

doi:10.15199/48.2015.09.38

## Lasery półprzewodnikowe

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono sprzężone zjawiska fizyczne, tj. wzajemnie powiązane procesy optyczne, elektryczne i cieplne, a niekiedy również mechaniczne, decydujące o działaniu laserów półprzewodnikowych różnych typów. Szczególnie dokładnie opisano struktury i własności półprzewodnikowych laserów o emisji krawędziowej (laserów EEL), głównie laserów paskowych. Przytoczono również opis głównych konstrukcji i najlepszych osiągnięć laserów o emisji powierzchniowej (laserów VCSEL). Ponadto opisano procesy odpowiedzialne za degradację tych przyrządów.

**Abstract.** The paper presents coupled physical phenomena, i.e. interrelated optical, electrical, thermal and sometimes also mechanical processes crucial for an operation of various types of semiconductor lasers. Structures and properties of edge-emitting semiconductor lasers (EELs) are described scrupulously, stripe-geometry lasers in particular. Some details concerning operation and properties of the best vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) are also given. Besides, processes responsible for laser degradation are characterized. (**Semiconductor lasers**).

**Słowa kluczowe:** fizyka laserów półprzewodnikowych, konstrukcje laserów półprzewodnikowych, cechy szczególne laserów półprzewodnikowych o różnych strukturach.

**Keywords:** physics of semiconductor lasers, constructions of semiconductor lasers, special features of various semiconductor lasers.

### Wprowadzenie

Lasery półprzewodnikowe są to źródła monochromatycznego i skolimowanego promieniowania spójnego, w których funkcję ośrodka czynnego pełni półprzewodnik. Obok diod elektroluminescencyjnych stanowią one drugą ważną grupę półprzewodnikowych emiterów promieniowania używanych w układach optoelektronicznych. Niewielkie rozmiary laserów półprzewodnikowych, niskie napięcie ich zasilania, możliwość masowej produkcji, niska cena, stosunkowo wysokie moce emitowanego promieniowania, łatwość modulacji prądem sterującym o wysokiej częstotliwości oraz możliwość uzyskania spójnego promieniowania w zakresie od dalekiej podczerwieni, poprzez światło widzialne do promieniowania ultrafioletowego, sprawiły, że przyrządy te mają obecnie ogromną liczbę zastosowań.

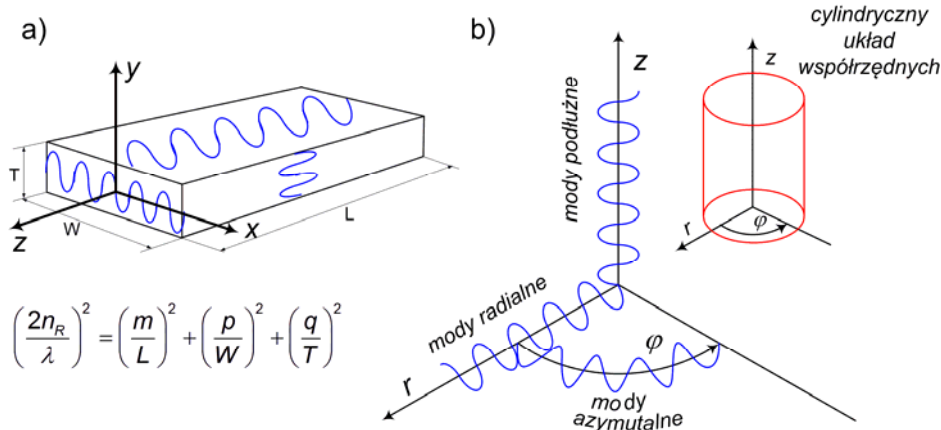
Każdy laser składa się z obszaru czynnego, w którym następuje wzmocnienie promieniowania do poziomu zrównania się jego wzmocnienia ze stratami (I warunek laserowy), oraz z rezonatora, wprowadzającego odpowiednią kierunkową i częstotliwościową selekcję modów promieniowania (II warunek laserowy). W przypadku lasera półprzewodnikowego, jego obszar czynny, a najczęściej również rezonator, są wykonane w materiale półprzewodnikowym.

### Mody promieniowania lasera półprzewodnikowego

Modami promieniowania laserowego nazywamy fale stojące promieniowania elektromagnetycznego wewnątrz

laserowego rezonatora. W przypadku laserów o emisji krawędziowej o strukturze wyjaśnionej poniżej rozróżniamy (rys. 1) mody podłużne o całkowitej liczbie połówek fali wzdłuż osi rezonatora między jego zwierciadłami oraz mody poprzeczne i boczne o całkowitej liczbie połówek fali w obu pozostałych prostopadłych kierunkach rezonatora. Natomiast w laserach o emisji powierzchniowej oprócz modów podłużnych wzdłuż osi lasera i modów poprzecznych w kierunku radialnym rozróżnia się też mody azymutalne o całkowitej liczbie połówek fali w kierunku azymutalnym.

Wzbudzenie się danego modu promieniowania następuje po osiągnięciu przez niego warunku progowego akcji laserowej, tj. wówczas, kiedy to jego wzmocnienie modowe, będące konsekwencją wzajemnego przekrycia się rozkładu natężenia promieniowania tego modu i rozkładu wzmocnienia optycznego w rezonatorze, stanie się równe jego stratom modowym, związanym z analogicznym przekryciem się rozkładu tego natężenia i rozkładu strat optycznych. Zgodnie z teorią Wagnera-Birnbauma [1], w wyniku nieliniowych oddziaływań między materiałem obszaru czynnego i promieniowaniem, w laserach następuje wówczas skupienie prawie całej energii promieniowania w modach najbardziej uprzywilejowanych (często jedynie w jednym modzie), o najkorzystniej usytuowanych rozkładach natężenia promieniowania względem obszaru wzmacniającego i obszaru strat.



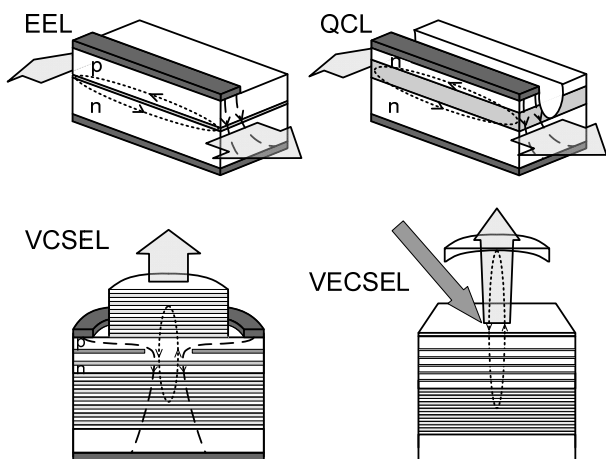
Rys. 1. Mody promieniowania w laserze o emisji krawędziowej (a) i powierzchniowej (b)

Wzrost natężenia promieniowania takiego uprzywilejowanego modu laserowego jest w przypadku laserów półprzewodnikowych ograniczony przez zjawisko lokalnego wypalania dziury w rozkładzie promieniowania (*hole-burning effect*). W rezultacie laser półprzewodnikowy najczęściej emituje promieniowanie wielomodowe, będące czasowym uśrednieniem niezwykle krótkich okresów promieniowania jednomodowego [2].

### Struktury laserów półprzewodnikowych

Dwie główne konfiguracje laserów półprzewodnikowych (rys. 2) to:

- lasery o emisji krawędziowej (lasery EEL – *edge-emitting lasers*), w wypadku których promieniowanie wędrując w rezonatorze między jego zwierciadłami cały czas znajduje się wewnątrz ośrodka czynnego, czyli cały czas jest przez niego wzmacniane, oraz
- lasery o emisji powierzchniowej (lasery VCSEL – *vertical-cavity surface-emitting lasers*), w których promieniowanie rozchodzi się w kierunku prostopadłym do krawędzi obszaru czynnego i jest wzmacniane jedynie wewnątrz tego obszaru, tj. na części jego drogi w rezonatorze.



Rys. 2. Schematy typowych struktur laserów półprzewodnikowych: symetryczna połowa laserów EEL i QCL oraz laser VCSEL i pompowany optycznie laser VECSEL

Głównymi zaletami laserów o emisji krawędziowej są:

- stosunkowo łatwa technologia,
- stosunkowo wysoka moc emitowanej wiązki promieniowania,
- możliwość łączenia laserów w jednowymiarowe matryce laserowe,

natomiast ich głównymi wadami są:

- wzbudzenie się wielu modów podłużnych,
- bardzo rozbieżna wiązka promieniowania wykazującego astygmatyzm.

Z kolei zaletami laserów VCSEL są:

- mała rozbieżność wiązki ich promieniowania,
- naturalna praca na pojedynczym modzie podłużnym,
- możliwość wczesnego odrzucania wadliwych struktur w czasie ich wytwarzania,
- możliwość łączenia laserów w dwuwymiarowe matryce laserowe,
- możliwość kontrolowanego odstrojenia emitowanego promieniowania od maksimum krzywej wzmocnienia materiału obszaru czynnego,

natomiast ich wadami są:

- bardzo niskie moce emitowanego promieniowania,

- wzbudzenie się modów poprzecznych oraz
- stosunkowo wysokie wartości oporności elektrycznych i cieplnych.

Oprócz opisanych powyżej dwóch głównych konfiguracji laserów półprzewodnikowych, tj. (w skrócie) laserów krawędziowych EEL i laserów VCSEL, znane są również półprzewodnikowe lasery z rozłożonym sprzężeniem zwrotnym (typu DFB), lasery z zewnętrznym rezonatorem (typu VECSEL) i kwantowe lasery kaskadowe (typu QCL). Każdy z tych laserów zasługuje na osobne omówienie, jednakże w tej pracy ograniczymy się w głównej mierze do laserów EEL (głównie laserów paskowych), porównując jednakże ich własności z laserami VCSEL.

### Poprawa stabilności spektralnej laserów półprzewodnikowych

W celu poprawy stabilności spektralnej laserów półprzewodnikowych stosuje się następujące ich zmodyfikowane struktury:

- zewnętrzny rezonator, w przypadku którego zastosowanie powłok antyodbiwających na jednym ze zwierciadeł lasera umożliwia wyjście przez nie promieniowania z kryształu półprzewodnikowego; wówczas sprzężenie zwrotne jest realizowane przez zewnętrzne zwierciadło lub siatkę dyfrakcyjną, dzięki czemu można dodatkowo umieścić na drodze promieniowania dodatkowe elementy oraz tak starannie dobrać odległość między zwierciadłami, aby został uprzywilejowany jego jeden wybrany mod,
- lasery sprzężone – dwa sprzężone lasery tworzą niezwykle selektywny układ, wówczas odpowiednio dobierając prądy płynące przez każdy z nich oraz szerokość szczeliny między nimi można uzyskać stabilną emisję jednomodową promieniowania o zadanej mocy i długości fali,
- *injection locking* – promieniowanie emitowane przez niezwykle starannie wykonany mały *master laser* jest wstrzykiwane do potężnego *slave laser*, powodując wyłączenie modów własnych tego lasera i wzmacnianie jedynie wstrzykniętych modów *master laser*,
- MOPA – *Master Oscillator – Power Amplifier* – nowoczesna wersja *injection locking*.

### Degradacja laserów półprzewodnikowych

Przez degradację lasera półprzewodnikowego rozumiemy stopniowe lub raptowne pogorszenie się parametrów emitowanej przez niego wiązki promieniowania laserowego. Z punktu widzenia przebiegu degradacji rozróżniamy degradację raptowną (*catastrophic degradation*), zachodzącą nagle, bez żadnego ostrzeżenia, oraz degradację stopniową (*gradual degradation*), kiedy to parametry wiązki laserowej zmieniają się stopniowo. Natomiast z punktu widzenia miejsca, w którym następują procesy degradacji, rozróżniamy degradację zwierciadeł, degradację kontaktów i degradację objętościową. Stąd w laserach półprzewodnikowych mamy do czynienia z następującymi procesami degradacji:

- raptowna degradacja zwierciadeł spowodowana przez miejscowe nadtopienie jego powierzchni w wyniku lokalnego wzrostu temperatury,
- stopniowa degradacja zwierciadeł – stopniowe utlenianie powierzchni zwierciadeł wpływające na ich współczynnik odbicia,
- raptowna degradacja kontaktów, będąca wynikiem zwarcia lasera przez kryształy włoskowate wyrastające z lutu w wyniku procesów elektromigracji,
- stopniowa degradacja kontaktów w wyniku tworzenia się w ich obszarze wysokooporowych związków międzymetalicznych zawierających atomy złota i indu

dyfundujących z warstw kontaktu i lutu,

- raptowna degradacja objętościowa z powodu nagłego rozrastania się ciemnych obszarów DLD (*dark line defekt*) i DSD (*dark spot defekt*),
- stopniowa degradacja objętościowa w wyniku stopniowego ciemnienia obszaru rezonatora w konsekwencji powolnego tworzenia się w nim defektów.

#### Podsumowanie

Rozwój konstrukcji laserów półprzewodnikowych, bardzo masowy i gwałtowny w początkowym okresie, zbliża się chyba już stopniowo do końca. Wciąż pojawiają się nowe ich struktury, ale trudno już chyba liczyć na jakąś zupełnie nową ich konstrukcję o zdecydowanie poprawionych parametrach w stosunku do osiągnięć dotychczasowych laserów. Zapewne więc chyba nie uda się już doprowadzić powyższego rozwoju do uzyskania wciąż oczekiwanego radykalnie lepszego nowego lasera półprzewodnikowego o zdecydowanie poprawionych własnościach, tj. lasera o wciąż miniaturowych rozmiarach i o stosunkowo niewysokim progu akcji laserowej, ale działającego również w wysokich temperaturach i emitującego wiązkę o znikomej rozbieżności, dostatecznie wysokiej mocy i dowolnej długości fali promieniowania. Wielkie nadzieje wiąże się jeszcze z nowymi strukturami

laserów półprzewodnikowych, np. z kwantowymi laserami kaskadowymi, laserami DFB czy laserami typu VECSEL. Jednakże w ich wypadku, poprawiając niektóre wybrane parametry wiązki laserowej, musimy się liczyć ze znacznym pogorszeniem jej innych parametrów.

*Autorzy pragną podziękować za częściowe wsparcie przygotowania niniejszej pracy przez Polskie Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (MNiSzW), grant NCN nr 214/13/B/ST7/00633 i grant PBS 2/A3/15/2013 (PROFIT).*

#### LITERATURA

- [1] Wagner W.G. and Birnbaum G., Theory of quantum oscillators in a multimode cavity, *Journal of Applied Physics*, vol. 32, No 7 (July 1961) 1185
- [2] Bogatov A.P., Eliseev P.G., Ivanov L.P., Logginov A.S., Man'ko M.A., and Senatorov K.Ya., *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. QE-9 (1973) 392

---

**Autorzy:** prof. dr hab. inż. Włodzimierz Nakwaski, Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki, ul. Wólczańska 219, 90-924 Łódź, E-mail: [wlodzimierz.nakwaski@p.lodz.pl](mailto:wlodzimierz.nakwaski@p.lodz.pl); dr hab. inż. Robert P. Sarzała, Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki, ul. Wólczańska 219, 90-924 Łódź, E-mail: [robert.sarzala@p.lodz.pl](mailto:robert.sarzala@p.lodz.pl).