

dr inż. Maciej Dems

# Autoreferat

Politechnika Łódzka  
Wydział Fizyki Technicznej, Informatyki i Matematyki Stosowanej  
Instytut Fizyki

Łódź 2017

## Spis treści

<b>1. Dane podstawowe</b>	2
Imię i nazwisko	2
Posiadane dyplomy i stopnie naukowe	2
Aktualne miejsce pracy	2
Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	2
Dane bibliometryczne	2
<b>2. Wskazanie osiągnięcia</b>	3
Tytuł osiągnięcia naukowego	3
Zbiór prac wchodzących w skład osiągnięcia	3
Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników	3
2.1. Wprowadzenie	3
2.2. Nowe metody obliczeniowe	4
2.2.1. Pół-wektorowa metoda do analizy laserów typu VCSEL	4
2.2.2. Metoda transferu macierzy odbicia	5
2.2.3. Algorytmy genetyczne dla optymalizacji zwierciadeł Bragga	5
2.3. Zbadane podfalowe struktury foniczne	6
2.3.1. Laser typu VCSEL z kryształem fonicznym	6
2.3.2. Podfalowe siatki dyfrakcyjne o wysokiej odbijalności	8
2.3.3. Zwierciadło DBR z silną ujemną dyspersją	10
2.4. Podsumowanie	11
2.5. Literatura	11
Omówienie mojego indywidualnego wkładu w prace wchodzące w skład osiągnięcia naukowego	12
<b>3. Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze</b>	13
3.1. Nagrody, stypendia i wyróżnienia otrzymane po uzyskaniu stopnia doktora	13
3.2. Udział w najważniejszych projektach badawczych	13
3.3. Omówienie kierowanych przeze mnie projektów badawczych	14
<i>Modelowanie nowych struktur laserów VCSEL wykonanych z zastosowaniem selektywnej oksydacji powierzchniowej wewnątrz wnęki rezonansowej, pod kątem uzyskania jednomodowej emisji dużej mocy</i>	14
<i>Model jednomodowego lasera VCSEL opartego na kryształach fonicznych o dużej mocy i stabilnej polaryzacji promieniowania</i>	15
<i>Oprogramowanie do modelowania wzajemnych interakcji pomiędzy modelami fizycznymi w laserach półprzewodnikowych</i>	15
3.4. Opracowane oprogramowanie symulacyjne	15
3.5. Prace opublikowane po uzyskaniu stopnia doktora	17
3.5.1. Publikacje w czasopiśmie z listy JCR	17
3.5.2. Rozdziały w książkach	18
3.5.3. Artykuły opublikowane w tomach pokonferencyjnych SPIE	18
3.5.4. Pozostałe opublikowane publikacje pokonferencyjne	19
3.5.5. Pozostałe publikacje	20
3.5.6. Wynalazki, które uzyskały ochronę patentową	20

3.6.	Prace opublikowane przed uzyskaniem stopnia doktora . . . . .	20
3.6.1.	Publikacje w czasopismach z listy JCR . . . . .	20
3.6.2.	Artykuły opublikowane w tomach pokonferencyjnych SPIE . . . . .	21
3.6.3.	Pozostałe opublikowane publikacje pokonferencyjne . . . . .	21
3.7.	Referaty zaproszone na międzynarodowych konferencjach naukowych . . . . .	21
3.8.	Osiągnięcia dydaktyczne . . . . .	22
3.9.	Pozostałe osiągnięcia . . . . .	22
3.9.1.	Popularyzacja Nauki . . . . .	22
3.9.2.	Rozwój aparatury badawczej . . . . .	22

## 1. Dane podstawowe

### Imię i nazwisko

Maciej Dems

### Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

- **doktor nauk fizycznych** — w 2007 r. obroniłem z wyróżnieniem na Wydziale Fizyki Technicznej, Informatyki i Matematyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej rozprawę p.t. „Metoda admitancyjna fal płaskich i jej zastosowanie w modelowaniu laserów półprzewodnikowych oraz planarnych struktur kryształów fotonicznych”.
- **magister fizyki** — w 2002 r. obroniłem z wyróżnieniem na Wydziale Fizyki Technicznej, Informatyki i Matematyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej pracę magisterską na temat „Generacja naprężeń w wielowarstwowych strukturach laserów azotkowych w trakcie chłodzenia do temperatury pokojowej ich struktur wytworzonych w wysokiej temperaturze”.

### Aktualne miejsce pracy

- Politechnika Łódzka, Wydział Fizyki Technicznej, Informatyki i Matematyki Stosowanej, Instytut Fizyki, ul. Wólczańska 219, 90-924 Łódź

### Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- **od 1 lutego 2008 r.** — adiunkt w Instytucie Fizyki Politechniki Łódzkiej.
- **18 lutego – 11 marca 2007 r.** — staż naukowy w Department of Applied Physics and Photonics, Vrije Universiteit Brussel, Bruksela, Belgia, w ramach programu COST MP0702.
- **19 marca – 2 kwietnia 2006 r.** — staż naukowy w Department of Applied Physics and Photonics, Vrije Universiteit Brussel, Bruksela, Belgia, w ramach programu COST P11.
- **11 września – 1 października 2005 r.** — staż naukowy w Department of Applied Physics and Photonics, Vrije Universiteit Brussel, Bruksela, Belgia, w ramach programu COST P11.
- **1 – 30 listopada 2004 r.** — staż naukowy w Department of Applied Physics and Photonics, Vrije Universiteit Brussel, Bruksela, Belgia, w ramach programu COST P11.
- **20 lutego 2006 r. – 31 stycznia 2008 r.** — asystent w Instytucie Fizyki Politechniki Łódzkiej.
- **23 lutego 2004 r. – 19 lutego 2006 r.** — asystent w Centrum Nauczania Matematyki i Fizyki Politechniki Łódzkiej.
- **1 marca 2003 r. – 22 lutego 2008 r.** — asystent w Instytucie Fizyki Politechniki Łódzkiej.
- **16 sierpnia 2002 r. – 28 lutego 2003 r.** — asystent naukowy w Instytucie Fizyki Politechniki Łódzkiej.

### Dane bibliometryczne

Dane bibliometryczne zostały opracowane na podstawie bazy Web of Science.

ResearcherID:	E-6065-2016
ORCID:	0000-0002-5576-1021
Łączna liczba publikacji:	78
Liczba cytowań publikacji (bez autocytowań):	221
Indeks Hirsha:	11

## 2. Wskazanie osiągnięcia

### Tytuł osiągnięcia naukowego

Numeryczna analiza właściwości optycznych podfalowych struktur fotonicznych.

### Zbiór prac wchodzących w skład osiągnięcia

- [A1] M. Dems, „Semi-vectorial method based on effective index for VCSEL analysis”, *J. Opt. Soc. Am. B* **26**, 792–796 (2009). [5-letni Impact Factor w roku wydania 1,899]
- [A2] K. Panajotov and M. Dems, „Photonic crystal vertical-cavity surface-emitting lasers with true photonic band gap”, *Opt. Lett.* **35**, 829–831 (2010). [IF 3,548]
- [A3] M. Dems, I.-S. Chung, P. Nyakas, S. Bischoff, and K. Panajotov, „Numerical methods for modeling photonic-crystal VCSELs”, *Opt. Express* **18**, 16042–16054 (2010). [IF 3,939]
- [A4] M. Dems, „Modelling of high-contrast grating mirrors. The impact of imperfections on their performance in VCSELs”, *Opto-Electr. Rev.* **19**, 340–345 (2011). [IF 1,054]
- [A5] T. Czyszanowski, M. Dems, R. P. Sarzala, K. Panajotov, and K. D. Choquette, „Photonic crystal vcsels: Detailed comparison of experimental and theoretical spectral characteristics”, *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* **19**, 1–8 (2013). [IF 3,566]
- [A6] M. Gębski, M. Dems, A. Szerling, M. Motyka, L. Marona, R. Kruszka, D. Urbańczyk, M. Walczakowski, N. Pałka, A. Wójcik-Jedlińska, Q. J. Wang, D. H. Zhang, M. Bugajski, M. Wasiak, and T. Czyszanowski, „Monolithic high-index contrast grating: a material independent high-reflectance VCSEL mirror”, *Optics Express* **23**, 11674–11686 (2015). [IF 3,250]
- [A7] M. Dems, P. Wnuk, P. Wasylczyk, Ł. Zinkiewicz, A. Wójcik-Jedlińska, K. Regiński, K. Hejduk, A. Jasik, „Optimization of Broadband Semiconductor Chirped Mirrors with Genetic Algorithm”, *Appl. Phys. B.* **122**, 266 (2016). [IF 1,686]
- [A8] M. Dems, „Monolithic High-Contrast Gratings: why they do not scatter the light?”, *IEEE J. Lightwave Technol.* **35**, 159–165 (2017). [IF 2,543]

### Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników

#### 2.1. Wprowadzenie

Podfalowe struktury fotoniczne to struktury o wymiarach porównywalnych, lub mniejszych od długości fali elektromagnetycznej, z którą oddziałują. Zachodzące w nich zjawiska fizyczne (z zakresu optyki) jakościowo różnią się od tych możliwych do zaobserwowania w układach makroskopowych, dzięki czemu właściwe wykorzystanie tych struktur pozwala na osiągnięcie pożądaných efektów nieosiągalnych innymi metodami. Przykładami układów tego typu są: ćwierćfalowe lustra Bragga, podfalowe siatki dyfrakcyjne, czy też kryształy fotoniczne. Te właśnie struktury stały się przedmiotem moich badań, których wyniki zostały opublikowane w pracach wchodzących w skład osiągnięcia.

Publikacje, zebrane powyżej i szczegółowo omówione w dalszej części autoreferatu, można zakwalifikować do dwóch grup. Do pierwszej grupy zalicza się praca [A1] oraz po części [A4] i [A7]. Prezentują one

nowatorskie podejścia do analizy numerycznej struktur fotonicznych i przedstawiają autorskie zaawansowane metody obliczeniowe. Wraz z opracowaną przeze mnie, w ramach prac nad rozprawą doktorską, metodą admitancyjną fal płaskich (PWAM — Plane-Wave Admittance Method) stanowią one wydajne narzędzie do badania szczegółowych zjawisk fizycznych w strukturach podfalowych. Wyniki tych badań zostały przedstawione w pracach [A2] – [A6] oraz [A8], które składają się na drugą grupę cyklu publikacji.

Poniżej przedstawiam podsumowanie najważniejszych tez każdej z wymienionych prac. W pierwszej kolejności omawiam publikacje z grupy pierwszej, dotyczące nowych metod obliczeniowych, gdyż prezentują one warsztat narzędziowy wykorzystany w pozostałych pracach.

## 2.2. Nowe metody obliczeniowe

### 2.2.1. Pół-wektorowa metoda do analizy laserów typu VCSEL

W otwierającej cykl pracy [A1] zaprezentowałem pół-wektorową metodę do analizy laserów typu VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers). Metoda ta polega na rozwiązaniu niezależnych od czasu równań Maxwella w strukturze planarnej o warstwach jednorodnych w kierunku osi  $z$  (prostopadłej do warstw). Równania te można sprowadzić do postaci:

$$\partial_z \mathbf{E}(z) = -i \bar{\mathbf{R}}_{\mathbf{H}} \mathbf{H}(z), \quad (1)$$

$$\partial_z \mathbf{H}(z) = -i \bar{\mathbf{R}}_{\mathbf{E}} \mathbf{E}(z), \quad (2)$$

gdzie  $\mathbf{E}(z)$  i  $\mathbf{H}(z)$  to wektory pola elektrycznego i magnetycznego, operator  $\partial_z$  oznacza pochodną wzdłuż osi  $z$ , zaś  $\bar{\mathbf{R}}_{\mathbf{E}}$  i  $\bar{\mathbf{R}}_{\mathbf{H}}$  to macierze operatorów w płaszczyźnie  $xy$  (równoległej do warstw). Istotną cechą metody jest dyskretyzacja równań (1) i (2) w ortogonalnej bazie fal płaskich (bazie Fouriera). Równania w analogicznej formie były także punktem wyjścia do mojej wcześniejszej autorskiej, w pełni wektorowej metody PWAM. Jednakże, w odróżnieniu od niej, w pracy [A1] zastosowałem podejście pół-wektorowe, pozwalające w radykalny sposób skrócić czas obliczeń. W podejściu tym równania (1) i (2) przekształcane są do postaci:

$$[\bar{\mathbf{R}}_{\mathbf{H}} \bar{\mathbf{R}}_{\mathbf{E}} f_E + \mathbf{I} \partial_z^2 f_E] \mathbf{E} = 0, \quad (3)$$

gdzie trójwymiarowy rozkład natężenia pola elektrycznego potraktowany jest jako iloczyn dwóch czynników — jednego zależnego wyłącznie od składowej prostopadłej do epitaksjalnych warstw lasera ( $z$ ), oraz drugiego zmiennego wyłącznie w płaszczyźnie tych warstw:

$$\mathbf{E}(x, y, z) = f_E(z) \mathbf{E}(x, y). \quad (4)$$

Dzięki temu, trójwymiarowe równanie (3) można zastąpić dwoma równaniami, z których pierwsze jest jedno-, a drugie dwuwymiarowe:

$$(\partial_z^2 + \kappa^2 n(z)^2) f_E = 0, \quad (5)$$

$$[\langle \bar{\mathbf{R}}_{\mathbf{H}} \bar{\mathbf{R}}_{\mathbf{E}} \rangle - \kappa^2 \langle n^2 \rangle \mathbf{I}] \mathbf{E} = 0, \quad (6)$$

gdzie  $\langle \dots \rangle$  oznacza wynik całkowania po współrzędnej  $z$  ważonego przez rozkład natężenia pola  $|f_E|^2$ .

Separacja zmiennych w równaniu (4) jest typowa dla popularnej metody efektywnego współczynnika załamania [1]. Jednakże, w odróżnieniu od tejże, moja metoda nie ignoruje faktu, że pole elektromagnetyczne jest polem wektorowym, co pozwala na poprawną analizę znacznie szerszego spektrum struktur fotonicznych. Przykłady takich struktur zostały opisane w pracach [A1] (laser VCSEL z aperturą tlenkową, oraz laser VCSEL o stabilnej polaryzacji, wykorzystujący polaryzator metaliczny) oraz [A3] (laser VCSEL, aperturą uzyskaną za pomocą kryształu fotonicznego).

W przypadku obu struktur zaprezentowanych w pracy [A1] uzyskano bardzo dobrą zbieżność pomiędzy dokładnym modelem wektorowym oraz modelem pół-wektorowym, co potwierdza dokładność metody. Należy przy tym zauważyć, że o ile klasyczny laser VCSEL z aperturą tlenkową może być z powodzeniem modelowany za pomocą metody efektywnego współczynnika załamania, lub efektywnej częstotliwości [2], to nie jest to możliwe w przypadku lasera wykorzystującego polaryzator. Dowodzi to przewagi opracowanej metody nad wcześniejszymi rozwiązaniami. Podobnie laser oparty na kryształach fotonicznych może być

modelowany wyłącznie albo metodami w pełni wektorowymi, albo za pomocą opracowanego przeze mnie podejścia pół-wektorowego. W tym ostatnim przypadku jednak, metoda pół-wektorowa ma pewne ograniczenia, które opisane są sekcji 2.3.1 niniejszego autoreferatu.

W każdym z analizowanych przypadków, istotną przewagą metody pół-wektorowej nad w pełni wektorową jest czas obliczeń — różnica pomiędzy nimi jest kilkusetkrotna. Typowy czas obliczeń metody pół-wektorowej to kilka sekund, w porównaniu z czasem kilkudziesięciu minut w przypadku metod wektorowych. Jest to główny powód, dla którego podjąłem się opracowania zaprezentowanego podejścia. Umożliwiło ono prowadzenia analizy niektórych struktur w sposób znacznie bardziej efektywny i wydajny.

### 2.2.2. Metoda transferu macierzy odbicia

Bardzo istotną klasę badanych przeze mnie struktur fotonicznych stanowią podfalowe siatki dyfrakcyjne, które — przy spełnieniu pewnych warunków konstrukcyjnych — działają jak silnie odbijające zwierciadła. Ich szczegółowa analiza wymagała odrębnego podejścia numerycznego, różniącego się od stosowanych przeze mnie wcześniej. Z tego powodu konieczne było opracowanie nowej metody numerycznej, która pozwoliła na efektywną analizę parametrów zwierciadeł wykonanych z takich siatek w laserach typu VCSEL. Została ona nazwana metodą transferu odbicia w rozwinięciu fal płaskich (PWRT — Plane-Wave Reflection Transfer) i po raz pierwszy zaprezentowana była w pracy [A4]. Podobnie jak wszystkie wcześniej stosowane przeze mnie autorskie metody, opiera się ona na rozwinięciu pola elektromagnetycznego w strukturze wielowarstwowej, w bazie Fouriera (bazie fal płaskich). W każdej z warstw badanej struktury, równania Maxwella (1) oraz (2) są przekształcane do postaci zdiagonalizowanej, co pozwala na znalezienie modów własnych propagujących się w danej warstwie. Oryginalnym podejściem zastosowanym w PWRT jest rozdzielenie propagujących się w poszczególnych warstwach fal ( $\tilde{\mathbf{E}}$ ) na części propagujące się w przód ( $\tilde{\mathbf{F}}$ ) i wstecz ( $\tilde{\mathbf{B}}$ ):

$$\tilde{\mathbf{E}}(z) = \exp(-i\Gamma z)\tilde{\mathbf{F}} + \exp(i\Gamma z)\tilde{\mathbf{B}},$$

gdzie  $\Gamma$  jest diagonalną macierzą stałych propagacji dla danej warstwy. Następnie, w sposób iteracyjny wyznaczana jest dla każdej warstwy macierz odbicia  $\mathbf{R}$ , taka że:

$$\tilde{\mathbf{F}} = \mathbf{R}\tilde{\mathbf{B}}.$$

Szczegółowa postać też macierzy i metoda jej wyznaczenia opisana jest w pracy [A4]. Znajomość macierzy odbicia pozwala na obliczenie odbijalności dowolnego podfalowego zwierciadła przy zadanej fali padającej. W odróżnieniu od wcześniej istniejących metod, takich jak np. RCWA [3][4] w przypadku badania siatek dyfrakcyjnych możliwe jest określenie odbijalności dla każdego rzędu dyfrakcyjnego osobno, niezależnie od tego czy odpowiada on fali propagującej się, czy też wykładniczo zanikającej. Dzięki temu opracowana metoda okazała się wydajnym narzędziem do analizy zwierciadeł dla laserów typu VCSEL opartych na podfalowych siatkach dyfrakcyjnych. Szczegółowe wyniki takiej analizy przedstawione są w dalszej części autoreferatu.

### 2.2.3. Algorytmy genetyczne dla optymalizacji zwierciadeł Bragga

Ważnym elementem procesu projektowania struktur fotonicznych jest ich optymalizacja. W celu zaprojektowania wydajnego urządzenia należy tak dobrać jego parametry konstrukcyjne aby obliczone parametry wyjściowe były jak najbliższe wartościom oczekiwanym. Aby to uzyskać, w wielu sytuacjach wystarczające jest zastosowanie powszechnie znanych metod optymalizacji numerycznej. Jednakże, w przypadku bardziej skomplikowanych struktur, metody te okazują się zbyt ograniczone. Przykładem takiej struktury jest niejednorodne zwierciadło Bragga o silnej ujemnej dyspersji. Jego optymalizacja wymaga niezależnego zmieniania każdej z kilkudziesięciu par warstw ćwierćfalowych, w celu zapewnienia stałej wysokiej ujemnej dyspersji na możliwie szerokim zakresie długości fali. Zatem aby efektywnie przeprowadzić optymalizację takiej struktury konieczne jest zastosowanie nowatorskiego podejścia.

W pracy [A7] zaprezentowałem zastosowanie algorytmu genetycznego do optymalizacji niejednorodnych zwierciadeł Bragga. Pomimo, że algorytmy genetyczne stosowane są od pewnego czasu [5], ich dostosowanie do analizy właściwości optycznych zwierciadeł Bragga wymagało dodatkowych prac badawczych. Dotyczyły one przede wszystkim opracowania nowatorskiej metody zapisu ich parametrów konstrukcyjnych, która — z jednej strony — dokładnie opisywałaby strukturę, a z drugiej strony pozwalała na jej wy-

dajną optymalizację. Metoda ta opiera się na reprezentacji każdej pary warstw o niskim i wysokim współczynniku załamania nie jako ich grubości, ale jako efektywnej wartości wektora falowego całej pary oraz stosunku grubości warstw wchodzących w jej skład. Taki zapis pozwolił na modyfikację lustra w kolejnych iteracjach algorytmu genetycznego bez utraty informacji o podstawowych właściwościach optycznych danej pary, dając jednocześnie możliwość ich niezależnego strojenia. Umożliwiło to zwiększenie różnorodności badanych struktur (co jest niezbędne dla efektywnego znalezienia globalnego optimum za pomocą algorytmu genetycznego), bez wprowadzania chaosu pogarszającego jakość już częściowo zoptymalizowanych struktur.

Dodatkowe prace badawcze dotyczyły opracowania efektywnej metody oceny danej struktury. Łatwe do opisania jakościowo cechy — stała wysoka ujemna dyspersja na możliwie szerokim zakresie długości fali — musiały być sprowadzone do numerycznej wartości funkcji jakości. Zarówno postać tej funkcji jak i przyjęte w niej wartości współczynników mają ogromny wpływ na ostateczny wynik optymalizacji. W pracy [A7] została zaprezentowana procedura optymalizacji zwierciadła, przeprowadzona za pomocą funkcji oceny dającej najbardziej zadowalające rezultaty. Jej wyniki są przedstawione w dalszej części autoreferatu.

### 2.3. Zbadane podfalowe struktury fotoniczne

W oparciu o przedstawione powyżej metody numeryczne, przeprowadzona została szczegółowa analiza zjawisk fizycznych zachodzących w wybranych podfalowych strukturach fotonicznych. Poniżej zostały zwięźle przedstawione najważniejsze wnioski płynące z tej analizy, które zostały opublikowane w pracach wchodzących w skład monotematycznego cyklu ([A2] – [A8]). Przebadanymi strukturami były nowatorskie projekty laserów typu VCSEL oraz ich elementy, takie jak niejednorodne zwierciadło DBR (Distributed Bragg Reflector), czy też podfalowa siatka dyfrakcyjna o wysokim kontraście. Ich wspólną cechą był sposób oddziaływania z falą świetlną, który — na skutek podfalowych rozmiarów — w znaczący sposób różni się oddziaływania obserwowanego w popularnych układach.

#### 2.3.1. Laser typu VCSEL z kryształem fotonicznym

Pierwszą szczegółowo przebadaną strukturą było zwierciadło DBR z wytrawionym kryształem fotonicznym. Opisane zostało ono w drugiej pracy cyklu [A2]. Motywacją do podjęcia nad nim prac była chęć zaprojektowania lasera typu VCSEL opartego na kryształach fotonicznych, w którym istotną rolę będzie odgrywało zjawisko fotonicznej przerwy wzbronionej.

Zademonstrowane przez szereg grup badawczych projekty laserów typu PhC-VCSEL (Photonic-Crystal VCSEL) [6][7][8][9][10][J7][J8][B1] posiadają podobną konstrukcję — w standardowej strukturze lasera, składającego się z wnęki rezonansowej i dwóch zwierciadeł DBR, trawiona jest regularna siatka otworów tworząca dwuwymiarowy kryształ fotonicznych. Z uwagi na ograniczenia technologiczne, trawienie to najczęściej dotyczy wyłącznie górnego zwierciadła DBR. Struktury takie mają szereg zalet, do których zalicza się przede wszystkim, trudna do osiągnięcia innymi metodami, możliwość uzyskania emisji o dużym natężeniu na pojedynczym modzie poprzecznym. Jednakże, w tego typu laserach znaczenie kryształu fotonicznego jest zredukowane do nieliniowej modyfikacji efektywnego współczynnika załamania. Potwierdza to fakt, że struktury te mogą być (z pewną ograniczoną dokładnością) modelowane za pomocą skalarnych dwuwymiarowych metod numerycznych, które nie są w stanie prawidłowo opisać zjawiska powstawania fotonicznej przerwy wzbronionej. Ponadto, okres periodycznej struktury kryształu fotonicznego w tych urządzeniach jest zbyt duży aby możliwe było powstanie fotonicznej przerwy wzbronionej dla częstotliwości zbliżonych do częstotliwości emisji tych laserów (zazwyczaj odpowiadających długości fali od 800 nm do 1500 nm).

W związku z tym, w ramach swoich badań skoncentrowałem się na poszukiwaniu takich parametrów kryształu fotonicznego, które umożliwiłyby zaobserwowanie fotonicznej przerwy wzbronionej dla tych częstotliwości. Podstawowym założeniem było przyjęcie ograniczeń na postać kryształu fotonicznego, umożliwiających proste wykonanie go w zwierciadłach DBR. Składał się on zatem z naprzemiennych warstw Si i SiO<sub>2</sub> lub GaAs i AlO<sub>x</sub>, każda o grubości optycznej równej ¼ długości fali. Prostopadle do tych warstw wytrawione były jednorodne otwory powietrzne rozłożone na dwuwymiarowej sieci trójkątnej. Projekt taki w znacznej mierze przypominał postaci kryształów fotonicznych stosowanych w laserach VCSEL to modyfikacji efektywnego współczynnika załamania wybranych obszarów. Jednakże, o ile w typowym laserze typu PhC-VCSEL odległości pomiędzy otworami są rzędu 1 μm – 2 μm, w badanej przeze mnie strukturze ich

środki były odległe o  $0,5\ \mu\text{m}$  przy długości fali  $1,55\ \mu\text{m}$ . Dopiero dla tej — niestosowanej wcześniej wartości — dało się zaobserwować foniczną przerwę wzbronioną obejmującą interesującą długość fali. Z uwagi na jednorodną postać wytrawionych pionowych kolumn powietrznych, owa przerwa foniczna nie była zupełna — występowała ona wyłącznie dla modów o polaryzacji pola elektrycznego równoległej do płaszczyzny warstw epitaksjalnych. Z praktycznego punktu widzenia było to wystarczające, z uwagi na fakt, że taką właśnie polaryzację ma światło emitowane przez studnie kwantowe w laserach VCSEL.

Foniczna przerwa wzbroniona uniemożliwia propagację światła w analizowanej strukturze. W kryształach fonicznych wykorzystywana ona jest do ograniczenia modu do wybranego obszaru, w którym struktura periodyczna jest zaburzona. W praktyce zaburzenie to ma postać wnęki rezonansowej o efektywnym współczynniku załamania większym, bądź mniejszym od efektywnego współczynnika załamania kryształu fonicznego. W pierwszym przypadku ograniczenie światła ma dwojaki charakter — z jednej strony mod ograniczany jest za pomocą przerwy wzbronionej, z drugiej poprzez efekt całkowitego wewnętrznego odbicia. W typowych laserach typu PhC-VCSEL, występuje i ma znaczenie wyłącznie drugi z tych efektów. Z kolei jeśli efektywny współczynnik załamania wnęki jest mniejszy niż efektywny współczynnik załamania kryształu fonicznego, światło może być ograniczone wyłącznie poprzez przerwę wzbronioną.

Aby zademonstrować, że w zaprezentowanej w pracy [A2] strukturze dominującą rolę ma właśnie foniczna przerwa wzbroniona, zbadana została wnęki rezonansowa wewnątrz opisanego wcześniej kryształu fonicznego. Możliwe było znalezienie modu rezonansowego w tej wnęcie niezależnie od tego z jakiego materiału była w wykonana. W szczególności wyznaczone zostały parametry modu w skrajnym przypadku wnęki powietrznej. Dobroć tego modu wynosiła 43 000, co trzykrotnie przekraczało wartość możliwą do uzyskania w laserach VCSEL, w których ograniczenie modowe uzyskiwane jest z wykorzystaniem zjawiska całkowitego wewnętrznego odbicia.

W ramach prowadzonych przeze mnie badań, duży nacisk położyłem także na analizę tradycyjnych laserów typu PhC-VCSEL. W odróżnieniu od struktury opisaną powyżej, rolą zastosowanego w nich kryształu fonicznego nie jest zapewnienie fonicznej przerwy wzbronionej, a jedynie modyfikacja efektywnego współczynnika załamania wytrawionych obszarów. Z uwagi na rozmiary otworów, porównywalne z długością fali w rezonatorze lasera, ów efektywny współczynnik załamania nie jest prostą średnią współczynników załamania trawionego materiału i powietrza. W związku z tym poprawne wyznaczenie modów w takim laserze jest znacznie trudniejsze niż w klasycznych — osiowo-symetrycznych — konstrukcjach laserów z aperturą tlenkową.

Szczegółowa analiza pokazująca jak opracowane przez różne zespoły badawcze metody obliczeniowe radzą sobie z takimi konstrukcjami została — z mojej inicjatywy — przeprowadzona w ramach programu COST MP 0702 i jej wyniki zostały opublikowane w artykule [A3]. Praca ta jest zbiorczym opracowaniem przedstawiającym główne założenia podstawowych metod numerycznych pozwalających na analizę właściwości optycznych laserów typu PhC-VCSEL. Jej głównym celem jest porównanie wyników obliczeń przeprowadzonych dla tej samej struktury różnymi metodami. Pozwoliło to na porównanie dokładności tych metod i określenie zakresów ich stosowalności.

W szczególności, w pracy [A3] porównane zostały następujące metody: model modów sprzężonych [11], metoda elementów skończonych [12][13], oraz dwie metody opracowane przeze mnie: metoda transferu admitancji w rozwinięciu fal płaskich [J2] i opisana wcześniej metoda pół-wektorowa [A1]. Analizowaną strukturą był laser typu PhC-VCSEL wykonany w technologii arsenku galu, w którym jedynym ograniczeniem poprzecznym światła był kryształ foniczny w postaci trójkątnej sieci otworów wytrawionych w (a) całej strukturze lasera, (b) wyłącznie wewnątrz wnęki rezonansowej, (c) w całości górnego zwierciadła DBR i (d) w części górnego zwierciadła DBR. W każdym przypadku sieć ta miała usunięty jeden otwór w swoim środku, co tworzyło wnękę rezonansową. Rozstaw otworów (stała sieci) oraz ich średnica były zmieniane, co pozwoliło na wyznaczenie wpływu parametrów kryształu fonicznego na właściwości modu w laserze — długość emitowanej fali i wartość wzmocnienia progowego.

Wszystkie przebadane metody wykazały zadowalającą zgodność dla głębokiego trawienia. Dla otworów wytrawionych wyłącznie w części górnego zwierciadła DBR metoda pół-wektorowa wykazywała silne odstępstwa od pozostałych wyników, z uwagi na fakt, że nie uwzględnia ona w wystarczającym stopniu strat optycznych wywołanych dyfrakcją światła na krawędziach otworów. W pozostałych przypadkach nie za-

uważono istotnych różnic pomiędzy metodami z pewnymi wyjątkami. Były to: przypadek dużych otworów badanych za pomocą modelu modów sprzężonych, małe otwory badane metodą elementów skończonych oraz przypadek otworów występujących wyłącznie we wnętrzu lasera analizowany metodą admitancyjną fal płaskich oraz metodą pół-wektorową.

W konsekwencji przeprowadzone badania pokazały, że numeryczna analiza tak złożonego przypadku jak laser typu PhC-VCSEL nie jest zadaniem trywialnym i żadna z metod nie daje dokładnych wyników w każdej konfiguracji. Możliwe jednak były oszacowanie zakresu parametrów, dla których stosowanie poszczególnych metod jest uzasadnione, co jest cenną wskazówką dla jednostek chcących badać tego typu struktury w przyszłości.

Aby możliwe było rzetelnie określenie jakości wyników modelowania komputerowego, muszą one być porównane nie tylko ze sobą, ale także z wynikami pomiarów. Porównanie takie zaprezentowane jest w pracy [A5]. Przedstawia ona wyniki porównania długości fali i strat modowych wyliczonych modów poprzecznych w laserach typu PhC-VCSEL ze zmierzonymi eksperymentalnie spektrami emisji tych laserów. Badaną w tej pracy strukturą był laser VCSEL emitujący światło o długości fali 980 nm wykonany w technologii arsenku galu. Do struktury był wstrzykiwany prąd, który był ograniczony przez aperturę tlenkową o średnicy 12  $\mu\text{m}$  umieszczoną w pierwszej warstwie zwierciadła DBR. Obszar czynny składał się z trzech studni kwantowych  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  o grubości 8 nm. Wnęka rezonansowa otoczona była 35 parami zwierciadeł DBR od dołu i 19 parami od góry. W górnych zwierciadłach DBR wytrawiony był dwuwymiarowy kryształ fotoniczny o strukturze heksagonalnej, z pojedynczym defektem na środku tworzącym optyczną wnękę rezonansową.

Numeryczna analiza tego lasera zawierała zarówno obliczenia termiczno-elektryczne przeprowadzone metodą elementów skończonych, jak i obliczenia optyczne wykonane metodą admitancyjną fal płaskich [J2]. Pozwoliły one na wyznaczenie progów emisji laserowej dla poszczególnych modów. Wartość wzmocnienia wymagana dla osiągnięcia tychże progów bardzo dobrze odzwierciedlała zmierzoną eksperymentalnie emitowaną moc (im wyższy próg, tym mniejsza emitowana moc), jednakże była to ścisła zależność wyłącznie dla prądów bliskich prądom progowym. Powyżej progu, w rzeczywistym laserze zaczynały dominować efekty przestrzennego wypalania dziury i konkurencji modowej, które nie zostały uwzględnione w modelu numerycznym. Pomimo tego ograniczenia, symulacje numeryczne — w szczególności analiza optyczna, za którą byłem odpowiedzialny — pozwoliła na wyciągnięcie kilku istotnych wniosków: Dla struktur o relatywnie niewielkich otworach ( $b/a = 40\%$ , gdzie  $b$  to średnica wytrawionych otworów, zaś  $a$  to odległość pomiędzy ich ośrodkami) i płytkiego ich trawienia, kryształ fotoniczny w niewielkim stopniu ogranicza pole optyczne modów, który wyciekają ze struktury przez wytrawione otwory. W takiej sytuacji głównym mechanizmem zapewniającym ograniczenie poprzeczne jest apertura tlenkowa, w związku z czym laser pracuje wielomodowo. Z kolei w przypadku większych i głębszych otworów, mody niskich rzędów są silnie ograniczone do obszaru defektu kryształu fotonicznego, co zmniejsza straty tych modów, oraz poprawia dyskryminację modów wyższych rzędów. W szczególności możliwe jest uzyskanie jednomodowej pracy lasera o wartości parametru SMSR (Side Mode Suppression Ratio) rzędu 10 dB. Jego największa wartość była osiągana dla parametrów kryształu fotonicznego (w szczególności głębokość trawienia), przy których mod podstawowy ograniczony był głównie przez kryształ fotoniczny, zaś mod pierwszego rzędu przez aperturę tlenkową.

Niezależnie od parametrów wytrawionego kryształu fotonicznego, otrzymano wysoką zgodność pomiędzy wynikami obliczeń i pomiarami — szczególnie wyraźną w strukturach o silnej dyskryminacji modów poprzecznych wyższego rzędu. Wyniki te potwierdzają poprawność, opisywanej w prezentowanym cyklu publikacji, metodologii obliczeń i pokazują, że wnioski sformułowane na podstawie analizy teoretycznej mają bezpośrednie potwierdzenie eksperymentalne.

### 2.3.2. Podfalone siatki dyfrakcyjne o wysokiej odbijalności

Około roku 2011 rozszerzyłem zakres swoich badań na podfalone jednowymiarowe siatki dyfrakcyjne o wysokim kontraście współczynnika załamania (HCG — High-Contrast Gratings). Było to związane z odkryciem [14][15][16][17], że siatki takie mogą być efektywnymi zwierciadłami w laserach o emisji powierzchniowej, skutecznie zastępując wielowarstwowe zwierciadła DBR. Pierwszym etapem moich prac nad tymi strukturami było opracowanie — przedstawionej powyżej — metody transferu macierzy odbicia, która stała się efektywnym narzędziem do analizy tychże siatek. Metoda ta została szczegółowo opisana w pracy [A4].



W tym samym artykule przedstawiłem też analizę wpływu niedokładności wykonania podfalowej siatki dyfrakcyjnej na jej odbijalność. W tym celu przeanalizowałem zależność odbijalności siatki zoptymalizowanej dla polaryzacji TM (t.j. takiej, w której wektor natężenia pola elektrycznego fali padającej prostopadłe na siatkę dyfrakcyjną, jest prostopadły do jej szczelin) od wielkości losowo wprowadzonego błędu wymiarów geometrycznych siatki. Szczegółowe obliczenia przeprowadzone były dla czterech okresów siatki dyfrakcyjnej, w których szerokość szczelin i prętów krzemowych była losowo zmieniana z założonym odchyleniem standardowym (zmienianym od 0 nm do 50 nm). W ten sposób symulowane było zaburzenie periodyczności siatki. Obliczenia te pozwoliły określić zależność odbijalności siatki od precyzji procesu fotolitograficznego. W ich wyniku stwierdziłem, że przy niedokładności rzędu 10 nm średnia odbijalność spada o 0,5% (przy czym siatka jest zaprojektowana w ten sposób, że w przypadku braku niedokładności jej odbijalność wynosi dokładnie 100%). Utrzymuje się ona powyżej 99,0% przy odchyleniu standardowym 15 nm oraz powyżej 99,9% przy 6 nm. Współczesne technologie fotolitografii pozwalają na wykonanie siatki z taką dokładnością, jednakże, projektując urządzenie fotoniczne wykorzystujące podfalową siatkę dyfrakcyjną jako zwierciadło, należy się liczyć z zaprezentowanym przeze mnie spadkiem odbijalności.

Nie tylko lateralne niedokładności procesu fotolitografii mają wpływ na odbijalność siatki, lecz także nieprawidłowa głębokość jej trawienia. W przeprowadzonej analizie numerycznej zbadałem więc zależność odbijalności od tego typu błędów. Wyniki wskazały jednoznacznie, że zbyt krótki proces litografii — skutkujący niekompletnymi szczelinami pomiędzy prętami siatki — powoduje bardzo szybki spadek jej odbijalności. Z kolei zbyt długie trawienie (naruszające warstwę podłoża) nie ma wpływu na jakość zwierciadła. W związku z tym zalecane jest ściśle przestrzeganie minimalnego czasu trawienia, a wręcz przedłużanie go aby zagwarantować wykonanie kompletnych szczelin.

Poza analizą samych zwierciadeł, w pracy [A4] zbadałem także właściwości optyczne lasera typu VCSEL, w którym górne zwierciadło DBR zostało zastąpione podfalową siatką dyfrakcyjną wykonaną z krzemu i umieszczoną na warstwie dystansującej SiO<sub>2</sub>. Owa warstwa dystansująca pełni bardzo istotną rolę – zarówno długość emitowanej fali jak i dobroć rezonatora bardzo silnie od niej zależą. Jej optymalną grubością jest  $\frac{3}{4}$  długości fali.

Podobnie jak poprzednio zbadałem wpływ niedokładności wykonania siatki dyfrakcyjnej na parametry pracy lasera. W szczególności najbardziej interesującą mnie wielkością była dobroć rezonatora, gdyż bezpośrednio wpływa ona na prąd progowy oraz emitowaną moc. Przy idealnie wykonanej siatce, dobroć przebadanej struktury wynosiła 1600 (co jest wartością spotykaną w klasycznych laserach typu VCSEL). Wprowadzenie przypadkowego zaburzenia o odchyleniu standardowym 5 nm spowodowało spadek jej wartości do 1200, zaś niedokładność rzędu 10 nm skutkowałą dobrocią 800. Jak zatem widać niedokładności wykonania siatki dyfrakcyjnej istotnie wpływają na pogorszenie parametrów lasera, co musi być wzięte pod uwagę przy projektowaniu urządzeń: na przykład poprzez poprawę jakości wzorcowego projektu, tak by—nawet przy dwukrotnym spadku dobroci—praca lasera była wciąż możliwa.

Oddzielną kategorią zbadanych przeze mnie siatek dyfrakcyjnych o wysokiej odbijalności były monolityczne podfalowe siatki dyfrakcyjne (MHCG — Monolithic High-Contrast Gratings). W odróżnieniu od siatek opisanych powyżej, nie posiadają one warstwy o niskim współczynniku załamania poniżej prętów siatki. Dzięki temu ich struktura może być wytrawiona bezpośrednio w materiale w wysokim współczynniku załamania (na przykład arsenku galu), stanowiącym wnękę rezonansową lasera o emisji powierzchniowej. Jest to bardzo nowatorskie rozwiązanie, zaprezentowane po raz pierwszy przez nasz zespół badawczy [A6], [B21]. Umożliwia ono wykonanie lasera typu VCSEL o wyjątkowo małej grubości [B20] oraz z wykorzystaniem tylko jednego rodzaju materiału. Dzięki temu możliwe jest uniknięcie problemu niedopasowania sieciowego materiałów o różnych składach atomowych stosowanych w wielowarstwowych zwierciadłach Bragga. W konsekwencji daje to możliwość wykonania lasera w dowolnym systemie materiałowym, a co za tym idzie emitującego światło o dowolnej długości fali.

W odróżnieniu od standardowych wysoko-odbiciowych siatek podfalowych, materiał przylegający do MHCG od strony fali padającej ma efektywny współczynnik załamania wyższy od efektywnego współczynnika załamania warstwy siatki. W efekcie nie zachodzi efekt całkowitego wewnętrznego odbicia wyższych niż zerowy rzędów dyfrakcyjnych. W ogólności może to skutkować rozpraszaniem dyfrakcyjnym fali odbitej od MHCG, które uniemożliwiłoby wykorzystanie jej w laserze o emisji powierzchniowej. Jednakże w publikacji [A6] pokazałem, że — w opisanych w niej strukturach — rozpraszanie to nie ma miejsca. Istotnym

wynikiem zaprezentowanym w tejże pracy było wyznaczenie spektrum współczynników odbicia siatki dyfrakcyjnej dla każdego rzędu dyfrakcyjnego osobno. W przebadanych siatkach, przy długości fali 980 nm (dla której badane siatki były zoptymalizowane), współczynnik ten dążył do 100% dla zerowego rzędu dyfrakcyjnego, zaś współczynniki dla pozostałych rzędów — wyłącznie dla tej długości fali — zmierzały do zera. To zaskakujące zjawisko zostało wyjaśnione przeze mnie szczególnymi właściwościami rezonansu odpowiedzialnego za blisko stuprocentową odbijalność siatki. W związku z tym, charakter fali odbitej był taki sam dla siatki dyfrakcyjnej umieszczonej na materiale o wysokim współczynniku załamania (np. arsenku galu) jak i zawieszanej w powietrzu. W tym drugim przypadku w siatkach podfalowych nie istnieją odbite rzędy dyfrakcyjne inne niż zerowy, w związku z czym cała energia odbijana jest w rząd zerowy. Skoro profil fali odbitej nie zmienia się ze wzrostem współczynnika załamania warstwy poniżej siatki, to nawet mimo teoretycznej możliwości pojawienia się rzędu pierwszego i wyższych, energia fali odbitej pozostaje w całości w rzędzie zerowym.

Streszczone powyżej rozważania teoretyczne rozwinąłem w publikacji [A8]. Praca ta zawiera szczegółową analizę zjawiska braku rozpraszania światła w MHCG. Pokazałem w niej, że w standardowych strukturach HCG położenia rezonansów odpowiedzialnych za ich wysoką odbijalność zmieniają się w funkcji długości fali wraz ze zmianą współczynnika załamania warstwy bezpośrednio pod siatką dyfrakcyjną. W przypadku wzrostu tego współczynnika powyżej wartości pozwalającej na propagację pierwszego rzędu dyfrakcyjnego fali odbitej, maksymalna odbijalność siatki drastycznie spada. Przy starannym doborze jej parametrów geometrycznych możliwe jest ponowne osiągnięcie współczynnika odbicia rzędu 100%, ale odbicie to następuje w wiele rzędów dyfrakcyjnych, powodując silne wysokie rozpraszanie fali odbitej. Z kolei w strukturach MHCG, rezonans odpowiedzialny za wysoką odbijalność siatki zachodzi dla stałej długości fali — niezależnej od współczynnika załamania warstwy pod siatką — i rozpraszanie nie występuje.

W artykule pokazałem, że fakt iż energetyczny współczynnik odbicia dla zerowego rzędu dyfrakcyjnego jest niezależny od współczynnika załamania warstwy pod siatką wynika ze szczególnych właściwości macierzy impedancji, która opisuje zależność pomiędzy polem elektrycznym a magnetycznym w strukturze. Macierz ta ma silnie dominujący oraz w całości urojony element diagonalny. W efekcie, pole elektromagnetyczne na powierzchni siatki dyfrakcyjnej jest silnie zbliżone do fali płaskiej i wyższe rzędy dyfrakcyjne fali odbitej nie są wzbudzone.

Praca [A8] może zatem być traktowana jako podsumowanie cyklu publikacji składającego się osiągnięcie naukowe. Prezentuję w niej matematyczne wyjaśnienie nowego zjawiska zachodzącego w nowoczesnej strukturze podfalowej oraz wyjaśniam jego przyczynę.

### 2.3.3. Zwierciadło DBR z silną ujemną dyspersją

Ostatnim rodzajem badanych struktur były niejednorodne zwierciadła Bragga z silną ujemną dyspersją do zastosowania w laserach femtosekundowych. Prace nad tymi strukturami prowadziłem we współpracy z naukowcami z Instytutu Technologii Elektronowej PAN oraz Uniwersytetu Warszawskiego. Miały one na celu opracowanie półprzewodnikowego zwierciadła Bragga, które pozwalałoby na osiągnięcie silnej ujemnej dyspersji fali odbitej, zachowującej w miarę stałą wartość na możliwie szerokim zakresie długości fali. Zwierciadło takie ma zastosowanie w laserze femtosekundowym typu Yb:KYW, emitującym światło o długości fali 1035 nm. Wyniki prowadzonych badań zostały opublikowane w artykułach [B16]–[B18] oraz [A7]. W szczególności ostatnia z tych prac zawiera znaczący element mojego osobistego wkładu, gdyż dotyczy optymalizacji właściwości optycznych badanego zwierciadła za pomocą algorytmu genetycznego — z tego powodu zaliczam ją do zbioru publikacji stanowiących habilitacyjne osiągnięcie naukowe. Opis najważniejszych zagadnień związanych z samą metodą optymalizacji struktur przedstawiłem w części 2.2.3 niniejszego autoreferatu. Poniżej znajduje się podsumowanie wyników dotyczących bezpośrednio otrzymanych zoptymalizowanych struktur.

W efekcie optymalizacji przeprowadzonej za pomocą algorytmu genetycznego, otrzymano dwie struktury luster. Pierwsza z nich (I) zapewniała w miarę stałą wartość dyspersji grupowej dla fali odbitej (GDD — Group Delay Dispersion) na poziomie  $-3000 \text{ fs}^2$  dla długości fali z zakresu 1030 nm – 1047 nm. Druga struktura (II) pozwoliła na osiągnięcie na tym samym zakresie GDD rzędu  $-3500 \text{ fs}^2$ , jednakże jej wartość podlegała większym wahanom. Oba projekty potencjalnie pozwalały na zapewnienie femtosekundowej pracy impulsowej lasera Yb:KYW. W związku z tym faktem zostały one wykonane metodą epitaksji z wiązki molekularnej (MBE — Molecular Beam Epitaxy), a ich właściwości optyczne zmierzone. W przypadku struktury

I parametry wykonanej próbki w znacznym stopniu odbiegały od ustaleń teoretycznych, jednakże próbka II bardzo dobrze odpowiadała projektowi — zaobserwowano jedynie nieznaczne przesunięcie widm odbijalności i GDD ku krótszym długościom fali, z uwagi na systematyczny błąd grubości warstw w procesie MBE. Pomimo tego przesunięcia, próbka II pozwoliła na uzyskanie pracy impulsowej lasera Yb:KYW, zapewniając długość impulsu rzędu 600 fs.

Celem badań zaprezentowanych w pracy [A7] było opracowanie wariantu algorytmu genetycznego pozwalającego na efektywną optymalizację zwierciadeł Bragga o silnej ujemnej dyspersji oraz zweryfikowanie jego jakości poprzez eksperymentalne zbadanie lustra zaprojektowanego przy użyciu tego algorytmu. Wyniki uzyskane dla struktury II przedstawionej w tejże pracy potwierdzają skuteczność przeprowadzonej optymalizacji. Warto zaznaczyć, że zoptymalizowana struktura jest mocno niejednorodna — grubości warstw nie podlegają zmianom w sposób płynny i w związku z tym nie były możliwe do przewidzenia przy użyciu istniejących szacunków analitycznych.

## 2.4. Podsumowanie

Powyżej zostały omówione publikacje wchodzące w skład habilitacyjnego osiągnięcia naukowego „Numeryczna analiza właściwości optycznych podfalowych struktur fotonicznych”. Prace te zostały po części wykonane we współpracy z innymi polskimi i zagranicznymi badaczami (5 artykułów), po części indywidualnie przeze mnie (3 artykuły). Dotyczą one szeregu aspektów związanych z modelowaniem numerycznym podfalowych struktur fotonicznych: dwie prace [A1], [A4] poświęcone są w głównej części opracowaniu niezbędnemu warsztatowi narzędziowego w postaci nowych i udoskonalonych metod numerycznych. Trzy artykuły zostały wykonane w szerokiej współpracy krajowej i międzynarodowej i zawierają rygorystyczną weryfikację tych metod — bądź to przez porównanie z innymi algorytmami numerycznymi [A3], bądź z eksperymentem [A5], [A7]. Ponadto praca [A7] prezentuje nowatorskie zastosowanie nowoczesnej metody optymalizacji do opracowania wydajnej struktury zwierciadła DBR o silnej ujemnej dyspersji.

Pozostałe prace poświęcone są analizie fizycznych właściwości nowoczesnych podfalowych struktur fotonicznych. W pracy [A2] zaproponowana została struktura kryształu fotonicznego w zwierciadle lasera typu VCSEL, która w znacznie pełniejszym stopniu wykorzystuje zjawisko fotonicznej przerwy wzbronionej niż robią to badane przez szereg zespołów naukowych lasery typu PhC-VCSEL. Z kolei prace [A4], [A6], [A8] poświęcone są podfalowym siatkom dyfrakcyjnym, stanowiącym interesującą alternatywę dla wielowarstwowych zwierciadeł Bragga w laserach typu VCSEL. Praca [A4] omawia wpływ niedokładności wykonania tych siatek na ich parametry optyczne, zaś prace [A6] i [A8] prezentują nowoczesną strukturę monolitycznych podfalowych siatek dyfrakcyjnych o wysokim kontraście. Wyjaśnienie zjawiska braku rozpraszania dyfrakcyjnego w tych siatkach — zaprezentowane w publikacji [A8] — uważam osobiście za najbardziej znaczący element prezentowanego osiągnięcia naukowego i mój największy wkład w rozwój dyscypliny naukowej.

## 2.5. Literatura

- [1] G. R. Hadley, “Effective index model for vertical-cavity surface-emitting lasers”, *Opt. Lett.* **20**, 1483–1485 (1995).
- [2] H. Wenzel and H. J. Wünsche, “The effective frequency method in the analysis of vertical-cavity surface-emitting lasers”, *IEEE J. Quantum Electron.* **33**, 1156–1162 (1997).
- [3] M. G. Moharam and T. K. Gaylord, “Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction”, *J. Opt. Soc. Am.* **71**, 811–818 (1981).
- [4] M. G. Moharam, D. A. Pommet, and G. E. B., “Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: Enhanced transmittance matrix approach”, *J. Opt. Soc. Am. A* **12**, 1077–1086 (1995).
- [5] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Company (1989).
- [6] D. S. Song, S. H. Kim, H. G. Park, C. K. Kim, and Y. H. Lee, “Single-fundamental-mode photonic-crystal vertical-cavity surface-emitting lasers”, *Appl. Phys. Lett.* **80**, 3901–3903 (2002).
- [7] A. J. Danner, J. J. Raftery Jr., N. Yokouchi, and K. D. Choquette, “Transverse modes of photonic crystal vertical-cavity lasers”, *Appl. Phys. Lett.* **84**, 1031–1033 (2004).
- [8] T. S. Kim, A. J. Danner, D. M. Grasso, E. W. Young, and K. D. Choquette, “Single fundamental mode photonic crystal vertical cavity surface emitting laser with 9 GHz bandwidth”, *Electron. Lett.* **40**, 1340–1341 (2004).
- [9] A. J. Danner, T. S. Kim, and K. D. Choquette, “Single fundamental mode photonic crystal vertical cavity laser with improved output power”, *Electron. Lett.* **41**, 325–326 (2005).

- [10] A. J. Danner, J. J. Raftery Jr., L. P. O., and K. D. Choquette, "Single mode photonic crystal vertical cavity lasers", *Appl. Phys. Lett.* **88**, 091114 (2006).
- [11] G. P. Bava, P. Debernardi, and L. Fratta, "Three-dimensional model for vectorial fields in vertical-cavity surface-emitting lasers", *Phys Rev. A* **63**, 23816 (2001).
- [12] P. Nyakas, "Full-vectorial three-dimensional finite element optical simulation of vertical-cavity surface-emitting lasers", *IEEE J. Lightwave Techn.* **25**, 2427–2434 (2007).
- [13] P. Nyakas, G. Varga, Z. Puskás, N. Hashizume, T. Kárpáti, T. Veszprémi, and G. Zsombok, "Self-consistent real three-dimensional simulation of vertical-cavity surface-emitting lasers", *J. Opt. Soc. Am. B* **23**, 1761–1769 (2006).
- [14] C. F. R. Mateus, M. C. Y. Huang, Y. Deng, A. R. Neureuther, and C. J. Chang-Hasnain, "Ultrabroadband mirror using low-index cladded subwavelength grating", *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16**, 518–520 (2004).
- [15] Y. Zhou, M. C. Y. Huang, C. Chase, V. Karagodsky, M. Moewe, B. Pesala, F. G. Sedgwick, and C. J. Chang-Hasnain, "High-index-contrast grating (hcg) and its applications in optoelectronic devices", *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **15**, 1485–1499 (2009).
- [16] M. C. Y. Huang, Y. Zhou, and C. J. Chang-Hasnain, "Single mode high-contrast subwavelength grating vertical cavity surface emitting lasers", *Appl. Phys. Lett.* **92**, 171108 (2008).
- [17] M. C. Y. Huang, Y. Zhou, and C. J. Chang-Hasnain, "A nanoelectromechanical tunable laser", *Nature Photonics* **2**, 180–184 (2008).

### Omówienie mojego indywidualnego wkładu w prace wchodzące w skład osiągnięcia naukowego

- [A1] *M. Dems*, „Semi-vectorial method based on effective index for VCSEL analysis”, *J. Opt. Soc. Am. B* **26**, 792–796 (2009).  
Praca opracowana w całości przeze mnie. Mój wkład wynosi 100%.
- [A2] *K. Panajotov and M. Dems*, „Photonic crystal vertical-cavity surface-emitting lasers with true photonic band gap”, *Opt. Lett.* **35**, 829–831 (2010).  
Mój wkład w pracę szacuję na 80%. Polegał on na przeprowadzeniu analizy numerycznej nowatorskiej struktury oryginalnie zaproponowanej przez prof. Krassimira Panajotova. Samodzielnie przeprowadziłem całość obliczeń struktury oraz jej optymalizację pozwalającą na uzyskanie rekordowo wysokiej dobroci. Wspólnie z prof. Panajotovem zredagowałem treść publikacji.
- [A3] *M. Dems, I.-S. Chung, P. Nyakas, S. Bischoff, and K. Panajotov*, „Numerical methods for modeling photonic-crystal VCSELs”, *Opt. Express* **18**, 16042–16054 (2010).  
Mój wkład w tę pracę był wiodący (szacuję go na 60%). Polegał on na zaprojektowaniu założeń analizy porównawczej przedstawionego lasera, koordynowaniu całości prac, redagowaniu tekstu oraz sformułowaniu ostatecznych wniosków. Ponadto samodzielnie prowadziłem obliczenia analizowanych struktur metodami PWAT i PWEI, które były dwiema spośród czterech porównywanych metod.
- [A4] *M. Dems*, „Modelling of high-contrast grating mirrors. The impact of imperfections on their performance in VCSELs”, *Opto-Electr. Rev.* **19**, 340–345 (2011).  
Praca opracowana w całości przeze mnie. Mój wkład wynosi 100%.
- [A5] *T. Czyszanowski, M. Dems, R. P. Sarzala, K. Panajotov, and K. D. Choquette*, „Photonic crystal vscels: Detailed comparison of experimental and theoretical spectral characteristics”, *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* **19**, 1–8 (2013).  
Mój wkład w tę pracę szacuję na 30%. Polegał on na opracowaniu modelu numerycznego i przeprowadzeniu za jego pomocą analizy modów poprzecznych badanego lasera, które stanowiły podstawę do porównania z wynikami pomiarów.
- [A6] *M. Gębski, M. Dems, A. Szerling, M. Motyka, L. Marona, R. Kruszka, D. Urbańczyk, M. Walczakowski, N. Pałka, A. Wójcik-Jedlińska, Q. J. Wang, D. H. Zhang, M. Bugajski, M. Wasiak, and T. Czyszanowski*, „Monolithic high-index contrast grating: a material independent high-reflectance VCSEL mirror”, *Optics Express* **23**, 11674 (2015).  
Mój wkład w tę pracę szacuję na 15%. Polegał on na opracowaniu metody obliczania odbijalności podfalogowych siatek dyfrakcyjnych osobno dla każdego rzędu dyfrakcyjnego, oraz przeprowadzeniu analizy tejże odbijalności dla każdego rzędu z osobna. W pracy wykazałem, że w zaprezentowanych siatkach dyfrakcyjnych nie zachodzi rozpraszanie fali odbitej oraz wskazałem, które właściwości siatki są od-

powiedzialne za to zjawisko. Ponadto uczestniczyłem aktywnie w redagowaniu całości artykułu oraz tworzeniu wstępu i zakończenia.

- [A7] *M. Dems, P. Wnuk, P. Wasylczyk, Ł. Zinkiewicz, A. Wójcik-Jedlińska, K. Regiński, K. Hejduk, A. Jasik, „Optimization of Broadband Semiconductor Chirped Mirrors with Genetic Algorithm”, Appl. Phys. B. 122, 266 (2016).*

Mój wkład w tę pracę był wiodący (szacuję go na 70%). Polegał on na opracowaniu metody numerycznej analizy niejednorodnych luster dyspersyjnych. Ponadto samodzielnie zaimplementowałem algorytm genetyczny do optymalizacji właściwości tychże luster — dotyczy to zarówno określenia kryteriów wyboru najlepszych struktur w danej generacji jak i opracowania metody numerycznego opisu ich parametrów fizycznych, który pozwolił na wydajne zastosowanie algorytmu genetycznego. Ponadto zredagowałem większą część tekstu publikacji. Wkład pozostałych autorów dotyczył głównie części eksperymentalnej — wykonania i zmierzenia parametrów zaproponowanych przeze mnie struktur, będących wynikiem optymalizacji.

- [A8] *M. Dems, „Monolithic High-Contrast Gratings: why they do not scatter the light?”, IEEE J. Lightwave Technol. 35, 159–165 (2017).*

Praca opracowana w całości przeze mnie. Mój wkład wynosi 100%.

### 3. Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze

Kompletne zestawienie wszystkich osiągnięć zamieszczone jest w wykazie, który stanowi odrębny załącznik do wniosku. Poniżej zamieszczam szczegółowe omówienie tych osiągnięć, które uważam za najważniejsze z punktu widzenia mojego rozwoju naukowego.

#### 3.1. Nagrody, stypendia i wyróżnienia otrzymane po uzyskaniu stopnia doktora

- **2015** — Nagroda za najlepszy pomysł na firmę typu Spin-Off,
- **2013** — Stypendium Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla Wybitnych Młodych Naukowców,
- **2012** — Medal Komisji Edukacji Narodowej,
- **2011** — Stypendium dla Młodych Naukowców na Wydziale Fizyki Technicznej, Informatyki i Matematyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej,
- **2010** — Stypendium dla Młodego Doktora Politechniki Łódzkiej w ramach projektu „Innowacyjna dydaktyka bez ograniczeń. . . ” współfinansowane przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,
- **2008** — Stypendium dla Młodego Doktora Politechniki Łódzkiej w ramach projektu „Innowacyjna dydaktyka bez ograniczeń. . . ” współfinansowane przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego,
- **2008** — Stypendium START Fundacji na rzecz Nauki Polskiej.

#### 3.2. Udział w najważniejszych projektach badawczych

- **od 2016** — kierownik projektu NCN Opus (2015/19/B/ST7/00562) *Modelowanie nowych struktur laserów VCSEL wykonanych z zastosowaniem selektywnej oksydacji powierzchniowej wewnątrz wnęki rezonansowej, pod kątem uzyskania jednomodowej emisji dużej mocy*, kwota finansowania 499 200 PLN,
- **2015** — kierownik projektu FNP Impuls (37/UD/SKILLS/2015) *Oprogramowanie do modelowania wzajemnych interakcji pomiędzy modelami fizycznymi w laserach półprzewodnikowych*, kwota finansowania 90 000 PLN,
- **2013–2016** — główny wykonawca w projekcie NCN (2012/06/M/ST7/00442) *Lasery o emisji powierzchniowej ze sprzężonymi wnękami rezonansowymi*, kwota finansowania 663 436 PLN,
- **2012–2015** — główny wykonawca w projekcie międzynarodowym NCBiR i A\*STAR (1/3/POL-SIN/2012) *Nowoczesne lasery o emisji powierzchniowej z kryształem fonicznym i siatką o wysokim kontraście*, kwota finansowania 948 353 PLN,

- **2011–2014** — kierownik projektu NCBiR (LIDER/17/5/L-2/10/NCBiR/2011) *Model jednomodowego lasera VCSEL opartego na kryształach fotonicznych o dużej mocy i stabilnej polaryzacji promieniowania*, kwota finansowania 971 062 PLN,
- **2011–2013** — główny wykonawca w projekcie NCBiR (NR02-0009-10/2011) *Opracowanie i wykonanie lasera impulsowego Yb:KYW z półprzewodnikowym lustrem SDCM*, kwota finansowania 1 980 000 PLN,
- **2009–2013** — kierownik zadania w projekcie *InTechFun — Innowacyjne technologie wielofunkcyjnych materiałów i struktur dla nanoelektroniki, fotoniki, spintroniki i technik sensorowych* w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka (UDA-POIG.01.03.01-00-159/08-00), kwota finansowania 2 320 880 PLN,
- **2009–2012** — kierownik zadania *P 2.1 Photonic crystal and microcavity structures for lasing, sensing and telecom applications* w programie międzynarodowym *COST Action MP0702 „Towards functional sub-wavelength photonic structures”*,
- **2009–2012** — wykonawca w projekcie międzynarodowym Swiss National Science Foundation (IZ73ZO 128019/1) *Sprzężone matryce laserów VCSEL w zastosowaniach do wykrywania gazów i monitoringu środowiska*, kwota finansowania 75 000 CHF,
- **2009–2011** — główny wykonawca w projekcie MNiSW (N N515 004 32/0297) *Analiza możliwości zastosowania kryształów fotonicznych w strukturach laserów złączowych z poprzecznym rezonatorem optycznym (laserów typu VCSEL) w celu uzyskania znaczącej poprawy ich własności użytkowych*, kwota finansowania 249 668 PLN.

### 3.3. Omówienie kierowanych przeze mnie projektów badawczych

Powyżej przedstawione są najważniejsze projekty badawcze, w których brałem udział. W trzech z nich pełniłem/pełnię rolę kierownika. Poniżej znajduje się omówienie podstawowych założeń kierowanych przeze mnie projektów oraz — w przypadku projektów zakończonych — najważniejsze osiągnięte wyniki.

#### ***Modelowanie nowych struktur laserów VCSEL wykonanych z zastosowaniem selektywnej oksydacji powierzchniowej wewnątrz wnęki rezonansowej, pod kątem uzyskania jednomodowej emisji dużej mocy***

Realizacja projektu rozpoczęła się w 2016 roku. Jego celem jest zbadanie wpływu tlenkowych form anty-rezonansowych umieszczonych wewnątrz struktur laserów o emisji powierzchniowej z pionową wnęką rezonansową (VCSEL) na ich własności fizyczne. Standardowo do zapewnienia pracy lasera na jednym modzie poprzecznym stosuje się anty-rezonansowe warstwy falowodowe (ARROW) umieszczanych na powierzchni lasera. Jednakże, ich efektywność jest ograniczona z uwagi na niewielkie natężenie światła na powierzchni zwierciadła. Zatem, umieszczenie warstw anty-rezonansowych w głębi struktury lasera powinno zapewnić o wiele wyraźniejszą eliminację modów wyższych rzędów.

W ramach realizacji projektu badany jest — za pomocą symulacji komputerowych — wpływ struktur ARROW umieszczonych wewnątrz wnęki rezonansowej na właściwości optyczne, elektryczne i cieplne laserów. Badania te pozwolą na zrozumienie fizyki tych nowych struktur oraz na ich optymalizację, co w przyszłości umożliwi opracowanie projektów jednomodowych laserów dużej mocy nowej generacji. Prowadzone prace mają charakter teoretyczny i są przeprowadzone z użyciem zaawansowanego samouzgodnionego modelu komputerowego opracowanego pod moim kierownictwem w Zespole Fotoniki Instytutu Fizyki Politechniki Łódzkiej. Model ten składa się z kilku zasadniczych modułów do obliczeń rozptyłu ciepła, struktury pasmowej obszaru czynnego, wzmocnienia materiałowego, rozptyłu prądu, transportu nośników oraz zjawisk optycznych. Wzajemna kompatybilność modułów sprawia, że można je dowolnie łączyć, tworząc w ten sposób pakiety obliczeniowe do symulacji przyrządów półprzewodnikowych różnego typu. Zastosowanie analizy numerycznej do badania laserów półprzewodnikowych ma tę zaletę, że umożliwia rozpatrzenie przebiegu poszczególnych zjawisk w laserze w odseparowaniu od innych efektów utrudniających właściwą interpretację wyników badań. Uwzględnianie wybranych zależności w obrębie poszczególnych modułów, jak i powiązań pomiędzy nimi, sprawia, że na drodze obliczeń komputerowych można precyzyjnie wskazać zjawiska fizyczne odpowiedzialne za obserwowane efekty.

Opracowane w ramach projektu wyniki analizy teoretycznej będą zweryfikowane doświadczalnie, w ramach współpracy międzynarodowej, przez grupę badawczą z Laboratory for Analysis and Architecture of Systems (LAAS-CNRS), która posiada nowatorską technologię pozwalającą na wykonanie selektywnej oksy-

dacji w głębi struktur laserowych o dowolnym kształcie, w tym także zagłębionych struktur ARROW. Planowanym rezultatem projektu będzie dokładne zrozumienie fizyki zjawisk zachodzących w takich strukturach, które pozwoli na skuteczne projektowanie nowych generacji urządzeń. Będzie to stanowić doskonały punkt wyjścia do dalszych prac aplikacyjnych, mających na celu stworzenie jednomodowego lasera dużej mocy o doskonałej jakości, który znajdzie zastosowanie np. w dziedzinie telekomunikacji optycznej.

Do chwili obecnej został przeprowadzony wstępny etap prac: opracowano wyjściową strukturę lasera typu VCSEL oraz przetestowano wydajność i poprawność obliczeń numerycznych jego właściwości optycznych. Prace te zostały wykonane pod moim bezpośrednim nadzorem przez doktorantkę zatrudnioną do realizacji projektu. Aktualnie realizowany jest drugi etap prac, polegający na analizie różnych wariantów umieszczenia struktury anty-rezonansowej za pomocą selektywnej oksydacji we wnętrzu lasera.

### ***Model jednomodowego lasera VCSEL opartego na kryształach fotonicznych o dużej mocy i stabilnej polaryzacji promieniowania***

Celem projektu było opracowanie kompleksowego modelu numerycznego jednomodowego lasera o emisji powierzchniowej, zapewniającego stabilną polaryzację emitowanego promieniowania, wykorzystującego w swej konstrukcji kryształy fotoniczne. Model ten miał pozwolić na wydajną komputerową analizę właściwości przyrządu i, co za tym idzie, zmniejszenie kosztów jego zaprojektowania i wytworzenia. Z uwagi na mnogość zjawisk fizycznych wpływające na pracę lasera oraz ich wzajemną interakcję, ścisła symulacja jego zachowania wymagała nowatorskiego oprogramowania, którego stworzenie było głównym celem projektu. Cel ten udało się w całości zrealizować i jego bezpośrednim efektem jest zaawansowane oprogramowanie symulacyjne, opisane w dalszej części autoreferatu. Drugorzędnym celem było zaprojektowanie struktury lasera typu PhC-VCSEL, która mogłaby zapewnić dużą moc emitowanego promieniowania, pracując na pojedynczym modzie poprzecznym. Projekt takiego lasera miał być demonstracją możliwości opracowanego oprogramowania, pokazującą, że nadaje się ono do skutecznego modelowania nowatorskich i skomplikowanych struktur. Zaproponowana struktura została zaprezentowana na jednym z najważniejszych światowych kongresów w dziedzinie fotoniki i opublikowana w pracy [D14].

W trakcie realizacji projektu kierowałem interdyscyplinarnym zespołem, w skład którego wchodziło, poza mną, sześć osób. Byli to zarówno fizycy jak i informatycy. Dzięki synergii wynikającej z tejże interdyscyplinarności końcowy efekt projektu — opisane poniżej oprogramowanie — cechuje się wysoką jakością i może z powodzeniem konkurować z istniejącymi rozwiązaniami komercyjnymi, a w zakresie modelowania podfałowych struktur fotonicznych znacząco je przewyższa.

Kierowany przeze mnie projekt zakończył się sześcioma publikacjami z listy JCR oraz sześcioma referatami konferencyjnymi.

### ***Oprogramowanie do modelowania wzajemnych interakcji pomiędzy modelami fizycznymi w laserach półprzewodnikowych***

Celem tego projektu był rozwój oprogramowania, którego prototyp został opracowany w poprzednim projekcie. Polegał on na stworzeniu nowoczesnego interfejsu graficznego oprogramowania oraz na rozszerzeniu platformy symulacyjnej o elektryczny model dryftowo-dyfuzyjny, pozwalający na dokładne wyznaczenie rozptyłu prądu w badanej strukturze.

W ramach projektu dokonano także audytu i optymalizacji wykorzystywanych modeli numerycznych. Zostały one przeprowadzone poprzez szczegółową analizę kodu wykonującego obliczenia. W konsekwencji część modeli została uzupełniona o elementy pozwalające na prowadzenie krytycznych obliczeń w sposób równoległy na kilku rdzeniach procesora. Pozwoliło to na przynajmniej kilkunastoprocentowe przyspieszenie obliczeń. Jednocześnie jeden z modułów obliczeniowych — służący do wyznaczania wzmocnienia w studniach kwantowych — został całkowicie przepisany. Dzięki starannemu przemyśleniu struktury nowego kodu uzyskano dziesięciokrotne, a w niektórych przypadkach dwudziestokrotne przyspieszenie obliczeń.

## **3.4. Opracowane oprogramowanie symulacyjne**

Tak jak napisałem powyżej, głównym efektem projektów badawczo-rozwojowych „Model jednomodowego lasera VCSEL opartego na kryształach fotonicznych o dużej mocy i stabilnej polaryzacji promieniowania” oraz „Oprogramowanie do modelowania wzajemnych interakcji pomiędzy modelami fizycznymi

w laserach półprzewodnikowych” było oprogramowanie pozwalające na wydajne modelowanie szerokiego spektrum urządzeń fotonicznych. Zostało ono opracowane z wykorzystaniem bogatego doświadczenia naukowego członków kierowanego przeze mnie zespołu i już od momentu powstania pierwszego prototypu (w 2012 r.) udowodniło swoją przydatność w pracy naukowej. Nosi ono nazwę PLaSK (Photonic Laser Simulation Kit).

Od samego początku prac nad oprogramowaniem dbałem o jego wysoką jakość, pilnując by ostateczny produkt spełniał rygorystyczne wymagania:

- wydajność numeryczna i oszczędność pamięci operacyjnej,
- możliwość prowadzenia obliczeń dla szerokiej gamy urządzeń różnymi metodami,
- elastyczność architektury, pozwalająca na wydajne rozwijanie oprogramowania w przyszłości,
- przyjazny ale i elastyczny interfejs użytkownika, umożliwiający prowadzenie skomplikowanych obliczeń,
- wieloplatformowość, pozwalająca na uruchomienie programu zarówno na laptopie jak i klastrze obliczeniowym.

Mając na uwadze te założenia konieczne było staranne zaprojektowanie architektury oprogramowania. W ramach kierowanego przeze mnie zespołu ustaliliśmy, że będzie się na nią składać:

- wspólne jądro oprogramowania,
- baza materiałowa,
- moduły obliczeniowe (niezależne zarówno dla każdego zjawiska fizycznego jak i metody obliczeń),
- tekstowy interfejs użytkownika,
- graficzny interfejs użytkownika.

Jądro oprogramowania to kod zapewniający mechanizmy wymiany danych pomiędzy poszczególnymi modułami obliczeniowymi, wczytywanie geometrii analizowanej struktury oraz dostarczania danych z bazy materiałowej. Poszczególne metody obliczeniowe zaimplementowane są w modułach obliczeniowych, uruchamianych w sposób dynamiczny w zależności od potrzeb. Z kolei tekstowy i graficzny interfejs użytkownika pozwala na wygodne projektowanie badanej struktury i prowadzenie krótkotrwałych obliczeń na komputerach biurowych lub laptopach, a także na uruchomienie zautomatyzowanych obliczeń, które mogą być prowadzone przez długi okres czasu na wydajnych klastrach obliczeniowych bez ingerencji użytkownika.

Realizacja wyżej opisanych zamierzeń wymagała zastosowania nowoczesnych technologii — kod jądra i modułów obliczeniowych, gdzie niezbędna jest duża wydajność, tworzony jest w języku C++11, zaś interfejs użytkownika w dynamicznym języku Python, zapewniającym dużą elastyczność i łatwość modyfikacji przez użytkownika końcowego. Opisu geometrii struktury ma postać grafu skierowanego, analogicznego do używanego w systemach grafiki komputerowej. Podejście takie pozwoliło na reprezentację praktycznie każdej możliwej struktury fotonicznej, a jednocześnie umożliwiło jej wydajną analizę na potrzeby modułów obliczeniowych.

Opracowany został także nowatorski system wymiany danych pomiędzy modułami obliczeniowymi, wykorzystujący architekturę dostawców i odbiorców danych. Podejście takie pozwoliło na tworzenie modułów obliczeniowych przez wiele osób jednocześnie oraz swobodną wymianę tychże modułów (na przykład na liczącą inną metodą) w już działającym oprogramowaniu. Jediną kwestią wymagającą odgórnego ustalenia był rodzaj wymienianych danych (np. rozkład temperatury w badanej strukturze), zaś poszczególne moduły obliczeniowe mogły te dane otrzymać z dowolnego źródła. Działający program umożliwia prowadzenie obliczeń w zakresie stosowalności tychże modułów. Przebieg takich obliczeń z punktu widzenia potencjalnego użytkownika programu jest następujący:

1. Definicja analizowanej struktury;
2. określenie właściwości zastosowanych materiałów — wykorzystanie dostarczonej bazy lub wprowadzenie własnych zależności;
3. określenie rodzaju obliczeń — wybór właściwych modułów obliczeniowych (model cieplny, model elektryczny, optyczny itp.);
4. określenie parametrów obliczeń dla każdego modelu i wzajemnych relacji pomiędzy nimi;
5. zdefiniowanie poszczególnych kroków obliczeń i prezentacji wyników;
6. uruchomienie obliczeń, śledzenie ich procesu, analiza wyników.



Z uwagi na wysoką jakość opracowanego pod moim kierownictwem oprogramowania, prowadzone są intensywne prace nad jego komercjalizacją. Do chwili obecnej zainteresowanie zakupem licencji wyraziły takie ośrodki badawcze jak Technische Universität Berlin (Niemcy), Hewlett-Packard Labs (USA), firma Alight Technologies (Dania), korporacja Finisar (USA).

### 3.5. Prace opublikowane po uzyskaniu stopnia doktora

#### 3.5.1. Publikacje w czasopismach z listy JCR

- [B1] T. Czyszanowski, R. Sarzala, M. Dems, H. Thienpont, and K. Panajotov, „Threshold characteristics of bottom-emitting long wavelength VCSELs with photonic-crystal within the top mirror”, *Opt. Quantum Electron.* **40**, 149–154 (2008).
- [B2] T. Czyszanowski, M. Dems, H. Thienpont, and K. Panajotov, „Modal gain and confinement factors in top- and bottom-emitting photonic-crystal VCSEL”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41**, 085102 (2008).
- [B3] M. Dems, T. Czyszanowski, H. Thienpont, and K. Panajotov, „Highly birefringent and dichroic photonic crystal VCSEL design”, *Opt. Commun.* **281**, 3149–3152 (2008).
- [B4] T. Czyszanowski, R. P. Sarzala, M. Dems, W. Nakwaski, H. Thienpont, and K. Panajotov, „Optimal photonic-crystal parameters assuring single-mode operation of 1300 nm AlInGaAs vertical-cavity surface-emitting laser”, *J. Appl. Phys.* **105**, 093102 (2009).
- [B5] T. Czyszanowski, R. P. Sarzala, M. Dems, H. Thienpont, W. Nakwaski, and K. Panajotov, „Strong modes discrimination and low threshold in cw regime of 1300 nm AlInGaAs/InP VCSEL induced by photonic crystal”, *Physica Status Solidi A: Applications and Materials Science* **206**, 1396–1403 (2009).
- [B6] T. Czyszanowski, M. Dems, R. P. Sarzala, W. Nakwaski, and K. Panajotov, „Precise lateral mode control in photonic crystal vertical-cavity surface-emitting lasers”, *IEEE J. Quantum Electron.* **47**, 1291–1296 (2011).
- [B7] T. Czyszanowski, R. P. Sarzala, M. Dems, J. Walczak, M. Wasiak, W. Nakwaski, V. Iakovlev, N. Volet, and E. Kapon, „Spatial-mode discrimination in guided and antiguided arrays of long-wavelength VCSELs”, *IEEE J. Sel. Topics in Quantum Electron.* **19**, 1702010 (2013).
- [B8] L. Frasunkiewicz, T. Czyszanowski, M. Wasiak, M. Dems, R. P. Sarzala, W. Nakwaski, and K. Panajotov, „Optimization of single-mode photonic-crystal results in limited improvement of emitted power and unexpected broad range of tuning”, *IEEE J. Lightwave Technol.* **31**, 1360–1366 (2013).
- [B9] M. Gebski, M. Dems, J. Chen, Q. J. Wang, D. H. Zhang, and T. Czyszanowski, „The influence of imperfections and absorption on the performance of a GaAs/AlOx high-contrast grating for monolithic integration with 980 nm GaAs-based VCSELs”, *IEEE J. Lightwave Technol.* **31**, 3853–3858 (2013).
- [B10] A. Jasik, P. Wasylczyk, M. Dems, P. Wnuk, A. Wojcik-Jedlinska, K. Reginski, L. Zinkiewicz, and K. Hejduk, „A passively mode-locked, self-starting femtosecond Yb:KYW laser with a single highly dispersive semiconductor double-chirped mirror for dispersion compensation”, *Laser Physics Lett.* **10**, 085302 (2013).
- [B11] K. Panajotov, Y. Xie, M. Dems, C. Belmonte, H. Thienpont, J. Beeckman, and K. Neyts, „Vertical-cavity surface-emitting laser emitting circularly polarized light”, *Laser Physics Lett.* **10**, 105003 (2013).
- [B12] T. Czyszanowski, N. Volet, J. Walczak, M. Dems, R. P. Sarzala, V. Iakovlev, A. Sirbu, A. Mereuta, A. Caliman, and E. Kapon, „Numerical analysis of mode discrimination by intracavity patterning in long-wavelength wafer-fused Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers”, *IEEE J. Quantum Electron.* **50**, 732–740 (2014).
- [B13] M. Gebski, M. Dems, J. Chen, Q. Wang, D. H. Zhang, and T. Czyszanowski, „Optical Properties of GaAs/AlOx and Si/SiOx High Contrast Gratings Designed for 980-nm VCSELs”, *IEEE T. Nanotechnol.* **13**, 418–424 (2014).
- [B14] M. Gebski, O. Kuzior, M. Dems, M. Wasiak, Y. Y. Xie, Z. J. Xu, Q. J. Wang, D. H. Zhang, and T. Czyszanowski, „Transverse mode control in high-contrast grating VCSELs”, *Opt. Express* **22**, 20954–20963 (2014).

- [B15] V. Iakovlev, J. Walczak, M. Gebski, A. K. Sokol, M. Wasiak, P. Gallo, A. Sirbu, R. P. Sarzala, M. Dems, T. Czyszanowski, and E. Kapon, „Double-diamond high-contrast-gratings vertical external cavity surface emitting laser”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **47**, 065104 (2014).
- [B16] A. Jasik, M. Dems, P. Wnuk, P. Wasylczyk, A. Wojcik-Jedlinska, K. Reginski, L. Zinkiewicz, and K. Hejduk, „Design and fabrication of highly dispersive semiconductor double-chirped mirrors”, *Appl. Phys. B: Lasers and Optics* **116**, 141–146 (2014).
- [B17] A. Jasik, P. Wasylczyk, P. Wnuk, M. Dems, A. Wojcik-Jedlinska, K. Reginski, L. Zinkiewicz, and K. Hejduk, „Tunable semiconductor double-chirped mirror with high negative dispersion”, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **26**, 14–17 (2014).
- [B18] P. Wnuk, P. Wasylczyk, L. Zinkiewicz, M. Dems, K. Hejduk, K. Reginski, A. Wojcik-Jedlinska, and A. Jasik, „Continuously tunable Yb:KYW femtosecond oscillator based on a tunable highly dispersive semiconductor mirror”, *Opt. Express* **22**, 18284–18289 (2014).
- [B19] K. Panajotov, M. Dems, C. Belmonte, H. Thienpont, Y. Xie, J. Beeckman, and K. Neyts, „Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser with cholesteric liquid crystal overlay”, *IEEE J. Lightwave Technol.* **32**, 20–26 (2014).
- [B20] M. Gebski, M. Dems, M. Wasiak, J. A. Lott, and T. Czyszanowski, „Monolithic subwavelength high-index-contrast grating VCSEL”, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **27**, 1953–1956 (2015).
- [B21] M. Marciniak, M. Gebski, M. Dems, E. Haglund, A. Larsson, M. Riazat, J. A. Lott, and T. Czyszanowski, „Optimal parameters of monolithic high-contrast grating mirrors”, *Opt. Lett.* **41**, 3495–3498 (2016).
- [B22] T. Czyszanowski, M. Gebski, M. Dems, M. Wasiak, R. Sarzala, K. Panajotov, „Subwavelength grating as both emission mirror and electrical contact for VCSELs in any material system”, *Scientific Reports* **7**, 40348 (2017).

### 3.5.2. Rozdziały w książkach

- [C1] M. Dems, T. Czyszanowski, R. Kotyński, K. Panajotov, „Plane-Wave Admittance Method and its Applications to Modeling Photonic Crystal Structures” in *Photonic Crystals: Physics and Technology*, pod redakcją C. Sibilia, T. M. Benson, M. Marciniak, T. Szoplik, Springer (2008), ISBN 978-88-470-0843-4, strony 253–278.
- [C2] K. Panajotov, M. Dems, and T. Czyszanowski, „Photonic-Crystal VCSELs” in *Compact Semiconductor Lasers*, pod redakcją R. De La Rue, S. Yu, J.-M. Lourtioz, Wiley (2014), ISBN 978-3-527-41093-4, strony 149–193.

### 3.5.3. Artykuły opublikowane w tomach pokonferencyjnych SPIE

- [D1] T. Czyszanowski, R. P. Sarzala, M. Dems, M. Wasiak, W. Nakwaski, and K. Panajotov, „Pulse-regime single-mode operation of antiwaveguide Photonic-Crystal 1300 nm VCSEL”, *Proc. SPIE* **7720**, 77200A (2010).
- [D2] M. Dems and K. Panajotov, „True photonic band-gap in vertical-cavity surface-emitting lasers”, *Proc. SPIE* **8432**, 84321G (2012).
- [D3] J. Walczak, T. Czyszanowski, M. Dems, R. P. Sarzala, A. Sokol, M. Wasiak, and V. Iakovlev, „Simulation of 1550 nm diamond VECSEL with high contrast grating”, *Proc. SPIE* **8432**, 84321H (2012).
- [D4] T. Czyszanowski, M. Dems, M. Wasiak, and R. P. Sarzala, „Three dimensional simulation of 1300 nm AlGaInAs VCSEL arrays”, *Proc. SPIE* **8432**, 84320A (2012).
- [D5] K. Panajotov, M. Dems, C. Belmonte, H. Thienpont, Y. Xie, J. Beeckman, and K. Neyts, „VCSELs with nematic and cholesteric liquid crystal overlays”, *Proc. SPIE* **8639**, 86390A (2013).
- [D6] T. Czyszanowski, M. Dems, R. P. Sarzala, and K. Panajotov, „Numerical analysis of photonic-crystal VCSELs”, *Proc. SPIE* **8639**, 86390Q (2013).
- [D7] M. Gebski, M. Dems, J. Chen, W. Qijie, Z. D. Hua, and T. Czyszanowski, „GaAs/AlOx high contrast gratings for 980 nm VCSELs”, *Proc. SPIE* **8995**, 89950C (2014).

- [D8] T. Czyszanowski, M. Dems, R. P. Sarzala, V. Iakovlev, N. Volet, and E. Kapon, „Spatial mode discrimination in anti-guided arrays of long-wavelength VCSELs”, *Proc. SPIE* **9001**, 90010H (2014).
- [D9] H. Li, P. Moser, P. Wolf, G. Larisch, L. Frasukiewicz, M. Dems, T. Czyszanowski, J. A. Lott, and D. Bimberg, „Energy efficiency, bit rate, and modal properties of 980 nm VCSELs for very-short-reach optical interconnects”, *Proc. SPIE*, **9001**, 90010B (2014).
- [D10] T. Czyszanowski, M. Dems, R. P. Sarzala, K. Panajotov, and E. Kapon, „Comparison of spatial anti-guided mechanism in single emitter VCSELs and VCSEL arrays”, *Proc. SPIE* **9134**, 91340X (2014).
- [D11] L. Frasukiewicz, M. Dems, R. P. Sarzala, K. D. Choquette, K. Panajotov, and T. Czyszanowski, „Coupled-cavity VCSELs: numerical analysis of physical phenomena”, *Proc. SPIE* **9134**, 91342C (2014).
- [D12] M. Gebiski, M. Dems, J. Chen, W. Qijie, Z. D. Hua, and T. Czyszanowski, „Photonic heterostructure High Contrast Grating as a novel polarization control and light confinement system in HCG VCSEL”, *Proc. SPIE* **9134**, 91341H (2014).
- [D13] M. Gebiski, O. Kuzior, M. Wasiak, A. Szerling, A. Wojcik-Jedlinska, N. Palka, M. Dems, Y. Y. Xie, Z. J. Xu, Q. J. Wang, D. H. Zhang, and T. Czyszanowski, „High-Contrast Grating reflectors for 980 nm Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers”, *Proc. SPIE* **9372**, 937206 (2015).
- [D14] M. Dems, P. Beling, M. Gebiski, L. Piskorski, J. Walczak, M. Kuc, L. Frasukiewicz, M. Wasiak, R. Sarzala, and T. Czyszanowski, „VCSEL modeling with self-consistent models: From simple approximations to comprehensive numerical analysis”, *Proc. SPIE* **9381**, 93810K (2015).
- [D15] K. Panajotov, Y. Xie, J. Beeckman, K. Neyts, M. Dems, C. Belmonte, and H. Thienpont, „Hybrid VCSEL-liquid crystal systems”, *Proc. SPIE* **9381**, 93810P (2015).
- [D16] M. Gebiski, M. Dems, M. Wasiak, R. P. Sarzala, J. A. Lott, and T. Czyszanowski, „Double High Refractive-Index Contrast Grating VCSEL”, *Proc. SPIE* **9381**, 93810Q (2015).
- [D17] M. Gebiski, M. Dems, J. A. Lott, and T. Czyszanowski, „Monolithic Subwavelength High Refractive-Index-Contrast Grating VCSELs”, *Proc. SPIE* **9766**, 97660M (2016).
- [D18] M. Marciniak, M. Gebiski, M. Dems, M. Wasiak, T. Czyszanowski, „Multi-parameter optimization of monolithic high-index contrast grating reflectors PDF”, *Proc. SPIE*. **9757**, 97570D (2016).
- [D19] M. Marciniak, M. Gebiski, M. Dems; T. Czyszanowski, „Optimal parameters of monolithic high-index contrast grating VCSELs PDF”, *Proc. SPIE*. **9892**, 98921V (2016).

#### 3.5.4. Pozostałe opublikowane publikacje pokonferencyjne

- [E1] M. Dems and K. Panajotov, „Applications of photonic crystals for polarisation stabilisation in VCSELs”, in *ICTON 2008: Proceedings of the 10th Anniversary International Conference on Transparent Optical Networks* **2**, 56–59, Athens, Greece (2008).
- [E2] M. Dems, „Modelling of Photonic-Crystal VCSELs with Semi-Vectorial and Vectorial Models”, in *ICTON 2009: 11th International Conference on Transparent Optical Networks*, **1-2** 1280–1283, San Miguel, Portugal (2009).
- [E3] M. Dems, I.-S. Chung, P. Nyakas, S. Bischoff, and K. Panajotov, „Modelling of photonic-crystal VCSELs with semi-vectorial and vectorial models”, in *ICTON 2011: 13th International Conference on Transparent Optical Networks*, Stockholm, Sweden (2011).
- [E4] M. Dems, „Propagacja fali elektromagnetycznej w falowodzie wykonanym w planarnym kryształie fonicznym do zastosowań w diodzie o emisji krawędziowej”, *Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania* **52**, 40–42 (2011).
- [E5] M. Gebiski, M. Dems, J. Chen, W. Qijie, Z. D. Hua, and T. Czyszanowski, „Optical properties of Si/SiO<sub>2</sub> and GaAs/AlO<sub>x</sub> sub-wavelength HCG mirrors on GaAs substrate and an impact of structural imperfections on their performance”, in *Proceedings of the 2013 IEEE 5th International Nanoelectronics Conference (INEC)*, 146–149 (2013).

- [E6] T. Czyszanowski, M. Dems, M. Wasiak, R. P. Sarzala, E. Lamothe, N. Volet, V. Iakovlev, and E. Kapon, „How to control single mode emission of VCSEL arrays?”, in *2013 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & International Quantum Electronics Conference* (2013).
- [E7] L. Frasniewicz, T. Czyszanowski, M. Wasiak, M. Dems, R. P. Sarzala, W. Nakwaski, and K. Panajotov, „Why Photonic-Crystal VCSELs do not provide high power emission in the single-mode regime?”, in *2013 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & International Quantum Electronics Conference* (2013).
- [E8] M. Dems, P. Beling, M. Gebski, L. Piskorski, M. Kuc, M. Wasiak, and R. P. Sarzala, „Automated self-consistent approach to modeling of photonic devices”, in *ICTON 2013: 15th International Conference on Transparent Optical Networks* (2013).
- [E9] K. Gołaszewska, R. Kruszka, M. Myśliwiec, M. Ekielski, W. Jung, T. Piotrowski, M. Juchniewicz, J. Bar, M. Wzorek, E. Kamińska, A. Piotrowska, R. P. Sarzala, M. Dems, J. Wojtas, R. Mędrzycki, P. Prystawko, „Diody elektroluminescencyjne na bazie GaN z powierzchniowymi kryształami fonicznymi”, *Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania* **54**, 46–49 (2013).
- [E10] J. Walczak, M. Wasiak, M. Dems, R. P. Sarzala, A. Sirbu, E. Kapon, and T. Czyszanowski, „Electrically-pumped VCSEL with coaxial ring tunnel junction”, in *IEEE International Semiconductor Laser Conference (ISLC 2014)*, 171–172 (2014).

### 3.5.5. Pozostałe publikacje

- [F1] R. Sarzala, T. Czyszanowski, M. Wasiak, M. Dems, Ł. Piskorski, W. Nakwaski, K. Panajotov, „Numerical Self-Consistent Analysis of VCSELs”, *Advances in Optical Technologies* **2016**, 689519 (2012).

### 3.5.6. Wynalazki, które uzyskały ochronę patentową

- [G1] V. Iakovlev, P. Gallo, E. Kapon, T. Czyszanowski, M. Dems, M. Wasiak, J. Walczak, „Vertical Cavity Surface Emitting Laser Cavity with Low Thermal Impedance”, patent USA nr **US 9,337,615 B2** (2016).
- [G2] P. Wasylczyk, A. Jasik, M. Dems, P. Wnuk, Ł. Zinkiewicz, „Wielowarstwowe lustro dyspersyjne oraz laser impulsowy z wielowarstwowym lustrem dyspersyjnym”, patent polski nr **PL 221642 B1** (2016).
- [G3] A. Jasik, P. Wasylczyk, M. Dems, P. Wnuk, A. Wójcik-Jedlińska, Ł. Zinkiewicz, „Sposób wykonania półprzewodnikowego lustra dyspersyjnego”, patent polski nr **PL 222202 B1** (2016).

## 3.6. Prace opublikowane przed uzyskaniem stopnia doktora

### 3.6.1. Publikacje w czasopismach z listy JCR

- [J1] M. Dems and W. Nakwaski, „Thermal and molecular stresses in multi-layered structures of nitride devices”, *Semicond. Sci. Technol.* **18**, 733–737 (2003).
- [J2] M. Dems, R. Kotynski, and K. Panajotov, “Plane-wave admittance method — a novel approach for determining the electromagnetic modes in photonic structures”, *Opt. Express* **13**, 3196–3207 (2005).
- [J3] M. Dems and W. Nakwaski, „The modelling of high-contrast photonic crystal slabs, using the novel extension of the effective index method”, *Optica Applicata* **36**, 51–56 (2006).
- [J4] P. Bienstman, S. Selleri, L. Rosa, H. P. Uranus, W. C. L. Hopman, R. Costa, A. Melloni, L. C. Andreani, J. P. Hugonin, P. Lalanne, D. Pinto, S. S. A. Obayya, M. Dems, and K. Panajotov, „Modelling leaky photonic wires: A mode solver comparison”, *Opt. Quantum. Electron.* **38**, 731–759 (2006).
- [J5] T. Czyszanowski, M. Dems, and K. Panajotov, „Impact of the hole depth on the modal behaviour of long wavelength photonic crystal VCSELs”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **40**, 2732–2735 (2007).
- [J6] T. Czyszanowski, M. Dems, and K. Panajotov, „Optimal parameters of photonic-crystal vertical-cavity surface-emitting diode lasers”, *IEEE J. Lightwave Technol.* **25**, 2331–2336 (2007).
- [J7] T. Czyszanowski, M. Dems, H. Thienpont, and K. Panajotov, „Optimal radii of photonic crystal holes within DBR mirrors in long wavelength VCSEL”, *Opt. Express* **15**, 1301–1306 (2007).

- [J8] T. Czyszanowski, M. Dems, and K. Panajotov, „Single mode condition and modes discrimination in photonic-crystal 1.3  $\mu\text{m}$  AlInGaAs/InP VCSEL”, *Opt. Express* **15**, 5604–5609 (2007).
- [J9] T. Czyszanowski, M. Dems, H. Thienpont, and K. Panajotov, „Modal behavior of photonic-crystal vertical-cavity surface-emitting diode laser analyzed with Plane Wave Admittance Method”, *Opt. Quantum. Electron.* **39**, 427–433 (2007).
- [J10] T. Czyszanowski, R. P. Sarzala, L. Piskorski, M. Dems, M. Wasiak, W. Nakwaski, and K. Panajotov, „Comparison of usability of oxide apertures and photonic crystals used to create radial optical confinements in 650-nm GaInP VCSELS”, *IEEE J. Quantum. Electron.* **43**, 1041–1047 (2007).
- [J11] M. Dems, T. Czyszanowski, and K. Panajotov, „Numerical analysis of high Q-factor photonic-crystal VCSELS with plane-wave admittance method”, *Opt. Quantum. Electron.* **39**, 419–426 (2007).
- [J12] R. Kotynski, M. Dems, and K. Panajotov, „Waveguiding losses of micro-structured fibres – plane wave method revisited”, *Opt. Quantum. Electron.* **39**, 469–479 (2007).
- [J13] M. Dems and K. Panajotov, „Modeling of single- and multimode photonic-crystal planar waveguides with the plane-wave admittance method”, *Appl. Phys. B: Lasers and Optics* **89**, 19–23 (2007).

### 3.6.2. Artykuły opublikowane w tomach pokonferencyjnych SPIE

- [K1] M. Dems, T. Czyszanowski, and K. Panajotov, „Plane-wave and cylindrical-wave admittance method for simulation of classical and photonic-crystal-based VCSELS”, *Proc. SPIE* **6182**, 618219 (2006).
- [K2] T. Czyszanowski, M. Dems, H. Thienpont, and K. Panajotov, „Full vectorial electromagnetic modeling of vertical-cavity surface-emitting diode lasers by the plane wave admittance method”, *Proc. SPIE* **6185**, 61850Y (2006).

### 3.6.3. Pozostałe opublikowane publikacje pokonferencyjne

- [L1] M. Dems and W. Nakwaski, „The self-consistent method for determination of a band structure in photonic crystals with frequency-dependent dielectric constants”, in *ICTON 2003: Proceedings of the 5th International Conference on Transparent Optical Networks* **1**, 276–279 (2003).
- [L2] T. Czyszanowski, M. Dems, and W. Nakwaski, „Usability comparison of scalar and vectorial optical approaches to simulation of a 1.3  $\mu\text{m}$  InGaAsNVCSEL operation”, in *ICTON 2004: Proceedings of the 6th International Conference on Transparent Optical Networks* **1**, 375–378 (2004).
- [L3] M. Dems, K. Panajotov, T. Czyszanowski, R. Kotynski, and W. Nakwaski, „Simulation of photonic crystal diode lasers with plane-wave admittance method”, in *ICTON 2005: Proceedings of the 7th International Conference on Transparent Optical Networks* **1**, 277–280 (2005).
- [L4] T. Czyszanowski, M. Dems, K. Panajotov, and W. Nakwaski, „Crucial parameters of photonic-crystal holes within photonic-crystal VCSEL DBR”, in *ICTON 2006: Proceedings of the 8th International Conference on Transparent Optical Networks* **2**, 181–184 (2006).
- [L5] M. Dems and K. Panajotov, „Modeling of single- and multimode photonic-crystal planar waveguides with plane-wave admittance method: Losses and modes coupling”, in *ICTON 2006: 8th International Conference on Transparent Optical Networks* **4**, 245–248 (2006).
- [L6] T. Czyszanowski, R. P. Sarzala, M. Dems, H. Thienpont, and K. Panajotov, „Optimal designs of telecommunications oriented photonic-crystal VCSELS”, in *ICTON 2007: Proceedings of the 9th International Conference on Transparent Optical Networks* **2**, 44–47 (2007).

### 3.7. Referaty zaproszone na międzynarodowych konferencjach naukowych

1. M. Dems, K. Panajotov, T. Czyszanowski, R. Kotynski, and W. Nakwaski, „Simulation of photonic crystal diode lasers with plane-wave admittance method”, *7th International Conference on Transparent Optical Networks*, Barcelona, Hiszpania, 3–7 lipca 2005.
2. M. Dems, T. Czyszanowski, K. Panajotov, „Strongly Birefringent and Dichroic VCSEL”, *International Workshop on Advances in Physics and Technology of Photonic Crystals*, Praga, Czechy, 19 kwietnia 2007.

3. M. Dems, K. Panajotov, W. Nakwaski, „Polarization Control in VCSELs with Photonic Crystals”, *7th Belarusian-Russian Workshop “Semiconductor Lasers and Systems”*, Mińsk, Białoruś, 1–5 czerwca 2009.
4. M. Dems, „Modelling of Photonic-Crystal VCSELs with Semi-Vectorial and Vectorial Models”, *11th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2009)*, San Miguel, Portugalia, 28 czerwca – 2 lipca 2009.
5. M. Dems, I.-S. Chung, P. Nyakas, S. Bischoff, and K. Panajotov, „Modelling of photonic-crystal VCSELs with semi-vectorial and vectorial models”, *13th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2011)*, Sztokholm, Szwecja, 26–30 czerwca 2011.
6. M. Dems, P. Beling, M. Gebiski, L. Piskorski, M. Kuc, M. Wasiak, and R. P. Sarzala, „Automated self-consistent approach to modeling of photonic devices”, *15th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2013)*, Cartagena, Hiszpania, 23-27 czerwca 2013.
7. M. Dems, M. Gębski, Jian Chen, Wang Qijie, Zhang Dao Hua, T. Czystanowski, „Subwavelength high contrast grating mirrors for applications in vertical-cavity surface-emitting lasers”, *V Workshop on Physics and Technology of Semiconductor Lasers*, Kraków, Polska, 17-20 listopada 2013.

### 3.8. Osiągnięcia dydaktyczne

W ramach działalności dydaktycznej opracowałem programy zajęć oraz treści wykładów do następujących przedmiotów: *Elektrodynamika* (wykład dla V semestru studiów pierwszego stopnia na kierunku Fizyka Techniczna), *Foundations of Electrodynamics* (wykład w języku angielskim dla V semestru studiów pierwszego stopnia na kierunku Science and Technology), *Programming in Engineering* (wykład i zajęcia projektowe w języku angielskim dla I semestru studiów pierwszego stopnia na kierunku Science and Technology) oraz *Kryształy fotoniczne i metody ich projektowania* (specjalistyczny wykład i zajęcia projektowe dla III semestru studiów drugiego stopnia na specjalności Optoelektronika). Ponadto w 2010 roku opracowałem zestaw modelowych ćwiczeń z zakresu modelowania struktur fotonicznych w ramach programu „Innowacyjna dydaktyka bez ograniczeń — zintegrowany rozwój Politechniki Łódzkiej — zarządzanie Uczelnią, nowoczesna oferta edukacyjna i wzmacnianie zdolności do zatrudniania, także osób niepełnosprawnych” finansowanego z Programu Operacyjnego UE Kapitał Ludzki, zaś w 2016 opracowałem i przeprowadziłem cykl szkoleń na temat „Programowanie dla celów naukowych i obróbka danych” w ramach „Programu Rozwoju Kompetencji w Politechnice Łódzkiej o obszarze ICT” finansowanego z Programu Operacyjnego UE Wiedza Edukacja Rozwój.

### 3.9. Pozostałe osiągnięcia

#### 3.9.1. Popularyzacja Nauki

W latach 2002–2015 byłem opiekunem naukowym Studenckiego Koła Naukowego Fizyków „Kot Schrödingera”. Najbardziej widocznym efektem działalności Koła była popularyzacja nauki. Za tę działalność Koło — pod moją opieką — zdobyło w 2009 r. prestiżową nagrodę Popularyzator Nauki przyznawaną przez Polską Agencję Prasową we współpracy z Ministerstwem Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Ponadto prowadzę także działalność popularyzatorską wśród dzieci, współpracując z Łódzkim Uniwersytetem Dziecięcym, na którym w 2009 roku przeprowadziłem widowiskowy wykład „Niech będzie światło, czyli jasno o fotonach i laserach”, wyjaśniający dzieciom w wieku 7–12 lat czym naprawdę jest światło i jak działają lasery.

#### 3.9.2. Rozwój aparatury badawczej

Od 2005 r. jestem osobą odpowiedzialną za budowę, rozbudowę i zarządzanie klastrem obliczeniowym kraken. Składa się on z 20 połączonych komputerów HP ProLiant, z których każdy posiada 2 procesory Intel Xeon. W sumie klastery udostępnia 160 rdzeni obliczeniowych i 480 GiB pamięci operacyjnej. Służy on do prowadzenia zaawansowanych obliczeń z zakresu fotoniki i fizyki molekularnej.

