



Politechnika Wroclawska

DZIEDZINA: nauki inżyneryjno-techniczne

DYSCYPLINA: informatyka techniczna i telekomunikacja

ROZPRAWA DOKTORSKA

**Lasery impulsowe wykonane w oparciu
o technologię światłowodów fluorkowych na
zakres średniej podczerwieni**

mgr inż. Łukasz Pajewski

Promotor:

prof. dr hab. inż. Sławomir Sujecki

Słowa kluczowe: lasery, światłowody, średnia podczerwień, ZBLAN

WROCŁAW 2024

Streszczenie

Niniejsza praca poświęcona jest układom laserowym generującym fale elektromagnetyczne o długości fali wynoszącej ok. $3\mu\text{m}$. W szczególności przedmiotem prac badawczych jest konstrukcja impulsowych układów laserowych, które generują promieniowanie w zakresie średniej podczerwieni przy wykorzystaniu włókien fluorkowych domieszkowanych jonami dysprozu. Zgodnie z wiedzą autora na dzień powstawania tezy pracy nie istnieją na świecie układy laserów światłowodowych pracy impulsowej domieszkowane dysprozem z modulacją wzmocnienia, które generują promieniowanie o długości fali ok. $3\mu\text{m}$, a istniejące układy z modulacją dobroci znacząco odbiegają parametrami od źródeł wykorzystujących włókna domieszkowane erbem. Lasery światłowodowe domieszkowane dysprozem mają liczne potencjalne zastosowania m.in. w spektroskopii, medycynie, przemyśle oraz telekomunikacji. Dlatego też jednym z celów prac badawczych jest przeanalizowanie powodów takiego stanu rzeczy oraz zaprojektowanie i konstrukcja impulsowych układów laserowych, wykorzystujących włókna fluorkowe domieszkowane dysprozem, z modulacją wzmocnienia oraz modulacją dobroci.

W pracy tej przedstawiono zatem wyniki badań teoretycznych oraz eksperymentalnych, których przedmiotem są układy laserowe zrealizowane przy wykorzystaniu światłowodów fluorkowych domieszkowanych jonami erbu oraz dysprozu. W szczególności przeprowadzono analizę podstawowych układów laserowych pracy ciągłej oraz omówiono zagadnienia techniczne związane z konstrukcją układów laserowych, które generują promieniowanie o długości fali $\sim 3\mu\text{m}$. Dzięki przeprowadzonej analizie i wdrożeniu nowatorskich rozwiązań technicznych, skonstruowano impulsowe układy laserowe o parametrach znacznie poprawionych w porównaniu z wynikami dostępnymi w literaturze. Wyniki przeprowadzonych eksperymentów potwierdzają stawiane hipotezy, a w szczególności możliwość skonstruowania tanich i stosunkowo prostych impulsowych układów laserowych generujących promieniowanie elektromagnetyczne o zakresie średniej podczerwieni przy zastosowaniu włókien fluorkowych domieszkowanych jonami dysprozu z wykorzystaniem zarówno modulacji wzmocnienia jak i modulacji dobroci.

Najbardziej wartościowe wyniki badań zostały opublikowane w czasopiśmie naukowych: *Journal of Lightwave Technology*, *Journal of Physics-Photonics* oraz *Photonics Letters of Poland*.

Lista publikacji

Zaproponowane w pracy rozwiązania zostały przedstawione w publikacjach naukowych dotyczących laserów Dy^{3+} :ZBLAN oraz Er^{3+} :ZBLAN pracujących w trybie ciągłym oraz impulsowym i wystąpieniach konferencyjnych (osoba prezentująca została podkreślona).

Publikacje w czasopismach naukowych stanowiące podstawę dysertacji:

1. **Łukasz Pajewski**, Łukasz Sójka, Samir Lamrini, Mark Farries, Tomasz Osuch, Trevor M. Benson, Angela Seddon, Sławomir Sujecki: Experimental investigation of actively Q-switched Dy^{3+} doped fluoride single mode fiber laser operating near $3\mu m$, Journal of Lightwave Technology, 2023
2. **Łukasz Pajewski**, Łukasz Sójka, Samir Lamrini, Trevor M. Benson, Angela Seddon, Sławomir Sujecki: Gain-switched Dy^{3+} :ZBLAN fiber laser operating around $3\mu m$, Journal of Physics-Photonics. 2020, vol. 2, nr 1, s. 1-7,
3. **Łukasz Pajewski**, Łukasz Sójka, Samir Lamrini, Trevor M. Benson, Angela Seddon, Sławomir Sujecki: Experimental investigation of a mid-infrared Er:ZBLAN fiber laser, Photonics Letters of Poland, 2020, vol. 12, nr 3, s. 73-75,

Publikacje w czasopismach naukowych dotyczące tematyki pracy, w których realizację autor był zaangażowany:

1. Łukasz Sójka, Bartłomiej Starzyk, Sławomir Sujecki, **Łukasz Pajewski**, Piotr Miluski, Jacek Żmojda, Wojciech A. Pisarski, Joanna Pisarska, Marcin Kochanowicz, Dominik Dorosz, Trevor Benson, David Furniss, Mark Farries, Angela Seddon: Mid-infrared emission from Dy^{3+} doped fluoroindate glass fiber. Ceramics International. 2023, vol. 49, nr 24, part B, s. 41210-41216
2. Łukasz Sójka, **Łukasz Pajewski**, Samir Lamrini, Mark Farries, Trevor Benson, Angela Seddon, Sławomir Sujecki: High peak power Q-switched Er:ZBLAN fiber, Journal of Lightwave Technology. 2021, vol. 39, nr 20, s. 6572-6578,
3. Łukasz Sójka, **Łukasz Pajewski**, Samir Lamrini, Mark Farries, Trevor Benson, Angela Seddon, Sławomir Sujecki: Experimental investigation of actively q-switched Er^{3+} :ZBLAN fiber laser operating at around $2.8\mu m$, Sensors. 2020, vol. 20, nr 16, art. 4642, s. 1-11,
4. Łukasz Sójka, **Łukasz Pajewski**, Maciej A. Popenda, Elżbieta Beres-Pawlik, Samir Lamrini, Konrad Markowski, Tomasz Osuch, Trevor Benson, Angela Seddon,

Sławomir Sujecki: Experimental investigation of mid-infrared laser action from Dy³⁺ Doped fluorozirconate fiber, IEEE Photonics Technology Letters. 2018, vol. 30, nr 12, s. 1083-1086.

Publikacje pokonferencyjne dotyczące tematyki pracy:

1. **Łukasz Pajewski**, Sławomir Sujecki, Łukasz Sójka, Angela Seddon, Trevor Benson, Mark Farries, David Furniss, Samir Lamrini: Application of fluoride fiber laser devices operating at wavelengths near 3 micrometers.
W: Micro-structured and Specialty Optical Fibres VII. SPIE, cop. 2021. art. 117730O, s. 1-5
2. Łukasz Sójka, **Łukasz Pajewski**, Sławomir Sujecki, Trevor Benson, Angela Seddon, Mark Farries, Samir Lamrini, K. Scholle: Fluoride fiber lasers operating at wavelengths near 3 micrometers.
W: ICTON 2020 : 22nd International Conference on Transparent Optical Networks : Bari, Włochy

Wystąpienia konferencyjne o tematyce związanej z pracą, które nie zostały opublikowane:

1. Sławomir Sujecki, Łukasz Sójka, **Łukasz Pajewski**, Angela Seddon, P. Fuhrberg, Ori Henderson-Sapir, Andrew Malouf, David Ottaway: Mid-IR lasers in fluoride fibres.
W: PIERS 2019 Rome : Photonics & Electromagnetics Research Symposium also known as Progress In Electromagnetics Research Symposium, June 17-20, 2019, Rzym, Włochy
2. Łukasz Sójka, **Łukasz Pajewski**, Maciej A. Popenda, Elżbieta Bereś-Pawlik, Samir Lamrini, Konrad Markowski, Tomasz Osuch, Trevor Benson, Angela Seddon, Sławomir Sujecki: Laser światłowodowy Dy:ZBLAN generujący w zakresie średniej podczerwieni (3 μm).
W: STL 2018 : XII Sympozjum Techniki Laserowej, 25-27 września 2018, Jastarnia, Polska
3. Łukasz Sójka, **Łukasz Pajewski**, Maciej A. Popenda, Elżbieta Bereś-Pawlik, Samir Lamrini, Konrad Markowski, Tomasz Osuch, Trevor Benson, Angela Seddon, Sławomir Sujecki: Experimental investigation of mid-infrared laser action from Dy³⁺ doped fluorozirconate fiber.

W: D-Photon 2018 : 1st International Conference on Dielectric Photonic Devices and Systems Beyond Visible, October 1-2, 2018, Bari, Włochy

Publikacje w czasopismach naukowych nie dotyczące tematyki pracy:

1. Mateusz Mądry, Lourdes Alwis, Leonardo Binetti, **Łukasz Pajewski**, Elżbieta Bereś-Pawlik: Simultaneous measurement of temperature and relative humidity using a dual-wavelength erbium-doped fiber ring laser sensor, IEEE Sensors Journal. 2019, vol. 19, nr 20, s. 9215-9220
2. **Łukasz Pajewski**, Hanna I. Stawska, Elżbieta Bereś-Pawlik: Ray tracing methods in numerical analysis of double-clad microstructured optical fibre coupler. Optical and Quantum Electronics. 2017, vol. 49, nr 99, s. 1-12
3. Łukasz Sójka, **Łukasz Pajewski**, Mariusz Śliwa, Paweł Mergo, Trevor Benson, Sławomir Sujecki, Elżbieta Bereś-Pawlik: Multicore microstructured optical fibre for sensing applications, Optics Communications. 2015, vol. 344, s. 71-76
4. Łukasz Sójka, **Łukasz Pajewski**, Paweł Mergo, Kazimierz Jędrzejewski, L. Lewandowski, David Furniss, Angela Seddon, Trevor Benson, Sławomir Sujecki, Elżbieta Bereś-Pawlik: Neodymium-doped highly birefringent microstructure fiber laser, Laser Physics. 2013, vol. 23, nr 8, s. 1-6
5. Elżbieta Bereś-Pawlik, Łukasz Sójka, Michał Pilszak, **Łukasz Pajewski**, Sławomir Sujecki, Paweł Mergo, Krzysztof Poturaj, Krzysztof Skorupski, Jacek Klimek: Światłowody fotoniczne jako materiał na lasery światłowodowe ze zdefiniowanym stanem polaryzacji Elektronika (Warszawa). 2012, nr 11, s. 62-64

Publikacje pokonferencyjne nie dotyczące tematyki pracy:

1. Mateusz Mądry, **Łukasz Pajewski**, Elżbieta Bereś-Pawlik: The hybrid wireless and fiber optic sensor system.
W: Optical Fibers and Their Applications 2017, 23-27 January, Supraśl, Polska
2. Łukasz Sójka, **Łukasz Pajewski**, Hanna I. Stawska, Paweł Mergo, Sławomir Sujecki, Trevor Benson, Elżbieta Bereś-Pawlik: Multiwavelength erbium ring laser based on multicore fibre
W: ICTON 2016 : 18th International Conference on Transparent Optical Networks : Trydent, Włochy
3. Elżbieta Bereś-Pawlik, Hanna I. Stawska, Maciej A. Popena, **Łukasz Pajewski**, Natalia Malinowska, Robert Hossa: Multiphoton, optical fiber - based fluorescence

spectroscopy.

W: Laser Technology 2016 : Progress and Applications of Lasers, 27-30 September 2016, Jastarnia, Polska

4. Maciej A. Popenda, **Łukasz Pajewski**, Zygmunt Grzebieniak, Elżbieta Bereś-Pawlik: Fluorescence lifetime measurements with all-fiber optical setup for non-invasive in-vivo diagnostics.

W: ICTON 2015 : 17th International Conference on Transparent Optical Networks : Budapeszt, Węgry

5. Łukasz Sójka, **Łukasz Pajewski**, Mariusz Śliwa, Paweł Mergo, Trevor Benson, Sławomir Sujecki, Elżbieta Bereś-Pawlik: Sensing capability of multicore fibre

W: ICTON 2014 : 16th International Conference on Transparent Optical Networks : Graz, Austria

6. Elżbieta Bereś-Pawlik, Mariusz Śliwa, **Łukasz Pajewski**, Grzegorz Budzyń: Determination of possibilities of SI plastic fiber application in passive optical network

W: ICTON 2014 : 16th International Conference on Transparent Optical Networks : Graz, Austria

7. Łukasz Sójka, **Łukasz Pajewski**, Paweł Mergo, David Furniss, Angela Seddon, Trevor Benson, Sławomir Sujecki, Elżbieta Bereś-Pawlik: Erbium doped highly birefringent microstructure fiber

W: ICTON 2013 : 15th International Conference on Transparent Optical Networks : Kartagena, Hiszpania

8. Łukasz Sójka, **Łukasz Pajewski**, Michał Pilszak, Paweł Mergo, David Furniss, Angela Seddon, Trevor Benson, Sławomir Sujecki, Elżbieta Bereś-Pawlik: Highly birefringent microstructured neodymium doped fiber

W: ICTON 2012 : 14th International Conference on Transparent Optical Networks, 2nd - 5th July, 2012, Coventry, Wielka Brytania

Słownik skrótów

AOM	modulator akustooptyczny (ang. acousto-optic modulator)
AOTF	akustooptyczny filtr przestrajalny (ang. acousto-optic tunable filter)
ASE	wzmocniona emisja spontaniczna (ang. amplified spontaneous emission)
CR	relaksacja skrośna (ang. cross-relaxation)
CW	laser pracy ciągłej (ang. continuous wave)
EDFA	wzmacniacz światłowodowe domieszkowany jonami erbu (ang. erbium doped fiber amplifier)
EOM	modulator elektrooptyczny (ang. electro-optic modulator)
ESA	absorpcji w stanie wzbudzonym
ETU	konwersja energii w górę (ang. energy transfer upconversion)
FIR	daleka podczerwień (ang. far-infrared)
FWHM	szerokość połówkowa (ang. full width half maximum)
FSF	nieliniowa akumulacja przesunięcia faz (ang. frequency-shifted feedback)
GSA	absorpcji ze stanu podstawowego (ang. ground state absorption).
HR	silnie odbijające (ang. highly reflective)
HT	silnie przepuszczalne (ang. highly transparent)
IFG	szkło fluorowodorowe (ang. Indium InF ₃ Fluoride Glass) o składzie 40% InF ₃ 20% ZnF ₂ 20% SrF ₂ 20% BaF ₂
MIR	średnia podczerwień (ang. mid-infrared)
NA	apertura numeryczna (ang. numerical aperture)
NIR	bliska podczerwień (ang. near-infrared)
NPR	nieliniowa rotacja polaryzacji (ang. nonlinear polarization rotation)
PFR	częstotliwość powtarzania impulsów (ang. pulse repetition frequency)
SESAM	półprzewodnikowe zwierciadło nieliniowe (ang. semiconductor saturable absorber mirror)
SI	oddziaływania silne (ang. strong interactions)
SNR	stosunek sygnał-szum (ang. signal to noise ratio)
WI	oddziaływania słabe (ang. weak interactions)
ZBLAN	szkło fluorocyrcjonianowe ZFG (ang. Zirconium ZrF ₄ Fluoride Glass)

Oznaczenia stosowane we wzorach:

A_1, α_{ep}	stałe parametry charakteryzujące sieć jonów pierwiastka ziem rzadkich,
A_{eff}	powierzchnia przekroju włókna domieszkowanego,
α_s, α_p	współczynnik strat propagacji odpowiednio dla długości fali wzbudzonej i wzbudzającej
ΔE	różnica energii między poziomami energetycznymi
Δz	długość odcinka włókna
b_1, b_2	współczynniki Boltzmanna dla poziomów energetycznych ${}^4I_{13/2}$ oraz ${}^4I_{11/2}$
β_{ij}	współczynniki rozgałęzienia dla poszczególnych przejść określające prawdopodobieństwo ich wystąpienia i oznacza poziom początkowy, j oznacza poziom końcowy
c	prędkość światła
f_{PFR}	częstotliwość powtarzania impulsów
g_2, g_1	współczynniki degeneracji poziomów energetycznych
$\Gamma_{p,s}$	współczynnik wypełnienia (p – pompy, s – sygnału)
h	stała Plancka,
L	długość rezonatora
λ	długość fali
n	średnia ilość cząsteczek posiadających maksymalną energię fononów zgodna ze statystyką Bosego-Einsteina
N_i	ilość jonów na poszczególnych poziomach energetycznych,
k_B^T	stałą Boltzmanna,
ω	częstość kołowa fononu
p	ilość fononów potrzebna do przejścia bezpromienistego między poziomami energetycznymi
P_{avr}	moc średnia
$P_{P,s}^{\pm}(z,t)$	moc wzbudzająca propagująca w przód (+) oraz wstecznie (-) dla pompy (p) oraz sygnału (s)
P_{szcz}	moc szczytowa
R_{ESA}	współczynnik absorpcji w stanie wzbudzonym
R_{GSA}	współczynnik absorpcji ze stanu podstawowego
R_p	odbiciowość zwierciadła dla długości fali sygnału wzbudzającego,
R_s	odbiciowość zwierciadła dla długości fali sygnału wzbudzanego.
R_{SE}	współczynnik emisji wymuszonej

σ	przekrój czynny
$\sigma_{GSA}, \sigma_{ESA}, \sigma_{SE}$	przekrój czynny odpowiednio dla GSA, ESA, SE
t_{imp}	czas trwania impulsu
T	temperatura
T_c	temperatura krystalizacji
T_m	temperatura topnienia
T_g	temperatura zeszklenia
τ_i	czasy życia na poszczególnych poziomach energetycznych,
V	częstotliwość znormalizowana,
W_{11}, W_{12}	współczynniki określające prawdopodobieństwo wystąpienia konwersji w górę dla odpowiednio ETU_1 oraz ETU_2 , dla jonów erbu
W_{50}	współczynnik relaksacji dla sprzężonych termicznie poziomów $^2H_{11/2}$ i $^4S_{3/2}$ dla jonów erbu
W_{mp}	wskaźnik relaksacji wielofononowej

Spis treści

Streszczenie	2
Lista publikacji	3
Słownik skrótów	7
1. Wprowadzenie	13
1.1. Zastosowanie promieniowania optycznego z zakresu $3\mu\text{m}$	13
1.1.1. Definicja zakresu widmowego średniej podczerwieni.....	14
1.1.2. Zastosowanie fal z zakresu MIR w spektroskopii	14
1.1.3. Zastosowanie fal z zakresu MIR w obróbce polimerów	15
1.1.4. Zastosowanie fal z zakresu MIR w medycynie	20
1.1.5. Zastosowanie fal z zakresu MIR w aplikacjach wojskowych.....	23
1.1.6. Zastosowanie fal z zakresu MIR w telekomunikacji	24
1.2. Układy laserowe wykorzystywane w generacji fal $3\mu\text{m}$	25
1.2.1. Źródła fal z zakresu $\sim 3\mu\text{m}$ pracy ciągłej.....	28
1.2.2. Źródła fal z zakresu $\sim 3\mu\text{m}$ pracy impulsowej.....	32
1.2.2.1. Modulacja wzmocnienia	33
1.2.2.2. Modulacja dobroci.....	34
1.2.2.3. Synchronizacja modów podłużnych.....	35
1.2.2.4. Podsumowanie	36
1.3. Analiza potrzeb oraz teza pracy	41
2. Wstęp teoretyczny	43
2.1. Ośrodki aktywne dla źródeł laserowych w zakresie MIR.....	43
2.2. Włókna światłowodowe	48
2.3. Produkcja włókien fluorkowych	52
2.4. Podstawy teoretyczne pracy układów laserujących	54
2.5. Domieszkowane włókna ZBLAN	55
2.5.1. Analiza włókien ZBLAN domieszkowanych jonami holmu.....	55

2.5.2. Analiza włókien ZBLAN domieszkowanych jonami erbu	56
2.5.3. Analiza włókien ZBLAN domieszkowanych jonami dysprozu.....	58
3. Analiza eksperymentalna oraz numeryczna układów laserowych Er ³⁺ :ZBLAN.....	62
3.1. Modelowanie numeryczne dla laserów CW Er ³⁺ :ZBLAN	63
3.1.1. Model teoretyczny.....	63
3.1.2. Analiza numeryczna układu laserowego CW Er ³⁺ :ZBLAN	69
3.1.3. Podsumowanie analizy numerycznej	77
3.2. Laser Er ³⁺ :ZBLAN.....	78
3.2.1. Konstrukcja lasera CW Er ³⁺ :ZBLAN	78
3.2.2. Wyniki pomiarów lasera CW Er ³⁺ :ZBLAN.....	82
3.2.3. Podsumowanie wyników eksperymentalnych dla lasera CW Er ³⁺ :ZBLAN.....	86
4. Analiza eksperymentalna układów laserowych Dy ³⁺ :ZBLAN	87
4.1. Stan wiedzy dotyczący laserów Dy ³⁺ :ZBLAN	87
4.2. Laser CW Dy ³⁺ :ZBLAN	89
4.2.1. Założenia konstrukcyjne dla lasera CW Dy ³⁺ :ZBLAN	89
4.2.2. Konstrukcje lasera CW Dy ³⁺ :ZBLAN oraz wyniki pomiarów	92
4.2.3. Podsumowanie wyników dla lasera CW Dy ³⁺ :ZBLAN.....	98
4.3. Laser impulsowy Dy ³⁺ :ZBLAN z modulacją wzmocnienia	99
4.3.1. Konstrukcja lasera impulsowego Dy ³⁺ :ZBLAN z modulacją wzmocnienia	99
4.3.2. Wyniki pomiarów lasera impulsowego Dy ³⁺ :ZBLAN z modulacją wzmocnienia..	101
4.3.3. Podsumowanie wyników dla lasera impulsowego Dy ³⁺ :ZBLAN z modulacją wzmocnienia	106
4.4. Laser impulsowy Dy ³⁺ :ZBLAN z modulacją dobroci	107
4.4.1. Konstrukcja lasera impulsowego Dy ³⁺ :ZBLAN z modulacją dobroci	107
4.4.2. Wyniki pomiarów lasera impulsowego Dy ³⁺ :ZBLAN z modulacją dobroci.....	108
4.4.3. Podsumowanie wyników dla lasera impulsowego Dy ³⁺ :ZBLAN z modulacją dobroci	111
5. Wnioski końcowe.....	113

5.1. Wyniki dysertacji	113
5.2. Podsumowanie szczególnych osiągnięć.....	117
6. Bibliografia	120

1. Wprowadzenie

Od czasu prezentacji pierwszego lasera rubinowego w 1960 roku, naukowcy dokonali znaczącego postępu w dziedzinie technologii laserowej. Badacze wykazali, że możliwa jest konstrukcja laserów nie tylko przy użyciu rubinów, lecz także poprzez zastosowanie m.in. półprzewodników, cieczy, gazów oraz światłowodowych włókien aktywnych. Układy laserowe znalazły praktyczne zastosowanie, między innymi w systemach telekomunikacyjnych. Sygnał laserowy, po odpowiedniej modulacji, przesyłany jest przy wykorzystaniu układów o charakterze pasywnym na dystansach rzędu setek kilometrów. W celu prowadzenia transmisji na większe odległości, nieodzowne staje się wykorzystanie układów wzmacniających sygnał. Wyjątkową rolę pełnią w tym obszarze wzmacniacze światłowodowe domieszkowane jonami erbu EDFA (ang. erbium-doped fiber amplifier), które pozwalają na wzmocnienie sygnału bez potrzeby jego konwersji z sygnału optycznego na sygnał elektryczny. Oprócz zastosowań w telekomunikacji, lasery znalazły również zastosowanie w wielu innych dziedzinach, takich jak przemysł (np. w cięciu i obróbce materiałów), medycyna (w zabiegach chirurgicznych i kosmetycznych), miernictwo (jako elementy dalmierzy, żyroskopów oraz czujników przemieszczenia i nacisku) oraz w codziennym życiu (np. w odtwarzaczach CD/DVD/Blu-ray). Każdy nowy rodzaj lasera otwiera potencjalnie nowe możliwości zastosowań, dlatego wartościowe jest skierowanie uwagi na ewolucję w obszarze układów laserowych oraz dokładne zbadanie ich potencjalnych zastosowań.

1.1. Zastosowanie promieniowania optycznego z zakresu 3 μ m

Aktualnie prowadzone badania naukowe skupiają się przede wszystkim na potrzebie rozszerzenia spektralnego zakresu fal generowanych przez układy laserowe. Do tej pory z powodzeniem opracowano tanie i niezawodne źródła i systemy laserowe, które generują spektrum w zakresie do 2,5 μ m. Nie oznacza to, że nie istnieją inne źródła laserowe generujące w wyższych zakresach spektralnych. Ich ilość jest jednak bardzo ograniczona. Co więcej generowane przez nie długości fali zamykają się w pewnych wycinkach spektrum a ich różnorodność i możliwości, w porównaniu z laserami dostępnymi dla zakresu spektralnego <2,5 μ m, są znacząco ograniczone. Prace związane z poszerzaniem dostępności układów laserowych operujących w nieosiągalnych dotąd obszarach trwają od wielu lat.

Dzięki tym badaniom obszar spektralny przekraczający 2,5 μ m staje się coraz bardziej dostępny. Niemniej jednak, nie istnieją jeszcze wystarczająco rozwinięte źródła generujące fale w zakresie powyżej 2,5 μ m. Wciąż brakuje prostych, niedrogich i niezawodnych rozwiązań, które byłyby w stanie zaspokoić potrzeby potencjalnych użytkowników. Analizując dostępne

obecnie źródła, autor dostrzega wyraźne możliwości rozwoju w dziedzinie źródeł spektralnych w zakresie około $3\mu\text{m}$, szczególnie tych działających w trybie impulsowym, które mają duży potencjał znalezienia wielu zastosowań.

1.1.1. Definicja zakresu widmowego średniej podczerwieni

Definiując promieniowanie podczerwone, można stwierdzić, że jest to rodzaj promieniowania elektromagnetycznego o widmie obejmującym zakres od około $0,7$ do $1000\mu\text{m}$. Promieniowanie podczerwone jest podzielone na obszary bliskiej, średniej i dalekiej podczerwieni. Zakresy spektralne poszczególnych obszarów podczerwieni są zdefiniowane według standardów i różnią się w zależności od dziedziny nauki. Zgodnie ze specyfikacją zawartą w dokumencie ISO 20473, obszary średniej podczerwieni zostały zdefiniowane w sposób następujący:

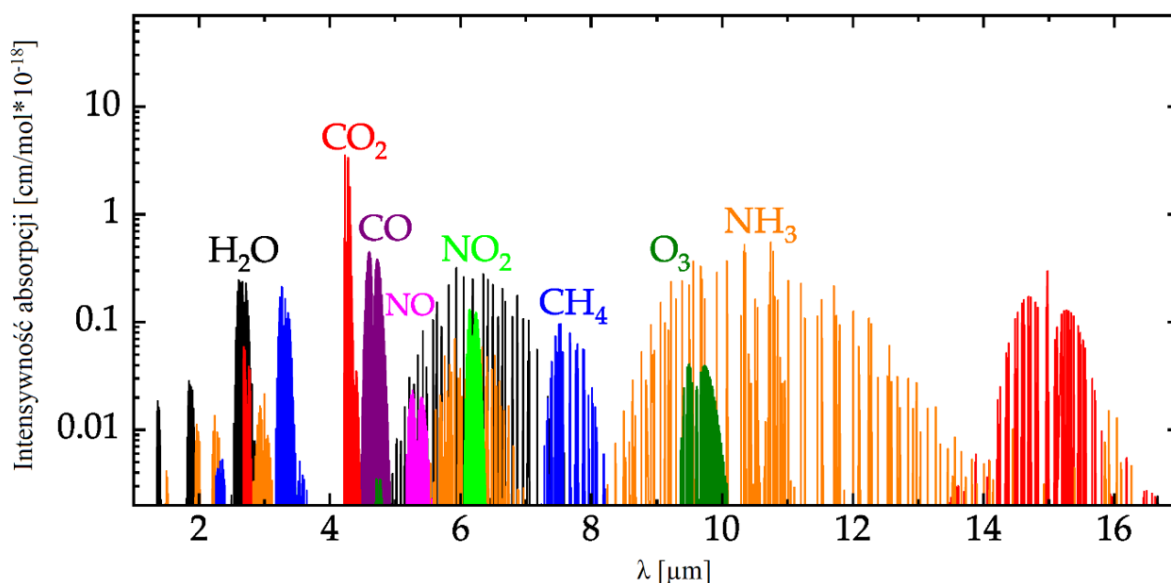
- obszar bliskiej podczerwieni NIR (ang. Near-Infrared) obejmuje zakres $0,78-3\mu\text{m}$,
- obszar średniej podczerwieni MIR (ang. Mid-Infrared) obejmuje zakres $3-50\mu\text{m}$,
- obszar dalekiej podczerwieni FIR (ang. Far-Infrared) obejmuje zakres $50-1000\mu\text{m}$.

W ramach niniejszej pracy proponuje się jednak, zgodnie z praktyką często przyjętą w publikacjach naukowych z dziedziny optoelektroniki, np. [1], przyjęcie, że obszar MIR rozpoczyna się już w zakresie około $2,5\mu\text{m}$.

1.1.2. Zastosowanie fal z zakresu MIR w spektroskopii

Promieniowanie elektromagnetyczne z obszaru NIR znajduje zastosowanie głównie w dziedzinie telekomunikacji. Technologia źródeł światła oraz nośników fal w zakresie $0,9-1,7\mu\text{m}$ jest już dobrze udokumentowana. W ostatnich latach coraz większe zainteresowanie wzbudza górny obszar NIR oraz obszar MIR. Wiele rodzajów molekuł charakteryzuje się silną absorpcją fal elektromagnetycznych z tych zakresów spektralnych, co pozwala na tworzenie zaawansowanych systemów detekcyjnych, opartych na analizie oddziaływań fal z cząstkami. W wyniku tych interakcji w obszarze wibracyjno-rotacyjnym wiązań atomowych w cząsteczkach powstają obszary zwiększonej absorpcji, co manifestuje się jako linie absorpcyjne. Na rys.1 przedstawiono intensywność absorpcji w zależności od długości fali dla cząsteczek związanych z monitorowaniem środowiska, kontrolą procesów przemysłowych oraz diagnostyką medyczną. W wykorzystaniu właściwości absorpcji cząsteczek leży potencjał do dokładnej detekcji gazów cieplarnianych obecnych w atmosferze. Przykładowo, dwutlenek węgla (CO_2) posiada charakterystyczne linie absorpcyjne na długościach fali $4,26\mu\text{m}$ oraz $14-16\mu\text{m}$, podczas gdy metan (CH_4) absorbuje fale o długościach $3,25\mu\text{m}$ i $7,8\mu\text{m}$ [2]. W zakresie

MIR spektroskopia znajduje szerokie zastosowanie również w medycynie. Analiza wydychanego powietrza pozwala na wykrycie pewnych związków, takich jak amoniak czy aceton, co ma znaczenie m.in. w diagnostyce medycznej. Badania takie, jak [3], wykazują związek pomiędzy zawartością amoniaku w wydychanym powietrzu a chorobami nerek czy wrzodami przewodu pokarmowego. Analogicznie, analiza zawartości acetonu we krwi i wydychanym powietrzu może być wykorzystana do diagnostyki cukrzycy [4]. Taka metoda wykrywania opiera się na charakterystycznych liniach absorpcyjnych acetonu znajdujących się na długościach 3,4 μm , 5,8 μm , 7,3 μm oraz 8,2 μm . Dalsze zastosowania diagnostyczne obejmują wykrywanie chorób, w tym raka, poprzez analizę spektroskopową tkanek in vivo w zakresie 5,5-11 μm [5]. Zastosowanie tego typu analizy oznacza minimalizację konieczności przeprowadzania bolesnych procedur, takich jak biopsje lub pobieranie próbek krwi, co przekłada się na mniejszy dyskomfort i stres pacjenta. Co więcej wyniki badań są dostępne niemal natychmiastowo, co prowadzi do szybszego rozpoczęcia procesu leczenia zwiększając szanse na wyleczenie. Przemysł także korzysta z potencjału MIR, na przykład w kontroli procesów, takich jak produkcja benzyny, gdzie analizowane są spektra w zakresie około 14 μm [6].



Rysunek 1. Wykres intensywności absorpcji wybranych cząsteczek w funkcji długości fali [7]

1.1.3. Zastosowanie fal z zakresu MIR w obróbce polimerów

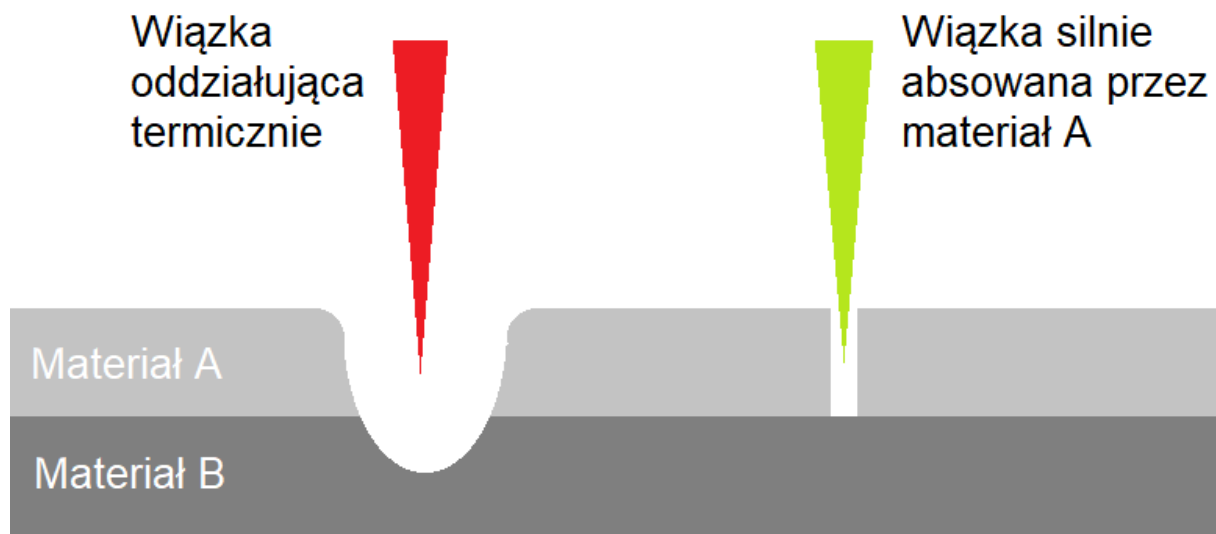
Fale z zakresu MIR znajdują również zastosowanie w przemyśle, zwłaszcza w kontekście obróbki materiałów, głównie polimerów. W miarę jak elementy poddawane obróbce stają się coraz mniejsze, tradycyjne metody oparte na ścieraniu czy mechanicznym cięciu stają się niewystarczające. Rozwiązaniem tego problemu jest wykorzystanie mikroobróbki

laserowej. W trakcie obróbki laserowej, wykorzystywana jest ablacja materiału. Proces ten, oparty na wymianie energii i masy, prowadzi do istotnych zmian strukturalnych i chemicznych w materiale, wynikających z absorpcji energii cieplnej. Przykłady takich zmian to depolimeryzacja organicznych składników związku, topnienie, parowanie oraz sublimacja materiału. Ablacja jest stosowana w wielu procesach, takich jak grawerowanie, cięcie polimerów, tworzenie otworów oraz w fotolitografia. Więcej informacji na temat ablacji można znaleźć w [8].

Standardowym podejściem w mikroobróbce laserowej jest wykorzystanie układów laserowych pracujących w zakresie MIR, a w szczególności zastosowanie laserów gazowych (CO_2). Z uwagi na ich zdolność do generowania wysokiej mocy oraz efektywną absorpcję materiałów polimerowych w zakresach długości fal $9,3\mu\text{m}$ i $10,6\mu\text{m}$, są one powszechnie stosowanymi narzędziami. Niemniej jednak problemem pozostaje wielkość obszaru poddawanego ablacji. Pierwszym ograniczeniem jest tutaj długość fali, która wprost proporcjonalnie wpływa na wielkość oświetlanego obszaru. Drugim ograniczeniem jest czas trwania impulsu, który w przypadku laserów CO_2 wykorzystywanych do mikroobróbki, wynosi zazwyczaj powyżej mikrosekundy. Jeśli polimer jest nagrzewany przez zbyt długi czas, ciepło dostarczone do niego jest przekazywane do otaczających go cząsteczek, co może prowadzić do uszkodzeń lub nawet stopienia struktury. Taka sytuacja wpływa na obniżenie jakości obrabianej krawędzi oraz utrudnia precyzyjną mikroobróbkę.

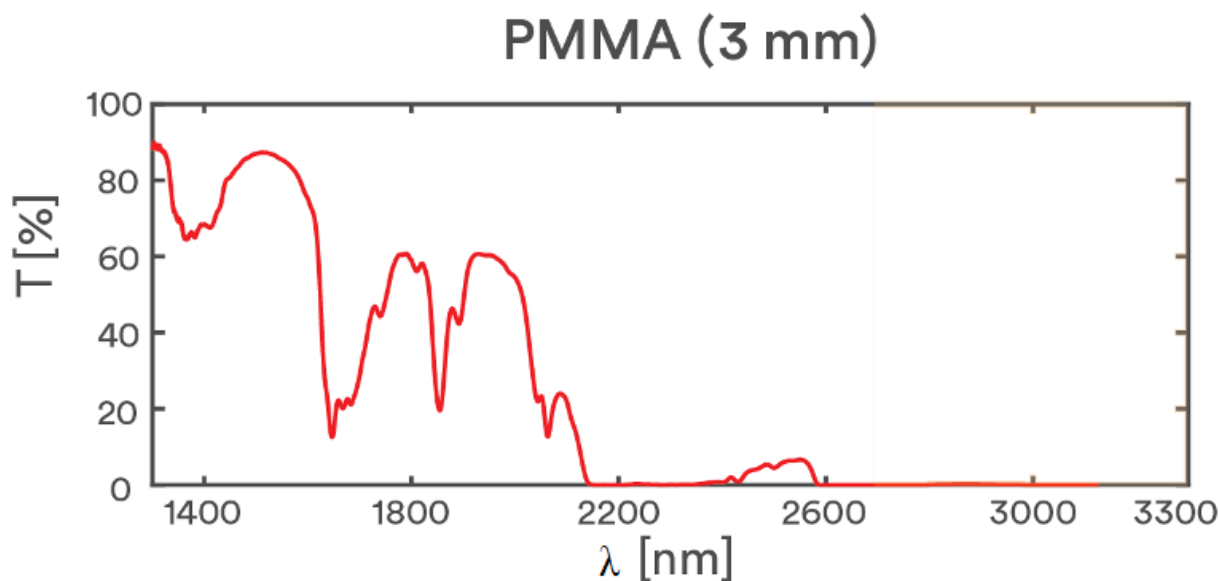
W celu przeciwdziałania omówionym ograniczeniom, rozwiązaniem może okazać się wykorzystanie impulsowych laserów pracujących w zakresie MIR, generujących fale z zakresów, które są silnie absorbowane przez materiał poddawany obróbce. Warunkiem jest tutaj zastosowanie układów laserowych o czasie trwania krótszym niż w przypadku laserów CO_2 oraz generujących fale, które są silniej absorbowane przez materiał poddawany obróbce. Generacja impulsów laserowych o długościach fali MIR oraz czasie trwania rzędu nanosekund umożliwi istotne poprawienie jakości cięć poprzez redukcję oddziaływań termicznych między różnymi obszarami materiału. W przypadku laserów CO_2 stosowanych w mikroobróbce, skupiona wiązka powoduje podgrzewanie materiału, prowadząc do powstania obszaru ablacji o zaokrąglonych brzegach. Długi czas trwania impulsu oraz poziom absorpcji materiału powoduje brak możliwości precyzyjnej kontroli uszkodzeń poszczególnych warstw materiału. Taki scenariusz został zobrazowany na rys.4 po lewej stronie. Innym podejściem jest zastosowanie impulsowych laserów o długościach fali MIR, które są silnie absorbowane przez materiał (rys.4, strona prawa). W przeciwieństwie do fal generowanych przez lasery CO_2 , które są absorbowane w podobnym stopniu przez większość polimerów, fale z innych zakresów MIR

są absorbowane z różnym natężeniem. Precyzyjny dobór promieniowania z tego zakresu pozwala na wykorzystanie różnic w absorpcji poszczególnych materiałów, otwierając możliwości obróbki materiałów wielowarstwowych w sposób celowy i kontrolowany. Ze względu na silną absorpcję materiału głębokość penetracji lasera jest w takim przypadku niższa niż w przypadku lasera CO₂. Ponadto, użycie impulsowych laserów pozwala na zmniejszenie czasu oddziaływania termicznego w obszarze wokół ablacji co umożliwia uzyskanie precyzyjnej obróbki.



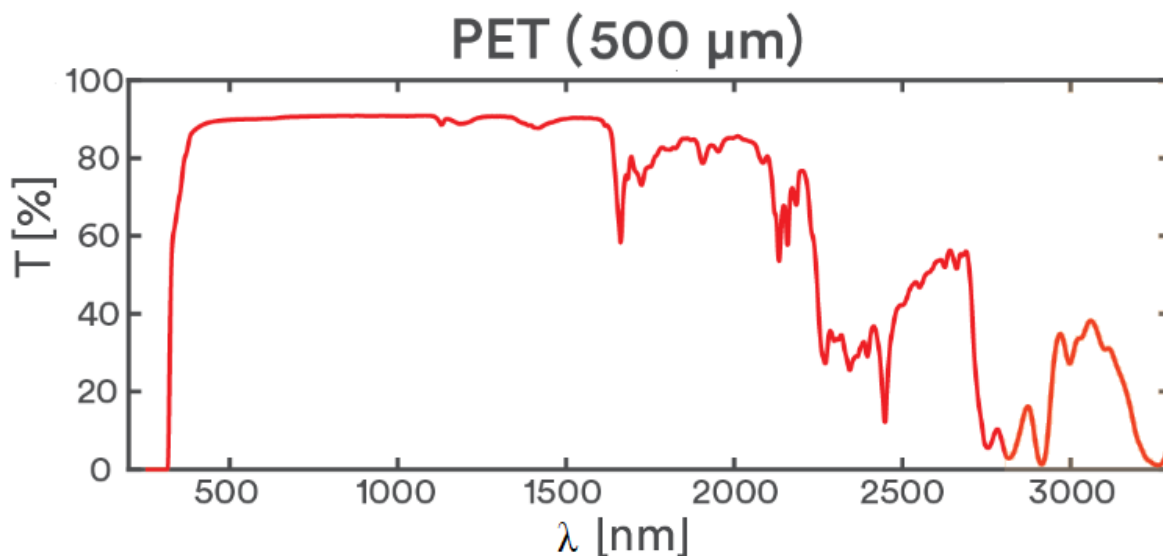
Rysunek 2. Oddziaływanie wiązki laserowej z materiałem

Na rysunkach 5-7 przedstawiono parametry transmisyjne popularnych związków polimerowych, których maksima absorpcyjne przypisane są do zakresu spektralnego MIR (około 3 μ m). Na rys.5 zaprezentowano spektrum transmisyjne związku PMMA (polimetakrylan metylu), znanego również jako szkło akrylowe. PMMA jest wykorzystywane m.in. do produkcji osłon, barier, soczewek oraz powłok zewnętrznych dla światłowodów. Związek ten charakteryzuje się silną absorpcją w zakresie około 3 μ m.



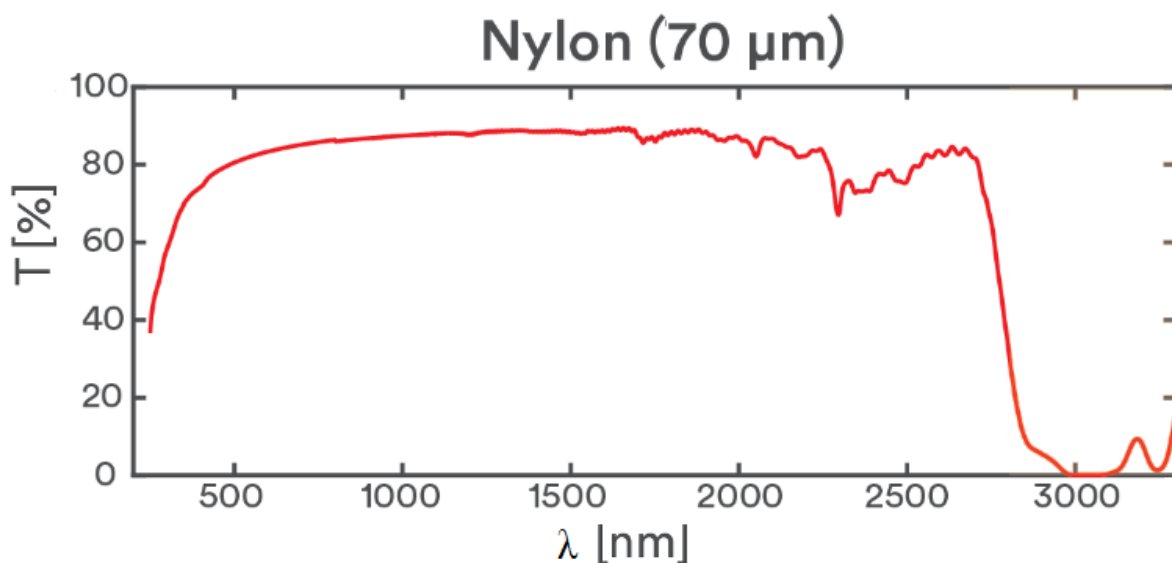
Rysunek 3. Spektrum transmisyjne 3mm związku PMMA [9]

Rys.6 przedstawia spektrum transmisyjne związku PET (politereftalanu etylenu), używanego w branży spożywczej do przechowywania żywności oraz w przemyśle odzieżowym do produkcji włókien syntetycznych. Najwyższe poziomy absorpcji dla PET występują w okolicach długości fal 2,9 μm oraz 3,5 μm .



Rysunek 4. Spektrum transmisyjne 500 μm związku PET [9]

Natomiast nylon, którego spektrum transmisyjne zostało przedstawione na rys.7, znajduje zastosowanie m.in. przemyśle odzieżowym. Niemniej jednak ze względu na jego lekkość, trwałość i odporność, znalazł także zastosowanie jako substytut elementów metalowych, np. w przemyśle motoryzacyjnym. Maksimum absorpcji dla nylonu przypada na długość fali około 3 μm .



Rysunek 5. Spektrum transmisyjne 70 μm związku nylonu [9]

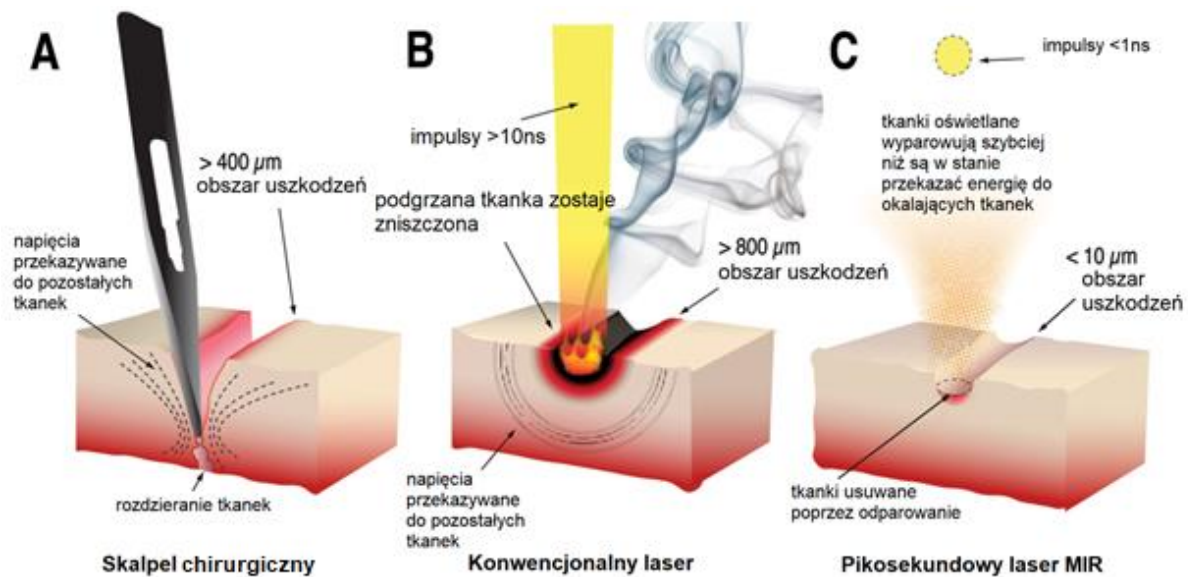
Wykorzystanie impulsowych źródeł laserowych z zakresu 3 μm otwiera perspektywy uzyskania wysokiej jakości cięć oraz precyzyjnej mikroobróbki wspomnianych materiałów. Potencjalne zastosowania laserów MIR obejmują m.in. cięcie szkła akrylowego, wytwarzanie soczewek, mikroobróbkę powierzchni oraz usuwanie pokryć z włókien światłowodowych bez konieczności stosowania elementów mechanicznych.

Ostatnia z wymienionych aplikacji jest szczególnie istotna w przypadku elementów światłowodowych, które wymagają precyzyjnego usunięcia pokrycia z włókna, takich jak np. siatki Bragga czy sprzęgacze światłowodowe. Usunięcie pokrycia z niewielkiego fragmentu włókna, zwłaszcza gdy znajduje się on wewnątrz dłuższego odcinka, stanowi wyzwanie związane z ryzykiem uszkodzenia struktury i przerwaniem ciągłości włókna. Poprzez zastosowanie selektywnej mikroobróbki możliwe jest dokładne, ablacyjne usunięcie pokrycia jedynie w wybranym miejscu, co otwiera nowe możliwości.

Wprowadzenie tego rodzaju podejścia może również zrewolucjonizować usuwanie pokryć z włókien fluorkowych. Tradycyjne metody mechaniczne są często trudne do zastosowania względem tych włókien i niosą ryzyko ich uszkodzenia. Dlatego też sięga się po rozpuszczalniki chemiczne, które rozpuszczają pokrycie, umożliwiając jego usunięcie. Należy jednak pamiętać, że rodzaj rozpuszczalnika musi być odpowiednio dobrany do materiału pokrywającego włókno. Największą wadą tego typu obróbki jest żrący charakter oraz toksyczność stosowanych rozpuszczalników oraz potrzeba ich ciągłego uzupełniania. Mikroobróbka selektywna może stanowić skuteczną alternatywę, umożliwiając usunięcie tylko warstwy pokrycia włókna bez ingerencji w strukturę podłoża.

1.1.4. Zastosowanie fal z zakresu MIR w medycynie

Fale z zakresu MIR znalazły zastosowanie również w medycynie. Silna absorpcja fal z zakresu podczerwonego niektórych cząsteczek, a w szczególności cząsteczek wody, jest wykorzystywana m.in. do cięcia tkanek. Wykorzystanie krótkich, silnie skupionych impulsów laserowych generujących w zakresie absorpcji molekuł wody zmniejsza głębokość penetracji, co prowadzi do zwiększenia dokładności cięcia oraz zmniejszenia uszkodzeń tkanki otaczającej. Stosując takie podejście uzyskuje się kontrolowane uszkodzenia tkanki w miejscu naświetlania przy jednoczesnym zachowaniu tkanek okalających w stanie nienaruszonym.



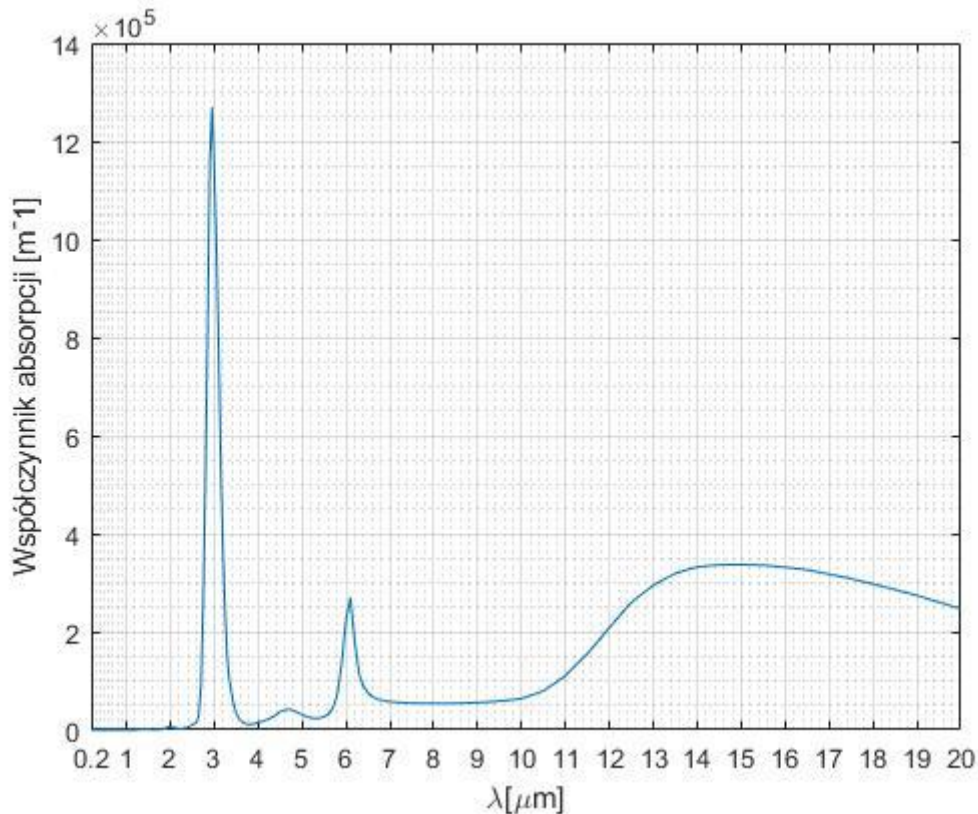
Rysunek 6. Analiza procesu cięcia tkanek z wykorzystaniem różnych narzędzi: (A) skalpel chirurgiczny wykorzystujący siłę nacisku do rozdzielania tkanek (prowadzi to do uszkodzeń tkanek okalających, krwawienia oraz obszaru uszkodzeń >400μm), (B) konwencjonalny laser chirurgiczny tnący poprzez podgrzanie tkanek w obszarze oświetlania aż do ich wypalenia (nie wywołuje krwawienia ale obszar uszkodzeń termicznych wynosi >800μm), (C) pikosekundowy laser MIR działający na zasadzie ablacji (nie wywołuje krwawienia, minimalne uszkodzenia tkanki okalającej) [10]

Porównanie działania skalpela laserowego z innymi dostępnymi w chirurgii rozwiązaniami zostało przedstawione na rys.6. W pracy [10] porównano różne metody cięcia tkanek. Tradycyjne podejście, polegające na użyciu skalpela chirurgicznego, prowadzi do rozerwania tkanek pod wpływem nacisku. W rezultacie tworzy się obszar, w którym oprócz rozerwanych tkanek znajdują się również uszkodzone obszary tkanki, które zostały zmiażdżone pod naciskiem sąsiadujących tkanek. Wszystko to skutkuje powstaniem uszkodzeń na obszarze większym niż 400μm oraz prowadzi do krwawienia. W przypadku konwencjonalnych laserów używanych w medycynie (takich jak lasery CO₂ generujące promieniowanie o długości fali 10,6μm), obszar uszkodzenia jest niemal dwukrotnie większy (wpływa na to uszkodzenie

termiczne tkanek okalających miejsce naświetlania). Jednak dzięki osiągnięciu wysokiej temperatury dochodzi do natychmiastowej kauteryzacji naświetlanego obszaru, co minimalizuje krwawienie. Jest to istotną zaletą tego typu systemów.

W celu minimalizacji obszaru uszkodzeń termicznych konieczne jest dostarczanie energii wystarczającej do ablacji oświetlanego obszaru przy jednoczesnym skróceniu czasu trwania ekspozycji. To podejście umożliwi przeprowadzenie procesu cięcia, jednocześnie minimalizując procesy przewodzenia ciepła do tkanek otaczających. Wykorzystanie impulsowych źródeł laserowych generujących w obszarze średniej podczerwieni (MIR) pozwala na osiągnięcie większej efektywności procesów ablacyjnych niż w przypadku laserów CO₂. W miarę wzrostu stopnia absorpcji danej długości fali przez cząsteczkę, wzrasta również moc absorbowana przez tkankę, co prowadzi do obniżenia energii wymaganej do indukowania ablacji w danym obszarze. Skutkuje to skróceniem czasu dostarczania mocy potrzebnej do wywołania ablacji, ograniczając jednocześnie czas oddziaływań cieplnych pomiędzy tkankami.

W przypadku skalpeli laserowych, ze względu na dużą zawartość wody w tkance żywej, ostateczny efekt ablacyjny jest w dużej mierze zależny od współczynnika absorpcji wody w stanie ciekłym. Współczynnik ten przedstawiono na rys.7. Widoczne jest, że największa absorpcja fal przez cząsteczki wody występuje w obszarze około 2,95 μm. Porównując stopień absorpcji na tej długości fali z omówioną już długością fali 10,6 μm, możemy stwierdzić, że absorpcja fal przez cząsteczki wody jest w tym obszarze około szesnastokrotnie wyższa. Przekłada się to na znacznie efektywniejsze doprowadzenie energii do tkanki a tym samym łatwiejsze osiągnięcie progu ablacji.



Rysunek 7. Wykres zależności współczynnika absorpcji od długości fali dla wody w stanie ciekłym, na podstawie danych z [11]

Na proces uszkodzenia tkanki wpływa również czas trwania impulsu. Jak już wcześniej zaznaczono im krótszy czas ekspozycji tkanki na promieniowanie, tym mniejsze uszkodzenie termiczne następuje. Krótkie, wysokoenergetyczne impulsy promieniowania mogą dostarczać energię wystarczającą do procesu ablacji. Równocześnie czas trwania impulsu może pozostać na tyle krótki, że ciepło nie jest w stanie oddziaływać negatywnie na otaczające tkanki, co minimalizuje ryzyko ich uszkodzenia.

Podsumowując, laser impulsowy działający w obszarze silnej absorpcji wody umożliwia precyzyjne, ablacyjne cięcie z obszarem uszkodzeń poniżej $10\mu\text{m}$ [10], zachowując przy tym minimalne uszkodzenie tkanek okalających oraz eliminując krwawienie. Warto zaznaczyć, że jest to szczególnie istotne w przypadku operacji na narządach wewnętrznych, charakteryzujących się znacznym unaczynieniem, takich jak wątroba, czy też przy operacjach w obszarach, gdzie każdy mikrometr przestrzeni ma ogromne znaczenie, jak ma to miejsce w przypadku tkanki mózgowej. Rozwój źródeł światła generujących w tym zakresie jest więc wysoce wskazany.

1.1.5. Zastosowanie fal z zakresu MIR w aplikacjach wojskowych

Kolejną grupą zastosowań dla laserów generujących fale $>2,5\mu\text{m}$ są zastosowania militarne. Ze względu na znaczenie technologii wojskowej dla obronności informacji na temat tego typu zastosowań są wciąż słabo dostępne. Ze znanych zastosowań warto wymienić pracujące w zakresie 2,8 oraz $3,4\mu\text{m}$ lasery chemiczne oparte odpowiednio na fluorowodorce oraz fluorku deuteru [12]. Lasery te generują promieniowanie ciągłe o mocy rzędu megawatów. Zostały one zastosowane np. w systemach przechwytyjących broń nuklearną. Innym przykładem są tutaj lasery mające neutralizować broń naprowadzaną termicznie. Ich zadaniem jest oślepienie systemów detekcyjnych stosowanych w tego typu pociskach. Choć rakiety naprowadzane termicznie nie są nowym wynalazkiem, obrona przed nimi nie jest trywialnym problemem. Tego typu pociski są naprowadzane na ciepło wytwarzane np. przez silniki maszyn powietrznych i przez wiele lat jedyną metodą obrony przed nimi było wykorzystywanie flar generujących ciepło, które miały zmylić układ sterowania pocisku. Alternatywnym podejściem jest wykorzystanie wiązki laserowej o dużej energii, która miałaby oślepić lub uszkodzić detektory w głowicy pocisku. Jednak dostępność systemów laserowych generujących fale z zakresu detekcyjnego omawianych głowic do niedawna nie pozwalała na stosowanie tego typu rozwiązań. Dopiero rozwój układów laserowych generujących fale w zakresie MIR pozwolił na skuteczne zastosowanie tej metody w systemach obronnych [13]. Przykładem takiego systemu jest system LAIRCM (ang. Large Aircraft Infrared Countermeasures). LAIRCM koncentruje wiązkę laserową o dużej intensywności na głowicy naprowadzającej nadlatujących pocisków, w celu ich oślepienia i zmiany kursu z pierwotnego celu. System ten został zaprojektowany w celu ochrony dużych statków powietrznych przed pociskami wystrzeliwanymi z broni ręcznej, wystrzeliwanymi z pojazdów oraz innymi pociskami naprowadzanymi w podczerwieni, gdy samoloty operują blisko ziemi np. podczas startu i lądowania, a także podczas operacji na niskim pułapie i tankowania w powietrzu.

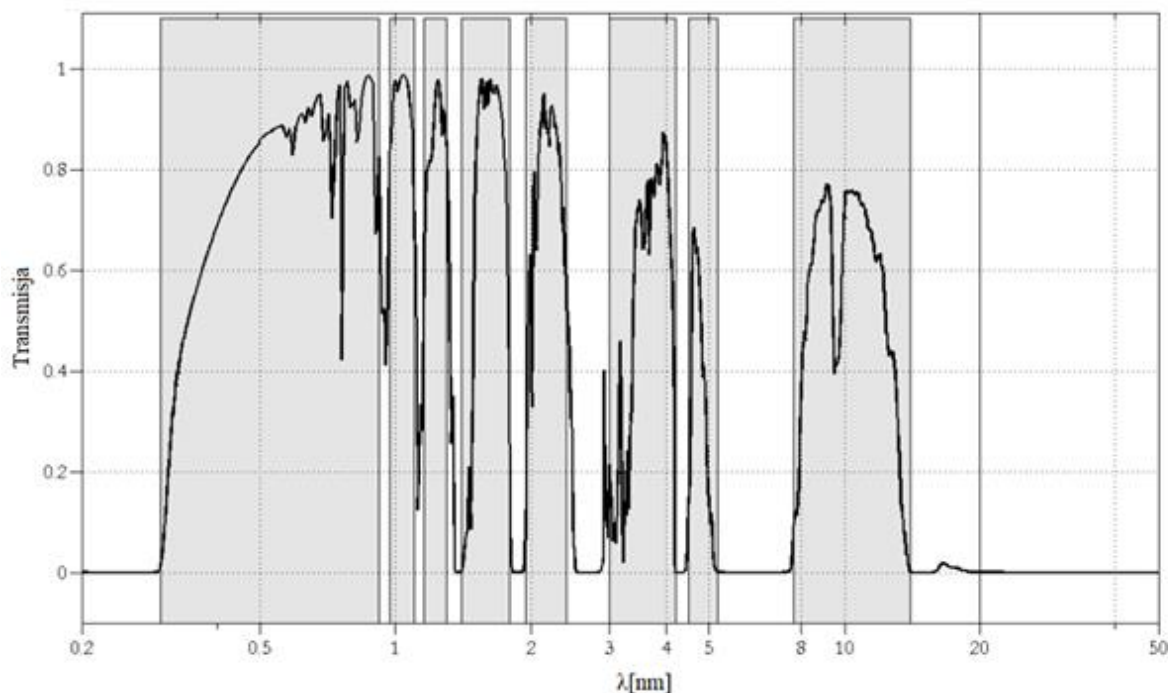


Rysunek 8. System ochrony przed pociskami LAIRCM [14]

Omawiając zastosowania militarne warto jest również wspomnieć o zastosowaniach spektroskopowych wykorzystywanych w tym obszarze. Mowa tutaj o wykrywaniu związków potencjalnie niebezpiecznych. Dzięki analizie spektralnej możliwe jest bowiem wykrywanie np. materiałów wybuchowych, które posiadają w swoim składzie związki, o charakterystycznych liniach absorpcyjnych w obszarze MIR [15].

1.1.6. Zastosowanie fal z zakresu MIR w telekomunikacji

Innym zastosowaniem fal elektromagnetycznych z zakresu MIR jest zastosowanie telekomunikacyjne związane z transmisją w wolnej przestrzeni. Dzięki wykorzystaniu fal z zakresu MIR, zwłaszcza z zakresu $3\text{-}5\mu\text{m}$ oraz $8\text{-}13\mu\text{m}$ możliwe jest stworzenie wydajnych i niezawodnych systemów telekomunikacyjnych działających w wolnej przestrzeni [16]. Komunikacja w wolnej przestrzeni niesie ze sobą kilka ważnych problemów związanych z bezpieczeństwem i zakłóceniami. W kontekście bezpieczeństwa ważne jest zastosowanie fal o długości bezpiecznych dla oka ludzkiego. Przyjęło się, że długości fali $>1,4\mu\text{m}$ są już bezpieczne dla oka ludzkiego ze względu na silną absorpcję tych długości fal przez rogówkę i soczewkę oka (tak silna absorpcja zapobiega uszkodzeniu elementów detekcyjnych, które są czułe na silne światło tj. siatkówki) [17]. Jeśli chodzi natomiast o zakłócenia transmisji sygnałów w wolnej przestrzeni to mają one kilka źródeł: absorpcja sygnału w atmosferze (głównie poprzez absorpcję sygnału przez parę wodną), zakłócenia związane z deszczem i mgłą (wodą w stanie ciekłym), a także rozpraszanie spowodowane obecnością cząstek stałych, zanieczyszczeń i efektem rozpraszania Rayleigha. Na rys.9 zaprezentowano zależność transmisji sygnału w atmosferze od długości fali.



Rysunek 9. Wykres zależności transmisji w atmosferze od długości fali [18]

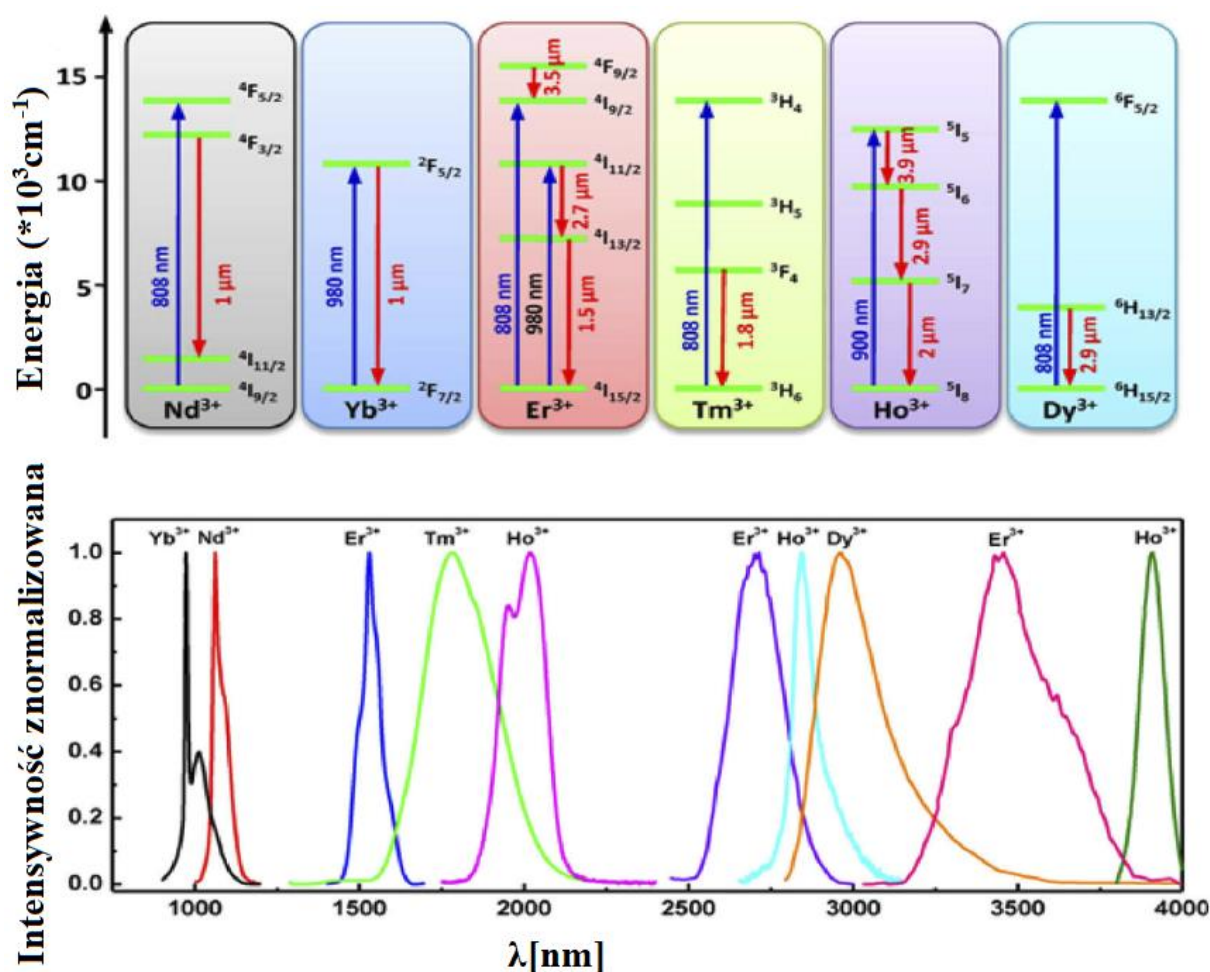
Zgodnie z badaniami [19] zastosowanie fal o długości ok. $3,6\mu\text{m}$ pozwala na osiągnięcie tłumień mniejszych o 26% w stosunku do fali $1,5\mu\text{m}$ w przypadku dobrych warunków pogodowych. Dodatkowo fale z wyższych zakresów spektralnych są mniej podatne na trudne warunki atmosferyczne takie jak np. mgła.

Oprócz przedstawionych powyżej problemów związanych z transmisją w wolnej przestrzeni pozostaje oczywiście kwestia możliwości konstrukcji układów laserowych z tego zakresu spektralnego. Biorąc pod uwagę wszystkie te czynniki najlepszym wyborem wydaje się właśnie zakres spektralny $3\text{-}5\mu\text{m}$ oraz $8\text{-}13\mu\text{m}$. Pomimo niskiej dostępności tanich, prostych, niezawodnych oraz ogólnodostępnych źródeł i detektorów z zakresu MIR rozwiązanie to nie powinno być lekceważone ze względu na potencjale korzyści jakie ze sobą niesie.

1.2. Układy laserowe wykorzystywane w generacji fal $3\mu\text{m}$

W niniejszym podrozdziale autor skupi się na znanych źródłach sygnałów o długościach fali ok. $3\mu\text{m}$. Omówione zostaną zarówno układy pracy ciągłej CW (ang. continuous wave) jak i impulsowej.

W rozdziale 1.1 zostały przytoczone obszary zastosowań fal z zakresu ok. $3\mu\text{m}$. W kontekście określonych zastosowań, które wymagają fal o ściśle określonych właściwościach spektralnych, systemy laserowe wykorzystujące włókna domieszkowane jonami z grupy ziem rzadkich wydają się szczególnie obiecujące. W zależności od zastosowanej domieszki generowane mogą być różne długości fali. Na rys.10 przedstawiono uproszczone diagramy energetyczne oraz spektra emisyjne najpopularniejszych jonów ziem rzadkich wykorzystywanych w układach laserowych pracujących w zakresie NIR/MIR.

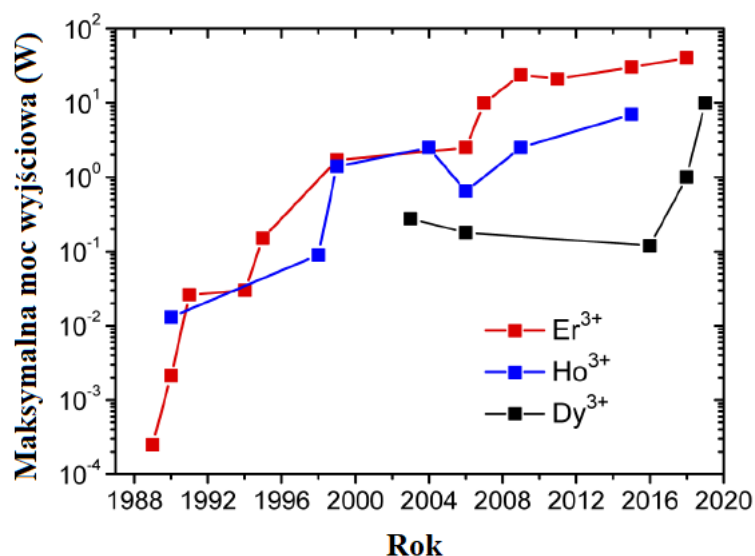


Rysunek 10. Uproszczone wykresy wybranych poziomów energetycznych oraz spektra emisyjne dla najpopularniejszych pierwiastków ziem rzadkich wykorzystywanych w układach laserowych [1]

Przy analizie obszaru $3\mu\text{m}$ na szczególną uwagę zasługują domieszki Er³⁺, Ho³⁺ oraz Dy³⁺, które pozwalają na uzyskanie akcji laserowej w tym zakresie. Domieszka Er³⁺ umożliwia generację fal z zakresu 2,55-2,95 μm oraz 3,25-3,6 μm , domieszka Ho³⁺ generację fal z zakresu 2,7-3,1 μm , domieszka Dy³⁺ 2,8-3,75 μm . Warto podkreślić, że każda z wymienionych domieszek charakteryzuje się na tyle unikalnym spektrum absorpcyjnym oraz emisyjnym, że

dokładny wybór odpowiedniej domieszki stanowi kluczowy element w osiągnięciu generacji na określonej długości fali, zachowując przy tym wysoką efektywność procesu.

Pierwszy laser światłowodowy emitujący w zakresie $2,7\mu\text{m}$ został zrealizowany w czerwcu roku 1988 [20]. Naukowcy wykorzystali światłowód fluorkowy domieszkowany jonami erbu o koncentracji 0,086 mol%, który został wzbudzony laserem argonowym na długości fali 476,5nm. Badacze nie podali uzyskanej mocy wyjściowej a jedynie zaznaczyli, że udało im się osiągnąć akcję laserową we włóknie światłowodowym. W kolejnych latach obserwowano wzrost poziomu mocy generowanej przez układy laserowe z tego zakresu spektralnego. Na rys.11 przedstawiono zaczerpnięty z publikacji [1] wykres obrazujący ewolucję mocy wyjściowej prezentowanych w publikacjach układów laserowych oraz typy domieszki jakie były wykorzystywane do generacji fal z zakresu $\sim 3\mu\text{m}$. Początkowo układy laserowe wykorzystywały głównie domieszkę jonów erbu. Wartości mocy generowane przez te układy stopniowo rosły z ułamków mW do ok. 42W. Od wczesnych lat 90 XX wieku uwaga naukowców skupiła się również na układach wykorzystujących domieszkę jonów holmu. Zainteresowanie społeczności naukowej włóknami domieszkowanymi jonami erbium i holmu wpłynęło na dostępność komponentów do budowy układów laserujących oraz różnych typów włókien światłowodowych domieszkowanych tymi jonami, co zaowocowało stale rosnącymi wartościami generowanej mocy. Historycznie, lasery wykorzystujące domieszkę jonów dysprozu pojawiły się nieco później. Jednakże ich rozwój jest szczególnie istotny z uwagi na charakterystykę pasma emisyjnego. Obszar emisji tych laserów jest przesunięty ku dłuższym długościom fal w porównaniu z domieszkami erbu czy holmu, obejmując zakres długości fal $2,7\text{-}2,9\mu\text{m}$. Ponadto, włókna domieszkowane jonami dysprozu wyróżniają się wyższą emisją w obszarze maksimum absorpcji wody oraz materiałów polimerowych, takich jak PMMA czy nylon.

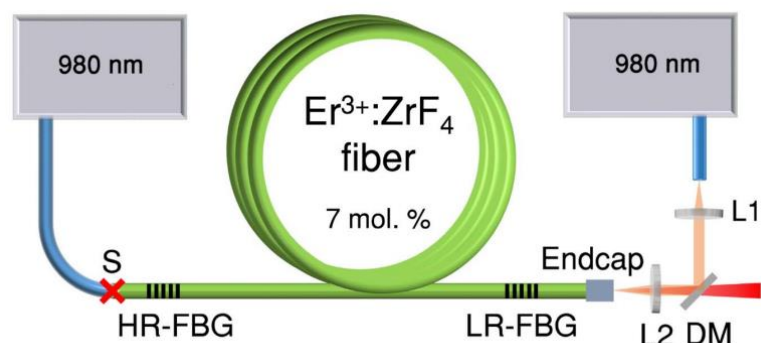


Rysunek 11. Wykres zależności maksymalnej mocy wyjściowej laserów generujących w zakresie $\sim 3\mu\text{m}$ na przestrzeni lat [1]

1.2.1. Źródła fal z zakresu $\sim 3\mu\text{m}$ pracy ciągłej

Analizując dostępne publikacje naukowe traktujące o laserach pracy ciągłej generujących w zakresie $\sim 3\mu\text{m}$ można dostrzec, że wykorzystują one głównie trzy wspomniane wcześniej włókna aktywne domieszkowane jonami Er^{3+} , Ho^{3+} oraz Dy^{3+} .

Doniesienia literaturowe pokazują, że największy postęp został osiągnięty dla włókien domieszkowanych jonami erbu. Włókna te są dostępne w wielu formach, a co najważniejsze w postaci włókien z podwójnym płaszczem, co umożliwia uzyskanie wysokich mocy wyjściowych. W pracy [17] autorzy przeprowadzili badania nad eksperymentalnym układem lasera o długości fali około $2,8\mu\text{m}$. W eksperymencie, którego schemat został przedstawiony na rys.12, jako medium aktywne, wykorzystano włókno ZBLAN z podwójnym płaszczem firmy Le Verre Fluore o długości ok. $6,5\text{m}$. Włókno było domieszkowane erbem o 7 molowym stężeniu procentowym (7 mol %). Rdzeń włókna miał $15\mu\text{m}$ średnicy podczas gdy płaszcz $220/240\mu\text{m}$.



Rysunek 12. Schemat eksperymentalny 42W lasera światłowodowego generującego w zakresie MIR opisanego w [17]

Włókno wzbudzone z wykorzystaniem dwóch zestawów pomp wielomodowych generujących fale o długości ok. 980nm o mocach ok. 145W (lewa) oraz 55W (prawa). Pierwszą z diod dołączono do włókna aktywnego poprzez zgrzew, podczas gdy moc pochodząca z drugiej doprowadzono z wykorzystaniem optyki objętościowej (soczewek L1, L2 oraz zwierciadła dichroicznego DM). Rezonator laserowy tworzyły dwa reflektory Bragga zapisane bezpośrednio na włóknie aktywnym. Jeden o wysokim współczynniku odbicia $\geq 99,5\%$ (HR-FBG) i drugi o niskim współczynniku odbicia 8% (LR-FBG). Włókno było chłodzone na całej długości, a jego czoło zostało dodatkowo zabezpieczone przed degradacją poprzez dodanie odcinka włókna wielomodowego AlF_3 . Tak przygotowany układ generował fale o długości ok. $2,82\mu\text{m}$ oraz moc dochodzącą do 42W. Jest to znaczący postęp w stosunku do wcześniejszych prac [21] (moc średnia 5,2W) oraz [22] (moc średnia 9W).

Autorzy wspomnianych prac zwracają uwagę na temperaturę pracy układu. Zgodnie z [21, 22] próg uszkodzenia dla szkieł ZBLAN domieszkowanych jonami erbu wynosi ok. $25\text{MW}/\text{cm}^2$. Silne domieszkowanie włókna, przekłada się na silną absorpcję mocy doprowadzanej do układu, co w połączeniu z gorszymi, niż ma to miejsce w przypadku włókien krzemionkowych, właściwościami termicznymi włókien fluorkowych powoduje, że chłodzenie układów laserowych wykorzystujących włókna aktywne ZBLAN jest niezbędne. Szczególnie narażone na uszkodzenie jest czoło włókna, które musi być dodatkowo chronione przed wpływem wilgoci powodującej jego degradację. Włókna fluorkowe są wysoce reaktywne z wodą. Jak wyjaśniono w [23]. Podczas kontaktu wody z włóknem ZBLAN zachodzą trzy procesy: składniki szkła rozpuszczają się, woda penetruje wewnątrz struktury krystalicznej a na powierzchni mającej kontakt z wodą dochodzi do krystalizacji. Szczególnie niepożądanym zjawiskiem jest penetrowanie struktury szkła przez wodę. Zjawisko to jest szczególnie destruktywne, z uwagi na bliskość maksimum absorpcyjnego wody ($2,94\mu\text{m}$) w stosunku do fal generowanych w układzie laserowym. Podczas akcji laserowej do końcówki włókna dostają

się cząsteczki wody. Cząsteczki te pochłaniają moc generowaną przez laser zwiększając swoją temperaturę. Skutkuje to wzrostem temperatury końca włókna. Co więcej, zjawisko dyfuzji cząsteczek wody jest zależne od temperatury. Wraz ze wzrostem temperatury wzrasta również poziom dyfuzji cząsteczek wody. Zwiększenie ilości cząsteczek wody powoduje natomiast zwiększenie absorpcji fal generowanych przez laser i wzrost temperatury. Raz zainicjowany proces narasta w czasie co w efekcie prowadzi do uszkodzenia czoła włókna.

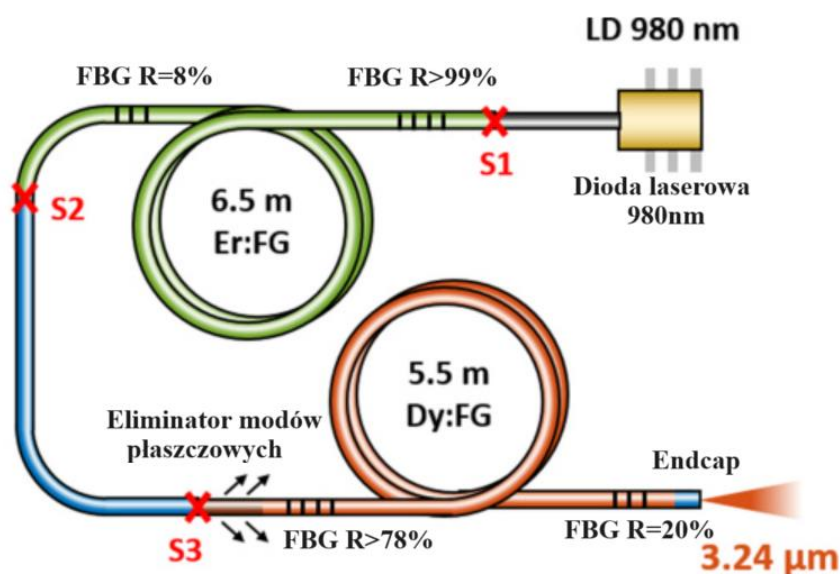
Znanym sposobem uniknięcia dyfuzji jest wspomniane już umieszczanie na końcu włókna krótkich fragmentów niedomieszkowanych szkieł, takich jak np. AlF_3 czy też kryształów CaF_2 , które znacząco zwiększają żywotność włókna poprzez odseparowanie go od atmosfery. Elementy przytwierdzone do końca włókna są nazywane z ang. endcaps a metoda ich wykorzystywania endcapping. Niestety i to rozwiązanie nie pozwala na całkowite zabezpieczenie czoła włókna i zwiększanie poziomu mocy wyjściowej w nieskończoność. Wciąż trwają badania nad znalezieniem innych materiałów, które mogą posłużyć do zabezpieczania czoła włókna czy też innych sposobów, które pozwolą na uzyskanie większych mocy wyjściowych.

Jak pokazano w 1.1 istnieje wiele zastosowań dla fal z zakresu ok. $3\mu m$. Czynnikiem decydującym jest tutaj długość fali, jaką generują układy laserowe. Włókna domieszkowane jonami erbu są również stosowane przy generacji fal dłuższych niż $2,8\mu m$. Jak pokazano w [24] zastosowanie podobnej konstrukcji układu laserowego oraz wzbudzenia dwufalowego ($976nm$ oraz $1976nm$) przy odpowiednio dobranych siatkach Bragga pozwala na uzyskanie układów generujących fale o długości $3,55\mu m$.

Chcąc uzyskać pośrednie długości fal niezbędne jest zastosowanie innej domieszki. Jedną z najpopularniejszych jest wspomniana już domieszka holmu. W większości prac przedstawiających lasery holmowe generujące fale z obszaru MIR wykorzystywany jest rezonator Fabry-Perot, w którym medium aktywne stanowi włókno aktywne a elementami odbijającymi są zwierciadła. Przykładem takiej pracy jest [25], w której to autorzy wykorzystali włókno z podwójnym płaszczem domieszkowane holmem oraz prazeodymem firmy FiberLabs do budowy lasera przestrajalnego generującego w zakresie $2,86-2,98\mu m$ przy mocy dochodzącej do $7,2W$. Jako fale wzbudzające wykorzystano długość $1150nm$ generowaną przez laser iterbowy. Podobnie jak miało to miejsce w omawianych wcześniej pracach, również w tej pracy autorzy podkreślają problem związany z degradacją czoła włókna aktywnego. Przeciwdziałać temu zjawisku miało w ich przypadku zastosowanie nadmuchu suchego powietrza jednak przy wysokich mocach okazało się to niewystarczające. Inne prace traktujące o wykorzystaniu domieszki holmu to [26], [27]. W [26] autorzy zaprezentowali laser

generujący fale o długości $3,22\mu\text{m}$ przy zastosowaniu pobudzenia falą 532nm . Moce osiągnięte przez laser są jednak stosunkowo niskie i wynoszą ok 11mW . W [27] natomiast wykorzystując fale wzbudzającą 888nm badacze uzyskali $3,92\mu\text{m}$ oraz moc 200mW . Zastosowanie domieszki holmu pozwala więc na uzyskanie długości fal nieosiągalnych dla domieszki erbu. Poziomy osiągniętych mocy są jednak dużo niższe niż te osiągnięte z zastosowaniem domieszki erbu.

Trzecią domieszką jaką można zastosować do generacji fal z obszaru $3\mu\text{m}$ jest domieszka dysprozu. Jej główną zaletą jest generacja fal z szerokiego zakresu spektralnego $2,8-3,7\mu\text{m}$. Włókna ZBLAN domieszkowane dysprozem zostały opracowane najpóźniej. Pierwsza publikacja traktująca o laserze światłowodowym wykorzystującym jako medium aktywne włókno domieszkowane dysprozem, zgodnie z [1] powstała w roku 2003, podczas gdy pierwsze publikacje dotyczące włókien domieszkowanych erbem są datowane na rok 1988 a holmem 1989. Z uwagi na tak dużą różnicę w czasie trwania badań, włókna domieszkowane dysprozem wciąż nie są tak dobrze przebadane jak pozostałe włókna. Ze względu na szeroki zakres generowanych fal mają one jednak wysoki potencjał aplikacyjny. Przykładem może być tutaj praca [28], w której to autorzy zaprezentowali laser generujący fale $3,24\mu\text{m}$ o mocy $10,1\text{W}$. Osiągnięta moc, porównując z laserem holmowym generującym w tym samym obszarze spektralnym [26], jest trzy rzędy wyższa. Laser ten charakteryzował się również wysoką efektywnością wynoszącą 58% . Należy jednak zaznaczyć, że długość fali wzbudzającej wynosi tutaj $2,8\mu\text{m}$. Autorzy wykorzystali w swojej pracy $5,5\text{m}$ włókna fluorkowego domieszkowanego dysprozem, które zostało wzbudzone przez dołączony, z wykorzystaniem zgrzewu, laser z włóknem fluorkowym domieszkowanym erbem. Laser ten był natomiast wzbudzany diodą laserową generującą fale 980nm . Rezonator w obu laserach został utworzony z dwóch zwierciadeł Bragga, które zostały naświetlone we włóknie aktywnym. Lasery zostały połączone za pomocą fluorkowego włókna pasywnego zakończonego eliminatorem modów płaszczowych. Koniec włókna domieszkowanego dysprozem został zabezpieczony przed wpływem wilgoci poprzez odpowiednie zakończenie włókna (endcapping). Schemat układu został przedstawiony na rys. 13. Zastosowanie w pełni światłowodowej konstrukcji i połączenie poszczególnych komponentów za pomocą zgrzewów umożliwiło autorom uzyskanie mocy wyjściowej $10,1\text{W}$ ($3,24\mu\text{m}$) przy 25W mocy generowanej przez układ lasera erbowego ($2,83\mu\text{m}$), który stanowił laser wzbudzający. Wynik ten do dziś nie został poprawiony.



Rysunek 13. Schemat układu 10W lasera dysprozowego Dy:FG z [28], S1-S3 oznaczają zgrzewy

Przedstawione w literaturze lasery CW generujące fale z obszaru ok. $3\mu\text{m}$, które osiągały najwyższe moce, w omawianym obszarze spektralnym, w tym te opisane w niniejszym rozdziale zostały zestawione w tab.1.

Tablica 1. Parametry źródeł światła pracy ciągłej generujących $\sim 3\mu\text{m}$

λ [μm]	Domieszka	Typ szkła	λ_{pompy} [μm]	Moc wyjściowa [W]	Efektywność [%]	Oдно́nik
2,82	Er ³⁺	ZBLAN	0,98	42	23	[29]
2,86-2,98	Ho ³⁺		1,15	7,2	29	[25]
3,22	Ho ³⁺		0,53	0,011	2,8	[26]
3,24	Dy ³⁺		2,8	10,1	58	[28]
3,55	Er ³⁺		0,98 i 1,98	5,6	26	[24]
3,92	Ho ³⁺	InF ₃	0,89	0,2	10	[27]

1.2.2. Źródła fal z zakresu $\sim 3\mu\text{m}$ pracy impulsowej

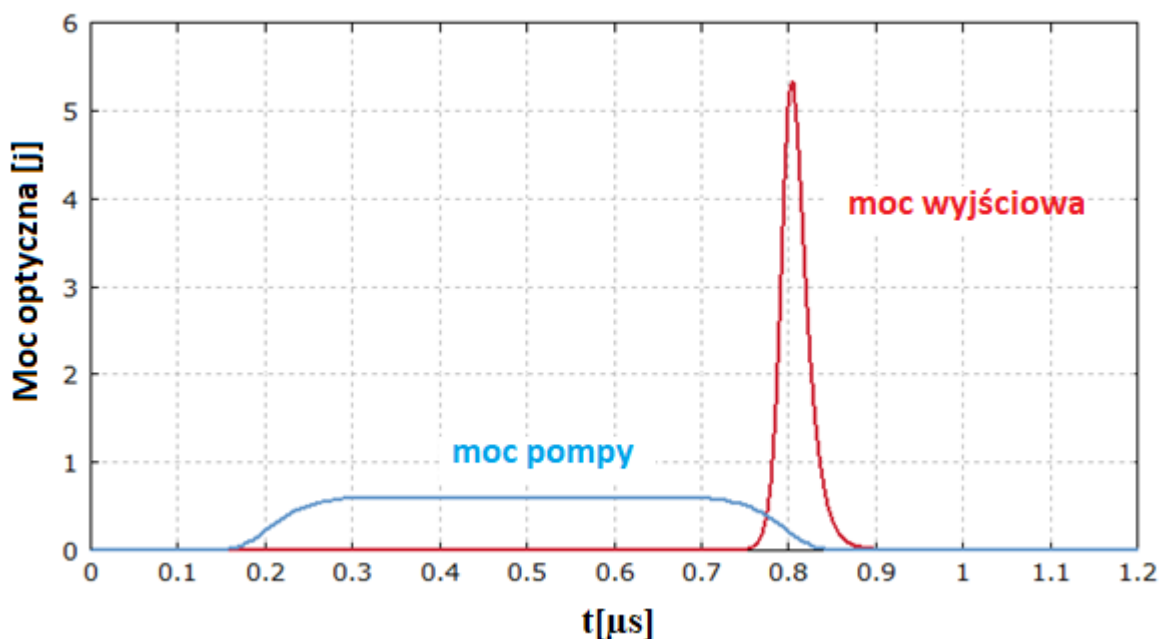
Analizując potencjalne zastosowania fal MIR, które zostały opisane w sekcji 1.1, warto zwrócić uwagę, że większość wspomnianych zastosowań korzysta z laserów impulsowych. Jest to szczególnie widoczne w przypadku spektroskopii, medycyny i obróbki materiałów. Wysoka moc średnia może bowiem prowadzić do degradacji oświetlanego ośrodka, jak i obszarów go okalających.

Najbardziej znane metody uzyskania pracy impulsowej to: modulacja wzmocnienia wnęki rezonansowej (ang. gain-switching), modulacja dobroci wnęki rezonansowej (ang. Q-

switching) oraz synchronizacja modów podłużnych (ang. mode locking). W kolejnych podpunktach opisano każdą z tych metod.

1.2.2.1. Modulacja wzmocnienia

Przebieg procesu kształtowania impulsu z wykorzystaniem modulacji wzmocnienia został przedstawiony na rys.14. W pierwszej fazie, badany ośrodek znajduje się w stanie równowagi termicznej. Wprowadzony do niego sygnał wzbudzający (pompa) powoduje wzrost koncentracji jonów w stanie wzbudzonym. Przy wystarczająco dużej koncentracji jonów w stanie wzbudzonym powstaje inwersja obsadzeń, której towarzyszy emisja spontaniczna i emisja wymuszona. Emisja wymuszona przyczynia się do wzrostu liczby fotonów wewnątrz wnęki rezonansowej i mocy wyjściowej aż do momentu, gdy duża liczba fotonów we wnęcie zaczyna zmniejszać koncentrację jonów w stanie wzbudzonym. Zatem moc wyjściowa po osiągnięciu maksimum, zaczyna maleć z powodu niedostatecznej liczby jonów w stanie wzbudzonym. Jednakże przy nieodpowiednim dobraniu kształtu impulsu pompy możliwa jest generacja impulsów wtórnych. Czas trwania impulsu wzbudzającego powinien zostać zatem dostosowany do parametrów wnęki rezonansowej. Z kolei długość impulsu wyjściowego zależy między innymi od geometrii wnęki rezonansowej i może wynosić nawet kilkadziesiąt nanosekund.



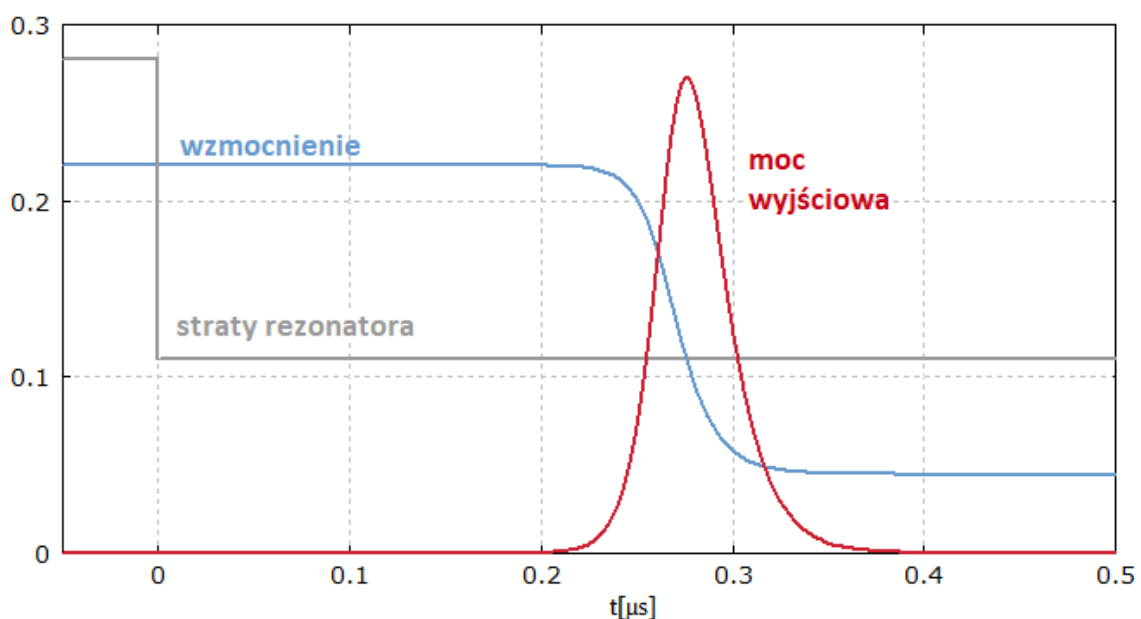
Rysunek 14. Wykres zależności mocy optycznej pompy oraz sygnału w funkcji czasu dla modulacji wzmocnienia [30]

1.2.2.2. Modulacja dobroci

Kolejną z metod wytwarzania impulsów jest modulacja dobroci wneki rezonansowej. Dobroć wneki rezonansowej definiowana jest jako stosunek zmagazynowanej we wnece energii do strat energii w pojedynczym cyklu pracy.

W celu uzyskania pracy impulsowej rezonator jest utrzymywany w stanie niskiej dobroci poprzez zwiększenie strat wewnątrz wneki. Jednocześnie wywoływana jest inwersja obsadzeń. W tym stanie układ laserowy jest w stanie generować emisję spontaniczną jednak straty wneki są na tyle duże, a poziom wzmacnienia na tyle niski, że nie zachodzi akcja laserowa. Następnie dobroć wneki zostaje przełączona w stan wysoki (poprzez minimalizację tłumienia wneki), co prowadzi do natychmiastowego wygenerowania impulsu. Poziom mocy wyjściowej osiąga maksimum i zaczyna spadać z powodu braku dostatecznej ilości jonów w stanie wzbudzonym, która pozwoliłaby na dalsze wzmacnianie coraz to większej ilości fotonów we wnece rezonansowej. Po generacji impulsu następuje ponowne zwiększenie strat wewnątrz wneki. Musi to nastąpić na tyle szybko, aby we wnece nie zdążył się nabudować kolejny impuls. Kształtowanie impulsu w układach z modulacją dobroci zostało zobrazowane na rys.15.

Wyróżniamy dwa typy modulacji dobroci: aktywną i pasywną. W przypadku modulacji aktywnej wykorzystywane są modulatory akustooptyczne AOM (ang. acousto-optic modulator), elektrooptyczne EOM (ang. electro-optic modulator), modulatory mechaniczne (ang. chopper) czy też akustooptyczne filtry przestrajalne AOTF (ang. acousto-optic tunable filter), które wprowadzają do wneki zmiany dobroci. W zależności od modulatora można w ten sposób wygenerować impulsy rzędu nanosekund.

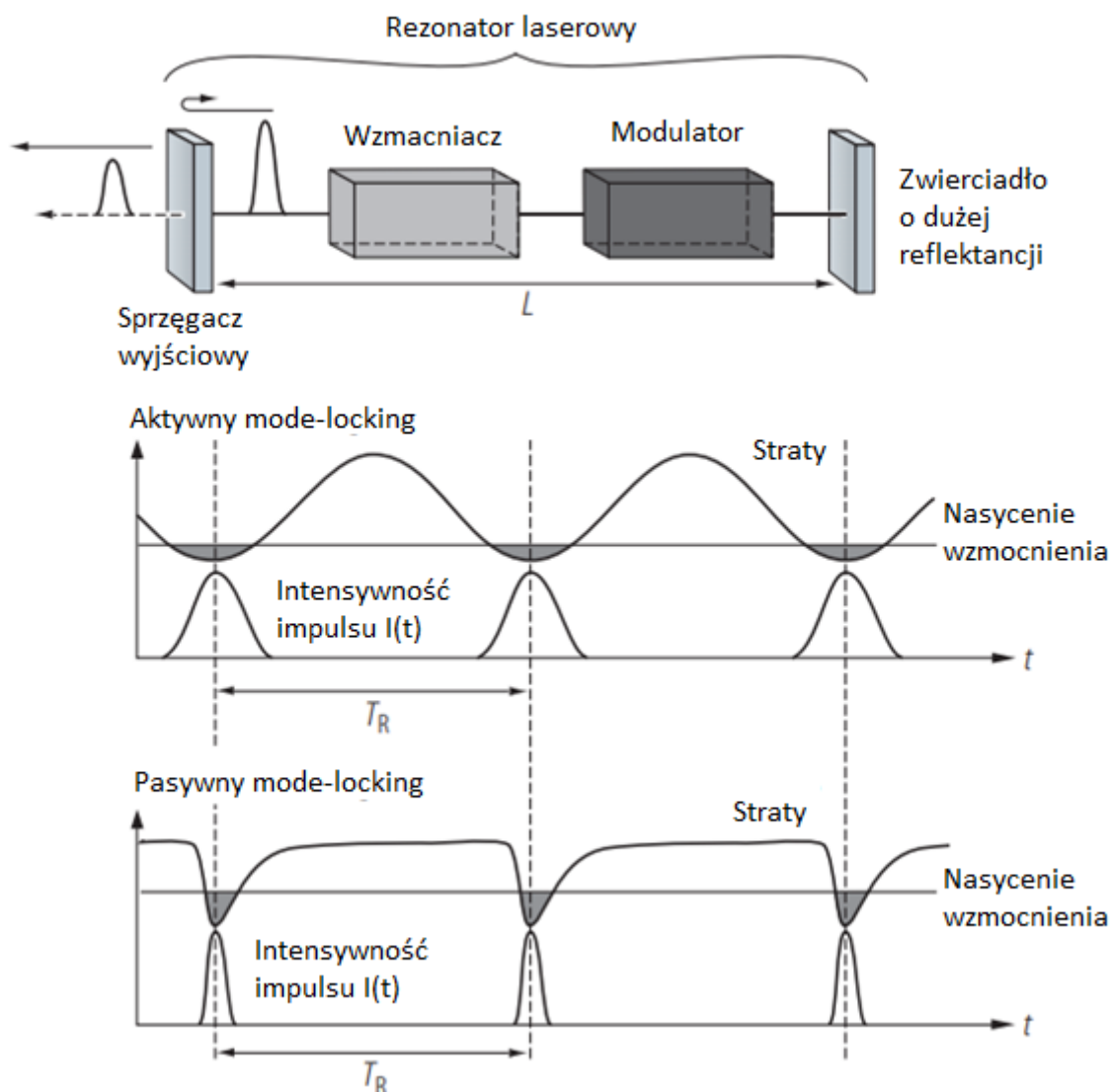


Rysunek 15. Kształtowanie się impulsu wyjściowego w układzie z modulacją dobroci [31]

Modulacja pasywna polega natomiast na wykorzystaniu elementów, które pasywnie będą zmieniać dobroć wnęki. Takimi elementami są np. nasycalne absorbery. Najbardziej znane nasycalne absorbery to SESAM (ang. semiconductor saturable absorber mirror), grafen oraz czarny fosfor. Absorbery w stanie podstawowym są w stanie absorbować energię z fotonów (zwiększając straty we wnęce rezonansowej) wzbudzając swoje elektrony do stanu przewodzenia, w którym do czasu relaksacji nie są w stanie pobierać energii z fotonów a tym samym straty są niwelowane. Stan, w którym absorber nie jest w stanie absorbować fotonów trwa od femtosekund do setek pikosekund.

1.2.2.3. Synchronizacja modów podłużnych

Ostatnią z metod wytwarzania impulsów jaką autor chciałby omówić jest synchronizacja modów podłużnych. Metoda ta pozwala na uzyskanie czasów trwania impulsów rzędu piko a nawet femtosekund. Krótsze czasy uzyskuje się zwykle dla pasywnej synchronizacji modów. Podobnie jak miało to miejsce w przypadku modulacji dobroci, w metodzie tej zmianie ulega poziom strat we wnęce rezonansowej. W tym celu wykorzystywane są aktywne i pasywne metody opisane w rozdziale 1.2.2.2. oraz inne techniki jak np. nieliniowa akumulacja przesunięcia faz FSF (ang. frequency-shifted feedback) czy też nieliniowa rotacja polaryzacji NPR (ang. nonlinear polarization rotation). Elementem wyróżniającym technikę synchronizacji modów jest kontrola czasy, w którym straty wnęki są niskie. Czas pomiędzy minimami strat jest dobrany w taki sposób, aby wynosił tyle co podwójny czas przejścia przez wnękę rezonansową (round trip T_R). W ten sposób jedynie niektóre fotony są wzmacniane co zawęża czas trwania impulsu. Schemat działania tego typu układów przedstawiono na rys.16.



Rysunek 16. Schemat działania aktywnej oraz pasywnej synchronizacji modów podłużnych [32]

1.2.2.4. Podsumowanie

Chcąc zastosować opisane w punkcie 1.2.2. metody generacji impulsowej w zakresie MIR należy rozważyć ich wady oraz zalety. Modulacja wzmacnienia wymaga modulowanego źródła wzbudzającego z możliwością regulacji częstotliwości pracy. Zaletą takiego rozwiązania jest zachowanie prostoty wnęki laserowej i zmniejszenie kosztów związanych z elementami modulującymi (aktywnymi bądź pasywnymi) działającymi w zakresie MIR. Elementy modulujące są wciąż trudnodostępne a ich koszt jest czasami wielokrotnie wyższy niż podobnych elementów w zakresie NIR. Dodatkowo wiele źródeł wzbudzających układy laserowe z zakresu MIR jest od razu dostępna w formie impulsowej znacznie ułatwiając konstruowanie laserów wykorzystujących modulację wzmacnienia. W sytuacji braku komercyjnie dostępnego źródła wzbudzającego o wymaganych parametrach możliwe jest skonstruowanie takiego źródła w laboratorium z wykorzystaniem komercyjnie dostępnych

komponentów na zakres NIR. Warto podkreślić, że głównym atutem metody modulacji wzmocnienia jest minimalne ingerowanie we wnękę laserową generującą promieniowanie w obszarze MIR. Niemniej jednak, wadą rozwiązania jest zależność czasu trwania impulsu od długości wnęki rezonansowej. Impulsy generowane z wykorzystaniem metody modulacji wzmocnienia osiągają zazwyczaj czasy trwania rzędu nanosekund.

Tablica 2. Zestawienie źródeł impulsowych wykorzystujących modulację wzmocnienia do roku 2019

Domieszka	λ [μm]	Moc szczytowa [W]	Szerokość impulsu [ns]	Energia impulsu [μJ]	f [kHz]	Moc średnia [W]	Odkaz
Er^{3+}	2,80	68,0	300	20,0	100	2,00	[33]
Ho^{3+}	2,98	3,3	1490	4,9	80	0,39	[34]
Er^{3+}	3,55	204,0	30	6,5	15	0,10	[35]
Ho^{3+}	2,93	4,0	824	3,3	80	0,26	[36]
Er^{3+}	3,46	6,5	1610	10,4	100	1,04	[37]
Er^{3+}	2,83	420,0	170	80,0	140	11,20	[38]

Na podstawie zestawienia z tab.2 można stwierdzić, że metoda modulacji wzmocnienia jest dobrze znana i opisana w przypadku włókien domieszkowanych jonami erbu oraz holmu. Implikuje to możliwy do uzyskania zakres spektralny. Zawiera się on w okolicach 2,8 μm (włókna domieszkowane jonami erbu), 2,9-3 μm (włókna domieszkowane jonami holmu), 3,4-3,6 (włókna domieszkowane jonami erbu). Wyraźnie widać tutaj brak doniesień literaturowych o możliwościach generacji w zakresie 3-3,4 μm . Obszar ten może zostać osiągnięty przy wykorzystaniu włókien domieszkowanych jonami dysprozu. Jednak do roku 2019, kiedy to autor zaczynał prace nad dysertacją, brak jest doniesień o układach wykorzystujących technikę modulacji wzmocnienia oraz włókna domieszkowane jonami dysprozu.

Technologia wytwarzania włókien domieszkowanych erbem jest dobrze znana i możliwe jest wytwarzanie włókien o dobrej jakości. Dodatkowo warto zaznaczyć, że komercyjnie dostępne są włókna domieszkowane jonami erbu z dużym rdzeniem (>30 μm) oraz włókna z podwójnym płaszczem. Włókna o dużej średnicy rdzenia pozwalają na zwiększenie progu uszkodzenia włókna co pozwala na uzyskanie wyższych mocy wyjściowych. Włókna z podwójnym płaszczem pozwalają natomiast na zwiększenie efektywności wzbudzenia ośrodka aktywnego poprzez zwiększenie obszaru, w którym może propagować fala wzbudzająca oraz umożliwiają uzyskanie jednolitego wzmacniania na całej długości włókna (więcej informacji o

włóknach z podwójnym płaszczem znajduje się w podrozdziale 2.2). Włókna domieszkowane dysprozem są obecnie rozwijane i pojawiają się pierwsze sprawdzone konstrukcje z większym rozmiarem rdzenia oraz podwójnym płaszczem. Jednak wciąż ich ilość jest znikoma w porównaniu do włókien domieszkowanych jonami erbu. Wszystko to sprawia, że wyniki układów laserowych osiągnane z wykorzystaniem włókien domieszkowanych jonami erbu są znacząco lepsze niż w przypadku włókien domieszkowanych jonami dysprozu.

Wykorzystując modulacje wzmocnienia możliwe do uzyskania szerokości impulsów znajdują się w przedziale od nanosekund do pojedynczych mikrosekund, częstotliwość pracy waha się od 15-140kHz, a energie impulsów od 3-80μJ.

Kolejnym ze sposobów na uzyskanie impulsowej akcji laserowej jest modulacja dobroci. Modulacja dobroci wymaga pasywnych, bądź też aktywnych elementów modulujących takich jak AOM, EOM czy SESAM jednak pozwala na skuteczną generację impulsów z częstotliwością pracy od pojedynczych Hz aż do GHz. Wadą tej metody jest potrzeba posiadania komponentów modulujących działających w obszarze MIR oraz umiejscowienie ich wewnątrz wnęki rezonansowej. Wszystko to powoduje, że w porównaniu do układów laserujących wykorzystujących modulację wzmocnienia, układy stosujące modulację dobroci są droższe, mają większe rozmiary rezonatora i są bardziej podatne na awarie.

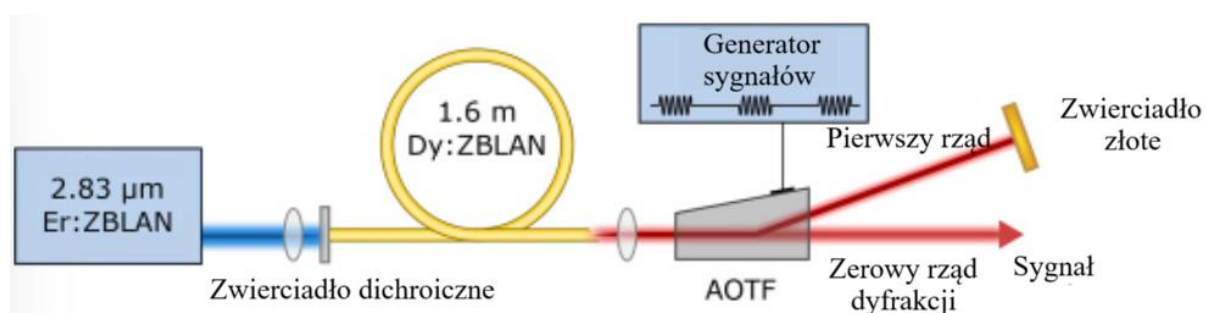
Tablica 3. Zestawienie źródeł impulsowych wykorzystujących modulację dobroci [39]

Domieszka	Modulator	λ [μm]	Moc szczytowa [W]	Szerokość impulsu [ns]	Energia impulsu [μJ]	f [kHz]	Moc średnia [W]	Oдноśnik
Er ³⁺	AOM	2,80	900	90	100	120,0	12,00	[40]
Er ³⁺	AOM	2,79	10600	53	560	1,0	0,56	[41]
Er ³⁺	Mechaniczny	2,78	1600	93	150	10,0	1,50	[42]
Er ³⁺	EOM	2,70	15700	13	206	0.1	0,02	[43]
Ho ³⁺ :Pr ³⁺	AOM	2,87	576	33	19	1,0	0,02	[44]
Er ³⁺	AOM	2,78	12700	26	330	0.1	0,03	[39]
Dy ³⁺	AOTF	3-3,23	39	270	12	1,5	0,02	[45]

Tab.3 przedstawia zestawienie źródeł impulsowych wykorzystujących modulację dobroci. Wyniki, podobnie jak miało to miejsce w przypadku modulacji wzmocnienia, wskazują na wyraźną przewagę prac dotyczących układów wykorzystujących włókna

domieszkowane jonami erbu. Jeśli chodzi zaś o typy modulatorów to w większości są to modulatory AOM.

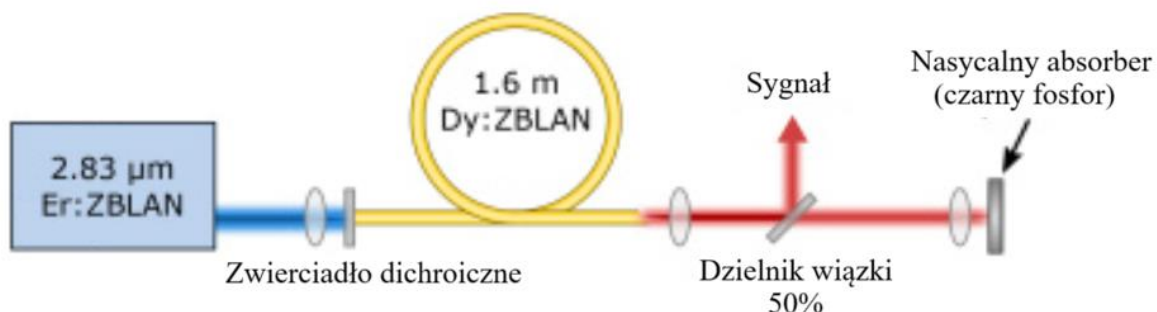
Warto tutaj podkreślić, że dostępność tego typu modulatorów jest bardzo mała i na świecie istnieje jedynie kilku producentów tego typu komponentów. Wykorzystując modulację dobroci możliwe jest uzyskanie impulsów o szerokości ok. 13ns, częstotliwość pracy waha się od 0,1-120kHz, a energie impulsów od 12-560μJ. W tym miejscu autor pragnie również zwrócić uwagę na swój udział w badaniach nad układami wykorzystującymi modulację dobroci. Mowa tutaj o publikacji [39], opisującej badania, w których autor uczestniczył. Efektem badań było uzyskanie jednego z najkrótszych czasów trwania impulsu układu laserującego przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej energii impulsu. W przedstawionej tabeli jedyna praca traktująca o laserach wykorzystujących domieszkę dysprozu to publikacja z roku 2019 [45], w której to autorzy po raz pierwszy zaprezentowali generację impulsów w laserze z włóknem aktywnym Dy³⁺:ZBLAN przy zastosowaniu zarówno aktywnej jak i pasywnej modulacji dobroci. W przypadku modulacji aktywnej zastosowany został AOTF w postaci kryształu TeO₂. Modulator firmy Gooch & Housego charakteryzował się szerokością transmisji filtru 5nm, 25μs czasem narostu i wydajnością dyfrakcji wynoszącą 75%. Autorzy wykorzystali pierwszy rząd dyfrakcji do stworzenia wnęki rezonansowej zakończonej złotym zwierciadłem, natomiast rząd zerowy służył do wyprowadzenia użytecznego sygnału laserowego. Impulsy powstałe w układzie charakteryzowały się energią 12μJ i czasem trwania 270ns, co przekłada się na moc szczytową 39W. Schemat pomiarowy został zaprezentowany na rys.17.



Rysunek 17. Schemat lasera impulsowego z włóknem aktywnym domieszkowanym dysprozem wykorzystujący aktywną modulację wzmacnienia zaprezentowany w [45]

W publikacji autorzy zauważają, że działanie ich układu było ograniczone przez stosowany modulator, którego czas narostu ograniczał parametry impulsów wyjściowych. Zastosowanie modulatora akustooptycznego, w ich przewidywaniach, powinno prowadzić do polepszenia parametrów impulsu (zmniejszenia czasu trwania impulsu oraz zwiększenia mocy szczytowej).

W tej samej publikacji przedstawiony został również układ wykorzystujący pasywną modulację dobroci. Zastosowanie jako nasycalnego absorbera czarnego fosforu pozwoliło na osiągnięcie impulsów o energii $1\mu\text{J}$ i czasie trwania 740ns . Schemat układu został przedstawiony na rys.18.



Rysunek 18. Schemat lasera impulsowego z włóknem aktywnym domieszkowanym dysprozem wykorzystujący pasywną modulację wzmacnienia zaprezentowany w [45]

Ostatnią z omawianych metod uzyskiwania impulsowej akcji laserowej jest metoda synchronizacji modów podłużnych. Metoda ta jest najbardziej wymagająca konstrukcyjnie przez co jest też najmniej stabilna. Podobnie jak metoda modulacji dobroci wykorzystywane są tutaj modulatory działające w zakresie MIR co zwiększa również koszty układu oraz jego rozmiar. W odróżnieniu od metody modulacji dobroci w metodzie synchronizacji modów podłużnych wykorzystywane są zwykle nasycalne absorbery. Synchronizacja modów podłużnych pomimo swojego skomplikowania pozwala jednak na uzyskanie najkrótszych czasów trwania impulsów.

Tablica 4. Zestawienie źródeł impulsowych wykorzystujących synchronizację modów podłużnych

Domieszka	Absorber/ technika	λ [μm]	Moc szczytowa [W]	Szerokość impulsu [ps]	Energia impulsu [nJ]	f [MHz]	Moc średnia [W]	Odkaz
Er^{3+}	NPR	2,8	3500	0,20	0,8	55,2	0,04	[46]
Er^{3+}	Grafen	2,8	20	42,00	0,7	25,4	0,02	[47]
Er^{3+}	SESAM	2,7-2,8	1100	6,40	7,0	28,9	0,20	[48]
Er^{3+}	NPR	3,5	5500	0,58	3,2	68	0,22	[49]
$\text{Ho}^{3+}:\text{Pr}^{3+}$	FSF	2,9	1870	4,70	10,0	30,1	0,30	[50]
Dy^{3+}	NPR	3,1	4200	0,83	4,8	60	0,20	[51]
Dy^{3+}	FSF	3,0-3,3	80	33,00	2,7	18,1	0,12	[52]

Wykorzystując metodę synchronizacji modów podłużnych naukowcy zaprezentowali układy laserujące o czasach trwania impulsów dochodzących do $0,2\text{ps}$. Impulsy te posiadają

jednak niskie energie rzędu pojedynczych nJ. Częstotliwość pracy układów laserowych wykorzystujących synchronizację modów waha się od 18-68MHz.

1.3. Analiza potrzeb oraz teza pracy

W poprzednich podrozdziałach omówiono zastosowanie fal z zakresu ok. 3 μ m. Przedstawione zostały również aktualne informacje dotyczące opisanych w literaturze układów laserów pracy ciągłej jak i impulsowej. Na podstawie analizy zastosowań fal z zakresu MIR o długości fali ok. 3 μ m oraz istniejących konstrukcji laserowych można zauważyć, że wciąż mało jest konstrukcji układów laserów impulsowych generujących w zakresie 3-3,5 μ m, które wykorzystują modulację wzmocnienia oraz modulację dobroci. Tego typu układy mogłyby znaleźć zastosowanie w medycynie jako np. skalpele laserowe lub też w przemyśle jako lasery wykorzystywane do obróbki materiałów polimerowych oraz w telekomunikacji w wolnej przestrzeni. Zastosowanie techniki modulacji wzmocnienia powoduje, że tego typu lasery mogłyby być również konkurencyjne cenowo, w stosunku do już istniejących laserów a przy tym bardziej niezawodne z uwagi na prostotę konstrukcji. Chcąc zapewnić pokrycie spektrum 3-3,5 μ m oczywistym wydaje się zastosowanie włókien domieszkowanych dysprozem.

Zgodnie z informacjami przytoczonymi w podpunkcie 1.2.2. na dzień powstawania tezy pracy (początek roku 2020) nie istnieją na świecie układy laserowe pracy impulsowej wykorzystujące włókna domieszkowane dysprozem z modulacją wzmocnienia a istniejące układy z modulacją dobroci znacząco odbiegają parametrami od źródeł wykorzystujących włókna erbowe.

Autor stawia więc tezę:

Możliwa jest konstrukcja impulsowego układu laserującego generującego w zakresie długości fal zbliżonych do 3 μ m z wykorzystaniem włókien ZBLAN domieszkowanych jonami dysprozu.

oraz hipotezy badawcze:

Możliwe jest skonstruowanie lasera impulsowego przy zastosowaniu modulacji wzmocnienia, który wykorzystuje jako medium aktywne włókno Dy³⁺:ZBLAN.

Zastosowanie szybkich modulatorów dobroci umożliwia skonstruowanie lasera impulsowego przy zastosowaniu modulacji dobroci, który wykorzystuje jako medium aktywne włókna Dy³⁺:ZBLAN i osiąga moc szczytową >100W oraz szerokość impulsu mniejszą niż 100ns.

2. Wstęp teoretyczny

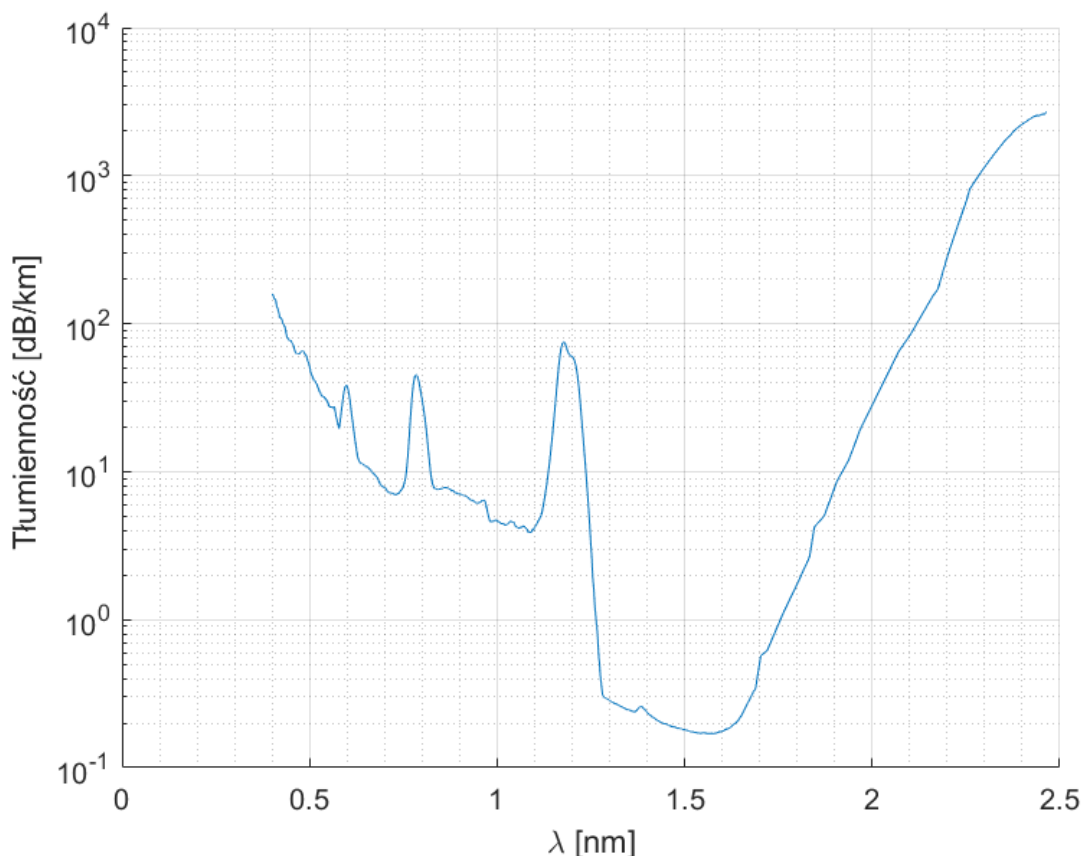
W poniższym rozdziale wprowadzone zostały podstawowe pojęcia związane z konstrukcją laserów światłowodowych. Omówione zostały również zagadnienia transmisji fal z zakresu MIR, produkcji włókien ZBLAN oraz oddziaływania światła z materią we włóknach domieszkowanych jonami ziem rzadkich.

2.1. Ośrodki aktywne dla źródeł laserowych w zakresie MIR

W podrozdziale 1.1. przytoczono korzyści związane z wykorzystaniem źródeł pracujących w zakresie MIR w dziedzinach takich jak spektroskopia, obróbka materiałowa, medycyna, telekomunikacja czy też sektorze obronnym. Pomimo licznych zastosowań wciąż brak jest tanich i powszechnie dostępnych źródeł światła generujących w tym zakresie spektralnych. W celu zrozumienia przyczyn tego stanu rzeczy, konieczne jest dokładne prześledzenie elementów składowych układów laserowych. Najprostszym sposobem uzyskania emisji promieniowania koherentnego jest zgromadzenie energii w ośrodku poprzez osiągnięcie inwersji obsadzeni, a następnie wykorzystanie zjawiska emisji wymuszonej. W tym celu jako ośrodek czynny, najczęściej stosuje się szkło domieszkowane jonami ziem rzadkich. Ośrodek ten często przyjmuje postać włókna światłowodowego, które służy jako medium do budowy laserów światłowodowych. Wybór tej formy ośrodka aktywnego nie jest przypadkowy. W celu konstrukcji układu laserowego niezbędny jest ośrodek charakteryzujący się niskimi stratami dla fal, na których ma generować laser. Ośrodek ten musi również umożliwiać domieszkowanie jonami ziem rzadkich. Dodatkowo powinien on zostać dostarczony w formie dogodnej do wytworzenia układu laserującego, a włókna światłowodowe idealnie spełniają te wymagania. Zbudowane są ze szkieł, które można domieszkować i posiadają niski poziom tłumienia. Główną ich zaletą jest jednak duża powierzchnia odprowadzania ciepła, które jest generowane podczas akcji laserowej. Co istotne powierzchnia ta nie zwiększa znacząco rozmiarów samego układu. Dzieje się tak ze względu na możliwość zwinięcia włókna. Dodatkowo specjalne konstrukcje struktury włókna takie jak np. włókna z podwójnym płaszczem umożliwiają efektywniejsze dostarczanie energii do obszaru aktywnego na całej jego długości. Zmniejsza to gęstość energii na poszczególnych odcinkach włókna co prowadzi do zmniejszenia poziomu zjawisk nieliniowych.

Technologia wytwarzania szkieł, które są przystosowane dla fal elektromagnetycznych z zakresu MIR oraz mogą być domieszkowane jonami ziem rzadkich, a przez to stać się ośrodkiem czynnym dla źródeł laserowych z zakresu MIR, do niedawna była niewystarczająco dopracowana. Szkła krzemionkowe, powszechnie stosowane w technologii NIR, z uwagi na

ich znaczące tłumienie fal o długości $>2\mu\text{m}$, nie nadają się do wykorzystania jako ośrodki aktywne generujące fale elektromagnetyczne o większej niż $2\mu\text{m}$ długości fali. Na rys.19. można zauważyć, że poziom tłumienia w szklach krzemionkowych powyżej $2,5\mu\text{m}$ osiąga poziom $>3000\text{dB/km}$. Taki poziom tłumienia całkowicie uniemożliwia transmisję sygnału na większe odległości oraz osiągnięcie akcji laserowej.



Rysunek 19. Wykres tłumienności włókna krzemionkowego z niską zawartością jonów OH^- w funkcji długości fali [53].

Konieczne stało się więc poszukiwanie innych materiałów do wytworzenia włókien światłowodowych spełniających wymogi transmisyjne dla fal z zakresu MIR. Idealny materiał powinien charakteryzować się niskim tłumieniem w zakresie spektralnym MIR, mieć niską maksymalną energię fononów, pozwalać na domieszkowanie jonami ziem rzadkich oraz być łatwym w kształtowaniu, tak aby umożliwić wytworzenie włókna światłowodowego. Maksymalną energię fononów definiuje się jako największą energię drgań cząsteczek w strukturze szkła, co ściśle koreluje z rozkładem wszystkich drgań wewnętrznych. Ma ona wpływ zarówno na parametry domieszki ziem rzadkich (tj. współczynnik relaksacji wielofononowej, czas życia na powłokach energetycznych oraz proces wymiany energii), jak również na parametry układu laserowego (parametry termiczne oraz sprawność kwantową).

Spośród wymienionych parametrów kluczowy jest współczynnik relaksacji wielofononowej. Stanowi on miarę częstotliwości wielofononowej relaksacji zachodzącej wewnątrz ośrodka. Zjawisko to jest niepożądane w układach laserowych, ponieważ powoduje, że jony przechodzą z poziomów wzbudzonych do stanów o niższej energii bez emisji fotonów, generując jedynie drgania sieci krystalicznej, które przekształcają się w ciepło. W rezultacie energia, która miała być użyta do emisji wymuszonej, zostaje utracona, a ośrodek zwiększa swoją temperaturę. Parametr relaksacji wielofononowej można obliczyć z wykorzystaniem wzorów 1-3 [54].

$$W_{mp}(T) = A_1 e^{-\alpha_{ep}\Delta E} [1 + n(T)]^p \quad (1)$$

$$n(T) = \left(e^{\frac{\hbar\omega}{k_B T}} - 1 \right)^{-1} \quad (2)$$

$$p = \frac{\Delta E}{\hbar\omega} \quad (3)$$

gdzie:

$W_{mp}(T)$ – wskaźnik relaksacji wielofononowej przy temperaturze T,

A_1, α_{ep} – stałe parametry charakteryzujące sieć jonów pierwiastka ziem rzadkich,

$n(T)$ – średnia ilość cząsteczek posiadających maksymalną energię fononów zgodna ze statystyką Bosego-Einsteina,

k_B^T – stałą Boltzmana,

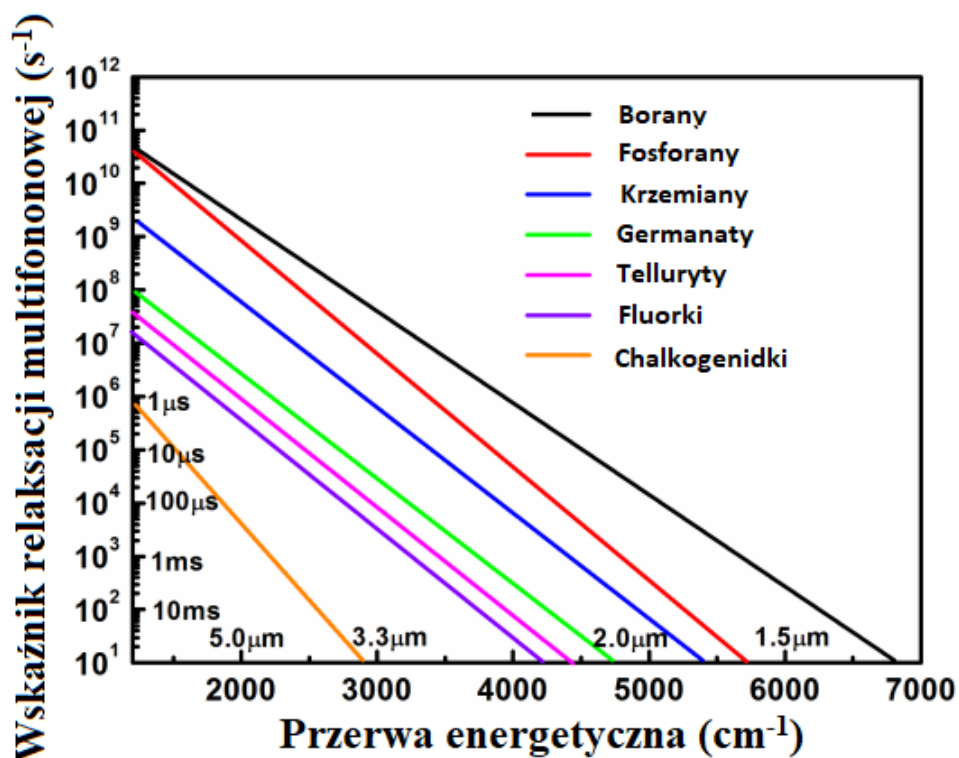
p – ilość fononów potrzebna do przejścia bezpromienistego między poziomami energetycznymi (ΔE)

ΔE – różnica energii między poziomami energetycznymi,

ω – częstość kołowa fononu,

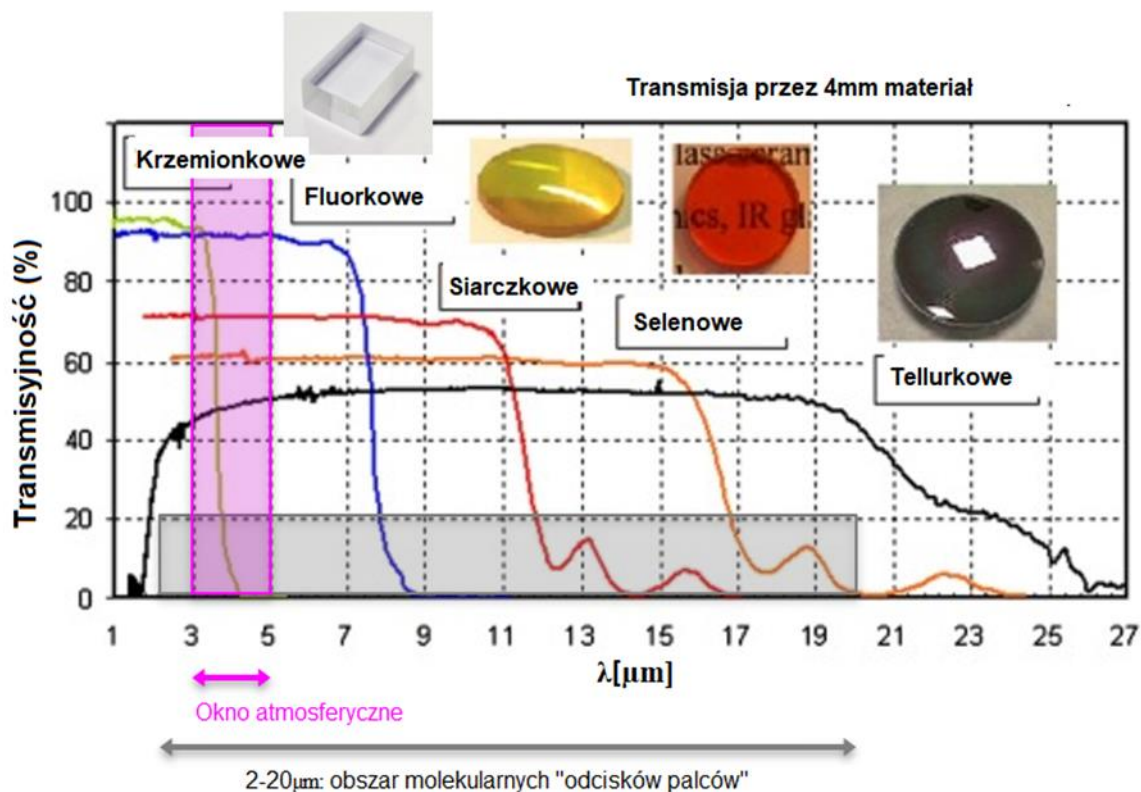
\hbar – stała Plancka.

Analiza wzorów 1-3 pokazuje, że W_{mp} maleje w miarę obniżania się energii fononów matrycy szklistej. Przyjmując, zgodnie z literaturą [55], że w procesie dostarczania lub emisji energii pozwalającej na zmianę poziomu energetycznego może uczestniczyć do 5 fononów, można oszacować maksymalną energię fononów, która pozwala na utrzymanie niskiego prawdopodobieństwa wystąpienia relaksacji wielofononowej. Czas wystąpienia tego zjawiska powinien więc być znacznie krótszy od czasu życia w stanie wzbudzonym. Zależność W_{mp} od szerokości przerwy energetycznej przedstawiono na rys.20. Można zauważyć, że dla długości fali $>2,5\mu\text{m}$ (4000 cm^{-1}), W_{mp} jest na poziomie milisekund, co odpowiada czasom życia dla stanów metastabilnych we wzbudzonych pierwiastkach ziem rzadkich takich jak erb, holm czy dysproz, jedynie dla chalcogenidków, fluorków i tellurków.



Rysunek 20. Zależność relaksacji multifononowej w funkcji wartości przerwy energetycznej dla wybranych materiałów [54]

Kolejnym z istotnych parametrów, jest niskie tłumienie w zakresie spektralnym, w który będzie transmitowany sygnał. Obecnie do zastosowań w zakresie MIR stosuje się szkła fluorkowe oraz chalkogenidkowe. Zależność transmisyjności od długości fali dla tych szkieł jest przedstawiona na rys. 21. Na podstawie wyników przedstawionych na rys. 21 można stwierdzić, że szkła tellurkowe posiadają najszerszy zakres spektralny, jednakże ich transmisyjność w zakresie spektralnym MIR wynosi około 55%, przy założonej grubości materiału wynoszącej 4 mm. Z drugiej strony, dostępne są również szkła fluorkowe, które charakteryzują się wysoką transmisyjnością powyżej 95%. Jednakże zakres spektralny jest dużo mniejszy niż dla szkieł tellurkowych i sięga długości fali $7 \mu m$, co wystarcza dla wielu zastosowań.



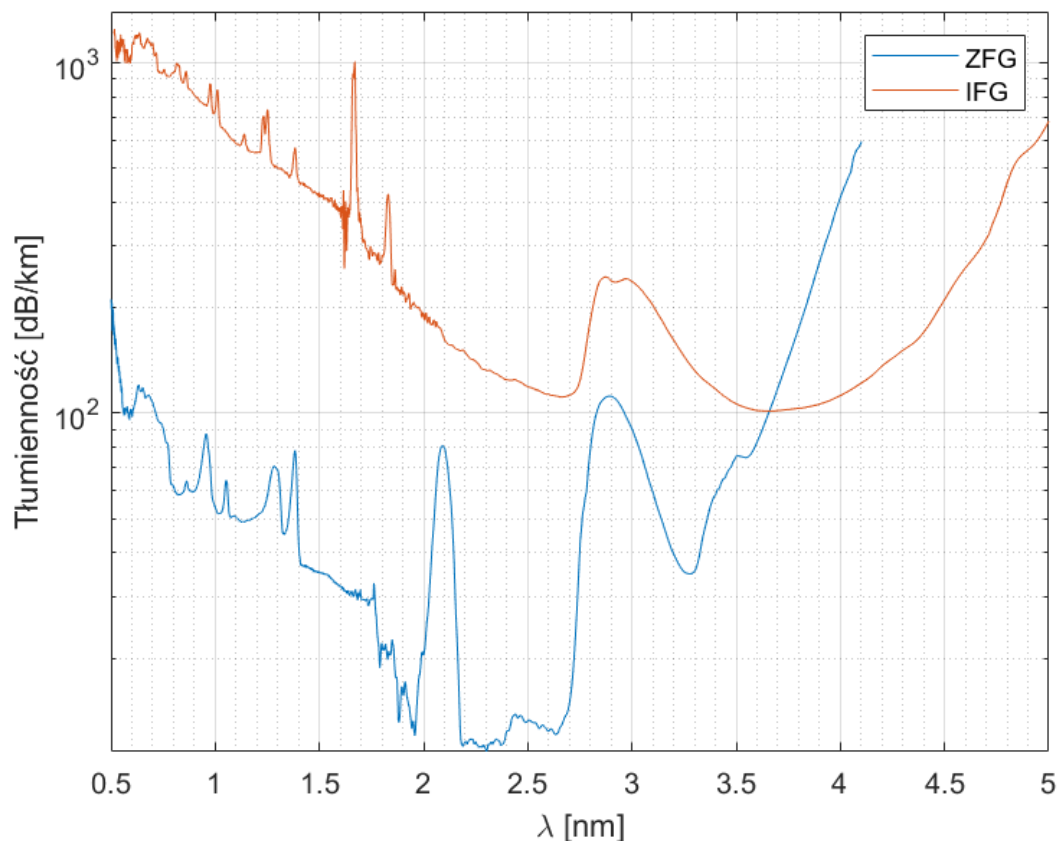
Rysunek 21. Transmisyjność szkieł w funkcji długości fali [56]

Mając na uwadze zarówno współczynnik W_{mp} jak i transmisyjność, można zauważyć, że szkła fluorkowe najlepiej spełniają wymagania dla propagacji fal z zakresu do $7\mu\text{m}$, podczas gdy dla fal dłuższych lepsze osiągi osiągną szkła siarczkowe, selenowe i tellurkowe, zaliczane do szkieł chalcogenidkowych. Włókna fluorkowe po raz pierwszy zostały zaprezentowane już w 1975r. przez braci Poulain [57]. Bracia Poulain, opisując historię wytworzenia szkła, sami nazywają ją „nieudanym eksperymentem”. W trakcie prac nad związkami fluorku cyrkonu przypadkowo odkryli związek, który miał postać szkła [58]. Wytworzone szkło składało się z mieszaniny związków $\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-NaF}$ i wykazywało obiecujące właściwości, jednak upłynęło wiele lat zanim opracowano stabilną technologię jego produkcji i wyciągania włókien optycznych z tego materiału. Głównym wyzwaniem okazało się powstawanie licznych defektów w strukturze włókien, takich jak bąbelki powietrza, kryształy (pod wpływem zawartej w atmosferze wody w szkle powstają formacje tlenofluorku, które powodowały krystalizację ośrodka, problem stanowiła również temperatura krystalizacji), inkluzje oraz obszary, w których skład szkła różnił się od zamierzonego (nierównomierne wymieszanie materiału) lub zmieniała się gęstość ośrodka. Choć te problemy nie zostały jeszcze w pełni wyeliminowane, możliwy jest już zakup włókien dobrej jakości, pozbawionych istotnych defektów. Głównym

producentem włókien fluorkowych jest firma Le Verre Fluoré, założona przez jednego z braci Poulain. Szkła fluorkowe dzielimy na:

- szkło fluorocyrykonianowe ZFG (ang. Zirconium ZrF_4 Fluoride Glass) o składzie 53% ZrF_4 20% BaF_2 4% LaF_3 3% AlF_3 20% NaF – nazywane ze względu na pierwsze litery związków składowych ZBLAN,
- szkło fluoroindowe IFG (ang. Indium InF_3 Fluoride Glass) o składzie 40% InF_3 20% ZnF_2 20% SrF_2 20% BaF_2 .

Ze względu na różne tłumienności obu włókien ich zastosowanie zależy od długości fali przesyłanego sygnału. Jak zaprezentowano na rys.22 w zakresie do $3,65\mu m$ niższe tłumienie mają szkła ZBLAN. Włókna IFG mogą natomiast zostać wykorzystane dla fal dłuższych. W tej pracy ze względu na zakres spektralny ($\sim 3\mu m$) autor skupi się na włóknach typu ZBLAN.



Rysunek 22. Wykres tłumienności włókna ZFG oraz IFG w funkcji długości fali [53].

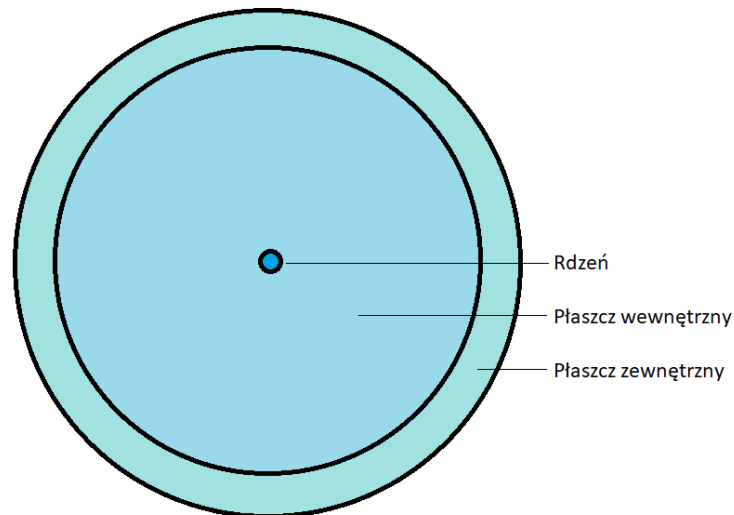
2.2. Włókna światłowodowe

W układach laserowych, które generują moc przekraczającą 1W, istotnym wyzwaniem jest zapewnienie skutecznego chłodzenia medium aktywnego. Podczas procesów nieradiacyjnych zachodzących wewnątrz wnęki laserowej generowane są duże ilości ciepła. W układach na ciele stałym ciepło wydzielane podczas tych procesów w połączeniu z małą

powierzchnią odprowadzającą ciepło z obszaru aktywnego, powoduje, że wymiana ciepła ośrodek-powietrze jest często niewystarczająca. Konieczne staje się zatem zwiększenie powierzchni wymiany ciepła lub stosowanie chłodzenia aktywnego. W kontekście układów na ciele stałym zwiększenie powierzchni ośrodka może zostać osiągnięte np. poprzez zastosowanie obszarów aktywnych w postaci prętów o dużej długości. Należy jednak zaznaczyć, że zastosowanie tego typu medium aktywnego prowadzi do zwiększenia rozmiarów całego układu.

Włókna światłowodowe, dzięki swojej unikalnej konstrukcji, charakteryzują się dużą powierzchnią odprowadzania ciepła w stosunku do wymiarów obszaru aktywnego. Z tego też powodu są one chętnie wybierane do budowy układów laserowych. Jednak chłodzenie ośrodka aktywnego nie stanowi jedynego powodu wykorzystania włókien światłowodowych. Duże znaczenie ma również możliwość dalszej obróbki włókna, tj. cięcie czy zgrzewanie. Umożliwia to precyzyjne dostosowanie długości włókna aktywnego do aktualnych potrzeb konstrukcyjnych oraz jego łatwą modyfikację w razie konieczności. Co więcej, elastyczność włókna umożliwia zwinięcie światłowodu, co pozwala na wytworzenie kompaktowej struktury rezonatora pomimo jego dużej długości. Możliwe staje się więc wykorzystanie dłuższego włókna o mniejszym wzmocnieniu, co przekłada się na lepsze odprowadzanie ciepła, przy jednoczesnym zachowaniu poziomu wzmocnienia rezonatora oraz kompaktowych wymiarów lasera. Dodatkowo, istotną rolę odgrywa technologia komponentów optycznych, takich jak sprzęgacze, cyrkulatory, siatki Bragga czy izolatory. Dzięki tym elementom powstały w pełni światłowodowe konstrukcje laserów, które cechują się większą odpornością na rozstrojenie oraz są znacznie bardziej przystępne w produkcji niż ich odpowiedniki w tradycyjnych układach objętościowych. Należy tutaj jednak podkreślić, że choć większość wspomnianych komponentów wciąż nie jest dostępna dla włókien w zakresie MIR, to bez wątpienia można spodziewać się ich pojawienia w ciągu najbliższych lat.

Kolejną z zalet stosowania włókien światłowodowych jest możliwość zastosowania konstrukcji włókien, dobrze znanych z obszaru techniki laserowej w zakresie bliskiej podczerwieni. Długoletnie badania i rozwój w dziedzinie technologii światłowodowej w obszarze NIR doprowadziły do opracowania specjalnych typów włókien światłowodowych, które odgrywają kluczową rolę w układach laserowych. Przykładem takiej konstrukcji jest włókno z podwójnym płaszczem DC (ang. double clad fiber), zaprezentowane na rys.23.



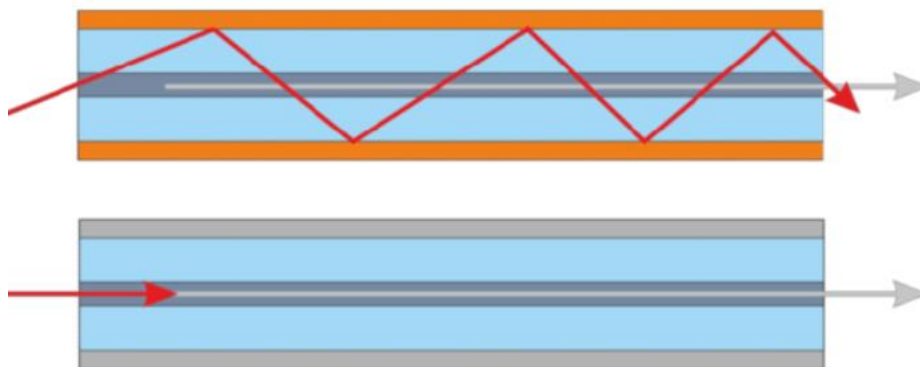
Rysunek 23. Światłowód z podwójnym płaszczem

Jednomodowe układy laserowe pozwalają na osiągnięcie znacznie mniejszych rozmiarów wiązki. Co więcej wiązka ta charakteryzuje się lepszymi parametrami (tj. np. wskaźnik M^2), w stosunku do włókien wielomodowych. Te właściwości sprawiają, że układy jednomodowe są preferowane w większości zastosowań. Niemniej jednak, wyzwaniem jest wprowadzenie do nich wysokich mocy wzbudzających. Problem stanowi tutaj głównie mniejszy rozmiar rdzenia oraz mniejszy kąt akceptacji w stosunku do włókien wielomodowych. Zazwyczaj źródłem mocy wzbudzających są lasery diodowe wysokich mocy, które wykorzystują włókna wielomodowe do prowadzenia wiązki. Wprowadzenie mocy z takich układów do włókien jednomodowych wymaga zastosowania układów optyki objętościowej w celu zniwelowania strat wynikających z różnic w rozmiarze rdzenia włókien. Warto również podkreślić, że ze względu na skoncentrowanie mocy na mniejszej powierzchni czoła włókna pojawia się problem związany z możliwością uszkodzenia termicznego oświetlanego obszaru. Wykorzystanie włókien o dużym polu modowym wydaje się być rozwiązaniem tego problemu. Niemniej jednak, istnieje pewne ograniczenie co do możliwości ciągłego zwiększania rozmiaru rdzenia włókna. W miarę jak rozmiar rdzenia rośnie, coraz trudniejszym zadaniem staje się utrzymanie odpowiedniej jakości wiązki oraz jednomodowej charakterystyki pracy.

Przy wykorzystaniu pobudzenia od czoła włókna, rozkład pobudzenia wzdłuż włókna okazuje się być niejednorodny. Ten niejednorodny rozkład wynika ze strat spowodowanych absorpcją fali wzbudzającej przez jony ziem rzadkich obecne w strukturze włókna oraz z tłumienia włókna. W efekcie, moc dostarczona na początku włókna znacząco przewyższa moc osiagającą jego koniec. Takie zjawisko prowadzi nie tylko do powstania niejednorodnego rozkładu temperatury wewnątrz włókna, ale i do niejednorodnego pobudzenia medium aktywnego.

Konstrukcja włókien DC została zaprojektowana z myślą o zwiększeniu jednorodności pobudzenia włókien aktywnych, przy zachowaniu jednomodowego charakteru wiązki wyjściowej. Włókno typu DC łączy w sobie zalety włókien jedno i wielomodowych rozwiązując jednocześnie problemy związane z dostarczaniem mocy pompującej do obszaru aktywnego. Aktywne światłowody DC składają się z jednomodowego rdzenia, który jest domieszkowany jonami ziem rzadkich oraz płaszczem wewnętrznym, który stanowi wielomodowy obszar propagacji dla wiązki pobudzającej.

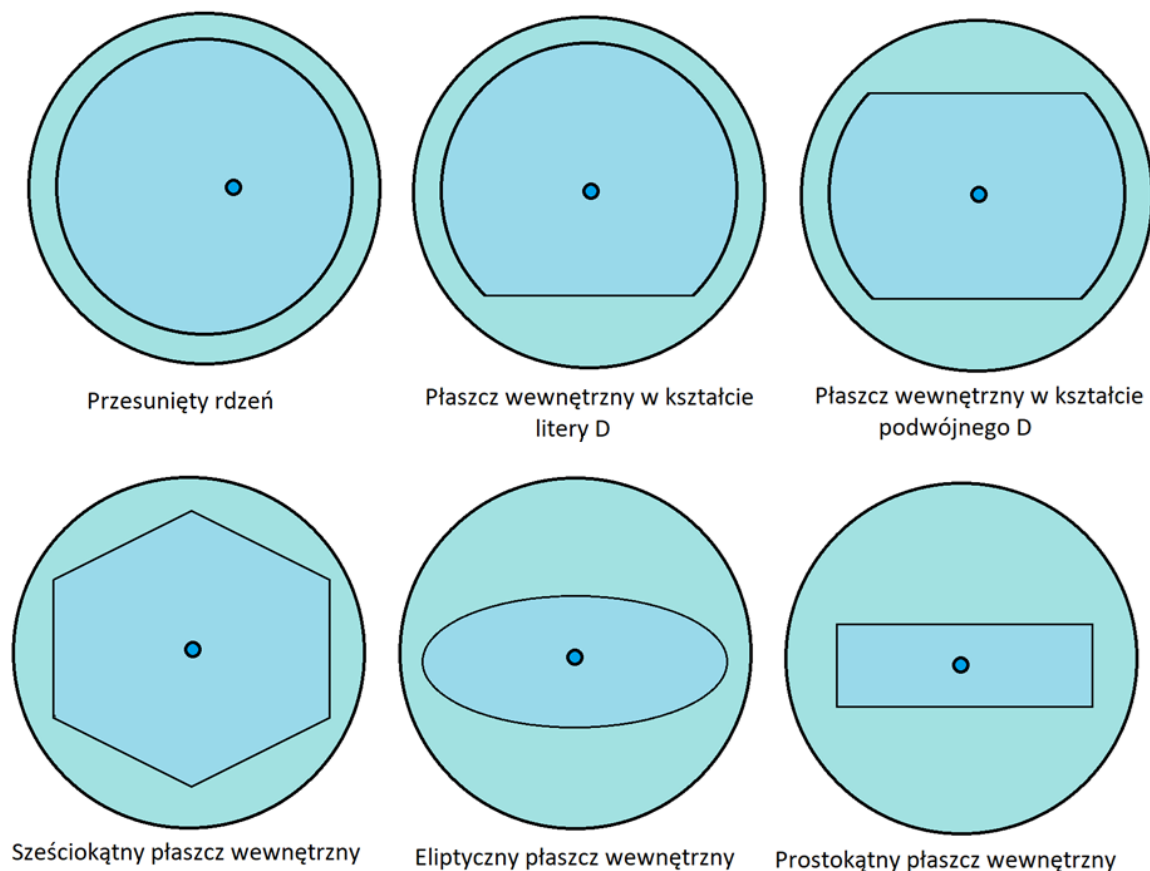
Zastosowanie włókien z podwójnym płaszczem niweluje również wspomniane problemy związane z nierównomiernym pobudzeniem ośrodka aktywnego. Domieszkowany rdzeń w połączeniu z płaszczem wewnętrznym tworzy strukturę jednomodową, która umożliwia generowanie wiązki o wysokiej jakości. Płaszcz wewnętrzny tworzy natomiast w połączeniu z płaszczem zewnętrznym światłowód wielomodowy, do którego w prosty sposób może zostać wprowadzona moc wzbudzająca. Na rys.24 zaprezentowano bieg promieni we włóknie DC oraz włóknie jednomodowym. We włóknie typu DC moc wzbudzająca propaguje wewnątrz płaszcz wewnętrznego przechodząc raz po raz przez rdzeń aktywny wzbudzając go jednorodnie na całym zakresie długości (przy założeniu, że mocy jest dostatecznie dużo) zwiększając efektywność wzbudzania i jego jednorodność.



Rysunek 24. Bieg promieni wzbudzających (kolor czerwony) oraz wzbudzonych (kolor szary) we włóknie DC (góra) oraz włóknie jednomodowym (dół) [59]

Jednak nawet w przypadku włókien z podwójnym płaszczem sprawa efektywności pobudzenia rdzenia nie jest trywialna. Okazuje się bowiem, że nawet w przypadku wykorzystania włókna z podwójnym płaszczem w układzie symetrycznym (z rdzeniem w centrum i okalającym go okrągłym płaszczem o środku pokrywającym się ze środkiem rdzenia) efektywność pompowania zgodnie z [60] wynosi jedynie 10%. W celu osiągnięcia wyższych efektywności niezbędne jest złamanie symetryczności konstrukcji włókna. W symetrycznej strukturze część promieni nigdy nie przejdzie przez rdzeń a tym samym nie zostanie

zaabsorbowana. Analizując wyniki z [60] można wyróżnić dwa typy rozwiązań tego problemu: przesunięcie rdzenia oraz zmianę kształtu płaszcza wewnętrznego. Zmiana położenia rdzenia, w analizowanym we wspomnianej publikacji włóknie, o $20\mu\text{m}$ poskutkowało zwiększeniem absorpcji do ok. 50%. Jeszcze większy wzrost absorpcji został zaobserwowany dla włókien o strukturze w kształcie litery D. Zgodnie z [60] pozwalają one na uzyskanie efektywności pompowania wynoszącej ok. 80%. Autorzy zaznaczają również, że możliwe jest osiągnięcie we włóknach DC efektywności wynoszącej nawet 98%, jednak struktura wewnętrznego płaszcza opisana w publikacji jest bardzo skomplikowana co utrudnia produkcję. Inne, popularne struktury włókien z podwójnym płaszczem zostały zaprezentowane na rys.25.



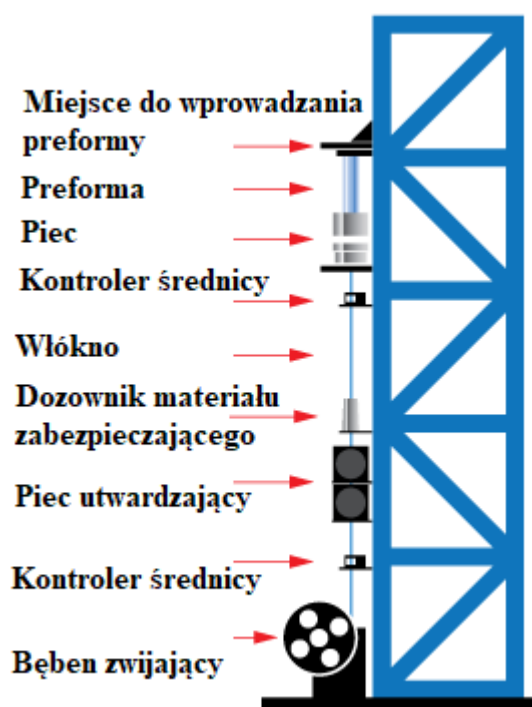
Rysunek 25. Przykładowe rodzaje światłowodów z podwójnym płaszczem

2.3. Produkcja włókien fluorkowych

Wyciąganie włókien ZBLAN jest z pozoru bardzo podobne do procesu znanego z wytwarzania włókien krzemionkowych. Ze względu na bardziej skomplikowany skład samego szkła jak i jego właściwości termiczne proces ten jest jednak o wiele trudniejszy co przekłada się na niską dostępność włókien i ich wysoką cenę. Przy produkcji włókien ZBLAN mieszanina złożona z fluorków metali ciężkich jest topiona i mieszana ze sobą. Cały proces musi

przebiegać w ściśle kontrolowanym środowisku a utrudnieniem jest fakt, że materiały są mieszane, nie jak to ma miejsce w przypadku szkła krzemionkowego w postaci gazów o wysokiej czystości materiału, a w postaci ciał stałych (proszków). Następnie z tak utworzonej masy formuje się preformę, która zostaje następnie schłodzona.

Sam proces wyciągania włókna również wydaje się podobny do tego używanego w przypadku włókien krzemionkowych. Preforma jest umieszczana w wieży do wyciągania światłowodów, w której jest doprowadzana do odpowiedniej temperatury i wyciągana we włókno. Tak powstałe włókno zostaje pokryte płaszczem ochronnym i nawinięte na szpulę. Przykładowa wieża wykorzystywana w produkcji włókien ZBLAN przez firmę Thorlabs została zaprezentowana na rys.26.

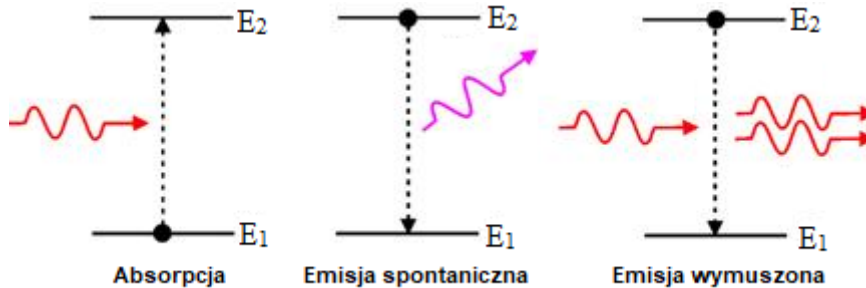


Rysunek 26. Budowa wieży do wyciągania światłowodów [61]

W przypadku procesu wyciągania włókna znaczącą rolę odgrywa temperatura, w której następuje proces wyciągania. Temperatura topnienia dla szkła ZBLAN wynosi $T_m \approx 450^\circ\text{C}$, temperatura krystalizacji $T_c \approx 350^\circ\text{C}$, a zeszklenia $T_g \approx 260^\circ\text{C}$ [62]. W celu wyciągnięcia włókna należy poruszać się w obszarze między T_c a T_g , w którym to materiał przyjmuje formę tzw. cieczy przechłodzonej. W tym stanie lepkość materiału umożliwia kształtowanie włókna a jednocześnie krystalizacja jest bardzo powolna. Z uwagi na to, że różnica temperatur wynosi tutaj jedynie 90°C cały proces musi być przeprowadzony przy zachowaniu dokładnej kontroli temperatury materiału.

2.4. Podstawy teoretyczne pracy układów laserujących

Analizę włókien aktywnych warto jest rozpocząć od wspomnianych już oddziaływań światła z materią. Zalicza się do nich absorpcję, emisję spontaniczną oraz emisję wymuszoną (rys.27).



Rysunek 27. Oddziaływania fotonów z cząsteczkami

Jony ziem rzadkich znajdują się zwykle w energetycznym stanie podstawowym (ang. ground state E_1). Jednak istnieje możliwość dostarczenia do nich energii i doprowadzenia ich do stanu wzbudzonego (ang. excited state E_2, E_3, \dots, E_n), w którym to mogą przebywać przez ograniczony czas. Czas ten jest nazywany czasem życia i jest definiowany jako czas w jakim cząsteczka może przebywać w danym stanie energetycznym. Po jego upływie oddaje ona energię i przechodzi na stan niższy. Wyjątek stanowi tutaj stan podstawowy, w którym cząsteczka może przebywać przez nieokreślony czas. Pod wpływem dostarczanej energii cząsteczki mogą przejść w stan wzbudzony, wykorzystując do tego celu energię dostarczoną przez źródło wzbudzające. Proces pochłonięcia fotonu i zmiany poziomu energetycznego na wyższy nazywamy absorpcją. Energia pochłoniętego fotonu jest równa różnicy w energii między poziomami energetycznymi E_1 i E_2 . Po pewnym czasie następuje powrót do poziomu niższego. Przy przejściu do stanu niższego energia jest oddawana w postaci promienistej (poprzez emisję fotonu) lub bezpromienistej (poprzez emisję fononu, drgań sieci krystalicznej). Dostarczona do cząsteczki energia spowoduje więc wzbudzenie do stanu wyższego. Po upływie czasu życia cząsteczka będzie dążyła do powrotu do równowagi termicznej poprzez promieniste i niepromieniste przejścia między poziomami energetycznymi. Gdy dochodzi do relaksacji poprzez emisję fotonu zjawisko to nazywamy emisją spontaniczną, a więc wypromieniowaniem energii w sposób spontaniczny w celu relaksacji ośrodka. Jeśli jednak do ośrodka w stanie wzbudzonym wprowadzimy foton o energii równej przejściu między stanem wzbudzonym a podstawowym może dojść do wymuszonej generacji fotonu o parametrach (kierunek, zwrot, energia) identycznych z tymi posiadanymi przez foton wymuszający. Zjawisko to nazywane jest emisją wymuszoną i stanowi ono podstawę tworzenia układów laserowych. W celu osiągnięcia akcji laserowej pożądanym więc jest, aby ośrodek pozostawał

w stanie wzbudzonym. Można to osiągnąć dostosowując ilość dostarczanej energii w taki sposób, aby ilość jonów wzbudzanych w ośrodku była stale większa od ilości jonów w stanie podstawowym. Sytuację taką nazywa się inwersją obsadzeń a proces prowadzący do niej jest określany w literaturze jako pompowanie optyczne. W osiągnięciu tego stanu pomaga obecny w niektórych jonach poziom metastabilny, który jest poziomem energetycznym, w którym cząsteczka może przebywać wzbudzona przez dłuższy czas (w porównaniu z pozostałymi poziomami energetycznymi).

2.5. Domieszkowane włókna ZBLAN

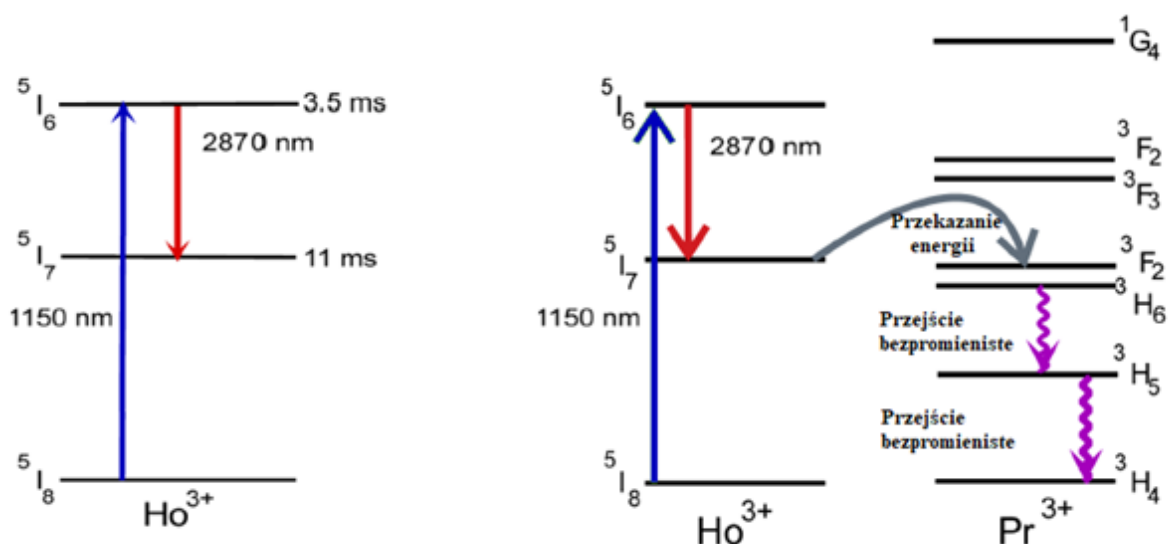
W celu uzyskania akcji laserowej niezbędne jest zastosowanie domieszek jonów ziem rzadkich, które pozwolą na wzbudzenie ośrodka. Do tego celu stosuje się jony neodymu, iterbu, erbium, tulu oraz dysprozu. Domieszkowanie szkieł jonami tych pierwiastków pozwala na powstanie ośrodków aktywnych, które w stosunkowo łatwy sposób można doprowadzić do stanu wzbudzonego (wywołując inwersję obsadzeń) poprzez dostępne źródła wzbudzające i wykorzystać w procesie emisji wymuszonej.

Opierając się na zjawiskach omówionych w podrozdziale 2.4 można przeprowadzić dokładną analizę oddziaływań prowadzących do wywołania akcji laserowej w konkretnych włóknach aktywnych domieszkowanych jonami ziem rzadkich. W przypadku fal z zakresu ok. $3\mu\text{m}$ autor zdecydował się na analizę najczęściej wykorzystywanych domieszek: holmu, erbium oraz dysprozu. W poniższych punktach 2.5.1.-2.5.3. przeprowadzona zostanie analiza włókien domieszkowanych generujących w zakresie ok. $3\mu\text{m}$ i problemów jakie musiały zostać rozwiązane w celu uzyskania akcji laserowej w tych ośrodkach.

2.5.1. Analiza włókien ZBLAN domieszkowanych jonami holmu

W poniższym punkcie dokonana została analiza włókien domieszkowanych jonami holmu (Ho^{3+}). Do generacji fotonów użytecznych ($2,9\mu\text{m}$) w ośrodkach aktywnych domieszkowanych jonami holmu dochodzi podczas przejścia z poziomu $^5\text{I}_6 \rightarrow ^5\text{I}_7$. Jest to przejście, które ze względu na swoją specyfikę, utrudnia uzyskanie efektywnej akcji laserowej. Dzieje się tak, ponieważ czas życia na poziomie $^5\text{I}_6$ (poziomie wzbudzonym) wynosi ok. $3,5\text{ms}$ podczas gdy czas życia na poziomie niższym wynosi ok. 11ms . Oznacza to, że ze względu na silne obsadzenie poziomu $^5\text{I}_7$ (poziomu niższego) uzyskanie inwersji obsadzeń, będzie utrudnione. Sytuacja ta, nazywana jest samowygaszaniem akcji laserowej lub z ang. bottleneck. Prowadzi ona do opróżnienia stanu podstawowego ośrodka czynnego przy jednoczesnym braku inwersji obsadzeń. Prowadzi to do bardzo niskiej sprawności akcji laserowej. Rozwiązaniem

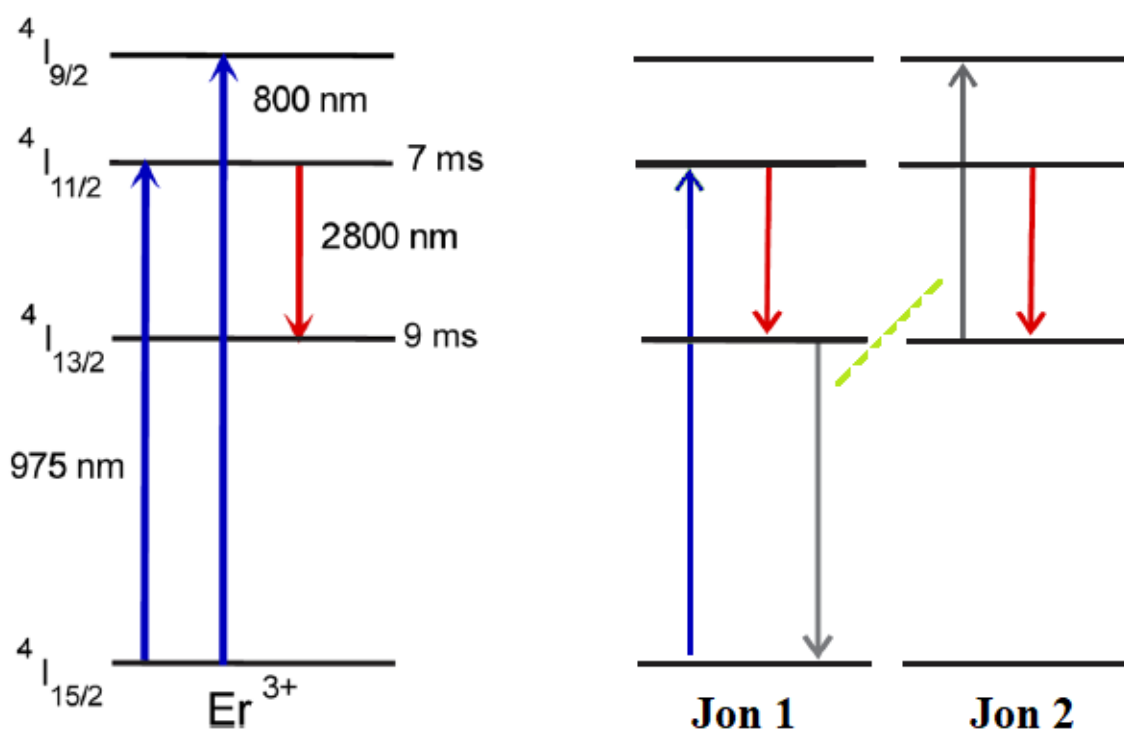
tego problemu jest zastosowanie podwójnego domieszkowania, w którym to do domieszki Ho^{3+} dodawana jest domieszka Pr^{3+} . Metoda ta po raz pierwszy została zaprezentowana przez Jacksona w 2003r [63]. Stosując ją możliwe jest przekazanie energii z poziomu $^5\text{I}_7$ jonów Ho^{3+} do jonów Pr^{3+} . Po przekazaniu energii jest ona szybko oddawana w formie bezpromienistej ze względu na czas życia poziomów pośrednich Pr^{3+} , który wynosił $<10\mu\text{s}$. Przebieg procesu został zaprezentowany na rys.28. Z punktu widzenia układu taki zabieg powoduje relatywne zmniejszenie czasu życia na poziomie $^5\text{I}_7$ w jonach Ho^{3+} . Proces ten jest nazywany wygaszaniem (ang. quenching) i powoduje zmniejszenie czasu życia danej powłoki poprzez procesy nieradiacyjne. Jak podają autorzy ilość domieszki Pr^{3+} przy domieszkowaniu szkła w zakresie 2000-3000ppm Ho^{3+} została ustalona eksperymentalnie na poziomie ok. 1:10.



Rysunek 28. Uproszczone schemat wybranych poziomów energetycznych wraz z najpopularniejszymi przejściami między poziomami energetycznymi w zakresie MIR wraz z naniesionymi czasami życia w stanie metastabilnym dla Ho^{3+} oraz $\text{Ho}^{3+}:\text{Pr}^{3+}$ [1]

2.5.2. Analiza włókien ZBLAN domieszkowanych jonami erbu

W przypadku domieszkowania jonami Er^{3+} sytuacja jest analogiczna do domieszkowania jonami Ho^{3+} . Przy przejściu $^4\text{I}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2}$, czas życia stanu $^4\text{I}_{11/2}$ jest krótszy niż czas życia stanu $^4\text{I}_{13/2}$ co stwarza niekorzystne warunki dla zajścia emisji wymuszonej. Rozwiązaniem, podobnie jak miało to miejsce w przypadku domieszki holmu może być zastosowanie domieszki Pr^{3+} .

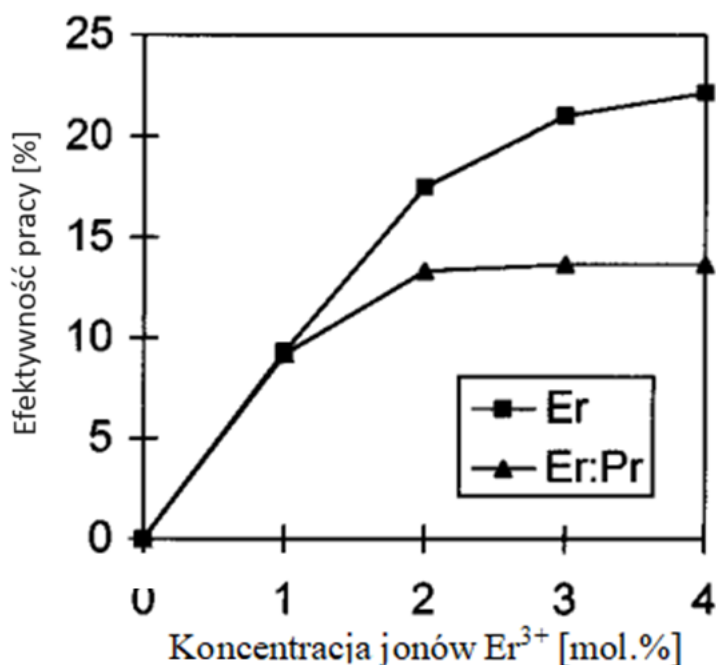


Rysunek 29. Uproszczone wykresy wybranych poziomów energetycznych wraz z przejściami emisyjnymi w zakresie MIR oraz naniesionymi czasami życia w stanie metastabilnym dla Er^{3+} oraz schemat przekazania energii między jonami w silnie domieszkowanych materiałach [1]

Jednak po analizie innych możliwości udowodniono, że istnieje lepsze rozwiązanie. Analiza została przeprowadzona przez Pollnau i Jacksona w 2002r. [64]. W swojej pracy porównali oni efektywność materiałów słabo domieszkowanych Er^{3+} , silnie domieszkowanych Er^{3+} ($>20000\text{ppm}$) oraz układów wykorzystujących domieszkę $\text{Er}^{3+}:\text{Pr}^{3+}$. Okazało się, że domieszkowanie Pr^{3+} umożliwia, podobnie jak ma to miejsce w przypadku Ho^{3+} , wygaszanie poziomu $^4\text{I}_{13/2}$ zapobiegając samowygaszaniu akcji laserowej. Proces ten prowadzi jednak do powstania jednego fotonu sygnału z wykorzystaniem jednego fotonu sygnału pompy. Bardziej efektywnym rozwiązaniem jest silne domieszkowanie erbem. Przy silnym domieszkowaniu następuje transfer energii między dwoma jonami erbu, powodując wzbudzenie z poziomu $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{9/2}$ (jak pokazano na rys.29). Proces ten jest nazywany konwersją w górę lub ETU (ang. energy transfer upconversion). W procesie tym foton wygenerowany przez jon Er^{3+} w procesie relaksacji jest pochłaniany przez inną cząsteczkę będącą w stanie wzbudzonym powodując transfer energii na wyższy poziom energetyczny. W przypadku szkieł silnie domieszkowanych jonami erbu w wyniku procesu ETU dochodzi więc do zwolnienia powłoki $^4\text{I}_{13/2}$ w jednym z jonów (co zapobiega samowygaszaniu) a wygenerowany foton jest pochłaniany przez drugi jon

powodując przejście ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$. Prowadzi to do uwolnienia powłoki ${}^4I_{13/2}$ a dodatkowo umożliwia wygenerowanie kolejnego fotonu użytecznego. Oznacza to, że z jednego fotonu wzbudającego powstają dwa fotony użyteczne co przyczynia się do znacznego zwiększenia efektywności pracy.

W pracy [65] można odnaleźć dokładną analizę wspomnianych metod wzbudzania włókien $\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$ potwierdzającą wysoką skuteczność metody z wykorzystaniem wysoko domieszkowanych szkieł. Warto jest tutaj odnieść się do symulacji dotyczących efektywności pracy układów laserowych wykorzystujących włókna $\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$ (rys.30). Zgodnie z przedstawionymi wynikami symulacji, o ile w przypadku niskiej domieszki jonów erbu skuteczność generacji fotonów jest taka sama dla samej domieszki erbu jak i domieszki erbu z prazeodymem, o tyle w przypadku wyższego domieszkowania wyraźnie widać przewagę wynikającą z wykorzystania jedynie procesu ETU. Zastosowanie prazeodymu umożliwiło osiągnięcie, przy 4 mol.% domieszki erbu efektywności lasera na poziomie ok. 14% podczas gdy dla samej domieszki erbu teoretyczna wartość osiąga ok. 23%. Dowodzi to, że najbardziej obiecujące wyniki dla laserów wykorzystujących włókna domieszkowane erbem można otrzymać wykorzystując medium aktywne silnie domieszkowane jonami erbu bez udziału domieszki prazeodymu.

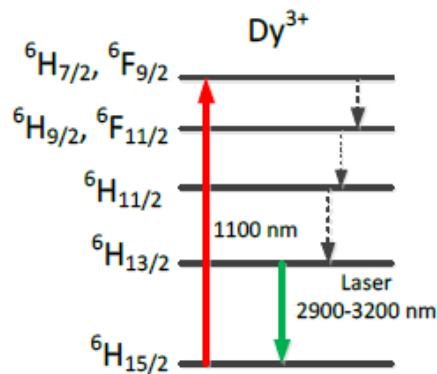


Rysunek 30. Wyniki symulacyjne efektywności pracy układu laserującego w funkcji koncentracji jonów Er^{3+} [65]

2.5.3. Analiza włókien ZBLAN domieszkowanych jonami dysprozu

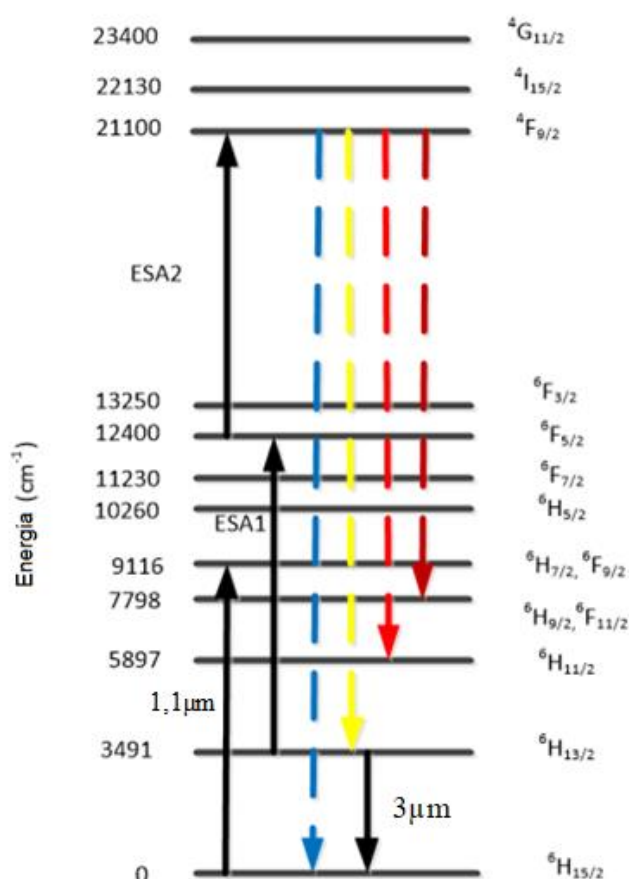
Ostatnim z wybranych typów włókien są włókna domieszkowane jonami Dy^{3+} . Akcja laserowa w okolicach $3\mu\text{m}$ w laserach światłowodowych wykorzystujących jako medium

aktywne szkła domieszkowane dysprozmem zachodzi przy promienistym przejściu z poziomu ${}^6\text{H}_{13/2}$ na poziom ${}^6\text{H}_{15/2}$. Czas życia na poziomie ${}^6\text{H}_{13/2}$ wynosi 0,63ms [66]. Przy wykorzystaniu źródła wzbudzającego generującego na długości fali 1,1 μm dochodzi do wzbudzenia jonu Dy^{3+} do stanu ${}^6\text{H}_{7/2}$ oraz ${}^6\text{F}_{9/2}$, które relaksują do poziomu ${}^6\text{H}_{13/2}$. Metoda ta ma swoje wady i zalety. Zaletą są dobrze znane i opracowane układy laserowe generujące na 1,1 μm .



Rysunek 31. Uproszczony model energetyczny dla szkieł fluorkowych domieszkowanych Dy^{3+} przy pompowaniu laserem 1,1 μm

Wadą jest mała sprawność kwantowa wynosząca ok. 20% [67]. Patrząc na uproszczony schemat energetyczny przedstawiony na rys.28 można zauważyć, że duża część energii jest tracona w wyniku relaksacji bezpromienistej, lecz nie jest to jedyny powód takiego stanu rzeczy. W celu dokładniejszej analizy powodów niskiej sprawności niezbędne jest poddanie analizie dokładnego schematu energetycznego przedstawionego na rys.31.



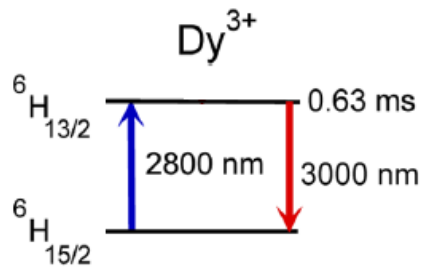
Rysunek 32. Model energetyczny dla szkieł fluorkowych domieszkowanych Dy^{3+} przy pompowaniu laserem $1,1\mu m$

W przedstawionym na rys. 32 schemacie energetycznym można wyróżnić kilka zjawisk wpływających na sprawność konwersji takiego układu. Podstawowym mechanizmem generacji fali wyjściowej o długości ok. $3\mu m$ jest przejście ze stanu podstawowego na poziom ${}^6H_{7/2}/{}^6F_{9/2}$, po czym bezpromieniste przejście do poziomu ${}^6H_{13/2}$, z którego zachodzi promieniste przejście do stanu podstawowego. Niemniej jednak nie jest to jedyna możliwość.

W wyniku absorpcji fotonu pobudzającego, możliwe jest przejście ${}^6H_{13/2} \rightarrow {}^6F_{5/2}$, czyli absorpcji ze stanu wzbudzonego ESA (ang. excited state absorption). ESA jest zjawiskiem, w wyniku którego dochodzi do pochłonięcia energii wzbudzającej przez jon będący już w stanie wzbudzonym. Proces ten może zająć ze względu na energie fotonów pobudzających (9091cm^{-1}), która jest bardzo zbliżona do energii przejścia ${}^6H_{13/2} \rightarrow {}^6F_{5/2}$ (8858cm^{-1}). Z poziomu ${}^6F_{5/2}$ zachodzą przejścia bezpromieniste do poziomu ${}^6H_{13/2}$ lub dochodzi do kolejnej absorpcji ze stanu wzbudzonego (ESA2) do poziomu ${}^4F_{9/2}$. Przejście to charakteryzuje się energią zbliżoną do energii fali wzbudzającej i wynosi 8748cm^{-1} , co umożliwia zajście procesu absorpcyjnego. Poziom ${}^4F_{9/2}$ charakteryzuje się długim czasem życia (ok. 1ms [68]) co może powodować jego silne obsadzenie. Relaksacja z tego poziomu jest możliwa na wiele sposobów, w tym w formie

zarówno przejść bezpromienistych jak i promienistych. Jedno z nich, a dokładniej przejście ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{15/2}$, jest silnie niekorzystne ze względu na możliwość promienistego przejścia bezpośrednio do stanu podstawowego (bez generacji fotonów z zakresu $3\mu\text{m}$).

Rozwiązaniem problemów związanych z niską sprawnością konwersji może okazać się wzbudzenie włókna długością fali $2,8\mu\text{m}$ (rys.33). Metoda ta pozwala na osiągnięcie sprawności laserowania dochodzącej nawet do 91% [69]. Wciąż brak jest jednak komercyjnie dostępnych źródeł wzbudzających o dużej mocy, które mogłyby zostać zastosowane do wzbudzania włókien $\text{Dy}^{3+}:\text{ZBLAN}$ falami $2,8\mu\text{m}$.



Rysunek 33. Uprozczone schemat przejść energetycznych dla włókien domieszkowanych jonami Dy^{3+} przy wzbudzeniu falą $2,8\mu\text{m}$.

3. Analiza eksperymentalna oraz numeryczna układów laserowych Er³⁺:ZBLAN

Jak opisano w poprzednich rozdziałach źródła laserowe generujące w zakresie $>2,5\mu\text{m}$ mają wiele potencjalnych zastosowań. Do połowy roku 2018 większość prac badawczych dotycząca źródeł generujących w zakresie MIR skupiała się na laserach światłowodowych wykorzystujących włókna domieszkowane jonami erbu. Prace te dotyczyły zwiększania mocy wyjściowej w celu osiągnięcia źródeł laserowych generujących moce rzędu watów, budowę źródeł przestrajalnych mogących być wykorzystanych w spektroskopii oraz układów impulsowych ([41], [70], [71] [72], [73], [21] [74],[75]). W porównaniu do innych domieszek, wykorzystanie domieszki erbu ułatwia znacząco pompowanie układów laserowych. W przypadku domieszki erbowej i wykorzystaniu przejścia $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ możliwe jest wzbudzenie układów za pomocą diod $0,975\mu\text{m}$. Diody te są powszechnie używane w technice światłowodowej a technologia ich wytwarzania pozwala na uzyskanie setek watów mocy wyjściowej z pojedynczej diody. W przypadku pozostałych domieszek sytuacja jest dużo bardziej skomplikowana. Układy wykorzystujące domieszkę jonów holmu muszą być wzbudzane za pomocą układów $1,15\mu\text{m}$, podczas gdy te wykorzystujące dysproz $1,1\mu\text{m}$, $1,3\mu\text{m}$, $1,7\mu\text{m}$ czy też $2,8\mu\text{m}$ ([25], [28], [76], [65]). Niestety źródła wysokiej mocy generujące na tych długościach fali w postaci diod laserowych są niedostępne co zmusza do poszukiwania rozwiązań alternatywnych (np. wzbudzenie innymi włóknowymi układami laserowymi).

Na dzień pisania niniejszej pracy najwyższą moc wyjściową dla lasera CW generującego w zakresie ok. $3\mu\text{m}$ zaprezentował w 2018 Aydin [29]. Uzyskał on moc $41,6\text{W}$ przy efektywności generacji 23%, dla długości fali pobudzającej $0,975\mu\text{m}$. Wyższe moce średnie dochodzące nawet do 70W przy efektywności ok. 20% [77] zaprezentowano dla przypadków laserów quasi-CW Er³⁺:ZBLAN, które mogą generować fale $2,8\mu\text{m}$. W układach tych ze względu na oddziaływania cieplne opisane w rozdziale 1.2.1, które mogą uszkodzić światłowód, laser jest uruchamiany jedynie na krótką chwilę w celu uzyskania pomiaru. Układy te nie nadają się więc do zastosowań, w których moc musi być dostarczana w sposób ciągły.

Źródła laserowe wykorzystujące włókna aktywne Er³⁺:ZBLAN są obecnie najlepiej poznanymi ze źródeł laserowych generujących fale o długości z zakresu $2,5-3,5\mu\text{m}$. Ze względu na dobrze opracowaną technologię wytwarzania możliwe jest znalezienie komercyjnie dostępnych, sprawdzonych włókien zarówno z pojedynczym jak i podwójnym płaszczem. Bardzo ważna jest tutaj również dostępność włókien o różnym rozmiarze rdzenia pozwalających na przekazywanie wyższych mocy bez uszkodzenia włókna. Wszystko to

powoduje, że wykorzystując włókna Er^{3+} :ZBLAN można skonstruować układy pracy ciągłej generujące moce rzędu dziesiątek watów. Układy wykorzystujące włókna aktywne domieszkowane jonami erbu są również idealne do zapoznania się ze specyfiką układów wykorzystujących włókna ZBLAN.

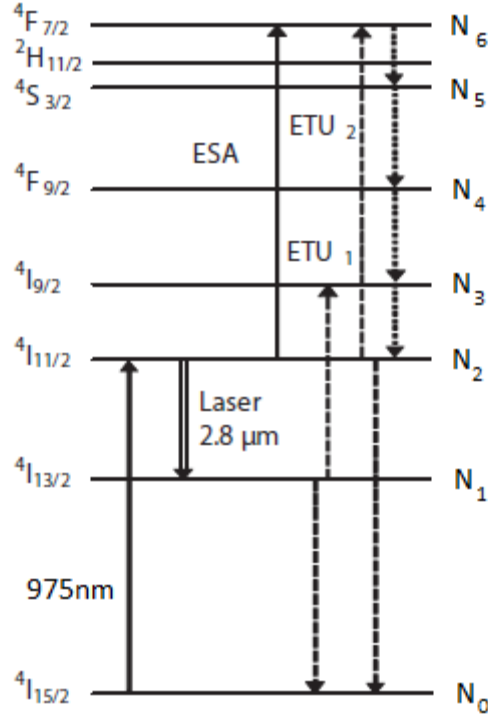
W poniższych podrozdziałach przedstawione zostaną uzyskane przez autora wyniki eksperymentalne oraz symulacje numeryczne wraz z ich analizą dotyczące układów laserowych z włóknami aktywnymi Er^{3+} :ZBLAN. W podrozdziale 3.1 autor przedstawia analizę numeryczną włókien Er^{3+} :ZBLAN. Analiza ta pozwoliła na poznanie zasad pracy układów laserujących wykorzystujących włókna aktywne typu ZBLAN i stanowiła podwaliny do konstrukcji testowego układu pracy ciągłej wykorzystującego jako włókno aktywne światłowód Er^{3+} :ZBLAN opisanego w rozdziale 3.2. Układ ten został wykorzystany do zapoznania się ze specyfiką konstrukcji układów laserowych wykorzystujących włókna typu ZBLAN. Jego wykonanie pozwoliło na opracowanie techniki obróbki włókien ZBLAN, analizę kwestii chłodzenia włókna oraz zarządzania dyfuzją cząsteczek wody prowadzącą do degradacji czoła włókna.

3.1. Modelowanie numeryczne dla laserów CW Er^{3+} :ZBLAN

Podrozdział ten poświęcony został modelowaniu wnęki rezonansowej dla laserów włóknowych wykorzystujących jako włókno aktywne światłowody Er^{3+} :ZBLAN. Wcześniejsza analiza numeryczna umożliwia zaprojektowanie układu rezonansowego i określenie wpływu elementów konstrukcyjnych na jego parametry wyjściowe takie jak efektywność pracy czy też moc wyjściowa.

3.1.1. Model teoretyczny

Do analizy właściwości lasera Er^{3+} :ZBLAN wykorzystano równania kinetyczne. Opisują one rozkład jonów w poszczególnych stanach energetycznych wykorzystując parametry spektroskopowe charakterystyczne dla danej domieszki. Opis wnęki rezonansowej z wykorzystaniem tych równań jest zależny m. in. od rozkładu poziomów energetycznych dla pierwiastka domieszki. Ich rozkład dla Er^{3+} zaprezentowano na rys.34.



Rysunek 34. Schemat rozkładu poziomów energetycznych w domieszkowanym erbem szkłe fluorkowym (na podstawie [78]).

Zgodnie z [78], [64] populację każdego z poziomów można opisać w funkcji czasu i długości włókna równaniami 4-10.

$$W_{22}N_2^2(z, t) - \frac{N_6(z, t)}{\tau_6} + R_{ESA}(z, t) = \frac{dN_6(z, t)}{dt} \quad (4)$$

$$\frac{\beta_{65}N_6(z, t)}{\tau_6} - \frac{N_5(z, t)}{\tau_5} - W_{50}N_5(z, t)N_0(z, t) = \frac{dN_5(z, t)}{dt} \quad (5)$$

$$\sum_{i=5}^6 \frac{\beta_{i4}N_i(z, t)}{\tau_i} - \frac{N_4(z, t)}{\tau_4} = \frac{dN_4(z, t)}{dt} \quad (6)$$

$$\sum_{i=4}^6 \frac{\beta_{i3}N_i(z, t)}{\tau_i} - \frac{N_3(z, t)}{\tau_3} + W_{50}N_5(z, t)N_0(z, t) + W_{11}N_1^2(z, t) = \frac{dN_3(z, t)}{dt} \quad (7)$$

$$\sum_{i=3}^6 \frac{\beta_{i2}N_i(z, t)}{\tau_i} - \frac{N_2(z, t)}{\tau_2} - 2W_{22}N_2^2(z, t) + R_{GSA}(z, t) - R_{ESA}(z, t) - R_{SE}(z, t) = \frac{dN_2(z, t)}{dt} \quad (8)$$

$$\sum_{i=2}^6 \frac{\beta_{i1}N_i(z, t)}{\tau_i} - \frac{N_1(z, t)}{\tau_1} + W_{50}N_5(z, t)N_0(z, t) - 2W_{11}N_1^2(z, t) + R_{SE}(z, t) = \frac{dN_1(z, t)}{dt} \quad (9)$$

$$N_{Er} = \sum_{i=0}^6 N_i \quad (10)$$

gdzie:

N_i – liczba jonów na poszczególnych poziomach energetycznych zgodna z rys.34,

τ_i – czasy życia na poszczególnych poziomach energetycznych,

β_{ij} – współczynniki rozgałęzienia fotoluminescencji dla poszczególnych przejść określające prawdopodobieństwo ich wystąpienia i oznacza poziom początkowy, j oznacza poziom końcowy,

W_{11}, W_{12} – współczynniki określające prawdopodobieństwo wystąpienia konwersji w górę dla odpowiednio ETU_1 oraz ETU_2 ,

W_{50} – współczynnik relaksacji dla sprzężonych termicznie poziomów ${}^2H_{11/2}$ i ${}^4S_{3/2}$, określający prawdopodobieństwo wystąpienia przejścia z tych poziomów na poziom podstawowy.

Parametry R_{GSA} (współczynnik absorpcji ze stanu podstawowego), oraz R_{ESA} (współczynnik absorpcji ze stanu wzbudzonego) mogą być opisane wzorami 11-12:

$$R_{GSA}(z, t) = \frac{\lambda_p \Gamma_p \sigma_{GSA}}{hcA_{eff}} N_0(z, t) [P_p^+(z, t) + P_p^-(z, t)] \quad (11)$$

$$R_{ESA}(z, t) = \frac{\lambda_p \Gamma_p \sigma_{ESA}}{hcA_{eff}} N_2(z, t) [P_p^+(z, t) + P_p^-(z, t)] \quad (12)$$

gdzie:

λ_p – długość fali sygnału pobudzającego,

Γ_p – współczynnik wypełnienia, który, w przypadku włókien DC, jest obliczany jako stosunek powierzchni rdzenia aktywnego do powierzchni obszaru pobudzającego,

$\sigma_{GSA}, \sigma_{ESA}$ – przekrój czynny odpowiednio dla GSA oraz ESA,

h – stała Plancka,

c – prędkość światła,

A_{eff} – powierzchnia przekroju włókna domieszkowanego,

$P_p^+(z, t), P_p^-(z, t)$ – moc wzbudzająca propagująca w przód (+) oraz wstecznie (-).

R_{SE} (współczynnik emisji wymuszonej) jest opisany zgodnie z równaniem (13):

$$R_{SE}(z, t) = \frac{\lambda_s \Gamma_s \sigma_{SE}}{hcA_{eff}} \left[b_2 N_2(z, t) - \left(\frac{g_2}{g_1} \right) b_1 N_1(z, t) \right] [P_s^+(z, t) + P_s^-(z, t)] \quad (13)$$

gdzie:

λ_s – długość fali sygnału laserowego,

Γ_s – współczynnik wypełnienia dla sygnału laserowego,

σ_{SE} – przekrój czynny dla emisji wymuszonej,

b_1, b_2 – współczynniki Boltzmanna dla poziomów energetycznych ${}^4I_{13/2}$ oraz ${}^4I_{11/2}$,

g_2, g_1 – współczynniki degeneracji poziomów energetycznych, dla erbu $g_2=g_1=2$ [78],

$P_s^+(z,t)$, $P_s^-(z,t)$ – moc wzbudzona propagująca w przód (+) oraz wstecznie (-).

Przy założeniu, że przekrój sygnału ma rozkład Gaussa parametr Γ_s może być zdefiniowany wzorami 14-15:

$$\Gamma_s = 1 - e^{-2\left(\frac{r_{core}}{r_{Gauss}}\right)^2} \quad (14)$$

$$r_{Gauss} = r_{core}(0,65 + 1,619V^{-1,5} + 2,876V^{-6}) \quad (15)$$

przy czym:

V – częstotliwość znormalizowana.

Chcąc wyznaczyć przebieg sygnału laserowego oraz sygnału pompującego w funkcji czasu oraz długości włókna należy rozwiązać równania 16-17:

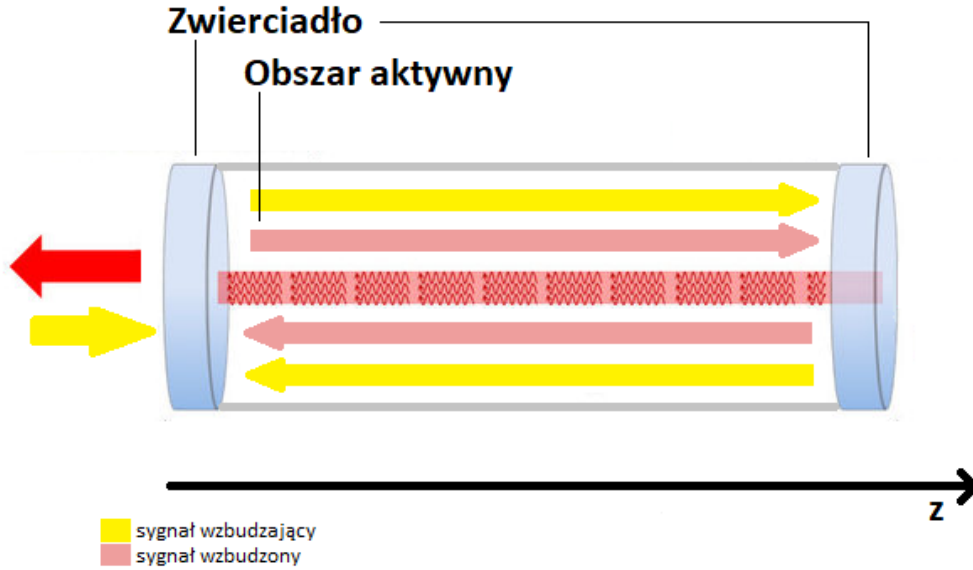
$$\pm \frac{dP_s^\pm(z,t)}{dz} = \Gamma_s \sigma_{SE} \left[b_2 N_2(z,t) - \left(\frac{g_2}{g_1}\right) b_1 N_1(z,t) \right] P_s^\pm(z,t) - \alpha_s P_s^\pm(z,t) \quad (16)$$

$$\pm \frac{dP_p^\pm(z,t)}{dz} = \Gamma_p [\sigma_{GSA} N_0(z,t) + \sigma_{ESA} N_2(z,t)] P_p^\pm(z,t) - \alpha_p P_p^\pm(z,t) \quad (17)$$

przy czym:

α_s , α_p - współczynnik strat propagacji odpowiednio dla długości fali wzbudzonej i wzbudzającej.

W celu rozwiązania równań 16-17 trzeba określić warunki brzegowe. Rozpatrywany układ ma postać rezonatora liniowego ograniczonego zwierciadłami, z których jedno jest częściowo przepuszczalne dla sygnału wzbudzającego, natomiast drugie zapewnia całkowite odbicie sygnału wzbudzanego oraz wzbudzającego. Schemat takiego układu został zaprezentowany na rys.35.



Rysunek 35. Schemat analizowanego układu laserowego.

Opisując wzorami sygnały wzбудzane oraz wzбудzające propagujące wewnątrz rezonatora w punktach $z=0$ oraz $z=L$, gdzie $z=0$ oznacza początek wnęki rezonansowej a $z=L$ oznacza punkt oddalony o długość L od początku wnęki i jest traktowany jako koniec wnęki, otrzymujemy następujące warunki brzegowe:

$$P_p^+(z=0) = R_p(z=0)P_p^-(z=0) + (1 - R_p(z=0))P_{pump} \quad (18)$$

$$P_p^-(z=L) = R_p(z=L)P_p^+(z=L) \quad (19)$$

$$P_s^+(z=0) = R_s(z=0)P_s^-(z=0) \quad (20)$$

$$P_s^-(z=L) = R_s(z=L)P_s^+(z=L) \quad (21)$$

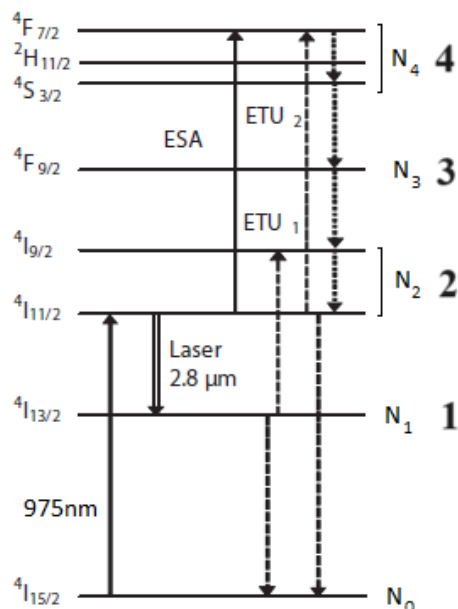
gdzie:

R_p – odbiciowość zwierciadła dla długości fali sygnału wzбудzającego,

R_s – odbiciowość zwierciadła dla długości fali sygnału wzбудzanego.

Złożoność równań kinetycznych jest ściśle powiązana z liczbą poziomów energetycznych, dlatego też przed ich implementacją przeanalizowano mechanizmy zachodzące w układzie i ich wpływ na działanie układu laserowego w celu uproszczenia symulacji. Przy założeniu, że do wzbudzenia układu wykorzystana zostanie długość fali 975nm, liczba poziomów mających wpływ na akcję laserową może zostać zredukowana. Założenia przyjęte w modelu opierają się na kilku obserwacjach i założeniach, które prowadzą do redukcji ilości równań kinetycznych. Pierwsze z założeń pochodzi z [79]. W publikacji autorzy zauważają, że 99% jonów znajdujących się w stanie $^4I_{9/2}$ przechodzi do stanu $^4I_{11/2}$. Co więcej czas życia na poziomie $^4I_{9/2}$ wynosi około $8\mu s$, co przy czasie życia poziomu $^4I_{11/2}$

wynoszącym ok. 7ms jest wartością wielokrotnie niższą. Można zatem przyjąć, że te dwa poziomy mogą zostać połączone w jeden. Podobne założenie przyjęto dla ${}^4F_{7/2}$, ${}^2H_{11/2}$ i ${}^4S_{3/2}$ połączonych w jeden poziom o czasie życia ${}^4S_{3/2}$ (580 μ s). Numery poziomów stosowane w dalszej części pracy odnoszą się do oznaczeń na rys.36.



Rysunek 36. Schemat rozkładu poziomów energetycznych w domieszkowanym erbem szkle fluorkowym, wersja ze zredukowanymi poziomami energetycznymi (na podstawie [78]).

Sumaryczna liczba jonów znajdujących się w układzie jest zależna od koncentracji domieszki wykorzystanej we włóknie aktywnym. Chcąc opisać poszczególne poziomy energetyczne należy wziąć pod uwagę jakie są możliwości wzbudzenia jonów do danego poziomu oraz prawdopodobieństwo takiego wzbudzenia, a następnie uwzględnić również sytuacje, w których jony mogą zmienić swój poziom energetyczny na inny. Tak więc w przypadku poziomu czwartego występują dwie możliwości wzbudzenia: ETU_2 oraz ESA . Zmniejszenie populacji jonów następuje natomiast w wyniku przejścia do poziomu 3. Poziom 3 może zostać obsadzony tylko w przypadku przejścia z poziomu 4, natomiast jego zwolnienie następuje po upływie czasu życia i przejściu bezpromienistym na poziom 2. Poziom 2 może zostać obsadzony poprzez absorpcję ze stanu podstawowego, spadek ze stanów wyższych (4 i 3) lub ETU_1 . Zmniejszenie populacji poziomu może natomiast nastąpić poprzez emisję wymuszoną, emisję spontaniczną zależną od czasu życia poziomu oraz ETU_2 . Poziom 1 jest obsadzany głównie przez jony, które przeszły ze stanu 2 (w wyniku emisji wymuszonej i spontanicznej) oraz jony pochodzące z poziomów wyższych. Zmniejszenie populacji na tym poziomie jest powodowane przez ETU_1 oraz przejście do stanu niższego po upływie czasu życia. Poziom podstawowy może być opisany jako suma jonów pochodzących z poziomów

wyższych przechodzących na poziom podstawowy oraz jony pochodzące z ETU_1 i ETU_2 pomniejszona o jony, które zostały wzbudzone ze stanu podstawowego.

Kolejnym poczynionym założeniem jest stwierdzenie, że analizowany laser pracuje nieprzerwanie w stanie ustalonym. Oznacza to, że wynik jest niezależny od czasu.

Korzystając z publikacji [80], [78] w kontekście wcześniej wymienionych założeń i obserwacji możliwe jest zredukowanie równań kinetycznych z 7 do 5 (22-26) równań niezależnych od czasu:

$$W_{22}N_2^2(z) - \frac{N_4(z)}{\tau_4} + R_{ESA}(z) = 0 \quad (22)$$

$$\frac{\beta_{43}N_4(z)}{\tau_4} - \frac{N_3(z)}{\tau_3} = 0 \quad (23)$$

$$R_{GSA}(z) - R_{SE}(z) - R_{ESA}(z) + \sum_{i=3}^4 \frac{\beta_{i2}N_i(z)}{\tau_i} - \frac{N_2(z)}{\tau_2} - 2W_{22}N_2^2(z) + W_{11}N_1^2(z) = 0 \quad (24)$$

$$R_{SE} + \sum_{i=2}^4 \frac{\beta_{i1}N_i(z)}{\tau_i} - \frac{N_1(z)}{\tau_1} - 2W_{11}N_1^2(z) = 0 \quad (25)$$

$$N_{Er} = \sum_{i=0}^6 N_i \quad (26)$$

W celu rozwiązania równań różniczkowych 16-17 przy określonych w 18-21 warunkach brzegowych niezbędne jest zastosowanie metod numerycznych. Oprogramowanie do ich rozwiązania zostało przygotowane przez prof. dr hab. inż. Sławomira Sujeckiego [75]. W oprogramowaniu zastosowano metodę relaksacyjną oraz algorytm Rungego–Kutty 4-5.

3.1.2. Analiza numeryczna układu laserowego CW Er^{3+} :ZBLAN

W poniższym punkcie przedstawiona zostanie analiza numeryczna zaprojektowanego układu laserowego wykorzystującego jako włókno aktywne światłowód Er^{3+} :ZBLAN.

Układ laserowy poddany analizie to laser światłowodowy z rezonatorem liniowym w którym medium aktywne stanowi włókno Er^{3+} :ZBLAN z podwójnym płaszczem, a rezonator zbudowany jest z wykorzystaniem dwóch zwierciadeł o założonej odbiciowości. Rdzeń światłowodu domieszkowany związkami ErF_3 na poziomie 7 mol.% (absorpcja pompy $0,975\mu m$ na poziomie ok. 3dB/m). Rdzeń światłowodu ma średnicę $15\mu m$, podczas gdy wewnętrzny płaszcz ma kształt podwójnego D o średnicach $240/260\mu m$.

Poniżej zaprezentowano zbiór danych wykorzystywanych w symulacji numerycznej do określenia poziomu mocy we włóknie. W tab.5 zaprezentowano parametry spektroskopowe charakteryzujące domieszkę erbu, podczas gdy w tab.6 umieszczono dane charakterystyczne

dla badanego włókna. W tab.6 parametry W_{11} oraz W_{22} zostały podane w dwóch wersjach: dla oddziaływań słabych WI (ang. weak interactions) oraz silnych SI (ang. strong interactions).

Tablica 5. Stałe parametry spektroskopowe wykorzystywane w symulacji zależne od typu domieszki.

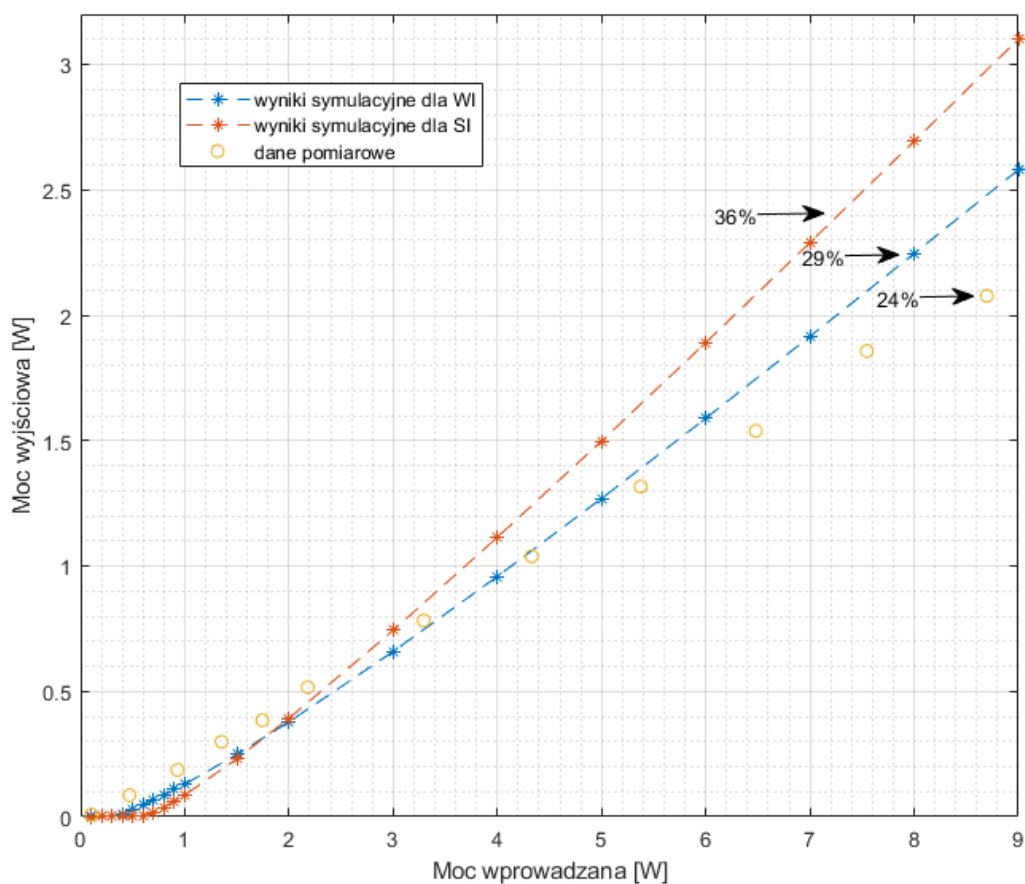
Parametr	Wartość
τ_1	9,0 ms
τ_2	6,9 ms
τ_3	0,12 ms
τ_4	0,58 ms
β_{20}	0,63
β_{21}	0,37
β_{30}	0,001
β_{31}	0
β_{32}	0,99
β_{40}	0,14
β_{41}	0,004
β_{42}	0,006

Tablica 6. Parametry wykorzystywane w symulacji charakterystyczne dla układu (na podstawie [78] oraz symulacji)

Parametr	Wartość	
	WI	SI
W_{11}	$1,0 \cdot 10^{-24} \text{ m}^3/\text{s}$	$36 \cdot 10^{-24} \text{ m}^3/\text{s}$
W_{22}	$0,3 \cdot 10^{-24} \text{ m}^3/\text{s}$	$12 \cdot 10^{-24} \text{ m}^3/\text{s}$
b_1/b_2	0,145/0,150	
λ_p	976 nm	
λ_s	2795 nm	
σ_{GSA}	$2,1 \cdot 10^{-25} \text{ m}^2$	
σ_{ESA}	$1,1 \cdot 10^{-25} \text{ m}^2$	
σ_{SE}	$4,4 \cdot 10^{-25} \text{ m}^2$	
N_{Er}	$11,2 \cdot 10^{26} \text{ m}^{-3}$	
A_{eff}	$1,77 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$	
L	3 m	

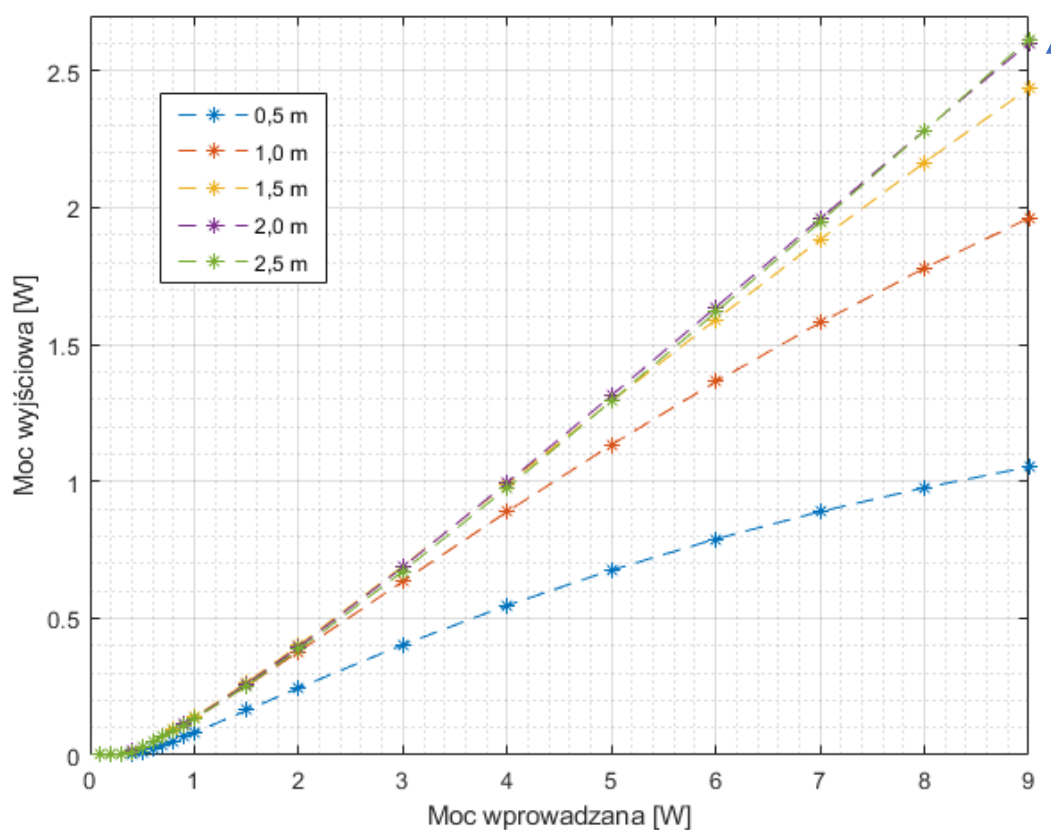
Γ_p	0,0057
Γ_s	0,75
α_s	0,023 m ⁻¹
α_p	0,003 m ⁻¹
$R_p(z=0)$	0,04
$R_s(z=0)$	0,04
$R_p(z=L)$	0,96
$R_s(z=L)$	0,96

Na rys.37 zaprezentowano zależności mocy wyjściowej od mocy wejściowej w układzie lasera CW Er³⁺:ZBLAN dla symulacji numerycznych przy założonych SI i WI oraz dla wyników pomiarowych z podrozdziału 3.2 (pomiarów dotyczą zaprojektowanego na podstawie wniosków z symulacji numerycznych układu laserującego). W obu przypadkach zgodność wyników symulacji z wynikiem eksperymentalnym jest akceptowalna, jednak dla WI zgodność ta jest znacznie wyższa co sugeruje, że współczynniki WI dokładniej przybliżają prawdopodobieństwo wystąpienia konwersji w górę dla ETU (W₁₁ oraz W₂₂). Wyniki symulacyjne zaprezentowane w dalszej części tego podrozdziału oraz wyniki eksperymentalne z podrozdziału 3.2 są zgodne z wynikami uzyskanymi w [71],[81],[82],[21],[78]. Efektywność pracy dla eksperymentalnego układu laserowego wynosiła 24%. W przypadku symulacji dla oddziaływań typu WI wynosi ona 29% a dla SI 36%.



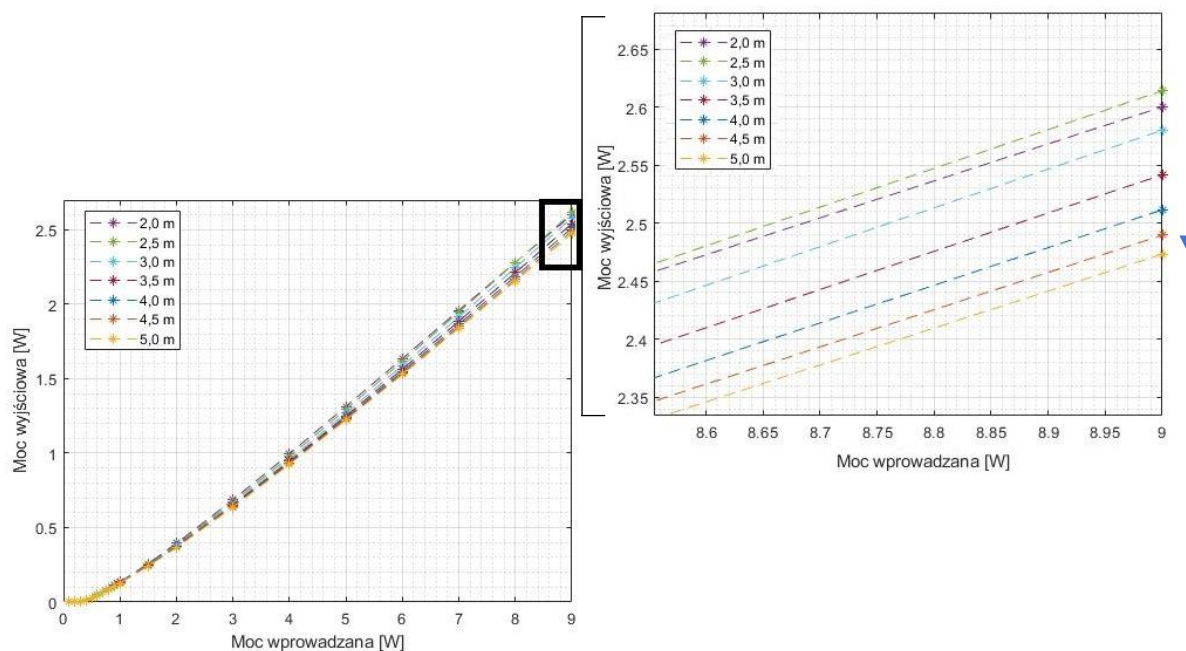
Rysunek 37. Wykres zależności mocy wyjściowej od mocy wejściowej w układzie lasera CW Er³⁺:ZBLAN dla symulacji numerycznych przy założonych SI i WI oraz dla wyników pomiarowych z podrozdziału 3.2

Przy zastosowaniu modelu numerycznego przeanalizowano wpływ parametrów elementów składowych wnęki laserowej na moc wyjściową i sprawność kwantową. Na rys. 38 oraz 39 przedstawiono wyniki analizy wpływu długości włókna na moc wyjściową oraz sprawność kwantową układu. Długość włókna aktywnego była zmieniana od 0,5-5m z krokiem co 0,5m.



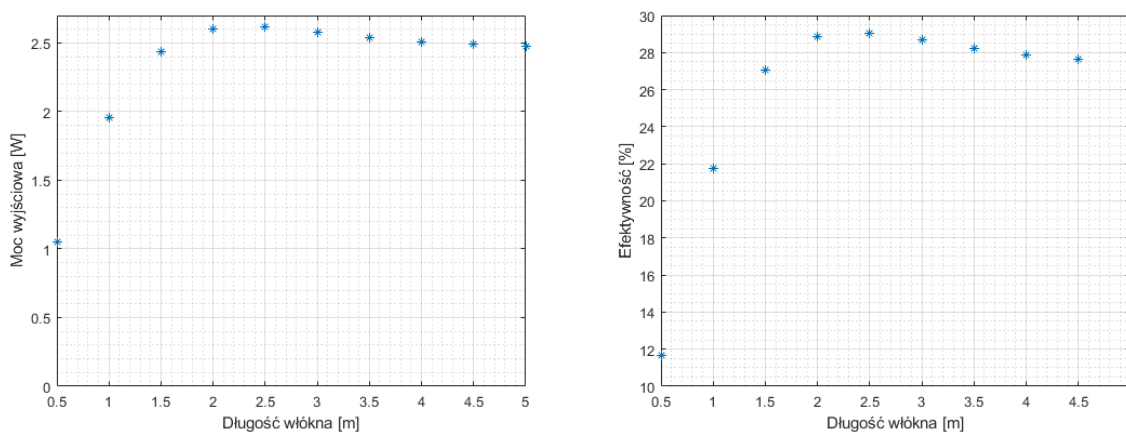
Rysunek 38. Wykres zależności mocy wyjściowej od mocy wejściowej w układzie lasera CW Er^{3+} :ZBLAN dla długości włókna aktywnego 0,5-2,5m

Wyniki przedstawione na rys. 38 wskazują, że wraz ze wzrostem długości włókna rośnie również moc wyjściowa oraz nachylenie krzywej. Zależność ta utrzymuje się do długości 2,5m. Powyżej tej długości poziom mocy oraz sprawność kwantowa zaczynają spadać co widać na rys.39.



Rysunek 39. Wykres zależności mocy wyjściowej od mocy wejściowej w układzie lasera CW Er³⁺:ZBLAN dla długości włókna aktywnego 2-5m

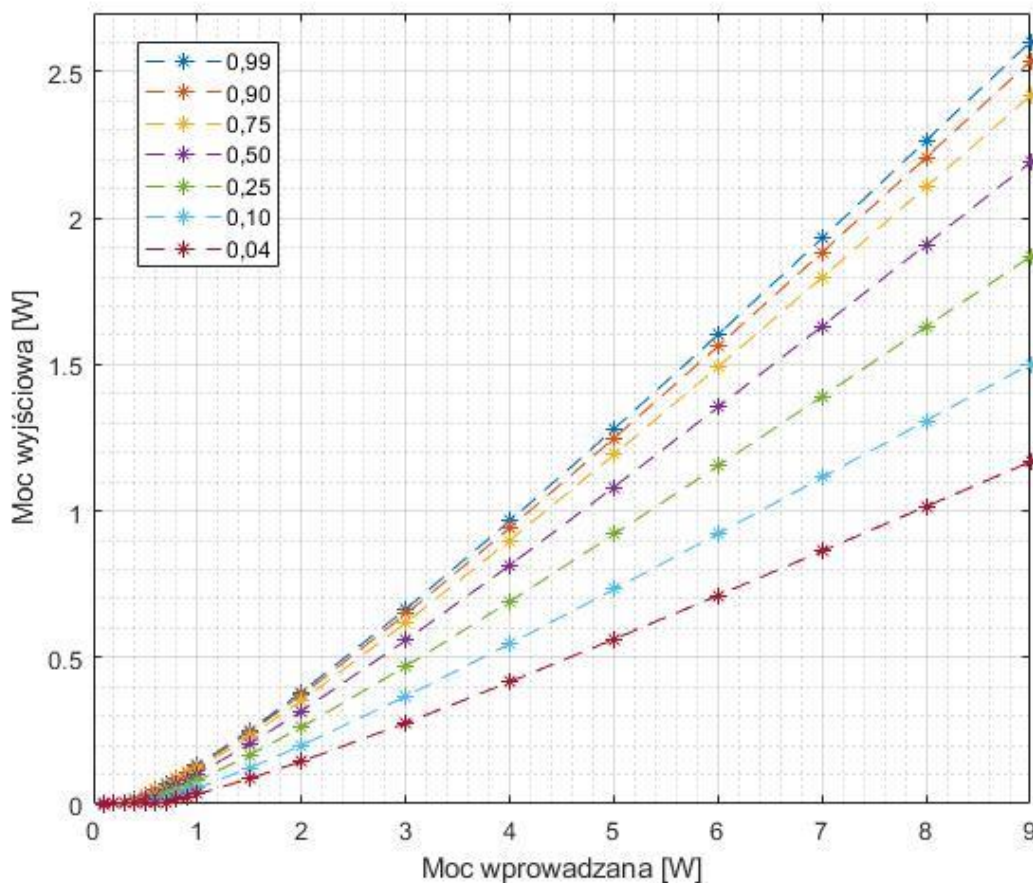
W celu lepszego zobrazowania tego efektu wykonano wykresy mocy wyjściowej oraz efektywności pracy lasera przy pobudzeniu mocą 9W w funkcji długości włókna aktywnego. Wykresy te zostały przedstawione na rys.40. Maksimum dla obu tych zależności zostaje osiągnięte dla długości włókna 2-3m.



Rysunek 40. Wykresy zależności mocy wyjściowej (lewy) oraz efektywności pracy (prawy) lasera przy pobudzeniu mocą 9W w funkcji długości włókna aktywnego

Projektując układ laserowy wykorzystujący włókno aktywne Er³⁺:ZBLAN należy rozważyć różne konstrukcje rezonatora. Jednym z rozwiązań jest układ laserowy, w którym rezonator stanowiłoby złote zwierciadło $R_s(z=L)=R_p(z=L)=0,96$ oraz obcięte pod kątem prostym włókno aktywne, w którym $R_s(z=0)=R_p(z=0)=0,04$. Główną zaletą takiego układu jest jego prostota oraz niski koszt. W ramach analizy wpływu parametrów odbiciowych wnęki rezonansowej na parametry wyjściowe układu laserującego, przeprowadzono dwie serie

symulacji. Pierwsza dotyczyła wpływu odbiciowości zwierciadła kończącego wnękę rezonansową $R(z=L)$ na moc wyjściową. W ramach badań zasymulowano zależności mocy wyjściowej od mocy wejściowej dla odbiciowości 0,99, 0,9, 0,75, 0,5, 0,25, 0,1 oraz 0,04 przy długości włókna wynoszącej 3m. Wyniki zaprezentowano na rys.32.

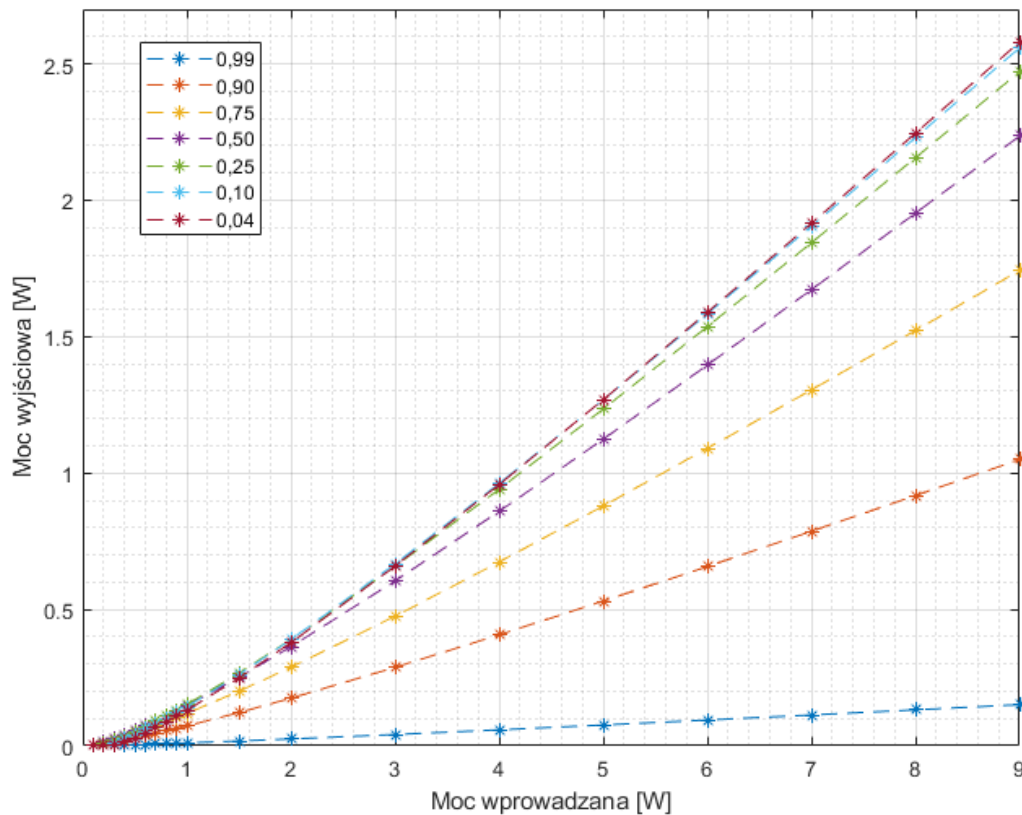


Rysunek 41. Wykres zależności mocy wyjściowej od mocy wejściowej w układzie lasera CW Er^{3+} :ZBLAN dla różnych wartości $R(z=L)$

Wraz ze wzrostem odbiciowości wzrasta też moc wyjściowa oraz sprawność kwantowa. Różnica pomiędzy mocą wyjściową dla odbiciowością 0,99 oraz 0,9 wynosi $\sim 3\%$ a różnica w efektywności pracy wyniosła $\sim 1\%$.

Druga symulacja została wykonana przy uwzględnieniu różnych wartości odbiciowości początku rezonatora. Podczas symulacji zastosowano w tym miejscu proste przycięcie włókna umożliwiające uzyskanie odbiciowości 0,04 oraz zwierciadło dichroiczne o określonej odbiciowości, będące przezroczyste dla sygnału pobudzającego. Podobnie jak w poprzedniej symulacji w ramach badań zasymulowano zależności mocy wyjściowej do mocy wejściowej dla odbiciowości 0,99, 0,9, 0,75, 0,5, 0,25, 0,1 oraz 0,04 przy 3m odcinku włókna aktywnego.

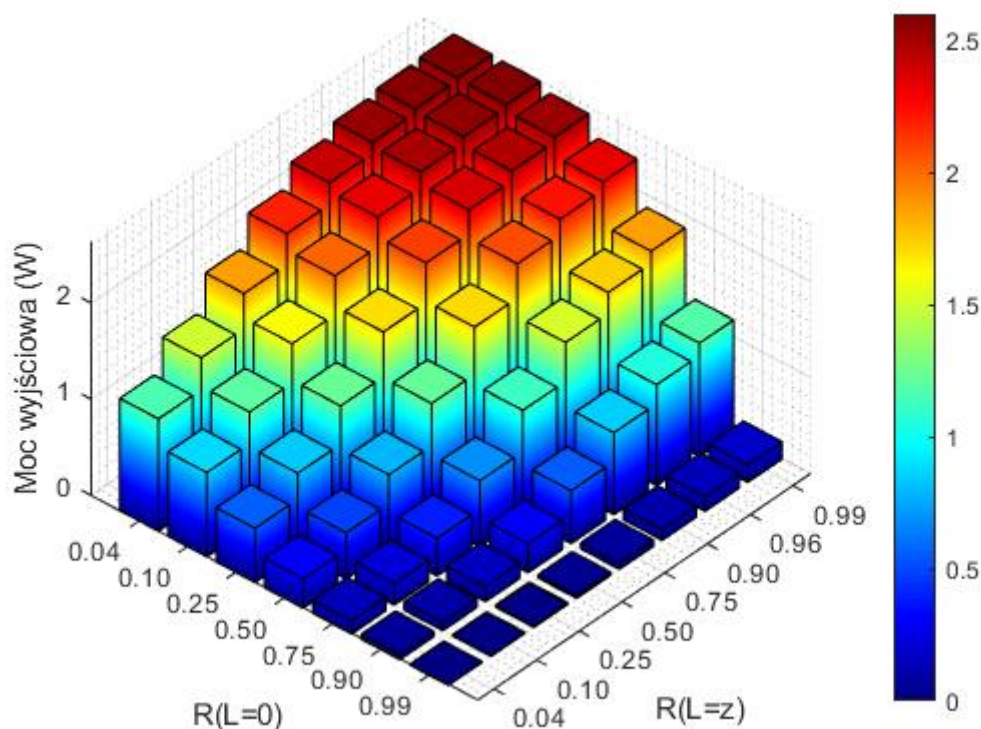
Drugą stroną rezonatora ($z=L$) stanowiło zwierciadło o odbiciowości 0,96. Wyniki zaprezentowano na rys.42.



Rysunek 42. Wykres zależności mocy wyjściowej od mocy wejściowej w układzie lasera CW Er^{3+} :ZBLAN dla różnych wartości $R(z=0)$

Analiza danych zaprezentowanych na rys.42 pozwala stwierdzić, że przy wykorzystaniu zwierciadła o odbiciowości $R=0,96$ jako zakończenia wnęki ($z=L$) najwyższą moc wyjściową uzyskuje się dla obciętego pod kątem prostym włókna oraz dla zwierciadeł o $R=0,1-0,25$. Zasadnym wydaje się więc wykorzystanie w układzie eksperymentalnym, jako element odbijający, płasko obciętej końcówki włókna. Zastosowanie zwierciadeł dichroicznych przynosi podobne wyniki jednak komplikuje konstrukcję układu oraz zwiększa jego koszt.

Kolejnym krokiem było poszerzenie symulacji o pełną analizę wpływu odbiciowości elementów składowych wnęki rezonansowej na moc wyjściową lasera. W tym celu przyjęto stałą długość włókna aktywnego wynoszącą 3m oraz moc wzbudzającą o wartości 9W i zmieniano parametry odbiciowe $R(z=0)$ oraz $R(z=L)$ w przedziale 0,04-0,99. Wyniki zaprezentowano na rys.43.



Rysunek 43. Wykres zależności mocy wyjściowej od odbiciowości wnęki rezonansowej w układzie lasera CW Er³⁺:ZBLAN

Najwyższa uzyskana wartość mocy wyjściowej wyniosła 2,6W dla $R(z=0)=0,04$ oraz $R(z=L)=0,99$. Wartość ta jest jednak bardzo zbliżona do wartości uzyskanych w przedziale $R(z=0)$ wynoszący od 0,04 do 0,10 oraz $R(z=L)$ od 0,96 do 0,99.

3.1.3. Podsumowanie analizy numerycznej

W rozdziale opisany został model teoretyczny służący do symulacji zachowania układu laserowego CW wykorzystującego jako włókno aktywne światłowód Er³⁺:ZBLAN. Model ten został następnie porównany z układem eksperymentalnym przedstawionego w rozdziale 3.2. Wyniki symulacji pokrywają się z wynikami eksperymentu w bardzo wysokim stopniu. W ramach analizy możliwości rozwoju układu laserowego przeprowadzono symulacje wpływu niektórych z parametrów elementów składowych rezonatora na moc wyjściową oraz sprawność kwantowa układu. Wyniki sugerują, że dla prostego układu wykorzystującego odbicie Fresnela oraz złote zwierciadło długość włókna aktywnego powinna wynosić 2-3m.

Analiza wpływu odbiciowości w miejscu $z=0$ wykazała, że wykorzystanie odbicia Fresnela pozwala osiągnąć wyniki porównywalne lub lepsze niż ma to miejsce w przypadku wykorzystania zwierciadeł dichroicznych przy jednoczesnym zachowaniu prostoty układu. Jeśli natomiast chodzi o $R(z=L)$ to z symulacji wynika, że chcąc uzyskać maksymalną moc

wyjściową powinno się zastosować zwierciadło o jak najwyższym poziomie odbiciowości, przy czym różnica w mocy między odbiciowością 0,96 a 0,99 wynosi jedynie 1% co uzasadnia zastosowanie złotego zwierciadła w celu ograniczenia kosztów całkowitych układu.

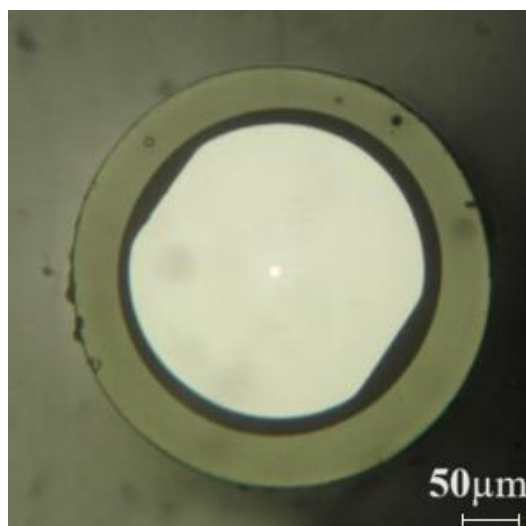
Przeprowadzenie analizy numerycznej pozwoliło autorowi na dobór parametrów wnęki rezonansowej przedstawionego w rozdziale 3.2 układu laserującego. Autor zdecydował wykorzystać najprostszą z konstrukcji zakładającą wykorzystanie odbicia Fresnela oraz złotego zwierciadła. W projekcie postanowiono również wykorzystać najdłuższy możliwy odcinek włókna aktywnego, przy którym moc wyjściowa wciąż pozostaje najwyższa (3m). Oznacza to uzyskanie parametrów pracy układu gorszych niż w przypadku odcinka o długości ok. 2,5m. Straty te są jednak bardzo małe a wykorzystanie dłuższego odcinka włókna aktywnego wiąże się z pewnymi korzyściami związanymi z możliwością przycięcia włókna w przypadku uszkodzenia jego czoła bez dużego wpływu na efektywność pracy układu laserującego.

3.2. Laser Er³⁺:ZBLAN

W poniższym rozdziale autor przedstawia skonstruowany na potrzeby badań układ laserujący wykorzystujący jako włókno aktywne światłowód Er³⁺:ZBLAN. Parametry układu zostały dobrane zgodnie z symulacjami numerycznymi przedstawionymi w podrozdziale 3.1.

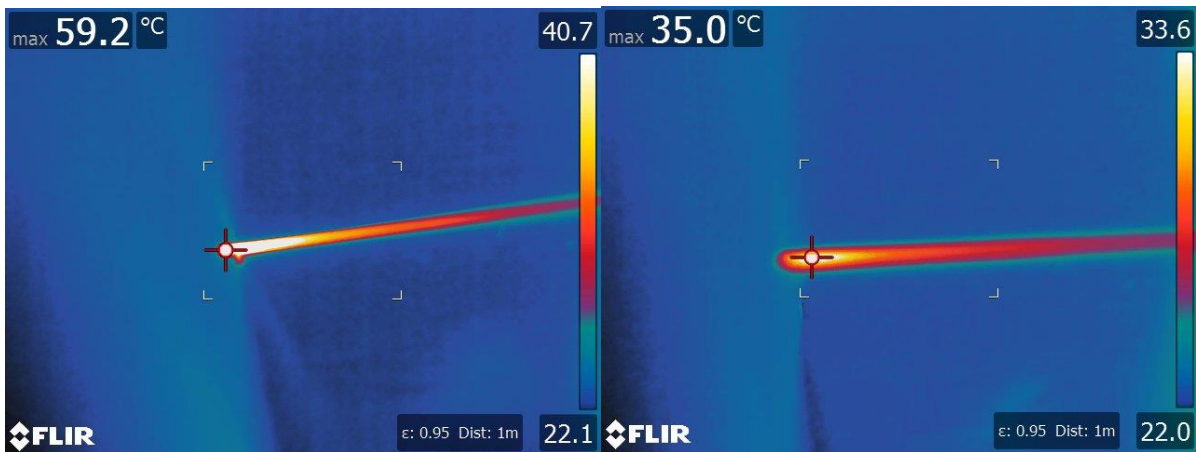
3.2.1. Konstrukcja lasera CW Er³⁺:ZBLAN

Do eksperymentu zgodnie z przyjętymi w symulacji założeniami wykorzystano 3m włókno Er³⁺:ZBLAN z podwójnym płaszczem. Rdzeń światłowodu był domieszkowany związkiem ErF₃ na poziomie 7 mol.% (70 000ppm). Zgodnie z [74] pozwala to na uzyskanie absorpcji pompy 0,975μm na poziomie ok. 3dB/m. Konstrukcja światłowodu została przedstawiona na rys.44. Rdzeń światłowodu miał średnicę 15μm, podczas gdy wewnętrzny płaszcz miał kształt podwójnego D o średnicach zewnętrznych 240/260μm. Ten typ konstrukcji pozwala na efektywniejsze wzbudzenie rdzenia wiązką pompującą. Apertura numeryczna ang. numerical aperture (NA) między rdzeniem i płaszczem wewnętrznym wynosiła NA₁₋₂=0,12, podczas gdy apertura numeryczna pomiędzy płaszczem wewnętrznym a zewnętrznym wynosiła NA₂₋₃=0,46. Włókno pracuje jednomodowo powyżej 2,5μm.



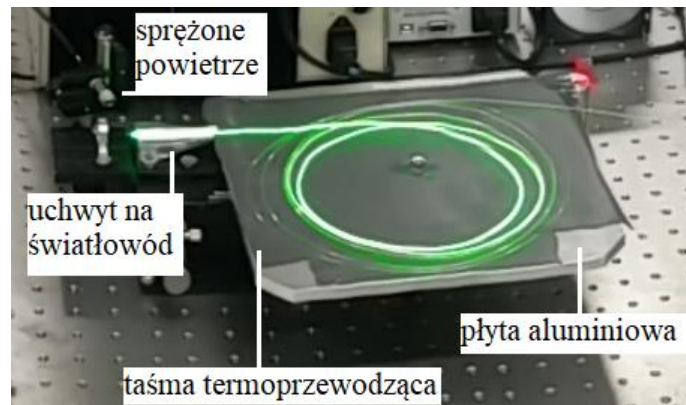
Rysunek 44. Zdjęcie czoła włókna aktywnego Er³⁺:ZBLAN [83]

Końce światłowodu zostały umieszczone w aluminiowych uchwytach. Włókno zostało również wysunięte z uchwytu na długość ok 2mm i umieszczone pod nadmuchem sprężonego powietrza. Taki sposób umieszczenia włókna przynosi dwie korzyści. Po pierwsze temperatura czoła włókna, jest obniżana poprzez ciągły przepływ powietrza. Po drugie powietrze znajdujące się w okolicy czoła włókna posiada niski poziom wilgotności. Dzięki temu proces degradacji opisany w sekcji 1.2.1 jest zmniejszony. W ramach testów układu wykonano pomiary temperatury czoła włókna z użyciem kamery termowizyjnej (rys.45). Oba zdjęcia zostały wykonane przy takiej samej mocy wejściowej źródła pompującego i w takim samym układzie laserowym. Różnicę stanowi jedynie nadmuch sprężonego powietrza. Jak widać na rys.45 włókno pozostawione bez nadmuchu (lewe zdjęcie) osiągnęło temperaturę ok. 59°C. Najgorętszym punktem włókna było jego czoło. Przy zastosowaniu nadmuchu (prawe zdjęcie) włókno osiągnęło temperaturę ok. 35°C. Co więcej temperatura ta dotyczy już nie samego czoła włókna a jego dalszej części, która posiadała wyższą temperaturę. Jest to szczególnie ważne biorąc pod uwagę fakt, że to właśnie czoło włókna jest szczególnie podatne na degradację. Warto też pamiętać o tym, że czoło włókna stanowi często zakończenie wnęki rezonansowej przez co jego stan jest tym bardziej kluczowy.



Rysunek 45. Zdjęcia termowizyjne końca włókna aktywnego w dwóch konfiguracjach chłodzenia: brak nadmuchu sprężonego powietrza (lewe) oraz z nadmchem sprężonego powietrza (prawe)

Pozostała część włókna aktywnego została umieszczona na płycie aluminiowej pokrytej taśmą termoprzewodzącą. Zdjęcie układu odprowadzania ciepła przedstawia rys.46.

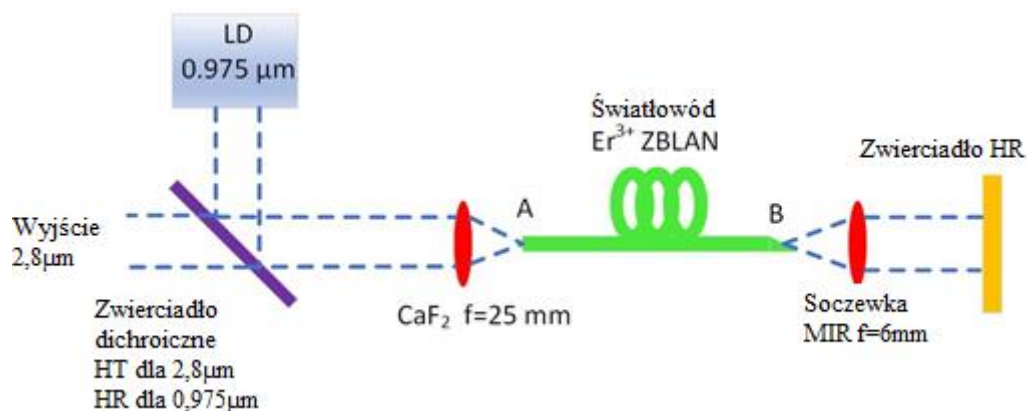


Rysunek 46. Zdjęcie układu chłodzenia włókna aktywnego

Podczas prac nad budową układu niezbędną czynnością było obcinanie włókna aktywnego. Ze względu na kluczowe znaczenie tej czynności podczas badań, w opinii autora uzasadnione będzie poruszenie tematyki różnicy w obróbce włókien krzemionkowych oraz włókien typu ZBLAN w niniejszej pracy. Chcąc obciąć koniec włókna niezbędne jest usunięcie buforu ochronnego. W przypadku włókien krzemionkowych stosuje się w tym celu stripper mechaniczny, który zdiera pokrycie pierwotne, następnie włókno jest czyszczone z wykorzystaniem alkoholu w celu usunięcia pozostałości. W przypadku włókien ZBLAN metoda ta bardzo często prowadzi do fizycznego uszkodzenia włókna. Popularną metodą usuwania polimeru ochronnego jest zastosowanie rozpuszczalników chemicznych niezawierających wody. W wyniku depolimeryzacji pokrycie staje się miękkie i łatwiej odchodzi od włókna. Kolejną różnicą jest cięcie włókna. W przypadku światłowodów krzemionkowych wykorzystywana jest obcinarka z ostrzem diamentowym, które nacina włókno tworząc uszkodzenie na jego powierzchni. Gdy siła zostaje przyłożona wzdłuż

uszkodzenia, naprężenia kumulujące się wzdłuż rysy powodują, że szkło pęka wzdłuż utworzonej linii. Inaczej dzieje się w przypadku włókien fluorkowych. Włókna ZBLAN są określane jako włókna miękkie. Określenie to odnosi się do ich większej, w stosunku do włókien krzemionkowych, elastyczności. Modułu Younga, który określa stosunek naprężenia do odkształcenia w przypadku włókien ZBLAN wynosi 52,7GPa podczas gdy dla włókien krzemionkowych wynosi 72,2GPa [84]. Włókna ZBLAN wymagają więc większych naprężeń w celu wywołania odkształcenia wystarczającego do rozerwania naruszonej struktury. Stosując standardowe narzędzia do cięcia światłowodów krzemionkowych zazwyczaj nie dochodzi do przerwania struktury. W celu wykonania poprawnego cięcia niezbędne jest przyłożenie dodatkowej siły naprężającej włókno. Rozwiązanie to zwiększa siły nakładane na obszar nacięcia umożliwiając cięcie miękkich włókien. Dobór naprężenia jest tutaj kluczowy i odbywa się metodą prób i błędów.

Schemat układu laserowego przedstawiono na rys.47. Włókno aktywne było wzbudzane 30W diodą wielomodową, sprzężoną do włókna wielomodowego o średnicy rdzenia 105 μ m, generującą fale z zakresu ok. 0,975 μ m (BWT K976DA3RN-30.00W) zakończoną złączem SMA. Złącze zostało umieszczone w kolimatorze na platformie pozycjonującej XYZ. Skolimowane promieniowanie było doprowadzane na zwierciadło dichroiczne ustawione pod kątem ok. 45°. Zwierciadło silnie odbijało ang. highly reflective (HR) fale z okolic 0,975 μ m ($R > 98.5\%$), które były kierowane na płasko-wypukłą soczewkę CaF₂ o ogniskowej 25mm. Soczewka skupiała światło na obciętym pod kątem prostym końcu włókna (A). Koniec ten działał jednocześnie jako zakończenie wnęki rezonansowej. Wykorzystano tutaj fakt odbicia części mocy od płasko zakończony końcówki światłowodu. Wartość odbicia ok. 4% jest wystarczająca do uzyskania akcji laserowej przy jednoczesnym zachowaniu prostoty układu laserowego co wykazano w symulacjach (podrozdział 3.1).

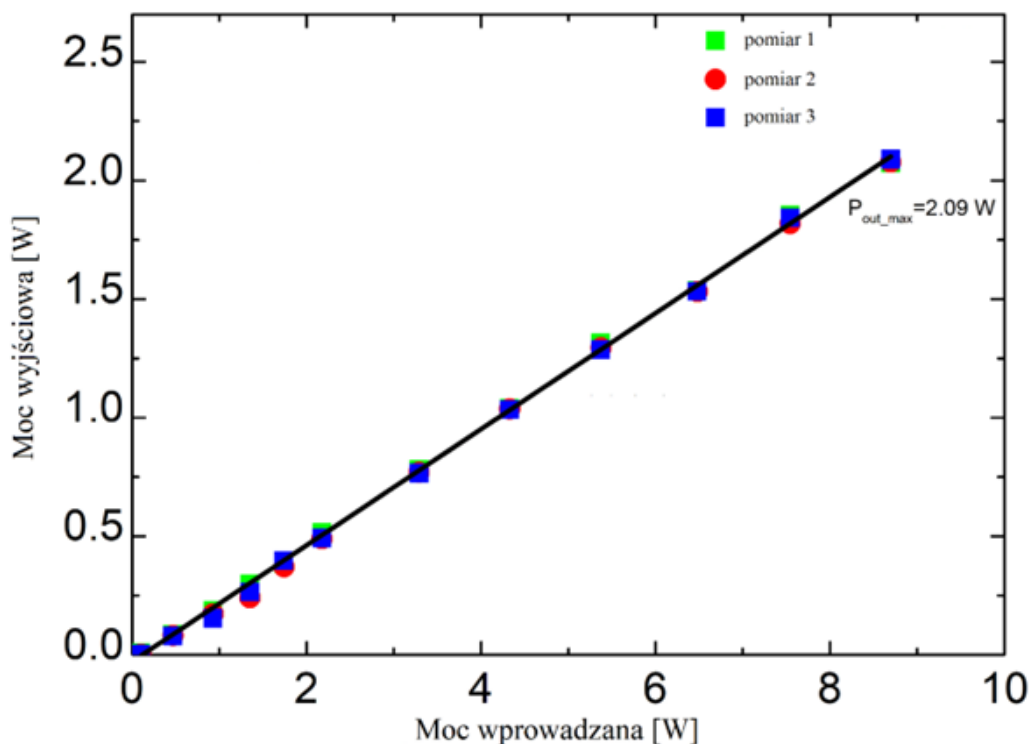


Rysunek 47. Schemat układu lasera CW na włóknie aktywnym Er³⁺:ZBLAN

Drugi koniec włókna (B) został obcięty pod kątem ok. 10° w celu zapobiegania propagacji wstecznej sygnałów odbitych na interfejsie szkło-powietrze. Do cięcia kąтового wykorzystano obcinarkę 3SAE Liquid Clamp Cleaver II LDF, która umożliwia skręcenie włókna podczas procesu obcinania. Odpowiedni dobór skrętu oraz naprężenia powoduje powstanie cięcia kąтового o określonym kącie cięcia. Pozostawienie końca B z płaskim zakończeniem mogłoby spowodować powstanie akcji laserowej pomiędzy końcami światłowodu aktywnego A i B. Z uwagi na niską sprawność kwantową takiego układu autor zdecydował się jednak na układ z zakończeniem wnęki rezonansowej w postaci złotego zwierciadła o odbiciowości $>96\%$ dla długości fali pompy oraz sygnału. Przed dotarciem do zwierciadła wiązka trafiała na soczewkę sferyczną o ogniskowej $f=6\text{mm}$. Wiązka wychodząca z układu laserującego trafiała ponownie na zwierciadło dichroiczne, którym doprowadzano wiązkę pompującą. Zwierciadło miało dużą transmitancję $T>95\%$ ang. highly transparent (HT) dla fali z zakresu $2,8\text{-}3,2\mu\text{m}$. Pomiary mocy wykonywane w układzie z rys. 47 były realizowane z użyciem miernika S415C Thorlabs. W celu odfiltrowania mocy pompy z zakresu ok. $0,975\mu\text{m}$ zastosowano filtr górnoprzepustowy przepuszczający fale $>2,4\mu\text{m}$ (Edmund Optics #68-659). Pomiary spektralne zostały natomiast wykonane z wykorzystaniem monochromatora MSH-150 LOT-Quantum Design GmbH o drodze optycznej 150mm z siatką dyfrakcyjną z centralną długością fali $4\mu\text{m}$, do którego dołączono detektor MCT Vigo System PVI-4TE-5.

3.2.2. Wyniki pomiarów lasera CW Er³⁺:ZBLAN

W ramach badań układu laserowego przedstawionego w 3.2.1 wykonano szereg pomiarów. Pierwszym z nich był pomiar wpływu mocy pompującej wprowadzonej do włókna na moc wyjściową. Wyniki pomiarów zostały zaprezentowane na rys.48.

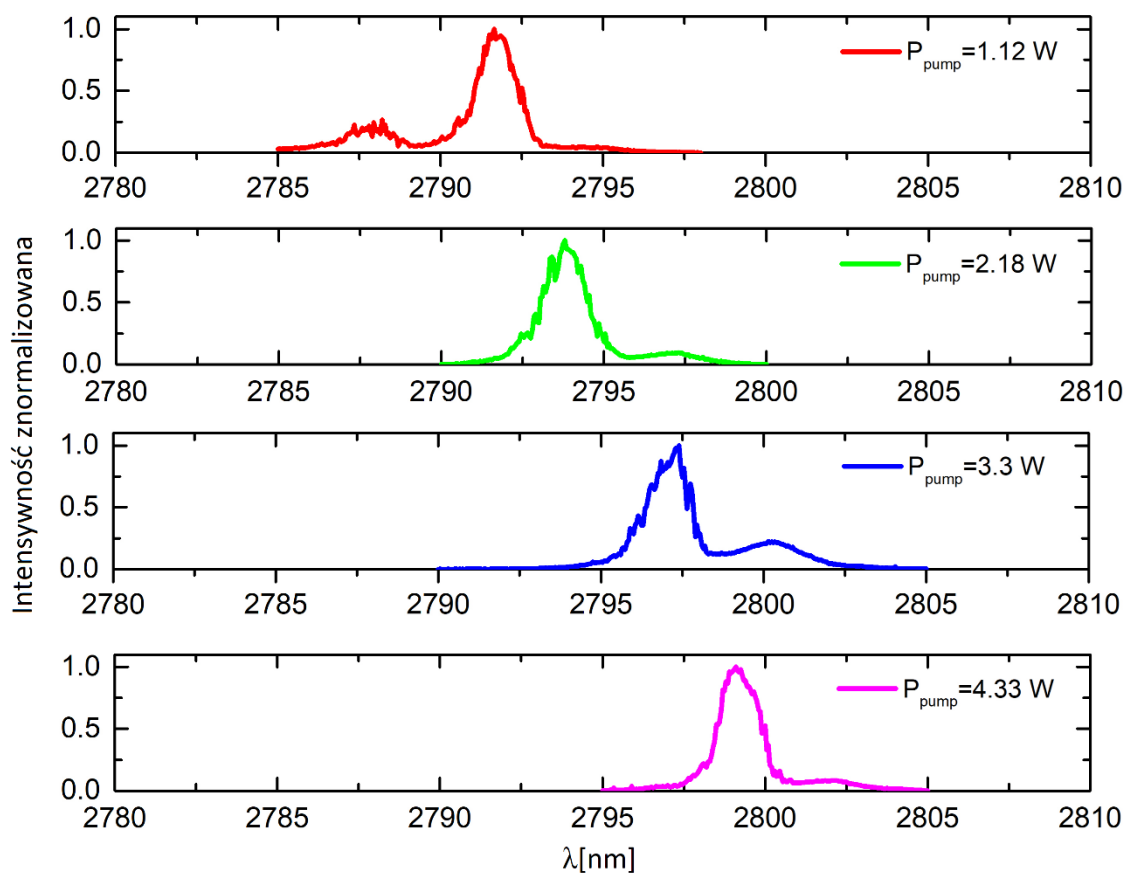


Rysunek 48. Zależność mocy wyjściowej od mocy wejściowej dla układu laserującego

Laser uzyskał niski próg rozpoczęcia akcji laserowej (ok. 100mW). Sprawność kwantowa wyniosła ok. 24%. Maksymalna moc wyjściowa wyniosła 2,09W. Porównując wyniki z innymi publikacjami (np. [29], [81], [82]) zauważono, że sprawność lasera jest podobna. Laser pracował stabilnie co potwierdza zbieżność wyników z trzech pomiarów dokonywanych niezależnie w odstępach czasu >5min. Maksymalna osiągnięta moc (2,09W) nie jest jednak wynikiem porównywalnym z wspomnianymi już 40W zaprezentowanymi w [29]. Zwiększenie mocy wejściowej w badanym układzie skutkowało niestabilną pracą układu laserowego kończącą się uszkodzeniem czoła włókna. Pomimo zastosowania układu chłodzenia z nadmuchiemy sprężonego powietrza, który dodatkowo zmniejszał wilgotność w okolicach czoła włókna niemożliwe było całkowite wyeliminowanie cząsteczek wody. Przy dużych mocach wyjściowych lub długim czasie użytkowania skutkowało to uszkodzeniem termicznym końca włókna. W celu zwiększenia mocy wyjściowej w przyszłości planuje się zbadanie lasera w układzie zamkniętym wypełnionym suchym powietrzem lub w atmosferze azotowej w celu wyeliminowania cząsteczek wody.

Kolejne pomiary dotyczyły wpływu mocy pompy na spektrum pracy układu laserującego. Wyniki zostały zaprezentowane na rys.49. Analizując wyniki można zauważyć, że centralna długość fali lasera przesuwana się w kierunku fali dłuższych wraz ze wzrostem mocy pompującej. Zachowanie to jest charakterystyczne dla laserów, w których wnęce rezonansowej

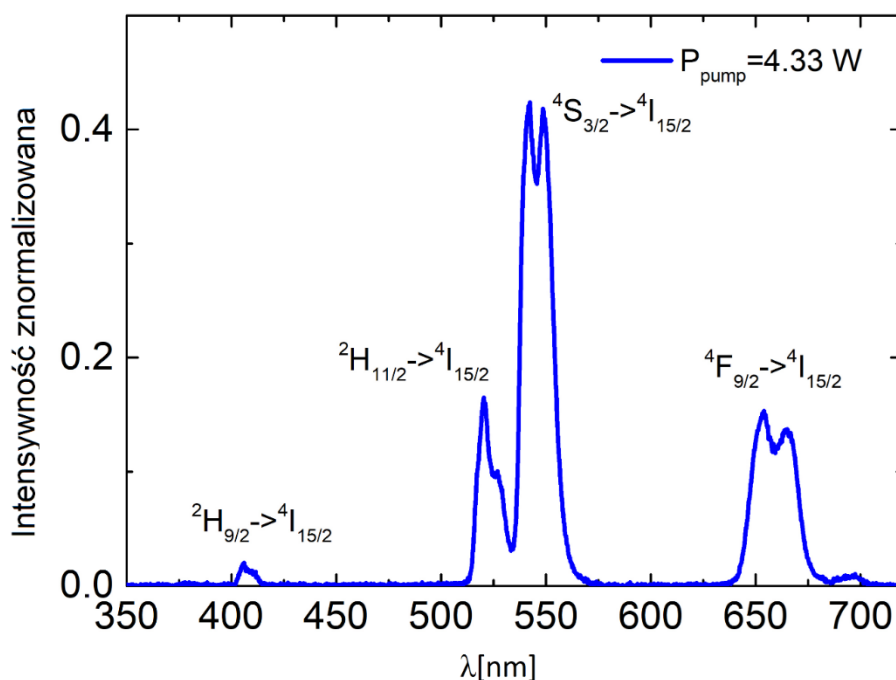
nie znajdują się elementy filtrujące stabilizujące długość fali. W układach takich populacja na podpoziomach energetycznych jest silnie zależna od mocy wprowadzanej. Zgodnie z [85] przyczyną takiego zachowania może być wypełnianie przez jony w stanie wzbudzonym niższego poziomu uczestniczącego w akcji laserowej. Gdy poziom ten zostaje zapełniony akcja laserowa na danej długości fali zostaje wygaszona przechodząc skokowo na inny poziom o podobnej energii przejścia. Wyjaśnia to, dlaczego widmo zmienia się w sposób skokowy a nie zachowuje ciągłego charakteru. Co więcej, w [85] pokazano, że nawet przy pompowaniu laserem CW widmo wykazuje pewne fluktuacje i ma tendencję do czasowej zmiany długości generowanej fali. Skala tych fluktuacji wynosi kilka milisekund. W przypadku włókien domieszkowanych erbem rozwarstwieniu ulegają poziomy $^4I_{11/2}$ oraz $^4I_{13/2}$, tworząc liczne poziomy Starka. Prowadzi to do powstania kilku linii emisyjnych o podobnej energii przejścia. Gdy dolna powłoka biorąca udział w akcji laserowej zostaje nasycona akcja przenosi się na kolejną parę emisyjną powodując zmianę długości fali. W sytuacji, w której zjawisko to jest niepożądane możliwe jest zastosowanie elementów stabilizujących długość fali. Mogą to być np. filtry akustooptyczne czy też siatki Bragga [27, 29]. Elementy te są jednak wciąż trudnodostępne komercyjnie dla fal z zakresu MIR.



Rysunek 49. Zmierzone widmo lasera CW Er³⁺:ZBLAN przy różnych mocach wejściowych

Wyniki pokazują, że laser generuje pomiędzy 2,791 a 2,799 μm z szerokością połówkową ang. full width half maximum (FWHM) ok. 3nm. Zauważalne są również wstęgi boczne spowodowane obecnością drugiego szczytu laserowego.

Analizując odpowiedź włókna na pobudzenie falą 0,975 μm warto również przeanalizować wykazywaną przez włókno luminescencje. W ramach eksperymentu wykonano pomiar luminescencji generowanej przez włókno w zakresie 350-750nm. W tym celu w odległości ok. 5cm od początku włókna (rys.47 koniec A), prostopadle do jego przebiegu, umieszczono krzemionkowe włókno wielomodowe (200 μm średnicy, NA=0.22). Zebrany sygnał został podany na spektrometr CCS 100/M Thorlabs. Zmierzone spektrum zostało przedstawione na rys.50.



Rysunek 50. Wykres intensywności luminescencji układu laserującego w funkcji długości fali

Analizując spektrum z rys.50 wyróżniono cztery główne zakresy spektralne, w których włókno emituje fale z zakresu widzialnego. Największą intensywnością luminescencji charakteryzuje się przejście $^4\text{S}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ odpowiadające za spektrum z okolic 550nm (charakterystyczny zielony kolor generowany przez włókno podczas pobudzania). Inne spektra emisyjne odpowiadają przejściom $^2\text{H}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ (405nm), $^2\text{H}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ (520nm) oraz $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ (660nm). Otrzymane wyniki są zgodne z pracami innych autorów np. [86].

3.2.3. Podsumowanie wyników eksperymentalnych dla lasera CW Er³⁺:ZBLAN

W ramach badań zbudowano układ laserowy wykorzystujący jako włókno aktywne światłowód z podwójnym płaszczem silnie domieszkowany jonami erbu. Układ generował fale elektromagnetyczne o długości ok. 2,8μm. Długość fali była zależna od mocy pobudzającej wprowadzonej do włókna aktywnego. Stosując filtry optyczne (np. siatki Bragga, przestrajalne filtry akustooptyczne) możliwe jest utrzymanie pracy jednofalowej niezależnej od mocy pobudzenia. Wartość mocy wyjściowej wyniosła maksymalnie 2,09W. Głównym powodem, dla którego nie uzyskano większej mocy wyjściowej była degradacja końca włókna. Zastosowane środki ochrony włókna w postaci nadmuchu sprężonego powietrza oraz układu chłodzącego włókno przyczyniły się do zmniejszenia temperatury włókna, w szczególności jego końca. Nie wystarczyło to jednak do zapobiegnięcia uszkodzeniom. W przyszłości planuje się zamknięcie układu w atmosferze obojętnej i wznowienie prac badawczych. Sprawność kwantowa układu wyniosła 24% co pokrywa się z danymi literaturowymi przytoczonymi w tab.1 znajdującej się w rozdziale 1.2.1. W ramach badań zmierzono również luminescencję generowaną przez włókno. Opisane w rozdziale badania zostały opublikowane w pracy: Łukasz Pajewski, Łukasz Sójka, Samir Lamrini, Trevor Benson, Angela Seddon, Sławomir Sujecki: Experimental investigation of a mid-infrared Er:ZBLAN fiber laser, Photonics Letters of Poland. 2020, vol. 12, nr 3, s. 73-75.

Dodatkowo konstrukcja opisywanego w rozdziale 3.2 układu laserowego oraz symulacje numeryczne opisane w rozdziale 3.1, które miały na celu ustalenie możliwych zmian parametrów wnęki rezonansowej zostały wykorzystane w dalszych badaniach, w których uczestniczył autor. W ramach tychże zaprojektowany i wykonany został układ lasera impulsowego wykorzystujący modulację dobroci. Wyniki zostały opisane i opublikowane w pracy: Łukasz Sójka, Łukasz Pajewski, Samir Lamrini, Mark Farries, Trevor Benson, Angela Seddon, Sławomir Sujecki: Experimental investigation of actively q-switched Er³⁺:ZBLAN fiber laser operating at around 2.8 μm, Sensors. 2020, vol. 20, nr 16, art. 4642, s. 1-11.

4. Analiza eksperymentalna układów laserowych

Dy³⁺:ZBLAN

W poprzednich rozdziałach opisano badania eksperymentalne oraz symulacje numeryczne układów laserowych wykorzystujących jako medium aktywne włókna Er³⁺:ZBLAN. Włókna te są dobrze znane, komercyjnie dostępne w wielu formach (w tym w postaci włókien z podwójnym płaszczem), zaś lasery światłowodowe opisane w literaturze. Dużo bardziej uboga jest literatura naukowa na temat laserów wykorzystujących włókna Dy³⁺:ZBLAN. O ile jednomodowe włókna Dy³⁺:ZBLAN są stosunkowo łatwo dostępne, o tyle włókna DC czy też włókna o dużym polu modowym są dostępne tylko u niektórych producentów, a ich jakość nie zawsze umożliwia osiągnięcie akcji laserowej. Wciąż zdarzają się włókna, zawierające defekty strukturalne powodujące, że rozkład mocy wewnątrz włókna jest zaburzony co może skutkować np. uszkodzeniem termicznym włókna podczas akcji laserowej. Z tego powodu światłowody Dy³⁺:ZBLAN wciąż nie stanowią alternatywy dla dobrze opracowanych włókien domieszkowanych erbem czy holmem. Należy jednak zauważyć, że włókna domieszkowane dysprozem posiadają też ogromny potencjał. Domieszka ta pozwala bowiem na generację długości fali z całego zakresu 2,8-3,4μm co nie jest osiągalne przy zastosowaniu erbu czy też holmu.

Na podstawie analizy informacji z literatury oraz doświadczenia zebranego podczas prac badawczych związanych z włóknami Er³⁺:ZBLAN zrealizowano źródła pracy ciągłej oraz impulsowej generujące w zakresie ~3μm przy wykorzystaniu włókna Dy³⁺:ZBLAN. W podrozdziale 4.1 znajduje się przegląd aktualnego stanu wiedzy dotyczącego laserów Dy³⁺:ZBLAN podczas gdy w podrozdziale 4.2 opisano budowę układu lasera pracy ciągłej, w podrozdziale 4.3 umieszczono opis układu impulsowego wykorzystującego modulację wzmocnienia a w podrozdziale 4.4 układu lasera impulsowego wykorzystującego modulację dobroci.

4.1.Stan wiedzy dotyczący laserów Dy³⁺:ZBLAN

Pierwszy laser wykorzystujący jako medium aktywne włókno ZBLAN domieszkowane dysprozem został opisany w publikacji [87] z 2003r. Jackson i jego grupa zaprezentowali laser emitujący ciągłą wiązkę o maksymalnej mocy wyjściowej 275mW. Ich układ działał przy wzbudzeniu na długości fali 1,094μm z efektywnością 4,5%. Układ został skonstruowany z wykorzystaniem rezonatora liniowego. Kolejna warta uwagi praca pochodzi z roku 2011 [88]. W pracy tej przy podobnej długości fali układu wzbudzającego (1,088μm) Tsang i jego grupa

uzyskali sprawność kwantową 23% przy jednoczesnej maksymalnej mocy wyjściowej rzędu 100mW. Osiągnięto więc znacząco większą sprawność kwantową. Wynik ten uzyskano poprzez wykorzystanie do wzbudzenia długości fali 2,8 μ m. W 2016r. sprawność kwantową na poziomie 51% uzyskał zespół Majewski i Jackson [89]. Pomimo osiągnięcia tak wysokiej efektywności moc wyjściowa wynosiła jedynie 80mW. Udowodnione zostało jednak, że wykorzystanie tej długości fali umożliwia uzyskanie efektywnej akcji laserowej. Problemem pozostawało wciąż rozwiązanie podatności włókna na efekt dyfuzji związany z cząsteczkami wody. W 2019r. zaprezentowano układ lasera światłowodowego, w którym wszystkie elementy konstrukcyjne były ze sobą zgrzane a światłowód aktywny został zabezpieczony metodą endcappingu [28]. Układ ten generował sygnał o mocy 10W przy 58% efektywności. Warto też odnotować, że w 2018r zaprezentowano światłowodowy laser Dy³⁺:ZBLAN przestrajalny w zakresie 2,8-3,4 μ m [67]. Układ ten wykorzystywał do wzbudzenia medium aktywnego długość fali 1,7 μ m i osiągał 200mW mocy wyjściowej przy efektywności 21%. Zaprezentowano również układ pracujący z wykorzystaniem źródła pompującego 1,3 μ m [90]. Moc wyjściowa układu wyniosła 200mW przy 20% efektywności.

Układy laserujące wykorzystujące włókna fluorkowe domieszkowane dysprozem mogą być wzbudzane z wykorzystaniem długości fal 1,1 μ m, 1,3 μ m, 1,7 μ m oraz 2,8 μ m. Żadna z tych długości nie jest jednak możliwa do generacji poprzez wykorzystanie tanich układów diodowych zakończonych światłowodem generujących wysokie moce wyjściowe. Spośród wymienionych długości fal najprostsze do uzyskania są fale ~1,1 μ m. Fale te mogą być generowane poprzez wykorzystanie lasera światłowodowego wykorzystującego jako źródło aktywne światłowód domieszkowany iterbem.

Na podstawie pozycji literaturowych dotyczących układów impulsowych można stwierdzić, że podczas gdy lasery impulsowe generujące impulsy pico i femtosekundowe, wykorzystujące technikę synchronizacji modów, zostały już dobrze opisane [52], [51], wciąż mało jest prac dotyczących technik modulacji dobroci i wzmocnienia. Z tego względu tematyka ta wydaje się ciekawa i autor chciałby jej poświęcić więcej uwagi.

Przykładowy laser wykorzystujący technikę modulacji dobroci został zaprezentowany np. w publikacji [91]. Generował on impulsy o energii 12 μ J, o czasie trwania 270ns z częstotliwością od 100Hz – 10 000Hz i mocą średnią ok. 100mW. Jako element modulujący wykorzystany został tutaj modulator akustooptyczny. W tej samej pracy autorzy zaprezentowali układ z pasywnym modulatorem wykorzystującym czarny fosfor jako nasycalny absorber. Układ ten generował impulsy o energii 1 μ J, o czasie trwania 740ns z częstotliwością 86kHz. Średnia moc dla tej konfiguracji wynosiła 87mW.

Technika modulacji wzmacnienia została opisana teoretycznie i przeanalizowana z wykorzystaniem symulacji numerycznych w [92]. Jednak do roku 2019 nie opublikowano żadnej pracy prezentującej wyniki eksperymentalne potwierdzające powstanie działającego układu lasera $\text{Dy}^{3+}:\text{ZBLAN}$ z modulacją wzmacnienia.

Technika modulacji wzmacnienia jest dobrze znana. Dzięki swojej niezawodności i prostocie jest często stosowana do wytwarzania układów laserowych generujących sygnały nanosekundowe w zakresie $2,8 \mu\text{m}$ oraz powyżej $3,46 \mu\text{m}$. Technika polega na modulacji układu pompującego. Niebywałą zaletą jest tutaj brak elementów znajdujących się wewnątrz wnęki rezonansowej.

W roku 2019 opublikowano dwie prace demonstrujące po raz pierwszy układy laserowe wykorzystujące domieszkę dysprozu oraz metodę modulacji wzmacnienia. Pierwszy z nich ukazał się we wrześniu (artykuł został nadesłany do recenzji 25 lipca) i prezentował układ lasera przestrajalnego $2,8\text{-}3,1 \mu\text{m}$ [93]. Układ generował sygnał o mocy średniej $218,6 \text{mW}$ z częstotliwością 80kHz . Szerokość impulsu wynosiła 530ns a energia przenoszona w nim dochodziła do $2,73 \mu\text{J}$. Drugi artykuł ukazał się w listopadzie (artykuł został nadesłany do recenzji 31 maja). Artykuł ten opisuje laser światłowodowy generujący na długości fali $2,943 \mu\text{m}$ wykonany przez autora niniejszej. Obie prace wykorzystywały jako układy pompujące źródła laserowe $1,1 \mu\text{m}$ modulowane z wykorzystaniem modulatorów akustooptycznych. Od czasu wydania tych publikacji tematyka układów laserowych wykorzystujących włókna domieszkowane dysprozem oraz modulację wzmacnienia jest cały czas rozwijana. Naturalnym kierunkiem wydaje się wykorzystanie, podobnie jak ma to miejsce w laserach pracy ciągłej, innych układów pompujących generujących na różnych długościach fali w celu osiągnięcia wyższej efektywności i energii wyjściowych. Wykorzystując pobudzenie długością fali $2,8 \mu\text{m}$ osiągnięto już energie rzędu $19,2 \mu\text{J}$ przy szerokości impulsu 772ns i repetycji 60kHz [94].

4.2. Laser CW $\text{Dy}^{3+}:\text{ZBLAN}$

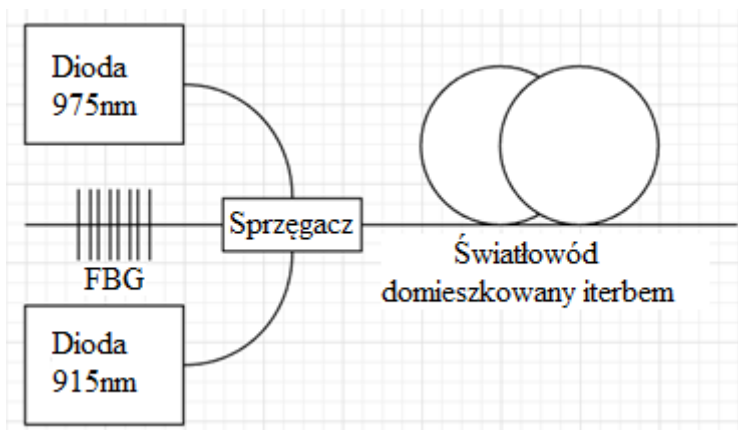
Poniższy podrozdział został poświęcony konstrukcjom układów laserów światłowodowych pracy ciągłej z medium aktywnym w postaci włókna $\text{Dy}^{3+}:\text{ZBLAN}$, które mogłyby zostać wykorzystane do budowy laserów impulsowych.

4.2.1. Założenia konstrukcyjne dla lasera CW $\text{Dy}^{3+}:\text{ZBLAN}$

W celu budowy układu laserowego generującego na $\sim 3 \mu\text{m}$ niezbędnym jest posiadanie źródła fal, które może zostać wykorzystane do wzbudzenia włókna aktywnego. W przypadku

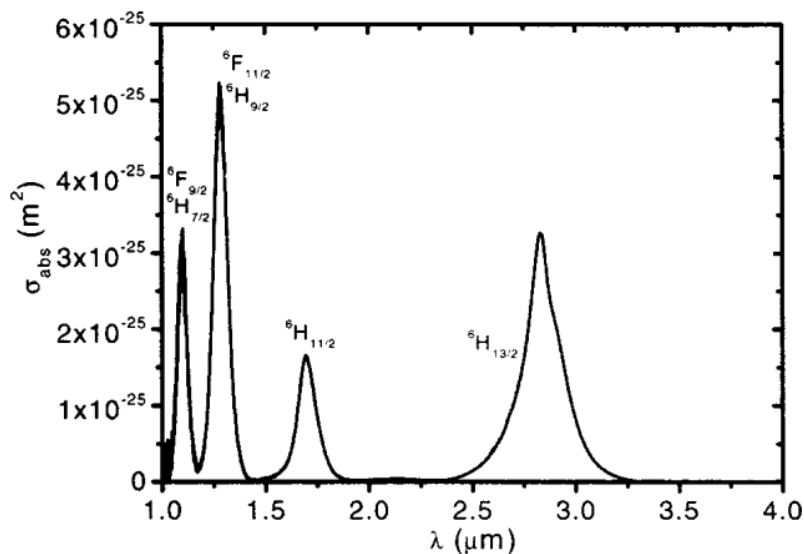
włókien $\text{Dy}^{3+}:\text{ZBLAN}$ brak jest laserów półprzewodnikowych pozwalających na tanie i efektywne wzbudzenie włókna. Zgodnie z informacjami przytoczonymi w podrozdziale 4.1 zazwyczaj wykorzystuje się dwie długości fali: $1,1\mu\text{m}$ oraz $2,8\mu\text{m}$. Układy generujące długość fali $1,1\mu\text{m}$ są jednak znacznie prostsze w produkcji. Dzieje się tak ze względu na łatwą dostępność komponentów do budowy układów laserowych wysokiej mocy generujących w tym zakresie długości fali oraz bardzo dobrze znaną technologię ich wytwarzania. Problemem pozostaje natomiast efektywność wzbudzania wynosząca jedynie kilka procent. Długość fali $2,8\mu\text{m}$ pozwala natomiast uzyskać efektywność na poziomie nawet ok. 60% lecz budowa tego typu źródeł wiąże się z dużo większym kosztem.

Podczas badań, ze względu na doświadczenie autora w konstrukcji światłowodowych laserów wysokich mocy, zdecydowano się na samodzielną budowę lasera wzbudzającego generującego na długości fali $1,1\mu\text{m}$. Jako włókno aktywne zastosowano światłowód z podwójnym płaszczem domieszkowany iterbem (5/130 μm PM-YDF-5/130-VIII Nufern). Laser ten (rys.51) został skonstruowany z wykorzystaniem rezonatora liniowego, w którym jako element silnie odbiciowy wykorzystano światłowodową siatkę Bragga (długość fali siatki $1,1\mu\text{m}$). Po drugiej stronie rezonatora jako element odbiciowy wykorzystano prosto obcięte włókno światłowodowe. Powoduje to, że na końcu układu dochodzi do zjawiska odbicia Fresnela (4% odbicia na granicy interfejsu szkło-powietrze).



Rysunek 51. Schemat układu pompującego $1,1\mu\text{m}$

Długości fali oraz moc wyjściowa generowana przez układ z rys. 51 wynosiła odpowiednio $1,1\mu\text{m}$ oraz 8W. Długość fali została ustalona na występujące w okolicach $1,1\mu\text{m}$ maksimum lokalne absorpcji dysprozu. Zależność absorpcji od długości fali dla Dy^{3+} został przedstawiony na rys.52. Zgodnie z [87] przekrój czynny wynosi dla tej długości fali ok. $3,3 \times 10^{-25} \text{ m}^2$.



Rysunek 52. Spektrum absorpcyjne włókna Dy³⁺:ZBLAN [87]

Podczas badań układów laserowych CW wykorzystujących włókna Dy³⁺:ZBLAN poszukiwane były konstrukcje, które mogą zostać wykorzystane do budowy układu lasera impulsowego z modulacją wzmacnienia oraz układu lasera impulsowego z modulacją dobroci. Testom poddano trzy konfiguracje wnęki rezonansowej:

- układ z rezonatorem utworzonym przez wykorzystanie odbić Fresnela na obu końcach włókna,
- układ wykorzystujący zjawisko odbicia Fresnela od strony wzbudzającej oraz przylegające złote zwierciadło jako zakończenie rezonatora,
- układ wykorzystujący zjawisko odbicia Fresnela od strony wzbudzającej oraz oddalone złote zwierciadło jako zakończenie rezonatora (konstrukcja stanowiła podstawę do planowania układów impulsowych wykorzystujących modulatory objętościowe AOM).

W każdym z wymienionych układów wykorzystano 1m włókna Dy³⁺:ZBLAN (2000ppm) firmy Le Verre Fluoré. Średnica rdzenia włókna wynosiła 12.5μm podczas gdy jego płaszczca 125μm. Apertura numeryczna NA=0.16. Włókno pracowało w trybie jednomodowym dla długości fali powyżej 2.6μm.

Włókno aktywne było wzbudzane z wykorzystaniem opisanego lasera generującego fale 1,1μm. Wiązka wzbudzająca była kierowana na zwierciadło dichroiczne umieszczone pod kątem 45°, a następnie skupiona w światłowodzie aktywnym za pomocą asferycznej soczewki z CaF₂ o ogniskowej 20mm (Edmund Optics). Soczewka nie posiadała powłoki przeciwoodbiciowej. Jej przepuszczalność wynosiła powyżej 95% zarówno dla długości fal wzbudzającej jak i sygnału. Czoło włókna od strony wiązki wzbudzającej zostało obcięte pod

kątem prostym w celu zakończenia wnęki rezonansowej za pomocą odbicia Fresnela. Włókna były przygotowywane z wykorzystaniem precyzyjnej obcinarki do włókien światłowodowych z regulacją naprężeń w celu otrzymania płaskich powierzchni. Dobór naprężeń nastąpił na podstawie metody prób i błędów przy oględzinach włókna z wykorzystaniem mikroskopu laboratoryjnego. Średnia moc wyjściowa była mierzona za pomocą detektora termicznego (S401C Thorlabs).

Absorpcję pompy ustalono biorąc pod uwagę przekrój czynny włókna dla długości fali 1,1 μm wynoszący $\sigma_{\text{pump}}=3.0 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ oraz koncentrację domieszki 2000 ppm ($3.63 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$).

$$A = 10 \log \left(\frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \right) = 4,34 \alpha L \quad (27)$$

Zakładając, że współczynnik absorpcji (α) wynosi:

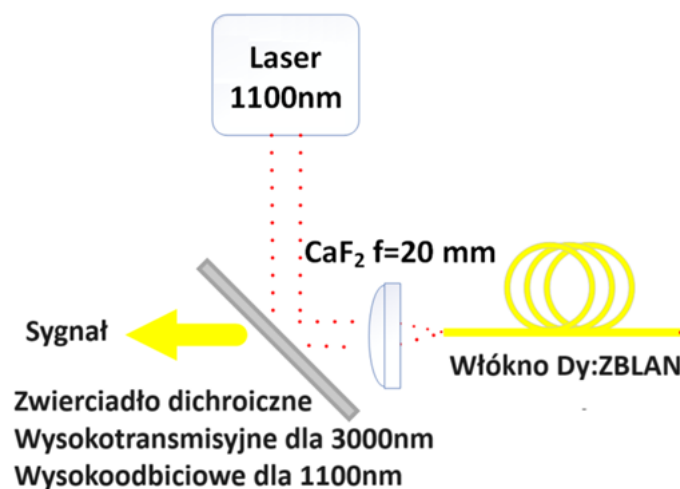
$$\alpha = \sigma_{\text{pump}} * x \quad (28)$$

gdzie x jest koncentracją domieszki oraz podstawiając dane do wzorów 27-28 wyliczono absorpcję na poziomie ok. 47dB.

W celu ustalenia poziomu mocy wprowadzanej do włókna posłużono się pasywnym włóknem krzemionkowym o długości, średnicy rdzenia oraz aperturze numerycznej odpowiadającej wykorzystywanemu światłowodowi domieszkowanemu. Pomiar wykazał, że efektywność wprowadzania wynosi ok. 55%. Maksymalna moc wprowadzona do włókna wynosiła ok. 4,5W.

4.2.2. Konstrukcje lasera CW Dy³⁺:ZBLAN oraz wyniki pomiarów

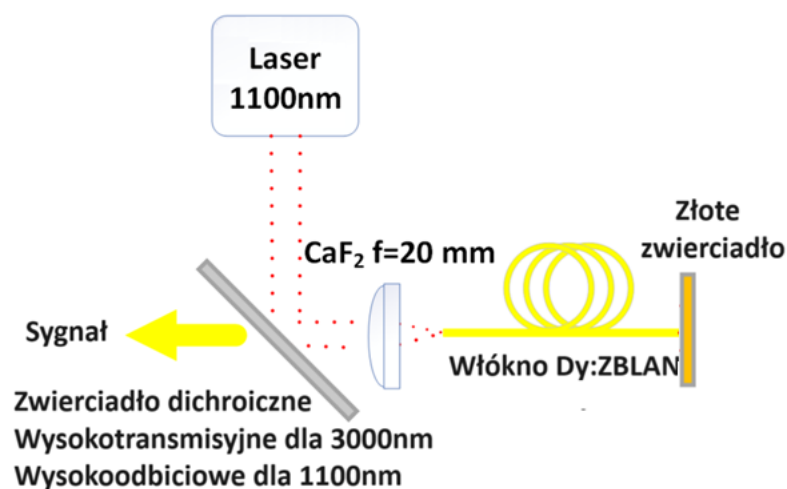
Pierwsza z konstrukcji zakładała układ z rezonatorem utworzonym przez wykorzystanie odbić Fresnela na obu końcach włókna. Budowa układu została przedstawiona na rys.53.



Rysunek 53. Układ eksperymentalny lasera CW Dy³⁺:ZBLAN z rezonatorem linowym zakończonym prosto obciążonym włóknem

W czasie pomiarów uzyskanie akcji laserowej okazało się niemożliwe. Prawdopodobnie spowodowane to było wysokim progiem laserowania, który nie mógł zostać osiągnięty bez uszkodzenia czoła włókna związanego z efektami termicznymi opisanymi w podrozdziale 1.2. Wysoki próg laserowania jest związany z bardzo niską odbiciowością zwierciadeł wnęki rezonansowej. Odbicie na poziomie 4% powoduje, że potrzeba dużego poziomu mocy wejściowej do uzyskania akcji laserowej. Z tego powodu wykorzystanie tej konstrukcji było niemożliwe choć układy tego typu mają stosunkowo proste konstrukcje i można je zrealizować przy wykorzystaniu minimalnej ilości komponentów.

W kolejnej z konstrukcji do zakończenia rezonatora wykorzystano przylegające do końca włókna złote zwierciadło. Budowa układu została przedstawiona na rys.54.

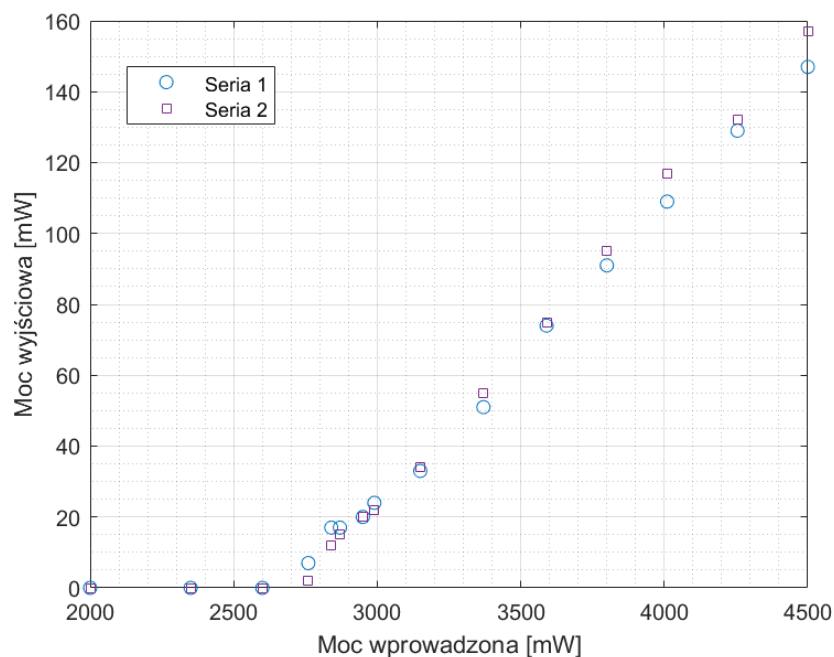


Rysunek 54. Układ eksperymentalny lasera CW Dy³⁺:ZBLAN z rezonatorem linowym zakończonym złotym zwierciadłem (dociśniętym do obciętego pod kątem prostym końca włókna).

Na wstępie zmierzono zależność mocy wyjściowej od mocy wprowadzonej do włókna. Wyniki zostały zaprezentowane na rys. 55. Uzyskano maksymalną moc wyjściową 157mW przy ok 8% efektywności kwantowej. Próg laserowania wyniósł ok. 2850mW. W celu sprawdzenia powtarzalności pomiarów wykonano dwie serie pomiarowe. Pomiędzy seriami zachowano 30min odstęp. Otrzymane wyniki potwierdzają, że układ pracuje stabilnie.

Ze względu na brak dostępu do technologii wytwarzania siatek Bragga we włóknach ZBLAN oraz brak możliwości spawania włókien ZBLAN z włóknami krzemionkowymi autor zdecydował się na zastosowanie technik związanych z odbiciowymi elementami objętościowymi w celu utworzenia wnęki rezonansowej oraz na zastosowanie nadmuchu sprężonego powietrza w celu ograniczenia degradacji końca włókna. Zastosowanie techniki docisku zwierciadła do obciętego pod kątem prostym włókna posiada kilka wartych uwagi zalet. Pozwala ona bowiem na szybkie uzyskanie rezonatora laserowego bez potrzeby

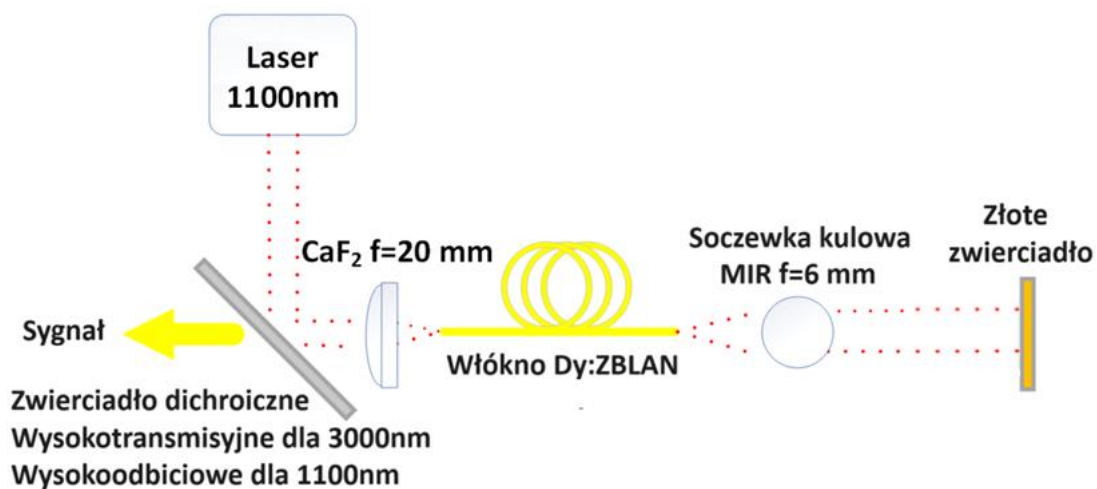
wyprowadzania wiązki z włókna światłowodowego a następnie ponownego wprowadzania jej do włókna. Dodatkowo ogranicza ona dostęp powietrza do czoła włókna co znacząco zwiększa żywotność takiego układu ze względu na ograniczenie procesu dyfuzji. Z uwagi na zalety jakie niesie ze sobą stosowanie tej metody została ona wykorzystana do konstrukcji układu lasera impulsowego wykorzystującego modulację wzmocnienia opisanego w podrozdziale 4.3.



Rysunek 55. Wykres mocy wyjściowej w funkcji mocy wprowadzonej do włókna aktywnego dla lasera CW Dy³⁺:ZBLAN z rezonatorem linowym zakończonym złotym zwierciadłem (dociśniętym do obciążonego pod kątem prostym końca włókna)

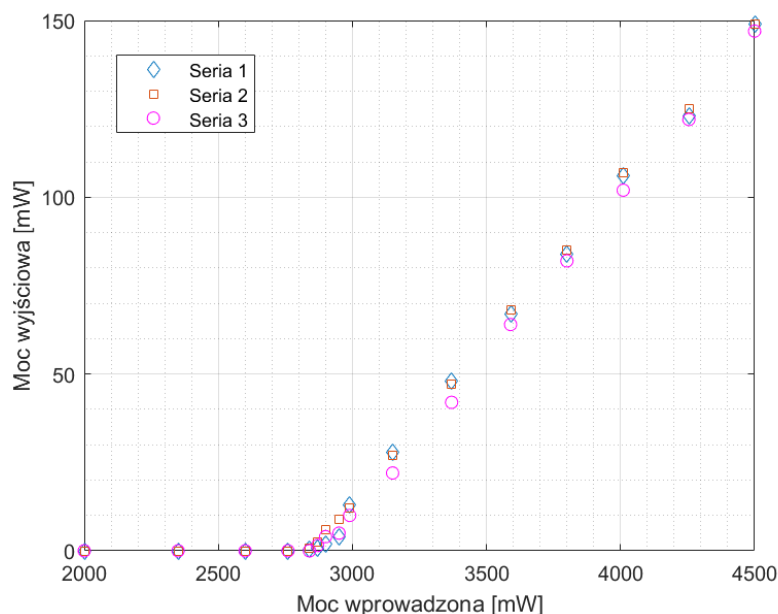
O ile konstrukcja układu z wykorzystaniem dociśniętych zwierciadeł sprawdza się w przypadku układów laserowych z modulacją wzmocnienia o tyle nie sprawdzi się ona w przypadku układów z modulatorem objętościowym wykorzystywanym w układach z modulacją dobroci. Kolejna z badanych konstrukcji zakładała więc oddalenie zwierciadła zamykającego wnękę rezonansową na pewną odległość od czoła włókna w celu późniejszego umieszczenia we wnęce elementu modulującego. Analizując problem konstrukcji takiego układu od strony teoretycznej jasnym wydaje się, że w przypadku zastosowania przerwy powietrznej odległość pomiędzy czołem włókna a zwierciadłem powinna być jak najmniejsza. Wynika to z faktu, że woda zawarta w atmosferze ma wysoki poziom absorpcji dla sygnałów, które są generowane przez układ laserowy. Każdy dodatkowy centymetr będzie więc zwiększał poziom tłumienia wnęki rezonansowej. Dodatkowo im dłuższy obszar oddziaływania sygnału z powietrzem tym ważniejsze staje się utrzymanie podobnego poziomu wilgoci pomiędzy seriami pomiarowymi. Z praktycznego punktu widzenia problemem staje się natomiast wprowadzenie wiązki do włókna po odbiciu od zwierciadła w przypadku małych długości przerwy powietrznej. Podczas

manipulacji wiązką wykorzystywane są bowiem uchwyty na zwierciadła, które pozwalają na zmianę nachylenia sygnału w osi x oraz y. Ich dokładność jest jednak ograniczona, przez co trudno jest uzyskać odpowiedni kąt wprowadzenia wiązki powracającej (mieszczący się w aperturze numerycznej włókna) bez wykorzystania dużej odległości pozwalającej na zaobserwowanie odchylenia. Dobór odległości zwierciadła stanowi więc kompromis pomiędzy stratami wprowadzanymi do wnęki a możliwością ponownego wprowadzenia wiązki do rdzenia włókna. Metodą prób i błędów odległość ta została ustalona na ok. 25cm. Schemat układu eksperymentalnego przedstawiono na rys.56.



Rysunek 56. Układ eksperymentalny lasera CW Dy³⁺:ZBLAN z rezonatorem linowym zakończonym złotym zwierciadłem

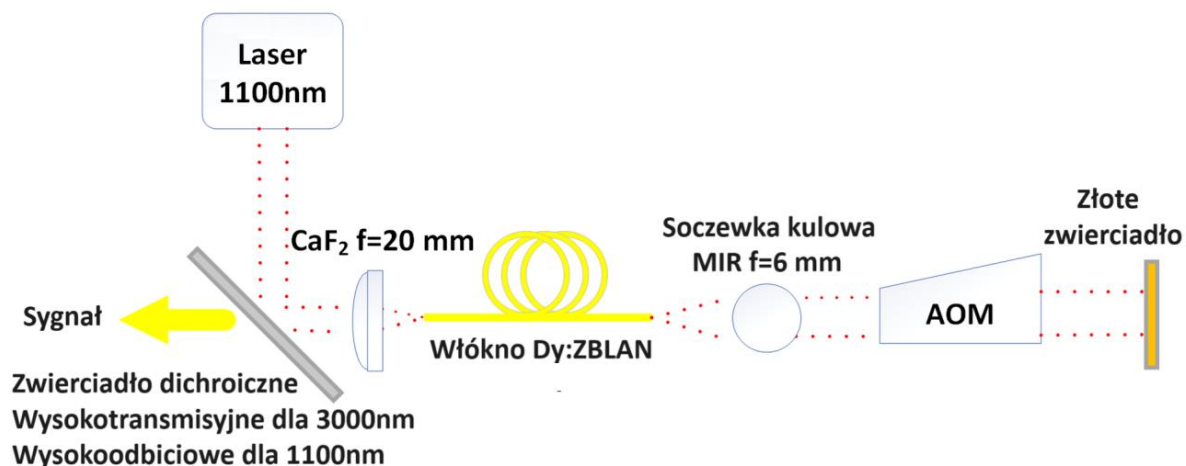
Podczas pomiarów uzyskano maksymalną moc wyjściową 149mW przy ok. 9% nachyleniu zbocza. Próg laserowania wyniósł ok. 2950mW. Podczas pomiarów utrzymywano stałą temperaturę (ok. 20°C) oraz wilgotność (<20%RH) w celu zmniejszenia prawdopodobieństwa uszkodzenia czoła włókna oraz zniwelowania potencjalnych strat wnęki rezonansowej wynikłych z absorpcji sygnału przez cząsteczki wody obecne w powietrzu. Wykres mocy wyjściowej w funkcji mocy wprowadzonej do wnęki został zaprezentowany na rys.57.



Rysunek 57. Wykres mocy wyjściowej w funkcji mocy wprowadzonej do włókna aktywnego dla lasera CW Dy³⁺:ZBLAN z rezonatorem linowym zakończonym złotym zwierciadłem

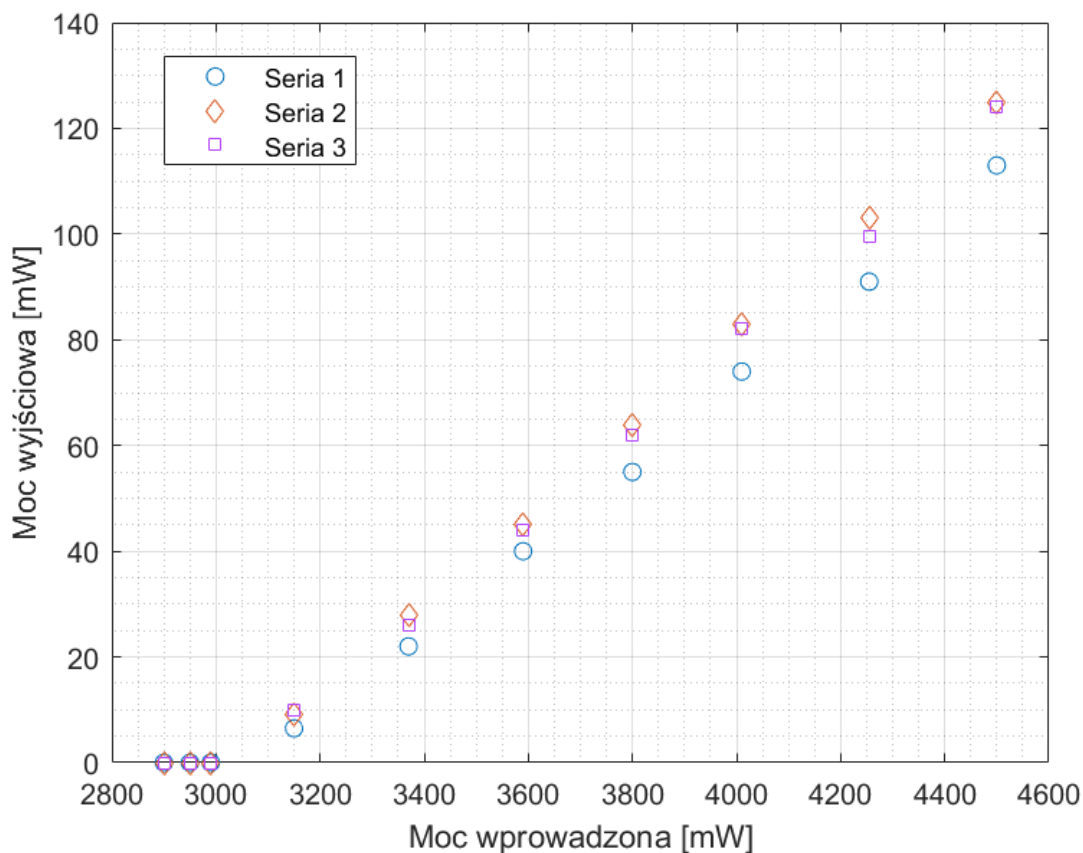
Wyniki uzyskane dla konfiguracji z oddalonym zwierciadłem są porównywalne z tymi uzyskanymi w przypadku zwierciadła przylegającego do czoła włókna. Układ laserowy wciąż pracuje stabilnie i powtarzalnie co potwierdziły wyniki uzyskane dla trzech serii pomiarowych. Eksperyment pokazał, że zastosowanie tego typu wnęki rezonansowej przy zachowaniu pewnych założeń konstrukcyjnych i środowiskowych praktycznie nie wprowadza dodatkowych strat w rezonatorze. Konstrukcja ta osiąga więc wyniki podobne do opisywanego wcześniej rezonatora jednak z powodzeniem może zostać zastosowana w układzie impulsowego lasera światłowodowego z modulacją dobroci.

W celu oszacowania strat wprowadzanych przez posiadany modulator akustooptyczny (I-QS041-1.5C2P-4-MN4 Gooch & Housego, Ilminster, Wielka Brytania) przebadano również układ z wyłączonym modulatorem umieszczonym wewnątrz wnęki (modulator działa wtedy w trybie transmisji). Schemat pomiarowy został zaprezentowany na rys. 58. Wykres zależności mocy wyjściowej w funkcji mocy wprowadzonej przedstawiono na rys. 59.



Rysunek 58. Układ eksperymentalny lasera CW Dy³⁺:ZBLAN z umieszczonym we wnętrzu rezonansowej modulatorem dobroci

W czasie pomiarów uzyskano maksymalną moc wyjściową ok. 125mW co oznacza ok. 0,75dB strat w stosunku do układu niezawierającego modulatora akustooptycznego. Ze względu na zwiększenie strat wnęki rezonansowej wzrostowi uległ również próg laserowania. Wzrósł on z 2950mW do ok. 3150mW. Nachylenie zbocza wyniosło ok. 8,5%.



Rysunek 59. Wykres mocy wyjściowej w funkcji mocy wprowadzonej do włókna aktywnego dla lasera CW Dy³⁺:ZBLAN z rezonatorem linowym zakończonym złotym zwierciadłem (wewnątrz wnęki rezonansowej znajduje się AOM)

4.2.3. Podsumowanie wyników dla lasera CW Dy³⁺:ZBLAN

W ramach badań przeanalizowano 4 układy laserów CW wykorzystujących jako włókno aktywne światłowód jednomodowy Dy³⁺:ZBLAN. Celem badań była analiza dostępnych rozwiązań konstrukcyjnych, porównanie ich i wybór konstrukcji odpowiednich do budowy układów pracy impulsowej wykorzystujących modulację wzmocnienia oraz modulację dobroci.

Do wzbudzania włókna aktywnego Dy³⁺:ZBLAN wykorzystywano światłowodowy laser iterbowy. Pompowanie układu falą 1,1μm wiąże się z niską efektywnością pracy jednak budowa samego lasera wzbudzającego jest stosunkowo prosta a uzyskane moce są wystarczające do osiągnięcia w przyszłości pracy impulsowej.

Konstrukcja układu wykorzystującego jedynie odbicia Fresnela zakończyła się niepowodzeniem. Ze względu na niskie wartości mocy sygnału propagującej wewnątrz włókna próg laserowania dla układu z odbiciami Fresnela jest wyższy niż w przypadku rezonatorów z większym poziomem odbiciowości wnęki. Podczas testów próg ten nie został osiągnięty pomimo zastosowania ok. 4,5W mocy wzbudzającej.

Kolejnym testowanym układem był układ z rezonatorem linowym zakończonym złotym zwierciadłem dociśniętym do obciążonego pod kątem prostym końca włókna. Uzyskano maksymalną moc wyjściową 157mW przy ok 8% nachyleniu zbocza. Próg laserowania wyniósł ok. 2850mW. Konstrukcja ta okazała się prosta w realizacji ze względu na brak potrzeby kontroli położenia wiązki biegnącej w otwartej przestrzeni rezonatora. Dodatkową jej zaletą okazała się wolniejsza degradacja końca włókna aktywnego wynikająca z braku dostępu powietrza do dużej jego powierzchni. Układ ten z powodzeniem może zostać zastosowany przy konstrukcji lasera impulsowego z modulacją wzmocnienia.

W przypadku układu lasera impulsowego z modulacją dobroci najlepszym rozwiązaniem wydaje się zastosowanie układu z odsuniętym zwierciadłem. Testy wykazały, że straty układu wynikające z przerwy powietrznej oraz modulatora akustooptycznego znajdujących się wewnątrz wnęki rezonansowej wynoszą poniżej 1dB. W czasie pomiarów uzyskano maksymalną moc wyjściową ok. 125mW, próg akcji laserowej wyniósł 3150mW, nachylenie zbocza wyniosło ok. 8,5%.

W trakcie pomiarów jednym z głównych problemów była wspomniana już degeneracja włókna pod wpływem cząsteczek wody. W celu uchronienia włókna przed degradacją oraz uszkodzeniem zastosowano technikę docisku włókna do zwierciadła oraz utrzymywano stałą temperaturę (ok. 20°C) oraz wilgotność (<20%RH) w laboratorium. Rozwiązania te nie są

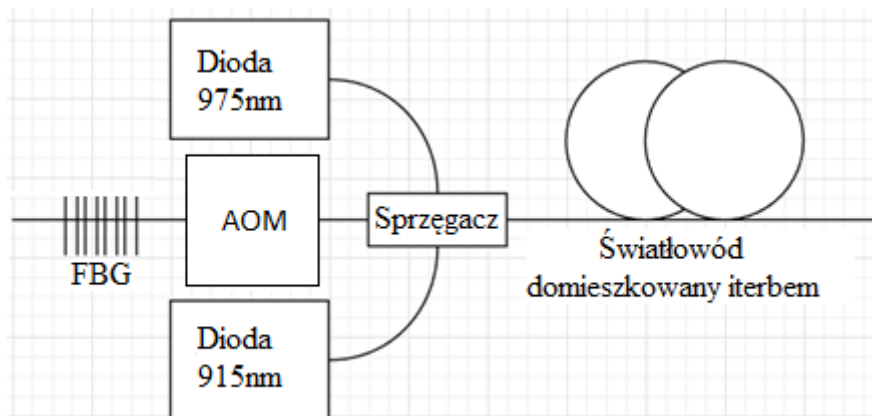
jednak idealne. W przypadku docisku włókna do zwierciadła nie możemy zakładać, że włókno przylega całą powierzchnią czoła do powierzchni zwierciadła a pomiędzy nimi nie występuje przerwa powietrzna. Jeśli zaś chodzi o utrzymywanie niskiej wilgotności w pomieszczeniu, w którym pracuje laser to jest to jedynie środek zaradczy. Obecność wilgoci w powietrzu zawsze będzie powodować degradację czoła włókna zmniejszając żywotność układu. Dlatego też w przypadku budowy układów, które miałyby być trwałe i niezawodne zaleca się zastosowanie dodatkowych środków ochrony czoła włókna (umieszczenie układu w atmosferze obojętnej lub próżni oraz zastosowanie odpowiedniego zakończenia włókna chroniącego przed wpływem dyfuzji).

4.3. Laser impulsowy Dy^{3+} :ZBLAN z modulacją wzmocnienia

Poniższe punkty 4.4.1-4.4.3 prezentują wyniki eksperymentalne uzyskane w ramach prac nad układami impulsowymi laserów Dy^{3+} :ZBLAN wykorzystującymi metodę modulacji wzmocnienia, wraz z analizą. Wyniki te zostały wykorzystane we wspomnianej już publikacji: Łukasz Pajewski, Łukasz Sójka, Samir Lamrini, Trevor Benson, Angela Seddon, Sławomir Sujecki: Gain-switched Dy^{3+} :ZBLAN fiber laser operating around 3 μ m, Journal of Physics-Photonics. 2020, vol. 2, nr 1, s. 1-7.

4.3.1. Konstrukcja lasera impulsowego Dy^{3+} :ZBLAN z modulacją wzmocnienia

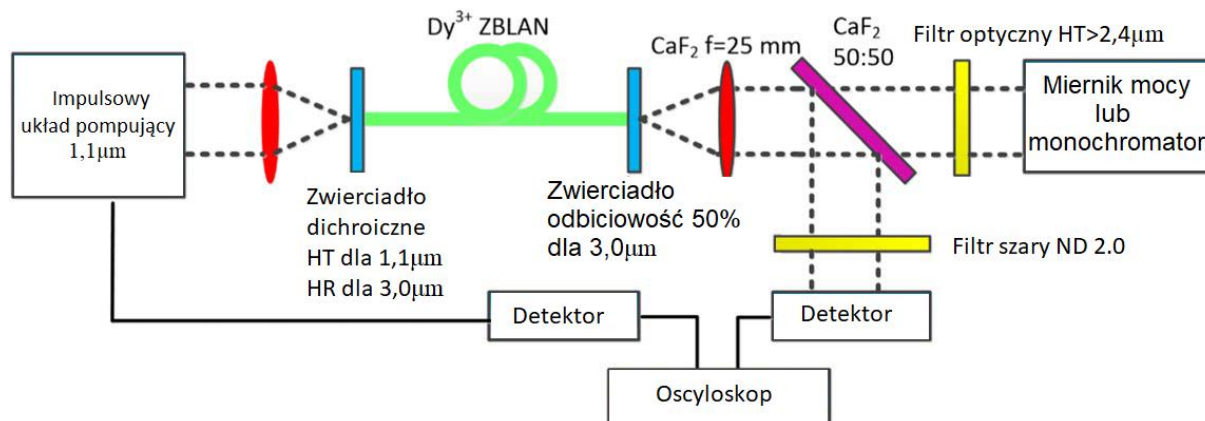
W celu uzyskania generacji impulsów za pomocą metody modulacji wzmocnienia zaprojektowany i wykonany został jednomodowy laser pompujący emitujący wiązkę świetlną z zakresu 1,1 μ m. Schemat układu przedstawia rys.60. Jako włókno aktywne wykorzystano światłowód z podwójnym płaszczem domieszkowany iterbem (5/130 μ m PM-YDF-5/130-VIII Nufern). Modulację dobroci uzyskano stosując modulator akustooptyczny Gooch and Housego S-M150-0.4C2G-3-F2S ze sterownikiem AOM Driver 2910 kontrolowanym za pomocą generatora funkcyjnego GWINSTEK GFG-3015. Laser pracował stabilnie dla częstotliwości z zakresu 25-100kHz.



Rysunek 60 Schemat układu pompującego 1,1μm

Schemat układu impulsowego lasera $\text{Dy}^{3+}:\text{ZBLAN}$ zaprezentowano na rys.61. Jako włókno aktywne wykorzystano światłowód firmy Le Verre Fluoré domieszkowany dysprozem (1000ppm) o średnicy rdzenia $15\mu\text{m}$ pracujący jednomodowo dla długości fali $>2,5\mu\text{m}$. Do budowy układu wykorzystano $0,9\text{m}$ włókna aktywnego. Dobór tej długości włókna miał zapewnić absorpcję pompy na poziomie ok. 21dB.

Wnęka rezonansowa została uformowana poprzez dociśnięcie do jednego z końców włókna zwierciadła dichroicznego ($\text{HR}>98\%$ dla długości fali $2,8\text{-}3,0\mu\text{m}$; $\text{HT}>75\%$ dla długości fali $\sim 1,1\mu\text{m}$). Drugi koniec został zakończony zwierciadłem o odbiciowości 50% dla długości fali sygnału.



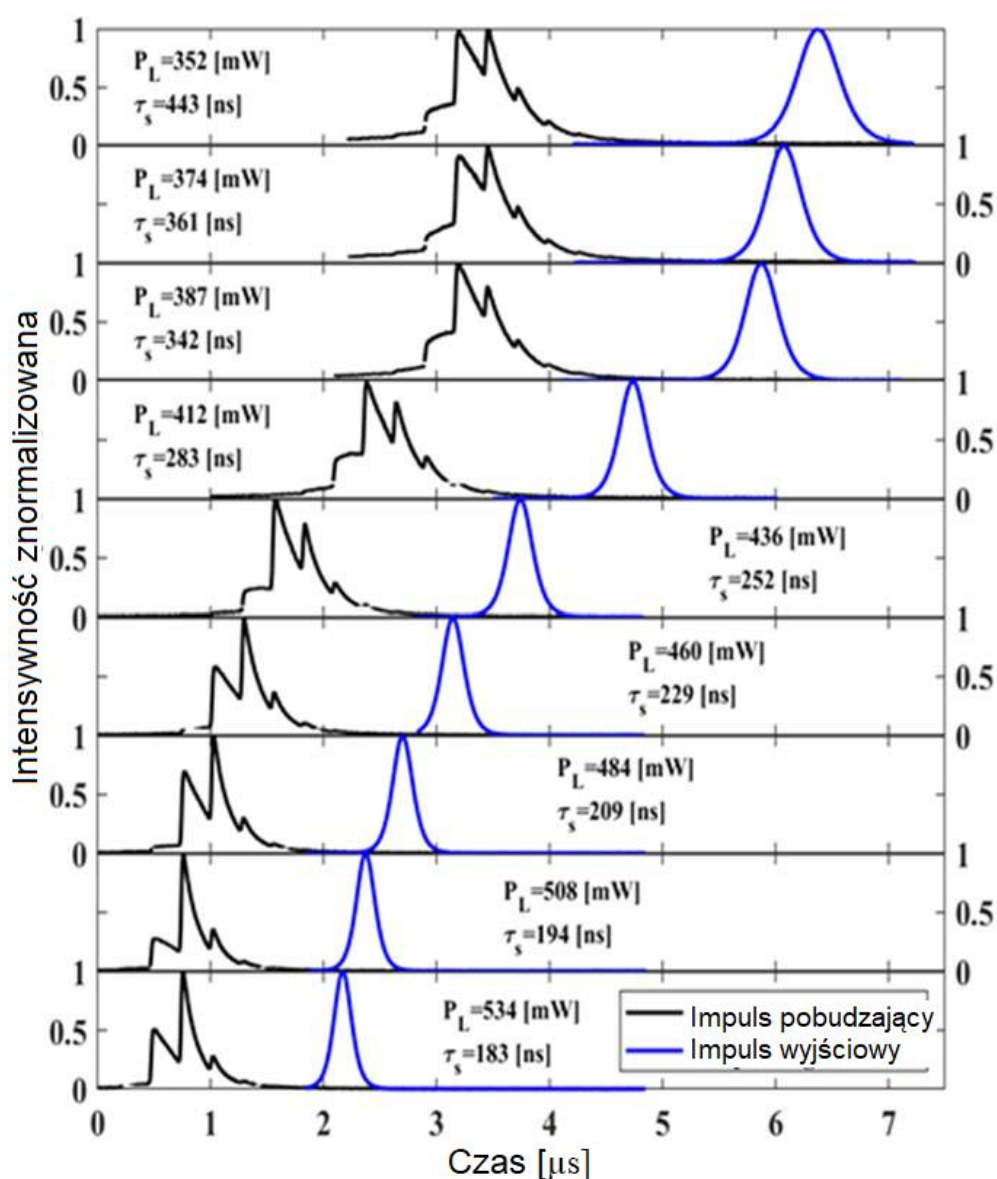
Rysunek 61. Schemat impulsowego układu laserowego z włóknem aktywnym $\text{Dy}^{3+}:\text{ZBLAN}$

Sygnal wyjściowy był skolimowany z wykorzystaniem soczewki CaF_2 (110-5105E Eksma Optics) o ogniskowej 25mm. W celu pomiaru mocy średniej wykorzystano detektor cieplny S401C Thorlabs. W celu odfiltrowania sygnału pobudzającego wykorzystano filtr optyczny górnoprzepustowy $2,4\mu\text{m}$ Edmund Optics #68-659. Do pomiarów spektralnych wykorzystano monochromator (MSH-150 LOT-Quantum Design GmbH) z detektorem MCT (Vigo System PV-4TE-5). Detektor ten charakteryzuje się pasmem 17MHz i czasem narostu 20ns. Pomiarów impulsów sygnału wzbudzającego $1,1\mu\text{m}$ dokonano z wykorzystaniem

detektora krzemionkowego Thorlabs PDA10A-EC o czasie narostu $<2,3\text{ns}$ podczas gdy sygnał był poddany analizie z wykorzystaniem wspomnianego już detektora MCT. Przebieg w dziedzinie czasu uzyskano z użyciem oscyloskopu Keysight DSO90804 A o paśmie 8GHz.

4.3.2. Wyniki pomiarów lasera impulsowego $\text{Dy}^{3+}:\text{ZBLAN}$ z modulacją wzmocnienia

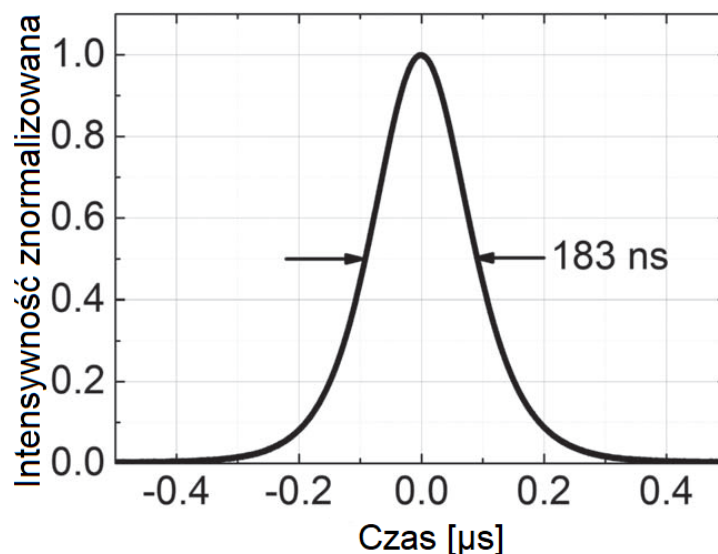
W ramach badań układu wykonano szereg pomiarów mających scharakteryzować parametry sygnału wyjściowego. W tym celu wykonano pomiar wpływu mocy pobudzającej na parametry wyjściowe lasera. Wyniki zostały zaprezentowane na rys.62. W czasie pomiarów utrzymywano 50kHz częstotliwość pracy lasera pobudzającego.



Rysunek 62. Charakterystyka czasowa impulsowego lasera $\text{Dy}^{3+}:\text{ZBLAN}$ oraz układu pobudzającego $1,1\mu\text{m}$ zmierzona dla różnych mocy średniej układu pobudzającego przy częstotliwości pracy 50kHz dla długości włókna aktywnego $L=0,9\text{m}$. P_L – moc wprowadzona, τ_s – czas trwania impulsu wyjściowego

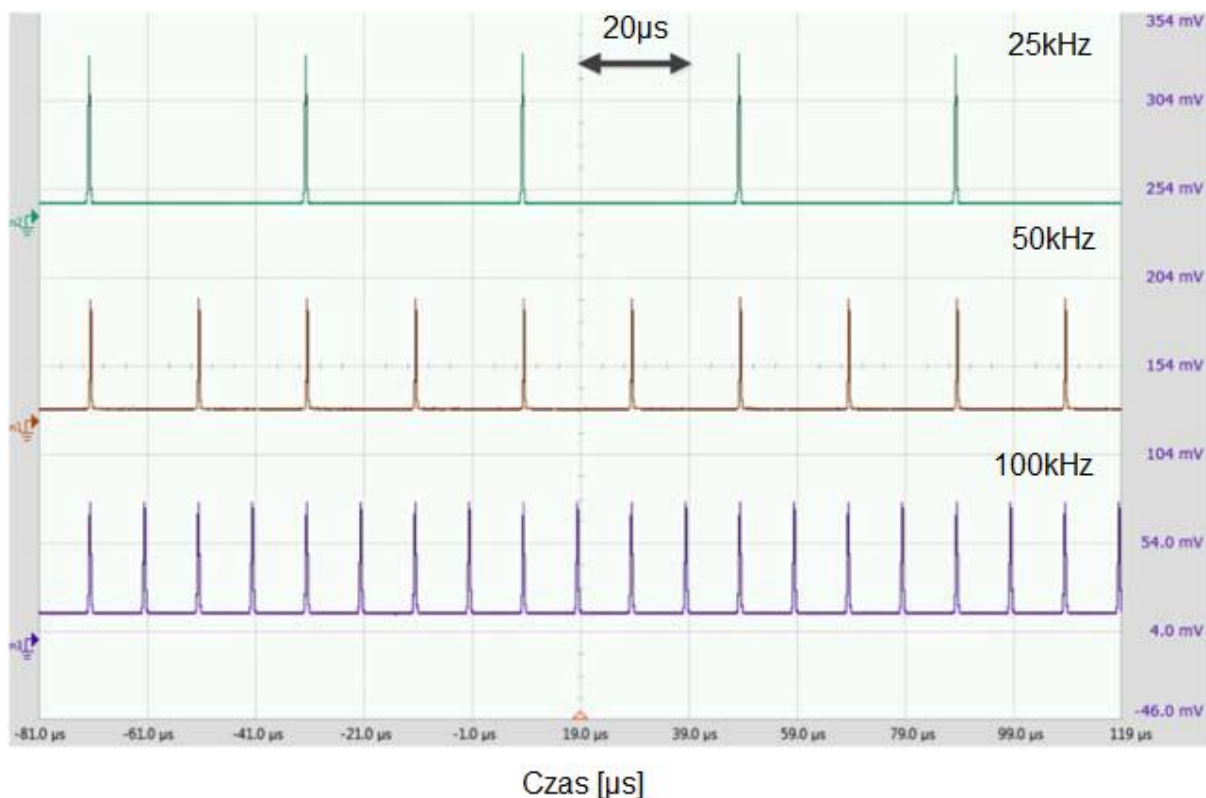
Maksymalna moc wprowadzona do układu wyniosła 534mW. Stabilna impulsowa akcja laserowa została zmierzona przy mocy wyjściowej 352mW. Przy tej mocy laser generował impulsy o szerokości 443ns. Wraz ze wzrostem wprowadzanej mocy szerokość impulsu wyjściowego malała aż do 183ns, przy pobudzeniu mocą 534mW. Dodatkowo odstęp czasowy pomiędzy impulsem pobudzającym a impulsem wyjściowym ulegał zmniejszeniu. Zachowanie to jest typowe dla układów z modulacją wzmocnienia. Podobne zachowanie zostało zaprezentowane w pracach [34, 36, 95, 96]. Warto jest tutaj również poruszyć temat wpływu kształtu impulsów pobudzających na kształt impulsów wyjściowych. Zgodnie z poczynionymi obserwacjami oraz z [97] kształt impulsów wyjściowych jest niezależny od kształtu impulsów pobudzających. Potwierdzenie tych słów widać na rys.62. Pomimo nieregularnego kształtu impulsu pobudzającego kształt impulsu wyjściowego ma rozkład w przybliżeniu opisany krzywą Gaussa. Szerokość impulsu zależy natomiast od długości wnęki rezonansowej oraz dynamiki procesu tworzenia impulsów opisanej w rozdziale 1.2.2.1.

Najkrótszy uzyskany czas trwania impulsu wyniósł 183ns przy pobudzeniu o mocy 534mW. Profil impulsu zaprezentowano na rys.63. Odchylenie średniokwadratowe amplitudy impulsu wyjściowego wyniosło ok. 5% przy 1% odchyleniu dla impulsów pobudzających.



Rysunek 63. Profil impulsu układu laserowego Dy^{3+} :ZBLAN dla pobudzenia 534mW z częstotliwością 50kHz przy długości włókna aktywnego $L=0,9m$

Układ laserowy został również zbadany pod kątem możliwości przestrajania częstotliwości pracy. Dokonano pomiarów dla częstotliwości 25, 50 oraz 100kHz. Wyniki zaprezentowano na rys.64. Układ pracował stabilnie dla każdej z wymienionych częstotliwości.



Rysunek 64. Wykres czasowy lasera impulsowego Dy³⁺:ZBLAN pracującego z częstotliwością 25, 50, 100kHz dla długości włókna aktywnego L=0,9m

Badając parametry wyjściowe układu sporządzono również wykres zależności średniej mocy układu generującego do średniej mocy układu pobudzającego. Wyniki przedstawiono na rys.65. Sprawność kwantowa osiągnęła 12%. Maksymalna średnia moc wyjściowa wyniosła ok. 35mW przy 534mW średniej mocy wprowadzanej. W celu obliczenia energii impulsu oraz mocy szczytowej zastosowano wzory 29-30.

$$E_{imp} = \left(\frac{P_{avr}}{f_{PRF}} \right) \quad (29)$$

$$P_{szcz} = \left(\frac{E_{imp}}{t_{imp}} \right) \quad (30)$$

gdzie:

P_{avr} – moc średnia,

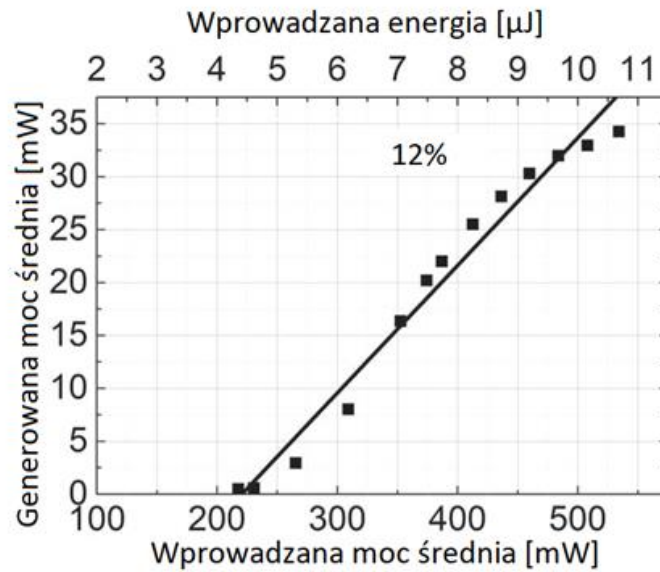
f_{PRF} – częstotliwość powtarzania impulsów, PFR (ang. pulse repetition frequency),

P_{szcz} – moc szczytowa,

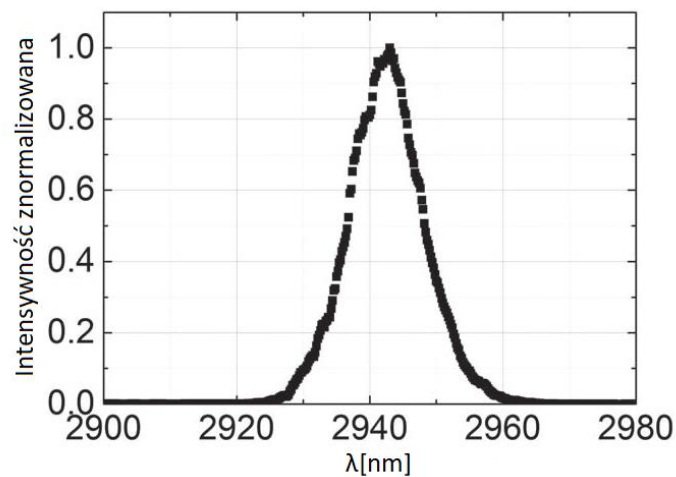
t_{imp} – czas trwania impulsu.

Osiągnięte wyniki przekładają się na energię impulsu 0,7µJ oraz moc szczytową ok. 3,8W. Przy średniej mocy wprowadzanej 534mW dokonano również pomiaru widma spektralnego. Laser generował na długości fali 2,943µm z FWHM=10nm (rys.66). Pomiar na

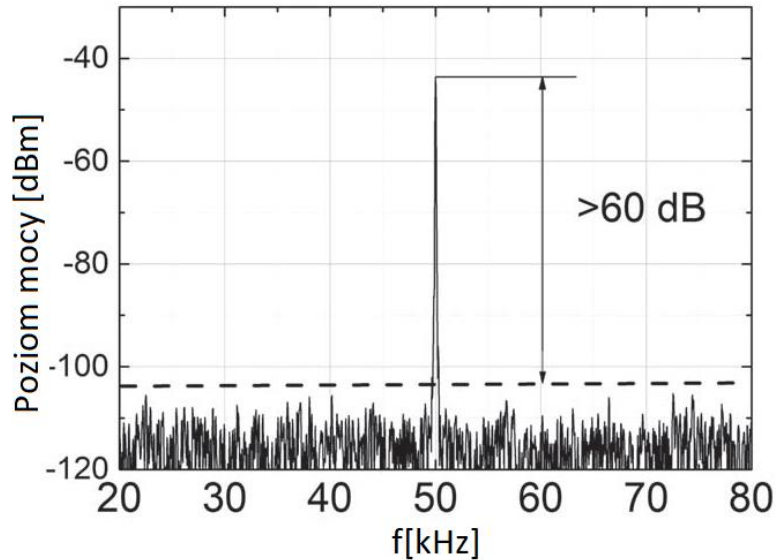
analizatorze widma przy 50kHz (rys. 67) wykazał stosunek sygnał szum (ang. signal to noise ratio SNR) na poziomie 61,31dB co pokazuje wysoką jakość uzyskanego sygnału.



Rysunek 65. Wykres zależności mocy średniej generowanej przez układ laserowy Dy³⁺:ZBLAN w funkcji wprowadzanej średniej mocy pompy dla częstotliwości pracy 50kHz oraz długości wnęki rezonansowej 0,9m



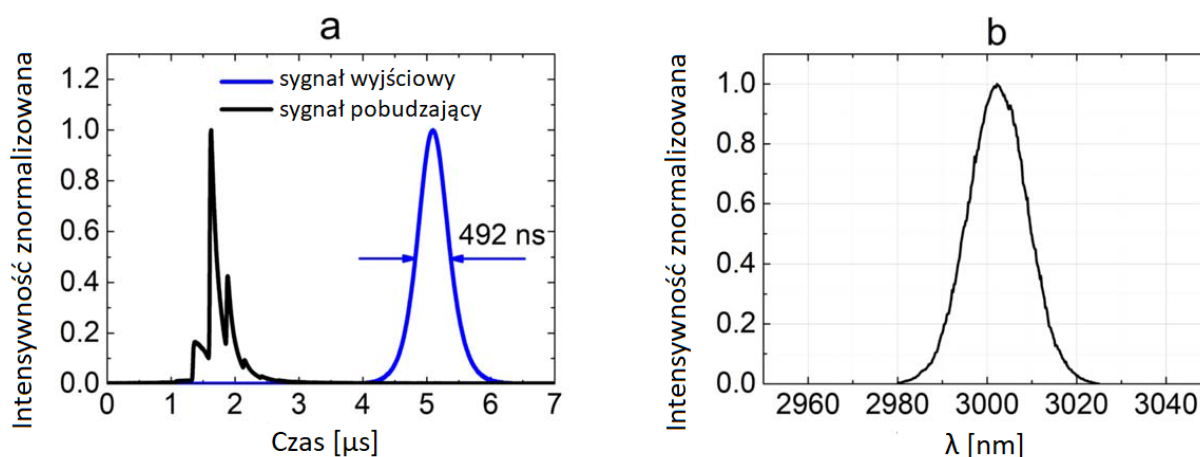
Rysunek 66. Widmo układu laserowego Dy³⁺:ZBLAN przy średniej mocy wprowadzanej 534mW, częstotliwości pracy 50kHz oraz długości włókna aktywnego L=0,9m



Rysunek 67. Widmo układu laserowego Dy^{3+} :ZBLAN przy średniej mocy wprowadzanej 534mW, częstotliwości pracy 50kHz oraz długości włókna aktywnego $L=0,9$

Wspomniano już, że lasery wykorzystujące włókna z domieszką dysprozu są pożądane ze względu na możliwość pracy w zakresie spektralnym, w którym nie mogą generować układy wykorzystujące domieszki erbu lub holmu ($2,9\text{-}3,4\mu\text{m}$). Omawiany układ pozwalał na generację fal o długości $2,943\mu\text{m}$. W celu uzyskania sygnału o dłuższej długości fali możliwe jest zastosowanie elementów filtrujących umieszczonych we wnęce rezonansowej (np. siatek Bragga lub filtrów wąskopasmowych). Niestety ich zastosowanie wiąże się ze zwiększeniem złożoności układu. Dodatkowym problemem jest tutaj dostępność wspomnianych elementów. W przypadku układów laserowych nieposiadających elementów stabilizujących długość fali możliwe jest zastosowanie zależności długości fali wyjściowej od długości wnęki rezonansowej. Wraz ze wzrostem długości wnęki laserowej rośnie długość fali generowanej przez układ [89]. Niestety z uwagi na powiązanie między długością rezonatora a czasem trwania impulsu metoda ta wiąże się ze zmianą czasu trwania uzyskanych impulsów.

W ramach eksperymentu zbadano parametry układu dla zwiększonej długości włókna $L=1,4\text{m}$. Zmianie uległo również zwierciadło odbiciowe (odbiciowość zmieniona z 50% na 70%). Absorpcja włókna wzrosła zgodnie z omawianą wcześniej zależnością do ok. 33,1dB. Do włókna wprowadzono sygnał pobudzający o mocy średniej 1,2W z częstotliwością 50kHz. Wyniki zaprezentowano na rys.68. Układ zgodnie z oczekiwaniami generował na dłuższej długości fali. Wyniosła ona $3,002\mu\text{m}$ przy $\text{FWHM}=15\text{nm}$. Czas trwania impulsu również uległ wydłużeniu do 492ns. Średnia moc wyjściowa wyniosła 80mW, co odpowiada energii $1,6\mu\text{J}$ oraz mocy szczytowej ok. 3,25W.



Rysunek 68. Charakterystyka czasowa (a) oraz widmo (b) impulsowego lasera Dy^{3+} :ZBLAN przy pobudzeniu długością fali $1,1\mu m$ i częstotliwości $50kHz$. Moc wprowadzana $1,2W$, długość włókna aktywnego $1,4m$

4.3.3. Podsumowanie wyników dla lasera impulsowego Dy^{3+} :ZBLAN z modulacją wzmocnienia

W powyższych punktach 4.3.1-4.3.2 opisane zostały badania dotyczące impulsowych układów laserowych wykorzystujących jako medium aktywne włókna Dy^{3+} :ZBLAN. W ramach badań skonstruowano układ lasera impulsowego wykorzystujący modulację wzmocnienia do generacji impulsów. Układ był pobudzany iterbowym laserem impulsowym generującym sygnał na długości fali $1,1\mu m$. Wykorzystując $0,9m$ włókna aktywnego oraz zwierciadło o odbiciowości 50% uzyskano sygnał na długości fali $2,943\mu m$. Impulsy generowane przez układ miały szerokość $183ns$ przy częstotliwości pracy $50kHz$. Warto tutaj zaznaczyć, że uzyskany wynik ($183ns$) był i wciąż jest najkrótszym zaprezentowanym czasem trwania impulsu dla układów Dy^{3+} :ZBLAN, pobudzanych falą $1,1\mu m$, generujących z wykorzystaniem metody modulacji wzmocnienia. Zmieniając długość światłowodu aktywnego ($1,4m$) uzyskano przesunięcie długości generowanej fali w kierunku fal dłuższych. Układ generował fale o długości $3,002\mu m$. Szerokość impulsu, która jest zależna od długości wnęki rezonansowej, wzrosła do $492ns$.

Zaprezentowane wyniki zostały opublikowane w: Łukasz Pajewski, Łukasz Sójka, Samir Lamrini, Trevor Benson, Angela Seddon, Sławomir Sujecki: Gain-switched Dy^{3+} :ZBLAN fiber laser operating around $3\mu m$, Journal of Physics-Photonics. 2020, vol. 2, nr 1, s. 1-7.

Biorąc pod uwagę fakt, że czas trwania impulsów jest, w układach wykorzystujących metodę modulacji wzmocnienia, zależny głównie od długości wnęki rezonansowej można sądzić, że uzyskanie wyników poniżej $183ns$ jest wysoce prawdopodobne. Należy przy tym uwzględnić fakt, że poziom absorpcji wnęki rezonansowej powinien pozostać na niezmiennym

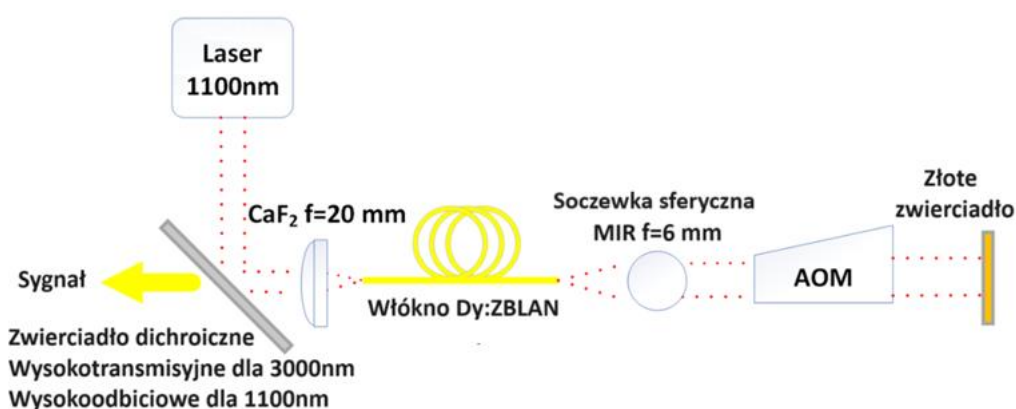
lub wyższym poziomie w celu uzyskania efektywnej akcji laserowej. Należałoby więc wykorzystać włókna silnie domieszkowane w celu zachowania poziomu mocy wyjściowej. Wyższa absorpcja wiąże się jednak z problemami związanymi z odprowadzaniem ciepła.

4.4. Laser impulsowy Dy³⁺:ZBLAN z modulacją dobroci

Poniższe punkty 4.4.1-4.4.3 prezentują wyniki eksperymentalne uzyskane w ramach prac nad układami impulsowymi laserów Dy³⁺:ZBLAN wykorzystującymi modulację dobroci. Wyniki te zostały opublikowane w publikacji: Łukasz Pajewski, Łukasz Sójka, Samir Lamrini, Mark Farries, Tomasz Osuch, Trevor M. Benson, Angela Seddon, Sławomir Sujecki: Experimental investigation of actively Q-switched Dy³⁺ doped fluoride single mode fiber laser operating near 3 μm, Journal of Lightwave Technology, 2023

4.4.1. Konstrukcja lasera impulsowego Dy³⁺:ZBLAN z modulacją dobroci

Schemat konstrukcyjny opisywanego w tym podrozdziale układu laserowego został przedstawiony na rys.69. Laser został skonstruowany w układzie rezonatora liniowego, w którym medium aktywne stanowi włókno Dy³⁺:ZBLAN. Podczas eksperymentów wykorzystywano dwa typy włókna. Pierwsze z nich to 0,9m włókno o domieszce dysprozu wynoszącej 2000ppm. Średnica rdzenia włókna wynosiła 12,5μm podczas gdy jego płaszczka 125μm. Apertura numeryczna NA=0.16. Włókno pracuje w trybie jednomodowym dla długości fali powyżej 2,6μm. Drugie włókno było słabiej domieszkowane jonami dysprozu (1000ppm). Długość włókna wynosiła 1,1m, średnica rdzenia 15μm a średnica płaszczka 125μm. NA=0.13. Włókno pracuje jednomodowo dla długości fali powyżej 2,55μm. Dobór tej długości włókna miał zapewnić absorpcję pompy na poziomie ok. 23,5dB.



Rysunek 69. Układ eksperymentalny lasera impulsowego Dy³⁺:ZBLAN z modulacją dobroci (na podstawie [98])

Włókna aktywne były wzbudzane z wykorzystaniem opisanego wcześniej lasera 1,1 μ m (punkt 4.2.1). Wiązka wzbudzająca była kierowana na zwierciadło dichroiczne umieszczone pod kątem 45°, a następnie skupiona w światłowodzie aktywnym za pomocą asferycznej soczewki z CaF₂ o ogniskowej 20mm (Edmund Optics). Soczewka nie posiadała powłoki przeciwodbiciowej. Jej przepuszczalność wynosiła powyżej 95% zarówno dla długości fal wzbudzającej jak i sygnału. Czoło włókna od strony wiązki wzbudzającej została obcięta pod kątem prostym w celu zakończenia wnęki rezonansowej za pomocą odbicia Fresnela. Drugi koniec włókna został przycięty pod kątem ok. 8° w celu uniknięcia odbić i propagacji wstecznej mogącej doprowadzić do niechcianej akcji laserowej. Wiązka emitowana z tego końca była kolimowana z wykorzystaniem soczewki kulowej pracującej w zakresie MIR o ogniskowej 6mm i prowadzona przez AOM. Modulator akustyczno-optyczny (I-QS041-1.5C2P-4-MN4 Gooch & Housego, Ilminster, Wielka Brytania), był oparty na ditlenku telluru (TeO₂) i charakteryzował się transmisją dla fal 3 μ m powyżej 95%, aperturą 1,5mm, modulacją sygnału powyżej 80%, czasem narastania 153ns/mm oraz częstotliwością pracy 40,68MHz. Zakończenie wnęki rezonansowej stanowiło płaskie, złote zwierciadło o odbiciowości >96%.

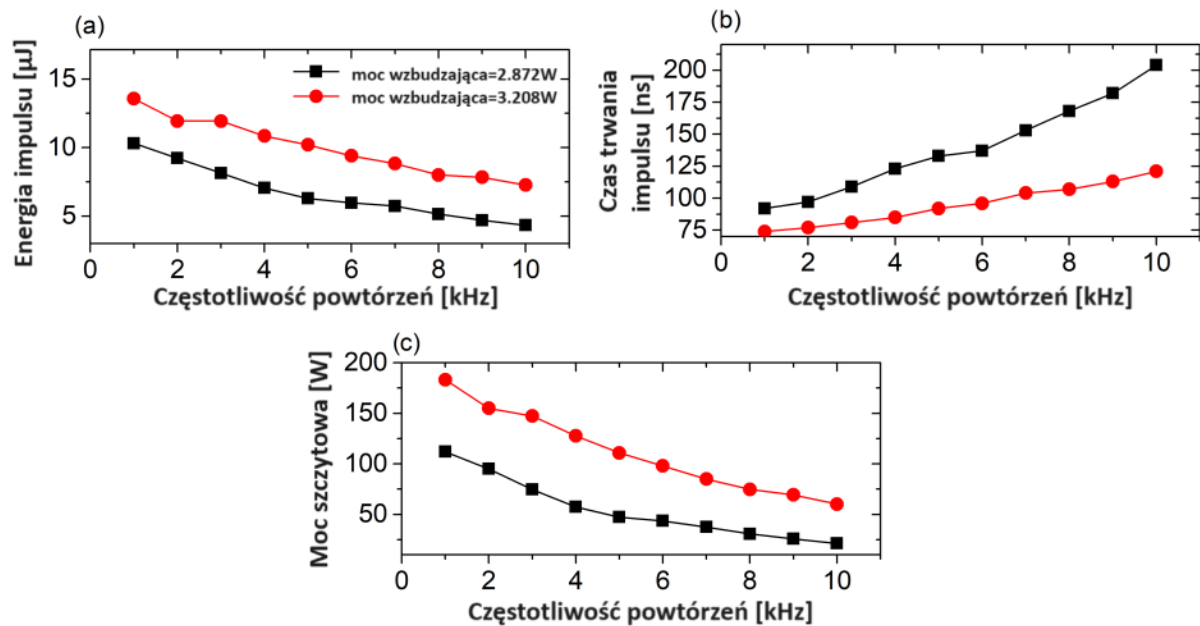
Charakterystyka czasowa impulsu była monitorowana za pomocą szybkiego detektora MCT z tellurku kadmu i rtęci (Vigo Systems PVMI-10.6) o czasie narastania poniżej 3ns i oscyloskopu o pasmie przenoszenia 500MHz (LeCroy WaveSurfer 452). Średnia moc wyjściowa była mierzona za pomocą detektora termicznego (S401C Thorlabs). Spektrum lasera było monitorowane za pomocą monochromatora o ogniskowej 150mm (MSH-150 LOT-Quantum Design GmbH) z siatką dyfrakcyjną karbowaną pod kątem 4 μ m oraz z czułym detektorem MCT (PVI-4TE-5 Vigo Systems).

4.4.2. Wyniki pomiarów lasera impulsowego Dy³⁺:ZBLAN z modulacją dobroci

Po zestawieniu układu laserowego dokonano serii pomiarów w celu określenia jego parametrów. Skupiono się na trzech parametrach: energii impulsu, czasie trwania impulsu oraz mocy szczytowej. Pomiary przeprowadzono dla różnych mocy lasera wzbudzającego. Pomiarów dokonano w funkcji częstotliwości powtórzeń od 1-10kHz. W całym tym zakresie uzyskano stabilną pracę impulsową zarówno dla włókna z domieszką 1000ppm jak i 2000ppm.

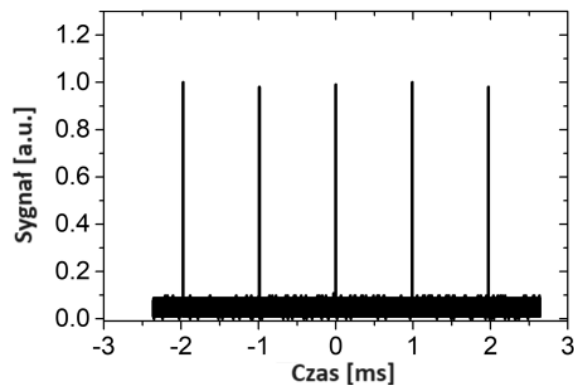
Na rys.70 zaprezentowano wyniki przeprowadzonych pomiarów dla włókna 2000ppm. Energia impulsu oraz moc szczytowa maleją wraz ze wzrostem częstotliwości powtórzeń. Obserwowane zachowanie może zostać wyjaśnione zgodnie z [99], [100], [45]. Autorzy tych prac wyjaśniają to zjawisko faktem, że przy wyższej częstotliwości powtórzeń układ ma krótszy

czas na odbudowę stanu inwersji obsadzeń po wytworzeniu impulsu co powoduje spadek energii impulsu oraz mocy szczytowej. Z tego samego powodu, przy wyższych częstotliwościach powtórzeń, zaobserwowano również wydłużenie czasu trwania impulsu. Dla mocy wzbudzającej wynoszącej 3,208W przy zmniejszającej się częstotliwości powtórzeń (z 10kHz do 1kHz) energie impulsów uległy zwiększeniu z 7,3μJ do 13,6μJ. Zmianie tej towarzyszy również zmniejszenie czasów trwania impulsów z 121ns do 74ns oraz wzrost mocy szczytowej (do 183W dla 1kHz).

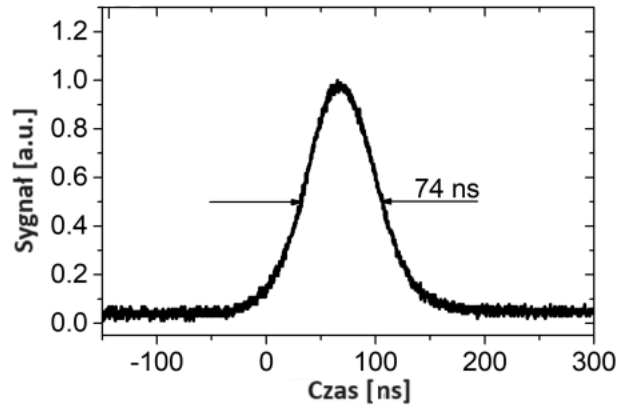


Rysunek 70. a) Energia impulsu, b) czas trwania impulsu oraz c) moc szczytowa w funkcji częstotliwości powtórzeń przy mocy wzbudzającej 2.872W oraz 3.208W dla 0,9m włókna $\text{Dy}^{3+}:\text{ZBLAN 2000ppm}$ [98]

Stabilność pracy układu została potwierdzona poprzez badanie przebiegów czasowych. Typowy przebieg czasowy dla 5 impulsów został przedstawiony na rys. 71. Kształt pojedynczego impulsu zaprezentowano natomiast na rys.72.

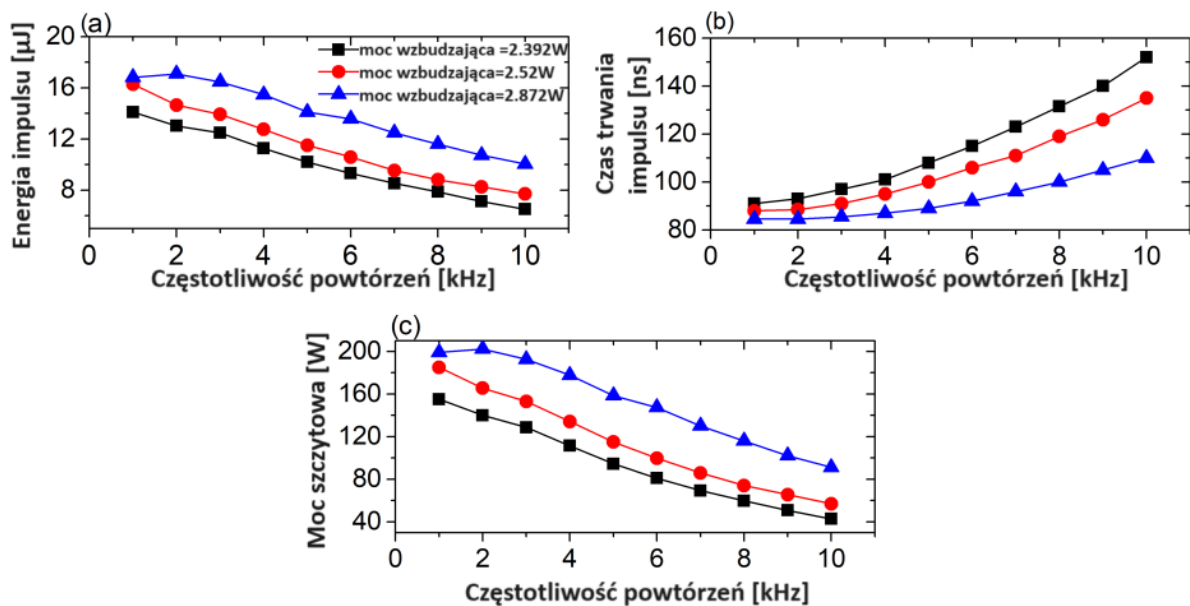


Rysunek 71. Przykładowy przebieg czasowy impulsów dla 0,9m włókna $\text{Dy}^{3+}:\text{ZBLAN 2000ppm}$ przy częstotliwości powtórzeń 1kHz oraz mocy wzbudzającej 3.0208W [98]



Rysunek 72. Przebieg czasowy pojedynczego impulsu dla 0,9m włókna Dy³⁺:ZBLAN 2000ppm przy częstotliwości powtórzeń 1kHz oraz mocy wzbudzającej 3.0208W [98]

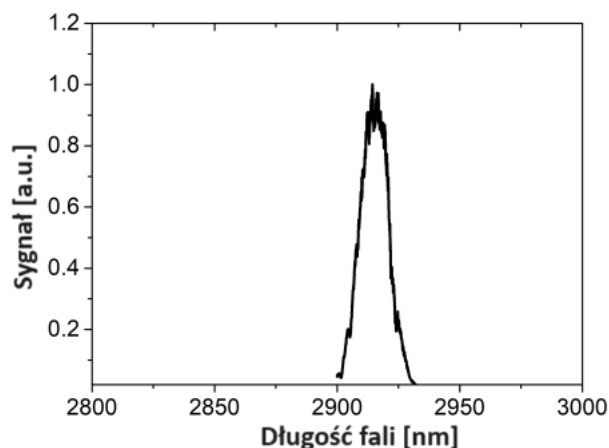
Kolejnym etapem eksperymentu była konstrukcja oraz analiza układu z 1,1m włóknem o średnicy rdzenia 15 μ m oraz o niższym poziomie domieszki dysprozu (1000ppm). Zastosowanie włókna o większej średnicy rdzenia oraz niższym poziomie domieszkowania pozwoliło na lepsze zarządzanie rozkładem energii wewnątrz włókna i uniknięcie degradacji czoła włókna co potwierdza wnioski uzyskane w [101]. Na rys.73 zaprezentowano a) energię impulsu, b) czas trwania impulsu oraz c) moc szczytową w funkcji częstotliwości powtórzeń i mocy lasera wzbudzającego. Dla 1kHz uzyskano impulsy o czasie trwania 84,5ns i energii wynoszącej 17 μ J co przekłada się na 201W mocy szczytowej. Wyniki te osiągnięto dla mocy wzbudzającej 2,872W.



Rysunek 73. a)Energia impulsu, b)czas trwania impulsu oraz c)moc szczytowa w funkcji częstotliwości powtórzeń przy mocy wzbudzającej 2.392W, 2.52W oraz 2.872W dla 1,1m włókna Dy³⁺:ZBLAN 1000ppm [98]

Warto zaznaczyć, że dla tej wartości mocy wzbudzającej zaobserwowano, iż zmniejszanie częstotliwości powtórzeń poniżej 2kHz nie skutkuje dalszym wzrostem energii impulsów. Zjawisko to zostało już wcześniej zaobserwowane w [45]. Opierając się na [45] oraz [66] można wysnuć wniosek, że takie zachowanie wynika prawdopodobnie z ograniczonej zdolności przechowywania energii w domieszkowanym dysprozem (III) włóknie. Czas życia górnego poziomu laserowego ${}^6\text{H}_{13/2}$ dla dysprozu (III) wynosi $650\mu\text{s}$, co odpowiada częstotliwości 1,5kHz.

Rys. 74 przedstawia widmo generowane przez układ laserowy przy mocy wzbudzającej wynoszącej 2,392W i częstotliwości pracy wynoszącej 10kHz. Laser pracuje na długości fali 2912nm, a FWHM=12nm. Bez elementu selektywnego, pozwalającego na kontrolę długości fali rezonatora, widmo lasera jest położone blisko środka długości fali dla przekroju czynnego emisji szkła $\text{Dy}^{3+}:\text{ZBLAN}$ [87].



Rysunek 74. Widmo spektralne dla 1,1m włókna $\text{Dy}^{3+}:\text{ZBLAN}$ 1000ppm przy częstotliwości powtórzeń 10kHz oraz mocy wzbudzającej 2.392W [98]

4.4.3. Podsumowanie wyników dla lasera impulsowego $\text{Dy}^{3+}:\text{ZBLAN}$ z modulacją dobroci

W punktach 4.4.1-4.4.2 opisane zostały badania dotyczące impulsowych układów laserowych wykorzystujących jako medium aktywne włókna $\text{Dy}^{3+}:\text{ZBLAN}$. Skonstruowano dwa układy laserowe z modulacją dobroci. Układy te były pobudzane iterbowym laserem impulsowym generującym sygnał o długości fali $1,1\mu\text{m}$.

W pierwszym układzie (0,9m włókna $\text{Dy}^{3+}:\text{ZBLAN}$, 2000ppm) uzyskano czas trwania impulsu 74ns, energię impulsu $13,6\mu\text{J}$ oraz moc szczytową 183W. Rozpatrując moc szczytową osiągnięta wartość mocy była ponad czterokrotnie wyższa od zaprezentowanych wcześniej wyników literaturowych. Poprzedni najwyższy wynik został zaprezentowany w pracy [45] i

wynosił 40W. Uzyskany czas trwania impulsu (74ns) był natomiast ponad trzykrotnie krótszy w porównaniu z wynikami osiągniętymi w literaturze dla układów z modulacją dobroci ([45], 270ns) oraz ponad dwukrotnie krótszy od układów z modulacją wzmocnienia, które zaprezentowano w podrozdziale 4.4 (183ns). Chociaż przy zastosowaniu synchronizacji modów podłużnych możliwe jest uzyskanie znacznie krótszych impulsów laserowych (~33ps), należy zaznaczyć, że energia impulsów uzyskana z tego typu laserów wynosiła około 2,7nJ [52], a więc o prawie cztery rzędy wielkości mniej niż w przedstawionym tutaj układzie.

Tak wyraźna poprawa w parametrach pracy układu laserowego w stosunku do poprzednio prezentowanych w literaturze prac została osiągnięta poprzez wykorzystanie szybkiego AOM z niskimi stratami wtrąceniowymi. Czas przełączania AOM, rzędu 150ns, był na tyle krótki, że nie zakłócał procesu nabudowywania impulsów. W rezultacie zwiększyło to efektywność procesu modulacji dobroci co doprowadziło do osiągnięcia wysokiej mocy szczytowej i krótkiego czasu trwania impulsu, co potwierdza twierdzenia autorów artykułu [102].

Wyniki uzyskane dla włókna 1000ppm są podobne do tych uzyskanych dla włókna 2000ppm. Zastosowanie włókna o większej średnicy rdzenia pozwoliło na osiągnięcie jeszcze wyższej energii pojedynczego impulsu, wynoszącej 17μJ co przy czasie trwania impulsu 84,5ns przekłada się na 201W mocy szczytowej (co stanowi, zgodnie z najlepszą wiedzą autora, najlepszy opublikowany dotychczas rezultat). Wyniki te osiągnięto dla mocy wzbudzającej 2,872W.

Zaobserwowana w czasie pomiarów długość fali lasera (2912nm) pokrywa się z wynikami uzyskanymi dla podobnego rezonatora laserowego w [87]. Uzyskana długość fali odpowiada pasmu absorpcyjnemu wody obecnej m.in. w tkankach ludzkich, co pokazuje potencjał do zastosowania laserów włóknowych wykorzystujących włókna Dy³⁺:ZBLAN np. w chirurgii laserowej.

Zaprezentowane wyniki zostały opublikowane w: Łukasz Pajewski, Łukasz Sójka, Samir Lamrini, Mark Farries, Tomasz Osuch, Trevor M. Benson, Angela Seddon, Sławomir Sujecki: Experimental investigation of actively Q-switched Dy³⁺ doped fluoride single mode fiber laser operating near 3 μm, Journal of Lightwave Technology, 2023.

5. Wnioski końcowe

Rozdział ten stanowi podsumowanie wyników uzyskanych w ramach dysertacji wraz z odniesieniem do tez postawionych w rozdziale 1.3. Oprócz podsumowania w podpunkcie 5.2 wypunktowane zostały szczególne osiągnięcia uzyskane podczas trwania prac badawczych.

5.1. Wyniki dysertacji

W niniejszej pracy omówiono układy laserów impulsowych wykorzystujących włókna ZBLAN domieszkowane erbem oraz dysprozem. W szczególności opisano konstrukcje lasera impulsowego generującego impulsy przy zastosowaniu modulacji wzmocnienia, który wykorzystuje jako medium aktywne włókno Dy^{3+} :ZBLAN. Opisano również konstrukcję lasera impulsowego wytwarzającego impulsy przy zastosowaniu modulacji dobroci, który wykorzystuje jako medium aktywne włókna Dy^{3+} :ZBLAN i osiąga moc szczytową $>100\text{W}$ oraz szerokość impulsu mniejszą niż 100ns . Uzyskane wyniki potwierdzają stawiane hipotezy badawcze a tym samym udowadniają tezę całej rozprawy pokazując, że możliwa jest konstrukcja impulsowego układu laserującego generującego w zakresie długości fal zbliżonych do $3\mu\text{m}$ z wykorzystaniem włókien ZBLAN domieszkowanych jonami dysprozu. Autor rozprawy jednoznacznie wykazał, że wykorzystanie doświadczenia konstrukcyjnego oraz dogłębna analiza problemów związanych z włóknami fluorkowymi pozwala na znalezienie relatywnie prostych konstrukcji układów laserowych pracy impulsowej pracujących w zakresie spektralnym ok. $3\mu\text{m}$ o rekordowych wartościach mocy szczytowej oraz czasu trwania impulsu.

Uzyskana moc szczytowa dla układów z modulacją wzmocnienia wyniosła $3,8\text{W}$ a czas trwania impulsu wyniósł 183ns . Warto tutaj zaznaczyć, że uzyskany wynik (183ns) był i wciąż jest najkrótszym zaprezentowanym w dostępnej literaturze czasem trwania impulsu dla układów Dy^{3+} :ZBLAN, pobudzanych falą $1,1\mu\text{m}$, generujących fale elektromagnetyczne z wykorzystaniem modulacji wzmocnienia. Uzyskany czas trwania impulsu jest prawie trzykrotnie mniejszy w porównaniu z wynikami uzyskanymi przez inne grupy badawcze (530ns)[93].

Dla układu lasera Dy^{3+} :ZBLAN z modulacją dobroci uzyskano czas trwania impulsu 74ns oraz moc szczytową 183W . Rozpatrując moc szczytową osiągnięta wartość mocy była ponad czterokrotnie wyższa od zaprezentowanych wcześniej wyników literaturowych. Poprzedni najwyższy wynik został zaprezentowany w pracy [45] i wynosił 40W . Uzyskany czas trwania impulsu (74ns) był natomiast ponad trzykrotnie krótszy w porównaniu z wynikami osiągniętymi w literaturze dla układów z modulacją dobroci ([45], 270ns).

Ponadto na podstawie przeprowadzonych prac badawczych, w ramach, których zrealizowano w laboratorium 3 wnęki rezonansowe lasera Dy^{3+} :ZBLAN przystosowane do pracy ciągłej oraz 4 wnęki przystosowane do pracy impulsowej, przy wykorzystaniu modulacji wzmocnienia (2 układy) oraz modulacji dobroci (2 układy) poczyniono następujące obserwacje i wyciągnięto wnioski, które przedstawiono poniżej.

W celu budowy układu laserowego Dy^{3+} :ZBLAN, konieczna była budowa odpowiedniego źródła wzbudzającego. W przypadku włókien ZBLAN domieszkowanych dysprozem, w odróżnieniu od włókien domieszkowanych erbem pompowanych na 980nm, brak jest diod laserowych, które umożliwiają tanie i efektywne wzbudzenie. Do wzbudzania włókna wykorzystuje się więc inne lasery emitujące fale długości 1,1 μ m, 1,7 μ m lub 2,8 μ m. Jako pompę zastosowano laser o długości fali 1,1 μ m, gdyż jest on łatwiejszy w realizacji niż źródła laserowe operujące przy długości fali 1,7 μ m i 2.8 μ m. Wadą pompowania falą elektromagnetyczną o długości 1,1 μ m jest niska efektywność wzbudzania, wynosząca jedynie kilka procent. Największą efektywność, dochodzącą do 60%, można osiągnąć stosując falę elektromagnetyczną o długości 2,8 μ m. Jednakże budowa układów laserowych generujących w tym zakresie jest znacznie trudniejsza i droższa niż w przypadku fali pompującej 1,1 μ m. W dysertacji zdecydowano się na budowę układu lasera iterbowego generującego fale elektromagnetyczne o długości fali 1,1 μ m. Układ mógł pracować zarówno w trybie pracy ciągłej jak i impulsowej tak aby możliwe było jego wykorzystanie do budowy układów impulsowych z modulacją wzmocnienia.

W celu realizacji układów laserów impulsowych pierwsze prace badawcze związane z włóknami Dy^{3+} :ZBLAN zostały ukierunkowane na lasery pracy ciągłej (ang. continuous wave CW). Badania różnych rodzajów rezonatorów CW pozwoliły na zdefiniowanie konstrukcji, które mogą zostać wykorzystane do budowy układów pracy impulsowej. W dysertacji przedstawiono trzy typy wnęk rezonansowych wraz z analizą ich przydatności do zastosowania w układach laserów impulsowych. Były to odpowiednio: układ z wnęką rezonansową utworzoną z obciętych pod kątem prostym włókien światłowodowych, układ z wnęką rezonansową utworzoną z obciętych pod kątem prostym włókien światłowodowych z dociśniętym do jednego z końców włókna złotym zwierciadłem, oraz układ z wnęką rezonansową utworzoną z obciętego pod kątem prostym włókna światłowodowego oraz oddalonego od czoła włókna złotego zwierciadła (koniec włókna znajdujący się po stronie zwierciadła był obcięty pod kątem 8° w celu uniknięcia odbić i wywołania akcji laserowej).

Analiza układów wykazała, że w przypadku lasera Dy^{3+} :ZBLAN z modulacją wzmocnienia w celu uproszczenia konstrukcji wnęki rezonansowej oraz zabezpieczenia czoła

włókna możliwe jest zastosowanie rezonatora z obciętym pod kątem prostym końcem włókna stanowiącym jedno z zakończeń rezonatora oraz drugim końcem zakończonym złotym zwierciadłem przylegającym do czoła włókna. W pracy opisano dwa źródła laserowe wykorzystujące modulację wzmocnienia oraz technikę docisku zwierciadła. Pierwsze z nich generujące na długości fali $2,943\mu\text{m}$ wykorzystywało $0,7\text{m}$ włókna aktywnego. Laser ten generował impulsy o mocy średniej 35mW , częstotliwości 50kHz i szerokości 183ns . Przekłada się to na moc szczytową ok. $3,5\text{W}$ oraz energię impulsu $0,7\mu\text{J}$. Drugi z układów wykorzystywał $1,4\text{m}$ włókna aktywnego. Zwiększenie długości wnęki rezonansowej pozwoliło na przesunięcie długości fali generowanych przez układ do $3,002\mu\text{m}$. Osiągnięta szerokość impulsu oraz moc średnia wyniosły odpowiednio 492ns oraz 80mW co przekłada się na energię $1,6\mu\text{J}$ oraz ok. 3W mocy szczytowej.

Należy zauważyć, że parametry uzyskanego lasera, który generuje impulsy przy wykorzystaniu modulacji wzmocnienia są wystarczające do zastosowania np. w spektroskopii a jego koszt jest znacznie niższy niż układów wykorzystujących inne metody modulacji.

Układ lasera światłowodowego do pracy impulsowej przy wykorzystaniu metody przełączania dobroci został zrealizowany przy użyciu rezonatora z odsuniętym od czoła włókna złotym zwierciadłem. W pierwszym kroku zweryfikowano eksperymentalnie wpływ umieszczenia wewnątrz wnęki laserowej lasera CW modulatora akustooptycznego na pracę układu. Wprowadzając do rezonatora AOM straty mocy wyjściowej lasera CW w porównaniu do układu odniesienia wyniosły ok. 1dB . Konstrukcję tę wykorzystano do konstrukcji laserów impulsowych $\text{Dy}^{3+}:\text{ZBLAN}$. W szczególności opisano dwa układy laserowe, pobudzone iterbowym laserem CW o długości fali $1,1\mu\text{m}$. W pierwszym układzie zastosowano włókno $\text{Dy}^{3+}:\text{ZBLAN}$ o długości $0,9\text{m}$ oraz koncentracji domieszki 2000ppm . Uzyskany czas trwania impulsu wyniósł 74ns , energia impulsu $13,6\mu\text{J}$ a moc szczytowa 183W . Należy podkreślić, że uzyskana moc szczytowa była ponad czterokrotnie wyższa zaś czas trwania impulsu ponad trzykrotnie krótszy w porównaniu z wynikami opublikowanymi wcześniej w dostępnej literaturze. W następnym kroku we wnęce lasera impulsowego $\text{Dy}^{3+}:\text{ZBLAN}$ z modulacją dobroci zastosowano włókno o większej średnicy rdzenia. Zwiększenie średnicy rdzenia pozwoliło na osiągnięcie wyższej energii pojedynczego impulsu. W tym układzie uzyskano energię pojedynczego impulsu wynoszącą $17\mu\text{J}$ co przy czasie trwania impulsu $84,5\text{ns}$ daje 201W mocy szczytowej.

Ze względu na istotne różnice w obróbce oraz utrzymaniu włókien fluorkowych w porównaniu z włóknami krzemionkowymi ważną częścią pracy było przystosowanie narzędzi do cięcia włókna oraz opracowanie metodyki przeciwdziałania dyfuzji cząsteczek wody do

włókna podczas prowadzonych prac badawczych. Przystosowanie narzędzi do cięcia włókna wiązało się z ustaleniem naprężenia jakiego poddawane jest włókno podczas procesu cięcia pod kątem prostym i naprężenia oraz skrętu włókna podczas cięcia pod kątem 8° (ten typ cięcia był wykorzystywany w układach laserowych w celu zapobiegania odbiciom Fresnela). Włókna ZBLAN ze względu na większą elastyczność w porównaniu z włóknami krzemionkowymi wymagają większego poziomu naprężenia, które musi zostać do nich przyłożone w celu wywołania przerwania struktury włókna. Jednocześnie zbyt duże naprężenie skutkować może zerwaniem części włókna powodując nierówne cięcie. Ustalenie poziomu naprężenia włókna musiało zostać wykonane dla każdej obcinarki światłowodowej osobno. Dodatkowo zmieniało się ono w zależności od średnicy włókna poddawanego cięciu.

W niniejszej pracy przeanalizowano także stan wiedzy dotyczący laserów wykorzystujących jako medium aktywne włókna Er^{3+} :ZBLAN. W szczególności opracowany oraz opisany został model numeryczny pozwalający na symulację numeryczną mocy wyjściowej układu laserowego w zależności od zadanych parametrów wnęki rezonansowej tj. odbiciowości krańców rezonatora oraz długości włókna aktywnego. Biorąc pod uwagę wysoki koszt włókien aktywnych oraz ich ograniczoną dostępność potrzeba wcześniejszego zaprojektowania wnęki rezonansowej wydaje się szczególnie uzasadniona. Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że zastosowanie zwierciadeł dichroicznych o zoptymalizowanej odbiciowości jako zakończeń rezonatora laserowego pozwala na zwiększenie mocy wyjściowej jedynie o ok. 1% w porównaniu z zastosowaniem prostszej konstrukcji z zastosowaniem obciętego pod kątem prostym końca włókna oraz złotego zwierciadła. Przeprowadzona analiza numeryczna zależności mocy wyjściowej od długości wnęki rezonansowej wykazała natomiast, że długość włókna aktywnego powinna wynosić 2-3m. Poprawność symulacji numerycznych została następnie potwierdzona eksperymentalnie. Skonstruowano laser CW Er^{3+} :ZBLAN, który generuje fale o długości ok. $2,8\mu\text{m}$, przy czym długość fali była zależna od mocy pobudzającej wprowadzonej do układu. Wartość mocy wyjściowej wyniosła maksymalnie 2,08W, zaś sprawność kwantowa układu 24%.

Głównym powodem, dla którego w omawianym układzie lasera Er^{3+} :ZBLAN nie uzyskano wyższych wartości mocy wyjściowej była degradacja końcówki włókna. W wyniku dyfuzji cząsteczki wody przenikają do struktury szkła ZBLAN powodując jego rozpuszczanie oraz krystalizację. Z uwagi na bliskość piku absorpcyjnego wody w stosunku do generowanych długości fali ($\sim 3\mu\text{m}$) część energii generowanej przez analizowane układy laserowe jest pochłaniana powodując zwiększenie temperatury obszaru zawierającego cząsteczki wody. Proces ten postępuje szybciej wraz ze wzrostem temperatury układu co jeszcze bardziej

zwiększa prawdopodobieństwo przekroczenia temperatury uszkodzenia włókna. Ze względu na obecność wody w atmosferze w celu konstrukcji niezawodnych układów wykorzystujących włókna ZBLAN niezbędne jest zabezpieczenie końców włókna. W pracy przytoczono dostępne w literaturze metody zapobiegania dyfuzji oparte m.in. na dospawanych fragmentach innych szkieł, które nie są podatne na dyfuzję oraz przedstawiono prosty układ zabezpieczenia włókna z wykorzystaniem nadmuchu sprężonego powietrza. Rozwiązanie to oprócz utrzymywania niskiej wilgotności w obrębie włókna pozwala na zmniejszenie temperatury końca włókna, co potwierdzono poprzez zdjęcia termowizyjne, znacznie zwiększa żywotność układu laserowego.

Opracowanie opisanych powyżej metodyk pracy z włóknami ZBLAN oraz budowa układu lasera CW Er^{3+} :ZBLAN pozwoliły na lepsze zrozumienie mechanizmów jakie zachodzą we włóknach fluorkowych oraz ich wpływu na generację akcji laserowej. Badania układów laserowych Er^{3+} :ZBLAN, ze względu na prostsze uzyskanie akcji laserowej stanowiły wstęp pozwalający na zdobycie wiedzy potrzebnej do realizacji laserów Dy^{3+} :ZBLAN.

Najbardziej wartościowe wyniki badań zostały opublikowane w czasopismach naukowych:

- Journal of Lightwave Technology (IF 4.7, punktacja MNiSW 140): Łukasz Pajewski, Łukasz Sójka, Samir Lamrini, Mark Farries, Tomasz Osuch, Trevor M. Benson, Angela Seddon, Sławomir Sujecki: Experimental investigation of actively Q-switched Dy^{3+} doped fluoride single mode fiber laser operating near $3 \mu\text{m}$, 2023, vol. 42, nr 2, s. 809-813,
- Journal of Physics-Photonics (punktacja MNiSW 20): Łukasz Sójka, Samir Lamrini, Trevor Benson, Angela Seddon, Sławomir Sujecki: Gain-switched Dy^{3+} :ZBLAN fiber laser operating around $3 \mu\text{m}$, 2020, vol. 2, nr 1, s. 1-7,
- Photonics Letters of Poland (punktacja MNiSW 40): Łukasz Pajewski, Łukasz Sójka, Samir Lamrini, Trevor Benson, Angela Seddon, Sławomir Sujecki: Experimental investigation of a mid-infrared Er :ZBLAN fiber laser, 2020, vol. 12, nr 3, s. 73-75.

5.2.Podsumowanie szczególnych osiągnięć

Poniżej przedstawiono główne wyniki oraz szczególne osiągnięcia uzyskane podczas prac nad dysertacją.

- Zrealizowano układ laserowy pracy ciągłej generujący na $2,8 \mu\text{m}$ wykorzystujący jako włókno aktywne światłowód z podwójnym płaszczem silnie domieszkowany jonami erbu. Badania zostały opublikowane w pracy: Łukasz Pajewski, Łukasz Sójka, Samir Lamrini, Trevor Benson, Angela Seddon,

Sławomir Sujecki: Experimental investigation of a mid-infrared Er:ZBLAN fiber laser, *Photonics Letters of Poland*. 2020, vol. 12, nr 3, s. 73-75.

- Przy wykorzystaniu analizy numerycznej przeprowadzono dla układu laserowego pracy ciągłej wykorzystującego rezonator liniowy oraz aktywne włókno Er³⁺:ZBLAN analizę mocy wyjściowej w funkcji odbiciowości elementów krańcowych rezonatora oraz długości włókna aktywnego.
- Skonstruowano układ laserowy pracy impulsowej wykorzystujący jako włókno aktywne światłowód jednomodowy Dy³⁺:ZBLAN wykorzystując modulację wzmocnienia. Impulsy generowane przez układ miały szerokość 183ns przy częstotliwości pracy 50kHz. Uzyskany wynik (183ns) był i wciąż jest najkrótszym zaprezentowanym czasem trwania impulsu dla układów Dy³⁺:ZBLAN, pobudzanych falą 1,1μm, generujących impulsy z wykorzystaniem metody modulacji wzmocnienia. Zmieniając długość światłowodu aktywnego uzyskano przesunięcie długości generowanej fali w kierunku fal dłuższych a mianowicie osiągnięto długość fali 3,002μm. Rezultat ten uzyskano bez wprowadzania we wnęce dodatkowych elementów filtrujących. Zaprezentowane wyniki zostały opublikowane w: Łukasz Pajewski, Łukasz Sójka, Samir Lamrini, Trevor Benson, Angela Seddon, Sławomir Sujecki: Gain-switched Dy³⁺:ZBLAN fiber laser operating around 3 μm, *Journal of Physics-Photonics*. 2020, vol. 2, nr 1, s. 1-7.
- Skonstruowano układ laserowy pracy impulsowej przy zastosowaniu jako włókna aktywnego światłowodu jednomodowego Dy³⁺:ZBLAN, który wykorzystuje w celu generacji impulsów modulację dobroci. Układ pracował stabilnie w przedziale repetycji impulsów od 1 do 10KHz. Stosując włókno 2000ppm o średnicy rdzenia 12,5μm osiągnięto czas trwania impulsów wynoszący 74ns. Wynik ten stanowi najkrótszy odnotowany czas trwania impulsów dla układów impulsowych z modulacją dobroci wykorzystujących włókno Dy³⁺:ZBLAN. Dla włókna 1000ppm o średnicy rdzenia 15μm osiągnięto natomiast energię pojedynczego impulsu, wynoszącą 17μJ co przy czasie trwania impulsu 84,5ns przekłada się na 201W mocy szczytowej. Wynik ten stanowi najwyższy odnotowany w literaturze wynik mocy szczytowej dla układów laserowych z modulacją dobroci wykorzystujących włókno Dy³⁺:ZBLAN. Wyniki badań zostały opublikowane w: Łukasz Pajewski, Łukasz Sójka, Samir Lamrini, Mark Farries, Tomasz Osuch, Trevor M. Benson, Angela

Seddon, Sławomir Sujecki: Experimental investigation of actively Q-switched Dy³⁺ doped fluoride single mode fiber laser operating near 3 μm, Journal of Lightwave Technology, 2023

6. Bibliografia

Bibliografia

1. Jackson, S.D. and R. Jain, *Fiber-based sources of coherent MIR radiation: key advances and future prospects*. Optics Express, 2020. **28**(21): p. 30964-31019.
2. Wang, J., et al., *Mid-infrared absorption-spectroscopy-based carbon dioxide sensor network in greenhouse agriculture: development and deployment*. Applied Optics, 2016. **55**(25): p. 7029-7036.
3. Manne, J., et al., *Pulsed quantum cascade laser-based cavity ring-down spectroscopy for ammonia detection in breath*. Applied optics, 2006. **45**(36): p. 9230-9237.
4. Crofford, O.B., et al., *Acetone in breath and blood*. Transactions of the American Clinical and Climatological Association, 1977. **88**: p. 128.
5. Seddon, A.B., *Mid-infrared (IR)—A hot topic: The potential for using mid-IR light for non-invasive early detection of skin cancer in vivo*. physica status solidi (b), 2013. **250**(5): p. 1020-1027.
6. Andrade, J.M., M.a.S. Sánchez, and L.A. Sarabia, *Applicability of high-absorbance MIR spectroscopy in industrial quality control of reformed gasolines*. Chemometrics and intelligent laboratory systems, 1999. **46**(1): p. 41-55.
7. Popa, D. and F. Udrea, *Towards integrated mid-infrared gas sensors*. Sensors, 2019. **19**(9): p. 2076.
8. Dowding, C., *Advances in Laser Materials Processing*, J.P. J. Lawrence, D.K.Y. Low, E. Toyserkani, Editor. 2010, Welding and Other Joining Technologies. p. 575-628.
9. Duval, S. *Laser processing of polymer in the mid-infrared – Why ?* 2021 [cited 2022 24.11.2022]; Available from: <https://femtum.com/laser-processing-of-polymer-in-the-mid-infrared/>.
10. Amini-Nik, S., et al., *Ultrafast mid-IR laser scalpel: protein signals of the fundamental limits to minimally invasive surgery*. PLoS one, 2010. **5**(9): p. e13053.
11. Hale, G.M. and M.R. Querry, *Optical Constants of Water in the 200-nm to 200- μ m Wavelength Region*. Applied Optics, 1973. **12**(3): p. 555-563.
12. Hecht, J., *History of gas lasers, part I-continuous wave gas lasers*. Optics and Photonics News, 2010. **21**(1): p. 16-23.
13. Nordwall, B., *NRL laser to counter IR missile threat*. AVIATION WEEK & SPACE TECHNOLOGY, 1994. **141**(20): p. 43-44.
14. Keller, J. *Air Force orders LAIRCM laser missile defense systems for different versions of C-130 aircraft*. 26.09.2014; Available from: <https://www.militaryaerospace.com/communications/article/16718878/air-force-orders-laircm-laser-missile-defense-systems-for-different-versions-of-c130-aircraft>.
15. Fuchs, F., et al. *Imaging stand-off detection of explosives using tunable MIR quantum cascade lasers*. in *Quantum Sensing and Nanophotonic Devices VII*. 2010. International Society for Optics and Photonics.
16. Prasad, N.S., *Optical Communications in the mid-wave IR spectral band*, in *Free-Space Laser Communications*. 2005, Springer. p. 347-391.
17. Reidenbach, H.-D., *Laser Safety*, in *Springer Handbook of Lasers and Optics*, F. Träger, Editor. 2007, Springer New York: New York, NY. p. 1251-1276.
18. Henninger, H. and O. Wilfert, *An Introduction to Free-space Optical Communications*. Radioengineering, 2010. **19**(2): p. 203-212.
19. Su, Y., et al., *10 Gbps DPSK transmission over free-space link in the mid-infrared*. Optics Express, 2018. **26**(26): p. 34515-34528.

20. Brierley, M.-C. and P. France, *Continuous wave lasing at 2.7 μm in an erbium-doped fluorozirconate fibre*. Electronics Letters, 1988. **24**(15): p. 935-937.
21. Faucher, D., et al., *Erbium-doped all-fiber laser at 2.94 μm* . Optics Letters, 2009. **34**(21): p. 3313-3315.
22. Zhu, X. and R. Jain, *10-W-level diode-pumped compact 2.78 μm ZBLAN fiber laser*. Optics Letters, 2007. **32**(1): p. 26-28.
23. Caron, N., et al., *Understanding the fiber tip thermal runaway present in 3 μm fluoride glass fiber lasers*. Optics express, 2012. **20**(20): p. 22188-22194.
24. Maes, F., et al., *5.6 W monolithic fiber laser at 3.55 μm* . Optics Letters, 2017. **42**(11): p. 2054-2057.
25. Crawford, S., D.D. Hudson, and S.D. Jackson, *High-Power Broadly Tunable 3- μm Fiber Laser for the Measurement of Optical Fiber Loss*. IEEE Photonics Journal, 2015. **7**(3): p. 1-9.
26. Carbonnier, C., H. Tobben, and U. Unrau, *Room temperature CW fibre laser at 3.22 μm* . Electronics Letters, 1998. **34**(9): p. 893-894.
27. Maes, F., et al., *Room-temperature fiber laser at 3.92 μm* . Optica, 2018. **5**(7): p. 761-764.
28. Fortin, V., et al., *10-W-level monolithic dysprosium-doped fiber laser at 3.24 μm* . Optics letters, 2019. **44**(3): p. 491-494.
29. Aydin, Y.O., et al., *Towards power scaling of 2.8 μm fiber lasers*. Optics letters, 2018. **43**(18): p. 4542-4545.
30. *Gain Switching* [dostęp 30.08.2021]; Available from: https://www.rp-photonics.com/gain_switching.html.
31. *Q Switching*. [dostęp 30.09.2021]; Available from: https://www.rp-photonics.com/q_switching.html.
32. Keller, U., *2.1 Ultrafast solid-state lasers*, ". Laser physics and applications, 2007: p. 33-167.
33. Gorjan, M., M. Marinček, and M. Čopič, *High-power pulsed diode-pumped Er: ZBLAN fiber laser*. Optics letters, 2011. **36**(10): p. 1923-1925.
34. Luo, H., et al., *State-switchable and wavelength-tunable gain-switched mid-infrared fiber laser in the wavelength region around 2.94 μm* . Optics Express, 2018. **26**(1): p. 63-79.
35. Jobin, F., et al., *Gain-switched fiber laser at 3.55 μm* . Optics letters, 2018. **43**(8): p. 1770-1773.
36. Luo, H., et al., *Cascaded gain-switching in the mid-infrared region*. Scientific Reports, 2017. **7**(1): p. 1-7.
37. Luo, H., et al., *Watt-level gain-switched fiber laser at 3.46 μm* . Optics Express, 2019. **27**(2): p. 1367-1375.
38. Paradis, P., et al., *10 W-level gain-switched all-fiber laser at 2.8 μm* . Optics letters, 2018. **43**(13): p. 3196-3199.
39. Sójka, L., et al., *High Peak Power Q-switched Er: ZBLAN Fiber Laser*. Journal of Lightwave Technology, 2021. **39**(20): p. 6572-6578.
40. Tokita, S., et al., *12 WQ-switched Er: ZBLAN fiber laser at 2.8 μm* . Optics Letters, 2011. **36**(15): p. 2812-2814.
41. Lamrini, S., et al. *High-energy Q-switched Er: ZBLAN fibre laser at 2.79 μm* . in *The European Conference on Lasers and Electro-Optics*. 2015. Optical Society of America.
42. Shen, Y., et al., *High peak power actively Q-switched mid-infrared fiber lasers at 3 μm* . Applied Physics B, 2017. **123**(4): p. 1-6.
43. Shen, Y., et al., *200 μJ , 13 ns Er: ZBLAN mid-infrared fiber laser actively Q-switched by an electro-optic modulator*. Optics Letters, 2021. **46**(5): p. 1141-1144.

44. Hu, T., D. Hudson, and S. Jackson, *High peak power actively Q-switched Ho³⁺, Pr³⁺-co-doped fluoride fibre laser*. Electronics letters, 2013. **49**(12): p. 766-767.
45. Woodward, R., et al., *Q-switched Dy: ZBLAN fiber lasers beyond 3 μm: comparison of pulse generation using acousto-optic modulation and inkjet-printed black phosphorus*. Optics express, 2019. **27**(10): p. 15032-15045.
46. Duval, S., et al., *Femtosecond fiber lasers reach the mid-infrared*. Optica, 2015. **2**(7): p. 623-626.
47. Zhu, G., et al., *Graphene Mode-Locked Fiber Laser at 2.8 μm*. IEEE Photonics Technology Letters, 2015. **28**(1): p. 7-10.
48. Shen, Y., et al., *Wavelength-tunable passively mode-locked mid-infrared Er³⁺-doped ZBLAN fiber laser*. Scientific Reports, 2017. **7**(1): p. 1-7.
49. Bawden, N., et al., *Ultrafast 3.5 μm fiber laser*. Optics Letters, 2021. **46**(7): p. 1636-1639.
50. Majewski, M.R., R.I. Woodward, and S.D. Jackson, *Ultrafast mid-infrared fiber laser mode-locked using frequency-shifted feedback*. Optics Letters, 2019. **44**(7): p. 1698-1701.
51. Wang, Y., et al., *Ultrafast Dy³⁺: fluoride fiber laser beyond 3 μm*. Optics letters, 2019. **44**(2): p. 395-398.
52. Woodward, R., M. Majewski, and S. Jackson, *Mode-locked dysprosium fiber laser: Picosecond pulse generation from 2.97 to 3.30 μm*. APL photonics, 2018. **3**(11): p. 116106.
53. *Single Mode Fluoride Fiber Optic Patch Cables*. [cited 2024 20.02]; Available from: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=7999.
54. Wang, W., et al., *Recent advances in soft optical glass fiber and fiber lasers*. Progress in Materials Science, 2019. **101**: p. 90-171.
55. Baker, C.C., et al., *Nanoparticle doping for high power fiber lasers at eye-safer wavelengths*. Optics express, 2017. **25**(12): p. 13903-13915.
56. *Fluoride glasses* [cited 2021 dostę 30.08.2021]; Available from: <https://leverrefluore.com/scientific-world/fluoride-glasses/>.
57. Poulain, M., M. Poulain, and J. Lucas, *Verres fluores au tetrafluorure de zirconium proprietes optiques d'un verre dope au Nd³⁺*. Materials Research Bulletin, 1975. **10**(4): p. 243-246.
58. *History*. [cited 2021 dostę 30.08.2021]; Available from: <https://leverrefluore.com/company/history/>.
59. Daniel, J., *Wavelength selection and transverse mode control in high power fibre lasers*. 2013.
60. Lou, Q., et al., *Development of double-clad fiber lasers*. Photonics Asia. Vol. 4914. 2002: SPIE.
61. *Mid-Infrared Optical Fiber. Mid-IR Manufacturing* [cited 2021 dostę 30.08.2021]; Available from: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=7062#ad-image-0.
62. Elyamani, A. and R. Pafchek, *Fluoride glasses and methods for making optical fibers from the glasses US5285518A*. 1992: United States.
63. Jackson, S., *210 mW 2.84 μm Ho³⁺, Pr³⁺-doped fluoride fibre laser*. Electronics Letters, 2003. **39**(10): p. 772-773.
64. Pollnau, M. and S.D. Jackson, *Energy recycling versus lifetime quenching in erbium-doped 3 μm fiber lasers*. IEEE journal of quantum electronics, 2002. **38**(2): p. 162-169.
65. Pollnan, M. and S.D. Jackson, *Erbium 3 μm fiber lasers*. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2001. **7**(1): p. 30-40.

66. Gomes, L., A.F.H. Librantz, and S.D. Jackson, *Energy level decay and excited state absorption processes in dysprosium-doped fluoride glass*. Journal of Applied Physics, 2010. **107**(5): p. 053103.
67. Majewski, M.R., R.I. Woodward, and S.D. Jackson, *Dysprosium-doped ZBLAN fiber laser tunable from 2.8 μm to 3.4 μm , pumped at 1.7 μm* . Optics letters, 2018. **43**(5): p. 971-974.
68. Piramidowicz, R., M. Klimczak, and M. Malinowski, *Short-wavelength emission analysis in Dy: ZBLAN glasses*. Optical Materials, 2008. **30**(5): p. 707-710.
69. Majewski, M.R., et al., *Directly diode-pumped mid-infrared dysprosium fiber laser*. Optics Letters, 2019. **44**(22): p. 5549-5552.
70. Jackson, S.D., *Towards high-power mid-infrared emission from a fibre laser*. Nature photonics, 2012. **6**(7): p. 423-431.
71. Tokita, S., et al., *Liquid-cooled 24 W mid-infrared Er: ZBLAN fiber laser*. Optics letters, 2009. **34**(20): p. 3062-3064.
72. Zhu, X., et al., *Pulsed fluoride fiber lasers at 3 μm* . JOSA B, 2017. **34**(3): p. A15-A28.
73. Zhu, X. and R. Jain, *Watt-Level 100-nm Tunable 3- μm Fiber Laser*. IEEE Photonics Technology Letters, 2008. **20**(2): p. 156-158.
74. Fortin, V., et al., *30 W fluoride glass all-fiber laser at 2.94 μm* . Optics Letters, 2015. **40**(12): p. 2882-2885.
75. Sujecki, S., *Simple and efficient method of lines based algorithm for modeling of erbium doped Q-switched fluoride fiber lasers*. JOSA B, 2016. **33**(11): p. 2288-2295.
76. Sójka, L., et al., *Experimental investigation of mid-infrared laser action from Dy 3+ doped fluorozirconate fiber*. IEEE Photonics Technology Letters, 2018. **30**(12): p. 1083-1086.
77. Newburgh, G. and M. Dubinskii, *Power and efficiency scaling of Er: ZBLAN fiber laser*. Laser Physics Letters, 2021. **18**(9): p. 095102.
78. Li, J. and S.D. Jackson, *Numerical modeling and optimization of diode pumped heavily-erbium-doped fluoride fiber lasers*. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2012. **48**(4): p. 454-464.
79. Moffatt, J.E., et al., *In-fiber measurement of the erbium-doped ZBLAN 4I13/2 state energy transfer parameter*. Journal of the Optical Society of America B, 2021. **38**(2): p. 415-419.
80. Zhu, G., et al., *Experimental and numerical investigations on Q-switched laser-seeded fiber MOPA at 2.8 μm* . Journal of Lightwave Technology, 2014. **32**(23): p. 3951-3955.
81. Faucher, D., et al., *20 W passively cooled single-mode all-fiber laser at 2.8 μm* . Optics letters, 2011. **36**(7): p. 1104-1106.
82. Bernier, M., et al., *Highly stable and efficient erbium-doped 2.8 μm all fiber laser*. Optics Express, 2009. **17**(19): p. 16941-16946.
83. *RE doped double cladding fibers*. 19.04.2022]; Available from: <https://leverfluore.com/products/active-fibers/re-doped-double-cladding-fibers/>.
84. Harrington, J.A., *Infrared Fibers and Their Applications*. SPIE PRESS BOOK. Vol. PM135. 2004.
85. Gorjan, M., M. Marinček, and M. Čopič, *Role of Interionic Processes in the Efficiency and Operation of Erbium-Doped Fluoride Fiber Lasers*. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2011. **47**(2): p. 262-273.
86. Komorowski, P., et al., *Erbium doped ZBLAN fiber laser operating in the visible-feasibility study*. Photonics Letters of Poland, 2017. **9**(3): p. 85-87.
87. Jackson, S.D., *Continuous wave 2.9 μm dysprosium-doped fluoride fiber laser*. Applied physics letters, 2003. **83**(7): p. 1316-1318.

88. Tsang, Y.H. and A. El-Taher, *Efficient lasing at near 3 μ m by a Dy-doped ZBLAN fiber laser pumped at \sim 1.1 μ m by an Yb fiber laser*. Laser Physics Letters, 2011. **8**(11): p. 818-822.
89. Majewski, M.R. and S.D. Jackson, *Highly efficient mid-infrared dysprosium fiber laser*. Optics letters, 2016. **41**(10): p. 2173-2176.
90. Tsang, Y.H., et al., *Efficient 2.96 μ m dysprosium-doped fluoride fibre laser pumped with a Nd: YAG laser operating at 1.3 μ m*. Optics express, 2006. **14**(2): p. 678-685.
91. Woodward, R.I., et al., *Q-switched Dy:ZBLAN fiber lasers beyond 3 μ m: comparison of pulse generation using acousto-optic modulation and inkjet-printed black phosphorus*. Optics Express, 2019. **27**(10): p. 15032-15045.
92. Falconi, M.C., et al., *Design of an efficient pulsed Dy 3+: ZBLAN fiber laser operating in gain switching regime*. Journal of Lightwave Technology, 2018. **36**(23): p. 5327-5333.
93. Luo, H., et al., *Gain-switched dysprosium fiber laser tunable from 2.8 to 3.1 μ m*. Optics Express, 2019. **27**(19): p. 27151-27158.
94. Jobin, F., et al., *1.4 W in-band pumped Dy 3+-doped gain-switched fiber laser at 3.24 μ m*. Optics Letters, 2020. **45**(18): p. 5028-5031.
95. Wei, C., et al., *Widely wavelength tunable gain-switched Er 3+-doped ZBLAN fiber laser around 2.8 μ m*. Optics Express, 2017. **25**(8): p. 8816-8827.
96. Swiderski, J., et al., *An all-fiber, resonantly pumped, gain-switched, 2 μ m Tm-doped silica fiber laser*. Laser Physics Letters, 2012. **10**(1): p. 015107.
97. Jiang, M. and P. Tayebati, *Stable 10 ns, kilowatt peak-power pulse generation from a gain-switched Tm-doped fiber laser*. Optics letters, 2007. **32**(13): p. 1797-1799.
98. Pajewsk, L., et al., *Experimental investigation of actively Q-switched Dy 3+ doped fluoride single mode fiber laser operating near 3 μ m*. Journal of Lightwave Technology, 2023.
99. Hu, T., D. Hudson, and S. Jackson, *High peak power actively Q-switched Ho3+, Pr3+-co-doped fluoride fibre laser*. Electronics letters, 2013. **49**(12): p. 766-767.
100. Sojka, L., et al., *Experimental investigation of actively Q-switched Er3+: ZBLAN fiber laser operating at around 2.8 μ m*. Sensors, 2020. **20**(16): p. 4642.
101. Koechner, W., *Q-Switching*, in *Solid-State Laser Engineering*. 1996, Springer, Berlin, Heidelberg.
102. Ward, J. and S. Valle. *Acousto-optic devices for operation in the infrared*. in *Fiber Lasers and Glass Photonics: Materials through Applications*. 2018. SPIE.