

FÜGGŐLEGES ÜREGŰ
FELÜLETSUGÁRZÓ LÉZERDIÓDÁK
HÁROMDIMENZIÓS MODELLEZÉSE

PH.D. TÉZISFÜZET

NYAKAS PÉTER CSABA

TÉMAVEZETŐ: PROF. VESZPRÉMI TAMÁS
BME, SZERVETLEN ÉS ANALITIKAI
KÉMIA TANSZÉK

KONZULENS: DR. KOCSÁNYI LÁSZLÓ
BME, ATOMFIZIKA TANSZÉK



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

2008

Bevezetés

A függőleges üregű felületsugárzó lézerdiódákat (VCSEL-eket) Kenichi Iga fedezte fel 1977-ben, kutatásuk azóta három szakaszban zajlik. Az első évtizedben bebizonyosodott, hogy elérhető velük szobahőmérsékleten is lézerműködés. Az 1990-es években új szerkezeti megoldásokkal, például az elektromos áramot és a lézermódusokat is hatékonyan behatároló oxid-apertúra alkalmazásával, sikerült alacsony küszöbáramot és jó hatásfokot megvalósítani. Az élsugárzó lézerdiódák tulajdonságainak elérése, bizonyos esetekben azok meghaladása után az ipari érdeklődés is megnőtt. Újabban a hagyományos 850 nm hullámhosszúságú eszközök mellett az egymódusú optikai adatátvitelt célzó hosszabb hullámhosszon sugárzó, valamint a megjelenítő eszközök céljára szolgáló látható fényű VCSEL-ek fejlesztése is rohamos léptekkel halad. Az egyetlen módusban és polarizációs állapotban működő, felületi mintázatokat vagy fotonikus kristályszerkezetet tartalmazó felületsugárzó lézerek pedig a tudományos kutatás legújabb területei.

Az alapvetően kísérleti jellegű ipari fejlesztés mellett számos módszert dolgoztak ki a VCSEL-ek elméleti tanulmányozására. Ezeket a vizsgált fizikai jelenségeknek megfelelően szokás elektromos, hőtani és optikai csoportokba sorolni. Az elektromos töltések és a lézermódusok közti kölcsönhatás gyors időskálán változtathatja meg a lézerfény teljesítményét, míg a módusok térbeli eloszlása közel időfüggetlennek tekinthető, és elsősorban a kialakított komplex törésmutató profiltól függ. Az összetett szerkezetre való tekintettel a felületsugárzó lézerdiódának mint nyitott rezonátornak a tanulmányozása komoly nehézségeket vet fel. Hengerszimmetrikus esetben ismertek ugyan közelítő jellegű analitikus megoldások, mint például a súlyozott index módszer, de ezek alkalmatlanok a korszerűbb VCSEL-ek módusainak meghatározására.

Általános, nem hengerszimmetrikus diódák leírására korábban egyedül az optikai szálak tökéletlenségeinek vizsgálatára is használt csatolt módusok elmélete bizonyult alkalmasnak, ez a módszer azonban viszonylag kis számítógépigénye mellett elméletileg pontatlan. Az összes elektromos tér-

komponensre a törésmutatótól függetlenül előírt folytonosság elvileg kiküszöbölhető lenne numerikus végeselemes modellezéssel, azonban ezt az eljárást néhány éve a korlátozott számítógépes erőforrásokra való tekintettel megvalósíthatatlannak ítélték háromdimenziós esetben, és csak hengerszimmetrikus szerkezetekre használták.

Célkitűzések

Munkám során olyan optikai módszerek kidolgozására törekedtem, amelyek egyaránt alkalmasak egyrészt a növesztési körülmények következtében nem szándékosan létrejövő, másrészt bizonyos céloknak megfelelően tervszerűen kialakított, nem hengerszimmetrikus törésmutató-eloszlással rendelkező VCSEL-ek számítására. A hierarchikus modellezési felfogás szerint gyors, de közelítő megoldások mellett nagy pontosságú numerikus módszereket is kerestem. A hatalmasnak ígérkező számítógépes erőforrások mérséklése végett hatékony numerikus eljárásokat is tanulmányoztam.

Természetes célkitűzés volt a lézermódus-számítás összekapcsolása az általában szintén numerikusan megvalósított hőtani és elektromos szimulációs eljárásokkal. A könnyű matematikai összeegyeztethetőség kedvéért igyekeztem egyetlen típusú mintavételezési hálót elkészíteni. A VCSEL-ek tipikus rétegszerkezete, de sokszor görbevonalú függőleges határfelületei a prizma alapú lefedést indokolták. Mivel az egymódusú, nagy sebességű lézerciódák tervezése időszerű és fontos praktikus feladat, a lézermódusok intenzitásának meghatározása stacionárius és dinamikus körülmények között szintén fontosnak tűnt.

A kidolgozandó modelleket valóság-hű és korszerű lézerciódákon kívántam bemutatni. Ilyenek például a körtől eltérő apertúrával, különleges alakú sekély felületi mintázatokkal és mindenekelőtt a mélyen fúrt fotonikus kristállyal ellátott VCSEL-ek. Természetes igényként merült fel az új számítási eredmények összehasonlítása egyrészt más eljárásokkal, másrészt mérési adatokkal.

Új tudományos eredmények

1. A súlyozott index módszert kétféle módon általánosítottam, és ezeket egy olyan többmódusú VCSEL modellezésére alkalmaztam, amely az ideális esetnek megfelelő kör és a befoglalt négyzet közti valóság-hű alakú oxidapertúrával rendelkezik. A számított hullámhosszkülönbség az alapmódus és a következő három módus között meggyőző egyezést mutatott a mért spektrummal, és a kísérleti közeltéri felvételeket is jól visszakaptam a számított módusprofilok súlyozásával [1, 2].

2. Kidolgoztam a Helmholtz-egyenlet teljesen numerikus megoldását nem hengerszimmetrikus VCSEL-ek vizsgálatára, és kimutattam a lézerfény diffrakcióját görbevonalú négyszög, valamint mérsékelten elnyújtott ellipszis alakú oxidapertúráknál. Mindkét példa megfelelt a kvalitatív elvárásnak, miszerint az apertúra szűkebb keresztmetszetei mentén erősebb diffrakciós hullámokra számítunk [3, 4].

3. Jelentős optikai veszteségkülönbséget mutattam ki passzív állapotú, elliptikus oxidapertúrájú VCSEL-ek merőleges polarizációjú alaplátusai között. Erre a célra a vektoriális Helmholtz-egyenlet numerikus, véges-elemes megoldását használtam. A merőleges polarizációjú módusok között kisebb veszteségkülönbséget kaptam a körapertúrával és elliptikus felületi mintázattal kialakított lézerdiódában. Az utóbbi esetben érdekes intenzitáseloszlást figyeltem meg a lézerdióda felett, amely a longitudinális állóhullám helyi eltolódásának tulajdonítható a lemaradt tartomány alatt [3, 5].

4. A Helmholtz-egyenlet numerikus megoldásával megerősítettem és elméletileg megindokoltam azt a kísérletileg már ismert tényt, hogy oxidapertúra alkalmazásával csökkenthető a fotonikus kristály VCSEL-ek küszöbárama. Bebizonyítottam, hogy az oxidapertúra tovább fokozza az optikai módusok térbeli beszorítottságát, így csökkentve a mélyen kimart lyuka-

kon történő szóródási veszteséget. Mivel a magasabbrendű módusokra erősebben hat az apertúra, ezért az egymódusosság romlása is várható oxidapertúrás, fotonikus kristály lézerdiodákban [3, 6].

5. A kölcsönhatásban álló optikai-elektromos-hőtani modellezés alapján kiszámítottam különböző, nem hengerszimmetrikus szerkezetű VCSEL-ek fényteljesítmény-áram görbéjét, miközben passzív állapotnak megfelelő módusképeket feltételeztem. A közel négyzet apertúrájú eszközben az aszimmetrikus áramprofil és a másodrendű módusok degenerációjának felhasadása következtében az apertúra sarkainál csúcsokat figyeltem meg a számított közeltéri eloszláson. Ez megfelelt a kísérleti felvételen látható maximumoknak. Arra is rámutattam számításaim alapján, hogy a másodrendű módusok közti intenzitásarány megfordítható, ha negyedhullámhossz mélységű háromszöges mintázatot marunk a legfelső tükörrétegbe az apertúra sarkai felett. Továbbá megvizsgáltam egy elliptikus felületi mintázattal rendelkező, de ettől eltekintve hengerszimmetrikus VCSEL fényteljesítmény-áram görbéjét, amin a marással jelentősen átfedő módusok intenzitásának nagymértékű csökkenését figyeltem meg [7-9].

6. Modellezéssel optimalizáltam protonimplant-apertúrás fotonikus kristály VCSEL-ek rácsállandóját a legnagyobb egymódusú fényteljesítmény elérése céljából. Ismét a csatolt optikai-elektromos-hőtani eljárást alkalmaztam, de a lézermódusokat újraszámítottam minden áramérték esetén. Kisebb rácsállandó esetén a magasabbrendű módusok könnyebben kiszorultak a fotonikus kristályt alkotó lyukak közül, és az alaplómóduséhoz viszonyított relatív optikai veszteségük nőtt. Nagyobb rácsállandó esetén a küszöbáram csökkent, és a maximálisan elérhető fényteljesítmény természetesen skálázódott. Az ellentétes tendenciák magyarázatot adnak egy optimális rácsállandó létezésére, amellyel maximális teljesítmény érhető el egyetlen módusban, és melynek számított és kísérleti értéke megegyezik [10-14].

Az eredmények hasznosítása

Új módszereim már részét képezik egy, a Furukawa Electric Technológiai Intézetben folyamatos fejlesztés alatt álló programcsomagnak, amelyet Magyarországon és Japánban egyaránt használnak felületsugárzó lézerdiodák tervezésére. Eredményeim közül a hatodik tézispontban részletezett numerikus optimalizálás áll legközelebb az iparban jelentkező praktikus célokhoz. Itt ismertetett vagy egyéb számításaimmal jelentős mértékben hozzájárultam három szabadalom benyújtásához.

A tézispontokhoz kapcsolódó közlemények

- [1] P. Nyakas, Zs. Puskás, T. Kárpáti, T. Veszprémi, Gy. Zsombok, G. Varga, and N. Hashizume, "Optical simulation of vertical-cavity surface-emitting lasers with non-cylindrical oxide confinement," *Opt. Commun.*, vol. 250, pp. 389–397, 2005.
- [2] P. Nyakas, G. Varga, T. Kárpáti, T. Veszprémi, Gy. Zsombok, Zs. Puskás, and N. Hashizume, "Optical simulation of vertical-cavity surface-emitting lasers with non-cylindrical oxide confinement," Conference on Lasers and Electro-Optics Europe, CLEO/Europe 2003, 2003, CC6W.
- [3] P. Nyakas, "Full-vectorial three-dimensional finite element optical simulation of vertical-cavity surface-emitting lasers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 25, pp. 2427-2434, 2007.
- [4] P. Nyakas, G. Varga, T. Kárpáti, T. Veszprémi, Gy. Zsombok, Zs. Puskás, and N. Hashizume, "Real three-dimensional optical simulation of non-nircular VCSEL structures with finite volume method," Proceedings of the 4th International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices, NUSOD '04, 2004, WP2.

- [5] P. Nyakas, "Three-dimensional VCSEL simulation using vector finite elements", Proceedings of the 5th International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices, NUSOD '07, 2007, TuP11.
- [6] P. Nyakas, Zs. Puskás, N. Hashizume, T. Kárpáti, T. Veszprémi, Gy. Zsombok, and G. Varga, "Numerical simulation of single-mode condition in photonic crystal confined vertical-cavity surface-emitting lasers with oxide apertures," Third Conference on Laser Optics for Young Scientists, 2006, WeS6–P05.
- [7] P. Nyakas, G. Varga, Zs. Puskás, N. Hashizume, T. Kárpáti, T. Veszprémi, and Gy. Zsombok, "Self-consistent real three-dimensional simulation of vertical-cavity surface-emitting lasers," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 23, pp. 1761–1769, 2006.
- [8] P. Nyakas, G. Varga, T. Kárpáti, T. Veszprémi, Gy. Zsombok, Zs. Puskás, and N. Hashizume, "Real three-dimensional spatio-temporal VCSEL simulation," Conference on Lasers and Electro-Optics Europe, CLEO/Europe 2005, 2005, CC6W.
- [9] P. Nyakas, Zs. Puskás, T. Kárpáti, T. Veszprémi, Gy. Zsombok, G. Varga, and N. Hashizume, "Real three-dimensional dynamical VCSEL simulation with spatially distributed noise sources," Proceedings of the 5th International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices, NUSOD '05, 2005, TuC3.
- [10] T. Kise, N. Yokouchi, and P. Nyakas, "Surface Emitting Lasers" (fordítás), japán szabadalom, benyújtási száma: JPA2007-046823, benyújtva 2007. 02. 27-én.
- [11] T. Kise, P. Nyakas, K. Maruyama, K. Kiyota, and N. Yokouchi, "Thermal lens effect on single-transverse-mode stability of proton-implanted photonic-crystal vertical-cavity surface-emitting lasers", The 20th annual meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, LEOS 2007, 2007, WZ5.

- [12] P. Nyakas, T. Kise, T. Kárpáti, and N. Yokouchi, "Numerical optimization of single-mode photonic crystal VCSELs", NUSOD '08, elfogadva, 2008.
- [13] T. Kise, K. Kiyota, K. Maruyama, N. Yokouchi, P. Nyakas, and N. Hashizume, "Transverse mode stability of proton-implanted photonic-crystal vertical cavity surface emitting lasers", The 54th Spring Meeting, the Japan Society of Applied Physics, 2007, 29a-SG-6.
- [14] T. Kise, P. Nyakas, K. Maruyama, K. Kiyota, and N. Yokouchi, "Single transverse mode analysis of proton-implanted photonic-crystal vertical-cavity surface-emitting lasers", The 68th Autumn Meeting, the Japan Society of Applied Physics, 2007, 8a-C-4.

További tudományos közlemények

- [15] T. Kise, N. Yokouchi, P. Nyakas, and Gy. Zsombok, "Surface Emitting Lasers" (fordítás), japán szabadalom, benyújtási száma: JPA2007-025240, benyújtva 2007. 02. 05-én.
- [16] T. Kageyama, N. Iwai, Y. Kawakita, K. Takaki, and P. Nyakas, "Surface Emitting Laser Element and Method of Fabricating the Same," USA-szabadalom, benyújtási száma: US 12/057538, benyújtva 2008. 03. 28-án.