

Wpływ położenia oksydacji na optyczne i elektryczne właściwości laserów typu VCSEL

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki modelowania lasera złączowego z pionową wnęką rezonansową o emisji powierzchniowej z warstwami oksydowanymi, emitującego falę o długości 980 nm. W ramach pracy przeprowadzono obliczenia cieplne, elektryczne i optyczne dla laserów posiadających dwie oksydacje, umieszczone w węzłach lub poza węzłami fali stojącej. Symulacje pokazały, że nawet niewielkie wysunięcie oksydacji z węzłów fali zmienia istotnie właściwości optyczne lasera.

Abstract. In this paper are presented results of numerical modeling of an oxide-confined vertical-cavity surface-emitting laser emitting at 980 nm. Simulations of thermal, electrical and optical phenomena were performed for a laser with the oxide layers at nodes of the standing wave and for a laser where the oxide layers were shifted by 20 nm from nodes. The simulations have shown that even such a small displacement change significantly some optical parameters of the laser. (**Impact of oxidation position on certain optical and electrical properties of a VCSEL.**)

Słowa kluczowe: laser półprzewodnikowy, laser VCSEL, modelowanie, oksydacje, GaAs.

Keywords: semiconductor laser, VCSEL, numerical modelling, oxidation, GaAs.

Wprowadzenie

Lasery o emisji powierzchniowej z pionową wnęką rezonansową odgrywają kluczową rolę jako konektory optyczne w światłowodowym przesyłaniu informacji na krótkie odległości (do 300 m). Lasery VCSEL emitujące fale elektromagnetyczne z zakresu bliskiej podczerwieni o długościach fali do około 1100 nm, konstruuje się na bazie arsenku galu. Zarówno lasery projektowane na długość fali 850 nm jak i na 980 nm mają podobne zastosowania, jednakże te drugie charakteryzują się lepszą wydajnością przy wyższych temperaturach pracy ciągłej (85°C). Wykorzystanie technologii arsenkowej umożliwi zastosowanie warstw tlenkowych, zapewniających uzyskanie skutecznego ograniczenia optycznego i elektrycznego. Lasery VCSEL pracują w niewymuszony sposób na pojedynczym modzie podłużnym. W przypadku modów poprzecznych sytuacja jest bardziej skomplikowana. Najprostszą metodą pozwalającą kontrolować mody poprzeczne jest zastosowanie warstw tlenkowych. W pracy przedstawiono wyniki symulacji wybranych właściwości elektrycznych i optycznych lasera VCSEL 980 nm z podwójnymi oksydacjami po stronie typu p, ułożonymi w dwóch konfiguracjach.

Model

W przeprowadzonych symulacjach pracy lasera zostały wykorzystane modele trzech zjawisk: cieplnych, elektrycznych i optycznych. Równania modeli optycznych i elektrycznych są rozwiązywane w sposób samouzgodniony. Model elektryczny opisuje następujące różniczkowe równanie cząstkowe:

$$(1) \quad \nabla(\sigma(\mathbf{r}) \circ \nabla V(\mathbf{r})) = 0$$

gdzie \mathbf{r} jest wektorem położenia, σ wektorem przewodnictwa elektrycznego materiału, a V potencjałem elektrycznym. Warunki brzegowe nadane są przez potencjał na elektrodach lasera. W obszarze złącza przewodność jest określona na podstawie równania Schockleya:

$$(2) \quad j = j_s \exp(\beta U)$$

gdzie j jest gęstością prądu, j_s i β są dwoma parametrami charakteryzującymi złącze, zaś U jest napięciem na złączu. W celu znalezienia rozkładu temperatury T rozwiązywane jest poniższe równanie transportu ciepła:

$$(3) \quad \nabla \mathbf{k}(\mathbf{r}) \circ \nabla T(\mathbf{r}) + \gamma(\mathbf{r}) = 0$$

Rozkład gęstości źródeł ciepła jest opisany przez następujące wzory:

$$(4) \quad \gamma = \mathbf{j} \circ \text{grad} V, \quad \mathbf{j} = \text{diag}(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z) \text{grad} V$$

gdzie $\text{diag}(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$ jest macierzą diagonalną ze współrzędnymi diagonalnymi tensora przewodności elektrycznej σ . Warunki brzegowe dla równania (3) są adiabatyczne z wyjątkiem spodu chłodnicy, dla którego przyjmuje się stałą temperaturę. Oba przedstawione równania rozwiązuje się z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Po rozwiązaniu układu równań (1) i (3) możliwe jest rozwiązanie (w symetrii cylindrycznej) równania dyfuzji (5) dla nośników w obszarze czynnym:

$$(5) \quad D \Delta n - (An + Bn^2 + Cn^3) + \frac{j}{ed} = 0$$

W powyższym równaniu D oznacza stałą dyfuzji, n jest koncentracją nośników, A , B , C są stałymi opisującymi proces rekombinacji nośników, d jest całkowitą grubością studni kwantowych, e jest ładunkiem elementarnym, j oznacza gęstość prądu w kierunku prostopadłym do płaszczyzny złącza, uzyskaną z rozwiązań dla modelu elektrycznego. Koncentracja nośników i rozkład temperatury są wykorzystane do obliczenia wzmocnienia optycznego w obszarze czynnym lasera. Szczegóły tych obliczeń można znaleźć w artykułach [1, 2].

Do analizy zjawisk optycznych użyto trójwymiarowego, wektorowego modelu optycznego. W pracy wykorzystano metody numeryczne, a mianowicie Plane-Wave Admittance Method (PWAM) oraz Plane-Wave Reflection Transformation (PWRT). Metody PWAM oraz PWRT pozwalają znaleźć mody własne dowolnej planarnej struktury fotonicznej. Za pomocą tych metod rozwiązuje się równania Maxwella w dziedzinie częstotliwości przez użycie rozwinięcia w bazie fal płaskich wewnątrz każdej warstwy i analitycznego rozwiązania w kierunku pionowym. Takie rozwiązanie jest możliwe dzięki przekształceniu pola elektromagnetycznego do współrzędnych diagonalnych. Równania Maxwella są przekształcone do równań drugiego rzędu:

$$(6) \quad \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial z^2} = -\mathbf{P}_H \mathbf{P}_E \mathbf{E}$$

$$(7) \quad \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial z^2} = -\mathbf{P}_H \mathbf{P}_E \mathbf{H}$$

gdzie \mathbf{E} i \mathbf{H} są wektorami zawierającymi współczynniki Fouriera składowych funkcji pola elektrycznego i magnetycznego. Macierze \mathbf{P}_E i \mathbf{P}_H są obliczane przez zastosowanie operatorów różniczkowych. Równania (6) i (7) można przekształcić w równania, które można rozwiązać analitycznie:

$$(8) \quad \frac{\partial^2 \mathbf{E}'}{\partial z^2} = -\mathbf{\Gamma} \mathbf{E}'$$

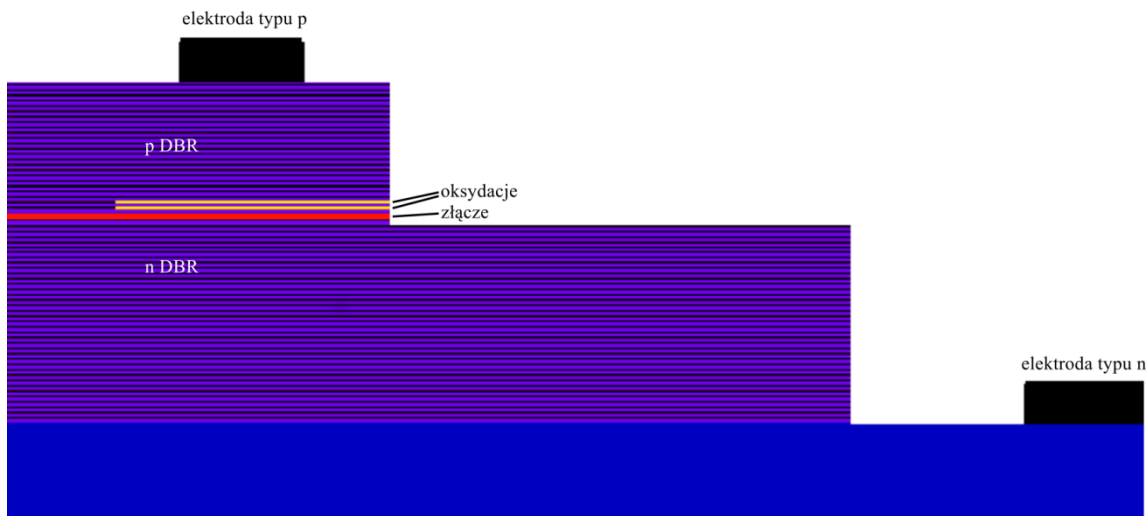
$$(9) \quad \frac{\partial^2 \mathbf{H}'}{\partial z^2} = -\mathbf{\Gamma} \mathbf{H}'$$

gdzie $\mathbf{\Gamma}$ jest diagonalną macierzą współczynników propagacji, zaś wektory \mathbf{E}' i \mathbf{H}' zawierają amplitudy odpowiednich modów propagujących w kierunku pionowym. Ponieważ

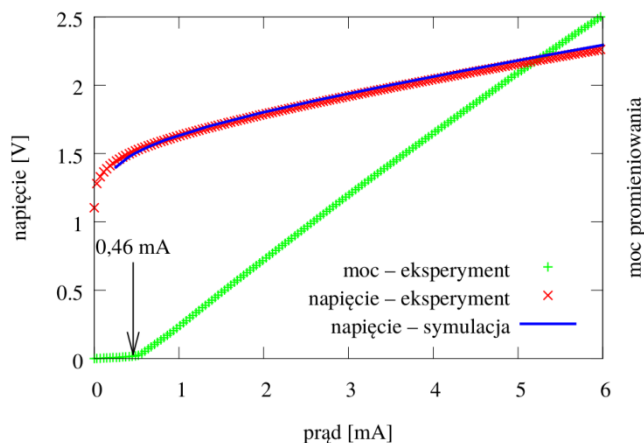
macierz $\mathbf{\Gamma}$ jest zespolona, uwzględniane są zarówno propagowane jak i zanikające mody.

Struktura modelowanego lasera VCSEL

Modelowany laser został zaprojektowany i wykonany w Institute of Solid State Physics, Technische Universität Berlin [3, 4]. Jest to laser emitujący falę o długości 980 nm, zoptymalizowany pod kątem zastosowań telekomunikacyjnych. Na rysunku 1 przedstawiono schemat modelowanej struktury. Po stronie zwierciadeł DBR typu p znajdują się dwie oksydacje o promieniu $r = 3,15 \mu\text{m}$ (zaznaczone na żółto). Zapewniają one ograniczenie elektryczne (tzn. skierowanie prądu płynącego przez obszar czynny w pobliżu środka struktury) i ograniczenie boczne modów promieniowania. Eksperymentalne charakterystyki, przedstawione na rysunku 2, posłużyły do kalibracji parametrów modelu. Uzyskano dobrą zgodność zarówno charakterystyki I - V jak i prądu progowego dla tej struktury.



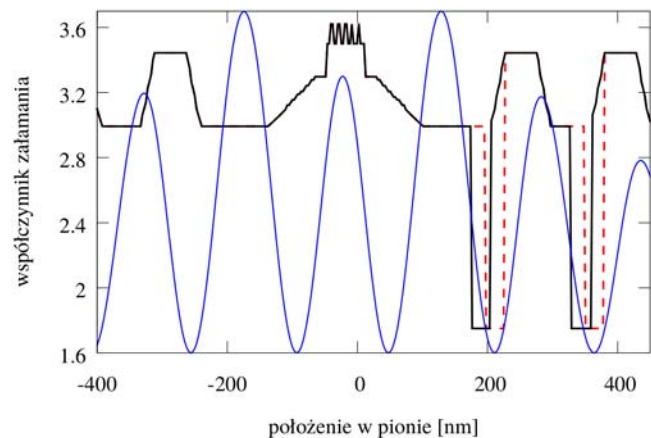
Rys. 1. Schemat struktury modelowanego lasera



Rys. 2. Charakterystyka prądowo-napięciowa (eksperymentalna i obliczona) oraz eksperymentalna charakterystyka emisyjna lasera opisanego w [3, 4]

W oryginalnej strukturze obie oksydacje (o grubości 30 nm każda) umieszczone są około 20 nm od węzłów fali stojącej w rezonatorze (rys. 3). W niniejszej pracy badano wpływ przesunięcia obu oksydacji do węzłów fali stojącej (linia czerwona przerywana na rysunku 3). Położenie oksydacji wpływa zarówno na rozkład gęstości prądu w obszarze czynnym jak i na efektywność ograniczenia

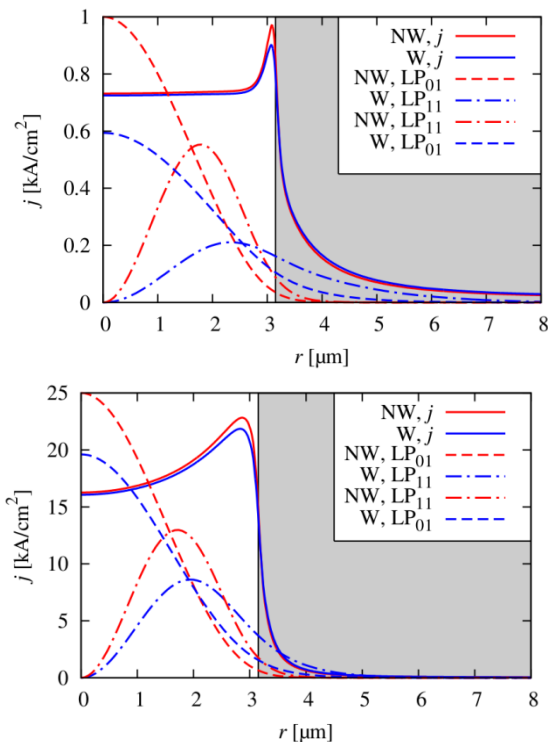
optycznego, czyli na bardzo istotne dla pracy lasera parametry.



Rys. 3. Profil współczynnika załamania w przekroju pionowym oryginalnego lasera (NW) – linia czarna oraz rozkład natężenia fali stojącej w rezonatorze – linia niebieska. Czerwona przerywana linia pokazuje położenie oksydacji w zmodyfikowanej strukturze (W)

Wyniki obliczeń

Przeprowadzono symulacje elektryczne, ciepłone i optyczne dla natężeń prądów odpowiadającym wartości prądu progowego (0,41 mA) do około 7 mA. Na rysunku 4 przedstawione są rozkłady gęstości prądów oraz profile modu podstawowego (LP_{01}) i pierwszego modu wyższego rzędu (LP_{11}) w obszarze czynnym dla struktury oryginalnej (NW) i struktury z oksydacją w węzłach (W). Wszystkie profile modów pokazane na rysunkach w tej pracy są unormowane w ten sposób, że cała z rozkładu natężenia modu jest równa 1.



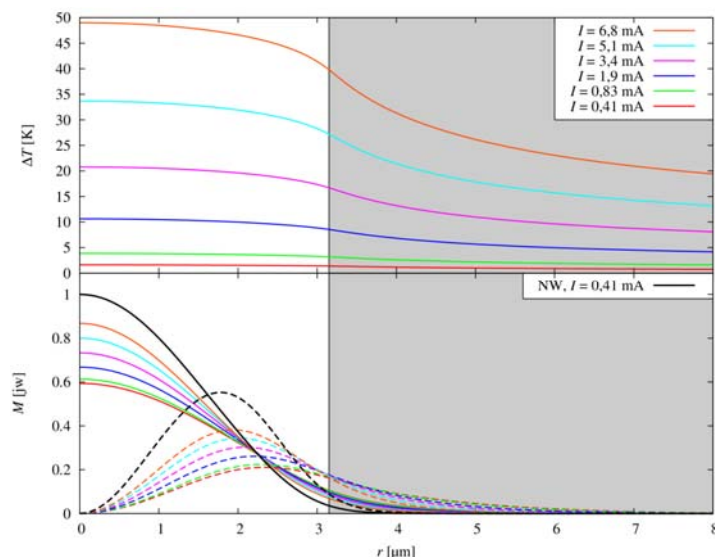
Rys. 4. Profile gęstości prądu w obszarze czynnym oraz profile modów (podstawowego i modu pierwszego rzędu) dla struktury oryginalnej – NW i zmodyfikowanej – W. Lewy wykres odpowiada prądowi progowemu (0,41 mA), prawy prądowi 7,8 mA. Szary obszar pokazuje zasięg warstwy oksydowanej

Na obu wykresach na rysunku 4 widać pik gęstości prądu w pobliżu krawędzi oksydacji. Wraz ze wzrostem prądu pogłębia się różnica między ilością nośników wpływających

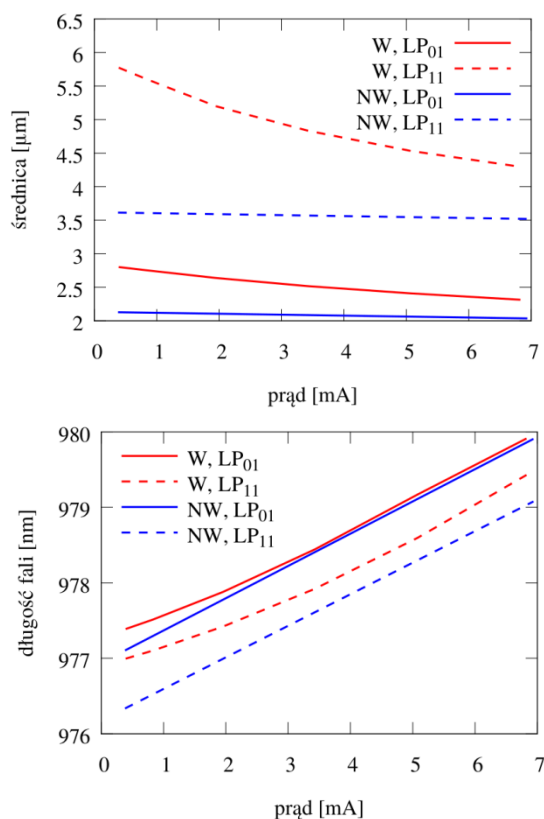
do złącza w środku struktury a ilością nośników wpływających przy krawędzi apertury. Zjawisko to faworyzuje mody wyższych rzędów, których maksima znajdują się bliżej maksimum gęstości prądu (rys. 4). W efekcie laser przełącza się w tryb pracy wielomodowej, co z reguły nie jest pożądanym zjawiskiem.

W analizowanym zakresie prądów temperatura we wnętrzu lasera zmienia się o kilkadziesiąt stopni, jak widać na rysunku 5. Powoduje to między innymi zmianę rozkładu współczynnika załamania w kierunku radialnym i wzmacnia wywołany gradientem współczynnika załamania efekt falowodowy. Dla struktury, w której ograniczenie optyczne zapewnione jest przez oksydację (struktura oryginalna – NW), zjawisko to nie ma silnego wpływu na kształt modów. Natomiast umieszczenie oksydacji w węzłach (struktura W) powoduje, że mody ograniczone są przez krawędź mesy oraz przez wspomniany efekt termiczny. Z tego powodu wzrost temperatury w laserze wyraźnie zmienia profile modów i powoduje ich zawężanie. Tym niemniej ich średnice w całym badanym zakresie są większe niż dla struktury ograniczonej optycznie oksydacjami (czarne linie na rysunku 5). Mody o większej średnicy pozwalają na uzyskanie większej mocy lasera. Dodatkowo, jak widać na rysunku 5, mod wyższego rzędu w strukturze mocno wnika w obszar pod oksydacją, w którym występuje silna absorpcja. To zjawisko zwiększa dyskryminację tych modów i pozwala dłużej utrzymać jednomodową pracę lasera na modzie podstawowym.

Na rysunku 6 przedstawiona jest zmiana średnicy modów wywołana wzrostem temperatury lasera. Widać na nim również, że w laserze, w którym ograniczenie optyczne zapewnione jest przez warstwy oksydowane, zmiany temperatury bardzo słabo wpływają na kształt modów. Pomimo że długości fali odpowiadające poszczególnym modom różnią się w obu rozważanych strukturach, ich zmiany z prądem zasilającym laser są bardzo podobne. Wynika to z faktu, że zmiany te spowodowane są temperaturowymi zmianami współczynnika załamania w całym laserze, a te są w obu przypadkach bardzo zbliżone, ponieważ rozkłady źródeł ciepła w każdym z przypadków (wynikające z rozkładu potencjału i gęstości prądu w laserze) różnią się nieznacznie.



Rys. 5. Profile przyrostu temperatury w obszarze czynnym (na górze) oraz profile modów (na dole) w strukturze zmodyfikowanej dla różnych wartości prądu zasilającego. Czarne linie pokazują mody w strukturze niezmodyfikowanej. Temperatury w strukturze zmodyfikowanej i niezmodyfikowanej (niepokazane na rysunku) różnią się bardzo nieznacznie



Rys. 6. Wykres zależności średnic modów (z lewej) oraz odpowiadających im długości fal (z prawej) od wartości prądu płynącego przez laser dla struktury oryginalnej (NW) i zmodyfikowanej (W)

Podsumowanie

Wyniki symulacji przedstawione w niniejszej pracy pokazały, że odsunięcie oksydacji od złącza o 20 nm wpływa zauważalnie na rozkład gęstości prądu w obszarze złącza – zwiększa się prąd płynący poza obszarem apertury względem wartości w środku struktury. Lasery z oksydacjami w

węzłach fali stojącej różnią się bardzo własnościami optycznymi od laserów z oksydacjami wysuniętymi z węzłów o zaledwie 20 nm. W tych pierwszych efekt ogniskowania termicznego wpływa znacząco na średnicę modów, która wyraźnie maleje wraz ze wzrostem prądu zasilającego przyrząd. W laserze, w którym ograniczenie modów zapewnione jest przez oksydacje umieszczone poza węzłami, efekt ten jest znikomy. W niezmodyfikowanej konstrukcji średnice modów są wyraźnie mniejsze, co może ograniczać moc takiego lasera, zwłaszcza w zakresie pracy jednomodowej.

Praca częściowa finansowana z projektów badawczych: NCN 2012/06/M/ST7/00442, NCN-2014/13/B/ST7/00633, PBS NCBiR PBS2 /A3/15/2013 oraz wykonana częściowo w ramach działalności Koła Naukowego Fizyków Kot Schrödingera.

LITERATURA

- [1] Sarzała R.P., Nakwaski W., Separate-confinement-oxidation vertical-cavity surface-emitting laser structure, *Journal of Applied Physics* 99(12), 2006
- [2] Piskorski Ł., Sarzała R.P., Nakwaski W., Self-consistent model of 650 nm GaInP/AlGaInP quantum-well vertical-cavity surface-emitting diode lasers, *Semiconductor Science and Technology* 22(6), 593, 2007
- [3] Li H., Moser P., Wolf P., Larisch G., Frasunkiewicz L., Dems M., Czyszanowski T., Lott J.A., and Bimberg D., Energy efficiency, bit rate, and modal properties of 980 nm VCSELs for very-short-reach optical interconnects, *Proc. SPIE* 9001, 90010B–90010B–8, 2014
- [4] Moser P., Lott J.A., Larisch G. and Bimberg D., Impact of the Oxide-Aperture Diameter on the Energy Efficiency, Bandwidth, and Temperature Stability of 980-nm VCSELs, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 33(4), luty 2015.

Autorzy: inż. Patrycja Śpiewak, Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki, ul. Wólczańska 219, 90-924 Łódź, E-mail: 193848@edu.p.lodz.pl; dr inż. Michał Wasiak, Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki, ul. Wólczańska 219, 90-924 Łódź, E-mail: michal.wasiak@p.lodz.pl.