na generowanie zdecydowanie szerszego pasma niż w przypadku światłowodów ANDi. Aktualnie rekordowo szerokie spektra (rozciągające się aż do kilkunastu mikrometrów) są generowane z włókien o dyspersji anomalnej¹¹. Jednakże, na początku XXI wieku zdano sobie sprawę z ograniczeń superkontinuum generowanego we włóknach pompowanych wokół zera dyspersji³². Przede wszystkim, poważnym problemem okazała się niska koherencja (lub jej brak) oraz znaczne fluktuacje amplitudy impulsów superkontinuum (tzw. szum *shot-to-shot noise*).

Na przestrzeni lat 2010-2013 podjęto na świecie szereg intensywnych prac w kierunku generacji koherentnego superkontinuum generowanego w światłowodach o dyspersji całkowicie normalnej³³. Zaproponowano również różne metody weryfikacji koherencji superkontinuum i badania parametrów szumowych. Należy pamiętać, że analizator widma optycznego, używany do obserwacji spektrum superkontinuum, mierzy uśredniony kształt widma wielu impulsów. Typowo, pomiar widma rozciągającego się na ok. 1000 nm zajmuje, w zależności od ustawień rozdzielczości i czułości przyrządu, nawet kilka sekund. Częstotliwość repetycji impulsów z laserów femtosekundowych na ogół jest rzędu megaherców. Oznacza to, że podczas pomiaru analizator widma uśredni spektrum z nawet milionów kolejnych impulsów (przy takich

³² J. M. Dudley, S. Coen, "Fundamental limits to few-cycle pulse generation from compression of supercontinuum spectra generated in photonic crystal fiber", *Opt. Express* 12, 2423-2428 (2004).

³³ A. M. Heidt, "Pulse preserving flat-top supercontinuum generation in all-normal dispersion photonic crystal fibers", *J. Opt. Soc. Am. B* 27, 550-559 (2010)

częstotliwościach nie jest możliwe wyzwalenie pojedynczym impulsem). W celu pełnej charakteryzacji stabilności amplitudowej (fluktuacje między kolejnymi impulsami) i koherencji superkontinuum najczęściej stosuje się trzy podstawowe metody eksperymentalne:

- z użyciem rozbalansowanego interferometru Michelsona, w którym jedno z ramion jest dłuższe o połowę długości optycznej rezonatora lasera pobudzającego. Obserwowana jest zatem interferencja pomiędzy dwoma kolejnymi impulsami ciągu. Obecność interferencji świadczy o spójności fazowej między kolejnymi impulsami³⁴, natomiast miarą koherencji jest głębokość modulacji prążków interferencyjnych widziana na analizatorze widma,
- dyspersyjna transformacja Fouriera, w której szerokopasmowe impulsy superkontinuum są wprowadzane do ośrodka o dużej dyspersji (np. długiego odcinka światłowodu), który dokonuje optycznej transformacji Fouriera – umożliwia to obserwację kształtu widma optycznego na oscyloskopie, jak również obserwację widma pojedynczych impulsów³⁵,
- obserwacja zdudnienia pomiędzy jednym komponentem spektralnym superkontinuum („zębem” grzebienia optycznego), a stabilnym laserem pracy ciągłej. Obecność zdudnienia świadczy o zachowaniu struktury grzebieniowej, tj. stałej fazy każdego z modów³⁶.

Podstawowym warunkiem wygenerowania stabilnego superkontinuum o wysokiej koherencji jest zastosowanie światłowodu o odpowiednio wyprofilowanej charakterystyce dyspersji (dyspersja całkowicie normalna, bez przejścia przez zero). Niemniej jednak aktualny stan wiedzy w momencie podjęcia badań wskazywał, iż w przypadku gdy impuls pobudzający będzie relatywnie długi (dłuższy niż 300-400 fs), nastąpi degradacja koherencji generowanego superkontinuum mimo odpowiedniego profilu dyspersji włókna³⁷. Podjęte przez habilitanta wspólnie z dr hab. inż. Mariuszem Klimczakiem z ITME badania miały na celu pokazanie, iż możliwa jest generacja szerokopasmowego, koherentnego i stabilnego superkontinuum przy pobudzeniu impulsami sub-pikosekundowymi. Zademonstrowano, po raz pierwszy na świecie, że mody wyższych rzędów propagujące się w światłowodzie fotonicznym (zawierające niezaabsorbowane promieniowanie pompujące), poprzez sprzężenia z modem podstawowym, mogą powodować zmniejszenie szumu amplitudowego oraz fluktuacji fazowych generowanego superkontinuum. Zjawisko w sposób teoretyczny wyjaśnił dr hab. inż. Mariusz Klimczak, natomiast weryfikacji eksperymentalnej dokonał habilitant. Wyniki tych badań opublikowano w pracy [H13]:

[H13] M. Klimczak^(40%), **G. Sobon**^(40%), K. Abramski^(10%), R. Buczyński^(10%), “Spectral coherence in all-normal dispersion supercontinuum in presence of Raman scattering and direct seeding from sub-picosecond pump”, *Optics Express* 22, 31635-31645 (2014), **IF₂₀₁₄ = 3,488**.

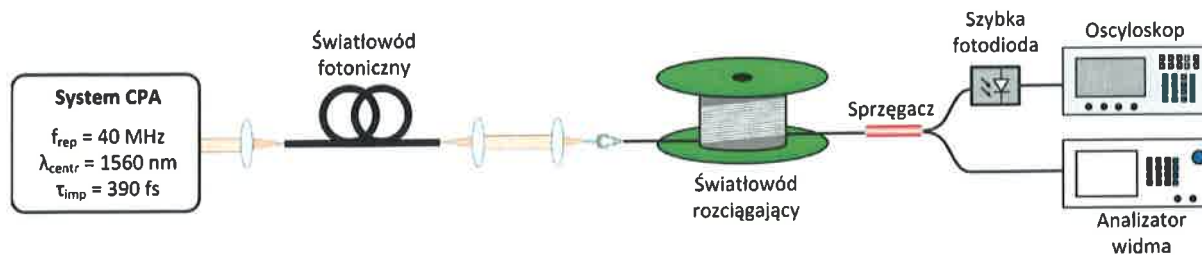
W eksperymencie wykorzystano całoszklany światłowód fotoniczny wytworzony w ITME. Światłowód pompowano opracowanym przez habilitanta laserem w konfiguracji CPA, dostarczającym impulsy o czasie trwania 390 fs, częstotliwości repetycji 40 MHz i mocy średniej 1 W, o długości fali 1560 nm. Na potrzeby weryfikacji stabilności amplitudowej zestawiono układ dyspersyjnej transformaty Fouriera, pozwalający na obserwację pojedynczych impulsów na oscyloskopie. Schemat zestawionego układu zilustrowano na **Rys. 7**.

³⁴ S. Kim, et al., “Coherent supercontinuum generation using Er-doped fiber laser of hybrid mode-locking”, *Opt. Lett.* 39, 2986-2989 (2014).

³⁵ K. Goda, B. Jalali, “Dispersive Fourier transformation for fast continuous single-shot measurements”, *Nature Photonics* 7, 102-112 (2013)

³⁶ A. Ruehl, et al., “Ultrabroadband coherent supercontinuum frequency comb”, *Phys. Rev. A* 84, 011806(R) (2011).

³⁷ X. Gu, et al., “Experimental studies of the coherence of microstructure-fiber supercontinuum”, *Opt. Express* 11, 2697-2703 (2003)



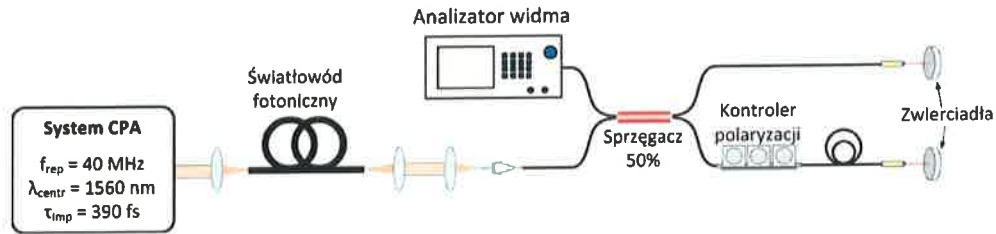
Rys. 7. Schemat układu do pomiaru dyspersyjnej transformaty Fouriera.

Superkontinuum wygenerowane w światłowodzie fotonicznym jest wprowadzane poprzez układ optyczny do ośrodka dyspersyjnego – w tym przypadku jest to długi odcinek (10 km) włókna jednomodowego (zgodnego ze standardem G.655). W światłowodzie tym, ze względu na dużą dyspersję chromatyczną, komponenty spektralne superkontinuum będą poruszały się z różnymi prędkościami, co spowoduje znaczące wydłużenie się impulsu. Jeżeli dobrana dyspersja będzie wystarczająco duża, impuls wydłuży się tak, że będzie możliwa jego obserwacja na oscyloskopie. Kształt czasowy impulsu dokładnie odzwierciedla jego widmo optyczne – umożliwia to obserwację widma optycznego pojedynczych impulsów superkontinuum w czasie rzeczywistym, w odróżnieniu od widma mierzonego przez analizator. Ponadto, metoda umożliwia przeprowadzenie statystycznej analizy fluktuacji amplitudy (np. zapis setek bądź tysięcy pojedynczych widm następujących po sobie impulsów). Do obserwacji impulsów w eksperymencie użyto szybkiej fotodiody InGaAs o paśmie 16 GHz oraz szybkiego oscyloskopu o paśmie 13 GHz. Przeprowadzony pomiar wykazał, że generowane superkontinuum cechuje się wysokim współczynnikiem koherencji (bliskim jedności w niemal całym generowanym paśmie) oraz niskim poziomem fluktuacji amplitudy pomiędzy następującymi po sobie impulsami. Eksperymentalnie potwierdzono, iż możliwa jest generacja szerokopasmowego, koherentnego i stabilnego superkontinuum przy pobudzeniu impulsami sub-pikosekundowymi.

W kolejnej pracy cyklu [H14]:

[H14] M. Klimczak^(40%), **G. Sobon**^(40%), R. Kasztelanic^(5%), K. Abramski^(5%), R. Buczyński^(10%),
 “Direct comparison of shot-to-shot noise performance of all normal dispersion and anomalous dispersion supercontinuum pumped with sub-picosecond pulse fiber-based laser”, Scientific Reports 6, 19284 (2016), IF₂₀₁₅ = 5,228

zapropnowałem oryginalny eksperyment polegający na bezpośrednim porównaniu koherencji oraz fluktuacji amplitudowych superkontinuum generowanego w dyspersji normalnej oraz anomalnej, w jednakowych warunkach generacji (ten sam laser pompujący i metody detekcji). Eksperyment taki jednoznacznie i niepodważalnie ilustruje różnicę w stabilności i koherencji obu typów superkontinuum. W badaniach wykorzystano te same światłowody, których użyto w pracach [H12] (dyspersja anomalna) i [H13] (dyspersja normalna). Oprócz układu do pomiaru dyspersyjnej transformaty Fouriera, w celu weryfikacji koherencji, zestawiono również układ rozbalansowanego interferometru Michelsona, służący do pomiaru spójności fazowej między dwoma kolejnymi impulsami superkontinuum. Układ zilustrowano na Rys. 8. Jest to światłowodowy interferometr Michelsona, w którym jedno z ramion jest wydłużone w taki sposób, by zaobserwować interferencję między dwoma kolejnymi impulsami ciągu (wprowadzona różnica dróg optycznych wynika z częstotliwości powtarzania impulsów).

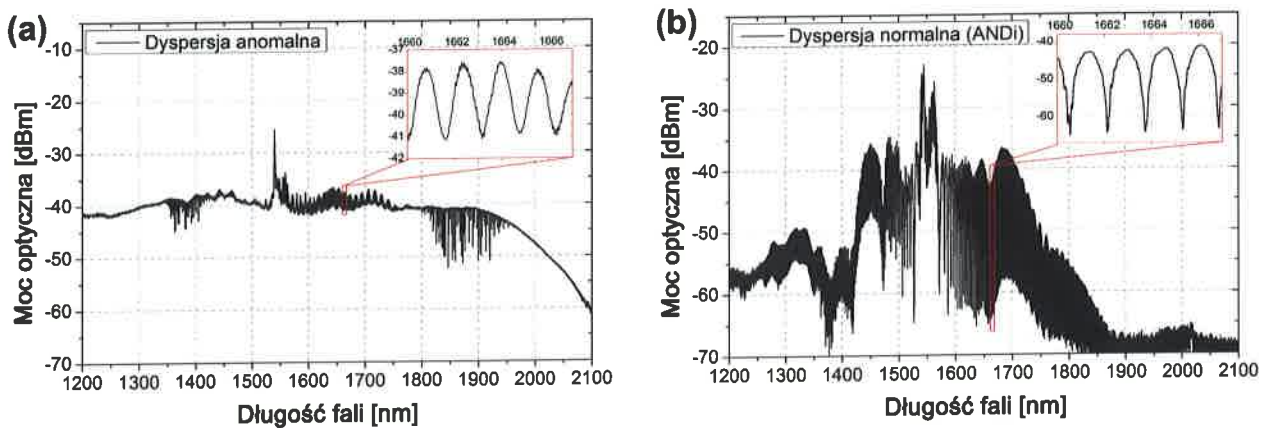


Rys. 8. Schemat układu interferometru Michelsona do pomiaru spójności fazowej superkontinuum.

Interferencję można zaobserwować tylko wtedy, gdy zachowana jest spójność fazowa między dwoma kolejnymi impulsami. Miarą koherencji jest współczynnik widzialności prążków (ang. *fringe visibility*), który jest proporcjonalny do głębokości modulacji prążków interferencyjnych obserwowanych na analizatorze widma optycznego. Funkcja widzialności prążków definiowana jest jako:

$$V(\lambda) = \frac{I_{\max}(\lambda) - I_{\min}(\lambda)}{I_{\max}(\lambda) + I_{\min}(\lambda)}, \quad (3)$$

gdzie I_{\max} oraz I_{\min} są odpowiednio maksymalnymi i minimalnymi natężeniami w sygnale interferencyjnym³⁸. Przyjmuje ona wartości od 0 do 1. Przyjmuje się, że współczynnik $V(\lambda)$ większy od 0,7 świadczy o wysokiej spójności fazowej superkontinuum³⁹. Przykładowe uzyskane interferogramy spektralne dla obu rodzajów superkontinuum przedstawiono na Rys. 9. Obserwowalny jest wyraźnie mniejszy kontrast prążków dla superkontinuum generowanego w dyspersji anomalnej (Rys. 9a), z maksymalnym współczynnikiem $V(\lambda)$ na poziomie 0,35. Natomiast w dyspersji normalnej (Rys. 9b) widzialność osiąga 0,99 w bardzo szerokim zakresie (1600-1700 nm), a w niemal całym generowanym spektrum jest większe niż 0,8, co świadczy o bardzo wysokiej koherencji promieniowania.



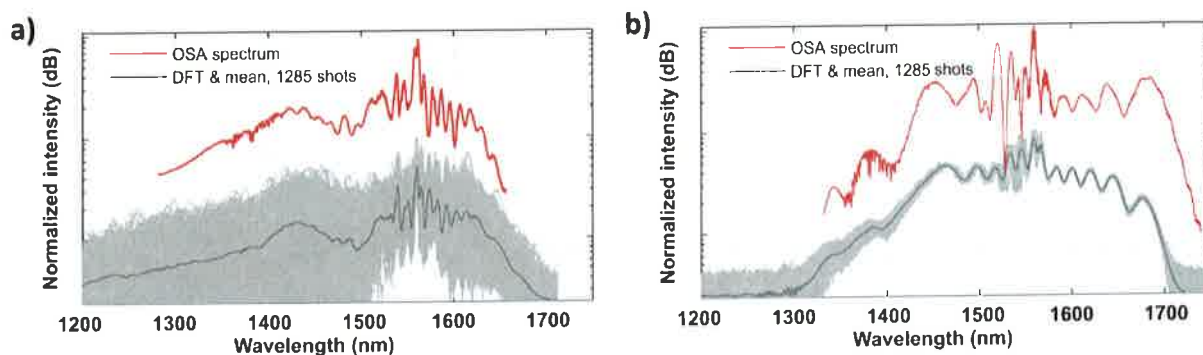
Rys. 9. Porównanie zmierzonych interferogramów spektralnych dla superkontinuum generowanego w dyspersji anomalnej (a) oraz całkowicie normalnej (b).

Diametralne różnice w stabilności są również widoczne w obrazach uzyskanych w pomiarze dyspersyjnej transformaty Fouriera. Na Rys. 10 przedstawiono wynik nałożenia na siebie widm 1285 impulsów z ciągu superkontinuum (wraz z ich wartością średnią) oraz widmo zmierzone przy

³⁸ A. R. Johnson, et al., "Octave-spanning coherent supercontinuum generation in a silicon nitride waveguide", *Opt. Lett.* **40**, 5117-5120 (2015).

³⁹ F. Lu, W.H. Knox, "Generation of a broadband continuum with high spectral coherence in tapered single-mode optical fibers", *Opt. Express* **12**, 347-353 (2004).

użyciu analizatora optycznego (linia czerwona). W przypadku superkontinuum w dyspersji anomalnej wyraźnie widoczne są ogromne różnice kształtu spektrum pomiędzy kolejnymi impulsami (szum *shot-to-shot noise*). W praktyce okazuje się niemal niemożliwe znalezienie dwóch identycznych widm w ciągu. Natomiast superkontinuum generowane w dyspersji normalnej cechuje się bardzo dużą stabilnością i niewielkimi fluktuacjami amplitudy przez cały okres pomiaru.



Rys. 10. Porównanie zmierzonych dyspersyjnych transformatów Fouriera dla superkontinuum generowanego w dyspersji normalnej (a) oraz anomalnej (b). Szara linia reprezentuje nałożone widma 1285 kolejnych impulsów. Czerwoną linią przedstawiono spektrum zarejestrowane przez analizator widma optycznego.

Nieliniowe światłowody fotoniczne mogą zostać wykorzystane nie tylko do generacji szerokopasmowego superkontinuum w średniej podczerwieni, ale również do inicjowania innych ciekawych zjawisk, takich jak generacja przestrajalnych solitonów optycznych (efekt w literaturze nazywany *soliton self-frequency shift*, SSFS)⁴⁰. Jest to zjawisko będące konsekwencją rozpraszania Ramana i powoduje ono rozbitcie impulsu wejściowego na dwa (lub więcej), przy czym nowopowstałe impulsy mają przesuniętą długość fali w stosunku do długości fali pompy. Aby efekt ten wystąpił, użyty światłowod musi posiadać dyspersję anomalną, a zero dyspersji powinno być przesunięte w kierunku krótkofalowym w stosunku do długości fali pompy. Środkowa długość fali generowanego solitonu zależy przede wszystkim od mocy wprowadzonej do światłowodu. Zjawisko to zostało zaobserwowane w telekomunikacyjnych światłowodach jednomodowych przez Mitschkego i Mollenauera w 1986 r. i nazwane przez nich efektem samoprzesunięcia częstotliwości solitonu (SSFS)⁴¹. Należy również pokreślić, iż generowany soliton wykazuje koherencję³⁶, niemniej jednak impulsy generowane w procesie SSFS mogą utracić spójność fazową przy dużych mocach pompujących (tj. przy bardzo dużych przesunięciach długości fali)⁴². Badaniem koherencji solitonów generowanych w światłowodach nieliniowych habilitant zajmował się w pracy [H17] omówionej w dalszej części autoreferatu.

Wykorzystanie efektu SSFS otwiera możliwości generacji ultrakrótkich impulsów w zupełnie nowych zakresach spektralnych, niedostępnych dla laserów światłowodowych i ciała stałego, ze względu na ograniczone pasmo istniejących ośrodków wzmacniających (takich jak iterb, erb, tul, holm). Dotychczas zademonstrowano przestrajanie solitonów nawet do 4,3 μm w światłowodach fluorkowych, pompowanych na długości fali 1,9 μm . Pewne długości fali, nieosiągalne dla tradycyjnych ośrodków wzmacniających, mogą być bardzo pożądane w wielu aplikacjach.

⁴⁰ J. H. Lee, J. van Howe, C. Xu, C. Liu, "Soliton Self-Frequency Shift: Experimental Demonstrations and Applications", IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 713-723 (2008)

⁴¹ F. M. Mitschke, L. F. Mollenauer, "Discovery of the soliton self-frequency shift", Opt. Lett. 11, 659-661 (1986)

⁴² T. W. Neely, T. A. Johnson, S. A. Diddams, "High-power broadband laser source tunable from 3.0 μm to 4.4 μm based on a femtosecond Yb:fiber oscillator", Opt. Lett. 36, 4020-4022 (2011)

Najnowsze badania wykazały, iż impulsy o długości fali 1,7 μm (będące poza pasmem wzmocnienia ośrodków domieszkowanych erbem) mogą być pomocne w diagnostyce medycznej (obrazowanie tkanek)⁴³.

W pracy [H15] cyklu:

[H15] **G. Soboń**^(65%), T. Martynkien^(10%), K. Tarnowski^(5%), P. Mergo^(10%), J. Sotor^(10%),
“Generation of sub-100 fs pulses tunable from 1700 to 2100 nm from a compact frequency-shifted Er-fiber laser”, *Photonics Research* 5, 151-155 (2017), **IF₂₀₁₅ = 3,179**

zaproponowałem wykorzystanie efektu SSFS do opracowania kompaktowego, całkowicie światłowodowego źródła impulsów femtosekundowych w średniej podczerwieni. W eksperymencie, pompując światłowód nieliniowy impulsami o długości fali 1560 nm, uzyskano na wyjściu ultrakrótkie impulsy płynnie przestrajalne w zakresie 1650 – 2100 nm. Do generacji solitonów wykorzystano krzemionkowy światłowód fotoniczny wytworzony na UMCS w Lublinie. Długość fali generowanego solitonu jest płynnie przestrajalna poprzez regulację mocy wprowadzonej do światłowodu. Impulsy generowane w procesie SSFS mają czas trwania bliski limitowi Fourierowskiemu⁴⁰, stąd też nie jest możliwa ich dalsza kompresja. Dlatego też, aby dodatkowo skrócić czas trwania wygenerowanego impulsu w średniej podczerwieni, do toru optycznego dodano odcinek światłowodu o dyspersji normalnej (typu DCF-2000), ale o relatywnie małej średnicy rdzenia. Duża nieliniowość wprowadzona przez odcinek włókna DCF pozwoliła na dodatkowe poszerzenie widma, a jego dyspersja (przy właściwie dobranej długości) umożliwiła dodatkowe, ponad dwukrotne skrócenie czasu trwania impulsu. W efekcie zademonstrowano możliwość generacji impulsów o czasie trwania krótszym niż 100 fs w niemal całym dostępnym zakresie przestrajania od 1700 do 2100 nm. Generowana moc średnia osiągała 20 mW na długości fali 2100 nm.

Należy podkreślić, iż opracowany układ jest całkowicie światłowodowy: nie posiada elementów ruchomych ani optyki objętościowej, a co za tym idzie – nie wymaga justowania. Do osiągnięcia postawionego celu kluczowe było również opanowanie techniki spawania włókna fotonicznego ze standardowymi światłowodami jednomodowymi typu PM oraz ze światłowodem DCF-2000.

4.2.3. Generacja częstotliwości różnicowej w kryształach nieliniowych

Prace [H16, H17] cyklu dotyczą badań nad innym podejściem do generacji impulsowego, szerokopasmowego promieniowania optycznego w średniej podczerwieni, mianowicie z wykorzystaniem efektów nieliniowych zachodzących w kryształach. Do najbardziej powszechnych metod zaliczyć można: generację częstotliwości różnicowej DFG oraz generację z oscylatorów parametrycznych OPO. W obu przypadkach wykorzystuje się trzeciorzędową nieliniowość kryształu optycznego do konwersji promieniowania z bliskiej podczerwieni w zakres średniej podczerwieni. Intensywny rozwój źródeł wykorzystujących oba procesy jest motywowany

⁴³ K. Wang, et al, “Order-of-magnitude multiphoton signal enhancement based on characterization of absorption spectra of immersion oils at the 1700-nm window”, *Opt. Express* 25, 5909-5916 (2017).

ich zastosowaniem w spektroskopii laserowej, w ultraczułych technikach detekcji śladowych ilości gazów wykorzystujących szerokopasmowe grzebień częstotliwości.

Dotychczas uważano, iż niska sprawność procesu DFG uniemożliwia uzyskanie dużych mocy wyjściowych, co jest czynnikiem kluczowym dla uzyskania wysokiej czułości układów do detekcji gazów. Zdecydowanie wyższe moce osiągnęto z układów OPO. Jednakże, układy OPO są zdecydowanie bardziej złożone, gdyż wymagają rezonatora optycznego, związanego pętlą synchronizacji z rezonatorem lasera pompującego. Aby zainicjować i utrzymać generację, długość wnęki OPO musi być idealnie dopasowana do długości lasera pompującego. Stąd też wymóg jej aktywnej stabilizacji. Idea DFG jest zdecydowanie prostsza, gdyż nie wymaga rezonatora. Proces DFG z definicji wymaga dwóch wiązek wejściowych (tzw. pompującej – o krótszej długości fali, oraz sygnałowej – o większej długości fali), a w wyniku ich interakcji powstaje trzecia (tzw. *idler*).

W wielu demonstracjach układów DFG wykorzystywano dwa osobne źródła laserowe (ciągłe lub impulsowe)⁴⁴. W kolejnej pracy cyklu [H16] zaproponowano zupełnie nowe podejście do generacji częstotliwości różnicowej, polegające na wykorzystaniu dwóch osobnych źródeł, lecz ze wspólnym wzmacniaczem:

[H16] K. Krzempek^(45%), **G. Sobon**^(45%), J. Sotor^(5%), K. M. Abramski^(5%), “A dual-wavelength amplifier that enables the simultaneous chirped-pulse amplification of femtosecond 1562 nm pulses and continuous wave 1064 nm radiation for applications in difference frequency generation”, *Laser Physics Letters* 13, 105107 (2016), **IF₂₀₁₅ = 2,391**.

Wykorzystano fakt, iż światłowód domieszkowany jonami erbu i iterbu jest w stanie jednocześnie wzmacniać promieniowanie z dwóch zakresów spektralnych: pasma wzmocnienia erbu (~1560 nm) oraz iterbu (~1060 nm). Koncepcja wykorzystania włókna erbowo-iterbowego do wzmacniania dwóch długości fali (w trybie pracy ciągłej) została zaproponowana przez habilitanta jeszcze w jego pracy doktorskiej. Naturalną konsekwencją było wykorzystanie tego efektu również gdy jeden z sygnałów jest impulsowy. Układ tego typu stanowi znakomite źródło dla procesu DFG.

W eksperymencie jako źródło sygnału wykorzystano erbowy laser femtosekundowy z nasycalnym absorberem na bazie nanorurek węglowych, następnie wzmocniony w układzie typu CPA. Do wzmacniacza wprowadzono dodatkowo wiązkę ciągłą z lasera półprzewodnikowego o długości fali 1064 nm. Na wyjściu wzmacniacza uzyskano około 590 mW mocy średniej promieniowania sygnałowego (długość fali 1562 nm, czas trwania impulsu 560 fs, częstotliwość repetycji 84 MHz) oraz ok. 620 mW promieniowania pompującego. Obie wiązki wprowadzono do kryształu PPLN o okresie 30,49 μm . W wyniku procesu generacji różnicowej uzyskano generację promieniowania o długości fali 3341 nm, szerokości pasma ok. 10 nm i mocy 40 μW . Pasma promieniowania w średniej podczerwieni w procesie DFG zależy bezpośrednio od długości zastosowanego kryształu. Im dłuższy kryształ, tym przenoszone pasmo jest węższe, jednakże uzyskuje się wyższą sprawność (ze względu na dłuższą drogę interakcji). Ponieważ w eksperymencie zastosowano relatywnie długi kryształ (40 mm), a wiązka pompująca była wiązką ciągłą, uzyskana sprawność konwersji była dość niska. Sprawności wyższe o kilka rzędów wielkości mogą zostać uzyskane z układów DFG, w których obie wiązki inicjujące są impulsowe, mające charakter impulsów ultrakrótkich, dodatkowo idealnie zsynchronizowanych w czasie.

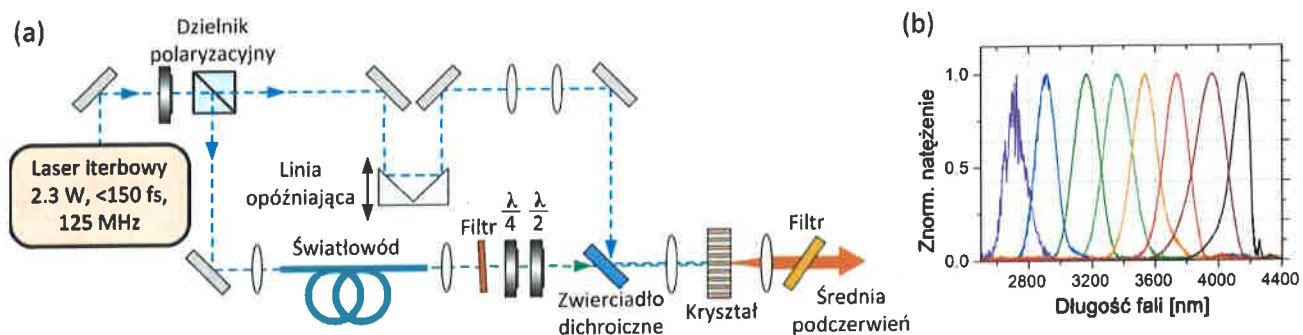
⁴⁴ P. Maddaloni, P. Malara, G. Gagliardi, P. De Natale, “Mid-infrared fibre-based optical comb”, *New J. Phys.* **8**, 262 (2006).

Badania nad generacją promieniowania w średniej podczerwieni w procesie DFG z użyciem dwóch wiązek impulsowych zrealizowałem podczas pobytu na uniwersytecie w Umeå. Rezultaty opublikowano w pracy [H17]:

[H17] **G. Sobon**^(70%), T. Martynkien^(5%), P. Mergo^(5%), L. Rutkowski^(5%), A. Foltynowicz^(15%), “High-power frequency comb source tunable from 2.7 to 4.2 μm based on difference frequency generation pumped by an Yb-doped fiber laser”, *Optics Letters* 42, 1748-1751 (2017), **IF₂₀₁₅ = 3,040**.

Głównym celem podjętych badań było opracowanie szerokopasmowego, przestrajalnego optycznego grzebienia częstotliwości o dużej mocy wyjściowej, do zastosowań w spektroskopii laserowej. W odróżnieniu od pracy [H16], w eksperymencie obie wiązki wejściowe miały charakter impulsowy, dzięki czemu spodziewano się uzyskania zdecydowanie wyższych sprawności generacji w procesie DFG.

Opracowany układ generatora grzebienia optycznego w średniej podczerwieni zaprezentowano na **Rys. 11a**. Źródłem pompującym jest światłowodowy laser iterbowy, generujący impulsy o czasie trwania poniżej 150 fs, częstotliwości powtarzania 125 MHz i maksymalnej mocy średniej 2,3 W. Wiązka lasera dzielona jest na dwie części. Pierwsza część wykorzystana jest jako pompa dla światłowodu fotonicznego, gdzie w wyniku procesu SSFS generowane są solitony o długościach fali z zakresu ok. 1350 – 1675 nm. Promieniowanie to, stanowiące sygnał dla procesu DFG, jest następnie łączone za pomocą zwierciadła dichroicznego z wiązką referencyjną. Obie wiązki są kolinearnie wprowadzone do kryształu PPLN o długości 3 mm i dziewięciu dostępnych okresach (od 27,91 do 31 μm). W zależności od długości fali sygnału, promieniowanie różnicowe może być przestrajane od 2700 do 4200 nm. Od strony krótkofalowej zakres jest ograniczony przez możliwości przestrajania solitonu w światłowodzie, natomiast od strony długofalowej ograniczeniem jest okno transmisyjne użytego kryształu (najkrótszy dostępny okres spolaryzowania, tj. 27,91 μm zapewnia dopasowanie fazowe do 4200 nm). Przykładowe, możliwe do uzyskania widma przedstawione na **Rys. 11b** ilustrują możliwości przestrajania opracowanego układu.



Rys. 11. Schemat układu do generacji optycznego grzebienia częstotliwości w średniej podczerwieni (a), ilustracja możliwości przestrajania generowanych impulsów w zakresie 2,7 – 4,2 μm (b).

W całym dostępnym zakresie przestrajania osiągnięto moc średnią wyższą niż 160 mW oraz czas trwania impulsu krótszy niż 200 fs. Najwyższą moc średnią równą 237 mW osiągnięto na środkowej długości fali ok. 3370 nm, natomiast najkrótszy impuls o czasie trwania 115 fs zmierzono na długości fali 3500 nm. Przeprowadzono również badania mające na celu zweryfikowanie koherencji opracowanego źródła. Zdecydowano się skorzystać z dwóch metod:

interferencji spektralnej oraz zdudnienia z laserem pracy ciągłej. Ponieważ sam proces generacji częstotliwości różnicowej nie degraduje koherencji⁴⁵, wystarczające jest potwierdzenie koherencji sygnału. Wcześniejsze prace sygnalizowały, iż proces Ramanowskiego przesuwania solitonu jest koherentny, jednakże, obserwowano degradację koherencji dla bardzo dużych przesunięć⁴². Eksperyment przeprowadzony przez habilitanta (z wykorzystaniem rozbalansowanego interferometru Michelsona, analogiczny do zilustrowanego na **Rys. 8**) wykazał, iż generowane solitony zachowują wysoką koherencję w całym zakresie przestrajania od 1375 do 1675 nm. Dodatkowo, koherencja promieniowania w średniej podczerwieni została zweryfikowana bezpośrednio, poprzez obserwację zdudnienia z laserem pracy ciągłej. W eksperymencie weryfikującym koherencję wygenerowano promieniowanie na długości fali około 3150 nm, następnie podwojono jego częstotliwość (generując drugą harmoniczną w osobnym kryształ PPLN) i zdudniono z wysokiej klasy stabilizowanym laserem wąskopasmowym o długości fali 1577 nm. Zaobserwowana na analizatorze częstotliwości radiowych szerokość zdudnienia (wynosząca ok. 400 kHz) była ponad 10-krotnie węższa niż w przypadku DFG demonstrowanego przez grupę badawczą z Monachium⁴⁶, co świadczy o wysokiej koherencji oraz małych fluktuacjach częstotliwości repetycji użytego lasera iterbowego (który nie był stabilizowany aktywnie do żadnego wzorca częstotliwości).

Warto podkreślić, iż w zademonstrowanym eksperymencie DFG:

- uzyskano najwyższą do tej pory moc średnią na świecie osiąganą z tego typu układów (wykorzystujących kryształ PPLN),
- uzyskano najszerszy dotychczas zakres przestrajania (2700 – 4200 nm) spośród źródeł wykorzystujących kryształ PPLN,
- w porównaniu z poprzednimi demonstracjami, uzyskano o 60% wyższą moc w przeliczeniu na 1 nm pasma, a także dwukrotnie wyższą moc w przeliczeniu na pojedynczy ząb grzebienia,
- w odróżnieniu do demonstrowanych wcześniej układów DFG, potwierdzono wysoką koherencję w całym zakresie przestrajania,

Opracowane źródło DFG jest obecnie wykorzystywane w badaniach nad opracowaniem techniki detekcji węglowodorów z wykorzystaniem tzw. skanującej wnęki Verniera⁴⁷. Dzięki wysokiej mocy, przewyższającej nawet moc osiąganą z układów OPO, spodziewane jest znaczące podwyższenie czułości i poprawienie limitów detekcyjności np. metanu. Ponadto, zdecydowanie prostsza konstrukcja źródła DFG w porównaniu do OPO (brak konieczności stabilizacji długości rezonatora) otwiera możliwości zastosowania tej techniki w aplikacjach poza laboratorium (w warunkach rzeczywistych).

Praca [H17] została wybrana przez edytorów czasopisma *Optics Letters* jako tzw. „**Editor’s Pick**”, wyróżnienie przyznawane wybranym artykułom (maksymalnie trzem w danym wydaniu czasopisma) za ich wysoki poziom naukowy i szczególną wartość dla dyscypliny.

⁴⁵ M. Zimmermann, C. Gohle, R. Holzwarth, T. Udem, T. W. Hänsch, “Optical clockwork with an offset-free difference-frequency comb: accuracy of sum- and difference-frequency generation”, *Opt. Lett.* **29**, 310-312 (2004).

⁴⁶ F. Zhu, H. Hundertmark, A. A. Kolomenskii, J. Strohaber, R. Holzwarth, H. A. Schuessler, “High-power mid-infrared frequency comb source based on a femtosecond Er:fiber oscillator”, *Opt. Lett.* **38**, 2360-2362 (2013).

⁴⁷ A. Khodabakhsh, L. Rutkowski, J. Morville, A. Foltynowicz, “Mid-infrared continuous-filtering Vernier spectroscopy using a doubly resonant optical parametric oscillator”, arXiv:1702.00396 (2017).

4.3. Podsumowanie

Omówiony cykl publikacji dotyczy prac badawczych habilitanta nad światłowodowymi źródłami promieniowania w zakresie średniej podczerwieni. W ocenie habilitanta, opublikowane prace stanowią istotny wkład w reprezentowaną dyscyplinę i pozwoliły na poszerzenie istniejącego stanu wiedzy. O dużym wpływie prowadzonych badań na dyscyplinę świadczy fakt publikowania w renomowanych czasopismach z Listy Filadelfijskiej, jak i wysoka cytowalność prac, mimo relatywnie niedługiego czasu od momentu ich opublikowania.

Realizacja wszystkich zaprezentowanych celów badawczych wymagała zaangażowania i koordynacji prac naukowców z wielu grup badawczych, o szerokich kompetencjach z różnych dziedzin nauki – m.in. chemii, fizyki oraz inżynierii materiałowej. Połączenie to umożliwiło opracowanie nowych typów laserów, jak również poszerzenie istniejącego stanu wiedzy w zakresie generacji ultrakrótkich impulsów w średniej podczerwieni.

Do najważniejszych osiągnięć badawczych i konstrukcyjnych w obrębie tematyki objętej cyklem omówionych publikacji habilitant zalicza:

- zainicjowanie badań nad femtosekundowymi laserami tulowymi, w tym: zastosowanie grafenu epitaksjalnego w laserach tulowych i demonstracja pierwszego na świecie lasera tulowego z nasycalnym absorberem na bazie kompozytu grafen/PMMA [H1], następnie pierwsza na świecie demonstracja lasera tulowego wykorzystującego grafen, zrealizowanego całkowicie w technologii PM [H2],
- uzyskanie generacji impulsów femtosekundowych z lasera tulowego wykorzystującego czarny fosfor [H3] (pierwszy tego typu laser na świecie),
- uzyskanie rekordowo wysokiej energii impulsu w całkowicie światłowodowym układzie CPA przy zachowaniu ultrakrótkiego czasu trwania impulsu (260 fs) [H4],
- przeprowadzenie badań nad wpływem parametrów nasycalnych absorberów (grafenu i nanorurek węglowych) na generację impulsów w laserze tulowym [H5,H6],
- demonstracja generacji najszerzszych spektralnie do tej pory na świecie solitonów dysypujących z lasera domieszkowanego talem [H7], jak również pierwsza na świecie demonstracja wzmacniania impulsów szumopodobnych we wzmacniaczu tulowym [H8],
- uzyskanie generacji w reżimie dyspersji zbalansowanej w laserze tulowym wykorzystującym grafen [H9]. Dotychczas ten tryb pracy lasera nie był obserwowany, ze względu na zbyt małą głębokość modulacji i niski próg zniszczenia typowych absorberów grafenowych. Osiągnięcie to było możliwe dzięki opracowaniu powtarzalnej technologii wielowarstwowych kompozytów grafen/PMMA we współpracy z ITME,
- generację koherentnego superkontinuum w zakresie średniej podczerwieni pompowanego relatywnie długimi (sub-pikosekundowymi) impulsami, co do tej pory było uznawane za niemożliwe [H13,H14], jak również bezpośrednie porównanie koherencji i parametrów szumowych dwóch rodzajów superkontinuum (generowanego w dyspersji normalnej oraz anomalnej). Osiągnięcie to wymagało zrealizowania szeregu eksperymentów z wykorzystaniem nowych technik pomiarowych (np. dyspersyjna transformacja Fouriera),
- opracowanie i demonstrację układu do generacji przestrajalnych impulsów (solitonów Ramanowskich) w zakresie 1700-2100 nm, wykorzystującego minimalną liczbę komponentów (trzy sprzęgacze światłowodowe i trzy lasery pompujące) [H15]. Jest to zdecydowanie najbardziej kompaktowy układ kiedykolwiek zademonstrowany na świecie, generujący impulsy o czasie trwania poniżej 100 fs w tak szerokim zakresie strojenia,

- opracowanie układu DFG generującego koherentne, femtosekundowe promieniowanie w średniej podczerwieni o najwyższej mocy uzyskanej dotychczas na świecie w tym zakresie spektralnym, jak również uzyskanie najszerszego zakresu przestrajania z układu DFG opartego na kryształach PPLN [H17].

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych

5.1. Działalność naukowa przed uzyskaniem stopnia doktora

Swoją działalność naukową rozpocząłem w 2009 roku, jako student 4. roku na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej. Badania prowadzone pod kierunkiem dra inż. Pawła Kaczmarka dotyczyły tematyki światłowodowych wzmacniaczy dużej mocy, pracujących w paśmie tzw. III okna telekomunikacyjnego. Jeszcze w trakcie realizacji pracy magisterskiej zostałem zatrudniony na Politechnice Wrocławskiej (na stanowisku referenta inżynierijno-technicznego), do realizacji projektu badawczo-rozwojowego „Wzmacniacze światłowodowe mocy do zastosowań w konfiguracji MOPA (*Master Oscillator Power Amplifier*)”, kierowanego przez dra Pawła Kaczmarka. W ramach zadań opracowywałem różne konstrukcje wzmacniaczy światłowodowych, zarówno pracy ciągłej jak i impulsowej. Przeprowadziłem szereg badań wstępnych, które przyczyniły się do powstania finalnego prototypu urządzenia, jak również brałem udział w projektowaniu prototypu wzmacniacza w konfiguracji MOPA o mocy wyjściowej 3 W. W prace badawcze w ramach tego projektu byłem zaangażowany aż do jego zakończenia, tj. do 30.05.2011.

Po uzyskaniu tytułu magistra inżyniera kontynuowałem pracę naukową w ramach pracy doktorskiej, którą realizowałem pod opieką prof. Krzysztofa Abramskiego na Politechnice Wrocławskiej. Praca obejmowała tematykę generacji i wzmacniania krótkich impulsów laserowych w zakresie tzw. III okna telekomunikacyjnego (zarówno nano- jak i femtosekundowych) we wzmacniaczach światłowodowych, w tym również w konfiguracji CPA. Do najważniejszych, oryginalnych rezultatów osiągniętych w trakcie doktoratu należy zaliczyć:

- opracowanie metody kompensacji zniekształcenia impulsów w wielostopniowych wzmacniaczach światłowodowych poprzez odpowiednie kształtowanie impulsów wejściowych, w tym: uzupełnienie istniejącego modelu teoretycznego (z lat 60-tych XX wieku) o poprawkę uwzględniającą zniekształcenie impulsu w kilku stopniach wzmacniających o różnych natężeniach nasycenia, budowę układu do bezpośredniej modulacji prądowej lasera półprzewodnikowego, opracowanie aplikacji LabVIEW do sterowania generatorem arbitralnym, a także eksperymentalną weryfikację założeń teoretycznych,
- opracowanie oryginalnej metody kontroli szumu emisji spontanicznej jonów iterbu (tzw. szum Yb-ASE) we wzmacniaczach światłowodowych domieszkowanych jonami $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$, polegającej na wymuszeniu jednokierunkowej akcji laserowej w pierścieniowym rezonatorze dla sygnału z pasma 1 μm . Rozwinięciem tego rozwiązania jest również opracowanie metody wykorzystania szumu Yb-ASE do zwiększenia sprawności wzmacniaczy erbowo-iterbowych, jak również opracowanie dwuczęstotliwościowych źródeł promieniowania (1,06 + 1,55 μm), wykorzystanych następnie w eksperymentach generacji średniej podczerwieni,
- demonstrację szeregu laserów femtosekundowych wykorzystujących grafen jako nasycalny absorber, z których zdecydowana większość stanowiła osiągnięcia unikatowe, pionierskie

- w skali świata – np. pierwsza demonstracja generacji solitonów skalarnych (spolaryzowanych liniowo), demonstracja harmonicznej synchronizacji modów, i wiele innych,
- demonstrację pasywnej harmonicznej synchronizacji modów w laserze z nieliniową rotacją polaryzacji, opartym na włóknie *double-clad*, na częstotliwości repetycji będącą 634. harmoniczną podstawowego odstępów międzymodowego (10,0204 GHz), będącą najwyższą częstotliwością repetycji kiedykolwiek zarejestrowaną w laserze femtosekundowym (wyższa częstotliwość została osiągnięta dopiero trzy lata później przez zespół z Francji),
 - projekt i budowę kompletnego układu CPA składającego się z femtosekundowego lasera sygnałowego na bazie grafenu, dyspersyjnego układu rozciągającego impulsy, dwustopniowego wzmacniacza światłowodowego oraz kompresora. Była to pierwsza demonstracja układu CPA z laserem wykorzystującym grafen. Publikacja została wyróżniona znakiem IOP Select dla najlepszych artykułów opublikowanych w tej dziedzinie w czasopiśmie wydawnictwa, za znaczący wkład w rozwój dyscypliny.

W rezultacie trwających niespełna 3 lat badań nad pracą doktorską opublikowano łącznie 18 prac w czasopiśmie naukowych z listy JCR.

W trakcie realizacji doktoratu byłem laureatem licznych nagród i wyróżnień wynikających z prowadzenia pracy naukowej (m.in. stypendium START FNP, stypendium Ministra Nauki dla doktorantów). Pracę doktorską obroniłem z wyróżnieniem w dniu 9. lipca 2013 r. (data publicznej obrony, data uchwały Rady Wydziału: 15.07.2013 r.). Praca została nagrodzona Nagrodą Prezesa Rady Ministrów oraz Nagrodą ABB.

5.2. Działalność naukowa po uzyskaniu stopnia doktora

Po uzyskaniu stopnia doktora kontynuowałem pracę naukową na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej. Tuż po złożeniu pracy doktorskiej w lutym 2013 roku zapoczątkowałem nowy wątek badawczy dotyczący generacji impulsów ultrakrótkich pracujących w zakresie średniej podczerwieni, który następnie ewoluował w kierunku innych metod generacji promieniowania MIR (superkontinuum, generacja częstotliwości różnicowej, etc.). Oprócz tego wątku badawczego, którego efektem są prace naukowe stanowiące podstawę wniosku o nadanie stopnia doktora habilitowanego, zajmowałem się również dwoma innymi tematami badawczymi:

- 1) laserami światłowodowymi generującymi impulsy ultrakrótkie w zakresie spektralnym 1,56 μm (lasery erbowe), w tym wykorzystaniem nowych nanomateriałów niskowymiarowych jako nasycalny absorber,
- 2) opracowywaniem światłowodowych wzmacniaczy impulsów femtosekundowych oraz wzmacniaczy pracy ciągłej dużej mocy na zakres 1,56 μm .

Pierwszy z wyżej wymienionych wątków badawczych został zainicjowany jeszcze w trakcie trwania studiów doktoranckich, kiedy w 2011 r. wspólnie z dr hab. inż. Jarosławem Sotorem opracowaliśmy i uruchomiliśmy pierwszy w Polsce (i jeden z nielicznych wtedy na świecie) laser z wykorzystaniem grafenu jako nasycalny absorber. Po obronie pracy doktorskiej kontynuowałem wątek wykorzystania grafenu w laserach erbowych (prace [A1,A3,A4,A6,A7,A12,A15,A20, A27,A30,A35]). Za najistotniejsze osiągnięcia w tej tematyce należy uznać uruchomienie pierwszego na świecie lasera dwupasmowego wykorzystującego grafen, generującego jednocześnie impulsy na długościach fali 1,55 oraz 1,9 μm [A27], a następnie prace nad synchronizacją fazową impulsów [A35]. Duże znaczenie miała również praca [A20], w której zademonstrowano generację

impulsów o czasie trwania 168 fs – był to w momencie publikacji laser generujący najkrótsze na świecie impulsy spośród dotychczasowych opublikowanych laserów wykorzystujących grafen (pobito czteroletni wówczas rekord ustanowiony przez grupę z Uniwersytetu w Cambridge). Rok później poprawiono ten wynik demonstrując generację impulsów o czasie trwania 88 fs z lasera ze zbalansowaną dyspersją, wykorzystującego kompozyt grafen/PMMA [A12].

Duże zainteresowanie badaczy grafenem stanowiło również motywację do podjęcia badań nad innymi materiałami niskowymiarowymi, posiadającymi podobne własności elektryczne i optyczne do grafenu. Taką grupę materiałów stanowią tzw. izolatory topologiczne, jak np. tellurek antymonu (Sb_2Te_3). Materiał ten w swojej objętości zachowuje się jak izolator, jednak na jego powierzchni występują stany przewodzące. W związku z tym, cienka warstwa izolatora topologicznego będzie wykazywać własności optyczne podobne do grafenu (płaska, szerokopasmowa absorpcja). Na Politechnice Wrocławskiej prace nad wykorzystaniem izolatorów topologicznych zapoczątkowano w 2014 r., kiedy to zademonstrowano pierwszy na świecie laser z synchronizacją modów na bazie Sb_2Te_3 [A29]. W eksperymencie wykorzystano cienkie warstwy eksfoliowane mechanicznie z materiału objętościowego. Ten sam materiał pozwolił następnie na demonstrację generacji ultrakrótkich impulsów (<130 fs) z lasera erbowego z zarządzaną dyspersją [A24]. W tym samym roku habilitant zainicjował współpracę z drem inż. Rafałem Zybąłą (Politechnika Warszawska, wcześniej Akademia Górniczo-Hutnicza), który opracował technologię wytwarzania izolatorów topologicznych (do celów badawczych nad ogniwami termoelektrycznymi nowej generacji). Współpraca ta zainicjowała szereg prac eksperymentalnych, które zaowocowały powstaniem kilku publikacji naukowych [A5,A8,A11,A14] oraz wielu wystąpień konferencyjnych. Ponadto, podejmowano również prace badawcze nad wykorzystaniem innych materiałów w laserach erbowych: czarnego fosforu [A13] oraz nanorurek węglowych [A17]. Prowadzono również badania nad laserami z pasywną synchronizacją modów na bazie nieliniowej rotacji polaryzacji [A16,A34].

Drugi główny podejmowany wątek badawczy to wzmacniacze światłowodowe zarówno pracy ciągłej (w konfiguracji MOPA) [A28,A31] jak i impulsowej (CPA) [A10,A18,A26]. W ramach prac nad wzmacniaczami pracy ciągłej rozwijano i optymalizowano technikę opracowaną w ramach doktoratu, polegającą na kontrolowaniu spontanicznej emisji z jonów iterbu w światłowodach erbowo-iterbowych. Emisja spontaniczna może być zniwelowana poprzez wprowadzenie zewnętrznego sygnału o długości fali z zakresu wzmocnienia iterbu, jak np. w pracy [A31] (dodatkowym źródłem był iterbowy laser światłowodowy), lub poprzez wprowadzenie pętli sprzężenia zwrotnego dla sygnału z pasma 1 μm w liniowym wzmacniaczu 1,56 μm [A28]. W pracy [A28] zaproponowano układ wzmacniacza erbowo-iterbowego z kontrolowaną emisją na długości fali 1060 nm, w którym osiągnięto moc wyjściową sygnału 1565 nm przekraczającą 10 W, nieosiągalną w klasycznych układach wzmacniaczy bez kontroli emisji z jonów iterbu. Należy zaznaczyć, iż opracowany układ był całkowicie światłowodowy, wykorzystujący jedynie włókna jednomodowe.

Równolegle rozwijano również wzmacniacze pracy impulsowej (femtosekundowe) w konfiguracji CPA. Prace prowadzono w ramach projektu Iuventus Plus finansowanego przez MNiSW, którego byłem kierownikiem. Koncentrowano się na opracowywaniu układów kompaktowych, z minimalną ilością optyki objętościowej, pracujące na długości fali 1,56 μm , dość niszowej dla układów CPA. W pracy [A26] zademonstrowano system generujący impulsy o czasie trwania 835 fs przy mocy średniej 8,65 W (częstotliwości repetycji 50 MHz), w którym cały tor optyczny (nie licząc kompresora impulsów) jest w pełni światłowodowy. W momencie publikacji była to najwyższa moc średnia osiągnięta kiedykolwiek z układu CPA pracującego w paśmie

1,56 μm . Wiele aplikacji, takich jak laserowa obróbka materiałów wymagają źródeł femtosekundowych o zdecydowanie niższych (i kontrolowanych) częstotliwościach repetycji i większych energiach impulsów. Stanowiło to motywację do opracowania kolejnej wersji układu CPA, w której zastosowano mechanizm regulowania częstotliwości poprzez „wybieranie” wybranych impulsów z ciągu megahercowego (tzw. *pulse-picker*) [A18]. Dzięki zmniejszeniu częstotliwości repetycji nawet do 100 kHz (z początkowej częstotliwości 40 MHz) osiągnięto po wzmocnieniu i kompresji impulsy o energii ponad 2 μJ i mocy szczytowej przekraczającej 1 MW (czas trwania impulsu poniżej 1 pikosekundy). Również w tym przypadku cały układ, za wyjątkiem kompresora, zrealizowany był całkowicie światłowodowo. Innym podejściem do opracowania kompaktowych układów CPA jest wykorzystanie jako kompresora impulsów objętościowej siatki Bragga o zmiennym okresie (ang. *chirped volume Bragg grating*, CVBG). Wykorzystując tego typu siatkę opracowano układ CPA generujący impulsy o czasie trwania 2,5 ps i mocy średniej 1 W przy częstotliwości powtarzania 50 MHz. Warto zaznaczyć, iż cały tor światłowodowy zrealizowany był z włókien i komponentów PM, dzięki czemu uzyskano znakomite parametry polaryzacji promieniowania na wyjściu [A10]. W chwili opublikowania był to pierwszy na świecie układ CPA zrealizowany całkowicie w technologii PM, wykorzystujący siatkę CVBG jako kompresor impulsów.

Oprócz opisanej powyżej działalności naukowej, obecnie habilitant jest na etapie rozpoczynania kolejnej, zupełnie nowej tematyki badawczej na Politechnice Wrocławskiej, dotyczącej absolutnie stabilizowanych optycznych grzebieni częstotliwości w zakresie spektralnym bliskiej i średniej podczerwieni, do zastosowań w szerokopasmowej spektroskopii laserowej.

W czasie prowadzonej od 2010 roku działalności naukowej zainicjowałem nawiązanie bliskiej współpracy z wieloma ośrodkami naukowymi z Polski i zagranicy, co umożliwiło podjęcie wielu nowych, niezmiernie ciekawych wątków badawczych, jak również zaowocowało powstaniem licznych wspólnych publikacji i aplikacji o wspólne projekty badawcze:

- 1) Uniwersytet w Umeå (Szwecja), Wydział Fizyki – ośrodek w którym zrealizowałem staż doktorski. Współpraca w zakresie opracowywania i wykorzystania femtosekundowych laserów jako optycznych grzebieni częstotliwości i ich zastosowań w spektroskopii laserowej.
- 2) Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych (ITME) w Warszawie – współpraca z trzema Zakładami ITME:
 - Zakład Epitaksji – grupa dra inż. Włodzimierza Strupińskiego – w zakresie opracowywania i wykorzystania wielowarstwowych kompozytów grafen/PMMA (grafen epitaksjalny) w laserach światłowodowych
 - Pracownia Grafenu Chemicznego – grupa dr inż. Ludwika Lipińskiej – w zakresie wykorzystania roztworów i zawiesin grafenu płatkowego, tlenku grafenu i zredukowanego tlenku grafenu w laserach światłowodowych,
 - Zakład Szkielek – dr hab. Ryszard Buczyński, dr hab. inż. Mariusz Klimczak – badania nad generacją superkontinuum w światłowodach fonicznych.
- 3) Politechnika Warszawska – współpraca z dwoma grupami badawczymi:
 - Zespół dra hab. inż. Mariusza Zdrojka – wykorzystanie nasycalnych absorberów na bazie nanorurek węglowych do generacji ultrakrótkich impulsów,
 - Zespół dra inż. Rafała Zybaly – izolatory topologiczne oraz inne materiały niskowymiarowe do zastosowań w laserach światłowodowych
- 4) Akademia Górniczo-Hutnicza (AGH) w Krakowie, Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki – dr inż. Krzysztof Mars, mgr inż. Andrzej Mikuła – badania nad nasycalnymi absorberami

- na bazie izolatorów topologicznych, osadzanie materiałów niskowymiarowych na podłożach optycznych.
- 5) Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej, Pracownia Technologii Światłowodów (dr inż. Paweł Mergo) – w zakresie badań nad zastosowaniem krzemionkowych światłowodów fotonicznych w laserach ultraszybkich (generacja superkontinuum, solitonów Ramanowskich, kompensacja dyspersji w zakresie spektralnym 2 μm).
 - 6) Czeska Akademia Nauk, Instytut Fotoniki i Elektroniki (Praga, Czechy) – zespół dra Pavla Peterki – w zakresie wykorzystania światłowodów tulowych i holmowych w femtosekundowych laserach światłowodowych.
 - 7) CSIR-Central Glass & Ceramic Research Institute (CGCRI), Fiber Optics and Photonic Division (Indie, Kalkuta) – dr Mukul Paul, dr Mrinmay Pal, współpraca w zakresie wykorzystania światłowodów erbowych oraz erbowo-iterbowych domieszkowanych nanocząstkami metalicznymi w laserach femtosekundowych
 - 8) Université d'Angers, Laboratoire de Photonique d'Angers (Angers, Francja) – grupa prof. François Sancheza – wspólny projekt badawczy w ramach programu na współpracę polsko-francuską (POLONIUM), dotyczący impulsowych laserów światłowodowych o dużej mocy.
 - 9) KTH Royal Institute of Technology (Sztokholm, Szwecja) – wymiana osobowa z zespołem Prof. Fredrika Laurella w ramach programu COST. Wspólne prace badawcze nad laserami światłowodowymi z kontrolowaną dyspersją.

5.3. Lista publikacji (nie wchodzących w skład cyklu omówionego w pkt 4)

5.3.1. Publikacje z listy JCR po uzyskaniu stopnia doktora

- [A1] A. Krajewska, I. Pasternak, **G. Sobon**, J. Sotor, A. Przewłoka, T. Ciuk, J. Sobieski, J. Grzonka, K. M. Abramski, W. Strupinski, “Fabrication and applications of multi-layer graphene stack on transparent polymer”, Applied Physics Letters 110, 041901 (2017), **IF₂₀₁₅ = 3,142**.
- [A2] K. Tarnowski, T. Martynkien, P. Mergo, K. Poturaj, **G. Soboń**, W. Urbańczyk, “Coherent supercontinuum generation up to 2.2 μm in all-normal dispersion microstructured silica fiber”, Optics Express 24, 30523-30536 (2016), **IF₂₀₁₅ = 3,148**.
- [A3] J. Sotor, **G. Sobon**, “24 fs and 3 nJ pulse generation from a simple, all polarization maintaining Er-doped fiber laser”, Laser Physics Letters 13, 125102 (2016), **IF₂₀₁₅ = 2,391**.
- [A4] J. Tarka, J. Boguslawski, **G. Sobon**, I. Pasternak, A. Przewłoka, W. Strupinski, J. Sotor, K. M. Abramski, “Power Scaling of an All-PM Fiber Er-Doped Mode-Locked Laser Based on Graphene Saturable Absorber”, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 23, 1100506 (2017), **IF₂₀₁₅ = 3,466**.
- [A5] M. Kowalczyk, J. Boguslawski, R. Zybala, K. Mars, A. Mikuła, **G. Soboń**, J. Sotor, “Sb₂Te₃-deposited D-shaped fiber as a saturable absorber for mode-locked Yb-doped fiber lasers”, Optical Materials Express 6, 2273-2282 (2016), **IF₂₀₁₅ = 2,657**.
- [A6] J. Sotor, M. Pawliszewska, **G. Sobon**, P. Kaczmarek, A. Przewłoka, I. Pasternak, J. Cajzl, P. Peterka, P. Honzátko, I. Kašik, W. Strupinski, K. Abramski, “All-fiber Ho-doped mode-locked oscillator based on a graphene saturable absorber”, Optics Letters 41, 2592-2595 (2016), **IF₂₀₁₅ = 3,040**.
- [A7] **G. Soboń**, J. Sotor, “Recent Advances in Ultrafast Fiber Lasers Mode-locked with Graphene-based Saturable Absorbers”, Current Nanoscience 12, 291-298 (2016), **IF₂₀₁₅ = 0,934**.

- [A8] J. Bogusławski, **G. Soboń**, K. Tarnowski, R. Zybala, K. Mars, A. Mikuła, K. M. Abramski, J. Sotor, “All-polarization-maintaining-fiber laser Q-switched by evanescent field interaction with Sb_2Te_3 saturable absorber”, *Optical Engineering* 55, 081316 (2016), **IF₂₀₁₅ = 0,984**.
- [A9] K. Krzempek, **G. Sobon**, J. Sotor, and K. M. Abramski, “Fully-integrated dual-wavelength all-fiber source for mode-locked square-shaped mid-IR pulse generation via DFG in PPLN”, *Optics Express* 23, 32080-32086 (2015), **IF₂₀₁₅ = 3,148**.
- [A10] **G. Sobon**, K. Krzempek, J. Tarka, J. Sotor, “Compact, all-PM fiber-CPA system based on a chirped volume Bragg grating”, *Laser Physics* 26, 015106 (2015), **IF₂₀₁₅ = 1,102**.
- [A11] J. Bogusławski, **G. Soboń**, R. Zybala, K. Mars, A. Mikuła, K. M. Abramski, J. Sotor, “Investigation on pulse shaping in fiber laser hybrid mode-locked by Sb_2Te_3 saturable absorber”, *Optics Express* 23, 29014-29023 (2015), **IF₂₀₁₅ = 3,148**.
- [A12] J. Sotor, I. Pasternak, A. Krajewska, W. Strupinski, **G. Sobon**, “Sub-90 fs a stretched-pulse mode-locked fiber laser based on a graphene saturable absorber”, *Optics Express* 23, 27503-27508 (2015), **IF₂₀₁₅ = 3,148**.
- [A13] J. Sotor, **G. Sobon**, W. Macherzynski, P. Paletko, K. M. Abramski, “Black phosphorus saturable absorber for ultrashort pulse generation”, *Applied Physics Letters* 107, 051108 (2015), **IF₂₀₁₅ = 3,142**.
- [A14] J. Boguslawski, **G. Sobon**, R. Zybala, J. Sotor, “Dissipative soliton generation in Er-doped fiber laser mode-locked by Sb_2Te_3 topological insulator”, *Optics Letters* 40, 2786-2789 (2015), **IF₂₀₁₅ = 3,040**.
- [A15] J. Boguslawski, J. Sotor, **G. Sobon**, R. Kozinski, K. Librant, M. Aksienionek, L. Lipinska, K. M. Abramski, “Graphene oxide paper as a saturable absorber for Er-and Tm-doped fiber lasers”, *Photonics Research* 3, 119-124 (2015), **IF₂₀₁₅ = 3,179**.
- [A16] J. Boguslawski, J. Sotor, **G. Sobon**, K.M. Abramski, “80 fs passively mode-locked Er-doped fiber laser”, *Laser Physics* 25, 065104 (2015), **IF₂₀₁₅ = 1,102**.
- [A17] J. Sotor, **G. Sobon**, J. Jagiello, L. Lipinska, K.M. Abramski, “Repetition frequency scaling of an all-polarization maintaining erbium-doped mode-locked fiber laser based on carbon nanotubes saturable absorber”, *Journal of Applied Physics* 117, 133103 (2015), **IF₂₀₁₅ = 2,101**.
- [A18] **G. Sobon**, P. Kaczmarek, A. Gluszek, J. Sotor, K.M. Abramski, “ μJ -level, kHz-repetition rate femtosecond fiber-CPA system at 1555 nm”, *Optics Communications* 347, 8-12 (2015), **IF₂₀₁₅ = 1,480**.
- [A19] B. Siwicki, M. Klimczak, **G. Soboń**, J. Sotor, D. Pysz, R. Stępień, K. Abramski, R. Buczynski, “Numerical simulations of spectral broadening in all-normal dispersion photonic crystal fiber at various pump pulse conditions”, *Optical Engineering* 54, 016102-016102 (2015), **IF₂₀₁₅ = 0,984**.
- [A20] J. Tarka, **G. Sobon**, J. Boguslawski, J. Sotor, J. Jagiello, M. Aksienionek, L. Lipinska, M. Zdrojek, J. Judek, K.M. Abramski, “168 fs pulse generation from graphene-chitosan mode-locked fiber laser”, *Optical Materials Express* 4, 1981-1986 (2014), **IF₂₀₁₄ = 2,844**.
- [A21] K. Krzempek, **G. Soboń**, J. Sotor, G. Dudzik, K. Abramski, “Widely tunable, all-polarization maintaining, monolithic mid-infrared radiation source based on differential frequency generation in PPLN crystal”, *Laser Physics Letters* 11, 105013 (2014), **IF₂₀₁₄ = 2,458**.
- [A22] J. Boguslawski, J. Sotor, **G. Sobon**, J. Tarka, J. Jagiello, W. Macherzynski, L. Lipinska, K. M. Abramski, “Mode-locked Er-doped fiber laser based on liquid phase exfoliated Sb_2Te_3 topological insulator”, *Laser Physics* 24, 105111 (2014), **IF₂₀₁₄ = 1,032**.
- [A23] J. Sotor, **G. Sobon**, K. Grodecki, K.M. Abramski, “Mode-locked Erbium-doped fiber laser based on evanescent field interaction with Sb_2Te_3 topological insulator”, *Applied Physics Letters* 104, 251112 (2014), **IF₂₀₁₄ = 3,302**.

- [A24] J. Sotor, **G. Sobon**, K.M. Abramski, "Sub-130 fs mode-locked Er-doped fiber laser based on topological insulator", *Optics Express* 22, 13244-13249 (2014), **IF₂₀₁₄ = 3,488**.
- [A25] J. Sotor, **G. Sobon**, W. Macherzynski, K.M. Abramski, "Harmonically mode-locked Er-doped fiber laser based on a Sb₂Te₃ topological insulator saturable absorber", *Laser Physics Letters* 11, 055102 (2014), **IF₂₀₁₄ = 2,458**.
- [A26] **G. Sobon**, P.R. Kaczmarek, D. Sliwiska, J. Sotor, K.M. Abramski, "High-power Fiber-based Femtosecond CPA System at 1560 nm", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 20, 3100205 (2014), **IF₂₀₁₄ = 2,828**.
- [A27] J. Sotor, **G. Sobon**, J. Tarka, I. Pasternak, A. Krajewska, W. Strupinski, K. M. Abramski, "Passive synchronization of erbium and thulium doped fiber mode-locked lasers enhanced by common graphene saturable absorber", *Optics Express* 22, 5536-5543 (2014), **IF₂₀₁₄ = 3,488**.
- [A28] **G. Sobon**, D. Sliwiska, K.M. Abramski, P. Kaczmarek, "10W single-mode Er/Yb co-doped all-fiber amplifier with suppressed Yb-ASE", *Laser Physics Letters* 11, 025103 (2014), **IF₂₀₁₄ = 2,458**.
- [A29] J. Sotor, **G. Sobon**, W. Macherzynski, P. Paletko, K. Grodecki, K. M. Abramski, "Mode-locking in Er-doped fiber laser based on mechanically exfoliated Sb₂Te₃ saturable absorber", *Optical Materials Express* 4, 1-6 (2014), **IF₂₀₁₄ = 2,844**.
- [A30] **G. Sobon**, J. Sotor, I. Pasternak, K. Krzempek, W. Strupinski, K.M. Abramski, "Tunable, linearly polarized Er-fiber laser mode-locked by graphene/PMMA composite", *Laser Physics* 23, 125101 (2013), **IF₂₀₁₃ = 1,025**.
- [A31] D. Sliwiska, P. Kaczmarek, **G. Sobon**, K.M. Abramski, "Double-seeding of Er/Yb co-doped fiber amplifiers for controlling of Yb ASE", *Journal of Lightwave Technology* 31, 3381-3386 (2013), **IF₂₀₁₃ = 2,862**.
- [A32] R. Buczynski, **G. Sobon**, J. Sotor, M. Klimczak, G. Stepniewski, D. Pysz, T. Martynkien, R. Kasztelaniec, R. Stepień, K. M. Abramski, "Broadband infrared supercontinuum generation in soft-glass photonic crystal fiber pumped with sub-picosecond Er-doped fiber laser mode-locked by graphene saturable absorber", *Laser Physics* 23, 105106 (2013), **IF₂₀₁₃ = 1,025**.
- [A33] K. Krzempek, **G. Sobon**, K.M. Abramski, "DFG-based mid-IR generation using a compact dual-wavelength all-fiber amplifier for laser spectroscopy applications", *Optics Express* 21, 20023-20031 (2013), **IF₂₀₁₃ = 3,525**.
- [A34] K. Krzempek, **G. Sobon**, P. Kaczmarek, K.M. Abramski, "A sub-100 fs stretched-pulse 205 MHz repetition rate passively mode-locked Er-doped all-fiber laser", *Laser Physics Letters* 10, 105103 (2013), **IF₂₀₁₃ = 2,964**.
- [A35] J. Sotor, **G. Sobon**, I. Pasternak, A. Krajewska, W. Strupinski, K. M. Abramski, "Simultaneous mode-locking at 1565 nm and 1944 nm in fiber laser based on common graphene saturable absorber", *Optics Express* 21, 18994-19002 (2013), **IF₂₀₁₃ = 3,525**.

5.3.2. Publikacje przed uzyskaniem stopnia doktora

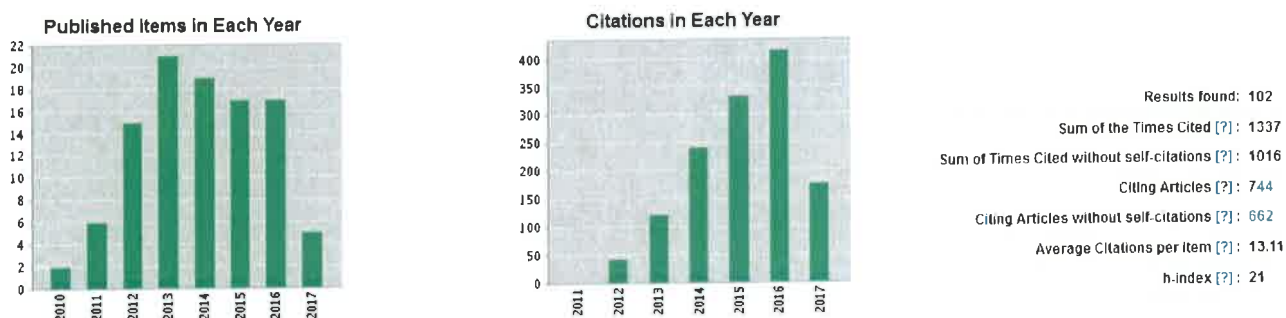
- [B1] **G. Sobon**, K. Krzempek, P. Kaczmarek, K.M. Abramski, "Eye-safe, high-repetition rate single-mode femtosecond CPA system at 1560 nm", *Laser Physics* 23, 075104 (2013), **IF₂₀₁₃ = 1,025**.
- [B2] A. J. Antończak, **G. Sobon**, K. M. Abramski, "Simple wavelength pre-selection and stabilization of the single-frequency operation of a microchip laser", *Opto-Electronics Review* 21, 199-204 (2013), **IF₂₀₁₃ = 1,279**.
- [B3] **G. Sobon**, J. Sotor, I. Pasternak, W. Strupinski, K. Krzempek, P. Kaczmarek, K. M. Abramski, "Chirped pulse amplification of a femtosecond Er-doped fiber laser mode-locked by a graphene saturable absorber", *Laser Physics Letters* 10, 035104 (2013), **IF₂₀₁₃ = 2,964**.

- [B4] M. C. Paul, **G. Sobon**, J. Sotor, K. M. Abramski, J. Jagiello, R. Kozinski, L. Lipinska, M. Pal, „A graphene-based mode-locked nano-engineered zirconia–yttria–aluminosilicate glass-based erbium-doped fiber laser”, *Laser Physics* 23, 035110 (2013), **IF₂₀₁₃ = 1,025**.
- [B5] **G. Sobon**, K. M. Abramski, „Fiber-based laser frequency combs”, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences* 60, 697-706 (2012), **IF₂₀₁₂ = 0,980**.
- [B6] **G. Sobon**, J. Sotor, J. Jagiello, R. Kozinski, K. Librant, M. Zdrojek, L. Lipinska, K. M. Abramski, „Linearly polarized, Q-switched Er-doped fiber laser based on reduced graphene oxide saturable absorber”, *Applied Physics Letters* 101, 241106 (2012), **IF₂₀₁₂ = 3,794**.
- [B7] **G. Sobon**, J. Sotor, J. Jagiello, R. Kozinski, M. Zdrojek, M. Holdynski, P. Paletko, J. Boguslawski, L. Lipinska, K.M. Abramski, „Graphene Oxide vs. Reduced Graphene Oxide as saturable absorbers for Er-doped passively mode-locked fiber laser”, *Optics Express* 20, 19463-19473 (2012), **IF₂₀₁₂ = 3,546**.
- [B8] **G. Sobon**, J. Sotor, I. Pasternak, K. Grodecki, P. Paletko, W. Strupinski, Z. Jankiewicz, K.M. Abramski, „Er-doped Fiber Laser Mode-locked by CVD-graphene Saturable Absorber”, *Journal of Lightwave Technology* 30, 2770-2775 (2012), **IF₂₀₁₂ = 2,555**.
- [B9] J. Sotor, **G. Sobon**, K.M. Abramski, „Erbium-doped fiber laser mode-locked by mechanically exfoliated graphene saturable absorber”, *Opto-Electronics Review* 20, 362-366 (2012), **IF₂₀₁₂ = 0,923**.
- [B10] **G. Sobon**, D. Sliwinska, P. Kaczmarek, K.M. Abramski, „Er/Yb co-doped fiber amplifier with wavelength-tuned Yb-band ring resonator”, *Optics Communications* 285, 3816-3819 (2012), **IF₂₀₁₂ = 1,438**.
- [B11] J. Sotor, **G. Sobon**, K.M. Abramski, „Scalar soliton generation in all-polarization maintaining, graphene mode-locked fiber laser”, *Optics Letters* 37, 2166-2168 (2012), **IF₂₀₁₂ = 3,385**.
- [B12] **G. Sobon**, J. Sotor, K.M. Abramski, „All-polarization maintaining femtosecond Er-doped fiber laser mode-locked by graphene saturable absorber”, *Laser Physics Letters* 9, 581-586 (2012), **IF₂₀₁₂ = 7,714**.
- [B13] **G. Sobon**, J. Sotor, K.M. Abramski, „Passive harmonic mode-locking in Er-doped fiber laser based on graphene saturable absorber with repetition rates scalable to 2.22 GHz”, *Applied Physics Letters* 100, 161109 (2012), **IF₂₀₁₂ = 3,794**.
- [B14] J. Sotor, **G. Sobon**, K. Krzempek, K.M. Abramski, „Fundamental and harmonic mode-locking in erbium-doped fiber laser based on graphene saturable absorber”, *Optics Communications* 285, 3174-3178 (2012), **IF₂₀₁₂ = 1,438**.
- [B15] **G. Sobon**, P. Kaczmarek, K.M. Abramski, „Erbium-Ytterbium Co-doped Fiber Amplifier Operating at 1550 nm with Stimulated Lasing at 1064 nm”, *Optics Communications* 285, 1930-1934 (2012), **IF₂₀₁₂ = 1,438**.
- [B16] **G. Sobon**, P. Kaczmarek, A. Antonczak, J. Sotor, K.M. Abramski, „Controlling the 1 μm spontaneous emission in Er/Yb co-doped fiber amplifiers”, *Optics Express* 19, 19104-19113 (2011), **IF₂₀₁₁ = 3,587**.
- [B17] **G. Sobon**, P. Kaczmarek, A. Antonczak, J. Sotor, A. Waz, K.M. Abramski, „Pulsed dual-stage Fiber-MOPA source operating at 1550 nm with arbitrarily shaped output pulses”, *Applied Physics B: Lasers and Optics* 105, 721-727 (2011), **IF₂₀₁₁ = 2,189**.
- [B18] **G. Sobon**, K. Krzempek, P. Kaczmarek, K.M. Abramski, M. Nikodem, „10 GHz Passive Harmonic Mode-Locking in Er-Yb Double-Clad Fiber Laser”, *Optics Communications* 284, 4203-4206 (2011), **IF₂₀₁₁ = 1,486**.
- [B19] P. Kaczmarek, **G. Sobon**, J. Sotor, A. Antończak, K. Abramski, „Fiber-MOPA Sources of Coherent Radiation”, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences* 58, 485-489 (2010), **IF₂₀₁₀ = 0,945**.

5.4. Podsumowanie dorobku naukowego

5.4.1. Dane bibliometryczne (stan na 14.06.2017 wg bazy Web of Science)

| | |
|---|---------|
| Liczba publikacji w czasopismach z listy JCR: | 71 |
| Liczba publikacji w czasopismach z listy JCR po złożeniu pracy doktorskiej: | 52 |
| Sumaryczny Impact Factor: | 189,242 |
| Przed złożeniem pracy doktorskiej: | 45,505 |
| Po złożeniu pracy doktorskiej: | 143,737 |
| Indeks Hirscha (wg Web of Science): | h = 21 |
| Całkowita liczba cytowań bez autocytowań (wg Web of Science): | 1015 |



Rys. 12. Podsumowanie cytowań prac habilitanta wg bazy Web of Science (stan z dnia 14.06.2017).

5.4.2. Informacje nt. wyróżnień publikacji naukowych

- Publikacja [H10] została wymieniona w gronie 10 najczęściej czytanych artykułów czasopisma *Photonics Research* w 2015 roku oraz na 3. miejscu na liście 10 najczęściej cytowanych artykułów czasopisma w latach 2014-2015.
- Publikacja [H12] jest wymieniona w gronie 10 najczęściej czytanych artykułów czasopisma *Optical Materials Express* w grudniu 2013 roku,
- Publikacja [B7] wymieniona jest jako dwunasta na liście piętnastu najczęściej cytowanych prac w latach 2012-2013 opublikowanych w czasopiśmie *Optics Express*,
- Publikacja [A29] wymieniona jest jako trzecia na liście piętnastu najczęściej cytowanych prac opublikowanych w *Optical Materials Express* w latach 2014-2016,
- Publikacja [A24] wymieniona jest jako siódma na liście dziesięciu najczęściej cytowanych prac opublikowanych w *Optics Express* w kategorii światłowodowych laserów impulsowych,
- Publikacja [A23] wymieniona jako dwunasta na liście najczęściej cytowanych prac w okresie 01.2015 – 07.2015 opublikowanych w czasopiśmie *Applied Physics Letters*.
- Publikacja [B3] została wybrana przez edytorów czasopisma *Laser Physics Letters* do kolekcji IOPselect, składającej się z najważniejszych artykułów opublikowanych w danym roku we wszystkich czasopismach wydawnictwa (IOP Publishing), mających potencjalnie największy wpływ na dalszy rozwój dziedziny.
- Prace [H3], [A13], [A29] oraz [B7] zostały wyróżnione znakiem “Highly cited paper” w bazie JCR, przyznawane publikacjom mieszającym się w 1% najczęściej cytowanych ogółem prac w danej dziedzinie nauki.

Gregorz Sobolewski