

## Wpływ warstwy ZnO na parametry pracy azotkowych laserów o emisji krawędziowej

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wyniki numerycznej analizy laserów krawędziowych na bazie azotku galu. Emiter został zaprojektowany do pracy w temperaturze pokojowej i ciągłej emisji światła zielonego (540 nm). Pokazano, że zastosowanie warstwy ZnO, jako ograniczenie optyczne po stronie *p*, w porównaniu z warstwą ITO, pozwala polepszyć parametry pracy lasera w połączeniu z innymi warstwami zapewniającymi efektywne ograniczenie modu od strony *n*. Wynika to między innymi ze znacznie niższej wartości współczynnika absorpcji materiału ZnO oraz z lepszej przewodności cieplnej ZnO w porównaniu do ITO.

**Abstract.** The paper presents the results of the numerical analysis of edge-emitting lasers based on gallium nitride. The emitter was designed for operation at room temperature and continuous emission of green light (540 nm). It is shown that the use of a ZnO layer as a *p*-type optical confinement, compared to an ITO layer, allows improved laser operating parameters in combination with other layers providing optical confinement on the *n*-side. This is due to the significantly lower value of the absorption coefficient of the ZnO material and the much better thermal conductivity of ZnO compared to ITO. (**The impact of the ZnO layer on the operating parameters of edge-emitting nitride lasers**)

**Słowa kluczowe:** zielony laser półprzewodnikowy, InGaN/GaN, ZnO, symulacja komputerowa

**Keywords:** green diode laser, InGaN/GaN, ZnO, computer simulation

### Wstęp

Półprzewodnikowe lasery o emisji krawędziowej emitujące światło zielone mogłyby posiadać potencjalnie wiele zastosowań w różnych dziedzinach przemysłu i nauki np. oświetlenie, projektory, komunikacja podmorska, czujniki, elementy zegarów atomowych. Niestety efektywność tych przyrządów, szczególnie emitujących światło powyżej 530 nm jest bardzo ograniczona. Stąd nadal poszukiwane są rozwiązania, które polepszą ich parametry pracy, żywotność, czy też niezawodność [1-5]. Jednym z głównych powodów słabych parametrów pracy tego typu urządzeń jest słabe ograniczenie modu w rejonie obszaru czynnego lasera. Poprawa tego aspektu niewątpliwie przyczyni się, do zmniejszenia gęstości prądu progowego, temperatury pracy lasera, a co za tym idzie także wszystkich jego parametrów użytkowych.

W celu uzyskania efektywnego ograniczenia modu należy otoczyć obszar czynny lasera wraz z falowodem materiałem (tzw. cladding) o mniejszym współczynniku załamania. W laserach emitujących światło zielone obszar czynny musi zawierać dużą ilość indu i być hodowany w stosunkowo niskich temperaturach. Z tego właśnie powodu zastosowanie standardowego materiału na warstwy ograniczające jakim jest AlGaIn nie jest tu dobrym rozwiązaniem. Po pierwsze epitaksja AlGaIn odbywa się w znacznie wyższej temperaturze niż InGaIn, co powoduje termiczną degradację warstw InGaIn, a po drugie niedopasowanie sieciowe między tymi materiałami powoduje duże naprężenia i dalszą degradację struktury [5]. Ze względów technologicznych nie można też zwiększać grubości warstwy falowodu wykonanego z InGaIn, czy też zwiększać zawartości indu w tej warstwie. Szczególnie trudną sytuację mamy po stronie *p* przyrządu. Jednym z proponowanych rozwiązań w celu uzyskania efektywnego ograniczenia modu od strony *p* lasera jest wykonanie po tej stronie warstwy *p*-GaIn w połączeniu z warstwą tlenku cynkowo-indowego (ITO). Dzięki niskiej wartości jego współczynnika załamania możliwe jest ograniczenie modu do warstwy aktywnej, falowodu i *p*-GaIn. Powoduje to obniżenie gęstości prądu koniecznego do uzyskania akcji laserowej oraz temperatury pracy przyrządu [6]. Niestety słabą stroną materiału ITO jest jego niska przewodność cieplna i wysoka absorpcja materiałowa. Wydaje się więc, że lepszym rozwiązaniem

może być zastąpienie ITO warstwą tlenku cynku (ZnO). Warstwa ZnO znajduje już zastosowanie w laserach, jako ograniczenie optyczne [7]. Wysoka przewodność cieplna ZnO oraz jego kilkukrotnie niższy współczynnik absorpcji niż dla ITO, dla zielonego i niebieskiego zakresu widma, powinna doprowadzić zarówno do zmniejszenia prądu progowego lasera jak i temperatury w jego wnętrzu. Dodatkowo warstwa ZnO charakteryzuje się o wiele lepszym dopasowaniem sieciowym do materiału GaIn. Niedopasowanie sieciowe ZnO do GaIn wynosi około 2%, dzięki czemu można uzyskać wysokiej jakości monokryształ ZnO rosnący na GaIn [7]. W efekcie powinniśmy uzyskać poprawę stabilności, wydajności oraz wydłużenie czasu życia lasera. Jak pokazaliśmy w pracach [8-10] ograniczenie modu po stronie *n* przyrządu można natomiast uzyskać stosując warstwę AlInN, wykorzystując jej dopasowanie sieciowe do GaIn [11, 12] lub wysoko domieszkowaną warstwę GaIn, wykorzystując efekt plazmacyjny [13, 14].

W niniejszej pracy przedstawiamy wyniki analizy numerycznej, której celem było pokazanie wpływu warstwy ZnO na rozkład modu optycznego, jak i na parametry pracy azotkowych laserów krawędziowych emitujące światło zielone (540 nm). Uzyskane wyniki porównano z wcześniej analizowanymi strukturami, które zawierały warstwę ITO jako ograniczenie optyczne od strony *p* lasera. Jako ograniczenie po stronie *n* w analizowanych strukturach rozważono pięć różnych kombinacji warstw azotkowych. Pierwszą zastosowaną warstwą jest pojedyncza warstwa *n*-GaIn, charakteryzująca się słabym ograniczeniem optycznym. Drugą możliwością jest zastosowanie warstwy *n*-GaIn wraz z dodatkową warstwą AlInN. Ostatnią rozważaną możliwością jest wykonanie standardowej warstwy *n*-GaIn w połączeniu z wysoko domieszkowaną warstwą *n*-GaIn, gdzie wykorzystano efekt plazmacyjny (dalej oznaczana jako struktura z GaN<sup>++</sup>). W przypadku wysoko domieszkowanej warstwy *n*-GaIn rozważono trzy różne wartości domieszkowania germanem (Ge):  $1 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ,  $2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ,  $3 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ .

### Struktura

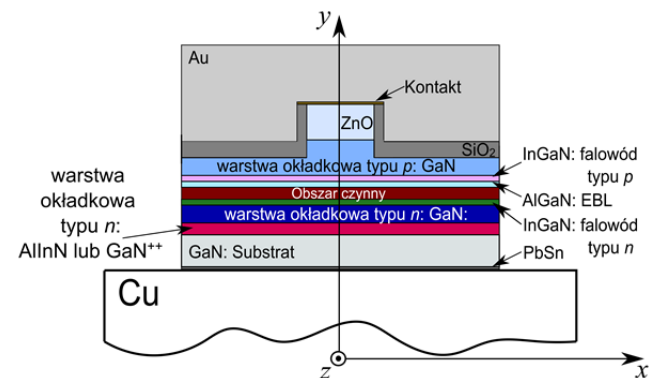
Symulacje numeryczne wykonano dla laserów krawędziowych z falowodem grzbietowym zaprojektowanych na bazie struktur opisanych w pracach [8-10]. Na rysunku 1 przedstawiono schemat budowy rozważanych struktur lasera

krawędziowego, które różnią się od siebie warstwami ograniczającymi od strony *p* i od strony *n*. Podstawą struktury jest podłoże wykonane z azotku galu. Na nim bezpośrednio znajdują się różne wersje warstwy okładkowej po stronie *n* tzn. plazmowiczny GaN z n-GaN, AllnN z GaN lub pojedyncza warstwa GaN. Następnie mamy warstwę falowodu typu *n* wykonanego z InGaN. Obszar czynny składa się z czterech 10 nm barier GaN, które przedzielone są trzema studniami kwantowymi InGaN o grubości 2,7 nm. Bezpośrednio nad obszarem czynnym umiejscowiona jest warstwa ograniczająca ucieczkę elektronów (EBL, ang. electron blocking layer) wykonana z p-AlGaIn oraz falowód typu *p*. Warstwa okładkowa typu *p* znajduje się nad falowodem w postaci kombinacji warstwy p-GaN i warstwy ZnO. W warstwach tych wykonano falowód grzbietowy o szerokości 2 μm. Na samej górze znajduje się kontakt ze złota. Poza niewielką powierzchnią na górze falowodu grzbietowego kontakt jest oddzielony od struktury warstwą izolacyjną z ditlenku krzemu. Szczegóły dotyczące warstw tworzących analizowane struktury zamieszczono w tabeli 1.

Wszystkie wartości przewodności cieplnych, przewodności elektrycznych, współczynników załamania światła, jak i współczynników absorpcji wykorzystane w obliczeniach zostały wzięte z wcześniejszych prac dotyczących podobnej tematyki. Więcej szczegółów znajduje się w pracach [8, 9]. Wszystkie parametry zamieszczone w tabeli 1 są podane dla temperatury 300 K. Dodatkowo oprócz wartości przewodności elektrycznych warstw, przyjęto odpowiednie wartości przewodności elektrycznej styku warstw ZnO/p-GaN i ITO/p-GaN.

Oszacowano, że przewodność elektryczna styku ZnO/p-GaN wynosi 1,316 S/m [7], natomiast styku ITO/p-GaN 0,083 S/m [15].

Zaprezentowane wyniki zostały uzyskane za pomocą symulacji numerycznych wykorzystujących autorski model i program komputerowy opracowany przez Zespół Fotoniki Instytutu Fizyki Politechniki Łódzkiej. Program ten pozwala na symulowanie zjawisk fizycznych zachodzących w szczególności podczas pracy laserów półprzewodnikowych. Wykonano obliczenia samouzgodnione łącząc ze sobą model termiczny, elektryczny, optyczny i model wzmocnienia obszaru czynnego lasera. Szczegóły podane są w pracach [8, 9].



Rys.1. Schemat budowy analizowanych azotkowych laserów krawędziowych. W celu dokładniejszego zobrazowania wyglądu rysunek nie został wykonany w skali.

Tabela 1. Dane konstrukcyjne modelowanych zielonych laserów krawędziowych z różnymi warstwami ograniczającymi mod w okolicach obszaru czynnego. QW (ang. quantum well) – studnia kwantowa, B (ang. barrier) – bariera, EBL (ang. electron blocking layer) – warstwa ograniczająca ucieczkę elektronów. Parametry cieplne i optyczne materiałów wykorzystywanych w symulacjach:  $k_{300\text{ K}}$  – przewodność cieplna w 300 K,  $\sigma_{300\text{ K}}$  – przewodność elektryczna w 300 K,  $n_{r,300\text{ K}}$  – współczynnik załamania w 300 K,  $\alpha_{300\text{ K}}$  – współczynnik absorpcji w 300 K.

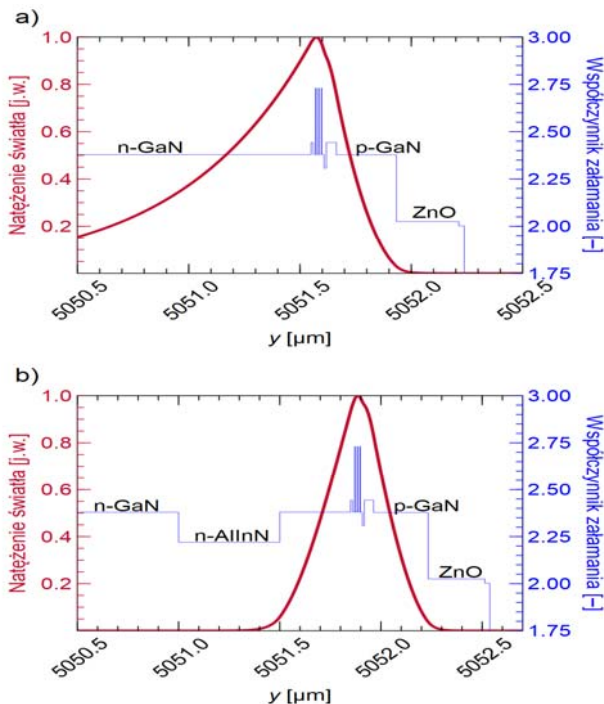
Warstwa	Materiał	Grubość [μm]	Domieszka [cm <sup>3</sup> ]	$k_{300\text{ K}}$ [W/(m·K)]	$\sigma_{300\text{ K}}$ [S/m]	$n_{r,300\text{ K}}$ [-]	$\alpha_{300\text{ K}}$ [1/cm]
złoty kontakt	Au	1,00	–	319	$4,4 \cdot 10^7$	0,3725	$5,7 \cdot 10^5$
izolacja	SiO <sub>2</sub>	0,25	–	1,38	$1,0 \cdot 10^{-5}$	1,4795	0
warstwa okładkowa typu p	ZnO	0,28	–	50	$0,7 \cdot 10^5$	2,0250	100
	ITO	0,28	–	3,20	$0,2 \cdot 10^5$	1,9357	510
	p-GaN	0,27	Mg: $2 \cdot 10^{19}$	84,17	102,4	2,3787	10
falowód typu p	p-In <sub>0,08</sub> Ga <sub>0,92</sub> N	0,045	Mg: $1 \cdot 10^{19}$	8,69	57,4	2,4429	100
EBL	p-Al <sub>0,2</sub> Ga <sub>0,8</sub> N	0,01	Mg: $5 \cdot 10^{19}$	14,65	26,2	2,3099	1
obszar czynny	QW n-In <sub>0,08</sub> Ga <sub>0,92</sub> N	0,0027	Si-doped	48,46	$1,0 \cdot 10^{-6}$	2,3710	wzmocnienie
	B GaN	0,01	undoped			2,3787	1
falowód typu n	n-In <sub>0,08</sub> Ga <sub>0,92</sub> N	0,01	Si: $5 \cdot 10^{18}$	8,69	$1,6 \cdot 10^3$	2,4429	50
warstwa okładkowa typu n	n-GaN	0,55	Si: $2 \cdot 10^{18}$	97,5	$7,9 \cdot 10^3$	2,3787	2
	n-GaN/n-AllnN	0,35/0,50	Si: $5 \cdot 10^{18}$	4,87	$2,4 \cdot 10^4$	2,2202	23
	n-GaN/ plazmowiczny GaN	0,50/0,20	Ge: $1 \cdot 10^{20}$	54	$2,0 \cdot 10^5$	2,2179	870
			Ge: $2 \cdot 10^{20}$	35	$3,0 \cdot 10^5$	2,0445	1745
			Ge: $3 \cdot 10^{20}$	23	$4,0 \cdot 10^5$	1,8550	2615
podłoże	n-GaN	50,0	–	167,64	$7,9 \cdot 10^3$	–	–
lut	PbSn	1,0	–	50	$6,7 \cdot 10^6$	–	–
chłodnica	Cu	5000	–	400	$5,8 \cdot 10^7$	–	–

## Wyniki

Podstawą analizy wykonanej w ramach prezentowanych badań było sprawdzenie efektywności ograniczenia rozkładu pola optycznego w strukturze laserowej po zastosowaniu warstwy ZnO w miejsce warstwy ITO i porównanie tych wyników. Na rysunku 2 przedstawiono rozkłady natężenia światła wzdłuż osi *y* (patrz rys. 1) dla struktury, która po stronie *n* posiada pojedynczą warstwę n-GaN (rys. 2a) oraz dla struktury z warstwą n-GaN oraz dodatkową warstwą n-AllnN (rys. 2b). Dodatkowo na rysunku naniesiono rozkład współczynnika załamania

poszczególnych warstw lasera. Zauważalny jest bardzo duży wpływ na ograniczenie modu w dolnej części lasera poprzez zastosowanie kombinacji warstw n-GaN i n-AllnN w stosunku do pojedynczej warstwy n-GaN. W przypadku zastosowania tylko pojedynczej warstwy n-GaN widać bardzo dużą ucieczkę modu w kierunku podłoża. Analogicznie wyglądałaby sytuacja, gdyby zastosować tylko pojedynczą warstwę p-GaN po stronie *p* lasera, prowadząc do dużych strat optycznych. Jak widać na rysunku 2b warstwa ZnO bardzo dobrze spełnia swoje zadanie, ograniczając mod po stronie *p* lasera.

Modyfikacja struktur polegająca na zamianie warstwy ITO warstwą ZnO nie tylko ma zapewnić ograniczenie modu, ale również ma wpływać na uzyskiwane parametry pracy lasera. Pierwsze zauważalne różnice są w wartościach progowych badanych struktur laserowych. Uzyskane prądy progowe wraz z maksymalnymi temperaturami panującymi w przyrządach w warunkach ich pracy progowej zamieszczono w tabeli 2. Na podstawie zamieszczonych danych obserwowany jest pozytywny wpływ warstwy ZnO na prądy progowe laserów, jak i temperatury panujące w ich wnętrzu. Dzięki blisko pięciokrotnie niższemu współczynnikowi absorpcji warstwy ZnO, w porównaniu do ITO, obniżamy wartości prądu progowego lasera. Dla struktur z ZnO, w zależności od warstw ograniczających mod od strony  $n$ , obserwujemy spadek prądu progowego w granicach od 1 mA do około 6 mA.

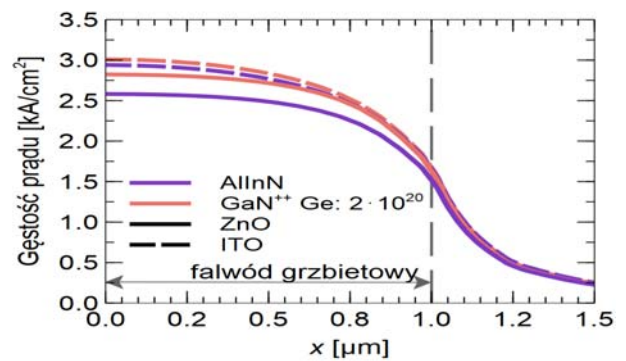


Rys.2. Rozkłady natężenia światła wzdłuż osi  $y$  ( $x = 0 \mu\text{m}$ ) na tle rozkładu współczynnika załamania światła poszczególnych warstw lasera dla (a) struktury z pojedynczą warstwą n-GaN oraz (b) struktury z warstwą n-GaN i z dodatkową warstwą n-AlInN.

Tabela 2. Porównanie uzyskanych w ramach symulacji wartości prądów progowych oraz maksymalnych temperatur w progach akcji laserowej dla struktur z warstwą ZnO oraz ITO.

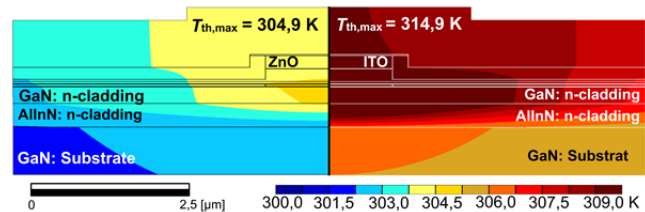
	ITO p-cladding		ZnO p-cladding		
	$I_{th}$ [mA]	$T_{th,max}$ [K]	$I_{th}$ [mA]	$T_{th,max}$ [K]	
n-GaN	32,9	314,2	26,6	303,7	
n-GaN/n-AlInN	27,8	314,9	24,9	304,9	
n-GaN n-GaN <sup>++</sup>	Ge: $1 \cdot 10^{20}$	30,2	312,3	28,9	304,1
	Ge: $2 \cdot 10^{20}$	28,1	311,1	26,9	303,8
	Ge: $3 \cdot 10^{20}$	27,5	310,9	25,9	303,7

Zastosowanie ZnO o mniejszym współczynniku absorpcji oraz lepszej przewodności cieplnej, w porównaniu do ITO, zmniejsza prąd potrzebny do działania lasera. Na rysunku 3 przedstawiono rozkłady gęstości prądu progowego wstrzykiwanego do obszaru czynnego dla dwóch wybranych struktur z warstwą ZnO i dwóch z warstwą ITO. Zastosowanie warstwy ZnO pozwala uzyskać niższe wartości gęstości prądu o około  $0,5 \text{ kA/cm}^2$  w stosunku do struktury laserowej z warstwą ITO. Pociąga to za sobą także obniżenie temperatury we wnętrzu lasera.



Rys.3. Rozkład gęstości prądu wstrzykiwanego do obszaru czynnego lasera w progach jego akcji laserowej dla wybranych konfiguracji warstw ograniczających mod.

Na rysunku 4 porównano rozkłady temperatury w okolicach obszaru czynnego lasera (w warunkach progowych) dla struktury z ZnO i struktury z ITO. Dla struktur z ZnO można zaobserwować niższe temperatury, co spowodowane jest niższym prądem progowym (niższą mocą dostarczoną do przyrządu) oraz kilkunastokrotnie wyższą przewodnością cieplną warstwy ZnO w stosunku do ITO. To ostatnie powoduje efektywniejsze odprowadzenie ciepła do złotego kontaktu i rozprzeczanie go na większą szerokość struktury półprzewodnikowej, a co za tym idzie efektywniejsze jego usuwanie. Wyniki pokazują, że zastosowanie warstwy ZnO zamiast ITO może obniżyć temperaturę we wnętrzu lasera nawet o 50-65%.



Rys.4. Rozkład temperatury w progach akcji laserowej w otoczeniu obszaru czynnego lasera w przekroju  $xy$  dla struktury z warstwą ZnO (po lewej) oraz dla struktury z warstwą ITO (po prawej stronie).

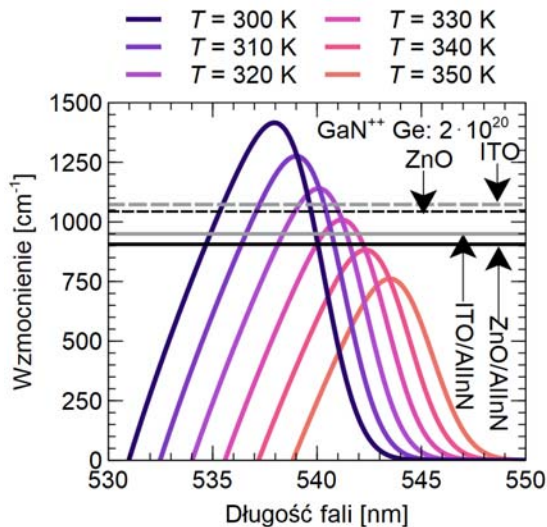
Rysunek 5 przedstawia obliczone rozkłady wzmocnienia materiałowego obszaru czynnego lasera w funkcji długości fali dla stałej wartości koncentracji nośników w tym obszarze przy różnych wartościach temperatury (od 300 K do 350 K). Dla temperatury 300 K maksymalna wartość wzmocnienia wynosi  $1415 \text{ cm}^{-1}$  dla długości fali 538 nm. Wzrost temperatury z 300 K do 310 K powoduje spadek wzmocnienia (z  $1415 \text{ cm}^{-1}$  do  $1275 \text{ cm}^{-1}$ ) oraz przesunięcie maksimum rozkładu z fali 538 nm do 539 nm. W przypadku rozważanego lasera długość fali zmienia się o 1 nm przy zmianie temperatury o 10 K, tzn.  $d\lambda/dT = 0,1 \text{ nm/K}$ .

Stabilność temperatury prądu progowego  $I_{th}$  lasera krawędziowego można opisać za pomocą parametru charakterystycznego  $T_0$  (ang. characteristic temperature). Zależność prądu progowego  $I_{th}$  od zmiany przyrostu temperatury  $\Delta T$  w obszarze czynnym lasera można wyrazić za pomocą następującego empirycznego równania [16]:

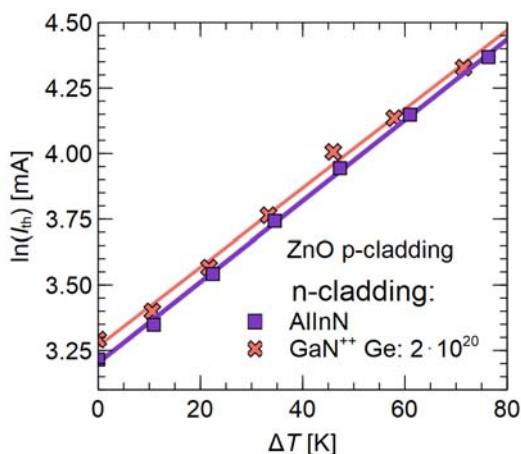
$$(1) \quad I_{th}(\Delta T) = I_{th,0} \exp\left(\frac{\Delta T}{T_0}\right),$$

gdzie  $I_{th,0}$  jest to progowa wartość prądu gdy temperatura obszaru czynnego wynosi np.  $T_p$ .  $\Delta T$  oznacza wzrost tej temperatury. Na rysunku 6 narysowano zależność prądu progowego wynikającą ze wzoru (1) w skali półlogarytmicznej w oparciu o wykonane symulacje. Ze współczynnika nachylenia można wyznaczyć wartości parametru  $T_0$  dla wybranych struktur, w których zastosowano warstwą ZnO.

Najniższą, tzn. najgorszą wartość parametru  $T_0$  uzyskała struktura bez dodatkowej warstwy ograniczającej mod od strony  $n$  lasera i wynosi on 56 K. Struktura z warstwą AlInN uzyskała parametr charakterystyczny w wysokości 65 K. Najlepsze wartości uzyskały struktury z plazmioniczną warstwą  $n$ -GaN. Średnia wartość parametru charakterystycznego wynosi 67 K.



Rys.5. Widma wzmocnienia obszaru czynnego lasera przy jego różnych temperaturach oraz wzmocnienie progowe  $g_{th}$  w obszarze czynnym dla struktur z warstwą ZnO lub warstwą ITO.



Rys.6. Zależność prądu progowego lasera  $I_{th}$  od zmiany temperatury  $\Delta T$  jego obszaru czynnego dla struktur z warstwą ZnO.

## Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki analizy numerycznej wpływu warstwy ZnO jako ogranicznika modu po stronie  $p$  lasera na jego parametry pracy. Uzyskane wyniki porównano z parametrami pracy analogicznych laserów z warstwą ITO.

Przedstawione wyniki wykazały korzystny wpływ warstwy ZnO na parametry pracy laserów krawędziowych. Warstwa ZnO pozwala obniżyć gęstość prądu wstrzykiwanego do złącza w progu akcji laserowej o 0,5 kA/cm<sup>2</sup> oraz zmniejszyć maksymalną temperaturę w przyrządzie w progu akcji laserowej o około 50-60% w stosunku do struktur z warstwą ITO. Wynika to m.in. z wysokiej przewodności cieplnej i niskiego współczynnika absorpcji ZnO. ZnO to obiecująca alternatywa dla ograniczenia modu jakim jest warstwa ITO.

Praca częściowo finansowana w ramach programu „FU<sup>2</sup>N – Fundusz Udoskonalania Umiejętności Młodych Naukowców” wspierającego doskonałość naukową Politechniki Łódzkiej – grant nr 503/7-71-42. Praca została ukończona podczas, gdy drugi autor był doktorantem w Interdyscyplinarnej Szkole Doktorskiej Politechniki Łódzkiej.

**Autorzy:** mgr inż. Dominika Dąbrowka, dr hab. inż. Robert P. Sarzała, Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki, ul. Wólczajska 217/221, 93-005 Łódź, E-mail: robert.sarzała@p.lodz.pl, dominika.dabrowka@dokt.p.lodz.pl

## LITERATURA

- [1] Lei H., Xiaoyu R., Jianping L., Aiqin T., Lingrong J., Siyi H., Wei Z., Liqun Z., Hui Y., High-power hybrid GaN-based green laser diodes with ITO cladding layer, *Photonics Research* 8(3), 279-285 (2020)
- [2] Nakatsu Y., Nagao Y., Kozuru K., Hirao T., Okahisa E., Masui S., Yanamoto T., Nagahama S., High-efficiency blue and green laser diodes for laser displays, *Proc. SPIE* 10918, 99-107 (2019)
- [3] Xiu H., Xu P., Wen P., Zhang Y., Yang J., Rapid degradation of InGaN/GaN green laser diodes, *Superlattices and Microstructures*, 142, 106517 (2020)
- [4] Marioli M., Meneghini M., Rossi F., Salviati G., de Santi C., Mura G., Meneghesso G., Zanoni E., Degradation mechanisms and lifetime of state-of-the-art green laser diodes, *Phys. Status Solidi*, 212, 974-979 (2015)
- [5] Tian A., Hu L., Zhang L., Liu J., Yang H., Design and growth of GaN-based blue and green laser diodes, *Science China Materials*, 63, 1348-1363 (2020)
- [6] Hardy T., Holder C.O., Feezell D.F., Nakamura S., Speck J.S., Cohen D.A., DenBaars S.P., Indium-tin oxide clad blue and true green semipolar InGaN/GaN laser diodes, *Appl. Phys. Lett.*, 103, 081103 (2013)
- [7] Myzaferi A., Mughal A.J., Cohen D.A., Farrell R.M., Nakamura S., Speck J.S., DenBaars S.P., Zinc oxide clad limited area epitaxy semipolar III-nitride laser diodes, *Opt. Express* 26, 12490-12498 (2018)
- [8] Kuc M., Sokół A.K., Piskorski Ł., Dems M., Wasiak M., Sarzała R.P., Czystanowski T., ITO layers as an optical confinement for nitride edge-emitting lasers, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 68(1), 147-154 (2020)
- [9] Kuc M., Piskorski Ł., Dems M., Wasiak M., Sokół A.K., Sarzała R.P., Czystanowski T., Numerical Investigation of the Impact of ITO, AlInN, Plasmonic GaN and Top Gold Metalization on Semipolar Green EELs, *Materials*, 13(6), 1444 (2020)
- [10] Dąbrowka D., Sarzała R.P., Tłumienie efektu thermal crosstalk w liniach laserowych, *Przegląd Elektrotechniczny* 98(9), 164-167 (2022)
- [11] Carlin J.F., Zellweger C., Dorsaz J., Nicolay S., Christmann G., Feltin E., Butté R., Grandjean N., Progresses in III-nitride distributed Bragg reflectors and microcavities using AlInN/GaN materials, *Phys. Status Solidi B* 242(11), 2326-2344 (2005)
- [12] Castiglia A., Feltin E., Cosendey G., Altoukhov A., Carlin J.-F., Butté R., Grandjean N., Al<sub>0.83</sub>In<sub>0.17</sub>N lattice-matched to GaN used as an optical blocking layer in GaN-based edge emitting lasers, *Appl. Phys. Lett.* 94(19), 193506 (2009)
- [13] Perlín P., Holc K., Sarzyński M., Scheibenzuber W., Marona Ł., Czernecki R., Leszczyński M., Bockowski M., Grzegory I., Porowski S., Cywiński G., Firek P., Szmiedt J., Schwarz U., Suski T., Application of a composite plasmonic substrate for the suppression of an electromagnetic mode leakage in InGaN laser diodes, *Appl. Phys. Lett.* 95(26), 261108 (2009)
- [14] Berger C., Lesnik A., Zettler T., Schmidt G., Veit P., Dadgar A., Bläsing J., Christen J., Strittmatter A., Metalorganic chemical vapor phase epitaxy of narrow-band distributed Bragg reflectors realized by GaN:Ge modulation doping, *J. Crystal Growth* 440, 6-12 (2016)
- [15] Mehari S., Cohen D.A., Becerra D.L., Nakamura S., DenBaars S.P., Demonstration of enhanced continuous-wave operation of blue laser diodes on a semipolar 202<sup>-1</sup> GaN substrate using indium-tin-oxide/thin-p-GaN cladding layers, *Opt. Express* 26, 1564-1572 (2018)
- [16] Mroczewicz B., Bugajski M., Nakwaski W., *Physics of Semiconductor Laser*, North Holland, Amsterdam, 1991