

Komputerowa analiza zjawisk pojemnościowych w azotkowych laserach VCSEL

Streszczenie. W pracy przedstawiono symulacje komputerowe azotkowych laserów o emisji powierzchniowej z pionową wnęką rezonansową, emitujących fale 405 nm. Analiza dotyczy zjawisk pojemnościowych zachodzących w tych laserach, istotnych z punktu widzenia ich potencjalnych zastosowań. Zauważono istotną różnicę w prądach czynnych między strukturami ze złączem tunelowym (TJ) i implantacją oraz strukturą z kontaktem ITO. Struktura TJ z grubą implantacją wydaje się najbardziej korzystna z punktu widzenia właściwości pojemnościowych.

Abstract. This paper presents computer simulations of nitride vertical-cavity surface-emitting lasers, emitting at 405 nm. The analysis is focused on capacitance phenomena occurring in these lasers, which are important for potential applications in optical links. A significant difference in the active currents is observed between the two analyzed structures with tunnel junction (TJ) and implantation, and the structure with an ITO electrode. The structure with TJ and thick implantation seems to be the most favorable from the point of view of capacitance properties. (**Computer analysis of capacitance phenomena in nitride VCSELs.**)

Słowa kluczowe: VCSEL, symulacje komputerowe, GaN, lasery półprzewodnikowe.
Keywords: VCSEL, computer simulations, GaN, semiconductor lasers.

Wstęp

Lasery VCSEL (ang. vertical-cavity surface-emitting lasers) ze względu na swoje zalety, cieszą się dużym zainteresowaniem. Lasery te pracują na pojedynczym modzie podłużnym i emitują stosunkowo wąską wiązkę o dobrych parametrach optycznych. Ponadto lasery VCSEL mają niskie prądy progowe i stosunkowo duże moce, w porównaniu do ich małych rozmiarów. Dotychczas komercyjnie dostępne są lasery emitujące promieniowanie z zakresu czerwieni i bliskiej podczerwieni. Stosowane są one głównie do optycznego przesyłu danych na krótkie dystanse, w detekcji 3D, w pojazdach autonomicznych, systemach LIDAR (ang. Light Detection and Ranging) [1-5]. Rozszerzenie zakresu emisji laserów VCSEL na zakres widzialny pozwoliłoby na znaczne poszerzenie ich zastosowań. Tego typu konstrukcje można zbudować na bazie azotku galu. Niestety, jak na razie azotkowe lasery VCSEL są cały czas w fazie badań laboratoryjnych. W tym momencie możemy mówić jedynie o potencjalnych zastosowaniach tych urządzeń. Zastosowania te mogą objąć m.in. systemy komunikacji w świetle widzialnym (VLC) w zakresie 390-750 nm [6].

We wszystkich systemach optycznej transmisji danych ważnym parametrem jest szybkość modulacji emitowanej wiązki. Szybkość modulacji może być ograniczona przez obecność pojemności i rezystancji w strukturze przyrządu. W niniejszej pracy analizujemy wpływ parametrów konstrukcyjnych struktury lasera na zjawiska pojemnościowe zachodzące w jego wnętrzu.

Jednym z dużych problemów obecnych laboratoryjnych konstrukcji laserów VCSEL są słabe parametry materiałowe zastosowanych w jego konstrukcji warstw GaN typu p, a w szczególności słaba przewodność elektryczna tego materiału. Problem z efektywnym rozproszaniem prądu we wnętrzu lasera rozwiązuje się najczęściej wprowadzając do jego konstrukcji warstwę ITO (tlenku indowo-cynowego), która cechuje się dużą przewodnością elektryczną. Niestety warstwa ITO charakteryzuje się także dużą absorpcją optyczną, a dodatkowo musi być zestawiona z warstwą tlenku ograniczającego i ukierunkowującego przepływ prądu. Powoduje to powstanie dodatkowych elementów pojemnościowych, niekorzystnie wpływających na modulację sygnału lasera. Alternatywnym podejściem jest zastąpienie warstwy ITO złączem tunelowym (tunnel junction). Pozwala to na jednoczesną eliminację nadmiaru materiału typu p oraz zastosowanie z obu stron lasera

kontaktów typu n o dużo lepszych właściwościach elektrycznych. Złącze tunelowe można zestawiać z wykonaniem implantacji jonami, która wyznacza nam ścieżki prądowe w strukturze lasera. Przedstawiona w pracy analiza będzie dotyczyć dwóch typów struktur wykonanych z materiałów azotkowych, a mianowicie struktury ze złączem tunelowym (TJ VCSEL) oraz struktury z kontaktem ITO (ITO VCSEL). W przypadku struktury TJ VCSEL rozważane będą konstrukcje posiadające różne grubości implantacji.

Modele komputerowe

Obliczenia wykonano przy użyciu modeli komputerowych stworzonych w Zespole Fotoniki Instytutu Fizyki Politechniki Łódzkiej, do których należą: samouzgodniony model komputerowy [7] oraz model pojemności [8]. Model samouzgodniony uwzględnia m.in. zjawiska termiczne, elektryczne, wzmocnieniowe i optyczne zachodzące w laserze półprzewodnikowym. Parametry materiałowe wykorzystane w symulacjach komputerowych analizowanych struktur laserowych znajdują się w pracy [9].

Wyznaczając charakterystyki pracy przyrządu zaczynamy od wyznaczenia jego parametrów w proggu akcji laserowej, a w szczególności jego prądu progowego. Na rysunku 1 przedstawiono schemat blokowy do obliczeń progowych uwzględniający wspomniane wcześniej zjawiska fizyczne. Następnie powtarzamy tę procedurę zmieniając temperaturę chłodnicy na jakiej spoczywa laser. W ten sposób można wyznaczyć prądy progowe lasera w zależności od temperatury jego obszaru czynnego. Zmiana prądu progowego lasera, którego obszar czynny początkowo znajdował się w temperaturze T_p , po jej wzroście do temperatury $T_p + \Delta T$ opisana jest wzorem:

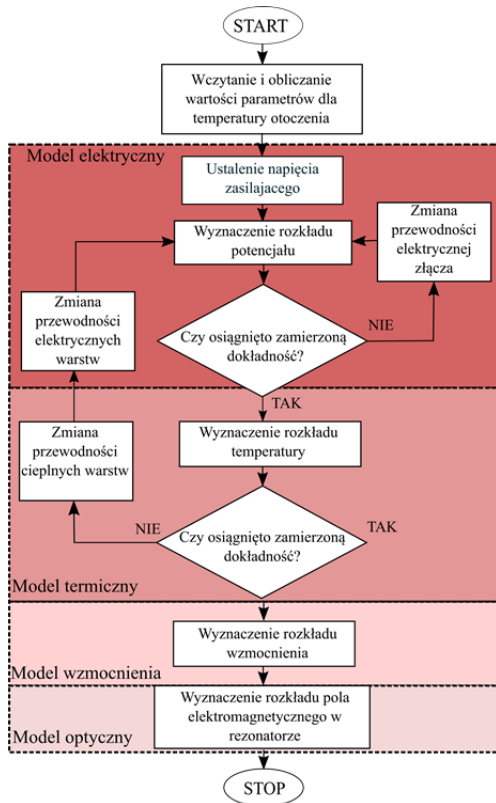
$$(1) \quad I_{th}(T_p + \Delta T) = I(T_p) \exp(\Delta T / T_0)$$

gdzie T_0 jest charakterystycznym parametrem struktury laserowej. Wzrost temperatury obszaru czynnego ściśle związany jest z prądem I zasilającym laser. Mając te dane możliwe jest policzenie mocy P_{out} emitowanej przez laser w zależności od jego prądu zasilania według zależności:

$$(2) \quad P_{out}(I) = \eta_i \left(\frac{\alpha_m}{\alpha_{mi} + \alpha_i} \right) \frac{h\nu}{e} (1 - I_{th} \pi(T(I)))$$

gdzie: η_i – wewnętrzna sprawność kwantowa, α_m – straty modowe krawędziowe związane z emisją promieniowania, α_i – całkowite straty modowe, e – ładunek elementarny, $h\nu$ – energia fotonów.

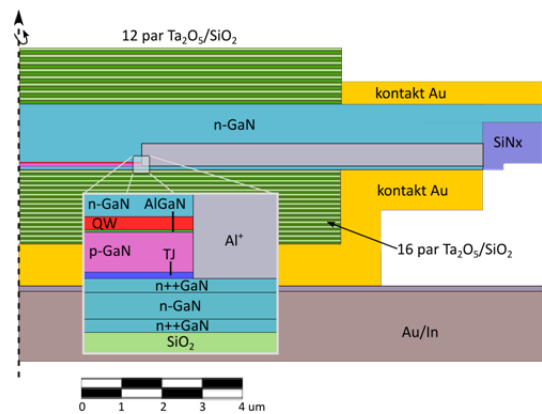
Powyższe równania opisują charakterystyki statyczne laserów. Model pojemności bazuje na modelu statycznym, z tym, że do składowej stałej napięcia zasilającego laser zostaje dodana modulowana składowa przemienna o niewielkiej wartości.



Rys.1. Schemat blokowy do obliczeń progowych lasera, obrazujący wykorzystane modele komputerowe oraz wzajemne i połączenie.

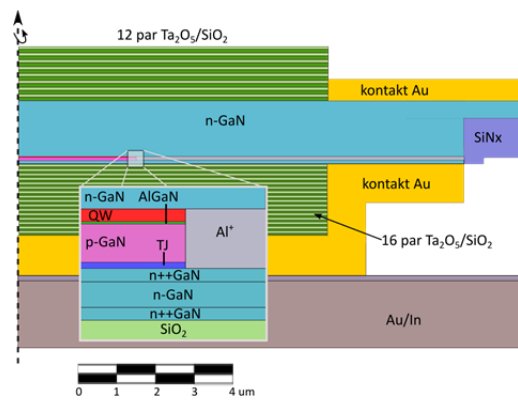
Modelowane struktury

Pierwsza z modelowanych struktur, struktura ze złączem tunelowym bazuje na konstrukcji powstałej na Uniwersytecie Kalifornijskim w Santa Barbara (UCSB) [10]. Pierwotna konstrukcja posiadała stosunkowo długi rezonator o długości około 23 długości emitowanej fali (23λ). Gruby rezonator był zastosowany w niniejszej konstrukcji z powodów termicznych. Gruba warstwa GaN, który jest dobrym przewodnikiem ciepła, istotnie przyczynia się do obniżenia temperatury w środku działającego lasera. W przedstawionych rozważaniach wybrano struktury z nieco mniejszymi rezonatorami równymi 10λ . Obie modelowane struktury są zaprojektowane na emisję fali o długości 405 nm i zawierają dwie pary dielektrycznych zwierciadeł DBR (ang. Distributed Bragg Reflectors). Górne zwierciadło posiada 12 par warstw Ta_2O_5/SiO_2 , natomiast dolne zwierciadło ma 16 par warstw wykonanych z tych samych materiałów. Dolne zwierciadło otacza pierścieniowy kontakt ze złota. W konstrukcji VCSEL pomiędzy obszarem czynnym a złączem tunelowym znajduje się cienka warstwa wykonana z materiału AlGaIn oraz warstwa materiału p-GaN. W strukturze tej aperturę elektryczną urządzenia w kierunku poziomym definiuje implantacja jonami Al^+ .

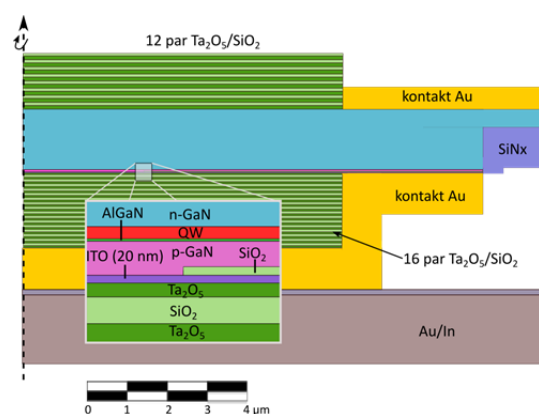


Rys.2. Schemat konstrukcji azotkowego lasera VCSEL ze złączem tunelowym i grubą implantacją Al^+ o grubości 542 nm

Na rysunku 2 i 3 przedstawiono schemat obu analizowanych konstrukcji azotkowych laserów VCSEL ze złączem tunelowym posiadających odpowiednio grubą i cienką implantację. Modyfikacją tej struktury jest trzecia rozważana konstrukcja, w której zamiast złącza tunelowego wykorzystano kontakt ITO o grubości 20 nm (rys. 4). W tym przypadku warstwą ograniczającą przepływ prądu, czyli definiującą aperturę elektryczną urządzenia jest cienka warstwa SiO_2 .



Rys.3. Schemat konstrukcji azotkowego lasera VCSEL ze złączem tunelowym i cienką implantacją Al^+ o grubości 142 nm

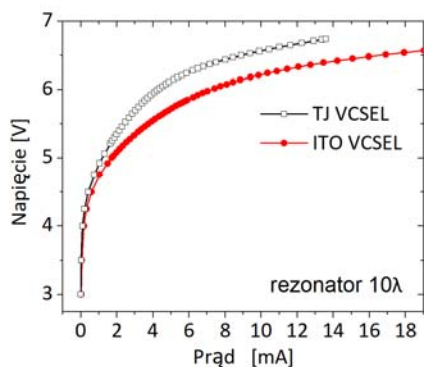


Rys.4. Schemat konstrukcji azotkowego lasera VCSEL z kontaktem ITO

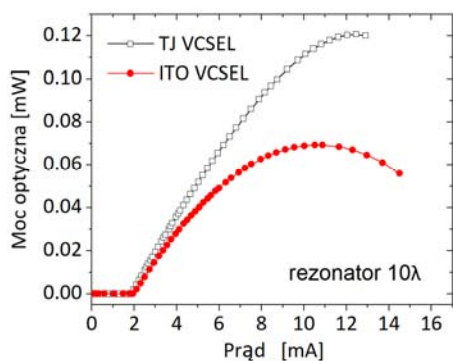
Wyniki

W pierwszej kolejności porównano charakterystyki prądowo-napięciowe oraz mocowo-prądowe analizowanych dwóch struktur z rezonatorami 10λ oraz aperturami

elektrycznymi o średnicy 6 μm . Na podstawie danych eksperymentalnych dla oryginalnej struktury lasera TJ VCSEL z rezonatorem 23λ skalibrowaliśmy nasz model komputerowy tak, żeby uzyskać podobne charakterystyki pracy lasera. Wyniki te można znaleźć w pracy [11]. Rysunek 5 przedstawia charakterystykę prądowo-napięciową struktur TJ VCSEL z grubą implantacją oraz ITO VCSEL. Struktura ze złączem tunelowym ma większy opór niż struktura z ITO. Na charakterystykach mocowo-prądowych z rysunku 6. widać, że moc emitowana przez laser TJ VCSEL jest prawie dwukrotnie większa niż moc emitowana przez laser ITO VCSEL. Podobne zależności, czyli większy opór oraz emitowane moce w strukturze z TJ w porównaniu ze strukturą z ITO pokazane są w pracy [12].



Rys.5. Charakterystyki prądowo-napięciowe struktur laserów VCSEL ze złączem tunelowym (TJ) oraz z kontaktem ITO.



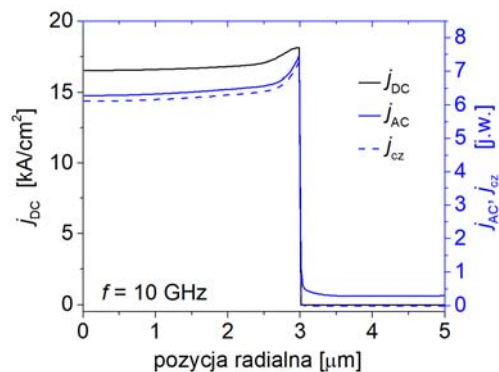
Rys.6. Charakterystyki mocowo-prądowe struktur laserów VCSEL ze złączem tunelowym (TJ) oraz z kontaktem ITO.

Model zjawisk pojemnościowych zakłada, że laser jest zasilany napięciem z pewną składową stałą, która jest modulowana sinusoidalnie zmienną składową o niewielkiej amplitudzie, czyli w reżimie *small signal modulation* (SSM). Składowa stała powoduje przepływ prądu przekraczającego wartość progową akcji laserowej, a składowa zmienna ma powodować modulację mocy emitowanej wiązki laserowej. Tu jednak skupiamy się jedynie na zjawiskach elektrycznych – czyli jak modulacja napięcia przekłada się na modulację prądu płynącego przez laser, a zwłaszcza przez jego obszar czynny. To właśnie ten parametr powoduje modulację mocy emitowanego promieniowania, choć ta zależność nie jest prostą proporcjonalnością.

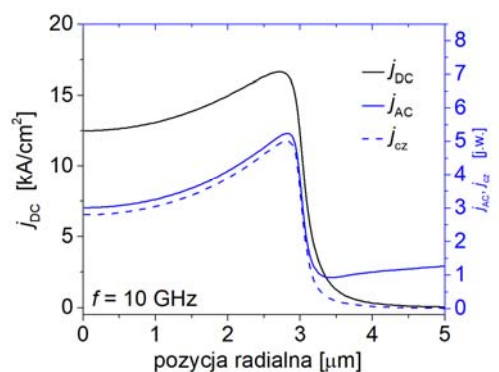
Ponieważ struktura lasera zawiera elementy izolujące lub o niskiej przewodności elektrycznej, przy dostatecznie dużych wartościach częstotliwości składowej zmiennej napięcia pojawiają się istotne efekty pojemnościowe. Impedancja lasera Z staje się zespolona, a jej moduł spada

z częstotliwością modulacji. Spadek $|Z|$ oznacza, że przy ustalonej amplitudzie składowej zmiennej napięcia, amplituda składowej zmiennej prądu rośnie z częstotliwością. Wbrew pozorom niekoniecznie jest to korzystne zjawisko. Zasilacz lasera musi wytwarzać większy prąd, ale ten dodatkowy prąd nie musi powodować, że więcej nośników przepłynie przez obszar czynny lasera – a to właśnie modulacja liczby nośników przepływających przez obszar czynny powoduje modulację mocy emitowanej wiązki. Podobnie jak w przypadku zwykłego kondensatora, między jego okładkami nie przepływają żadne nośniki ładunku, pomimo że nie stanowi on przerwy w układzie zasilanym napięciem zmiennym. Nośniki płyną przewodami do i z okładek kondensatora. Ten prąd jest przesunięty w fazie względem napięcia zasilającego o $\pi/2$.

Żeby określić jaką część składowej zmiennej prądu przekłada się na modulację liczby nośników wstrzykiwanych do obszaru czynnego, wystarczy policzyć rzut zespolonej amplitudy prądu na kierunek zespolonego napięcia na złączu (które jest inne niż napięcie przyłożone do lasera). Nazwiemy tą amplitudę *prądem czynnym* j_{cz} . Nasz model pozwala na analizę tych zjawisk również lokalnie, więc zamiast posługiwać się całym prądem, będziemy czasem mówić o lokalnej gęstości prądu czynnego (j_{cz}).



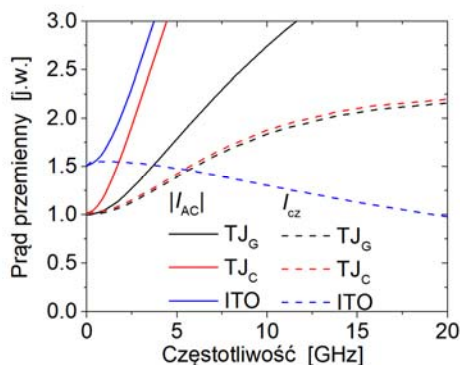
Rys.7. Rozkład gęstości prądów w obszarze czynnym: j_{DC} – składowej stałej prądu zasilającego, j_{cz} – prądu czynnego, j_{AC} – składowej przemiennego prądu dla częstotliwości modulacji równej 10 GHz. Wykresy dotyczą struktury ze złączem tunelowym.



Rys.8. Rozkład gęstości prądów w obszarze czynnym: j_{DC} – składowej stałej prądu zasilającego, j_{cz} – prądu czynnego, j_{AC} – składowej przemiennego prądu dla częstotliwości modulacji równej 10 GHz. Wykresy dotyczą struktury z kontaktem ITO.

W ogólności rozkład gęstości prądów przemiennych (całkowitego i czynnego) nie musi mieć kształtu zbliżonego do rozkładu gęstości składowej stałej. Na rysunkach 7 i 8 przedstawione są te trzy profile dla struktury ze złączem tunelowym i grubą implantacją (rys. 7) oraz struktury z ITO

(rys. 8) dla częstotliwości 10 GHz i składowych stałych równych około 3,4 mA. Widoczne jest, że istotna część prądu przemiennego płynie przez obszary poza aperturą prądową. Wynika to z faktu, że w wysokich częstotliwościach obszary izolacji elektrycznej oraz praktycznie nieprzewodzące obszary złącza, przez które nie płynie składowa stała, stają się przewodzące dla składowej przemiennej. Jeśli jednak rozważymy składową czynną, to jej rozkład jest bardzo podobny do rozkładu składowej stałej. Jest to raczej korzystna sytuacja, gdyż można założyć, że laser operuje na modach optycznych dobrze dopasowanych do rozkładu składowej stałej, więc można przyjąć, że podobny rozkład amplitudy modulacji sprzyja modulacji liczby fotonów emitowanych w te mody.



Rys.9. Składowe przemienne prądu $|I_{AC}|$ oraz prądu czynnego I_{cz} w zależności od częstotliwości modulacji dla struktur z ITO oraz dwóch przypadków struktur: z grubą implantacją równą 542 nm (TJ_G), z cienką implantacją równą 142 nm (TJ_C).

Na rysunku 9 przedstawione są zależności składowej przemiennej prądu oraz jej części czynnej w funkcji częstotliwości modulacji. Dla struktury ze złączem tunelowym rozważone zostały dwie grubości implantowanej warstwy izolacyjnej: 142 nm i 542 nm. We wszystkich strukturach prąd przemienny rośnie z częstotliwością, gdyż w układach z pojemnościami impedancja generalnie spada z częstotliwością. Jednak zachowanie części czynnej jest wyraźnie inne w strukturze ze złączem tunelowym. W przeciwieństwie do struktury z ITO, gdzie prąd czynny nieco maleje z częstotliwością, w strukturach ze złączem tunelowym prąd czynny rośnie ponad dwukrotnie w rozważanym zakresie częstotliwości i nasycy się w okolicy 20 GHz. Z punktu widzenia zastosowań telekomunikacyjnych optymalna jest odpowiedź optyczna lasera (modulacja mocy emitowanego światła) niezależna od częstotliwości modulacji napięcia. Należy jednak zaznaczyć, że zmiana amplitudy prądu modulującego jest tylko jednym z czynników decydujących o pracy lasera, więc nie jest oczywiste, który z tych schematów zmian prądu jest korzystniejszy. Z pewnością jednak struktura ze złączem tunelowym i grubą warstwą implantowaną ma najkorzystniejszy stosunek części czynnej prądu do całej składowej przemiennej.

Podsumowanie

W pracy przeanalizowano dwa typy półprzewodnikowych laserów VCSEL wykonanych z

materiałów azotkowych, do których należą struktura ze złączem tunelowym oraz struktura z kontaktem ITO. Struktura z TJ ma bardziej jednorodny rozkład prądu wstrzykiwanego do obszaru czynnego lasera niż struktura z ITO. Zgodnie z naszymi symulacjami struktury z TJ mają potencjał do osiągnięcia wyższych mocy optycznych w porównaniu ze strukturami z ITO. Z punktu widzenia zjawisk pojemnościowych w obydwu strukturach, to konstrukcja ze złączem tunelowym i grubą warstwą implantowaną wydaje się najbardziej optymalna dla zastosowań telekomunikacyjnych.

Praca jest współfinansowana z projektu NCN nr UMO-2018/29/N/ST7/02151

Autorzy: mgr inż. Patrycja Śpiewak, Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki, ul. Wólczańska 217/221, 90-005 Łódź, E-mail: patrycja.spiewak@p.lodz.pl; dr hab. inż. Michał Wasiak, Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki, ul. Wólczańska 217/221, 90-005 Łódź, E-mail: michal.wasiak@p.lodz.pl; dr hab. inż. Robert P. Sarzała, Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki, ul. Wólczańska 217/221, 90-005 Łódź, E-mail: robert.sarzała@p.lodz.pl

LITERATURA

- [1] Seurin J.F., Zhou D., Xu G., Miglo A, Li D., Chen T., Guo B., Ghosh C, High-efficiency VCSEL arrays for illumination and sensing in consumer applications, *Proc. of SPIE* 9766 (2016) 97660D-1(9)
- [2] Warren ME, Podva D, Dacha P, Block MK, Helms CJ, Maynard J, Carson RF. Low-divergence high-power VCSEL arrays for lidar application. In Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XXII 2018 Feb 19 (Vol. 10552, p. 105520E). International Society for Optics and Photonics.
- [3] Dummer M., Johnson K., Rothwell S., Tatah K., Hibbs-Brenner M., The role of VCSELs in 3D sensing and LiDAR, *Proc. SPIE* 11692 (2021), Optical Interconnects XXI, 116920C
- [4] Pruijboom A., Apetz R., Conrads R., Deppe C., Derra G., Gronenborn S., Kolb J.S, Moench H., Ogiewa F., Pekarski P., Pollmann-Retsch J., Weichmann U., Vertical-cavity surface emitting laser-diodes arrays expanding the range of high-power laser systems and applications, *J. Laser Appl.* 28 (2016), n.3, 032005-1(7)
- [5] E. Haglund, P. Westbergh, J. S. Gustavsson, E. P. Haglund, A. Larsson, "High-speed VCSELs with strong confinement of optical fields and carriers" *Journal of Lightwave Technology*, 34(2), 269-277, 2016.
- [6] L. U. Khan, "Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges", *Digital Communications and Networks*, 3.2: 78-88, 2017.
- [7] R. P. Sarzała, et al., *Optical and Quantum Electronics*, 36(4), pp. 331-347, 2004.
- [8] M. Wasiak et al., *J. Phys. D Appl. Phys.*, 49(17), 2016.
- [9] Kuc M. et al., Thermal crosstalk in arrays of III-N-based Lasers, *Materials Science and Engineering: B*, vol. 178(20) (2013), 1395-1402.
- [10] Forman CA, Lee S, Young EC, Kearns JA, Cohen DA, Leonard JT, Margalith T, DenBaars SP, Nakamura S. Continuous-wave operation of m-plane GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers with a tunnel junction intracavity contact. *Applied Physics Letters*. 2018 Mar 12;112(11):111106
- [11] Sarzała RP, Śpiewak P, Wasiak M. Influence of resonator length on performance of nitride TJ VCSEL. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 2019 Oct 9;55(6):1-9.
- [12] Shen, Chih-Chiang, et al. "Design and Fabrication of the Reliable GaN Based Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser via Tunnel Junction," *Crystals* 9.4 (2019): 187