

Początek i rozwój półprzewodnikowych laserów VCSEL

Streszczenie. W pracy przedstawiono historię rozwoju laserów półprzewodnikowych o emisji powierzchniowej z pionową wnęką rezonansową (laserów VCSEL). Odnotowano ich najważniejsze przełomowe rozwiązania technologiczne oraz konstrukcyjno-materiałowe. Podano też parametry eksploatacyjne tych przyrządów na poszczególnych etapach rozwoju i porównano ich własności z laserami o emisji krawędziowej. Szczególny nacisk położono na pokazanie rozwoju i obecnego stanu azotkowych laserów VCSEL. Przedstawiono też wybrane wyniki modelowania działania tych konstrukcji.

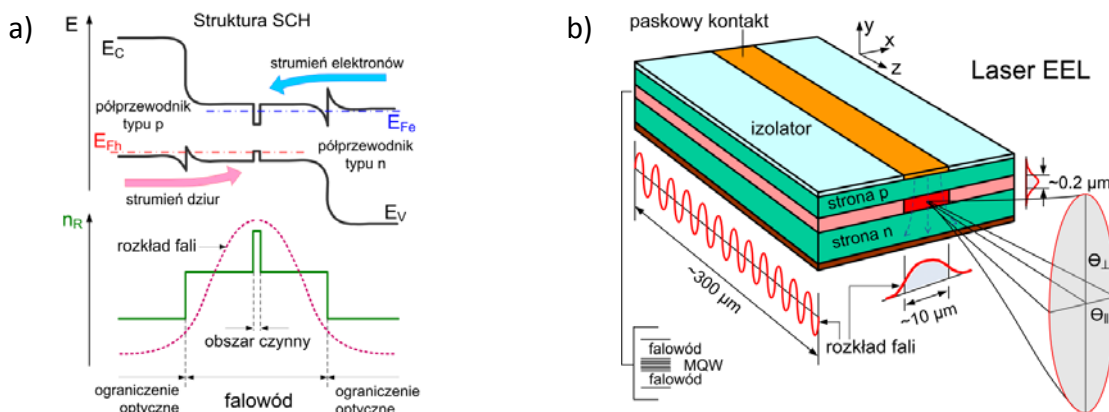
Abstract. History of a development of surface-emitting semiconductor lasers with a vertical cavity (VCSEL lasers) is presented. The most important turning points of their technology solutions and material structures are described. Laser operation parameters are shown for successive development stages. Properties of surface-emitting lasers are compared with those of edge-emitting ones. Development of structures of nitride VCSELs is shown together with characterization of their current state. Results of numerical simulations of an operation of various surface-emitting nitride lasers are presented. (*The beginnings and development of VCSELs*).

Słowa kluczowe: laser półprzewodnikowy, VCSEL, GaN, modelowanie
Keywords: semiconductor laser, VCSEL, GaN, numerical simulation

Wstęp

Pierwsze lasery półprzewodnikowe charakteryzowały się rozczarującymi osiągnięciami. Mogły pracować tylko impulsowo i tylko w temperaturach kriogenicznych, co pozbawiało je ich podstawowej zalety to jest miniaturowości i prostoty zasilania. Przełom nastąpił ok. 1970 roku, kiedy pokazano pierwszy biheterozłączowy krawędziowy laser półprzewodnikowy [1] pracujący w temperaturze pokojowej (RT – Room Temperature) z falą ciągłą (CW – Continuous Wave). Można było teraz myśleć o ich praktycznych zastosowaniach w nauce i technice. We wczesnych latach 70. wysiłki badaczy zostały ukierunkowane na otrzymanie struktur laserowych charakteryzujących się wysoką sprawnością oraz pracą CW z mocą kilku miliwatów na pojedynczym modzie poprzecznym. W późniejszych latach starano się zwiększyć moc użytkową, ograniczyć rozbieżność wiązki wychodzącej z lasera i uzyskać kontrolę nad emisją modu podłużnego. W roku 1972 Dyment

zastosował technikę implantacji jonami w celu ukierunkowania rozplywu prądu w strukturze lasera [2]. W roku 1974 Tsukada konstruuje laser z zagrzebanym obszarem czynnym (laser BH – Buried Heterostructure) [3], a w roku 1977 Kawaguchi i Kawasaki wytwarzają laser z falowodem grzbietowym (laser RW – Ridge Waveguide) [4]. Zastosowanie udoskonalonych technik epitaksjalnych umożliwiło wytworzenie w roku 1973 przełomowej dla rozwoju laserów półprzewodnikowych struktury SCH (Separate Confinement Heterostructure) [5] oraz w 1974 roku studni kwantowych (QW – Quantum Well) [6] (patrz rys.1a). Owocem tych prac staje się ostatecznie wytworzenie w roku 1981 struktury GRIN-SCH (GRaded Index Separate Confinement Heterostructures) [7], a w 1982 roku tejsze struktury z obszarem czynnym w postaci pojedynczej lub wielokrotnej studni kwantowej (MQW – Multiple Quantum Well) [8].

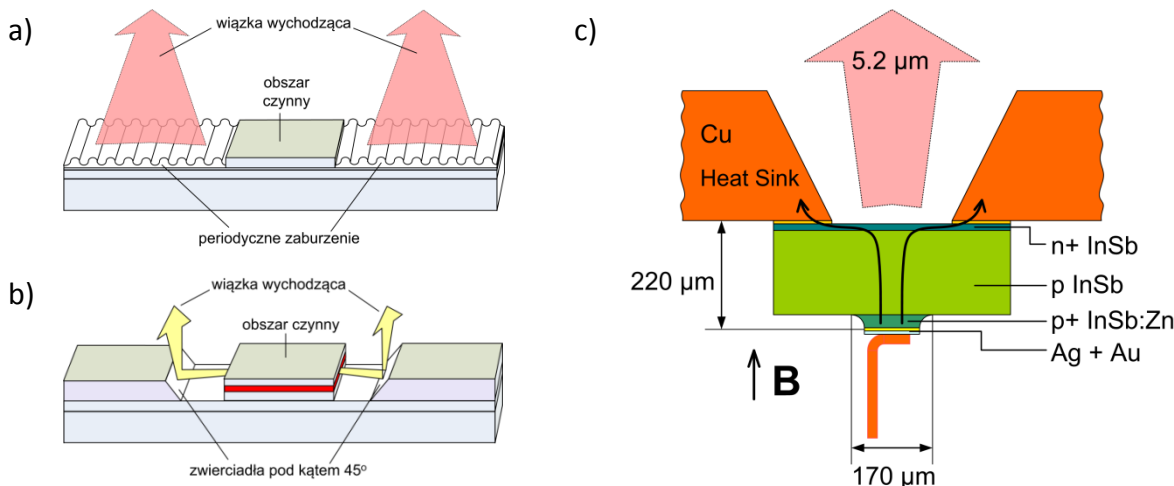


Rys.1. a) Schemat energetyczny struktury pasmowej obszaru czynnego lasera półprzewodnikowego (struktura SCH) spolaryzowanego w kierunku przewodzenia. Na dole rysunku narysowano profil współczynnika załamania oraz rozkład fali elektromagnetycznej. b) Schemat typowego paskowego lasera krawędziowego (laser EEL) wraz z naszkicowanymi rozkładami fali wygenerowanej w jego rezonatorze

Ważnym krokiem w rozwoju laserów jest też zaproponowanie w roku 1971 przez Kogelnika i Shanka koncepcji struktury periodycznej selektywnie odbijającej falę elektromagnetyczną [9]. Praca ta umożliwiła wytworzenie w latach 1973 i 1974 [10, 11] odpowiednio laserów DBR (*Distributed Bragg Reflection*) i DFB (*Distributed Feedback*). W latach 70. powstały więc niemal wszystkie niezbędne elementy współczesnych półprzewodnikowych laserów krawędziowych (patrz rys.1b).

Koncepcja lasera VCSEL

W latach 80. lasery półprzewodnikowe EEL (*Edge-Emitting Lasers*) były już dojrzałymi konstrukcjami

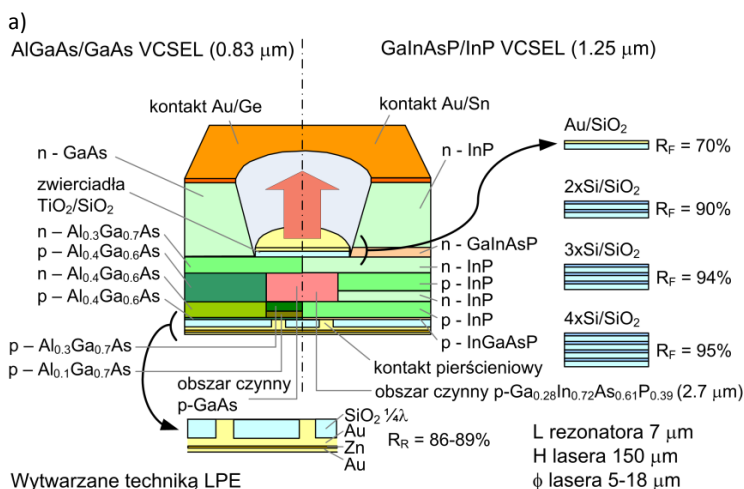


Rys.2. Schemat budowy lasera o emisji powierzchniowej typu GSE (a) oraz lasera (b), w którym wykorzystano specjalnie nachylone pod kątem 45° zwierciadła półprzewodnikowe. c) Laser z pionową wnęką rezonansową o emisji powierzchniowej zademonstrowany w roku 1965 przez Melengailisa. Do skupienia prądu w centralnej części struktury lasera użyto pola magnetycznego o indukcji **B**

Poważną wadą laserów EEL był brak możliwości wykorzystania ich struktur do wykonania dwuwymiarowych matryc laserowych. Problemy te można było rozwiązać zmieniając generalnie koncepcję budowy lasera półprzewodnikowego. Tak narodziła się idea lasera z pionową wnęką rezonansową emitującego wiązkę z powierzchni, a obecnie w skrócie nazywanego laserem VCSEL (*Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser*). Wcześniej jednak próbowano za pomocą laserów EEL uzyskać emisję powierzchniową poprzez zastosowanie ośrodka periodycznego jako medium odsprężającego część fali

pozwalającymi uzyskać moc 100 mW i osiągnąć sprawność około 50%. Przyrządy te stosowano w światłowodowej komunikacji optycznej, komunikacji satelitarnej, w zintegrowanych układach optycznych, obróbce materiałów oraz zapisie i odczycie informacji (CD RW). Jednak już pod koniec lat 70. zdano sobie sprawę z podstawowych wad laserów krawędziowych, do których w szczególności trzeba zaliczyć dużą rozbieżność wychodzącej wiązki promieniowania, pracę na wielu modach podłużnych oraz znaczny wpływ zmian warunków zewnętrznych i warunków zasilania na emitowaną przez laser falę.

emitowanej w płaszczyźnie złącza ku górze. Tak w roku 1975 powstały lasery nazywane laserami GSE (*Grating Surface Emitting laser*) [12, 13] (patrz rys.2a). Podobna koncepcja przedstawiona przez Springthorpea w roku 1977 [14] polegała na wykonaniu dodatkowych zewnętrznych zwierciadeł ustawionych pod kątem 45° do generowanej wiązki promieniowania (patrz rys.2b). Rozwiązania te jednak nie sprawdziły się, gdyż nie wykorzystywały w pełni zalet taniej technologii planarnej i znacznie podnosiły koszty produkcji.



Rys.3. a) Schemat budowy wraz z najważniejszymi elementami konstrukcyjnymi pierwszych laserów VCSEL wytwarzanych w technologii arsenkowej i fosforkowej. b) Prądy progowe laserów VCSEL wytwarzanych w latach 1979-1988 (na podstawie [20]). Znaczenie poszczególnych oznaczeń: P – planar, BH – buried heterostructure, SC – short cavity, RE – ring electrode, M – mesa, DR – dielectric reflector, CBH – circular buried heterostructure, CW – continuous wave

Generalnie uważa się, że koncepcję lasera VCSEL przedstawił w roku 1977 Kenichi Iga [15], jednak warto wspomnieć, że pierwszy taki laser powstał dużo wcześniej. W roku 1965 Melengailis zademonstrował działający laser o emisji powierzchniowej (patrz rys.2c) zbudowany na bazie objętościowego kryształu InSb z metalicznymi zwierciadłami, który był zasilany elektrycznie (pulsacyjnie) i emitował falę 5,2 μm w temperaturze 10 K [16].

Prace technologiczne nad laserami VCSEL ruszyły pod koniec lat 70. W 1979 roku Soda [17] przedstawia pierwszy elektrycznie pompowany laser, pracujący impulsowo w temperaturze 77 K (prąd progowy 900 mA). Laser był zbudowany z materiałów GaInAsP/InP. Wybrano je nieprzypadkowo. W roku 1970 wytworzono pierwszy światłowod kwarcowy o tłumienności poniżej 20 dB/km [18], potwierdzając przewidywania Kao z roku 1966. W roku 1977 uruchomiono pierwszą linię światłowodową w Chicago. Szybko też okazało się, że minimalne tłumienie światłowodów można uzyskać dla fal 1300 nm i 1550 nm, a te z kolei mogły być emitowane właśnie przez lasery zbudowane na bazie fosforków. Lasery VCSEL świetnie nadawały się do zastosowań w światłowodowej telekomunikacji optycznej, jednak sam system materiałowy GaInAsP/InP nie był odpowiedni dla uzyskania monolitycznych laserów tego typu, co miało okazać się w następnych latach. Dało to bodziec do rozpoczęcia prób z materiałami AlGaAs/GaAs, co zaowocowało uzyskaniem w roku 1984 arsenkowego lasera VCSEL pracującego impulsowo w temperaturze pokojowej [19]. Z badań tych wynikało, że do uzyskania efektywnie działających laserów VCSEL potrzebne są (i) zwierciadła o odbijalności powyżej 95%, (ii) efektywny sposób ograniczenia prądu w strukturze lasera wymuszający jego przepływ od oddalonych od osi lasera kontaktów do jego centrum. Rozwiązania konstrukcyjne, jakie stosowano w tym okresie w obu grupach materiałowych, przedstawia rysunek 3a. Momentem przełomowym okazał się rok 1988, kiedy to Koyama [21] zademonstrował pierwszy laser VCSEL pracujący w trybie CW RT z prądem progowym 3 mA (patrz rys.3b). Laser ten zbudowany był z GaAlAs/GaAs. W tym samym roku udało się też uzyskać fosforkowy laser VCSEL pracujący CW, ale tylko w 77 K [22].

Już w roku 1985 powstał pierwszy optycznie pompowany laser emitujący powierzchniowo z obszarem czynnym w postaci MQW [23]. Elektrycznie pompowany MQW VCSEL zademonstrowano w roku 1989 [24]. W związku z niewielkimi rozmiarami obszaru czynnego powstała koncepcja zwielokrotnienia go w postaci tzw. struktury RPG (*Resonant Periodic Gain*) zaproponowanej przez Geelsa w 1988 roku [25], w której obszary MQW były rozmieszczone w rezonatorze w odległości $\frac{1}{2}$ długości fali, co odpowiadało strzałkom fali stojącej. Podsumowaniem tych prac był wytworzony przez Jewella w pełni monolityczny laser InGaAs/GaAs VCSEL (emisja 960 nm) ze zwierciadłami DBR z AlGaAs/GaAs [26].

Rozwój laserów VCSEL

Pod koniec lat 80. lasery VCSEL z materiałów AlGaAs/GaAs mogły emitować moc do 3,2 mW w pracy CW, natomiast lasery z InGaAs/GaAs - około 0,6 mW CW i nawet 18 mW w pracy impulsowej. Uzyskano też dla nich szybkość modulacji 8 GHz. Sprawność tych przyrządów wynosiła 40% (obecnie sięga 62%), a prąd progowy spadł poniżej 1 mA. Dalsza poprawa tych parametrów była już tylko kwestią czasu. W stosunku do laserów EEL lasery VCSEL mają szereg zalet:

- niskie koszty wytwarzania będące wynikiem możliwości odrzucania wadliwych struktur jeszcze przed nakładaniem kontaktów,

- małe rozmiary lasera (średnica około 100 μm) oraz obszaru czynnego (średnica około 10 μm) umożliwiającą większą miniaturyzację urządzeń oraz niski prąd progowy,
- z 3 calowego podłoża można uzyskać około 15000 laserów VCSEL i tylko 4000 laserów EEL; daje to 95% uzysk, oszczędność materiału oraz niskie koszty produkcji,
- mała objętość obszaru czynnego przekłada się na bardzo małe moce potrzebne do działania lasera; na przykład w zastosowaniach telekomunikacyjnych osiągnięto około 100 fJ/bit,
- wysoka jakość emitowanej wiązki (wiązka gaussowska o przekroju kołowym, pozbawiona astygmatyzmu i o małej rozbieżności); wynikają stąd niskie koszty sprzęgania laserów VCSEL z innymi przyrządami optoelektronicznymi oraz wysoka sprawność tego procesu,
- konsekwencją krótkiego rezonatora (1-1,5 λ) jest naturalna praca laserów VCSEL na pojedynczym modzie podłużnym i wysoka selektywność emitowanej fali promieniowania,
- temperaturowa stabilność emitowanej fali (około 5 razy lepsza niż dla EEL, $<0,07$ nm/K),
- wysoka temperatura pracy (około 80°C) oraz małe i wytrzymałe systemy chłodzenia,
- duża moc na jednostkę powierzchni (dla EEL to maksymalnie około 500 W/cm², a dla VCSEL 1200 W/cm²),
- wysoka niezawodność laserów VCSEL – wysoki COD (*Catastrophic Optical Damage*),
- skalowalność w zastosowaniach do dużych mocy, wynikająca z możliwości budowy naturalnych matryc 2D oraz z wydajnego odprowadzania z nich ciepła,
- bardzo mała szerokość połówkowa wiązki uzyskanej z matryc laserowych (FWHM około 0,7-0,8 nm, czyli kilka razy mniej niż dla matryc wykonanych na bazie laserów EEL),
- łatwa kontrola polaryzacji wychodzącego światła,
- duża częstość modulacji (50 Gb/s) – niezastąpione w telekomunikacji.

Pełna komercjalizacja laserów VCSEL, która nastąpiła około roku 1997, wymagała jeszcze rozwiązania szeregu problemów technicznych i materiałowych.

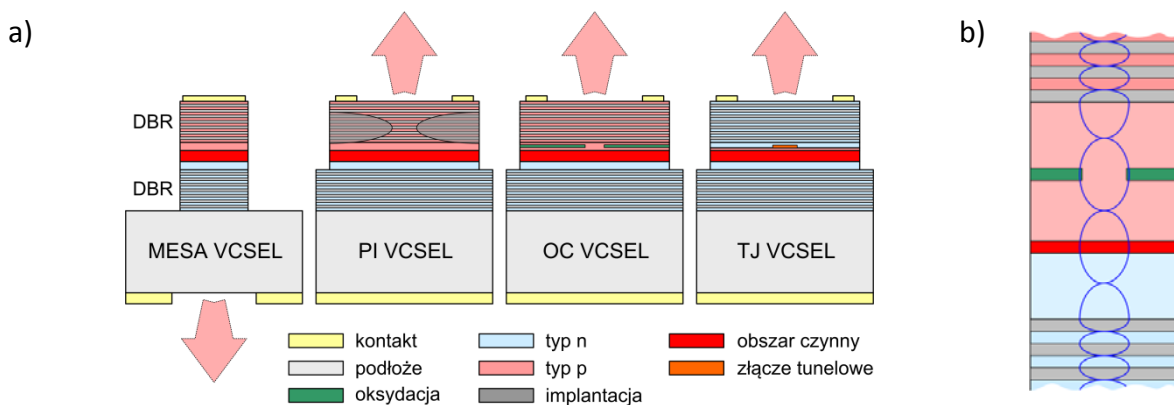
Jak już wspomniano, pod koniec lat 80. rozwój laserów VCSEL wykonanych z InGaAsP/InP został zahamowany. Wynikało to przede wszystkim z własności fizycznych tych materiałów, a w szczególności z wysokiej w nich rekombinacji niepromienistej, z trudnym ograniczeniem nośników w ich studniach kwantowych, powodującym duże straty prądu, oraz z poważnymi problemami wytworzenia na bazie tych materiałów efektywnych zwierciadeł DBR. Materiały wykorzystywane do budowy takich zwierciadeł muszą spełniać pewne minimalne wymagania: dopasowanie sieciowe przy jednocześnie dużym kontraście współczynnika załamania, niewielki opór cieplny oraz ewentualnie powinny przewodzić prąd przy jednocześnie rozsądnej wartości absorpcji promieniowania. Dobierając odpowiedni skład materiału InGaAsP można go było dopasować pod względem stałej sieci do InP, jednak różnica współczynników załamania takich materiałów wynosiła zaledwie 5,3%. Stąd np. dla fali 1500 nm należało wytworzyć zwierciadło DBR składające się aż z 76 okresów aby uzyskać wymagane odbicie 99,9%. Jednocześnie mały kontrast współczynnika załamania sprawiał, że zakres wysokiej odbijalności zwierciadła redukował się do kilkunastu nm, a jego grubość dochodziła do 15 μm . Dodatkowo bardzo mała przewodność cieplna (około 3 W/m/K) materiału poczwórno InGaAsP sprawiała

ogromne trudności z odprowadzeniem ciepła z wnętrza lasera. Ponadto problem było uzyskanie radialnego ograniczenia optycznego modu i jednorodności prądu wstrzykiwanego do obszaru czynnego lasera.

Nic więc dziwnego, że w tych okolicznościach główna uwaga badaczy skupiła się na materiałach arsenkowych AlGaAs/GaAs emitujących falę w okolicach 850 nm. Pracując nad tymi przyrządami uzyskano szereg ciekawych rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych istotnych dla dalszego rozwoju laserów VCSEL. W 1994 roku Matin w celu poprawienia rozptyłu prądu w laserze GaAs VCSEL zastosował warstwę ITO (*Indium Tin Oxide*) o transmisji 92% i rozsądnej przewodności elektrycznej [27]. Jak się potem okazało rozwiązanie to nie przyjęło się w tej grupie materiałowej, ale miało stanowić ważny element konstrukcyjny późniejszych azotkowych laserów VCSEL. W roku 1992 zademonstrowano periodycznie domieszkowane oraz gradientowe zwierciadła DBR [28], co sprawiło, że od tego momentu cechowały się one zarówno małą absorpcją promieniowania, jak i dobrą przewodnością elektryczną. W roku 1990 ukazała się praca [29] pokazująca laser VCSEL, w którym rozptyw prądu ograniczał utleniony na skutek tzw. mokrej oksydacji (*wet oxidation*) materiał AlGaAs o dużej zawartości glinu (około 98%), umieszczony w zwierciadle DBR AlGaAs/GaAs. Laser ten miał aperturę obszaru

czynnego 3 μm , rezonator $1/2 \lambda$ i prąd progowy 91 μA . Szybko się też okazało, że tak utleniony materiał (często oznaczany jako Al_xO_y) nie tylko znakomicie ogranicza prąd w strukturze lasera, ale dzięki temu, że jego współczynnik załamania jest około dwukrotnie mniejszy ($n_R = 1,5$) od otaczającego go materiału, może równie znakomicie ograniczać rozkład pola optycznego, wprowadzając radialny efekt falowodowy w laserze VCSEL. W 1994 roku wykorzystala to Huffaker pokazując laser z ograniczeniem elektrycznym i optycznym na bazie warstwy Al_xO_y [30]. Natomiast w roku 1998 Evans wprowadził tę warstwę do środka rezonatora lasera [31].

Druga połowa lat 90. to okres burzliwego rozwoju laserów InGaAs/GaAs VCSEL emitujących falę 980 nm. Mimo naprężonych obszarów czynnych lasery te wykazują się bardzo dobrymi własnościami [32] i niskimi prądami progowymi osiągającymi wartość nawet 8,5 μA [33]. Na bazie tych laserów w roku 1998 uzyskano laser VCSEL emitujący 40 mW w pracy CW i temperaturze 95 K. Obszar czynny tego lasera zawierał 2 zestawy potrójnych studni kwantowych w układzie kaskadowym, a sam laser cechował się sprawnością 50% [34]. W 2001 roku Miller zademonstrował matrycę laserów VCSEL pracującą w temperaturze 10°C i emitującą falę 980 nm o mocy 1,4 W z falą ciągłą [35].



Rys.4. a) Schematyczne przedstawienie podstawowych konstrukcji laserów VCSEL: MESA – laser z wytrawioną mesą emitujący przez podłoże; PI – laser z obszarami wysokorezystywnymi powstałymi po implantacji protonami; OC – laser z oksydacją; TJ – laser ze złączem tunelowym. b) Rozkład fali stojącej powstającej w rezonatorze lasera VCSEL na przykładzie lasera OC VCSEL

Końcówka lat 90. to powrót do technologii fosforowych laserów VCSEL. Jeszcze raz spróbowano podejść do zagadnienia i otrzymać rozsądnie działające przyrządy wykorzystując zdobyte doświadczenia i nowe technologie. Zastosowano m.in. zwierciadła hybrydowe (półprzewodnikowe z dołu i dielektryczne z góry). Otrzymano jednak dla fali 1300 nm zaledwie pracę impulsową w RT [36]. W 1999 roku Boucart zademonstrował laser InP QW VCSEL emitujący falę 1550 nm, pracujący CW RT z mocą 1 mW [37]. Był to prawdopodobnie pierwszy VCSEL ze złączem tunelowym (TJ – *Tunnel Junction*). W laserze tym jako tylne zwierciadło zastosowano metamorficzne zwierciadło GaAs/AlAs, którego wzrost przeprowadzono bezpośrednio na materiale InP. Przewaga zwierciadeł arsenkowych była na tyle duża, że zdecydowano się na nietypowy krok, tzn. zespajanie fosforowych obszarów czynnych z osobno wytwarzanymi zwierciadłami arsenkowymi za pomocą tzw. metody *wafer bonding* (lub *wafer fusion*) zaproponowanej w *University of California at Santa Barbara* w roku 1995 [38]. W ten sposób wykonano lasery na zakres 1,3 μm [39], jak i 1,5 μm [40]. Ten drugi zasilany był elektrycznie i pracował w trybie CW w 17°C emitując falę 1550 nm. Podstawowe konstrukcje laserów VCSEL przedstawia rysunek 4.

Przełom wieku to przede wszystkim rozwój technologii przerwy wzbronionej i technik dopasowania sieciowego dla materiałów potrójnych i poczwórnych związków $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$. Zaowocował on utrzymaniem laserów z obszarami czynnymi czy zwierciadłami do tej pory nie wytwarzanymi, jak QW AlGaInAs/AlGaInAs [41], DBR AlAsSb/AlGaAsSb [42] czy zupełnie nowym podejściem do osiągnięcia fali z zakresu II okna światłowodowej telekomunikacji optycznej w postaci studni kwantowych GaInNAs/GaAs [43]. Pojawia się też możliwość wykonania laserów VCSEL z obszarami czynnymi w postaci kropek kwantowych (QD – *Quantum Dot*) [44]. Pokazują się też prace, w których w strukturze lasera VCSEL umieszcza się kryształ fotoniczny (PhC – *Photonic Crystal*) [45].

Początek XXI wieku to walka przede wszystkim o jak największą moc laserów VCSEL pracujących na pojedynczym modzie oraz otrzymanie tychże przyrządów cechujących się bardzo dużą szybkością modulacji i bardzo dużą sprawnością przetwarzania sygnału (tzw. stosunkiem potrzebnej mocy na przesłanie 1 bitu informacji). Lasery te wykorzystuje się przede wszystkim w telekomunikacji na krótkie i bardzo krótkie dystanse (np. w serwerowniach i superkomputerach). Najlepiej spisują się tu lasery z oksydacją tlenkową emitujące falę 850 nm (57 Gbit/s) [46]

lub falę 980 nm (38 Gbit/s) [47]. Lasery wykorzystujące implantację do ograniczenia rozprywy prądu wykazują szybkość modulacji około 25 Gbit/s [48]. W 2015 roku uzyskano dla laserów VCSEL współczynnik sprawności energetycznej 100 fJ/bit przy modulacji 25-50 Gbit/s [49]. W przypadku pracy jednomodowej już w latach 90. uzyskano dla arsenkowych laserów implantowanych moc 4,4 mW [50], a dla oksydowanych 4,8 mW [51]. Dla fosforkowych laserów emitujących falę 1300 nm typu BH VCSEL uzyskano moc 1 mW [52], a dla TJ VCSEL wytworzonych w technologii *wafer fusion* – aż 6 mW [53]. Moc 6,5 mW emitowały analogiczne lasery projektowane na 1550 nm [54]. Dla laserów PhC VCSEL z aperturą tlenkową uzyskano moc 5,7 mW [55]. Bardzo dobrą moc (7 mW) dla pracy jednomodowej osiągają lasery z aperturą tlenkową i płytkim trawieniem na powierzchni zwierciadeł w kształcie klinów o odpowiednim wzorze [56].

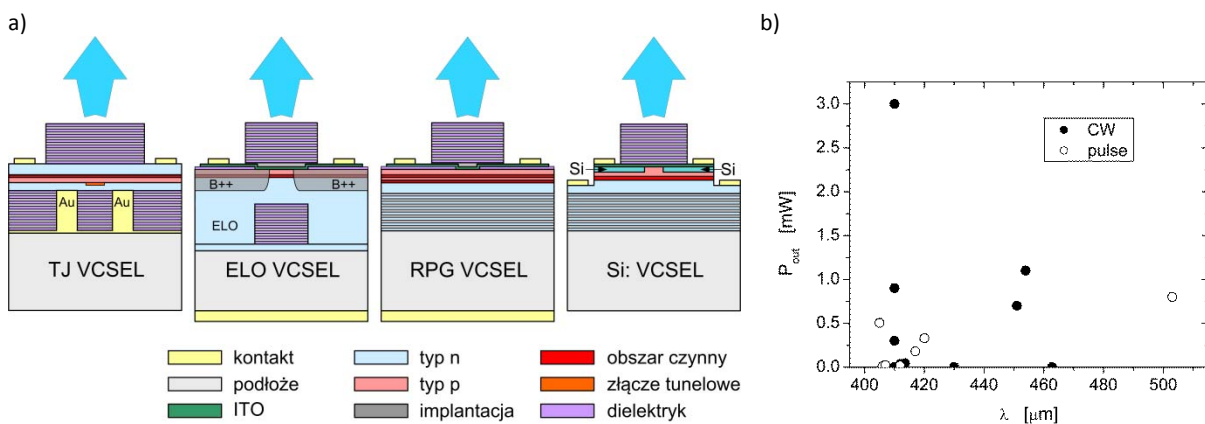
Azotkowe lasery VCSEL

Na początku XXI wieku lasery VCSEL były już dojrzałymi konstrukcjami o parametrach użytkowych umożliwiających ich zastosowanie w wielu dziedzinach nauki i techniki. Szczególnie duży sukces komercyjny odniosły w sieciach światłowodowych dostosowanych do pierwszego okna komunikacyjnego oraz w komunikacji na bardzo krótkie dystanse, całkowicie wypierając z tych zastosowań inne lasery półprzewodnikowe. Podstawowe zadanie jakie stało teraz przed naukowcami to rozszerzenie ich zakresu emisji z jednej strony na średnią podczerwień z drugiej na zakres widzialny, który był szczególnie ciekawy pod względem wielu ewentualnych zastosowań. Krótkofalowe lasery VCSEL mogłyby być zastosowane w myszkach, skanerach i druku o wysokiej rozdzielczości, wskaźnikach, optycznym zapisie i odczycie informacji, źródłach światła, diagnostyce medycznej, biosensorach, komunikacji podwodnej i w wolnej przestrzeni, komunikacji za pomocą światłowodów plastikowych, szybkiej komunikacji VLC (*Visible Light Communication*), pikoprojektorach i pełnokolorowych wyświetlaczach (szczególnie tych o niewielkich wymiarach i wymagających

niewielkiego zasilania). Lasery RT CW VCSEL emitujące czerwoną falę uzyskano dość wcześnie [57], chociaż ich parametry eksploatacyjne wciąż pozostają gorsze niż analogicznych przyrządów emitujących w podczerwieni [58]. Prawdziwe wyzwanie stanowił natomiast laser VCSEL emitujący w zakresie 400-500 nm.

Lasery emitujące w zakresie 400-500 nm można otrzymać teoretycznie na trzy sposoby: (i) stosując materiały All-Se, np. ZnSe, co pozwoliło otrzymać lasery z obszarem czynnym CdZnSe/ZnSe i zwierciadłami dielektrycznymi emitujące w temperaturze 77 K fale około 490 nm [59,60] (problemem okazała się jednak szybka degradacja po wstrzyknięciu prądu); (ii) stosując materiały All-O, np. ZnO, jednym z problemów okazała się trudność uzyskania materiału typu p; (iii) stosując materiały All-N, które jak na razie okazały się materiałami najlepiej rokującymi. Na bazie materiałów All-N (GaN, AlGaN, InGaN) udało się wytworzyć efektywnie działające lasery krawędziowe, które skomercjalizowała firma *Nichia Corp.* w roku 1999, a jednym z błyskotliwych aspektów tego procesu było wypuszczenie na rynek przez firmę Sony w 2006 roku takich urządzeń jak konsola do gier *PlayStation 3* oraz odtwarzacze *Blu-ray*, w których zastosowano laser krawędziowy emitujący falę 405 nm.

Pierwszy optycznie pompowany VCSEL wykonany z materiałów InGaN/GaN pojawił się stosunkowo szybko bo w 1996 roku [61]. Niestety, mimo intensywnych prac teoretycznych i technologicznych, nie potrafiono poradzić sobie z wieloma wyzwaniami stojącymi na drodze do wytworzenia elektrycznie pompowanego azotowego lasera VCSEL. Trudności te wiązały się z brakiem i ceną podłoża GaN, dużą rezystywnością materiału typu p, wstrzykiwaniem prądu do obszaru czynnego i jego jednorodnością, wytworzeniem natywnych zwierciadeł DBR, kontrolą długości rezonatora, efektami piezoelektrycznymi, małym ograniczeniem optycznym w kierunku prostopadłym do obszaru czynnego, brakiem bocznego ograniczenia optycznego, niesymetrycznymi własnościami nośników (masy efektywne, ruchliwości).



Rys.5. a) Schematyczne przedstawienie współczesnych konstrukcji azotkowych laserów VCSEL: TJ – laser ze złączem tunelowym i pierścieniowym kontaktem z Au; ELO – laser zaproponowany przez Sony; RPG – laser z przewodzącymi zwierciadłami AlInN/GaN i/lub periodycznym obszarem czynnym; Si – laser z aperturą zdefiniowaną dyfuzją Si. b) Porównanie mocy wytworzonych dotychczas laserów GaN VCSEL

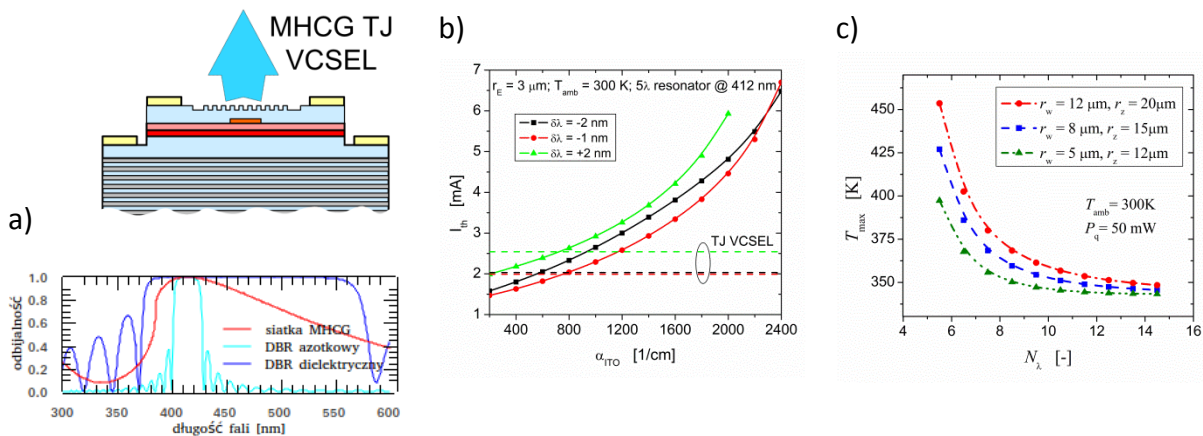
Pierwszy elektrycznie pompowany laser GaN CW VCSEL udało się wytworzyć dopiero w 2008 roku przez zespół z *National Chiao Tung University* (NCTU) z Tajwanu [62]. Pracował on jednak w temperaturze 77 K. Jeszcze w 2008 roku firma Nichia pokazała VCSEL pracujący CW, ale w RT [63], co stanowiło przełom dla tego typu struktur. Zwieńczeniem prac firmy Nichia była publikacja z 2011 roku

[64], w której pokazano lasery emitujące falę 451 nm z mocą 0,7 mW przy prądzie 11 mA. Najlepsze wyniki uzyskano dla laserów z aperturą 8 μm . Prądy progowe wynosiły 1,5 mA, a napięcia progowe 3,3 V. Zademontrowano też lasery zielone (503 nm), działające impulsowo z mocą 0,8 mW. Problemem tych konstrukcji była szybka degradacja spowodowana prawdopodobnie

bardzo skomplikowanym procesem technologicznym. Do roku 2014 udało się wytworzyć azotkowe lasery VCSEL jeszcze firmie Panasonic [65], zespołowi z *École Polytechnique Fédérale de Lausanne* (EPFL) ze Szwajcarii [66], grupie z Chin [67] oraz zespołowi z *University St. Barbara* w Kalifornii (UCSB) kierowanemu przez Shuji Nakamurę [68], który wytworzył lasery na podłożach niepolarnych. Żadna z tych konstrukcji nie stanowiła jednak istotnego przełomu. W każdej z nich rezonator lasera był rezonatorem z tzw. bocznym wstrzykiwaniem prądu (*intracavity contacts*). W każdej zastosowano warstwę ITO o grubości od 30 nm do 100 nm do zapewnienia odpowiedniego wstrzykiwania prądu do obszaru czynnego. Dwie z tych konstrukcji (NCTU i EPFL) miały dielektryczne górne i azotkowe nieprzewodzące dolne zwierciadła wykonane odpowiednio z AlN/GaN z supersieciami i AlInN/GaN. W pozostałych przypadkach oba zwierciadła były dielektryczne. Stosowano materiały Ta₂O₅/SiO₂, Nb₂O₅/SiO₂, ZrO₂/SiO₂, TiO₂/SiO₂. Długość rezonatora wynosiła najczęściej około 7λ ale były też konstrukcje z rezonatorem 35λ (Panasonic). Najczęściej stosowano układ 5 studni kwantowych o grubości 3 nm każda oraz 20 nm warstwę EBL (*Electron Blocking Layer*). Ograniczenie prądu uzyskiwano poprzez warstwy dielektryczne (np. SiO₂) lub, jak w przypadku EPFL, przez technikę RIE (*Reactive-Ion Etching*). Apertura elektryczna w większości przypadków wynosiła około 8 μm.

W latach 2015 i 2016 dokonano znacznego postępu prezentując nowe rozwiązania (patrz rys.5a). UCSB pokazało laser ze złączem tunelowym działający impulsowo z mocą 550 μW [69]. Sony, wyciągając wnioski z prac

Nichia i chcąc uniknąć usuwania podłoża i pocieniania struktury, zaproponowało i pokazało lasery „monolityczne”, w których dolne zwierciadła SiN/SiO₂ naniesione na podłożu GaN były zarastane w technologii ELO (*Epitaxial Lateral Overgrowth*) materiałem GaN. W ten sposób wytwarzano materiał objętościowy, na którym następnie w dalszych procesach epitaksjalnych wyrastał obszar czynny i materiał typu p. Zastosowano 30 nm warstwę ITO i SiO₂, a aperturę elektryczną zdefiniowano poprzez implantację jonami boru [70]. Rezonator lasera wynosił 4,5 μm, a laser emitował moc 1,1 mW i falę 453,9 nm. Dwa współpracujące ze sobą zespoły z Tajwanu zademonstrowały laser ze zwierciadłami AlN/GaN i TiO₂/SiO₂ i warstwą ITO, w którym bardzo małą aperturę elektryczną (3 μm) zdefiniowano poprzez dyfuzję Si do materiału GaN typu p, zmieniając go na materiał typu n. Laser ten charakteryzował się bardzo małym prądem progowym 0,6 mA i bardzo małą rozbieżnością wiązki (FWHM 5°) [71]. Najciekawsze konstrukcje wykonano w *Meijo University* (Nagoya) w Japonii. Wytworzono tam np. laser z przewodzącymi zwierciadłami AlInN/GaN (46 par). Drugim zwierciadłem było 8 par Nb₂O₅/SiO₂. Użyto bardzo cienkiej warstwy ITO (20 nm). Laser posiadał rezonator 1,5λ i emitował falę 405 nm [72]. Ta sama grupa pokazała też laser z obszarem czynnym typu RPG. W rezonatorze wytworzono dwie grupy MQW przedzielone 45 nm warstwą GaN domieszkowaną magnezem [73]. Ostatnio jedna z konstrukcji tej grupy zadziałała z mocą 3 mW [74] w trybie RT CW. Zależność mocy emitowanej od długości fali dla wszystkich wytworzonych do tej pory azotkowych laserów VCSEL przedstawia rysunek 5b.



Rys.6. a) Propozycja struktury lasera azotkowego TJ VCSEL ze zwierciadłem MHCG oraz porównanie odbijalności tego zwierciadła z odbijalnością zwierciadła azotkowego AlInN/GaN i zwierciadła dielektrycznego Ta₂O₅/SiO₂. b) Porównanie prądów progowych dla laserów NCTU (przy różnych odstrojeniach) i zaprojektowanej konstrukcji lasera TJ VCSEL (z rys.5a). c) Optymalizacja cieplna lasera TJ VCSEL przedstawionego na rysunku 5a. Przedstawiono wpływ grubości rezonatora i rozmiarów pierścienia ze złota

W trakcie badań nad azotkowymi laserami VCSEL nasza grupa wykonała szereg prac symulujących działanie tych przyrządów. Zaczęliśmy od porównania działania wczesnych konstrukcji tych przyrządów, wypunktowując podstawowe trudności konstrukcyjno-materiałowe [75]. Doświadczenia zebrane w tym okresie pozwoliły nam zaproponować nową konstrukcję lasera GaN VCSEL z monolitycznym zwierciadłem MHCG (*Monolithic High refractive index Contrast Grating*), którego parametry wyliczyliśmy i porównaliśmy ze zwierciadłami dielektrycznymi i azotkowymi [76] (patrz rys.6a). Jedną z odmian tej konstrukcji było zupełnie nowatorskie rozwiązanie z metalizowaną strukturą MHCG [77]. Porównaliśmy też poprzez modelowanie parametry eksploatacyjne struktury z NCTU z zaprojektowaną przez nas strukturą lasera TJ VCSEL (rys.6b) [78]. Dokonałiśmy optymalizacji cieplnej tej struktury [79] (rys.6c). Badaliśmy

także możliwość zastosowania warstwy AlN jako ograniczenia elektrycznego i optycznego w rezonatorze azotkowego lasera VCSEL [80] oraz analizowaliśmy wpływ parametrów ITO na pracę lasera [81].

Z przedstawionego materiału wynika, że, mimo wielu trudności pojawią się prawdopodobnie w najbliższym czasie konstrukcje azotkowych laserów VCSEL o parametrach eksploatacyjnych, które pozwolą myśleć o ich komercyjnych zastosowaniach.

Praca częściowo finansowana z projektu NCN nr UMO-2014/13/B/ST7/00633. Praca jest związana tematycznie z realizowanym w latach 2009-2014 projektem POIG.01.03.01-00-159 InTechFun i powstała w okresie jego trwałości.

Autorzy: dr hab. inż. Robert Piotr Sarzała, profesor dr hab. inż. Włodzimierz Nakwaski, Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki, ul. Wólczańska 219, 90-924 Łódź, E-mail: robert.sarzaala@p.lodz.pl; wlodzimierz.nakwaski@p.lodz.pl.

LITERATURA

- [1] Hayashi I., Panish M.B., Foy P.W., Sumski S., Junction lasers which operate continuously at room temperature, *Appl. Phys. Lett.*, 17 (1970), 109–110
- [2] Dymont J.C., D'Asaro L.A., North J.C., Miller B.I. and Ripper J.E., Proton-bombardment formation of stripe-geometry heterostructure lasers for 300 K CW operation, *Proc. IEEE* 60 (1972), 726–8
- [3] Tsukada T., GaAs-Al_xGa_{1-x}As buried-heterostructure injection lasers, *J. Appl. Phys.* 45 (1974), 4899–6
- [4] Kawaguchi H. and Kawakami T., Transverse-mode control in an injection laser by a strip-loaded waveguide, *IEEE J. Quantum Electron.* 13 (1977), 556–60
- [5] Panish M.B. et al., Reduction of threshold current density in GaAs-Al_xGa_{1-x}As heterostructure lasers by separate optical and carrier confinement, *Appl. Phys. Lett.*, 22 (1973), 590–91
- [6] Dupuis R.D. et al., Continuous 300 K laser operation of single quantum well Al_xGa_{1-x}As-GaAs hetero-structure diodes grown by metalorganic chemical vapor deposition, *Appl. Phys. Lett.*, 34 (1979), 265–7
- [7] Tsang W.T., A graded-index waveguide separate-confinement laser with very low threshold and a narrow Gaussian beam, *Appl. Phys. Lett.*, 39 (1981), 134–37
- [8] Hersee S.D., Baldy M., Assenat P., de Cremous B. and Duchemin J.P., Very low threshold GRIN-SCH GaAs/GaAlAs laser structure grown by OM-VPE, *Electron. Lett.* 18 (1982), 870–1
- [9] Kogelnik H. et al., Stimulated emission in a periodic structure, *Appl. Phys. Lett.*, 18 (1971), 152–54
- [10] Scifres D.R., Burnham R.D. and Streifer W., Distributed-feedback single heterojunction GaAs diode laser, *Appl. Phys. Lett.*, 25 (1973), 203–06
- [11] Zory P. and Comerford L.D., Grating-coupled double-heterostructure AlGaAs diode lasers, *IEEE J. Quantum Electron.* 11 (1974), 451–57
- [12] Alferov Zh.I. et al., Semiconductor lasers with the light output through the diffraction grating on the surface of the waveguide layer, *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-11, 7 (1975), 449
- [13] Zory P., and Comerford L.D., Grating-coupled double-heterostructure AlGaAs diode lasers, *IEEE J. of Quantum Electron.*, QE-11, 7 (1975), 451
- [14] Springthorpe A.J., A novel double-heterostructure p-n junction laser, *Appl. Phys. Lett.*, 31, 8 (1977), 524
- [15] Iga K., Surface-emitting laser-its birth and generation of new optoelectronics field, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 6 (6) (2000), 1201-1215
- [16] Melngailis I., Longitudinal injection-plasma laser of InSb, *Appl. Phys. Lett.*, 6, 3 (1965), 59-60
- [17] Soda H., Iga K., Kitahara C., and Suematsu Y., GaInAsP/InP surface emitting injection lasers, *Jpn. J. Appl. Phys.* 18 (1979), 2329
- [18] Kapron F.P. et al., Radiation losses in glass optical waveguides, *Appl. Phys. Lett.* 17 (1970), 423
- [19] Iga K., Ishikawa S., Ohkouchi S., and Nishimura T., Room temperature pulsed oscillation of GaAlGaAs surface emitting injection laser, *Appl. Phys. Lett.* 45 (1984), 348
- [20] Iga K. and Koyama F., Vertical-Cavity Surface Emitting Lasers And Arrays, Chapter 3 in G.A. Evans and J.M. Hammer "Surface Emitting Semiconductor Lasers and Arrays" Academic Press, Inc., San Diego, 1993
- [21] Koyama F., Kinoshita F., and Iga K., Room temperature cw operation of GaAs vertical cavity surface emitting laser, *Trans. of IEICE of Japan*, E11 (1988), 1089
- [22] Kawasaki H., Koyama F., and Iga K., Improvement of a flat surface circular buried heterostructure GaInAsP/InP surface emitting laser, *Jpn. J. Appl. Phys.* 27 (1988), 1548
- [23] Nomura Y. et al., Lasing characteristics of GaAs/AlGaAs multilayer composing distributed feedback cavity for surface emitting laser, *Extended Abstracts of 17th Conf on Solid State Devices and Material*, 71, 1985
- [24] Uenohara H., Koyama F., and Iga K., Application of the multiquantum well (MQW) to a surface emitting laser, *Jpn. J. Appl. Phys.* 28 (1989), 740
- [25] Geels R. et al., Analysis and design of a novel parallel-driven MQW DBR surface-emitting diode laser, *The Conf. on Lasers and Electro-Optics*, paper WM-1, 1988
- [26] Jewell J.L., Scherer A., McCall S.L., Lee Y.H., Walker S., Harbison J.P., Florez L.T., Low threshold electrically pumped vertical-cavity surface-emitting microlasers, *Electron. Lett.* 25 (1989), 1123–1124
- [27] Matin M.A. et al., Optically transparent indium-tin-oxide (ITO) ohmic contacts in the fabrication of vertical cavity surface emitting lasers, *Electron. Lett.*, Vol. 30 (1994), no. 4, 318–320
- [28] Sugimoto M. et al., Very low threshold current density in vertical cavity surface emitting laser diodes with periodically doped distributed bragg reflectors, *Electron. Lett.*, Vol. 28 (1992), no. 4, 385–387
- [29] Dallesasse J.M., Holonyak N., Sugg A.R., Richard T.A., and El-Zein N., Hydrolyzed oxidation of Al_xGa_{1-x}As-AlAs-GaAs quantum well heterostructures and superlattices, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 57 (1990), 2844-6
- [30] Huffaker D.L., Deppe D.G., Kumar K., and Rogers T.J., Native oxide defined ring contact for low threshold vertical cavity lasers, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 65 (1994), 97–99
- [31] Evans P.W., Wierer J.J., and Holonyak N., Al_xGa_{1-x}As native oxide based distributed bragg reflectors for vertical cavity surface emitting lasers, *J. Appl. Phys.*, Vol. 84 (1998), no. 10, 5436–5440
- [32] Graham L.A., Huffaker D.L., and Deppe D.G., Spontaneous lifetime control in a native oxide aperture microcavity, *Appl. Phys. Lett.*, Vol 74 (1999), no. 17, 2408–2410
- [33] Yang G.M., MacDougall M., and Dupkus P.D., Ultralow threshold current vertical cavity surface emitting laser obtained with selective oxidation, *Electron. Lett.*, Vol. 31 (1995), 886–888
- [34] Schmid W., Wiedenmann D., Grabber M., Jager R., Michalzik R., and Ebeling K.J., CW operation of a diode cascade InGaAs quantum well VCSEL, *Electron. Lett.*, Vol. 34 (1998), no. 6, 553–555
- [35] Miller M., Grabber M., Jager R., and Ebeling K.J., High power VCSEL arrays for emission in Watt regime at room temperature, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 13 (2001), no. 3, 173–175
- [36] Salet P. et al., Room temperature pulsed operating of 1.3 μm vertical cavity lasers including bottom InGaAsP/InP multilayer bragg mirrors, *Electron. Lett.*, Vol. 33 (1997), no. 24, 2048–2049
- [37] Boucart J. et al., 1 mW CW-RT Monolithic VCSEL at 1.55 μm, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 11 (1999), no. 5, 629–631
- [38] Babic D. et al., Room temperature continuous-wave operation of 1.54-μm vertical-cavity lasers, *IEEE Photonics Technology Letters*, 7(11) (1995), 1225–1227
- [39] Qian Y. et al., 1.3 μm vertical cavity surface emitting lasers with double bonded GaAs/AlAs Bragg mirrors, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 9 (1997), no. 1, 8–10
- [40] Rapp S. et al., Near room temperature continuous wave operation of electrical pumped 1.55 μm vertical cavity lasers with InGaAsP/InP bottom mirror, *Electron. Lett.*, Vol. 35 (1999), no. 1, 49–50
- [41] Kim J.K. et al., Room temperature, electrically pumped multiple active region VCSELs with high differential efficiency at 1.55 μm, *Electron. Lett.*, Vol. 35 (1999), no. 13, 1084–1085
- [42] Hall E., Almuneau G., Kim J.K., Sjolund O., Kroemer H., and Coldren L.A., Electrically pumped, single-epitaxial VCSELs at 1.55 μm Sb-based mirrors, *Electron. Lett.*, Vol. 35 (1999), no. 16, 1337–1338
- [43] Larson M.C. et al., GaInNAs/GaAs long wavelength vertical cavity surface emitting laser diodes, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 10 (1998), no. 2, 188–190
- [44] Lott J.A. et al., InAs-InGaAs quantum dot VCSELs on GaAs substrates emitting at 1.3 μm, *Electron. Lett.*, Vol. 36 (2000), no. 16, 1384–1385
- [45] Song D.S., Kim S.H., Park H.G., Kim C.K., and Lee Y.H., Single-fundamental-mode photonic-crystal vertical-cavity surface-emitting lasers, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 80 (2002), 3901–3903
- [46] Westbergh P., Haglund E.P., Haglund E., Safaisini R., Gustavsson J., Larsson A., High-speed 850 nm VCSELs operating error free up to 57 Gbit/s, *Electron. Lett.* 49(16) (2013), 1021–1023
- [47] Moser P. et al., 85°C error-free operation at 38 Gb/s of oxide-

- confined 980-nm vertical-cavity surface-emitting lasers, *Appl. Phys. Lett.* 100(8) (2012), 081103–1–3
- [48] Tan M.P., Fryslie S.T.M., Lott J.A., Ledentsov N.N., Bimberg D., Choquette K.D., Error-free transmission over 1-km OM4 multimode fiber at 25 Gb/s using a single mode photonic crystal vertical-cavity surface-emitting laser, *IEEE Photonics Technol. Lett.* 25(18) (2013), 1823–1825
- [49] Haglund E. et al., 30 GHz bandwidth 850 nm VCSEL with sub-100 fJ/bit energy dissipation at 25–50 Gbit/s, *Electronics Letters*, vol. 51 (2015), no. 14, 1096–1098
- [50] Lear K.L. et al., Vertical cavity surface emitting lasers with 21% efficiency by metal organic vapour phase epitaxy, *IEEE Photon. Technol. Lett.* 6(9) (1994), 1053
- [51] Jung C. et al., 4.8 mW single mode oxide confined top surface emitting vertical cavity laser diodes, *Electron. Lett.* 33(21) (1997), 1790
- [52] Francis D.A. et al., Monolithic 1310 nm buried heterostructure VCSEL using InGaAsP/InP DBR reflectors, in *Optoelectronic Devices*, ed. by J. Piprek, *Proceedings of SPIE*, 6013 (2005), 60130A-1
- [53] Syrbu A. et al., 10 Gbps VCSELs with high single mode output in 1310 nm and 1550 nm wavelength bands, in *Proc. Conference on Optical Fiber Communication*, paper OThS2, San Diego, CA, USA, 2008
- [54] Caliman A. et al., 8 mW fundamental mode output of wafer-fused VCSELs emitting in the 1550 nm band, in *Proc. Conference on Lasers and Electro Optics*, paper CMRR1, Baltimore, MD, USA, 2009
- [55] Yang H.P. et al., Characteristics of InGaAs submonolayer quantum dot and InAs quantum dot photonic crystal vertical cavity surface emitting lasers, *J. Lightwave Technol.* 26(11) (2008), 1387
- [56] Furukawa A., Sasaki S., Hoshi M., Matsuzono A., Moritoh K., Baba T., High power single mode vertical cavity surface emitting lasers with triangular holey structure, *Appl. Phys. Lett.* 85(22) (2004), 5161
- [57] Lott J.A., Schneider R.P., Choquette K.D., Kilcoyne S.P., Figiel J.J., Room temperature continuous wave operation of red vertical cavity surface emitting laser diodes, *Electron. Lett.* 29 (1993), 1693
- [58] Johnson K., Hibbs-Brenner M., Hogan W., and Dummer M., Advances in Red VCSEL Technology, *Advances in Optical Technologies*, Volume 2012, Article ID 569379, 13 pages, 2012
- [59] Jeon H. et al., Room temperature optically pumped bluegreen vertical cavity surface emitting lasers, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 67 (1995), no. 12, 1668–1670
- [60] Yokogawa T., Yoshii S., Tsujimura A., Sasai Y., and Merz J., Electrically pumped CdZnSe/ZnSe blue-green vertical-cavity surface-emitting lasers, *Jap. J. Appl. Phys.*, vol. 34 (1995), no. 6B, L751
- [61] Redwing J.M., Loeber D.A.S., Anderson N.G., Tischler M.A., Flynn J.S., An optically pumped GaN-AlGaIn vertical cavity surface emitting laser, *Appl. Phys. Lett.* 69 (1996), 1
- [62] Lu T.C., Kao C.C., Kuo H.C., Huang G.S., and Wang S.C., CW lasing of current injection blue GaN-based vertical cavity surface emitting laser, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 92 (2008), no. 14, 141102
- [63] Higuchi Y. et al., Room-temperature CW lasing of a GaN-based vertical-cavity surface-emitting laser by current injection, *Appl. Phys. Expr.*, vol. 1 (2008), no. 12, 121102
- [64] Kasahara D. et al., Demonstration of blue and green GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers by current injection at room temperature, *Appl. Phys. Express*, vol. 4 (2011), no. 7, 072103
- [65] Onishi T. et al., Continuous wave operation of GaN vertical cavity surface emitting lasers at room temperature, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 48 (2012), no. 9, 1107–1112
- [66] Cosendey G. et al., Blue monolithic AlInN-based vertical cavity surface emitting laser diode on free-standing GaN substrate, *Appl. Phys. Lett.* 101 (2012), 151113
- [67] Liu W.-J. et al., Room temperature continuous wave lasing of electrically injected GaN-based vertical cavity surface emitting lasers, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 104 (2014), no. 25, 251116
- [68] Holder C., Speck J.S., DenBaars S.P., Nakamura S., and Feezell D., Demonstration of Nonpolar GaN-Based Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, *Applied Physics Express*, 5 (2012), 092104
- [69] Leonard J.T. et al., Demonstration of a III-nitride vertical-cavity surface-emitting laser with a III-nitride tunnel junction intracavity contact, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 107 (2015), no. 9, 091105
- [70] Hamaguchi T. et al., Milliwatt-class GaN-based blue vertical-cavity surface-emitting lasers fabricated by epitaxial lateral overgrowth, *Phys. Status Solidi A*, vol. 213 (2016), no. 5, 1170–1176
- [71] Yeh P.S. et al., GaN-based vertical-cavity surface emitting lasers with sub-milliamp threshold and small divergence angle, *Appl. Phys. Lett.*, 109 (2016), 241103
- [72] Ikeyama K. et al., Room temperature continuous-wave operation of GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers with n-type conducting AlInN/GaN distributed bragg reflectors, *Appl. Phys. Express*, vol. 9 (2016), no. 10, 102101
- [73] Matsui K. et al., GaN-based vertical cavity surface emitting lasers with periodic gain structures, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 55 (2016) 05FJ08
- [74] Matsui K. et al., 3-mW RT-CW GaN-Based VCSELs and Their Temperature Dependence, presented at the International Workshop on Nitride Semiconductors, Orlando, USA, October 2016
- [75] Sarzała R.P., Piskorski Ł., Nakwaski W., Azotkowe lasery typu VCSEL, *Elektronika*, 11 (2014), 104-7
- [76] Marciniak M. et al., Monolityczna siatka HCG jako zwierciadło w azotkowym laserze VCSEL, *Elektronika*, 9 (2016), 35-38
- [77] Czystanowski T. et al. Metallic monolithic high-contrast grating VCSELs: new concept of vertical current injection, SPIE OPTO Symposium Photonics West, Francisco (USA), 28.01–2.02 2017
- [78] Śpiewak P. et al., Analysis of threshold currents and transverse modes in nitride VCSELs with different resonators, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Volume 52 (2016), Issue 11, id: 2400807
- [79] Sarzała R.P. et al., Designing of TJ VCSEL based on nitride materials, *Proc. of SPIE: Laser Technology 2016: Progress and Applications of Lasers*, Vol. 10159 1015908-1, 2017
- [80] Śpiewak P., Sokół A.K., Wasiak M., and Sarzała R.P., Impact of AlN-aperture on optical and electrical properties of nitride VCSEL, *Opt Quant Electron*, 49 (2017), 114
- [81] Śpiewak P. et al., Wpływ parametrów fizycznych warstwy ITO na pracę azotkowych laserów typu VCSEL, *Elektronika*, 9 (2016), 47-50