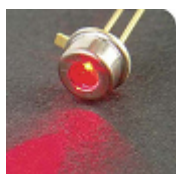


Modelovanie a simulácia vlastností VCSE laserov s nanoštruktúrou

Kuzma Anton · Elektrotechnika, Študentské práce

04.11.2011



V tomto článku je stručne popísaný návrh povrchovo emitujúcej laserovej diódy (ďalej len VCSEL) v prostredí návrhového balíka LaserMod programu rSoft a uvedené výstupy simulácií jej základných elektrických a optických charakteristík. Ďalšia časť práce je venovaná pozorovaniu vplyvu parametrov vybraných vrstiev štruktúry na optické

vlastnosti VCSEL.

1. Úvod

Postupom času dochádza k čoraz väčšej potrebe ľudstva byť informovaný a prijímať informácie rôzneho charakteru z rôznych oblastí Zeme. Informácie je potrebné prenášať na široký rozsah vzdialeností, a preto sa k satelitnej komunikácii pridružil rozmach pozemnej komunikácie. Najspoľahlivejším typom prenosu sa javia komunikačné trasy realizované káblovými spojmi. Metalické vedenia sú postupom času vytlačané do úzadia optickými vláknami, v ktorých sa šíria informácie v optickej forme pomocou fotónov. Takto je možné prenášať obrovské množstvo informácií na veľké vzdialenosti vďaka veľkej šírke prenášaného pásma a podstatne nižšieho útlmu v optických vláknach.

Aby bol takýto prenos efektívny, je kladený dôraz nielen na prenosové médium a detektor optického signálu, ale hlavne na zdroj šírenia žiarenia. Vzhľadom na parametre optických vlákien musí práve zdroj žiarenia spĺňať prísne parametre zaručujúce efektívny prenos veľkého množstva dát.

Najideálnejším zdrojom žiarenia pre optický prenos je laserová dióda. Existuje množstvo návrhov a vyhotovení laserových diód. Povrchovo emitujúca dióda (VCSEL) však ostatné prevyšuje v parametroch, ktoré sú dôležité práve pre prenos signálu optickými vláknami. Medzi tieto parametre patrí malá divergencia zväzku, stredová súmernosť zväzku, vysoká modulačná rýchlosť a možnosť pracovať pri vyšších teplotách vďaka tomu, že emisná vlnová dĺžka je určená módom rezonátora a nie maximálnym ziskom.

2. Princíp činnosti laserových diód

Laserová dióda je tvorená spojením silne dopovaného p-typu a n-typu polovodiča, čím vzniká PN priechod. Podobne ako u všetkých polovodičových p-n diódach aj pri

laserových diódach sú pri pripojení priepustne polarizovaného napätia elektróny injektované z n-oblasti a diery z p-oblasti do oblasti priestorového náboja (aktívna oblasť), kde dochádza k ich vzájomnej rekombinácii pri ktorej sa generujú fotóny (žiarivá rekombinácia). Aby pri rekombinácii nosičov v aktívnej oblasti laserovej diódy dochádzalo prednostne ku generácii fotónov a nie fonónov (kmity mriežky), je potrebné vyrobiť laserovú diódu z tzv. „priamych“ polovodičov. V takomto polovodiči sa nachádza minimum energie vodivostného pásma, v ktorej sa elektrón môže nachádzať, presne nad maximom energie valenčného pásma.

Medzi nepriame polovodiče patria napr. kremík a germánium, preto z nich nie je možné vyrobiť laserové diódy. Na rozdiel od týchto polovodičov sa viaceré viaczložkové polovodiče radia medzi priame polovodiče. Takéto viaczložkové polovodičové materiály sú napríklad dvojzložkové ako arzenid gália (GaAs), fosfid india (InP), antimonid gália (GaSb) a nitrid gália (GaN), trojzložkové ako AlGaAs a štvorzložkové ako AlInGaAs, InGaAsP a pod. Tieto materiály môžu byť použité na výrobu elektroluminiscenčných diód (LED) a laserových diód.

Pri absencii stimulovanej emisie môžu zotrvať elektróny a diery vo vybudených stavoch, tzv. „doba života nosičov náboja“. Po príchode fotónu s energiou rovnakou, akou je energia rekombinácie dôjde k rekombinácii. Tento jav sa nazýva stimulovaná emisia. Pri nej sa vytvára ďalší fotón s rovnakou frekvenciou, rovnakým smerom, s rovnakou polarizáciou a fázou ako má prvý fotón. To znamená, že stimulovaná emisia spôsobí nárast optickej vlny v oblasti, kde dochádza k injekcii a zisk sa zvyšuje s množstvom injektovaných elektrónov a dier. K stimulovanej emisii dochádza takmer výlučne u priamych polovodičoch.

Rovnako ako v iných laseroch je oblasť, kde dochádza k zisku, priestorovo obmedzená. V najjednoduchšej forme laserovej diódy je emitované žiarenie vedené v úzkom optickom vlnovode, ktorý je vytvorený v aktívnej časti laserovej diódy. Dva konce čipu lasera sú tvorené štiepnymi hranami a takto vzniká Fabry-Perotov rezonátor. Žiarenie emitované vo vlnovode je niekoľkokrát odrazené od zrkadiel vytvorených štiepnymi hranami, dochádza však aj k absorpcii a neúplným odrazom. Pri každom prechode žiarenia sa toto žiarenie zosilní stimulovanou emisiou. Ak dochádza k väčšiemu zosilneniu ako k stratám, dióda začne pracovať v laserovom režime.

VCSEL má optickú os žiarenia kolmú na optickú os tradičných laserových diód. Dĺžka aktívnej oblasti je veľmi krátka v porovnaní s hranovo emitujúcimi lasermi. Odrazové plochy na koncoch rezonančnej dutiny sú dielektrické zrkadlá vyrobené striedavo z materiálov s vysokým a nízkym indexom lomu. Takéto dielektrické zrkadlá poskytujú vysokú odrazivosť pre danú vlnovú dĺžku. Ak hrúbky vrstiev d_1 a d_2 s indexmi lomu n_1 a n_2 a platí vzťah (1), tak dochádza ku konštruktívnej interferencii odrazených vln na rozhraní. Z dôvodu vysokej odrazivosti týchto zrkadiel majú VCSEL spravidla menší výstupný výkon.

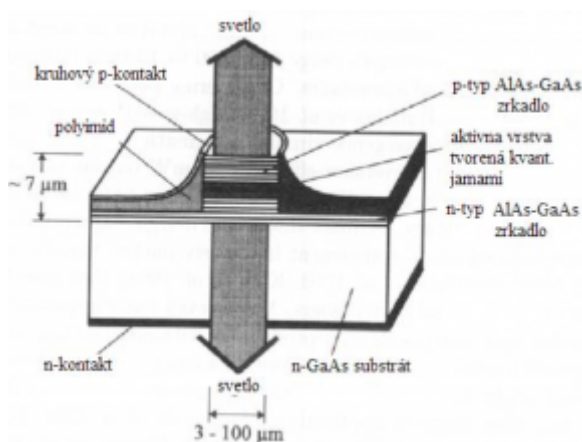
$$n_1 d_1 + n_2 d_2 = \frac{1}{2} \lambda \quad (1)$$

VCSEL majú výhodu oproti hranovo emitujúcim laserovým diódam aj v možnosti testovania počas výroby. Ak sa vyskytne problém, dokáže sa odhaliť pred koncom výroby a tak nedochádza k vynaloženiu zbytočných prostriedkov na ďalšie kroky

výroby. Ďalšou výhodou je aj to, že na jednej trojpalcovej doske GaAs môže byť naraz vyrobených niekoľko desiatok tisíc VCSEL.

3. Štruktúra VCSEL

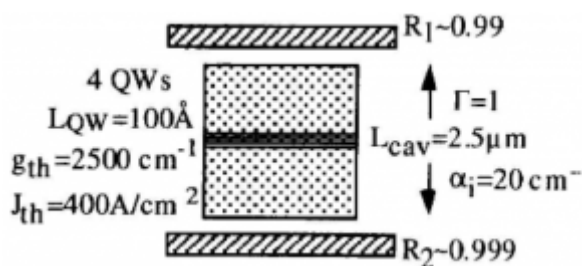
Podmienku rezonancie zabezpečuje rezonátor tvorený Braggovými zrkadlami (BR), ktoré sú umiestnené rovnobežne s aktívnou oblasťou skladajúcej sa z jednej, alebo viacerých kvantových jám. Planárne BR sa skladajú z vrstiev s vysokým indexom lomu, ktoré sa striedajú s vrstvami s nízkym indexom lomu. Každá vrstva má optickú hrúbku jednej štvrtiny vlnovej dĺžky generovaného žiarenia v materiáli, čo umožňuje dosiahnuť pri vhodnom počte vrstiev odrazivosť viac ako 99%. Vysoká odrazivosť kompenzuje krátku axiálnu dĺžku regiónu. Obr. 1 ilustruje usporiadanie štruktúry VCSEL.



Obr. 1 Štruktúra povrchovo emitujúcej laserovej diódy [1]

V bežných VCSEL sú horné a dolné zrkadlá dopované na p-typ respektíve n-typ vodivosti. Spolu tvoria PN prechod. V zložitejších štruktúrach môže byť p-typ a n-typ oblasť zapustená medzi zrkadlami. Takáto štruktúra je realizovaná zložitejším procesom, naproti tomu sa však eliminujú straty v BR štruktúrach.

Na Obr. 2 sú znázornené vrstvy so základnými parametrami a v Tab. 1 vysvetlivky k nim.



Obr. 2 Náčrt vrstiev so základnými parametrami typických hodnôt [1]

Tab. 1. Vysvetlivky vybraných parametrov

Značka	Názov	Jednotka
L_{QW}	Výška oblasti s kvantovými jamami	Å
L_{cav}	Výška aktívnej oblasti	μm
g_{th}	Prahový zisk	cm ⁻¹

J_{th}	Prahová prúdová hustota	A/cm ²
α	Absorpčný koeficient	cm ⁻¹
R	Odrazivosť	
Γ	Faktor priestorového ohraničenia	

Ak medzi dve Braggove zrkadlá vložíme aktívnu vrstvu, ktorej dĺžka je násobkom $\lambda/2$ vytvoríme krátky optický rezonátor s efektívnou dĺžkou prieniku žiarenia L_{eff} . Os rezonátora je v tomto prípade kolmá na p-n priechod. Takouto extrémne krátkou efektívnou dĺžkou rezonátora sa môže dosiahnuť účinná separácia pozdĺžnych módov a VCSEL môže pracovať v jednomódovom režime.

Vertikálne lasery majú vysokú kvalitu rezonátora, čo vytvára vysoký pomer stojatých vln v aktívnej oblasti. Zosilnenie v optickom rezonátore nie je konštantné, ale má lokálne maximá pozdĺž rezonátora. VCSEL využívajú kvantové jamy, ktoré sú vzhľadom na rozmery umiestnené do lokálneho maxima zosilnenia v rezonátore. Najnižší prahový prúd je možné dosiahnuť s jednou kvantovou jamou, ale maximálny optický výkon je tým limitovaný. Vyšší výkon ako aj medznú frekvenciu je možné dosiahnuť zvýšením počtu kvantových jám v mieste lokálneho maxima zosilnenia v rezonátore. [1]

3.1. Štruktúra s využitím kvantových javov

V štruktúrach laserov s dvojitým heteroprechodom (DH) je pre optimálne podmienky optického ohraničenia a nízkeho prahového prúdu hrúbka aktívnej vrstvy limitovaná v rozsahu 100 - 300 nm. Zlepšenie vlastností je možné dosiahnuť využitím kvantových javov v nízkodimenzionálnych štruktúrach. Využitím kvantovej jamy v aktívnej oblasti sa dosahuje zlepšenie nasledovných vlastností:

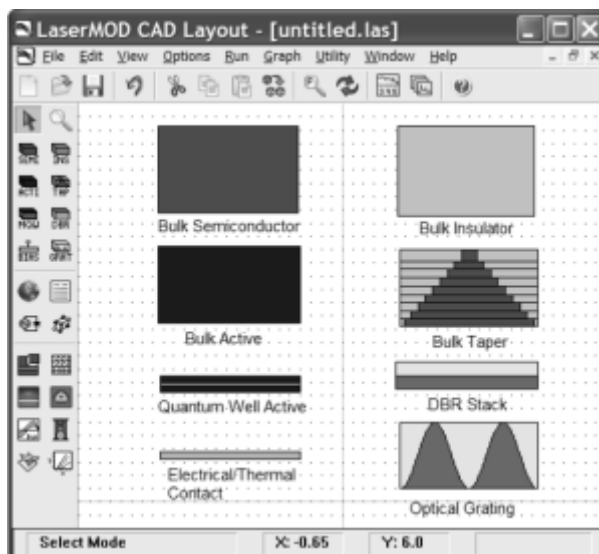
- energetické hladiny vo vodivostnom a valenčnom pásme sú kvantované v závislosti na šírke QW, čo priamo určuje energiu žiarivého prechodu,
- hustota obsadenia stavov je dvojdimeznionálna t.j. zisk v kvantovej jame narastá strmšie a transparentná koncentrácia nosičov pre dosiahnutie inverznej populácie sa dosahuje pri nižšej hodnote,
- faktor ohraničenia je možné optimalizovať využitím oddeleného optického ohraničenia štruktúrou SCH alebo GRIN-SCH (Graded index-separate confinement heterostructure),
- v kvantovej jame sa zvyšuje pravdepodobnosť stimulovanej emisie efektom fonónom podporenej rekombinácie na základe skokovej hustoty obsadenia stavov,
- uvedené výhodnejšie vlastnosti umožňujú zníženie prahového prúdu laserov s QW. [2]

4. Návrh VCSEL

Povrchovo emitujúca laserová dióda je navrhovaná pre žiarenie na vlnovej dĺžke 1300 nm. Toto je vlnová dĺžka, pri ktorej sa nachádza „okno“, kedy je útlm žiarenia naviazaného v optickom vlákne dosť nízky na to, aby sme boli schopní prenášať žiarenie na veľké vzdialenosti.. Samotný návrh a simulácie vlastností VCSEL prebiehali v prostredí programu Rsoft, konkrétne v jeho module Laser Mod.

4.1. Modul LaserMod vývojového balíka RSoft design

Tento modul podporuje okrem návrhu VCSEL aj návrh iných laserových štruktúr. Obr. 3 ilustruje druhy vrstiev, ktoré je možné používať pri návrhu.

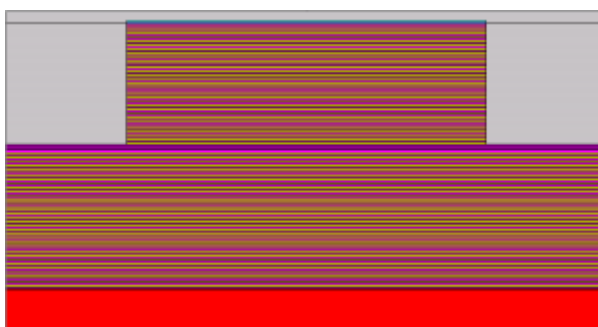


Obr. 3 Druhy štruktúr podporované pri návrhu [4]

Po pridaní potrebnej štruktúry do samotného návrhu, dokážeme meniť jej parametre v okne, ktoré sa otvorí po kliknutí pravým tlačidlom myši. Následne po upravení každej vrstvy prevedieme simuláciu, pri ktorej sa uchovávajú dáta a tieto je ďalej možné použiť na vykreslenie elektrických ako aj optických charakteristík. Presný postup pre prácu s návrhovým softvérom LaserMod obsahuje užívateľská príručka [4].

4.2. Návrh vrstiev VCSEL

Základná štruktúra navrhovaného VCSEL pozostáva z vrstiev kontaktu, substrátu, spodného Braggového zrkadla, ohraničujúcej vrstvy, vrstvy s kvantovými jamami, druhej ohraničujúcej vrstvy, aktívnej vrstvy vymedzujúcej prúd, horného Braggového zrkadla a vrchného kontaktu. V takomto poradí v smere odspodu nahor boli vrstvy namodelované v 2D návrhu. Pohľad na celkové usporiadanie je zobrazený na Obr. 4. Obr. 5 približuje pohľad na výsek vrstvy s kvantovými jamami a ohraničujúce vrstvy.



Obr. 4 Usporiadanie vrstiev VCSEL

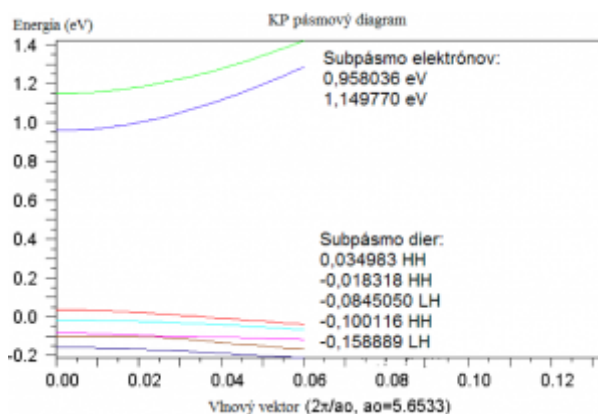


Obr. 5 Detail vrstvy s kvantovými jamami a ohraničujúce vrstvy

4.2.1 Vrstva s kvantovými jamami

Táto vrstva je svojou hrúbkou pod úrovňou 100 nm a preto ju môžeme nazvať nanoštruktúrou. Materiálové zloženie pre hrubý návrh tejto vrstvy bolo publikované v [5]. Táto vrstva je dôležitá z hľadiska toho, že určuje vlnovú dĺžku na akej žiari VCSEL. Zloženie tvorila dvojnásobná kvantová jama hrúbky 6,5 nm $\text{Ga}_{0.65}\text{In}_{0.35}\text{N}_{0.0108}\text{As}_{0.9892}$, ktorá je uzavretá v bariére GaAs hrúbky 20 nm. K parametrom tejto vrstvy som sa dopracoval úpravou zloženia pomocou KP pásmového diagramu vyobrazenom na Obr. 6. V takejto štruktúre vzniká žiarenie pri rekombinácii s energiou 0,923 eV, čo zodpovedá vlnovej dĺžke 1,34 μm . (2)

$$1.34 = \frac{1.24}{0.95836 - 0.34983} \quad (2)$$



Obr. 6 KP pásmový diagram

4.2.2 Ohraničujúca vrstva

Nasledoval návrh ohraničujúcej vrstvy a jej parametrov. Táto obklopuje vrstvu s aktívnymi jamami. Spodná je N typu z $\text{Al}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{As}$, ktorý je dopovaný na koncentráciu $0,2e+18$. Vrchná vrstva je svojím zložením rovnaká ako spodná len s tým rozdielom, že je P typu. Hrúbku vrstiev vypočítame podľa vzťahu (3).

$$L = \frac{2\lambda}{n} - L_{QW} \quad (3)$$

L - hrúbka, λ - vlnová dĺžka, L_{QW} - hrúbka vrstvy s kvantovými jamami, n - index lomu

Tento vzťah platí pre spodnú vrstvu. Horná vrstva je zmenšená o hrúbku vrstvy obmedzujúcej tok prúdu. Keďže táto vrstva nemá konštantný priebeh indexu lomu, ale

lineárne sa meniaci, tak priebeh indexu lomu, ktorý potrebujeme dosadiť do vzťahu vyrátame ako (4)

$$n = \frac{n_{MAX} - n_{MIN}}{2} \quad (4)$$

Hodnoty indexu lomu vyčítame z grafu priebehu indexu lomu.

4.2.3 Vrstva vymedzujúca tok prúdu

Šírka tejto vrstvy má hodnotu 15 μm a výška 0,4 μm . Je z P typu $\text{Al}_{0,55}\text{Ga}_{0,45}\text{As}$, ktorý je dopovaný na koncentráciu $1\text{e}+18$.

4.2.4 Braggove zrkadlá

Vyššie spomenuté vrstvy sú uzavreté medzi horným a dolným Braggovým zrkadlom. Tieto zabezpečujú úlohu optického rezonátora, vďaka odrazom na rozhraniach indexov lomu. Braggove zrkadlá sú tvorené P typom $\text{Al}_{0,55}\text{Ga}_{0,45}\text{As}$ s dopáciou $2\text{e}+18$ ak sa jedná o vrchné Braggove zrkadlo a N typom ak sa jedná o spodné Braggove zrkadlo. Hrúbka vrchnej aj spodnej vrstvy každého páru oboch zrkadiel zodpovedá štvrtine vlnovej dĺžky žiarenia podeleného indexom lomu vrstvy podľa vzťahu (5).

$$L = \frac{\lambda}{4n} \quad (5)$$

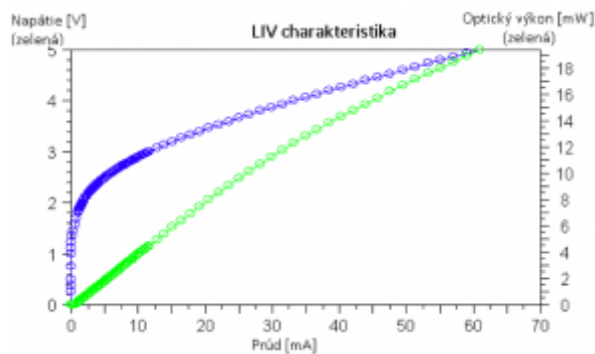
Vrchná vrstva s indexom lomu 3,57 má hrúbku 91 nm a spodná vrstva s indexom lomu 3,22 má hrúbku 101 nm. Dôležitým parametrom u Braggových zrkadiel je počet párov zrkadiel. Určuje odrazivosť, ale aj absorbuje určité množstvo žiarenia. Pri vyššom počte párov zrkadiel spodného zrkadla dióda žiari smerom nahor a v opačnom prípade smerom nadol. Odrazivosť spodného zrkadla pri dióde žiariacej nahor sa pohybuje na úrovni 99,9% a odrazivosť vrchného zrkadla je na úrovni približne 99%. Ďalej ovplyvňuje aj hodnotu prahového prúdu, kedy začína laserová dióda pracovať v laserovom režime. [6]

4.2.5 Substrát a kontaktné vrstvy

Štruktúra je narastená na vrstve N typu AlGaAs s koncentráciou prímiesí $4\text{e}+18$, ktorá oddeľuje štruktúru od substrátu. Samotný substrát je tvorený GaAs , ktorý je N typu s koncentráciou $1\text{e}+19$. Jeho hrúbka je zadaná na hodnotu 2 μm , čo nezodpovedá reálnym hrúbkam substrátu. Takáto hrúbka je zvolená z dôvodu rovnomernejšieho rozloženia hustoty mriežky celého modelu. Vrchnú a spodnú stranu povrchovo emitujúcej laserovej diódy tvoria ohmické kontakty hrúbky 0,1 μm . Vrchný slúži ako anóda a spodný ako katóda.

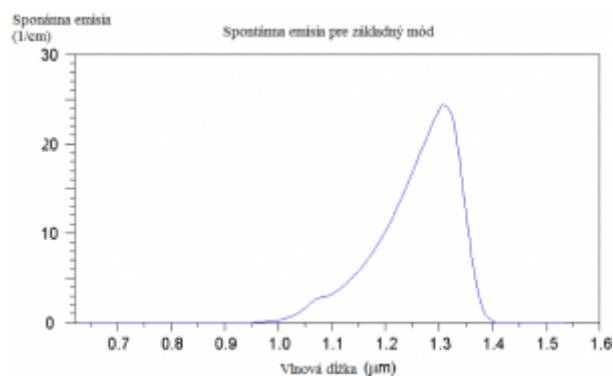
5. Základné elektrické a optické charakteristiky

Medzi základné charakteristiky VCSEL patria voltampérová - IV a vyžarovacia - LI (spolu LIV charakteristika) zobrazené na Obr. 7.



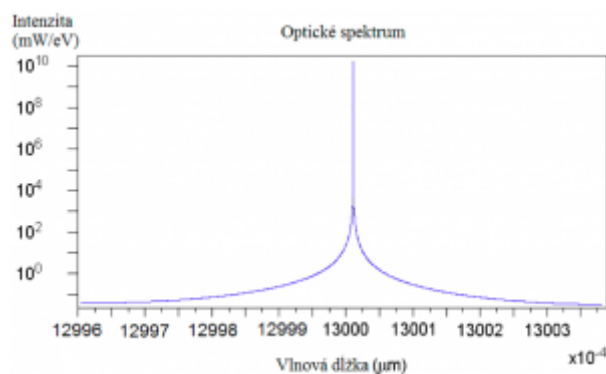
Obr. 7 IV a LI charakteristika navrhovanej VCSEL

Na Obr. 8 sa nachádza charakteristika spontánnej emisie.



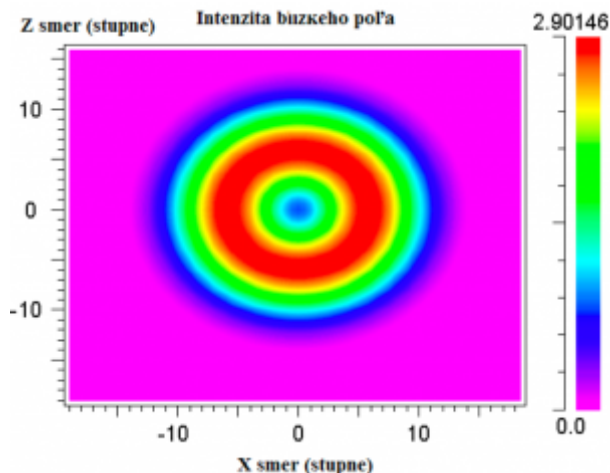
Obr. 8 Spontánna emisia navrhnutého VCSEL

Optické spektrum charakterizuje, na akej vlnovej dĺžke žiari VCSEL. Toto spektrum ilustruje Obr. 9.



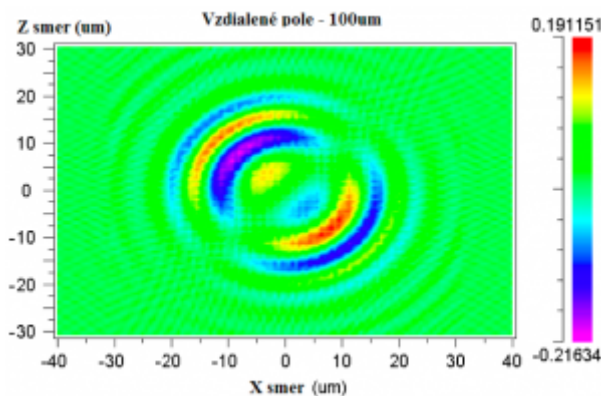
Obr. 9 Optické spektrum navrhnutého VCSEL

Divergencia zväzku žiarenia VCSEL sa pohybuje v okolí hodnoty 10°. Táto hodnota sa dá odčítať z charakteristiky blízkeho poľa, ktoré znázorňuje Obr. 10. V tomto prípade je hodnota divergencie 12°.



Obr. 10 Blízke pole navrhovanej VCSEL

Na Obr. 11 sa nachádza pohľad na vzdialené pole vo vzdialenosti 100 μm od povrchu VCSEL.



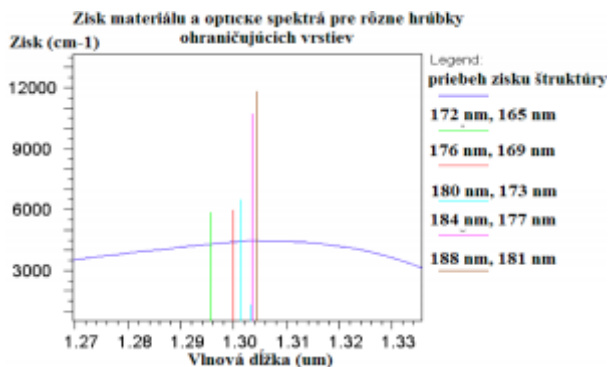
Obr. 11 Vzdialené pole navrhovanej VCSEL vo vzdialenosti 100 μm

6. Ovpływovanie optických vlastností VCSEL hrúbkou ohraničujúcej vrstvy

Zmenou hrúbky ohraničujúcich vrstiev dokážeme ovplyvňovať vlnovú dĺžku žiarenia VCSEL. Tieto zmeny hrúbky sa pohybujú v rozmedzí jednotiek až desiatok nanometrov. Takáto zmena vlnovej dĺžky vplýva na optický výkon žiarenia. So zvyšovaním hrúbky vrstvy sa posúva vlnová dĺžka žiarenia smerom k vyšším hodnotám (zmena Fabry-Perotovej rezonančnej frekvencie) a zvyšuje sa optický výkon do momentu, kedy sa optický rezonátor rozladí, čo spôsobí, že VCSEL neprejde do laserového režimu činnosti pod vplyvom zvyšujúceho sa prúdu.

K tomuto dochádza aj pri znižovaní hrúbky vrstvy pod určitú hodnotu. Zvyšovanie optického výkonu VCSEL je spôsobené tým, že Fabry-Perotov rezonátor ladíme na nižšiu frekvenciu (vyššiu vlnovú dĺžku), pri ktorej sa nachádza vyšší zisk štruktúry. Tento jav je znázornený na Obr.12. Riadiť hrúbku vrstvy pri jej raste pomocou molekulárno zväzkovej epitaxie (MBE) v rozlíšení jednotiek nanometrov nepredstavuje pre túto metódu problém.

Na Obr. 12 sa nachádza optické spektrum spolu s priebehom zisku štruktúry v závislosti od vlnovej dĺžky, pre hrúbky ohraničujúcich vrstiev 172 nm až 188 nm pre spodnú vrstvu a 165 nm až 181 nm pre vrchnú vrstvu. Hrúbky sa menia s krokom 4 nm.



Obr. 12 Optické spektrum a zisk štruktúry navrhovanej VCSEL

7. Záver

Použitie a vhodná voľba parametrov nanoštruktúr pri návrhu VCSEL výrazne vplýva na elektrické ako aj optické vlastnosti. Pri výrobe dokážeme presne navrhnuť energiu žiarivého prechodu a teda aj vlnovú dĺžku na ktorej bude VCSEL emitovať žiarenie. Dôležitou vlastnosťou je menší prahový prúd, ktorý je menší ako 1 mA. Toto je dosiahnuté vďaka tomu, že v kvantovej jame sa zvyšuje pravdepodobnosť stimulovanej emisie efektom fonónom podporenej rekombinácie na základe skokovej hustoty obsadenia stavov. (V dvojitej heteroštruktúre je hustota stavov rozložená parabolicky a injektované nosiče s vyššou energiou musia postupne preskakovať na nižšie úrovne pozdĺž parabolickej závislosti následkom interakcie s fonónmi).

VCSEL oproti hranovo emitujúcim laserovým diódam poskytuje výhodu v symetričnosti optického zväzku, ktorý má malú divergenciu a z toho dôvodu sa jednoduchšie naväzuje do optického vlákna. Kritickým krokom pri návrhu VCSEL je naladenie optického rezonátora tak, aby sa dióda dostala do optimálneho laserového režimu činnosti. Pri výrobe je dôležité dodržať veľkú presnosť pri raste jednotlivých vrstiev v štruktúre VCSEL, najmä Braggových zrkadiel.

Odkazy na literatúru

1. Kováč, J., "LaseryVCSEL_QC_ppt", prednáška z predmetu Aplikovaná optoelektronika a lasery, 2010
2. Kováč, J., "Polovodičové lasery 3", prednáška z predmetu Aplikovaná optoelektronika a lasery, 2010
3. "Cvičenie 5 - Vlastnosti optických vlákien (1.časť) "
http://www.kemt.feit.tuke.sk/predmety/OE_Cv5.pdf
4. RSoft Design Group, Inc., "LaserMOD 3 User guide", 2008, Dostupné z
<http://www.rsoftdesign.com>
5. Robert P. Sarzala, Wlodzimierz Nakwaski, "Methods to Improve Performance of the 1.3- μ m Oxide-Confined GaInNAs/GaAs QW VCSELs", ICTON 2010, June 2010, Munich, Germany
6. Kumarajah Kandiah, P Susthitha Menon, Sahbudin Shaari, "Design and modeling of a vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) ", ICSE2008, Proc. 2008, Johor Bahru, Malaysia

Spoluautor článku je prof. Ing. František Uherek PhD., Katedra mikroelektroniky, Fakulta Elektrotechniky a Informatiky, Slovenská Technická Univerzita, Ilkovičova 3, Bratislava

812 19

Práca bola prezentovaná na Študentskej vedeckej a odbornej činnosti (ŠVOČ 2011) v sekcii Mikroelektronika a optoelektronika a získala Diplom Dekana, ISBN 978-80-227-3508-7
