

**MODELOWANIE ZJAWISK
FIZYCZNYCH W OPTYCZNIE
POMPOWANYCH LASERACH
TYPU VECSEL**

Adam K. Sokół, Robert P. Sarzała

Politechnika Łódzka
Monografie 2018

Recenzenci:
prof. dr hab. Marek Godlewski
dr hab. inż. Grzegorz Sęk, prof. PŁ

Redaktor Naukowy Wydziału Fizyki Technicznej,
Informatyki i Matematyki Stosowanej
dr hab. inż. Aneta Poniszewska-Marańda

© Copyright by Politechnika Łódzka 2018

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI ŁÓDZKIEJ
90-924 Łódź, ul. Wólczańska 223
tel. 42 631-29-52, 42 631-20-87
fax 42 631-25-38
e-mail: zamowienia@info.p.lodz.pl
www.wydawnictwa.p.lodz.pl

ISBN 978-83-7283-933-6

Nakład 100 egz. Ark. druk. 16,00. Papier offset. 80g, 70 x 100
Druk ukończono w lipcu 2018 r.
Wykonano w Drukarni „Quick-Druk” s.c., 90-562 Łódź, ul. Łąkowa 11
Nr 2262

PODZIĘKOWANIA

Badania opisane w niniejszym opracowaniu zostały zrealizowane częściowo w ramach: grantów finansowanych przez Narodowe Centrum Nauki: PRELUDIUM nr 2014/15/N/ST7/05290 pt. „*Półprzewodnikowe lasery dyskowe dostosowane do generacji promieniowania z zakresu średniej podczerwieni*” i OPUS nr 2014/13/B/ST7/00633 pt. „*Modelowanie półprzewodnikowych laserów azotkowych z pionową wnęką rezonansową o emisji powierzchniowej*”, projektów badawczych realizowanych w ramach dofinansowania badań służących rozwojowi młodych naukowców na Wydziale FTIMS Politechniki Łódzkiej w latach: 2012, 2015 i 2016 oraz stypendium naukowego z Własnego Funduszu Stypendialnego Politechniki Łódzkiej w roku 2015.

Autorzy pragną w tym miejscu wyrazić swoją wdzięczność i podziękować całemu Zespołowi Fotoniki Instytutu Fizyki Politechniki Łódzkiej za wsparcie i przychylne nastawienie podczas realizacji niniejszej pracy. W szczególności autorzy dziękują dr. inż. Michałowi Wasiakowi i dr. inż. Łukaszowi Piskorskiemu. Za wspólną pracę, udostępnienie danych doświadczalnych oraz cenne dyskusje, które niewątpliwie podniosły wartość niniejszej pracy, autorzy chcieliby również podziękować członkom zespołu z Instytutu Technologii Elektronowej w Warszawie: dr hab. inż. Agacie Jasik, dr. hab. Janowi Muszalskiemu, dr inż. Annie Wójcik-Jedlińskiej, dr Iwonie Sankowskiej, dr. inż. Arturowi Brodzie, mgr inż. Justynie Kubackiej-Traczyk i dr. Arturowi Trajnerowiczowi.

Badania realizowane były w Zespole Fotoniki Instytutu Fizyki Politechniki Łódzkiej na Wydziale Fizyki Technicznej, Informatyki i Matematyki Stosowanej.

SPIS TREŚCI

Podziękowania.....	i
Spis treści.....	iii
Wykaz oznaczeń.....	v
Najważniejsze skróty.....	vii
Streszczenie.....	ix
1. Wstęp.....	13
2. Cele pracy.....	17
3. Lasery typu VECSEL.....	19
3.1. Historia.....	19
3.2. Budowa i zasada działania.....	27
3.3. Wytwarzanie.....	40
3.4. Osiągi.....	42
3.5. Zastosowania.....	46
4. Modelowanie zjawisk fizycznych w laserach typu VECSEL.....	51
4.1. Transport i rekombinacja nośników ładunku.....	54
4.2. Struktura pasmowa.....	67
4.3. Wzmocnienie materiałowe.....	72
4.4. Rozpływ ciepła.....	75
4.5. Zjawiska optyczne.....	79
4.6. Algorytm obliczeń nadprogowych.....	96
4.7. „Cykl życia” nośników i fotonów.....	101
4.8. Modele pracy nadprogowej lasera typu VECSEL w literaturze.....	104
5. Arsenkowe lasery typu VECSEL.....	107
5.1. Laser emitujący falę o długości 980 nm.....	108
5.2. Laser dwufalowy.....	118
5.3. Laser z podwójnym diamentem.....	124

6. Antymonkowy laser typu VECSEL.....	131
6.1. Wprowadzenie	131
6.2. Obszar czynny GaInAsSb/AlGaAsSb	133
6.3. Wyniki symulacji	145
6.4. Podsumowanie.....	175
7. Laser typu DW-VECSEL do generacji promieniowania z zakresu średniej podczerwieni	177
8. Azotkowy laser typu VECSEL	189
9. Podsumowanie.....	205
Abstract.....	209
Dodatek: Parametry materiałowe	213
D.1. Parametry dla modelu transportu i rekombinacji nośników	213
D.2. Parametry dla modeli wzmocnienia i struktury pasmowej	216
D.3. Parametry dla modelu rozptyłu ciepła.....	217
D.4. Parametry dla modelu optycznego.....	218
Bibliografia	219
Autorzy	235

WYKAZ OZNACZEŃ

A	współczynnik rekombinacji monomolekularnej
a_{lc}	stała sieci
B	współczynnik rekombinacji bimolekularnej
c	prędkość światła w próżni
C	współczynnik rekombinacji Augera
D	współczynnik dyfuzji ambipolarnej
d	grubość
g	wzmocnienie materiałowe
k	przewodność cieplna
n	koncentracja nośników
n_{Im}	część urojona współczynnika załamania, współczynnik ekstynkcji
n_R	zespolony współczynnik załamania
n_{Re}	część rzeczywista współczynnika załamania
P	moc
P_a	moc promieniowania pompującego absorbowanego w laserze
P_e	moc promieniowania emitowanego
P_e^{OC}	moc promieniowania emitowanego przez zwierciadło wyjściowe
P_p	moc promieniowania pompującego
R	współczynnik odbicia, odbijalność
r	współrzędna radialna
R_{th}	oporność cieplna
T	temperatura
T_{oc}	współczynnik transmisji zewnętrznego zwierciadła
w	szerokość
w_e	szerokość wiązki emitowanej
w_p	szerokość wiązki pompującej
z	współrzędna osiowa
a	współczynnik absorpcji
λ	długość fali
Γ	współczynnik wypełnienia

Uwaga. W pracy przyjęto zapis liczb zgodny z notacją anglosaską, gdzie separatorem znaków dziesiętnych jest kropka. Używane w pracy określenia: *arsenki* lub *materiały arsenkowe* odnoszą się do dwu-, trój- i czteroskładnikowych związków chemicznych grupy $A^{III}As$, określenia: *antymonki* lub *materiały antymonkowe* – do analogicznych związków grupy $A^{III}Sb$, a *azotki* lub *materiały azotkowe* – do związków grupy $A^{III}N$.

NAJWAŻNIEJSZE SKRÓTY

CW	ang. <i>Continuous Wave</i> – praca z falą ciągłą
DBR	ang. <i>Distributed Bragg Reflector</i> – zwierciadło ćwierćfalowe Bragga
DW-VECSEL	ang. <i>Dual-Wavelength VECSEL</i> – laser typu VECSEL pracujący na dwóch częstotliwościach (VECSEL dwufalowy)
EEL	ang. <i>Edge-Emitting Laser</i> – laser o emisji krawędziowej
EP-VECSEL	ang. <i>Electrically Pumped Vertical-External-Cavity Surface-Emitting Laser</i> – elektrycznie pompowany laser półprzewodnikowy o emisji powierzchniowej z zewnętrzną pionową wnęką rezonansową
HCG	ang. <i>High-Refractive-Index Contrast Grating</i> – podfalowa siatka dyfrakcyjna o wysokim kontraście współczynnika załamania
LPE	ang. <i>Liquid Phase Epitaxy</i> – epitaksja z fazy ciekłej
MBE	ang. <i>Molecular Beam Epitaxy</i> – epitaksja z wiązek molekularnych
MOCVD	ang. <i>Metal Organic Chemical Vapor Deposition</i> – osadzanie chemiczne z par związków metaloorganicznych
MOVPE	ang. <i>Metal Organic Vapor Phase Epitaxy</i> – epitaksja z fazy gazowej z wykorzystaniem związków metaloorganicznych
MQW	ang. <i>Multi Quantum Well</i> – wielokrotna studnia kwantowa
OC	ang. <i>Output Coupler</i> – zewnętrzne zwierciadło
OPSL	ang. <i>Optically Pumped Semiconductor Laser</i> – optycznie pompowany laser półprzewodnikowy
OP-VECSEL	ang. <i>Optically Pumped Vertical-External-Cavity Surface-Emitting Laser</i> – optycznie pompowany laser półprzewodnikowy o emisji powierzchniowej z zewnętrzną pionową wnęką rezonansową
PL	ang. <i>PhotoLuminescence</i> – fotoluminescencja
QD	ang. <i>Quantum Dot</i> – kropka kwantowa
QW	ang. <i>Quantum Well</i> – studnia kwantowa

RPG	ang. <i>Resonant Periodic Gain</i> – sposób rozmieszczania studni kwantowych w obszarze czynnym tak, by każda z nich znajdowała się w pobliżu strzałki rozkładu natężenia emitowanego światła
SDL	ang. <i>Semiconductor Disk Laser</i> – półprzewodnikowy laser dyskowy
SESAM	ang. <i>Semiconductor Saturable Absorber Mirror</i> – nasycalne zwierciadło półprzewodnikowe
VCSEL	ang. <i>Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser</i> – laser półprzewodnikowy o emisji powierzchniowej z pionową wnęką rezonansową
VECSEL	ang. <i>Vertical-External-Cavity Surface-Emitting Laser</i> – laser półprzewodnikowy o emisji powierzchniowej z zewnętrzną wnęką rezonansową

STRESZCZENIE

Optycznie pompowane lasery półprzewodnikowe o emisji powierzchniowej z zewnętrzną pionową wnęką rezonansową (ang. *vertical-external-cavity surface-emitting laser*, VECSEL) stanowią szczególny rodzaj laserów łączących w sobie zalety laserów typu VCSEL (ang. *vertical-cavity surface-emitting laser*) i półprzewodnikowych laserów o emisji krawędziowej, a także laserów opartych na ciele stałym. Ich unikalne własności sprawiają, że znajdują one coraz więcej zastosowań w dziedzinach, takich jak: telekomunikacja, monitorowanie środowiska, biologia, medycyna, kryminalistyka czy wyświetlanie obrazu. Niniejsza praca została poświęcona opracowaniu kompleksowego matematycznego modelu lasera typu VECSEL i stworzeniu na jego bazie programu komputerowego, przy pomocy którego przeprowadzono następnie szereg symulacji struktur laserowych pracujących w różnych zakresach widmowych – od barwy niebieskiej do średniej podczerwieni – i wykonanych w różnych systemach materiałowych – arsenkowym, antymonkowym i azotkowym.

Początek pracy stanowi krótki *Wstęp*, który ma za zadanie wprowadzić Czytelnika w jej tematykę oraz wykazać zasadność postawionych celów opisanych w rozdziale *Cele pracy*. W kolejnym rozdziale, zatytułowanym *Lasery typu VECSEL*, przedstawiono historię rozwoju laserów typu VECSEL oraz informacje zgromadzone na podstawie bogatej literatury, dotyczące ich budowy, zasady działania, osiągnięć i zastosowań zarówno naukowych, jak i komercyjnych.

Rozdział *Modelowanie zjawisk fizycznych w laserach typu VECSEL*, jak sam tytuł wskazuje, traktuje o symulacji procesów zachodzących we

wnętrzu rozważanego przyrządu, decydujących o jego działaniu i własnościach eksploatacyjnych. Oprócz matematycznego opisu zjawisk i algorytmów będących podstawą wykorzystywanego w niniejszej pracy oprogramowania, a także struktury programu, znajduje się tam również komentarz na temat wybranych modeli numerycznych prezentowanych w literaturze czy też dostępnych komercyjnie.

W dalszej części pracy przedstawiono wyniki symulacji prowadzonych z wykorzystaniem prezentowanego modelu. Rozdział *Arsenkowe lasery typu VECSEL* dotyczy struktur wykonanych na podłożu GaAs. Dwa pierwsze podrozdziały zawierają wyniki badań prowadzonych wspólnie z zespołem z Instytutu Technologii Elektronowej w Warszawie. W podrozdziale *Laser emitujący falę o długości 980 nm* znajdują się rozważania dotyczące działania struktur zawierających różną liczbę studni kwantowych w obszarze czynnym oraz wpływu relaksacji struktury epitaksjalnej na osiągi lasera typu VECSEL. Podrozdział *Laser dwufalowy* poświęcony został projektowaniu i symulacji działania lasera typu VECSEL emitującego jednocześnie promieniowanie o dwóch długościach fali w zakresie bliskiej podczerwieni. W trzecim podrozdziale zatytułowanym *Laser z podwójnym diamentem* opisano wykorzystanie modelu do symulacji struktury arsenkowej z podwójnym diamentem i podfalowymi siatkami dyfrakcyjnymi przeprowadzonych przez dr.inż. Jarosława Walczaka z Zespołu Fotoniki Instytutu Fizyki Politechniki Łódzkiej. Badania te były prowadzone we współpracy z naukowcami z Laboratorium Fizyki Nanostruktur Politechniki Federalnej w Lozannie oraz z firmy BeamExpress S.A.

W rozdziale *Antymonkowy laser typu VECSEL* znajdują się rozważania dotyczące możliwości wykonania lasera typu VECSEL z obszarem czynnym GaInAsSb/AlGaAsSb, który mógłby posłużyć do bezpośredniej generacji promieniowania z przedziału widmowego od 3 do 5 μm . Inne podejście do uzyskania promieniowania z zakresu średniej podczerwieni z wykorzystaniem lasera typu VECSEL opisano w rozdziale *Laser typu DW-VECSEL do generacji promieniowania z zakresu średniej podczerwieni*. Przedstawiono tam koncepcję lasera z podwójnym obszarem czynnym, generującego jednocześnie dwie wiązki promieniowania

o różnych częstotliwościach, dla których długość fali odpowiadająca częstotliwości różnicowej zawiera się w przedziale 3–5 μm . Przy pomocy wspomnianego przyrządu i specjalnie dobranego kryształu nieliniowego można potencjalnie otrzymać promieniowanie ze wspomnianego zakresu widmowego. Kolejny rozdział, zatytułowany *Azotkowy laser typu VECSEL*, dotyczy symulacji działania azotkowego lasera typu VECSEL, który, w odróżnieniu od dotychczas zademonstrowanych konstrukcji, umożliwiłby pracę w reżimie ciągłym.

Całość zamyka *Podsumowanie* zawierające opis zrealizowanych prac oraz możliwe kierunki dalszych badań. Na końcu pracy znajduje się ponadto streszczenie w języku angielskim (*Abstract*), rozdział *Dodatek*, w którym zamieszczono informacje na temat przyjętych w pracy parametrów materiałowych (*Parametry materiałowe*), spis cytowanych pozycji literaturowych (*Bibliografia*), a także życiorysy naukowe autorów (*Autorzy*).

1. WSTĘP

Niniejsza praca dotyczy komputerowego modelowania zjawisk fizycznych zachodzących podczas pracy optycznie pompowanych laserów typu VECSEL (ang. *vertical-external-cavity surface-emitting lasers*), czyli półprzewodnikowych laserów o emisji powierzchniowej z zewnętrzną pionową wnęką rezonansową, zwanych także półprzewodnikowymi laserami dyskowymi (ang. *semiconductor disk lasers*, SDLs). Jest to stosunkowo młoda rodzina przyrządów półprzewodnikowych, jednak ze względu na swoje unikalne własności znajduje ona szereg zastosowań zarówno naukowych, jak i komercyjnych, m.in. w biologii, medycynie, telekomunikacji, monitorowaniu środowiska pod kątem detekcji szkodliwych gazów, kryminalistyce i technologiach multimedialnych do produkcji różnego rodzaju wyświetlaczy i projektorów.

Lasery typu VECSEL łączą w sobie zalety laserów dyskowych opartych na ciele stałym (łatwość skalowania mocy wyjściowej, zewnętrzna wnęką rezonansowa) oraz laserów półprzewodnikowych (wysoka częstotliwość modulacji, możliwość uzyskania promieniowania o bardzo różnych długościach fali, dzięki inżynierii przerwy energetycznej), w tym laserów o emisji krawędziowej (duża moc wyjściowa) i laserów typu VCSEL (wysoka jakość emitowanej wiązki). Połączenie dużej mocy wyjściowej i doskonałej jakości wiązki o małej rozbieżności i kołowym przekroju jest kluczem do wielu zastosowań naukowych i komercyjnych. Ponadto, zewnętrzna wnęką rezonansowa pozwala na umieszczanie dodatkowych elementów optycznych na drodze wiązki laserowej

wewnątrz rezonatora – np. zwierciadeł nasycalnych SESAM do generacji ultrakrótkich impulsów laserowych czy kryształów nieliniowych do otrzymywania wyższych harmoniczných – oraz zestawianie wielu laserów w ramach jednego rezonatora w celu zwiększenia mocy wyjściowej.

Uzyskanie wysokich osiągnięć laserów typu VECSEL w postaci dużej mocy wyjściowej i sprawności różniczkowej wymaga starannego zaprojektowania ich struktur półprzewodnikowych i układów montażowych oraz zapewnienia odpowiednich warunków pobudzenia optycznego. Do realizacji tego celu konieczna jest jednak dokładna wiedza na temat procesów fizycznych związanych z pracą tych laserów. Podobnie jak w przypadku innych laserów półprzewodnikowych, bezpośrednia analiza zjawisk zachodzących we wnętrzu laserów typu VECSEL przy pomocy metod eksperymentalnych jest na ogół bardzo utrudniona, a czasem wręcz zupełnie niemożliwa, ze względu na małe rozmiary tych przyrządów. Z pomocą przychodzi symulacja komputerowa, która, dzięki wykorzystaniu metod numerycznych, umożliwia badanie pracy lasera bez potrzeby zestawiania szeregu układów pomiarowych czy wytwarzania dodatkowych struktur testowych. Stanowi ona doskonale narzędzie wspomagające projektowanie struktur przyszłych laserów, ale również badanie gotowych już przyrządów. Niestety, wiele z opisywanych w literaturze czy nawet dostępnych komercyjnie modeli numerycznych zawiera daleko idące uproszczenia bądź skupia się jedynie na wybranym zagadnieniu, nie uwzględniając relacji wiążących go z innymi zjawiskami fizycznymi zachodzącymi podczas pracy lasera.

W niniejszej pracy podjęto próbę opracowania kompleksowego modelu matematycznego lasera typu VECSEL i stworzenia na jego bazie programu komputerowego umożliwiającego przeprowadzanie symulacji zjawisk fizycznych zachodzących we wnętrzu struktury półprzewodnikowej. Wiązało się to z koniecznością stworzenia od podstaw algorytmów pozwalających na uwzględnienie wzajemnych powiązań pomiędzy poszczególnymi procesami fizycznymi. W efekcie model umożliwia przeprowadzanie symulacji nadprogowej pracy lasera typu VECSEL i wyznaczanie jego wybranych charakterystyk eksploatacyjnych. Swoją

użyteczność potwierdził jak dotąd w badaniach nad strukturami laserowymi przeznaczonymi do pracy w różnych zakresach widmowych i wykonanymi z użyciem różnych technologii materiałowych, gdzie wielokrotnie wykazano zgodność wyników obliczeń i danych doświadczalnych. W niniejszej pracy przedstawiono wybrane wyniki symulacji prowadzonych z wykorzystaniem prezentowanego modelu dla arsenkowych, antymonkowych i azotkowych laserów typu VECSEL.

2. CELE PRACY

Głównym celem niniejszej pracy było opracowanie kompleksowego matematycznego modelu lasera typu VECSEL oraz stworzenie na jego bazie programu komputerowego umożliwiającego przeprowadzanie symulacji zjawisk fizycznych zachodzących we wnętrzu modelowanego przyrządu. Wiele z opisywanych w literaturze czy nawet dostępnych komercyjnie modeli numerycznych zawiera daleko idące uproszczenia bądź skupia się jedynie na wybranym zagadnieniu, nie uwzględniając relacji wiążących go z innymi procesami fizycznymi zachodzącymi podczas pracy lasera. Naszym celem było więc stworzenie od podstaw algorytmów pozwalających na uwzględnienie wzajemnych powiązań pomiędzy poszczególnymi zjawiskami fizycznymi tak, by w połączeniu z modelami opracowanymi już wcześniej w Zespole Fotoniki Instytutu Fizyki Politechniki Łódzkiej umożliwić kompleksową analizę pracy laserów typu VECSEL, w szczególności wyznaczenie ich charakterystyk eksploatacyjnych.

Poza opracowaniem modelu matematycznego oraz jego implementacją celem pracy była również weryfikacja przyjętych w nim założeń przez porównanie otrzymanych wyników z danymi doświadczalnymi dla laserów wykonanych w różnych systemach materiałowych i generujących promieniowanie o długościach fali z różnych zakresów widmowych.

Ponieważ głównymi zadaniami symulacji komputerowej są zazwyczaj: (i) głębsze poznanie fizyki działania modelowanych przyrządów, (ii) optymalizacja już istniejących struktur i urządzeń oraz (iii) projektowanie nowych rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych, ostatnim

celem pracy było pokazanie praktycznych możliwości opracowanego modelu i oprogramowania poprzez realizację wyżej wymienionych punktów na przykładzie różnych analizowanych w pracy laserów typu VECSEL, które powinny spełniać z góry określone wymagania i parametry eksploatacyjne.