

Warszawa dn. 07.02.2018r.

Autoreferat

1. Imię i nazwisko: Anna Kozłowska

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

1992 - magister inżynier; specjalność: konstrukcja przyrządów precyzyjnych i optycznych, Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki (d. Wydział Mechaniki Precyzyjnej).

1997 - doktor nauk technicznych Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki (d. Wydział Mechaniki Precyzyjnej), rozprawa doktorska pt.: "Analiza właściwości dwuwiązkowego interferometru siatkowego z laserem półprzewodnikowym", promotor prof. dr hab. inż. Małgorzata Kujawińska.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych:

1997 - 2006 Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, Warszawa, na stanowiskach: doradca dyrektora, starszy inżynier, adiunkt, kierownik Samodzielnej Pracowni Laserów.

2006-2008 Instytut Technologii Elektronowej, na stanowisku: adiunkt.

2008 - dziś Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, Warszawa na stanowiskach: adiunkt, kierownik pracowni (Zakład Optoelektroniki, Pracownia Badań Optycznych i Termicznych Materiałów Fonicznych).

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

a) tytuł osiągnięcia naukowego:

Jako osiągnięcie naukowe zgłaszam monotematyczny cykl 13 publikacji pt.:

„Badanie własności optycznych i termicznych diod laserowych dużej mocy pod kątem poprawy niezawodności i optymalizacji przyrządów”

b) autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy:

H1 A. Kozłowska, A. Małąg, Far-field emission characteristics of high-power laser diodes, *Proceeding SPIE* 5120, 178-183, 2002 (IF = - ; liczba cytowań bez autocytowań: 4).

H2 A. Kozłowska, M. Latoszek, J. W. Tomm, F. Weik, T. Elsaesser, M. Zbroszczyk, M. Bugajski, B. Spellenberg, M. Bassler, Analysis of thermal images from diode lasers: Temperature profiling and reliability screening, *Applied Physics Letters* 86, 203503, 2005 (IF=4,127; liczba cytowań bez autocytowań: 19).

- H3** A. Małąg, A. Jasik, M. Teodorczyk, A. Jagoda, **A. Kozłowska**, High-power low vertical beam divergence 800-nm-band double-barrier-SCH GaAsP-(AlGa)As laser diodes, *IEEE Photonics Technology Letters* 18, 1582, 2006 (IF=2,353; liczba cytowań bez autocytowań: 10).
- H4** **A. Kozłowska**, A. Małąg, Investigations of transient thermal properties of conductively cooled diode laser arrays operating under quasicontinuous-wave conditions, *Microelectronics Reliability* 46, 2079-2084, 2006 (IF=0,815; liczba cytowań bez autocytowań: 1).
- H5** **A. Kozłowska**, P. Wawrzyniak, A. Małąg, M. Teodorczyk, J. W. Tomm, F. Weik, Reliability screening of diode lasers by multi-spectral infrared imaging, *Journal of Applied Physics* 99, 053101, 2006 (IF=2,316; liczba cytowań bez autocytowań: 3).
- H6** M. Szymański, **A. Kozłowska**, A. Małąg, A. Szerling, Two-dimensional model of heat-flow of broad-area diode laser mounted to the non-ideal heat sink, *Journal of Physics D: Applied Physics* 40, 924-9, 2007 (IF=2,200; liczba cytowań bez autocytowań: 3).
- H7** M. Ziegler, F. Weik, J. W. Tomm, T. Elsaesser, W. Nakwaski, R. P. Sarzała, D. Lorenzen, J. Meusel, **A. Kozłowska**, Transient thermal properties of high-power diode laser bars, *Applied Physics Letters* 89, 263506, 2006 (IF=3,997; liczba cytowań bez autocytowań: 29).
- H8** **A. Kozłowska**, M. Szymański, E. Pruszyńska-Karbownik, M. Bugajski, R. Pomraenke, Ch. Lienau, J. Renard, A. Małąg, Tailoring of optical mode profiles of high-power diode lasers evidenced by near-field photocurrent spectroscopy, *Applied Physics Letters* 91, 1011031, 2007 (IF=3,596; liczba cytowań bez autocytowań: 4).
- H9** **A. Kozłowska**, Infrared imaging of semiconductor lasers, *Semiconductor Science and Technology* 22, R27-R40, 2007 (IF=1,899; liczba cytowań bez autocytowań: 11).
- H10** D. Pierścińska, **A. Kozłowska**, K. Pierściński, M. Bugajski, J. W. Tomm, M. Ziegler, F. Weik, Thermal processes in high-power laser bars investigated by spatially resolved thermoreflectance, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 19, S150-S154, 2008 (IF=1,054; liczba cytowań bez autocytowań: 12).
- H11** **A. Kozłowska**, A. Małąg, E. Dąbrowska, M. Teodorczyk, Thermal properties of high-power diode lasers investigated by means of high resolution thermography, *Materials Science and Engineering B-Advanced Functional Solid-State Materials* 177, 1268-1272, 2012 (IF=1,846; liczba cytowań bez autocytowań: 1).
- H12** **A. Kozłowska**, M. Teodorczyk, E. Dąbrowska-Tumańska, M. Chmielewski, D. Podniesiński, A. Małąg, A novel micro-channel cooler for high-power diode laser arrays, *Photonics Letters of Poland* 6, 23-25, 2014 (IF = -)
- H13** **A. Kozłowska**, P. Łapka, M. Seredyński, M. Teodorczyk, E. Dąbrowska-Tumańska, Experimental study and numerical modeling of micro-channel cooler, with micro-pipes for high-power diode laser arrays, *Applied Thermal Engineering* 91, 279-287, 2015 (IF=3,043; liczba cytowań bez autocytowań: 3).

Sumaryczny IF publikacji H1÷H13: 27,246

Sumaryczny ważony IF publikacji H1÷H13 (z uwzględnieniem mojego udziału w powstaniu publikacji): 14,375

Sumaryczna liczba cytowań (bez autocytowań) publikacji H1÷H13: 100

Oświadczenia mojego indywidualnego wkładu w powstanie wymienionych wyżej publikacji znajdują się w załączniku 3. Kopie prac oraz oświadczenia współautorów określające indywidualny wkład każdego z nich zestawiono w załącznikach 4 i 5. **Z powodów formalnych (brak możliwości uzyskania oświadczenia jednego ze współautorów), z cyklu publikacji została wyłączona praca pt. „Deep level emission from high-power diode laser bars detected by multi-spectral infrared imaging” autorstwa: A. Kozłowska, P. Wawrzyniak, J. W. Tomm, F. Weik, T. Elsaesser, opublikowana w *Applied Physics Letters* 87, 153503, 2005 (IF=4,127, liczba cytowań bez autocytowań: 13), tematycznie łącząca się ściśle z pracami wchodzącymi w skład cyklu.**

c) omówienie celu naukowego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania:

Diody i matryce laserowe są wysokowydajnymi źródłami światła, stosowanymi do przesyłania informacji, obróbki materiałowej, do celów pompowania optycznego, w metrologii, medycynie i wojskowości. Moje zainteresowanie diodami laserowymi sięga pracy doktorskiej, zrealizowanej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. M. Kujawińskiej w Instytucie Mikromechaniki i Fotoniki na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Badania nad diodami laserowymi kontynuowałam w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych, gdzie byłam głównym wykonawcą Projektu Badawczego Zamawianego nr PBZ 023-10, dotyczącego opracowania diod laserowych dużej mocy i laserów na ciele stałym pompowanych diodami laserowymi. Projekt PBZ zakładał wykorzystanie istniejącej infrastruktury ITME w zakresie epitaksji związków III-V i technologii struktur półprzewodnikowych i był ukierunkowany na opracowanie przyrządów średniej mocy (do 0,5 W mocy ciągłej). Realizacja projektu wymagała stworzenia od podstaw całego zaplecza pomiarowego diod i matryc laserowych, począwszy od stanowisk do charakteryzacji niezmontowanych chipów pracujących w reżimie impulsowym, poprzez pomiary przyrządów zmontowanych na blokach chłodzących, aż do gotowych przyrządów w różnego typu obudowach. Oprócz badań przyrządowych i materiałowych ważny element moich prac stanowiło opracowywanie i implementacja nowych metod badawczych do charakteryzacji elektro-optycznej i termicznej, co pozwoliło na stworzenie w ITME unikatowych w skali kraju laboratoriów diagnostyki diod laserowych i innych źródeł promieniowania.

W przypadku diod laserowych dużej mocy, szczególnie istotna jest problematyka zagadnień cieplnych, ograniczających możliwość uzyskania wysokich mocy optycznych, ale też nieodłącznie towarzysząca zjawiskom degradacji przyrządów. W trakcie realizacji Projektu Badawczego Zamawianego nr PBZ-MIN-009/T11/2003 byłam kierownikiem zadania pt. „Badania optymalizacyjne mechanizmów odprowadzania ciepła ze struktur laserów półprzewodnikowych dużej mocy i opracowanie układów ich chłodzenia”. Zadanie było realizowane we współpracy z Instytutem Fizyki Politechniki Łódzkiej, grupą prof. W. Nakwaskiego i pozwoliło na skonstruowanie szeregu zoptymalizowanych pod względem efektywności odprowadzania ciepła układów chłodzenia diod laserowych. Ogromny postęp w technologii diod laserowych, nowe rozwiązania konstrukcyjne i nowe metody selekcji przyrządów, pozwoliły na uzyskanie wyróżniających się w skali światowej parametrów diod laserowych, co ilustruje np. publikacja [H3]. W trakcie realizacji kolejnych projektów (m.in.

projektów rozwojowych N R02 0004 06/2009 i N R02 0013 06, autorskiego nr 4 T11B 007 24 oraz licznych prac statutowych) udało się podwyższyć moc emitowaną z pojedynczego przyrządu, opracować wydajne układy odprowadzania ciepła oraz polepszyć parametry wiązki diod laserowych. Jednakże problemem stale towarzyszącym opracowywaniu diod laserowych była niezawodność tych przyrządów, wynikająca zarówno ze zdefektowania heterostruktury laserowej, jak i niedoskonałości technologii struktur i montażu. Dla odbiorców diod laserowych to właśnie długoterminowa żywotność jest jednym z najważniejszych parametrów użytkowych, do dnia dzisiejszego stanowiącym poważne ograniczenie w wielu zastosowaniach tych przyrządów. **Celem prac, których wynikiem jest prezentowany cykl publikacji, była poprawa niezawodności diod laserowych, wiążąca się z koniecznością znalezienia efektywnych metod badań własności optycznych i termicznych oraz optymalizacja przyrządów.** Większość prezentowanych badań dotyczy przyrządów zaprojektowanych i wykonanych w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych [H1-H6], [H8], [H12-H13], pozostałe bazowały na produktach firm Jenoptik oraz Dilas.

Wyniki badań stanowiących podstawę niniejszego cyklu publikacji [H1-H13] zostały podzielone na dwie zasadnicze grupy tematyczne tworzące spójną całość. Pierwsza część dotyczy badań własności optycznych diod laserowych dużej mocy i obejmuje publikacje [H1], [H3], [H8]. Druga część prac poświęcona jest badaniom termicznym diod laserowych (publikacje [H2], [H4-H7], [H9-H13]).

1. Badania własności optycznych diod laserowych dużej mocy

Wiązka optyczna laserów krawędziowych jest formowana w wyniku efektu falowodowego, kształtowanego poprzez dobór geometrii i składu warstw tworzących heterostrukturę laserową. Uzyskany rozkład modu optycznego w dużej mierze determinuje podatność diod laserowych (DL) na procesy degradacyjne, wynikające z pracy w warunkach wysokich gęstości mocy, zlokalizowanych w ich obszarze aktywnym, w tym także w pobliżu zwierciadeł. Dlatego, w przypadku przyrządów dużej mocy dąży się do obniżenia gęstości mocy w falowodzie i na zwierciadłach laserowych. Zagadnieniu temu poświęcona była znaczna ilość prac badawczych, które zaowocowały opracowaniem konstrukcji heterostruktur o szerokich rozkładach pola optycznego, takich jak heterostruktura z szeroką wnęką optyczną i rozdzielonym ograniczeniem (ang. *Large Optical Cavity Separate Confinement Heterostructure*, LOC SCH) [1-4] lub zaproponowana w roku 1996 i rozwijana później w ITME struktura z podwójną barierą i rozdzielonym ograniczeniem (ang. *Double-Barrier Separate Confinement*, DB SCH) [5-8]. Prace prowadzone przeze mnie nad zagadnieniami zjawisk optycznych w diodach laserowych dotyczyły badania wpływu zaprojektowanych rozkładów pola optycznego na charakterystyki kierunkowe wiązki [H1], [H3], [H8] oraz charakterystyki elektro-optyczne diod laserowych [H3]. Badania rozkładów modowych diod laserowych DB SCH o zmniejszonej rozbieżności wiązki, przeprowadzone za pomocą unikatowej metody wysokorozdzielczej fotoprądowej mikroskopii pola bliskiego, zostały przedstawione w pracy [H8].

Pierwsza z prac tworzących prezentowany cykl publikacji [H1] poświęcona jest badaniom rozkładów pola optycznego w strefie dalekiej dla przyrządów o różnych

konstrukcjach heterostruktury laserowej. **W pracy wykazano wyraźną przewagę rozwijanej w ITME konstrukcji DB SCH nad typową heterostrukturą z pojedynczą studnią kwantową i rozdzielonym ograniczeniem** (ang. *Single Quantum Well Separate Confinement*, SQW SCH). Przeprowadzone pomiary wykazały, że rozbieżności wiązki w płaszczyźnie prostopadłej do złącza dla diod DB SCH są zdecydowanie mniejsze (od 16° do 26°, dla różnych poziomów pompowania) niż dla diod SQW SCH, posiadających rozbieżności wiązki zakresie 27°-37°, dla różnych poziomów prądowych. W płaszczyźnie złącza dla struktur SQW SCH zaobserwowano efekt stabilizacji pola ze względu na efekt elastoptyczny wprowadzony w trakcie tworzenia paska aktywnego poprzez implantację jonów helu. Wprowadzone różnice współczynnika załamania w postaci maksimum na brzegach paska spowodowały poszerzenie pola optycznego poza obszar paska oraz uzyskanie charakterystycznego rozkładu z minimum na środku paska. W przypadku struktur DB SCH wyniki pomiarów wskazały na występowanie typowego falowodu wzmocnieniowego z silną filamentacją wiązki. **Do pomiaru charakterystyk kierunkowych wiązki diody laserowej zaproponowałam nowy układ pomiarowy bazujący na kamerze CCD.** Uzyskanie wymaganej dokładności pomiaru było możliwe dzięki opracowanemu przeze mnie programowi, uwzględniającemu kształt powierzchni detektora, geometrię układu oraz współczynniki załamania poszczególnych elementów toru optycznego. Dokładność zaproponowanego układu pomiarowego została oszacowana na $\pm 1^\circ$ [9], zaś sam układ stanowi ciekawą i wygodną alternatywę dla układu goniometrycznego, który w przypadku silnie rozbieżnej wiązki wymaga długotrwałego pomiaru rozkładu intensywności punkt po punkcie.

Wyniki prac nad polepszeniem parametrów optycznych i elektrooptycznych diod laserowych DB SCH, przedstawione są w pracy [H3]. Artykuł poświęcony jest konstrukcji, procesowi wytworzenia i charakteryzacji elektrooptycznej diod laserowych emitujących w paśmie 800 nm o niskiej rozbieżności wiązki w kierunku prostopadłym do złącza, zaś mój udział dotyczył zaprojektowania i uruchomienia stanowisk badawczych, opracowania metodyki i wykonania badań optycznych i elektrooptycznych przyrządów oraz przeprowadzenia analizy wyników eksperymentalnych. W pracy przedstawione zostały dwie wersje heterostruktury C i C' różniące się zawartością glinu w warstwach ograniczających $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (odpowiednio $x = 0,45$ i $x = 0,42$). Niższa zawartość Al wpłynęła na zmniejszenie współczynnika oddziaływania fali prowadzonej z warstwą aktywną. Studnię kwantową tworzyła naprężona rozciągająco warstwa GaAsP o grubości 15 nm. Heterostruktury GaAsP-AlGaAs-GaAs zostały wytworzone techniką epitaksji metaloorganicznej z fazy gazowej (ang. *Metal-Organic Vapour Phase Epitaxy*, MOVPE) w reaktorze R&D200 firmy Aixtron. Paski aktywne o szerokości $W=0,1$ mm zostały wytworzone techniką implantacji jonów He^+ przez metalizację TiPt typu p i maskę fotorezystu. Po podzieleniu płytki na linijki o długości rezonatora $L = 1$ mm, na przełomy lustrzane, metodą sputeringu, naniesione zostały warstwy HR/LR z AlN-Si-AlN. Pocięte na chipy linijki laserowe zostały przylutowane indem do specjalnie zaprojektowanych chłodziw miedzianych. W ostatnim etapie wykonano połączenia drutowe do kontaktów typu n (metalizacja AuGeNi). Badania diod laserowych o przedstawionej konstrukcji wraz z dalszymi jej modyfikacjami są zawarte również w innych publikacjach prezentowanego cyklu [H1-H6], [H8], [H12].

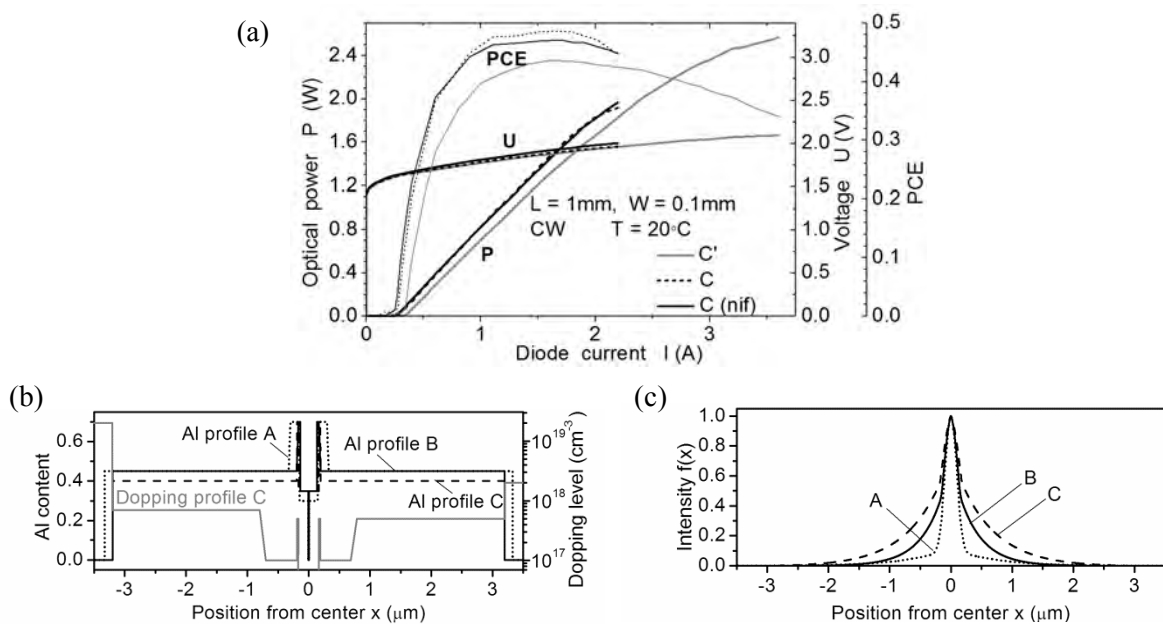
Tabela 1

Wersja	Praca impulsowa (100 ns, 5 kHz)				Praca ciągła		
	I_{th} (A)	S (W/A)	T_0 (K)	T_1 (K)	I_{th} (A)	S_{CW} (W/A)	θ_{\perp} (°)
C	0,23-0,32	1,15-1,28	110-120	300-370	0,23-0,32	1,05-1,17	18-16
C'	0,32-0,43	1,05-1,2	77-80	170-190	0,33-0,41	0,9-1,07	14-13

Podstawowe parametry charakteryzacji elektro-optycznej (prąd progowy I_{th} , sprawność energetyczna S oraz parametry cieplne T_0 i T_1 opisujące, odpowiednio wzrost I_{th} i spadek sprawności kwantowej ze wzrostem temperatury) dla niezmontowanych przyrządów (w warunkach zasilania impulsowego) zostały zebrane w tabeli 1. Tabela przedstawia również parametry przyrządów zmontowanych na blokach miedzianych (I_{th} , sprawność energetyczna dla pracy ciągłej S_{CW} oraz rozbieżności wiązki w płaszczyźnie prostopadłej do złącza θ_{\perp}). Charakterystyki kierunkowe promieniowania zostały wyznaczone za pomocą zmodyfikowanego układu z kamerą CCD, przedstawionego bliżej w pracy [H1]. **Dla diod laserowych w wersji C' uzyskano wyjątkowo niskie rozbieżności w kierunku prostopadłym do złącza θ_{\perp} (14° - 13° , wg wiedzy autorów wartości najniższe na świecie dla diod laserowych emitujących w paśmie 800 nm). Charakterystyki mocy optycznej - prąd – napięcie dla zasilania CW wskazują (rys. 1a), że obniżenie gęstości mocy w falowodzie przyniosło spodziewane podwyższenie osiągniętej mocy optycznej (P_{opt} rzędu 2,5 W dla przyrządu w wersji C') i podwyższenie progów COD. Charakterystyki mocy optycznej w funkcji prądu wskazywały jednak na konieczność dalszej optymalizacji układu odprowadzania ciepła ze struktury.**

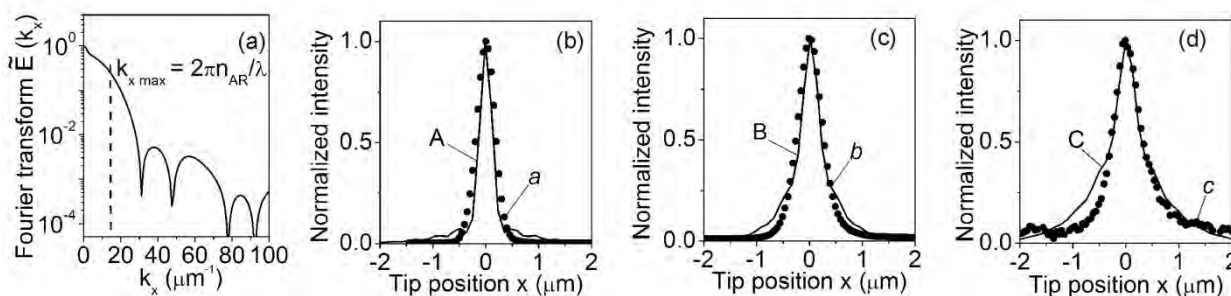
Publikacja [H8] stanowi kontynuację moich badań nad zagadnieniami kształtowania rozkładu modowego i jego wpływu na charakterystyki kierunkowe diod laserowych. Ze względu na submikronowe grubości warstw struktury falowodowej diody laserowej, eksperymentalne rozkłady pola optycznego zazwyczaj są wyznaczone pośrednio, na podstawie charakterystyk kierunkowych promieniowania w polu dalekim. Moim pomysłem było przeprowadzenie charakteryzacji struktur DB SCH za pomocą unikatowej metody wysokorozdzielczej fotoprądowej mikroskopii pola bliskiego (ang. *Near-Field Photo-Current*, NPC), z powodzeniem wykorzystywanej wcześniej do badań struktur LOC SCH [10]. Pozwoliło to na eksperymentalne potwierdzenie i bezpośrednią obserwację zaprojektowanych różnic szerokości rozkładu modu optycznego. Praca została wykonana we współpracy z Instytutem Maxa-Borna w Berlinie. Wykorzystaliśmy układ NPC z sondą światłowodową pokrytą aluminium ze specjalnie przygotowaną końcówką z oknem o średnicy 100 nm, która skanowała zwierciadło diody laserowej w odległości ok. ~ 10 nm. Jako źródła pobudzające zastosowaliśmy laser helowo-neonowy oraz przestrajalny laser tytanowo-szafirowy. W pracy analizowane były trzy wersje heterostruktury DB SCH. Zaprojektowane profile zawartości Al oraz domieszkowania dla rozważanych wersji heterostruktury pokazane są na rys. 1b, zaś obliczone profile pola optycznego na rys. 1c. Skany NPC w kierunku prostopadłym do złącza zarejestrowane zostały dla różnych długości fali pobudzającej. Szczególnie interesujące wyniki uzyskano przy pobudzeniu $\lambda = 810$ nm. W

tym przypadku sygnał NPC pochodzi od nośników wygenerowanych na skutek absorpcji międzypasmowej w studni kwantowej i skany te odzwierciedlają rozkład modu podstawowego w falowodzie. Ze względu na specyficzne cechy metody optycznej mikroskopii pola bliskiego nie można było bezpośrednio porównać obliczonych i przedstawionych na rys. 1c rozkładów pola optycznego ze zmierzonymi skanami. Sygnał NPC tworzony jest przez fale propagujące się poprzez warstwę antyodblaskową AR w głąb falowodu, podczas gdy fala ewanescentna w warstwie AR nie przyczynia się w sposób znaczący do rejestrowanego sygnału. Oznacza to występowanie górnego limitu na poprzeczny, równoległy do zwierciadła w kierunku x , składnik wektora falowego $k_{x,max}=2\pi n_{AR}/\lambda$ promieniowania wprowadzonego do falowodu diody laserowej (rys. 2a).



Rys. 1 Charakterystyki moc optyczna - prąd – napięcie (P-I-V) dla diod laserowych zawierających trzy wersje heterostruktur przy zasilaniu CW (a) [H3], zaprojektowane profile zawartości Al i profile domieszkowania (b) oraz obliczone dla struktur A, B i C rozkłady pola optycznego (c) [H8].

Dla wyznaczenia teoretycznych profili NPC $I_{NPC}(x)$ na podstawie obliczonych rozkładów pola optycznego konieczne jest więc odcięcie częstości wyższych niż $k_{x,max}$. Porównanie otrzymanych w ten sposób teoretycznych i eksperymentalnych rozkładów pola optycznego dla trzech wersji heterostruktur A, B i C przedstawione jest odpowiednio na rys. 2b, c i d. Choć uzyskano dość dobrą zbieżność obu wyników, to jednak można zaobserwować niewielkie rozbieżności manifestujące się stłumieniem bocznych fragmentów wyznaczonych eksperymentalnie rozkładów. Dla wyjaśnienia przyczyn rozbieżności, na podstawie eksperymentalnych profili NPC wyznaczone zostały rozkłady pola dalekiego i porównane z rzeczywistymi zmierzonymi rozkładami pola dalekiego dla diod wytworzonych z trzech omawianych heterostruktur. **Uzyskano bardzo dobrą zbieżność wyznaczonych rozbieżności wiązki z wynikami pomiarów profilometrycznych w polu dalekim. Wyniki pracy [H8] pokazują, że metoda NPC jest niezwykle precyzyjnym, unikatowym narzędziem do ilościowych i nieniszczących badań falowodów optycznych w przyrządach optoelektronicznych, w szczególności w strukturach laserowych.**



Rys. 2 (a) Transformata Fouriera $\tilde{E}(k_x)$, teoretycznego profilu $E(x)$ dla wersji A heterostruktury i maksymalna częstość przestrzenna $k_{x, \text{max}} = 2\pi n_{\text{AR}}/\lambda$ odwzorowywana przez technikę NPC; (b)-(d) obliczone rozkłady pola optycznego $I_{\text{NPC}}(x) = |E_t(x)|^2$ dla wersji A-C (linie ciągłe) porównane z eksperymentalnymi profilami I_{NPC} (kółka) dla diod laserowych wykonanych z heterostruktur A-C [H8].

2. Badanie własności termicznych oraz detekcja defektów diod laserowych dużej mocy, optymalizacja tych przyrządów

Generacja ciepła wewnątrz diody laserowej, powodująca wzrost temperatury w obszarze lasera, związana jest występowaniem szeregu źródeł strat energetycznych, takich jak rekombinacja niepromienista, reabsorpcja promieniowania, wydzielanie ciepła Joule'a, rekombinacja powierzchniowa. Zbyt wysoka temperatura pracy diody laserowej powoduje wzrost prądu progowego, spadek sprawności i bardzo często przyspiesza degradację przyrządu. Dążenie do polepszenia parametrów wiązki diody laserowej i podwyższanie emitowanej przez nią mocy optycznej skutkowało coraz trudniejszymi warunkami termicznymi pracy przyrządu. Istotnym zagadnieniem badawczym była optymalizacja własności termicznych diod laserowych, pozwalająca na polepszenie własności eksploatacyjnych tych przyrządów (np. wydłużenie ich czasu życia). Ważną część prowadzonych przez mnie prac stanowiło zaproponowanie nowych i rozwinięcie istniejących metod badań termicznych, dedykowanych do charakteryzacji diod laserowych dużej mocy (publikacje [H2], [H4], [H9], przedstawione w rozdziale 2.1). Rozdział 2.2 poświęcony jest zagadnieniu detekcji defektów oraz badaniom niezawodnościowym diod laserowych (publikacje [H2], [H5], [H10-H11]). W rozdziale 2.3 zaprezentowane są badania własności termicznych diod i matryc laserowych z pasywnym i aktywnym układem chłodzenia oraz zaproponowane są sposoby na polepszenie tych własności w stosunku do istniejących rozwiązań (publikacje [H4], [H6-H7], [H12-H13]).

2.1 Nowe metody eksperymentalne w badaniach własności termicznych diod laserowych

Wyznaczenie temperatury w obszarze diody laserowej jest utrudnione ze względu na jej niewielkie rozmiary i w praktyce jest przeprowadzane w sposób pośredni, np. przy wykorzystaniu efektu temperaturowych zmian szerokości przerwy energetycznej półprzewodnika w obszarze aktywnym, zmian napięcia przewodzenia złącza półprzewodnikowego, czy zmian współczynnika odbicia. Uśrednioną temperaturę obszaru aktywnego diody laserowej wyznacza się zazwyczaj na podstawie temperaturowego

przestrojenia długości fali emitowanego światła (ang. *Wavelength Tuning*, WT) [11], bądź na podstawie temperaturowej zmiany napięcia złącza [12,13]. Temperaturę zwierciadeł diody laserowej określa się za pomocą spektroskopii mikro-Ramanowskiej (μ R) lub metodą termoodbicia (ang. *Thermoreflexion*, TR) [14-17]. W trakcie badań nad własnościami termicznymi diod laserowych ujawniły się słabości typowo stosowanych metod pomiaru temperatury, w szczególności długi czas pomiaru (w przypadku obrazowania termicznego) lub możliwość wykonania jedynie pomiaru uśrednionego. Doskonałe rezultaty przyniosło zastosowanie wysokorozdzielczej termowizji, która została przeze mnie zaimplementowana i rozwinięta jako zaawansowane narzędzie do nieinwazyjnej diagnostyki diod laserowych dużej mocy. Nieliczne, publikowane przez innych autorów wcześniejsze prace na ten temat dotyczyły termowizji w paśmie 8-12 μ m [18-21]. Niska rozdzielczość przestrzenna uzyskiwana w tym paśmie, związana z limitem dyfrakcyjnym uniemożliwiała skuteczne badania przyrządów o tak niewielkich rozmiarach, jak diody laserowe. **Zaproponowane przeze mnie wykorzystanie wysokorozdzielczej termowizji w paśmie 3-5 μ m stworzyło nowe możliwości badań przyrządowych, otwierając drogę obrazowaniu termicznemu diod laserowych, wstępnej selekcji przyrządów rokujących osiągnięcie długiego czasu życia oraz detekcji defektów.** Prowadzonym przeze mnie badaniom termowizyjnym towarzyszyły pomiary za pomocą metod komplementarnych, takich jak metoda temperaturowego przestrojenia długości fali światła (dostarczająca informacji o uśrednionej temperaturze obszaru aktywnego), termoodbicie i metoda mikro-Ramana (dostarczające informacji o temperaturze zwierciadeł laserowych).

Główne koncepcje zastosowania wysokorozdzielczej termowizji do badań diod laserowych zostały przeze mnie przedstawione w pracy [H9]. Jest to praca przeglądowa, a jej opublikowanie w roku 2007 w piśmie *Semiconductor Science and Technology* było wyrazem docenienia mojego wkładu w rozwój tej techniki pomiarowej. W badaniach termowizyjnych jednym z kluczowych parametrów warunkujących intensywność rejestrowanego sygnału jest emisyjność badanego obiektu. W przypadku laserów szerokopaskowych, warstwy półprzewodnikowe są zazwyczaj pokryte warstwami metalicznymi, takimi jak kontakty omowe, które stanowią warstwy odbijające dla emitowanego promieniowania termicznego. Jeśli rozmiary chipa laserowego L (długość rezonatora) i w_c (szerokość chipu) są wystarczająco duże w porównaniu do drogi absorpcji (i emisji) promieniowania emitowanego w podczerwieni $d=1/\alpha$ ($L \gg d$, i $w_c \gg d$), gdzie α oznacza współczynnik absorpcji badanego materiału, wówczas całkowita emisyjność diody laserowej wynosi $0,65 \div 0,75$ i jest w głównej mierze zależna od współczynnika odbicia zwierciadeł. Warunek ten jest zazwyczaj spełniony dla diod laserowych dużej mocy, o typowych długościach rezonatora $0,5 \div 4,0$ mm. W tym przypadku intensywność sygnału termowizyjnego może być opisana zależnością:

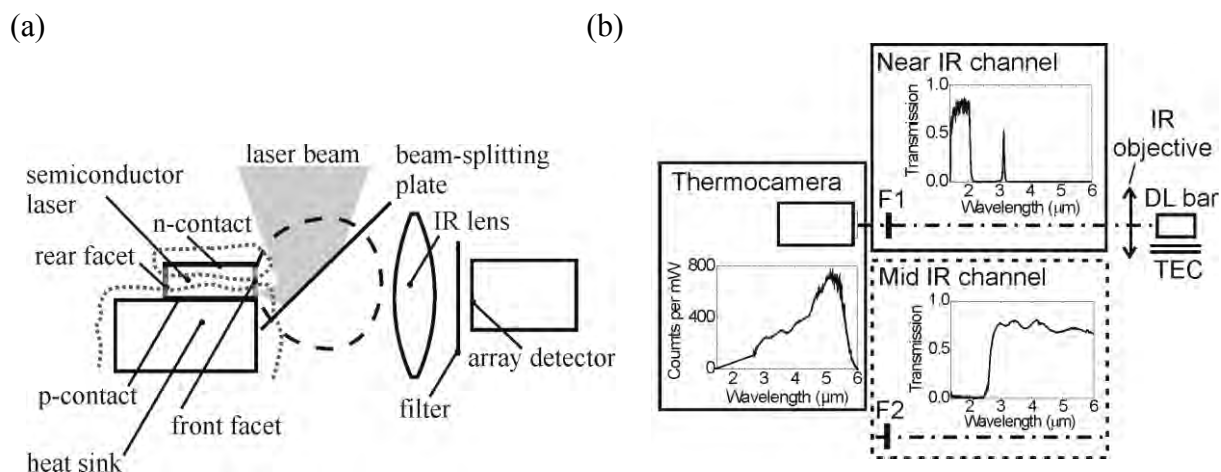
$$I_{IRI} \approx \int_{\Delta\lambda} \varepsilon(\lambda, x, y) M_e[\lambda, T(x, y, z)] d\lambda + I_{bg}, \quad (1)$$

gdzie M_e oznacza egzytancję energetyczną monochromatyczną wyprowadzoną na podstawie prawa Plancka, $T(x,y,z)$ jest rozkładem temperatury w diodzie laserowej, zaś I_{bg} oznacza intensywność sygnału tła.

Dokładność pomiaru termowizyjnego w dużej mierze zależy od drogi emisji promieniowania termicznego, nawet jeśli całkowita emisyjność chipu jest wysoka. Dla dużych wartości d sygnał pochodzi z całej objętości lasera i mogą mieć miejsce odbicia od metalicznych części lasera. Znajomość własności absorpcyjnych badanego materiału w interesującym nas zakresie spektralnym obejmującym średnią podczerwień (w szczególności współczynnika absorpcji na swobodnych nośnikach) jest kluczowa dla uniknięcia niewłaściwej interpretacji obrazu termicznego. Ponieważ absorpcja na swobodnych nośnikach wzrasta wraz ze wzrostem długości fali światła, droga emisji promieniowania w paśmie 8-12 μm jest znacznie krótsza niż w paśmie 3-5 μm . Np. dla arsenku galu typu n o koncentracji $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, zakładając typowe wartości absorpcji na swobodnych nośnikach ($148,51 \text{ cm}^{-1}$ dla $\lambda=10 \mu\text{m}$ i $19,62 \text{ cm}^{-1}$ dla $\lambda=5 \mu\text{m}$ [22]) drogi emisji wynoszą 67 μm i 500 μm odpowiednio dla 10 μm i 5 μm . Dla struktury laserowej, oprócz absorpcji na swobodnych nośnikach, również i inne mechanizmy absorpcji mogą zwiększać ilość docierającego do kamery promieniowania termicznego. Defekty i zanieczyszczenia mogą tworzyć głębokie poziomy energetyczne, które skutkują w podwyższonej absorpcji dla $E < E_g$ [23,24]. W pracy zwróciłam uwagę, że różne drogi emisji dla dwóch typowo stosowanych w termowizji pasm detekcji skutkują w odmiennych cechach obrazów termowizyjnych. Stosunkowo krótka droga emisji w paśmie 8-12 μm przyczynia się do faktu, że lokalne grzanie w obszarze zwierciadeł ma wpływ dominujący na rejestrowany obraz termiczny. Wadą stosowania tego pasma jest niska rozdzielczość przestrzenna, rzędu 50-200 μm , co biorąc pod uwagę typowe rozmiary zwierciadła laserowego, rzędu 100 x 500 μm , stanowi poważne utrudnienie. Z tego punktu widzenia, zdecydowanie bardziej odpowiednią metodą jest wysokorozdzielcza termowizja w paśmie 3-5 μm , zaś dla uzyskania ilościowej informacji o rozkładzie temperatury diody laserowej konieczne jest odpowiednie skonfigurowanie układu pomiarowego. Zastosowana kamera termowizyjna powinna odznaczać się małymi szumami detektora i wysoką czułością termiczną. Wymagania te spełniają np. kamery z detektorem fotonowym HgCdTe (zastosowanym w pracach [H2], [H5], [H7], [H9-H10]) lub InSb (zastosowanym w pracach [H11-H13]), chłodzonym w cyklu Stirlinga do temperatury ciekłego azotu. W pomiarach indywidualnych diod laserowych kluczowe znaczenie ma zastosowanie optyki mikroskopowej o dużym powiększeniu, wysokiej jasności i niewielkich aberracjach geometrycznych. Pozwala to na uzyskanie wysokiej rozdzielczości przestrzennej pomiaru, rzędu 3 - 10 μm . Schematy zaproponowanych przeze mnie układów pomiarowych, spełniających wymagania stawiane układom diagnostyki diod laserowych dużej mocy, przedstawione są na rys. 3. Układ jednokanałowy przestawiony jest na rys. 3a, zaś jego modyfikacja, pozwalająca dodatkowo na detekcję luminescencji zachodzącej z udziałem głębokich defektów pokazana jest na rys. 3b. Dwukanałowe stanowisko termowizyjne pozwoliło na niezależną obserwację promieniowania termicznego w paśmie MIR (3-5 μm) oraz luminescencji w paśmie NIR (1,5 - 2 μm), co zostało po raz pierwszy zademonstrowane przeze mnie w pracy [25], na przykładzie komercyjnych matryc InGaAlAs/GaAlAs/GaAs o konstrukcji LOC SCH.

Złożoność struktury lasera półprzewodnikowego (heterostruktura półprzewodnikowa na pocienionej płycie podłożowej, pokrycia metaliczne) oraz jej niewielkie rozmiary spowodowały, że typowo stosowane w termowizji metody kalibracji, polegające na wyznaczeniu wartości sygnału wytworzonego przez kamerę dla wybranych obszarów ciała

czarnego o różnych temperaturach i stworzeniu na tej podstawie modelu kalibracji, nie mogą być w bezpośredni sposób zaimplementowane w badaniach diod laserowych. Zaproponowana przeze mnie metoda kalibracji, przedstawiona w publikacjach [H2], [H9] wymaga zarejestrowania obrazów referencyjnych dla wyłączonej, grzanej zewnętrznie diody laserowej. Metoda pozwala z jednej strony na uwzględnienie różnych emisyjności materiałów warstw składowych, których rozmiary są często mniejsze niż rozdzielczość kamery, z drugiej strony, na częściowe uniezależnienie się od wpływu tła.



Rys. 3 Schemat jednocanalowego [H2], [H7], [H10-H13] (a) i dwukanalowego [H5], [H9], [25] (b) układu termowizyjnego do badań diod i matryc laserowych dużej mocy.

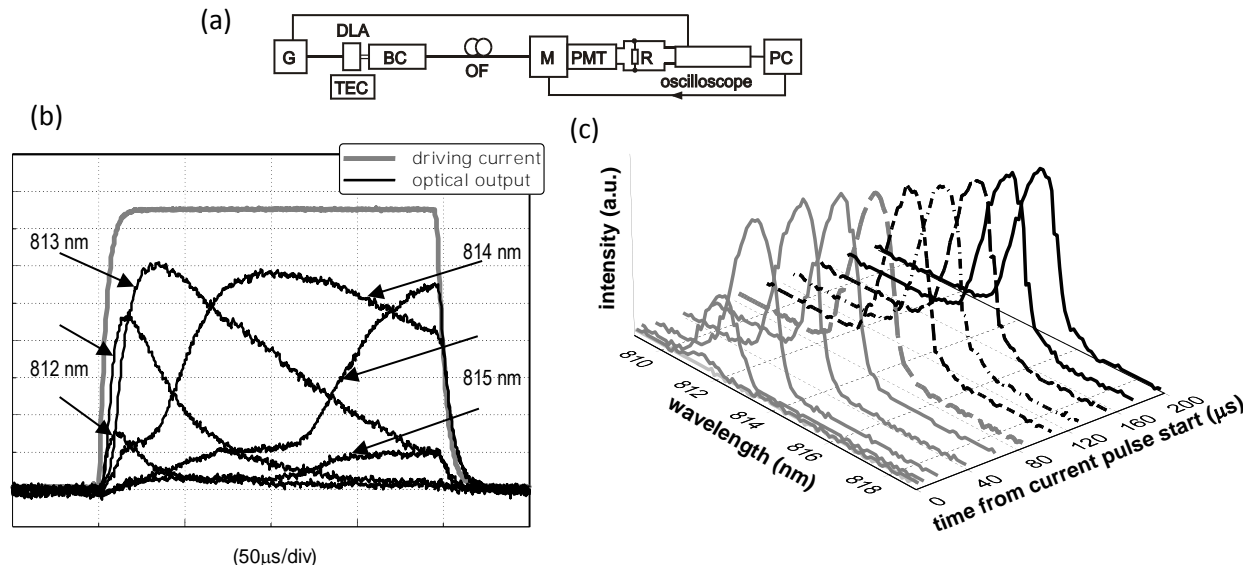
Dla uzyskania pełnej informacji o własnościach termicznych badanych diod laserowych, oprócz metody termowizyjnej, w pracach wchodzących w skład cyklu publikacji wykorzystałam również inne metody eksperymentalne. **Bazując na metodzie temperaturowego przestrojenia długości fali emitowanego światła, zaprezentowałam oryginalne stanowisko badawcze do pomiaru przebiegów czasowych temperatury obszaru aktywnego matryc diod laserowych (rys. 4a, praca [H4]), pracujących w reżimie pracy quasi-ciągłej (ang. *Quasi-Continuous Wave*, QCW). Idea pomiaru polega na rejestracji oscylogramów impulsu optycznego dla kolejnych ‘położeń spektralnych’ monochromatora (kolejnych położeń kątowych siatki dyfrakcyjnej, rys. 4b). Za pomocą specjalnie opracowanego oprogramowania uzyskałam rozdzielone czasowo widma diody laserowej dla wybranych momentów czasowych od początku impulsu (rys. 4c).**

Stanowisko wykorzystałam do pomiarów matryc diod laserowych emitujących w paśmie 808 nm, jednakże po zmianie detektora może być z powodzeniem stosowane do pomiarów w nietypowych pasmach spektralnych, gdzie analiza czasowo-rozdzielcza jest znacznie utrudniona. Wyniki badań termicznych matryc diod laserowych uzyskane z wykorzystaniem przedstawionego stanowiska zawarte są w dalszej części autoreferatu (rozdział 2.3).

2.2. Detekcja defektów i badania niezawodnościowe przyrządów

Pomimo, iż niezawodność diod i matryc laserowych poprawiła się znacząco w ciągu ostatnich lat, wciąż jednak jest ona gorsza niż np. diod elektroluminescencyjnych, które nie pracują w warunkach tak dużych gęstości mocy. Badanie przyczyn degradacji i opracowanie

sposobów na podwyższenie niezawodności prowadzone było przez wiele lat w licznych ośrodkach badawczych na świecie [24,26-29]. W ten trend wpisywały się prace prowadzone przeze mnie w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych oraz Instytucie Technologii Elektronowej, we współpracy z Instytutem Maxa-Borna w Berlinie i innymi ośrodkami krajowymi. Nowe możliwości w zakresie detekcji defektów stworzyła metoda termowizji wysokiej rozdzielczości, która z powodzeniem zaczęła być stosowana nie tylko w badaniach naukowych, ale również w ośrodkach przemysłowych produkujących (i testujących) diody laserowe na dużą skalę.

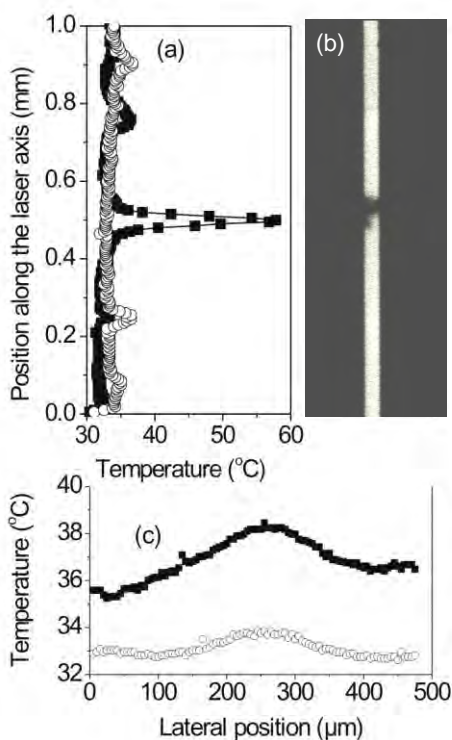


Rys. 4 Schemat stanowiska do pomiaru przebiegów czasowych temperatury obszaru aktywnego matryc diod laserowych (a), przykładowe oscylogramy zarejestrowane dla wybranych położeń spektralnych monochromatora (b) oraz zmiana widma matrycy diod laserowych w trakcie trwania impulsu prądowego (c) [H4].

Z punktu widzenia niezawodności diod laserowych, oprócz temperatury obszaru aktywnego wewnątrz rezonatora niezwykle istotna jest temperatura zwierciadeł laserowych. Jedną z częstych przyczyn uszkodzenia diody laserowej jest tzw. katastroficzne optyczne uszkodzenie zwierciadła (*Catastrophic Optical Mirror Damage* COMD) [26]. Proces ten jest nieodwracalny i prowadzi do lokalnego zniszczenia zwierciadła w wyniku wzrostu temperatury, związanego z rekombinacją powierzchniową, która inicjuje pętlę dodatniego sprzężenia zwrotnego, obejmującą zwężenie przerwy energetycznej na skutek wzrostu temperatury, reabsorpcję promieniowania laserowego, a w efekcie stopienie zwierciadeł. Uzyskanie pełnego obrazu własności termicznych diody laserowej nie było więc możliwe bez sięgnięcia po metody pomiaru temperatury zwierciadeł laserowych, takie jak metoda mikro-Ramana oraz metoda termoodbicia.

Możliwości metody termowizyjnej w zakresie detekcji defektów i profilowania termicznego w diodach laserowych zostały po raz pierwszy zaprezentowane przeze mnie w pracy [H2]. Szczególnie atrakcyjne było uzyskanie szybkiej informacji o rozkładach temperatury diod laserowych, co jest utrudnione za pomocą innych dostępnych metod, takich jak WT. Rozkłady termiczne w płaszczyźnie złącza zmierzone metodą termowizyjną od strony przedniego zwierciadła dla niezdegradowanego przyrządu porównano z rozkładami

uzyskanymi za pomocą modelowania numerycznego metodą elementów skończonych (pakiet oprogramowania CDF-ACE+). Modelowanie zostało przeprowadzone w Instytucie Technologii Elektronowej, w grupie prof. M. Bugajskiego, zaś pomiary wykonane metodą termograficzną oraz metodą mikro-Ramana we współpracy z Instytutem Maxa Borna w Berlinie. Uzyskano dobrą zgodność wyników eksperymentalnych i wyników modelowania, zaś występujące niewielkie rozbieżności mogły wynikać z pewnych uproszczeń przyjętych w modelowaniu numerycznym, nieuwzględniających wszystkich źródeł ciepła występujących w rzeczywistym przyrządzie. W celu skorelowania profili uzyskanych metodą termowizyjną z defektami struktury występującymi wewnątrz rezonatora laserowego, zaproponowałam, by obrazy termowizyjne były rejestrowane zarówno od strony przedniego zwierciadła, jak i poprzez specjalnie do tego celu wykonane ‘okna’ w metalizacji typu n, od strony podłoża chipu laserowego. Wyniki badań niezdefektowanej diody laserowej oraz diody z tzw. defektem ciemnej linii (ang. *Dark Line Defect*, DLD) w środkowej części rezonatora zaprezentowane są na rys. 5. Defekty DLD stanowią jedną z częstych przyczyn degradacji diod laserowych, wynikających z dyslokacji, które wspinając się i ślizgając tworzą skomplikowane sieci, prowadzące do powstania dość rozległych uszkodzeń w obszarze aktywnym i w podłożu diody laserowej [27]. Na skutek reabsorpcji promieniowania na takim centrum defektowym nastąpić może znaczny wzrost temperatury.



Rys. 5 Przekrój temperaturowy wzdłuż rezonatora dla niezdefektowanej (kółka) i zdefektowanej (kwadraty) diody laserowej zmierzony metodą termowizyjną (a) oraz rozkład intensywności promieniowania spontanicznego EL zarejestrowany kamerą CCD od strony górnej metalizacji dla diody zdefektowanej (b); przekroje temperaturowe w płaszczyźnie złącza zmierzone kamerą termowizyjną od strony przedniego zwierciadła dla niezdefektowanej (kółka) i zdefektowanej (kwadraty) diody laserowej (c) [H2].

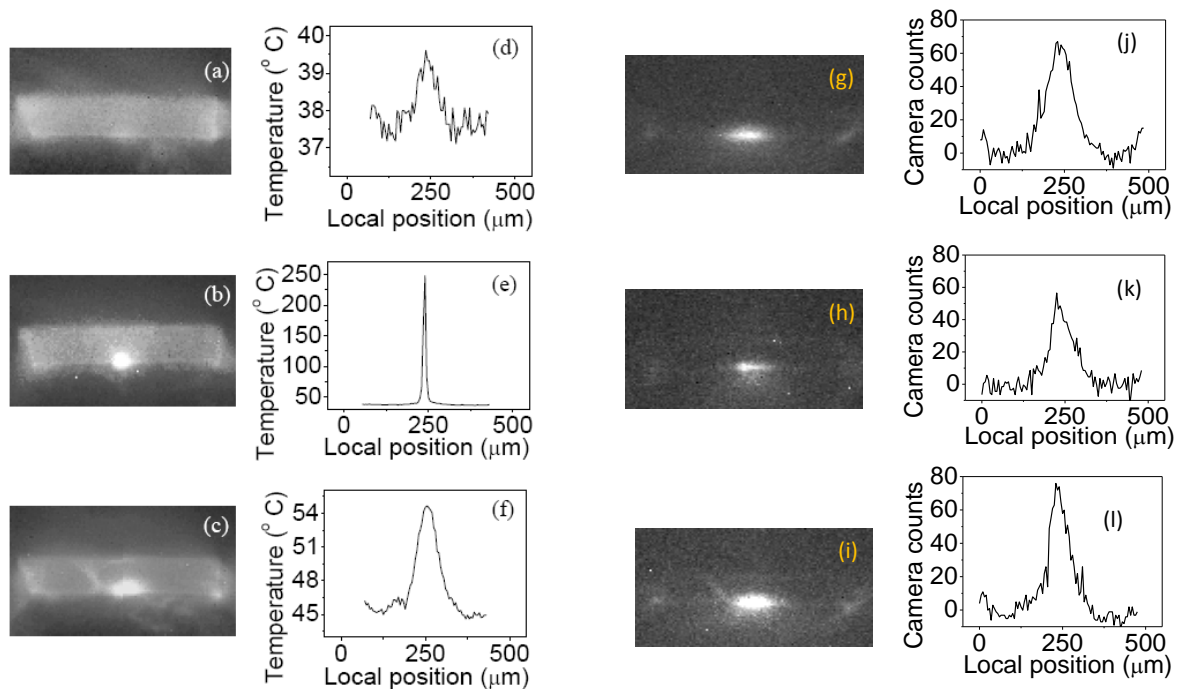
Efekt ten został uwidoczniony metodą termowizyjną poprzez obserwację rezonatora lasera od strony okna w n-kontakcie. Pokazany na rys. 5a wynik pomiaru termowizyjnego dla diody niezdefektowanej wskazuje na dość równomierny rozkład temperatury wzdłuż rezonatora (profil oznaczony otwartymi kółkami). Dla kolejnej diody zaobserwowano natomiast lokalny wzrost temperatury w środkowej części rezonatora (zamknięte kwadraty). Rozkład elektroluminescencji (EL) dla tej diody, zarejestrowany kamerą CCD, ujawnił występowanie

defektu DLD w środkowej części rezonatora (ciemny obszar, w których nie zachodzi rekombinacja promienista, rys. 5b). Profile temperatury w płaszczyźnie złącza widziane od strony przedniego zwierciadła dla obu rozważanych diod laserowych pokazane są na rys. 5c. Pokazują one wyraźnie, w jaki sposób defekt występujący wewnątrz rezonatora laserowego wpływa na profil temperaturowy zarejestrowany od strony przedniego zwierciadła (profil oznaczony zamkniętymi kwadratami). Wynik ten jest istotny z punktu widzenia metodyki nieniszczących badań pozwalających na wykrywanie zdefektowanych przyrządów.

Typowe, komercyjne diody laserowe nie mają zazwyczaj okien w górnej metalizacji, pozwalających na bezpośrednie wykrycie defektów struktury. W pracy pokazałam, że występujące anomalie można jednak wykryć już na podstawie analizy profili termicznych od strony zwierciadła przedniego, a po ustawieniu ostrości kamery termowizyjnej na punkcie znajdującym się wewnątrz rezonatora można ujawnić zlokalizowane gorące obszary, (w wyniku reabsorpcji promieniowania na defektach występujących wewnątrz rezonatora laserowego). **Wyniki pracy [H2] pokazują, że ze względu na częściową przezroczystość struktury laserowej w paśmie detekcji 3-5 μm , metodą termowizyjną można ujawnić nie tylko defekty znajdujące się w rejonie przedniego zwierciadła, ale również ‘ukryte’ głębiej w rezonatorze laserowym. Wyniki te wskazują na szczególną przydatność metody termowizyjnej do szybkiej, nieinwazyjnej detekcji defektów w diodach laserowych.**

Nowa metodyka wstępnej selekcji przyrządów, pozwalająca na wyeliminowanie diod laserowych zawierających centra defektowe, została przez mnie przedstawiona w publikacji [H5]. Tradycyjne testy selekcji typu ‘burn-in’, polegające na ok. 100 godzinnej pracy diody laserowej w warunkach nominalnych, bądź w warunkach podwyższonej temperatury lub podwyższonego prądu sterującego, nie zawsze przynosiły zadowalające rezultaty. **Praca [H5] stanowi pierwsze w literaturze światowej doniesienie ta temat wykorzystania dwukanałowego systemu termowizyjnego do wstępnej selekcji diod laserowych rokujących długi czas życia. Układ ten, zaproponowany przeze mnie wcześniej do charakteryzacji matryc diod laserowych [25], został tu wykorzystany jako narzędzie do nieinwazyjnej diagnostyki indywidualnych diod laserowych.** Dla pełniejszego poznania mechanizmów degradacji diod laserowych AlGaAs/GaAs, oprócz pomiarów termowizyjnych wykonaliśmy niskosygnałową charakteryzację prądowo-napięciową oraz przeprowadziliśmy badania metodą spektroskopii fotoprądowej. Testy niezawodnościowe zostały wykonane dla serii 30 diod laserowych o bardzo zbliżonych charakterystykach mocy optycznej w funkcji prądu sterującego, zaś szczegółowe wyniki przedstawiono dla kilku reprezentatywnych przyrządów. W pierwszym etapie zarejestrowane zostały mapy termowizyjne dla dwóch zakresów spektralnych MIR i NIR, zmierzone charakterystyki I-V oraz wyznaczone współczynniki idealności w trzech zakresach napięciowych. Następnie wykonane zostały testy starzeniowe, trwające 1000 godz. (przeprowadzone w temperaturze pokojowej). Wyniki badań w paśmie MIR i NIR dla wybranych przyrządów oznaczonych *A1*, *A2* i *A3*, dla których odnotowano degradację w trakcie testów starzeniowych, pokazane są na rys. 6. Dioda *A1* jest przykładem przyrządu o umiarkowanie długim czasie życia (testy starzeniowe wykazały jej degradację po 570 h pracy ciągłej). We wstępnych testach termowizyjnych (przed rozpoczęciem testów starzeniowych) wykazywała ona podwyższony poziom luminescencji w

paśmie NIR (rys. 6 g,j). Należy zauważyć, że typowe testy ‘burn-in’ nie wychwyciłyby tej diody jako potencjalnie krótko-żyjącego przyrządu. Przykładem przyrządu wykazującego szybką degradację jest natomiast dioda oznaczona jako *A2*, posiadająca defekt na przednim zwierciadle. Zarówno wyniki badań termowizyjnych w paśmie MIR (rys. 6 b,e), jak i wyniki niskoprądowej charakteryzacji I-V wskazały na istnienie obszaru o podwyższonej rekombinacji niepromienistej i zwiększonej gęstości stanów powierzchniowych w obszarze zwierciadła. Z kolei w paśmie NIR nie odnotowano anomalnego zachowania (rys. 6 h,k). Wyniki wstępnej charakteryzacji dla kolejnego przyrządu, *A3*, również wskazywały na niebezpieczeństwo szybkiej degradacji, potwierdzone w późniejszych testach starzeniowych. Świadczył o tym podwyższony sygnał w obu rozważanych zakresach spektralnych (rys. 6 c,f,i,l), jak również podwyższona wartość współczynnika idealności (w zakresie napięciowym 1,25-1,35V).



Rys. 6 Wyniki charakteryzacji przykładowych diod laserowych (od góry: *A1*, *A2* i *A3*) w pasmach MIR (a-f) i NIR (g-l) wykonane w celu wstępnej selekcji przyrządów rokujących długi czas życia [H5], [H9].

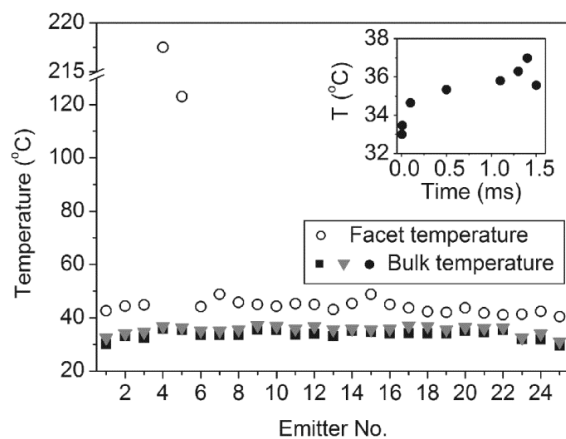
Wyniki eksperymentu zaprezentowanego w publikacji [H5] w sposób jednoznaczny wskazały na przydatność metody termowizyjnej do celów wstępnej selekcji przyrządów. W szczególności, w przypadku przyrządów, dla których defekty ujawniały się w paśmie 3-5 μm w trakcie testów starzenia następowała stosunkowo szybka degradacja. W paśmie NIR sytuacja jest bardziej złożona. Wyniki późniejszych prac, wykonanych przy zastosowaniu wysokorozdzielczej fotoprądowej mikroskopii pola bliskiego, wskazały podłoże jako obszar, z którego pochodzi obserwowana w paśmie NIR luminescencja [30, 31]. Sam mechanizm powstawania tej luminescencji nie został jednak w sposób jednoznaczny wyjaśniony. Najprawdopodobniej część promieniowania spontanicznego ze studni kwantowej pobudza emisję w podłożu na skutek przejść międzypasmowych i przejść pomiędzy pasmem

przewodzenia a poziomem defektywnym poprzez kaskadowy proces recyklingu fotonów [30]. Podwyższony poziom luminescencji w paśmie NIR, obserwowany dla niektórych diod laserowych, mógł być więc spowodowany zarówno podwyższonym poziomem emisji spontanicznej ze studni kwantowej, jak i zwiększoną liczbą defektów punktowych w podłożu. Może to tłumaczyć zaobserwowaną korelację pomiędzy podwyższonym poziomem intensywności luminescencji w paśmie NIR a późniejszą degradacją diod laserowych. Korelacja ta została potwierdzona w późniejszych pracach dotyczących tej tematyki, np. w [31].

Praca [H11] przedstawia wyniki wykorzystania przez mnie wysokorozdzielczej termografii do analizy własności termicznych diod laserowych emitujących w paśmie 650 nm i 808 nm. Generalnym problemem dla serii ‘czerwonych’ diod laserowych był dość krótki czas życia i duży stopień zdefektowania struktur. Z powodu stosunkowo wysokiej energii kwantu, w porównaniu z przyrządami emitującymi w paśmie podczerwieni, wzrasta tu prawdopodobieństwo występowania defektów sieciowych. Dość niskie przewodnictwo cieplne materiałów wchodzących w skład heterostruktury (InGaAlP, a w szczególności InAlP) może skutkować stosunkowo wysokimi rezystancjami termicznymi przyrządów. Efekty ujawniły się w trakcie badań termowizyjnych dla serii pojedynczych diod laserowych o długości rezonatora $L=1$ mm, bazujących na komercyjnej heterostrukturze SQW (InGaP/InGaAlP/InAlP). Pomiar termowizyjny pozwoliły na wizualizację szeregu defektów strukturalnych, które zostały skorelowane z obserwacjami rozkładów promieniowania w polu bliskim za pomocą kamery CCD (objawiającymi się w postaci lokalnego zaniku luminescencji). Na podstawie danych eksperymentalnych uzyskanych metodą termowizyjną, wyznaczyłam rezystancje termiczne R_{th} badanych przyrządów, uzyskując dość wysokie wartości rzędu 17 - 23 °C/W. Niższe temperatury pracy, jak również niższe rezystancje termiczne uzyskano dla przyrządów emitujących w paśmie 808 nm. Oprócz analizowanej wcześniej struktury DB SCH, w pracy zawarłam wyniki badań diod laserowych GaAsP/AlGaAs/GaAs zawierających heterostrukturę asymetryczną z rozdzielonym ograniczeniem (ang. *Asymmetric Separate Confinement Heterostructure*, ASCH) oraz ze zmniejszoną odległością warstwy aktywnej od chłodnicy laserowej. Dość grube warstwy ograniczające występujące w heterostrukturze DBSCH są elementem limitującym rezystancje elektryczną i termiczną tych przyrządów. Zaprojektowana asymetria falowodu heterostruktury miała na celu przesunięcie pola optycznego w kierunku strony n, gdzie występują mniejsze straty na swobodnych nośnikach, niż po stronie p. Zostało to zrealizowane poprzez wprowadzenie dodatkowej, cienkiej warstwy antyfalowodowej, umieszczonej pomiędzy obszarem aktywnym a pasywnym falowodem, która zwiększa penetrację pola optycznego w kierunku strony n. Zmniejszona została grubość warstwy ograniczającej typu p, co w efekcie pozwoliło na obniżenie rezystancji elektrycznej i termicznej przyrządu. **Wyniki pomiarów termowizyjnych wskazały na obniżenie temperatury pracy przyrządu w stosunku do diod laserowych opartych na strukturze symetrycznej. Jeśli chodzi o rezystancje termiczne, to rozrzut wyznaczonych wartości R_{th} , wynikający z dużej ilości parametrów technologicznych, determinujących własności termiczne rzeczywistych przyrządów, utrudnił znacznie tę analizę.** Dodatkowych informacji dostarczyły czasowo-rozdzielcze pomiary spektralne dla diod zawierających

strukturę asymetryczną i symetryczną. Mniejsze przesunięcie w kierunku fal dłuższych widma emisji diody ASCH w trakcie pierwszych kilku mikrosekund od początku impulsu, wskazuje na polepszone usuwanie ciepła z obszaru bezpośrednio bliskiego studni kwantowej [32]. **Należy zauważyć, że dla serii diod laserowych ASCH, w badaniach termowizyjnych nie wykryto anomalii w postaci np. ‘gorących’ punktów. Z punktu widzenia niezawodności przyrządów, był to wyniki obiecujący.**

Problematyce defektów w obszarze zwierciadeł poświęcona jest praca [H10]. Przy zastosowaniu trzech komplementarnych technik pomiaru temperatury: metody termoodbicia, metody termowizyjnej oraz analizy temperaturowego przesunięcia widma badane były rozkłady termiczne dla komercyjnej matrycy diod laserowych AlGaAs/InAlGaAs. W pierwszym etapie zarejestrowano mapy termowizyjne, ujawniające typowe dla matryc chłodzonych pasywnie rozkłady z podwyższoną temperaturą na środku matrycy, w stosunku do jej brzegów. W obszarze jednego z emiterów uwidoczniony został lokalny wzrost temperatury. Następnie, za pomocą metody termoodbicia, wyznaczone zostały wysokorozdzielcze rozkłady temperatury w obszarze przedniego zwierciadła matrycy. Dla uzyskania ilościowej informacji o temperaturze zwierciadeł, zmierzono odbicie od zwierciadła w funkcji temperatury przyrządu, co pozwoliło na wyznaczenie charakterystyk kalibracyjnych (w obszarze podłoża GaAs i dla heterostruktury laserowej). W takich samych warunkach zasilania, jak przy badaniach metodą TR, zmierzone zostały charakterystyki spektralne matrycy z rozdzielczością czasową i przestrzenną. Pozwoliły one na wyznaczenie uśrednionej temperatury obszarów aktywnych matrycy w funkcji czasu.



Rys. 7 Temperatura zwierciadeł dla kolejnych emiterów wyznaczona metodą TR (oznaczona otwartymi kółkami) oraz temperatura wewnątrz rezonatora wyznaczona metodą WT (0,5 μ s i 1,5 ms od początku trwania impulsu, odpowiednio kwadraty oraz trójkąty), w reżimie pracy QCW. Na wykresie wewnętrznym pokazany jest wzrost temperatury wewnątrz rezonatora w trakcie trwania impulsu (oznaczony zamkniętymi kółkami) [H10].

Wyniki porównania temperatury wewnątrz rezonatora (uzyskany metodą WT) i na zwierciadle (uzyskany metodą TR) pokazany jest na rys. 7. Wskazuje on na stosunkowo niewielki wzrost temperatury na zwierciadle w stosunku do wnętrza rezonatora (5-12°C). Dla dwóch emiterów matrycy zarejestrowane mapy termoodbicia ujawniły występowanie obszarów o podwyższonej lokalnie temperaturze. Obszar występowania defektów był wcześniej wykryty za pomocą metody termowizyjnej, jednakże w trakcie pracy matrycy mogła nastąpić jej dalsza degradacja. **Uzyskane wyniki wskazują na atrakcyjność metody termoodbicia jako bardzo precyzyjnego narzędzia do pomiarów temperatury zwierciadeł matryc diod laserowych. Wyniki potwierdziły również wskazywaną w**

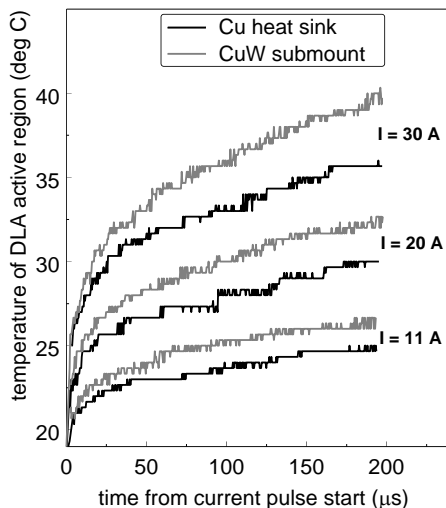
poprzednich pracach przydatność metody termowizyjnej do szybkiego wykrywania defektów występujących w obszarze zwierciadeł laserowych.

2.3 Własności termiczne diod i matryc laserowych z pasywnym oraz aktywnym sposobem chłodzenia

Zarówno pojedyncze diody laserowe, jak i matryce diod są elementami pracującymi w warunkach bardzo dużych gęstości mocy, rzędu 7 kW/cm^2 (gęstość dostarczanej mocy elektrycznej), dlatego kluczowe znaczenie dla ich niezawodnej pracy miało skuteczne odprowadzanie ciepła z obszaru aktywnego i utrzymanie właściwych temperatur pracy. W światowych ośrodkach badawczych, pierwsze lata XXI wieku były okresem poszukiwań efektywnych metod odprowadzania ciepła, zarówno dla chłodzonych pasywnie przyrządów mniejszej mocy, jak i dla matryc diod laserowych dużej mocy, gdzie stosowano chłodzenie aktywne z przepływem cieczowym [33-37]. Przy opracowywaniu konstrukcji układu odprowadzania ciepła diod laserowych uwzględniano aspekty związane z ich niezawodnością. W przypadku diod laserowych naprężenia występujące w obszarze aktywnym powodują zmianę struktury pasmowej półprzewodnika. Zmiana ta uwidacznia się poprzez zmianę szerokości przerwy energetycznej oraz odstępów pomiędzy podpasмами ciężkich i lekkich dziur. Niekorzystny rozkład naprężeń jest najczęściej wprowadzony na etapie lutowania chipu matrycy do obudowy. Wielkość tych naprężeń zależy zarówno od własności materiału lutowni, jak i samej chłodnicy do której jest montowany chip laserowy. Prace badawcze w tamtym okresie koncentrowały się na minimalizacji naprężeń wprowadzanych na etapie procesu technologicznego, wynikających z różnic we współczynnikach rozszerzalności cieplnej (ang. *Coefficient of Thermal Expansion*, CTE) poszczególnych elementów. Opracowywane konstrukcje obudów diod i matryc laserowych wykorzystywały materiały o odpowiednio dopasowanym CTE, problem naprężeń brany był pod uwagę przy doborze składu lutowni oraz materiałów na pokrycia, kontakty, izolacje, itp. [37].

Praca [H4], poświęcona jest analizie własności termicznych matryc diod laserowych GaAsP/AlGaAs/GaAs pracujących w reżimie QCW. Typowo stosowany reżim pracy QCW, związany z warunkami pompowania optycznego laserów z ośrodkiem aktywnym z granatu itrowo-glinowego domieszkowanego neodymem (Nd:YAG), obejmował impulsy zasilające o czasie trwania 100-200 μs i repetycji 50-100 Hz. Zarówno badane matryce, jak i materiały kompozytowe, z których wytworzone zostały chłodnice, były w całości opracowane i wykonane w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych. Dotychczasowe doświadczenia w montażu matryc diod laserowych ujawniały bardzo duży wpływ naprężeń montażowych na charakterystyki elektrooptyczne przyrządów, powodujący w ekstremalnych przypadkach kilkukrotny spadek mocy emiterów brzegowych w stosunku do środka matrycy. Po raz pierwszy, we współpracy z zespołem technologicznym, matryce wykonane w ITME zostały zmontowane na chłodnicach z kompozytu Cu-W, o CTE dopasowanym do materiału diody laserowej. Badalam przebiegi czasowe, uśrednione dla wszystkich emiterów matryc, porównując je z przebiegami referencyjnymi zarejestrowanymi dla przyrządu zmontowanego na chłodnicy miedzianej (rys. 8). Uzyskane wyniki pozwoliły mi na oszacowanie cyklicznego obciążenia termicznego, jakiemu poddawane są matryce w trakcie pracy

impulsowej. W pracy zawarłam również wskazania odnośnie najbardziej odpowiednich materiałów na chłodnice laserowe. **Wyniki pracy [H4] były istotne z punktu widzenia głównego celu prac, jakim była poprawa niezawodności opracowywanych diod i matryc laserowych, zaś proponowane rozwiązania dotyczące materiałów o dopasowanym CTE zostały na trwale wprowadzone do konstrukcji układów odprowadzania ciepła dla przyrządów laserowych wytwarzanych w ITME.**

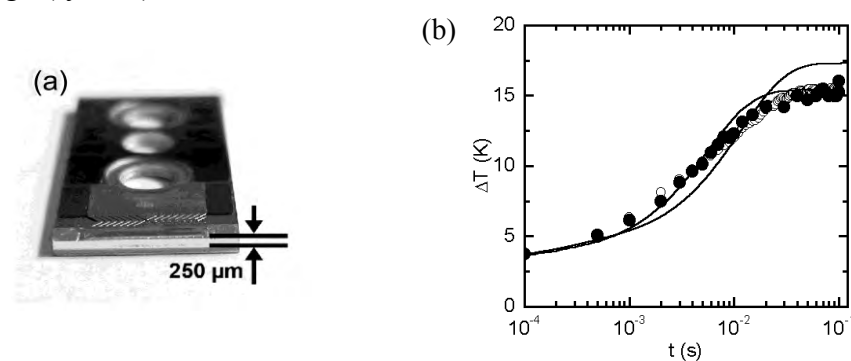


Rys. 8 Temperatura obszaru aktywnego w funkcji czasu dla dwóch matryc diod laserowych zmontowanych na chłodnicach z różnych materiałów (Cu i CuW) [H4].

Dwuwymiarowy analityczny model rozptyłu ciepła w szerokopaskowej diodzie laserowej, chłodzonej w sposób pasywny za pomocą chłodnicy miedzianej, został przedstawiony w artykule [H6]. Wcześniejsze prace dotyczące tego zagadnienia często zakładały istnienie idealnej chłodnicy, wykonanej z materiału o nieskończonej przewodności cieplnej. W rzeczywistych układach warunek ten nie jest spełniony, zaś w pracy zaproponowano zmianę geometrii układu pozwalającą na poprawę modelu (uzupełnienie prostokątnego stosu warstw o różnych grubościach i przewodnictwach cieplnych o dodatkową warstwę o odpowiednio dobranej szerokości). Praca ma charakter teoretyczny, zaś dla weryfikacji modelu przeprowadziliśmy porównanie wyników modelowania z wynikami eksperymentalnymi. Mój udział w tej pracy nie miał charakteru wiodącego, był jednak istotny z punktu widzenia weryfikacji wyników modelowania i polegał na zaprojektowaniu części eksperymentalnej prac, dokonaniu selekcji i pomiarów rezystancji termicznych diod laserowych emitujących w paśmie 808 nm, współdziałanie w ich wykonaniu oraz na współredagowaniu manuskryptu. Zarówno dla diod emitujących w paśmie 808 nm, jak i przyrządów na pasmo 980 nm uzyskaliśmy pewne rozbieżności pomiędzy wynikiem eksperymentalnym a wyliczeniami teoretycznymi. Podczas, gdy R_{th} wyznaczone z eksperymentu było w zakresie 11-13 K/W dla dwóch różnych heterostruktur na pasmo 808 nm (heterostruktury DB SCH różniące się grubością warstw AlGaAs), to wartości teoretyczne wynosiły 7,3 oraz 7,4 K/W. Podobnie w przypadku przyrządów emitujących w paśmie 980 nm, eksperyment wskazał na wartości wyższe niż uzyskane z opracowanego modelu rozptyłu ciepła. Najbardziej prawdopodobną przyczyną rozbieżności jest nieuwzględnienie w modelowaniu niedoskonałości warstwy lutowniczej. W rzeczywistych przyrządach warstwa lutownicza może zwierać puste pory powietrzne ('voidy'), których

rozmiar i ilość są trudne do oszacowania, ale które sposób znaczący mogą zmniejszyć przewodnictwo cieplne warstwy.

Szereg zastosowań matryc laserowych wymaga dokładnej stabilizacji długości fali emitowanego promieniowania. Jest to istotne np. w przypadku pompowania optycznego laserów na ciele stałym, gdzie długość fali światła diody pompującej powinna ściśle odpowiadać pasmu absorpcji materiału aktywnego. W trakcie pracy impulsowej matrycy następuje periodyczna zmiana temperatury obszaru aktywnego, a co za tym idzie, również przestrajanie długości fali w czasie trwania impulsu. **W literaturze światowej brakowało informacji dotyczących zmian temperatury obszaru aktywnego w trakcie trwania impulsu dla typowych schematów chłodzenia: pasywnego i aktywnego. Moim pomysłem było podjęcie tego istotnego z punktu widzenia użytkowników matryc zagadnienia, a wynikiem prac jest artykuł [H7].** Modelowanie własności termicznych dwóch typów matryc zostało przeprowadzone w Instytucie Fizyki Politechniki Łódzkiej, w grupie prof. W. Nakwaskiego, zaś pomiary temperatury obszaru aktywnego w matrycy laserowej zostały wykonane metodą termograficzną oraz metodą analizy przesunięcia temperaturowego widm emisji we współpracy z Instytutem Maxa Born'a w Berlinie. Badaliśmy komercyjne matryce (In)GaAlAs/GaAs zmontowane na monolitycznych chłodnicach miedzianych (chłodzenie pasywne) oraz na chłodnicach mikro-kanalowych (chłodzenie aktywne). W tym drugim przypadku stosowane było chłodzenie wodne, a kanały umieszczone były w biskiej odległości 250 μm od chłodzonego obszaru aktywnego. Fotografia chłodzonej aktywnie matrycy pokazana jest na rys. 9a. Porównanie wyników modelowania (przeprowadzonego metodą elementów skończonych dla układu składającego się z wielu warstw o różnych, zależnych od temperatury przewodnościach cieplnych) z wynikami uzyskanymi eksperymentalnie wskazało na dobrą zgodność, szczególnie w przypadku chłodzenia aktywnego (rys 9 b).

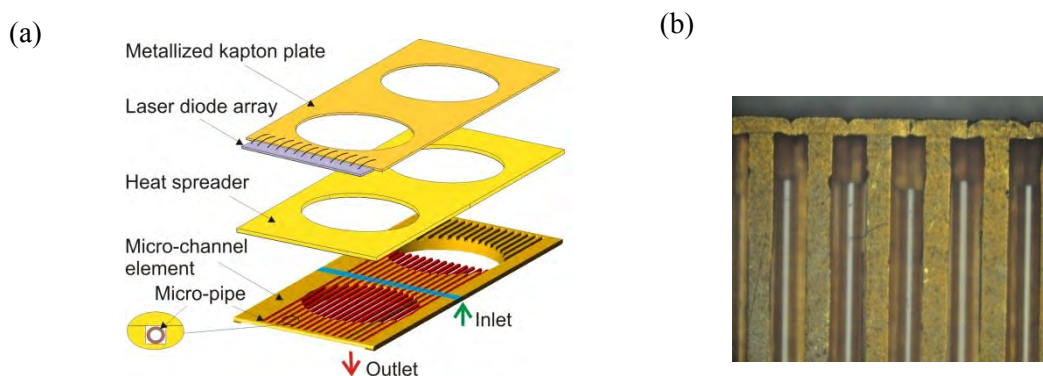


Rys. 9 Fotografia matrycy laserowej zmontowanej na chłodnicy mikrokanalowej (a) oraz zarejestrowany dla tego przyrządu wzrost temperatury obszaru aktywnego dla środkowego emitera matrycy (w stosunku do 25 $^{\circ}\text{C}$) (b). Otwartymi kółkami oznaczono przebieg uzyskany metodą termowizyjną, zamkniętymi kółkami metodą WT, zaś liniami ciągłymi oznaczono wyniki modelowania FEM, przy uwzględnieniu możliwego rozrzutu parametrów materiałowych, w szczególności pojemności cieplnych elementów chłodnicy [H7].

W przypadku chłodzenia pasywnego, metoda termowizyjna pozwoliła na wyznaczenie przebiegów termicznych nie tylko dla obszaru aktywnego matrycy, ale również kilku dla obszarów na chłodnicy miedzianej. W szczególności, przebiegi dla dolnej części chłodnicy,

w odległości 5,9 mm od obszaru aktywnego wskazały, że przyjęty w założeniach modelowania warunk izotermiczny nie został spełniony eksperymentalnie, co w efekcie dało wydłużone czasy uzyskiwania przez układ stanu ustalonego. W przypadku chłodzenia pasywnego czasy te wynosiły kilka sekund. Dla chłodzenia aktywnego układ uzyskiwał równowagę termiczną po ok. 30 ms. Wyznaczone w pracy stałe czasowe przebiegów temperaturowych dla kilku analizowanych obszarów stanowią cenną informację dla użytkowników komercyjnych matryc laserowych emitujących w paśmie 808 nm.

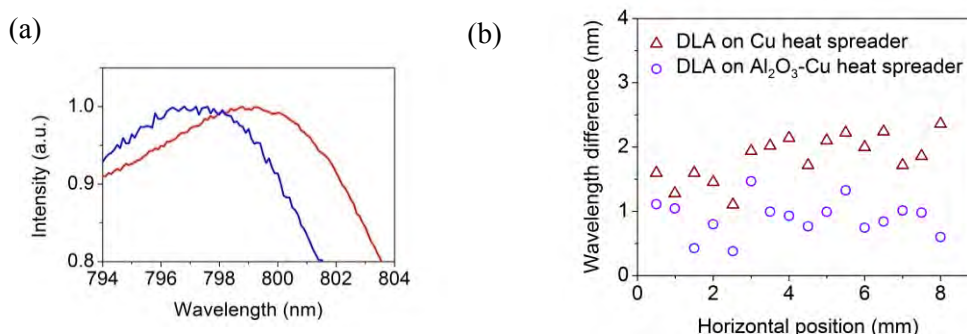
Zwielokrotnienie mocy optycznej uzyskiwanej z pojedynczej matrycy laserowej uzyskuje się poprzez składanie matryc w stos, a w rozwiązaniach konstrukcyjnych dąży się do uzyskania możliwie niewielkiej odległości pomiędzy poszczególnymi matrycami w celu osiągnięcia maksymalnej gęstości mocy optycznej. Jest to szczególnie istotne w zastosowaniach pompowania optycznego dielektrycznych ośrodków aktywnych. Aby spełnić te wymagania **zapropowaliśmy nową, kompaktową konstrukcję chłodnicy mikrokanalowej (praca [H12]).** Nowością pracy w stosunku do istniejących rozwiązań było **zapropowanie zmodyfikowanej drogi cyrkulacji wody poprzez zastosowanie mikro-rurek, dzięki czemu konstrukcja zawiera mniejszą ilość warstw składowych.** W efekcie, udało się zminimalizować odległość pomiędzy poszczególnymi matrycami w stosie (do 1 mm), co jest bardzo dobrym wynikiem w porównaniu do rozwiązań komercyjnych, gdzie ta odległość wynosiła 1,6 – 1,9 mm [38-40]. Zaproponowana modułowa konstrukcja układu pozwala na umieszczanie w stosie od 1 do 10 matryc diod laserowych. Schemat chłodnicy przedstawiony jest na rys. 10a. Matryca diod laserowych montowana jest na odpowiednio skonstruowanej płytce nakrywkowej, umieszczonej bezpośrednio nad kanałami wodnymi, dzięki czemu odległość obszaru aktywnego od cieczy chłodzącej jest ograniczona jedynie grubością płytki. Płytkę nakrywkową pełni jednocześnie rolę elementu rozpraszającego ciepło i jest wykonana z miedzi lub z materiału o niższym w stosunku do miedzi współczynniku rozszerzalności termicznej.



Rys. 10 Schemat układu chłodzenia matrycy diod laserowych (a) oraz fotografia chłodnicy mikrokanalowej z umieszczonymi mikro-rurkami (b) [H12].

W omawianej partii prototypowej chłodnicy mikrokanalowe zostały wykonane przy użyciu specjalnie opracowanego procesu galwanicznego (rys. 10b). Sposób wykonania mikrokanalów został opatentowany (patent nr 223961, P.404682 pt. "Sposób wytwarzania mikrokanalów i/lub łączenia i uszczelniania metalowych, zwłaszcza miedzianych, chłodnic

mikro-kanalowych”, którego jestem pierwszą autorką). Na prototypowych chłodnicach zostały zmontowane komercyjne matryce laserowe oraz matryce wytworzone w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych. W celu przeprowadzenia charakteryzacji elektro-optycznej i termicznej zbudowałam nowe stanowisko pomiarowe dedykowane dla chłodzonych aktywnie matryc diod laserowych dużej mocy, pozwalające na jednoczesną kontrolę całego stosu złożonego z 10 matryc diod laserowych. Wyniki eksperymentalne wskazały na skuteczne odprowadzanie ciepła za pomocą nowego układu, co zostanie bliżej przedstawione w dalszej części autoreferatu. W celu określenia naprężeń montażowych dla matrycy zmontowanej na płytce z kompozytu metalowo-ceramicznego Cu-Al₂O₃ oraz na referencyjnej płytce miedzianej, zmierzone zostały widma fotoluminescencji dla poszczególnych emiterów matrycy (przez montażem oraz po zmontowaniu matryc). Dla każdego z emiterów obserwowane było przesunięcie widma fotoluminescencji na skutek modyfikacji struktury pasmowej, w wyniku wprowadzonych naprężeń montażowych (widma dla przykładowego emitera pokazane są na rys. 11a). Rys. 11b zawiera zestawienie wyznaczonych różnic długości fali światła dla dwóch rozważanych matryc. Ponieważ przesunięcie widma fotoluminescencji w kierunku krótkofalowym o 0,07 nm odpowiada wprowadzonemu naprężeniu ściskającemu rzędu 1 MPa (dla objętościowego GaAs) [37], wyniki wskazują, że dla matrycy zmontowanej na płytce nakładkowej z kompozytu metalowo-ceramicznego Cu-Al₂O₃ udało się uzyskać znaczne zmniejszenie naprężeń w stosunku do układu referencyjnego zawierającego chłodnicę miedzianą.

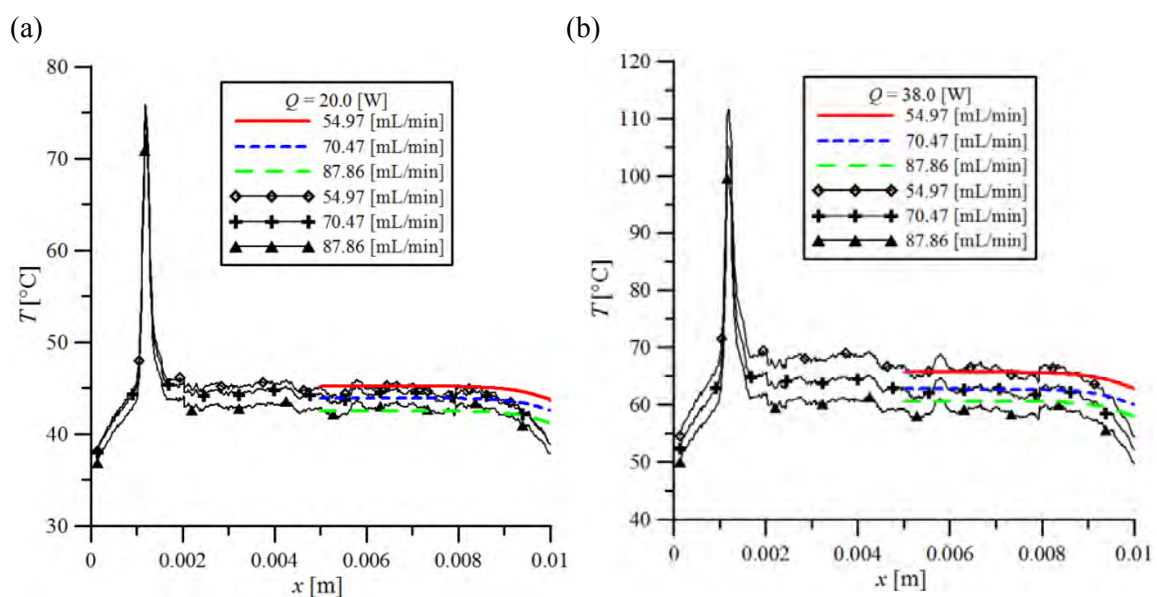


Rys. 11 (a) Przykładowe widma fotoluminescencji dla jednego z emiterów matrycy laserowej przed montażem (linia czerwona) i po zmontowaniu na miedzianej płytce nakrywkowej (linia niebieska); (b) wyznaczone różnice maksymalnych długości fali światła (przed i po montażu) dla poszczególnych emiterów matryc zmontowanych na podkładkach z różnych materiałów [H12].

Bardziej szczegółowa analiza opracowanego układu chłodzenia została zawarta w publikacji [H13]. Praca zawiera wyniki eksperymentalne oraz wyniki modelowania numerycznego i została przeprowadzona we współpracy z zespołem Instytutu Techniki Ciepłej na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. Wykonany został pełny trójwymiarowy model geometryczny, dokładnie odzwierciedlający opracowany układ chłodzenia. Wykorzystany został do tego celu program *Ansys Design Modeler*, na bazie którego utworzono następnie siatkę objętości kontrolnych. Siatka została odpowiednio zagęszczona w obszarze bezpośrednio pod matrycą diod laserowych i w przerwach pomiędzy mikro-rurkami a ściankami mikro-kanalów. Przyjęto, że przepływ

cieczy na początkowym odcinku (w mikro-rurkach i w przestrzeniach między rurkami i ściankami chłodnicy) jest laminarny, jednak w przestrzeni bezpośrednio pod diodą laserową może lokalnie stać się turbulentny. Równania Reynoldsa transportu pędu, ciepła i masy w kanałach zostały uzupełnione równaniami transportu energii dyssypacji i energii kinetycznej turbulencji.

Wykonano serię symulacji numerycznych dla różnych traconych w matrycy laserowej mocy cieplnych oraz dla różnych szybkości przepływu cieczy. Wyniki zostały porównane z eksperymentalnymi rozkładami temperatury zarejestrowanymi metodą termowizyjną (rys. 12). Uzyskano bardzo dobrą zgodność wyników eksperymentalnych i wyników modelowania numerycznego, szczególnie dla środkowej części matrycy. Pewne rozbieżności na brzegach mogą wynikać z niejednorodnej rezystancji termicznej warstwy lutownia. Piek temperaturowy widoczny w wynikach eksperymentalnych wynika z uszkodzenia jednego z emiterów.



Rys. 12 Eksperymentalne rozkłady temperatury w płaszczyźnie złącza zarejestrowane metodą termowizyjną (czarne linie ciągłe z symbolami) oraz wyniki symulacji numerycznych (zielona, niebieska i czerwona linia) dla różnych szybkości przepływu cieczy oraz dla różnych traconych w matrycy laserowej mocy cieplnych Q ($Q = 20$ W (a) i $Q = 38$ W (b)) [H13].

Zaproponowany w pracy układ chłodzenia został porównany z innymi rozwiązaniami chłodnic mikro-kanałowych. Wyniki pracy potwierdzają przydatność nowej kompaktowej konstrukcji chłodnicy mikro-kanałowej zawierającej mikro-rurki do celów aktywnego chłodzenia matryc laserowych dużej mocy, zaś uzyskana zgodność wyników eksperymentalnych i wyników modelowania numerycznego mieści się w granicach błędów uzyskiwanych w tego typu analizach.

3. Podsumowanie

W mojej ocenie, do najważniejszych osiągnięć opisanych w publikacjach [H1-H13], stanowiących osiągnięcie w rozumieniu art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.) należą:

1. **Optymalizacja parametrów wyjściowych diod laserowych dużej mocy, takich jak rozbieżność wiązki w płaszczyźnie prostopadłej do złącza i moc optyczna oraz opracowanie metod charakteryzacji optycznej i elektrooptycznej tych przyrządów, w szczególności:**

W publikacji [H1]:

- Przeprowadzenie analizy rozkładów pól optycznych diod laserowych w strefie dalekiej, wskazującej na zdecydowaną przewagę rozwijanej w ITME konstrukcji DB SCH nad typową konstrukcją z pojedynczą studnią kwantową i rozdzielonym ograniczeniem, co dało w efekcie niższą rozbieżność wiązki w kierunku prostopadłym do złącza oraz mniejszą gęstość mocy optycznej w falowodzie; zbadanie wpływu parametrów procesu technologicznego tworzącego pasek aktywny na rozkłady pola optycznego w płaszczyźnie złącza.
- Zaproponowanie nowej metody pomiaru silnie rozbieżnych wiązek diod laserowych za pomocą zmodyfikowanej kamery CCD, uzyskanie wymaganej dokładności pomiaru dzięki opracowanemu oprogramowaniu uwzględniającemu kształt powierzchni detektora, geometrię układu oraz współczynniki załamania poszczególnych elementów toru optycznego.

W publikacji [H3]:

- Opracowanie metodyki i wykonanie badań optycznych i elektrooptycznych diod laserowych GaAsP/AlGaAs/GaAs, zawierających różne wersje heterostruktur DB SCH; zademonstrowanie niskich rozbieżności wiązki w kierunku prostopadłym do złącza (14° - 13° , wg wiedzy autorów wartości najniższe na świecie dla przyrządów emitujących w paśmie 800 nm) oraz wysokich mocy optycznych, rzędu 2,5 W w warunkach pracy ciągłej z pojedynczego przyrządu.

W publikacji [H8]:

- Eksperymentalne potwierdzenie i obserwacja zaprojektowanych różnic szerokości rozkładu modu optycznego diod laserowych, które ze względu na submikronowe rozmiary struktury falowodowej nie mogą być wyznaczone metodami optyki tradycyjnej.
- Wyjaśnienie specyficznych cech metody wysokorozdzielczej fotoprądowej mikroskopii pola bliskiego, warunkujących powstawanie sygnału pomiarowego w przypadku badań rozkładu modu optycznego diod laserowych, co pozwoliło na wykazanie, że metoda to stanowi niezwykle precyzyjne, unikatowe narzędzie do pomiaru rozkładów pola optycznego w strukturach laserowych.

2. Zaproponowanie nowych i rozwinięcie istniejących metod badań termicznych oraz metod wykrywania defektów, a także przeprowadzenie szeregu badań przyrządowych dających wskazania dla zespołów technologicznych w celu podwyższenia niezawodności diod i matryc laserowych dużej mocy, w szczególności:

W publikacjach [H2], [H5], [H7], [H9-H13]:

- Implementacja i rozwinięcie metody wysokorozdzielczej termowizji w paśmie MIR (3-5 μm) jako zaawansowanego narzędzia do nieinwazyjnej diagnostyki diod laserowych. Metoda ta zaczęła być z powodzeniem stosowana nie tylko w badaniach naukowych, ale również w pracach rozwojowych prowadzonych w ośrodkach przemysłowych produkujących diody laserowe na dużą skalę.

W publikacji [H2]:

- Zaproponowanie metodyki pomiarów termowizyjnych w paśmie 3-5 μm dla celów profilowania termicznego diod laserowych i pokazanie zalet tej metody w stosunku do używanych wcześniej metod pomiaru temperatury.
- Skorelowanie profili termicznych rejestrowanych od strony przedniego zwierciadła z występowaniem defektów struktury wewnątrz rezonatora laserowego, zarejestrowanych poprzez specjalnie do tego celu wykonane 'okna' w górnej metalizacji diody laserowej; wykazanie przydatności metody termowizyjnej do nieinwazyjnych badań przyrządów pozwalających na szybką detekcję defektów.

W publikacji [H4]:

- Zaprojektowanie i uruchomienie nowego stanowiska do pomiaru czasowo-rozdzielczych charakterystyk spektralnych matryc diod laserowych, przydatnego do pomiarów w różnych, również nietypowych pasmach spektralnych, gdzie analiza czasowo-rozdzielcza może być utrudniona.
- Przeprowadzenie badań cyklicznego obciążenia termicznego, jakiemu poddawane są matryce diod laserowych w trakcie pracy w reżimie QCW, zaproponowanie rozwiązań dotyczących materiałów o dopasowanym CTE w konstrukcji układów odprowadzania ciepła w celu poprawy niezawodności opracowywanych w ITME diod i matryc laserowych.

W publikacji [H5]:

- Zaproponowanie (wg mojej wiedzy po raz pierwszy w świecie) wykorzystania dwukanałowej metody termowizyjnej do wstępnej selekcji diod laserowych rokujących osiągnięcie długiego czasu życia.
- Przeprowadzenie badań niezawodnościowych serii przyrządów i skorelowanie ich z wynikami badań kamerą termowizyjną w pasmach NIR i MIR oraz metodami spektroskopii fotoprądowej i niskosygnałowej charakteryzacji prądowo-napięciowej, co pozwoliło na opisanie sposobu degradacji opracowywanych w ITME diod laserowych AlGaAs/GaAs.

W publikacji [H9]:

- Analiza literaturowa wybranych aspektów odwzorowania termicznego w pasmach NIR i MIR w odniesieniu do diod laserowych dużej mocy (z uwzględnieniem prac własnych

dotyczącej tej tematyki), zademonstrowanie możliwości metody do celów profilowania termicznego oraz szybkiej, nieinwazyjnej detekcji defektów w diodach laserowych.

W publikacji [H10]:

- Przeprowadzenie badań temperatury zwierciadła matrycy diod laserowych przy zastosowaniu metody termoodbicia, zaproponowanie sposobu kalibracji umożliwiającego ilościową ocenę wyników eksperymentalnych, potwierdzenie przydatności metody termowizyjnej do szybkiego wykrywania defektów występujących w obszarze zwierciadeł laserowych.

W publikacji [H11]:

- Przeprowadzenie analizy własności termicznych diod laserowych emitujących w paśmie 650 nm i 808 nm, wyznaczenie rezystancji termicznych przyrządów oraz przeprowadzenie diagnostyki obu typów diod laserowych pod kątem występowania defektów.
- Uruchomienie w ITME stanowiska do badań termowizyjnych zawierającego kamerę z detektorem fotonowym InSb chłodzonym w cyklu Stirlinga do temperatury ciekłego azotu o dobrych parametrach rozdzielczości przestrzennej i czułości temperaturowej. Stanowisko to służy bieżącym badaniom diod laserowych i innych elementów optoelektronicznych opracowywanych w Instytucie.

3. Badania własności termicznych diod i matryc laserowych dużej mocy emitujących w paśmie bliskiej podczerwieni z pasywnym oraz aktywnym sposobem chłodzenia oraz optymalizacja tych przyrządów, w szczególności:

W publikacji [H6]:

- Przeprowadzenie weryfikacji analitycznego modelu rozptyłu ciepła w szerokopaskowej diodzie laserowej, chłodzonej w sposób pasywny za pomocą chłodnicy miedzianej oraz przeprowadzenie dyskusji na temat występujących rozbieżności między obliczoną a wyznaczoną eksperymentalnie rezystancją termiczną diod laserowych.

W publikacji [H7]:

- Analiza własności termicznych matryc diod laserowych dużej mocy dla dwóch typowych schematów chłodzenia: pasywnego, realizowanego poprzez przylutowanie struktury laserowej do chłodnicy z metalu o wysokim przewodnictwie cieplnym oraz aktywnego, przy użyciu chłodnic mikro-kanałowych z przepływem cieczowym; wyznaczenie czasów uzyskiwania przez układ stanu ustalonego w trakcie pracy impulsowej; wyznaczenie stałych czasowych przebiegów temperaturowych dla kilku analizowanych obszarów, co stanowi cenną informację dla użytkowników komercyjnych matryc laserowych emitujących w paśmie 808 nm.

W publikacji [H12]:

- Opracowanie nowej kompaktowej konstrukcji chłodnicy mikro-kanałowej zawierającej mikro-rurki oraz opracowanie i opatentowanie nowego sposobu wytwarzania mikro-kanałów w chłodnicach miedzianych za pomocą zmodyfikowanego procesu galwanicznego.

- Opracowanie i uruchomienie stanowiska laboratoryjnego do badań chłodzonych aktywnie matryc diod laserowych dużej mocy, pozwalającego na jednoczesną kontrolę całego stosu złożonego z 10 matryc diod laserowych.
- Wykazanie przydatności kompozytu metalowo-ceramicznego Cu-Al₂O₃ jako elementu odprowadzającego ciepło z matrycy laserowej, dla którego udało się uzyskać znaczne zmniejszenie naprężeń montażowych w stosunku do układu referencyjnego zawierającego chłodnicę miedzianą.

W publikacji [H13]:

- Wykonanie serii eksperymentów sprawdzających działanie nowej chłodnicy mikro-kanalowej z mikro-rurkami dla różnych, traconych w matrycy laserowej mocy cieplnych i dla różnych szybkości przepływu cieczy.
- Wykazanie przydatności nowej kompaktowej chłodnicy mikro-kanalowej do celów aktywnego chłodzenia matryc laserowych dużej mocy oraz uzyskanie dobrej zgodności z wynikami symulacji numerycznych.

Zaprezentowane podsumowanie cyklu publikacji [H1-H13], wskazuje w mojej ocenie, że osiągnięty został główny cel prac, polegający na przeprowadzeniu badań własności optycznych i termicznych diod laserowych pod kątem poprawy niezawodności oraz optymalizacji przyrządów. Dalsze wykorzystanie przedstawionych w cyklu publikacji prac, wg mojej oceny, powinno koncentrować się na wdrożeniu do produkcji matryc laserowych (wraz z opracowanymi układami chłodzenia) oraz zastosowaniu tych układów do celów pompowania optycznego laserów na ciele stałym. Prowadzone obecnie prace dotyczące pompowanych optycznie źródeł laserowych emitujących promieniowanie w paśmie bezpiecznym dla wzroku do zastosowań dalmierzowych oraz zastosowań w obróbce materiałowej stwarzają szanse na wykorzystanie badanych przyrządów w praktyce przemysłowej.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych:

Poza badaniami stanowiącymi podstawę niniejszego wniosku habilitacyjnego moje zainteresowania naukowe obejmowały tematy związane z:

- a) konstrukcją i badaniami układów interferometrycznych wykorzystujących półprzewodnikowe źródła światła pod kątem zastosowania w mikromechanice i elektronice (prace prowadzone przed uzyskaniem stopnia doktora),
- b) badaniami optycznymi materiałów tlenkowych domieszkowanych jonami ziem rzadkich do zastosowań laserowych, fotowoltaicznych i luminoforowych (prace prowadzone po uzyskaniu stopnia doktora),
- c) badaniami zjawisk rozptyłu ciepła w elementach elektronicznych i optycznych wytwarzanych w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych przy wykorzystaniu metody termowizji wysokiej rozdzielczości w paśmie 3-5 μm (prace prowadzone po uzyskaniu stopnia doktora).

ad (a)

Prace prowadzone przeze mnie przed uzyskaniem stopnia doktora dotyczyły metod pomiarowych pozwalających na bezdotkowy pomiar pól przemieszczeń w płaszczyźnie pod kątem zastosowań w mikromechanice i elektronice. W ramach pracy doktorskiej opracowałam nową konstrukcję zminiaturyzowanego dwuwiązkowego interferometru siatkowego z diodą laserową. Badałam wpływ specyficznych właściwości półprzewodnikowego źródła światła (prądowe przestrajanie długości fali światła, skoki modów) na obraz uzyskiwany metodą interferometryczną. Zaproponowałam zmodyfikowany (w stosunku do interferometrii klasycznej) opis zjawisk występujących w interferometrii siatkowej przy oświetleniu chromatycznym oraz określiłam wymagania dla diody laserowej stosowanej w tej metodzie [41]. Opracowałam nowe metody pomiarowe, takie jak optoelektroniczną zmianę częstości nośnej prążków interferencyjnych, metodę jednoczesnego pomiaru ortogonalnych pól przemieszczeń u i v [42-46].

ad (b)

Istotna część zagadnień badawczych podejmowanych w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych dotyczy wytwarzania zaawansowanych materiałów tlenkowych domieszkowanych jonami ziem rzadkich i metalami przejściowymi, w postaci monokryształów, ceramik przezroczystych i szkieł. Aby możliwe było szybkie przekazywanie informacji dla technologów opracowujących dany materiał, powstała konieczność uruchomienia w Instytucie stanowisk badawczych do bieżącej charakteryzacji optycznej materiałów. Stanowiło to motywację utworzenia w ITME nowej pracowni pomiarowej (kierowana przeze mnie Pracownia Badań Optycznych i Termicznych Materiałów Fonicznych). Ważna część prowadzonych przeze mnie prac dotyczy badania właściwości optycznych przezroczystych materiałów ceramicznych domieszkowanych jonami ziem rzadkich (m.in. zademonstrowanie po raz pierwszy w świecie zjawiska nieliniowej absorpcji w tworzywach polikrystalicznych na bazie $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ [47], analiza własności optyczne ceramik $\text{Nd}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ uzyskanych za pomocą metody reakcji w fazie stałej oraz za pomocą reakcji współstrącania soli [48]). W trakcie ostatnich lat współuczestniczyłam w badaniach szeregu materiałów wykorzystywanych w technice laserowej (m.in. ceramik granatu itrowo-glinowego domieszkowanych iterbem [49] oraz tulem [50], szkieł aktywnych emitujących w paśmie bezpiecznym dla wzroku, domieszkowanych erbem, iterbem i chromem [51] oraz fonicznych włókien aktywnych domieszkowanych iterbem [52]). We współpracy z Zakładem Technologii Chemicznych ITME oraz firmą Abraxas przeprowadziłam badania luminescencyjnych koncentratorów słonecznych (ang. *Luminescent Solar Concentrators*, LSC), które w połączeniu z ogniwami oświetlanymi krawędziowo stanowią ciekawą alternatywę dla rozwiązań wielkopowierzchniowych ogniw słonecznych [53]. Obecnie prowadzę badania dotyczące ceramicznych luminoforów światła białego na bazie granatu itrowo-glinowego domieszkowanego cerem ($\text{Ce}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$). Luminofory są pobudzane diodą laserową emitującą w paśmie 454 nm, zaś barwa tworzonego w ten sposób źródła światła białego jest modyfikowana poprzez zmiany mikrostruktury, składu i geometrii próbki.

ad(c)

Inny, ciekawy nurt moich badań związany był z wykorzystaniem metody termowizyjnej do diagnostyki elementów elektronicznych i optycznych opracowywanych w ITME. Brałam udział w realizowanym w ITME projekcie sektorowym NCBiR GRAF-TECH-OPTIGRAF pt. „Przezroczyste grafenowe warstwy ochronne i grzewcze na elementach optycznych”. Prowadzone przeze mnie badania dotyczyły grafenowych warstw grzejnych naniesionych na elementy szklane. Przy wykorzystaniu metody termowizyjnej badałam rozkłady wydzielanego w warstwach ciepła Joule’a w trakcie przepływu prądu przez struktury [54,55]. Zademonstrowałam, że metoda termowizyjna w paśmie 3-5 μm doskonale ujawnia wszelkie nieciągłości struktury, trudne do bezpośredniego wykrycia za pomocą innych metod. Przeprowadzone przeze mnie badania pomogły w optymalizacji wytwarzania struktur, ale także wyjaśniły mechanizm tworzenia obrazów termowizyjnych w zdefektowanych warstwach. Inny, interesujący temat badawczy dotyczył badań rozptyłu ciepła w strukturach laserowych za pomocą elementów z kompozytów metal-grafen i został przeprowadzony we współpracy z Zakładem Kompozytów Metalowo-Ceramicznych ITME [56]. Brałam również udział w badaniach odprowadzania ciepła z diod laserowych za pomocą tlenku grafenu i grafenu [57]. We współpracy z Zakładem Szkielek przeprowadziłam badania mikro-soczewek przeznaczonych do pracy w podczerwieni i wykonanych metodą wytłaczania na gorąco [58].

6. Wskaźniki bibliometryczne

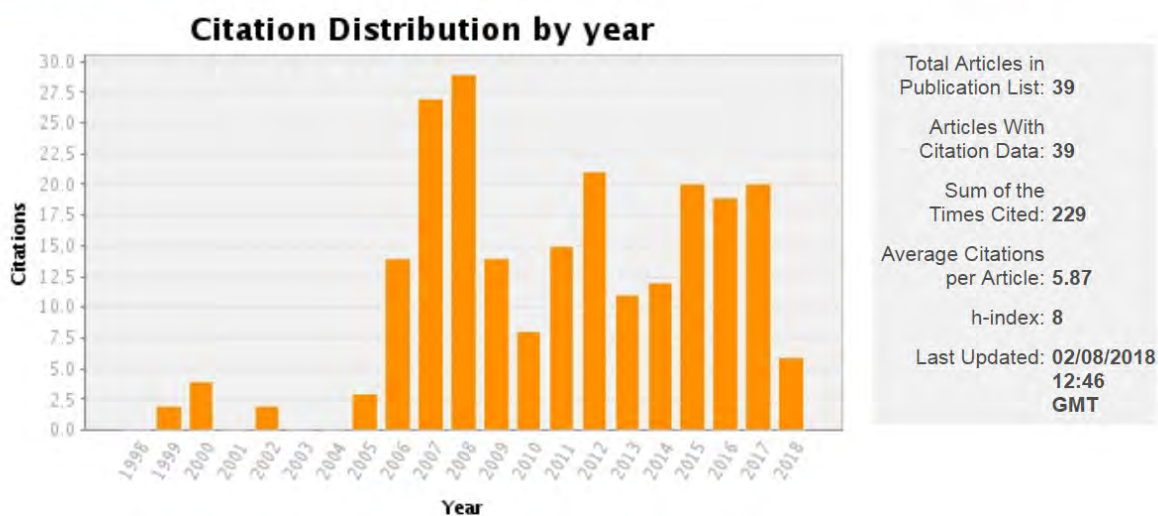
Sumaryczny impact factor wszystkich publikacji według listy Journal Citation Reports (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania: 47,792

Liczba cytowań wszystkich publikacji według bazy Web of Science (WoS): 229, w tym liczba cytowań bez autocytowań: 184

Indeks Hirscha według bazy Web of Science: 8

This graph shows the number of times the articles on the publication list have been cited in each of the last 20 years.

Note: Only articles from Web of Science Core Collection with citation data are included in the calculations. [More information about these data.](#)



7. Literatura:

1. T. Hayakawa, M. Wada, F. Yamanaka, H. Asano, T. Kuniyasu, T. Ohgoh, and T. Fukunaga, Effect of broad-waveguide structure in 0.8 μm high-power InGaAsP/InGaP/AlGaAs lasers, *Appl. Phys. Lett.* 75(13), 1839–1841, 1999.
2. J. Sebastian, G. Beister, F. Bugge, E. Buhandt, G. Erbert, et al., High power 810-nm GaAsP-AlGaAs diode lasers with narrow beam divergence, *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 7 (2) 334-339, 2001.
3. A. Knauer, G. Erbert, R. Staske, B. Sumpf, H. Wenzel, M. Weyers, High-power 808 nm lasers with a super-large optical cavity, *Semicond. Scie. and Techn.*, 20(6), 621-624, 2005.
4. E. A. Avrutin, B. S. Ryvkin, Theory and modelling of the power conversion efficiency of large optical cavity laser diodes, *IEEE High Power Diode Lasers and Systems Conference (HPD)*, Coventry, 9-10, 2015.
5. G. Lin, S.-T. Yen, C.-P. Lee, and D.-C. Liu, Extremely small vertical far-field angle of InGaAs-AlGaAs quantum-well lasers with specially designed cladding structure, *IEEE Photon. Technol. Lett.* 8(12), 1588–1590, 1996.
6. A. Małag, B. Mroziwicz, Vertical beam divergence of double-barrier multiquantum well (DBMQW) (AlGa)As heterostructure lasers, *J. Lightw. Technol.* 14(6), 514–518, 1996.
7. A. Małag, **A. Kozłowska**, and M. Wesołowski, Effect of Al-content reduction in (AlGa)As cladding layers of MOVPE-grown high-power DBSQW laser diodes, *EW-MOVPE X, Booklet of Extended Abstracts*. Lecce, Italy, Univ. of Lecce, 235–238, 2003.
8. A. Małag, Beam divergence and COD issues in double barrier separate confinement heterostructure laser diodes, *Bull. Polish Acad. Sci., Tech. Sci.* 53(2), 167–173, 2005.
9. **A. Kozłowska**, A. Małag, S. Wróbel. Metody profilowania wiązki diody laserowej, *Elektronika* 10, 33-34, 2004.
10. T. Guenther, V. Malyarchuk, J. W. Tomm, R. Müller, and C. Lienau, Near-field photocurrent imaging of the optical mode profiles of semiconductor laser diodes, *Appl. Phys. Lett.* 78, 1463, 2001.
11. R. Purchert, A. Bärwolff, M. Voss, U. Menzel, J.W. Tomm, J. Luft, Transient thermal behavior of high power diode laser arrays, *IEEE Trans. on Comp., Packag. and Manufact. Techn. B* 23, 95-100, 2000.
12. A. Piccirillo, G. Oliveti, M. Ciampa, P.E. Bagnoli, Complete characterisation of laser diode thermal circuit by voltage transient measurements, *Electron. Lett.* 29(3), 318-320, 1993.
13. V. Lepaludier, Y. Scudeller, A transient method of thermal characterization of double heterostructure laser diodes, *Microelectron. J.* 28, 301-312, 1997.
14. S. Todoroki, M. Sawai, K. Aiki, Temperature distribution along the striped active region in high-power GaAlAs visible lasers, *J. Appl. Phys.* 58, 1124, 1985.

15. W. C. Tang, H. J. Rosen, P. Vettiger, D. J. Webb, Raman microprobe study of the time development of AlGaAs single quantum well laser facet temperature on route to catastrophic breakdown, *Appl. Phys. Lett.* **58**, 557, 1991.
16. P. W. Epperlein, Micro-Temperature Measurements on Semiconductor Laser Mirrors by Reflectance Modulation: A Newly Developed Technique for Laser Characterization, *Japan. J. Appl. Phys.* 32, part 1(12A), 5514, 1993.
17. T. J. Ochalski, D. Pierścińska, K. Pierściński, M. Bugajski, J. W. Tomm, T. Grunske, **A. Kozłowska**, Complementary thermo-reflection and micro-Raman analysis of facet temperatures of diode lasers, *Appl. Phys. Lett.* 89, 071104, 2006
18. V. Malyutenko, Mapping of current and heat flows in IR light emitting devices and lasers *Proc SPIE* 4648, 43-47, 2002.
19. V. Malyutenko, High-resolution study of light and heat patterns in infrared emitting devices *Proc. Mat. Res. Soc. Simp.* 744 M4.10.1-M.4.10.6, 2003.
20. B. Meadows, F. Amzajerjian, N. R. Baker, V. Sudesh, U. N. Singh, M. Kavaya, Thermal characteristics of high-power, long pulse width, quasi-CW laser diode arrays *Proc. SPIE* 5336, 203-211, 2004.
21. F. Amzajerjian, B. Meadows, B. Barnes, M. Kavaya, S. Upendra, N. Baker, Improving reliability of long pulsewidth high power laser diode pump arrays *Proc. NASA Earth-Sun System Technology Conference* (Maryland, USA, 28-30 June), 2005.
22. M. R. Brozel, G. E. Stillman (ed), *6 Properties of Gallium Arsenide* (London: INSPEC, The Institution of Electrical Engineers), 1996.
23. J. W. Tomm, A. Bärwolff, A. Jaeger, T. Elsaesser, J. Bollmann, W. T. Masselink, A. Gerhardt, J. Donecker, Deep level spectroscopy of high-power laser diode arrays *J. Appl. Phys.* 84, 1325, 1998.
24. O. Ueda, Degradation of III-V Opto-Electronic Devices, *J. Electrochem. Soc.* 135, 11C, 1988.
25. **A. Kozłowska**, P. Wawrzyniak, J. W. Tomm, F. Weik, T. Elsaesser, Deep level emission from high-power diode laser bars detected by multi-spectral infrared imaging, *Appl. Phys. Lett.* 87, 153503, 2005.
26. A. Moser, E.-E. Latta, D. J. Webb, Thermodynamics approach to catastrophic optical mirror damage of AlGaAs single quantum well lasers, *Appl. Phys. Lett.* 55, 1152, 1989.
27. M. Fukuda, *Reliability and Degradation of Semiconductor Lasers and LEDs* (Artech House, Boston, 1991).
28. A. Jakubowicz, Material- and fabrication-related limitations to high-power operation of GaAs/AlGaAs and InGaAs/AlGaAs laser diodes, *Mater. Sci. Eng.* B44, 359, 1997.
29. J. Jiménez, Laser diode reliability: crystal defects and degradation modes, *Compt. Rend. Phys.* 4(6), 663-673, 2003.

30. M. Ziegler, R. Pomraenke, M. Felger, J. W. Tomm, P. Vasa, C. Lienau, M. Bou Sanayeh, A. Gomez-Iglesias, M. Reufer, F. Bugge, G. Erbert, Infrared emission from the substrate of GaAs-based semiconductor lasers, *Appl. Phys. Lett.* 93, 041101, 2008.
31. J. W. Tomm, M. Ziegler, H. Kissel, J. Biesenbach, Defect imaging in laser diodes by mapping their near-infrared emission, *J. Electron. Mat.*, 39(6) 723-726, 2010.
32. A. Małag, E. Dąbrowska, M. Teodorczyk, G. Sobczak, **A. Kozłowska**, J. Kalbarczyk, Asymmetric heterostructure with reduced distance from active region to heatsink for 810-nm range high-power laser diodes, *IEEE J. Quant. Electron.* 48(4), 465-471, 2012.
33. Z. Liu, G. Fang, K. Feng, High packing density laser diode stack arrays using Al-free active region laser bars with a broad waveguide and discrete copper microchannel-cooled heatsinks, *Chin. Opt. Lett.* 7, 214-216, 2009.
34. M. Leers, K. Boucke, Cooling approaches for high power diode laser bars, *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference*, 4550100, 2008.
35. R. Feeler, J. Junghans, G. Kemner, E. Stephens, Next generation microchannel coolers, *Proc. SPIE* 6876, 687608, 2008.
36. H. T. Chien, D. S. Lee, P. D. Ding, S. L. Chiu, P. H. Chen, "Disk-shaped miniature heat pipe (DMHP) with radiating micro grooves for TO can laser diode package", *IEEE Trans. Comp. Packag. Tech.* 26(3), 569-574, 2003.
37. J.W. Tomm, J. Jimenez, Eds, *Quantum-well laser array packaging*, 2007.
38. <http://www.coherent.com>, Coherent Inc., 31/05/2015.
39. <http://www.jenoptik.com>, JENOPTIK AG, 31/05/2015.
40. <http://www.dilas.com>, DILAS Diodenlaser GmbH, 31/05/2015.
41. **A. Kozłowska**, M. Kujawinska, C. Gorecki, Grating interferometry with a semiconductor light source, *Appl. Opt.* 36, 8116-8120, 1997.
42. **A. Kozłowska**, E. Udd, R. P. Tatam,, et. al., Fibre optic grating interferometer for in-plane displacement measurement, *Interferometric Fiber Sensing - Interferometry '94*, *Proc. SPIE* 2341, 124-131, 1994.
43. **A. Kozłowska**, C. Gorecki, J. S. Chang, et al. Fringe design in automated fibre-optic grating interferometer, *17th Congress of the International Commission For Optics: Optics For Science and New Technology*, 2778, 1112-1113, 1996.
44. **A. Kozłowska**, M. Kujawinska, C. Gorecki, Remote control in-plane displacement measurement system, *Optical Inspection and Micromasurement* , *Proc SPIE* 2782, 243-249, 1996.
45. **A. Kozłowska**, M. Kujawinska, C. Gorecki, et. al., The influence of the spectral properties of a wavelength modulated laser diode on the resulting interferogram, *Laser Interferometry Viii: Techniques and Analysis*, *Proc. SPIE* 2860, 250-255, 1996.

46. **A. Kozłowska**, M. Kujawińska, The measurement of thermally induced in-plane displacements using fibre-optic operating interferometry, *MST News Poland* 3(7), 9-12, 1997.
47. A. Wajler, **A. Kozłowska**, M. Nakielska, K. Leśniewska-Matys, A. Sidorowicz, D. Podniesiński, P. Putyra, Nonlinear Absorption of Submicrometer Grain-Size Cobalt-Doped Magnesium Aluminate Transparent Ceramics, *J. Am. Ceram. Soc.* 97, 1692-1695, 2014.
48. **A. Kozłowska**, M. Nakielska, D. Podniesiński, H. Węglarz, A. Wajler, Z. Librant, T. Łukasiewicz, A. Małąg, Comparison of spectroscopic properties of neodymium-doped aluminium garnet (Nd:YAG) ceramics obtained by reactive sintering of Al_2O_3 , Y_2O_3 and Nd_2O_3 and by synthesis of nanocrystalline Nd:YAG powders, *Proc. SPIE* 79341B, 73934-6, 2011.
49. H. Węglarz, A. Wajler, H. Tomaszewski, **A. Kozłowska**, M. Nakielska, A. Sidorowicz, Z. Librant, Właściwości optyczne polikrystalicznego granatu itrowo-glinowego domieszkowanego iterbem (Yb:YAG), *Mat. Ceram.* 64(1), 38-41, 2012.
50. A. Sidorowicz, H. Węglarz, **A. Kozłowska**, M. Nakielska, A. Wajler, H. Tomaszewski, Z. Librant, A. Olszyna, Wpływ domieszkowania Tm_2O_3 na mikrostrukturę i właściwości optyczne ceramiki Tm:YAG, *Mat. Ceram.*, 64(4), 500-505, 2012.
51. D. Podniesiński, M. Nakielska, **A. Kozłowska**, R. Stępień, D. Pysz, Laser na szkle fosforanowym domieszkowanym erbem, iterbem i chromem, *Mat. Elektron.* 43, 4-10, 2015.
52. D. Podniesiński, **A. Kozłowska**, M. Nakielska, R. Stępień, M. Franczyk, Ocena jakości wykonania światłowodu PCF - badania generacyjne, *Mat. Elektron.* 39(1), 3-10, 2011.
53. **A. Kozłowska**, M. Nakielska, J. Sarnecki, et al., Spectroscopic investigations of rare-earth materials for luminescent solar concentrators, *Opt. Applicata* 41, 359-365, 2011.
54. **A. Kozłowska**, G. Gawlik, R. Szewczyk, A. Piątkowska, A. Krajewska, Infrared thermal emission from Joule-heated graphene with defects, *Asia Communications and Photonics Conference 2014, OSA (Optical Society of America, 2014)*, paper ATh4B.2, 2014.
55. **A. Kozłowska**, M. Kachniarz, G. Gawlik, R. Szewczyk, M. Wojtasiak, Graphene Joule Heating Measurements in Environmental Chamber, *Progress in Automation, Robotics and Measuring Techniques, Advances in Intelligent Systems and Computing* 352, 129-135, 2015.
56. **A. Kozłowska**, K. Pietrzak, M. Chmielewski, E. Dąbrowska, M. Teodorczyk, 2016, Heat-sinking of high-power laser diodes using copper/carbon nanoform composites, *International Symposium on Reliability of Optoelectronics for Systems ISROS 2016*, Otwock, 06.06 - 09.06.2016.
57. E. Dąbrowska, M. Teodorczyk, L. Lipińska, K. Krzyżak, A. Dąbrowski, G. Sobczak, **A. Kozłowska**, P. Matkowski, A. Młozniak, A. Małąg, Zastosowanie tlenku grafenu i grafenu w technologii diod laserowych, *Przeł. Elektrotechn.* 91(9), 1-4, 2015.

58. R. Kasztelanic, I. Kujawa, R. Stępien, P. Kluczyński, **A. Kozłowska**, Low-cost soft-glass diffractive and refractive lenses for efficient mid-IR fiber coupling systems, *Infrar. Phys. & Techn.* 71, 307-312, 2015.

Anna Kozłowska