

Selekcja modowa w laserach kaskadowych ze sprzężonymi wnękami rezonansowymi

Streszczenie. W niniejszej pracy przeprowadzono analizę numeryczną lasera kaskadowego ze sprzężonymi wnękami rezonansowymi. Zaobserwowano, iż właściwe dobranie niezależnych prądów zasilających obie wnęki rezonansowe umożliwia uzyskanie emisji jednomodowej.

Abstract. In this paper numerically investigate the evolution of the mode spectrum of the two coupled Fabry-Perot cavities, controlled by the driving currents of both sections leading to single mode operation. Theoretical analysis showed that most efficient single mode operation takes place in the case of relatively close current densities in both sections of the coupled-cavity quantum cascade laser which assures the overlap of the gain spectra. (*Longitudinal modes selection in coupled-cavity quantum cascade lasers*).

Słowa kluczowe: lasery półprzewodnikowe, lasery kaskadowe, sprzężone wnęki rezonansowe.

Keywords: numerical simulations, quantum cascade laser (QCL), coupled-cavity laser.

Wprowadzenie

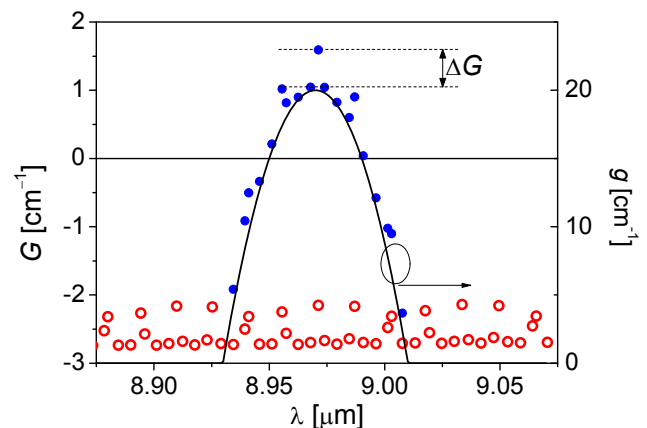
Kaskadowe lasery półprzewodnikowe [1] emitujące promieniowanie o długościach fali z szerokiego zakresu podczerwieni (od kilku do kilkuset mikrometrów) posiadają ogromny potencjał aplikacyjny, przede wszystkim w spektroskopii oraz w telekomunikacji w wolnej przestrzeni. Oba te zastosowania wymagają bardzo wąskiej charakterystyki spektralnej źródeł promieniowania, która może być zapewniona jedynie przez lasery jednomodowe. W przypadku laserów kaskadowych niemożliwe jest wykorzystanie rozwiązania stosowanego w laserach o emisji powierzchniowej z pionową wnęką rezonansową (lasery typu VCSEL – *Vertical Cavity Surface Emitting Laser*), których naturalną cechą (ze względu na krótki rezonator) jest praca na pojedynczym modzie podłużnym. Anizotropia wzmocnienia w obszarach czynnych laserów kaskadowych uniemożliwia zajęcie rekombinacji wymuszonej, przy udziale promieniowania o wektorze falowym skierowanym prostopadle do płaszczyzny obszaru czynnego, czyli w konfiguracji stosowanej w laserach typu VCSEL. Standardowym rozwiązaniem, które umożliwia pracę lasera na pojedynczym modzie podłużnym jest wprowadzenie do typowej struktury paskowego lasera krawędziowego zaburzeń współczynnika załamania na kierunku propagacji wiązki.

Typową konstrukcją lasera o emisji krawędziowej, zapewniającą akcję jednomodową, jest laser z rozłożonym sprzężeniem zwrotnym (skrótowo nazywany laserem DFB *Distributed Feedback*), jednak technologia jego wytwarzania niesie szereg trudności znacząco podnoszących koszty jego masowej produkcji. Alternatywą są lasery ze sprzężonymi wnękami rezonansowymi (*Coupled Cavity Laser*), które przy właściwym zaprojektowaniu umożliwiają akcję jednomodową oraz prądowe przestrajanie długości fali w zakresie kilkudziesięciu nanometrów. Sprzężone wnęki rezonansowe w najprostszej postaci są wytwarzane przez wytrawienie poprzecznej przerwy w pasku laserowym.

Wyniki

Szczegóły budowy epitaksjalnej analizowanej struktury zostały opisane w [1]. Rozważając wpływ sprzężonych wnęk na własności modalne lasera przyjęliśmy, iż laser został podzielony na dwie części w stosunku 1:2,5 szczeliną o głębokości odpowiadającej grubości części epitaksjalnej lasera. W symulacjach użyliśmy trójwymiarowego modelu elektryczno-cieplnego wykorzystującego metodę elementu skończonego [2] oraz

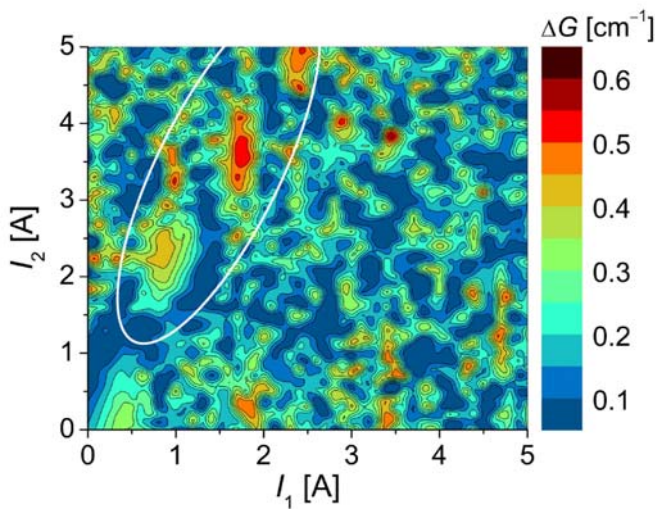
dwuwymiarowego modelu efektywnego współczynnika załamania [3], w którym uwzględniliśmy wpływ rozkładu temperatury i wzmocnienia materiałowego na rozkład zespolonej wartości współczynnika załamania w analizowanym laserze.



Rys. 1. Wzmocnienie modowe (G) modów podłużnych w funkcji ich długości fali. Puste okręgi oznaczają wzmocnienia modowe modów podłużnych w przypadku braku wzmocnienia w obszarze czynnym. Niebieskie oznaczają przypadek, w którym zależność spektralna wzmocnienia materiałowego (g) przyjmuje postać funkcji parabolicznej (czarna krzywa). ΔG definiuje różnicę wzmocnień modowych pomiędzy dwoma najsilniejszymi modami podłużnymi

Rysunek 1 ilustruje zależność wzmocnienia modowego modów podłużnych od ich długości fali w przypadku braku wzmocnienia w strukturze oraz w przypadku przyjęcia parabolicznej zależności wzmocnienia od długości fali. W przypadku, gdy rezonator lasera jest monolityczny, wzmocnienia modowe kolejnych modów podłużnych są do siebie bardzo zbliżone, co dowodzi iż geometria lasera nie powoduje dyskryminacji modowej. W przypadku, gdy rezonator zostanie przedzielony na dwie nierówne części wówczas mniejszych strat modowych doznają te mody, które mogą znaleźć się jednocześnie w rezonansie z obiema wnękami. Taki przypadek ilustruje rysunek 1. Puste okręgi pokazują mody we wnęcie bez wzmocnienia materiałowego. Pewna część modów posiada większe wzmocnienie modowe, co świadczy o tym, iż znalazły się w rezonansie z obiema wnękami. Po uwzględnieniu wzmocnienia materiałowego (pełne okręgi) zostaje wzmocniona tylko ta część modów, których długość fali znajduje się w przedziale, gdzie wzmocnienie materiałowe

jest dodatnie. Obecność wzmożenia materiałowego jest dodatkowym czynnikiem dyskryminującym mody. W celu określenia dyskryminacji modowej, która umożliwia osiągnięcie pracy jednomodowej, wprowadzamy wielkość ΔG zdefiniowaną na rysunku 1, która określa różnicę wzmożenia modowego pomiędzy dwoma najsilniejszymi modami.



Rys. 2. Różnica wzmożeń modowych ΔG w funkcji natężeń prądów (I_1 , I_2) wstrzykiwanych niezależnie do obu wnęk. Biały owal pokazuje obszar, w którym parametr ΔG osiąga największe wartości

Rysunek 2 ilustruje wielkość ΔG w funkcji prądów sterujących obiema wnękami rezonansowymi. Najrozleglejsze obszary o znaczącej wartości ΔG zostały oznaczone owalem o białym konturze. Obszary te występują w pobliżu prostej wyznaczającej stosunek pomiędzy prądami obu wnęk: $I_2/I_1 = 2.5$. Stosunek ten odpowiada stosunkowi długości obu wnęk, co dowodzi iż w tym przypadku gęstości prądów w obu wnękach są zbliżone. Fakt ten posiada dalsze konsekwencje. W przypadku zbliżonej gęstości prądów wstrzykiwanych do obu wnęk, zbliżone są także temperatury obszarów czynnych w obu wnękach, a co za tym idzie zbliżone są także długości fal modów, które są wzmacniane przez obie wnęki. Tylko w takim przypadku można znaleźć taki mod podłużny, który jednocześnie znajdzie się w rezonansie z obiema wnękami rezonansowymi oraz będzie wzmożony

przez obszary czynne obu wnęk. W takiej sytuacji uzyskujemy najsilniejszą dyskryminację modową.

Podsumowanie

Wykorzystując dwuwymiarowy model zjawisk optycznych połączony z trójwymiarowym modelem zjawisk termiczno-elektrycznych przeprowadziliśmy analizę zachowania paskowego lasera kaskadowego ze sprzężonymi wnękami. Analiza pokazała, iż najsilniejszą emisję jednomodową można uzyskać w przypadku, gdy gęstości prądów wstrzykiwanych niezależnie do obu wnęk są do siebie zbliżone. Wniosek ten posiada istotne konsekwencje aplikacyjne, pokazujące iż akcję jednomodową lasera dwuwnękowego można uzyskać poprzez odpowiednie dobranie prądów sterujących.

Badania zostały sfinansowane ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu PROFIT PBS2/A3/15/2013.

LITERATURA

- [1] Bugajski M., Gutowski P., Karbownik P., Kolek A., Haldas G., Pierściński K., Pierścińska D., Kubacka-Traczyk J., Sankowska I., Trajnerowicz A., Kosiel K., Szerling A., Grzonka I., Kurzydłowski K., Slight T., Meredith W., Mid-IR quantum cascade lasers: Device technology and non-equilibrium Green's function modeling of electro-optical characteristics, *Phys. Status Solidi B* 251, (2014), 1144-1157
- [2] Sarzała R.P., Wasiak M., Nakwaski W., Temperature increase within quantum-cascade lasers originating from their incomplete soldering, *Photon. Lett. Poland*, vol. 3 (2), (2011), 52-54
- [3] Czyszanowski T., Nakwaski W., How exact are simplified scalar approaches to optical fields in oxide-confined stripe-geometry diode lasers?, *Opto-Electron. Rev.* vol. 15, (2007), 88-97

Autorzy: dr inż. Maciej Kuc, Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki, ul. Wólczańska 219, 90-924 Łódź; dr hab. inż. Robert Sarzała, Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki, ul. Wólczańska 219, 90-924 Łódź, E-mail: robert.sarzala@p.lodz.pl; dr hab. inż. Tomasz Czyszanowski, Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki, ul. Wólczańska 219, 90-924 Łódź, E-mail: tomasz.czyszanowski@p.lodz.pl; prof. dr hab. Maciej Bugajski, Instytut Technologii Elektronowej, al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa.