

# GalnAsP/InP infravörös diódák és lézerek

RAKOVICS VILMOS, PÜSPÖKI SÁNDOR, SERÉNYI MIKLÓS, RÉTI ISTVÁN,  
BALÁZS JÁNOS, BÁRSONY ISTVÁN

MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet  
rakovics@mfa.kfki.hu

Lektorált

**Kulcsszavak:** félvezető lézer, infravörös diódák, GalnAsP, InP, epitaxiás növesztés folyadékfázisból

Az infravörös tartományban sugárzó GalnAsP/InP félvezető lézereket és infravörös diódákat előállítottunk elő. A GalnAsP és InP rétegek növesztésére folyadékfázisú növesztési technológiát dolgoztunk ki, amelyet sikeresen alkalmaztunk különböző hullámhosszú új félvezető eszközök kifejlesztésére. Ebben a cikkben röviden összefoglaljuk az általunk kifejlesztett lézerek és infravörös diódák legfontosabb paramétereit és felhasználási területüket.

## 1. Bevezetés

A III-V kétkomponensű félvezetők felfedezésével szinte egy időben megszületett az a felismerés, hogy ezen anyagok szilárdfázisú elegyei alapját képezhetik különleges tulajdonságú félvezető eszközök tervezésének. A háromkomponensű anyagok tiltott sávja és rácsállandója közötti egyértelmű összefüggéssel ellentétben a négykomponensű anyagokkal a rácsállandó és a tiltott sáv szélessége egymástól függetlenül változtatható az összetevők arányának megváltoztatásával.

A GalnAsP kvaterner GaAs és InP hordozóhoz egyaránt rácsilleszhető. A GaAs-hez rácsillesztett anyag tiltott sáv szélessége 1,42-1,91 eV, az InP-hoz illeszkedő kvaterneré pedig 0,75-1,35 eV tartományban változtatható. GalnAsP félvezetőben a gerjesztett töltéshordozók rekombinációjával keletkező elektromágneses sugárzás hullámhossza a fordítottan arányos az anyag tiltott sáv energiájával. Az aktív réteg összetételének változtatásával változik a diódából kilépő sugárzás hullámhossza.

A III-V félvezetőkön végzett kutatásokat főleg a gyorsan fejlődő fénytávoközlésben és a szelektív spektroszkópiában alkalmazott félvezető fényforrások iránt jelentkező igény motiválta [1]. A témában folyó korai nemzetközi és hazai kutatásokról Lendvai Ödön [2], valamint Lajtha György és Szép Iván [3] könyveiből olvashatunk magyarul. Különösen a kis küszöbáramú és a kívánt hullámhosszon működő nagy hatásfokú, folytonos üzemben működő lézervediódák létrehozása volt nagy kihívás az anyagtechnológiai kutatással foglalkozó szakemberek számára. A feladat nehézségét az okozza, hogy a lézerhatás létrejöttéhez négy alapfeltételt kell együttesen biztosítani:

- sugárzásos átmenet a megfelelő energiájú szintek között;
- fordított betöltöttség létrejötte;
- stimulált emisszió;
- az optikai küszöb átlépése.

Hogy ezek a feltételek már kis meghajtó áramoknál létrejajjenek, mind az injektált töltéseket, mind a keletke-

ző fotonokat kis térrészre kell koncentrálni. Az aktív réteget minden oldalról nagyobb tiltott sávú és kisebb törésmutatójú anyagoknak kell határolni, valamint az eszközön átfolyó áramot az aktív tartományra kell korlátozni.

A félvezető heteroszerkezetek létrehozására alkalmas epitaxiás módszerek közül gyorsaságával és olcsóságával a folyadékfázisú epitaxiás (LPE, Liquid Phase Epitaxy) módszer tűnik ki, ezért a legtöbb lézerszerkezet kifejlesztésére ezt használták. A fénytávoközlési célra kifejlesztett kis küszöbáramú lézerek megbízhatóságát rontotta, hogy a p-n átmenetek és az aktív rétegük határán számos kristályhibát tartalmaztak. Az MFKI-ban és MFA-ban folyó kutatások olyan heteroszerkezetek létrehozására irányultak, amelyek nem tartalmaznak maradt felületeken kialakított átmeneteket, egylépcsős LPE technológiával előállíthatók, de a belőlük készült infravörös diódák és lézerek legfontosabb paramétereit hasonlóak vagy jobbák, mint a bonyolultabb technológiával készülő korábbi eszközöké.

## 2. GalnAsP/InP kettős heteroszerkezetű infravörös diódák és lézerek felépítése és működése

Az InP hordozóhoz rácsillesztett GalnAsP/InP heteroszerkezetek felhasználásával 920-1670 nm-es tartományban sugárzó infravörös diódák és injektációs lézerek készíthetők. A diódák aktív tartományában a p-n átmenetre merőleges rétegszerkezet a következő:

- a hordozóval azonos típusú InP határoló réteg;
- GalnAsP aktív réteg;
- a hordozóval ellentétes típusú InP határoló réteg.

Mivel az aktív réteg kisebb tiltott sávval és nagyobb törésmutatóval rendelkezik mint a határoló rétegek, a kettős heteroszerkezet az átmenetre merőlegesen összetartja az injektált töltéshordozókat és a keletkező fotonokat. A lézersugár széttartása az átmenetre merőlegesen az aktív réteg vastagságának a függvénye. Az GalnAsP/InP lézerek küszöbárama ( $I_{th}$ ) erősen hőmérsékletfüggő[4].

Az 1. ábra egy GaInAsP/InP lézer tipikus teljesítmény-áram karakterisztikáit mutatja több különböző hőmérsékleten 20 és 80°C között. A küszöbáram nő, a határfok pedig csökken a hőmérséklet növekedésekor. Az InP/InGaAsP lézerek küszöbáramának erős hőfokfüggése miatt a küszöbáramot a lehető legkisebbre kell leszorítani. A küszöbáram erősen függ a lézer geometriai paramétereitől [5] a következők szerint:

$$I_{th} = LWd(\alpha/\beta\Gamma_v + I_0), \quad (1)$$

ahol  $\alpha = \alpha_i + [\ln(1/R)]/L$ .

$L$ ,  $W$  és  $d$  a az aktív réteg hossza, szélessége és vastagsága,  $\alpha$  és  $\beta$  a lézer veszteségi és erősítési tényezője,  $\Gamma_v$  az úgynevezett fényösszetartási faktor,  $I_0$  pedig az erősítés eléréséhez szükséges küszöbáramsűrűség egységnyi vastagságú réteg esetén.  $\beta$  és  $I_0$  a geometriai paramétereiktől független, de  $\Gamma_v$  kis keresztmetszetű aktív réteg esetén erősen függ az aktív réteg szélességétől és vastagságától,  $\alpha_i$  a belső,  $[\ln(1/R)]/L$  pedig a rezonátortükrökhöz kapcsolódó veszteségi tényező,  $R$  a tükröreflexió.

A lézerek hossza a differenciális kvantumhatásfokra ( $\eta_d$ ) is hatással van [6-8].

$$1/\eta_d = 1/\eta_i [1 + \alpha_i L / \ln(1/R)], \quad (2)$$

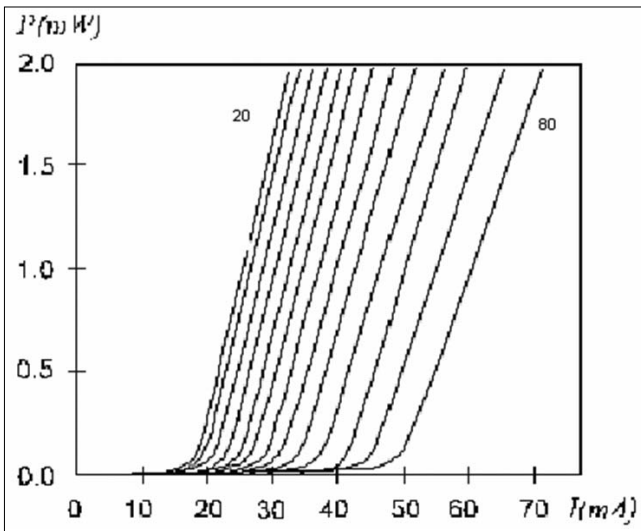
ahol  $\eta_i$  a belső kvantumhatásfok.

A legtöbb gyakorlati alkalmazás esetén a működési tartományban a lézertől kilépő sugárzásnak stabil téreloszlással kell rendelkeznie. A kilépés szögét a hullámvezetőben kialakuló transzverzális módusok szabják meg. Kellően vékony hullámvezetőben csak egyetlen módus terjedhet, ezért a kis keresztmetszetű hullámvezető kialakításával biztosítható a lézersugár stabil téreloszlása. A fénytávközlési célra korábban kifejlesztett 1300 és 1550 nm-en sugárzó kis küszöbáramú lézerek többnyire két epitaxiás lépést tartalmazó technológiával készültek és az aktív réteg elhelyezkedése szerint két típusba sorolhatók [9-12].

#### 1. ábra

A GaInAsP/InP lézerek

teljesítmény-áram karakterisztikájának hőfokfüggése (1550 nm-en sugárzó GaInAsP/InP BH-lézer 20-80°C-on) [4]



Az aktív réteg elhelyezkedése szerint meza és csatorna típusú lézerekről beszélhetünk. A meza típusú lézerek előállításánál először a kettős heterostruktur növesztik sík hordozón, majd ezt követően meza-marással és ránövesztéssel alakítják ki az eltemetett aktív réteget és a zárórteget egyaránt tartalmazó lézerszerkezetet [9,12-14].

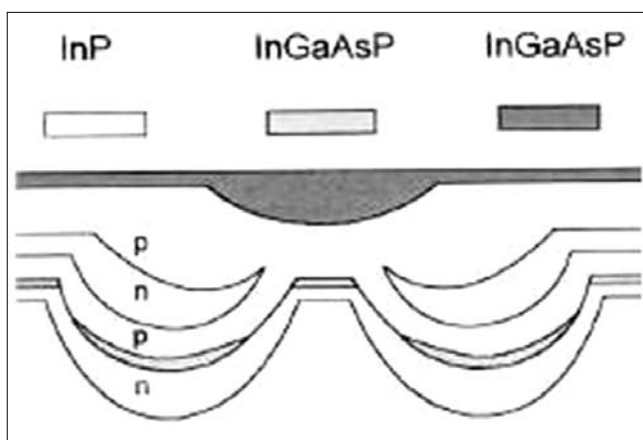
A lézerek másik csoportjánál először készítik el az áramkorlátozó zárószerkezetet, majd abban keskeny csatornát nyitnak és a második növesztési lépésben a csatorna alján alakul ki az eltemetett aktív réteg [10-11]. N-típusú hordozón a meza típusú, p-típusú hordozón pedig a csatorna típusú lézerek előnyösebbek, mert ezekenél esik egybe a legkisebb ellenállású áramút az aktív réteg közepével. Azt tapasztalták, hogy a kétlépcsős technológia kihozatala jelentősen kisebb, mint az egylépcsős növesztéssel készülő lézereké. A hagyományos eltemetett aktív rétegű lézerek megbízhatóságát rontotta, hogy a p-n átmenetek és az aktív rétegük határán számos kristályhibát tartalmaztak. A hibák összefüggnek a gyártási technológia lépéseivel. A maratás során keletkező felületek hibái növelik a nemsugárzós átmenetek valószínűségét. A adalékok nemkívánatos diffúzióját okozhatja a második epitaxiás növesztés okozta hőkezelés. A maratott nem sík kristályfelületen magas hőmérsékleten lejátszódó anyagtranszport és hőbomlás szintén számos hibahely forrása lehet.

A nyolcvanas évek elejétől megfigyelhető az a törekvés, hogy a keskeny szalaglézereket egyetlen epitaxiás növesztéssel hozzák létre [12,15-17], ugyanis azt tapasztalták, hogy a kétlépcsős epitaxiás növesztéssel készülő lézerek megbízhatósága kisebb, és a megfelelő paraméterű lézerek kihozatala rosszabb a bonyolultabb technológia következtében. Olyan módszert fejlesztettünk ki, amely csak egy epitaxiás lépést tartalmaz, amelynek során egyidejűleg létrejön a keskeny eltemetett aktív réteg és a laterális áramszétfolyást hatékonyan akadályozó zárószerkezet is.

### 3. Új lézerszerkezetek és előállításuk egylépcsős folyadékepitaxiás módszerrel

A modern félvezető lézerek szerkezeti felépítésének közös jellemzője, hogy kis keresztmetszetű InGaAsP eltemetett aktív réteget és a szerkezetbe épített áramkorlátozó rétegeket tartalmaznak. Az aktív tartományban a rétegek sorrendje megegyezik a hagyományos szalaglézerekével. Az első réteg a hordozóval azonos típusú, nagy tiltott sávú és kis törésmutatójú InP, ezt a kívánt hullámhossznak megfelelő összetételű, kisebb tiltott sávval és nagyobb törésmutatóval rendelkező InGaAsP aktív réteg, majd a hordozóval ellentétes típusú InP réteg követi. Az aktív tartományon kívül elhelyezkedő rétegek pedig megakadályozzák az áram átfolyását, azáltal, hogy záró p-n átmenetet, vagy félszigetelő réteget tartalmaznak. Az irodalomban korábban ismertett lézerszerkezetek többségét csak két vagy több

epitaxiás lépést és az előző lépésben növesztett szerkezet kémiai marását tartalmazó technológiával lehet előállítani. A marási művelet és az ismételt növesztés okozta hibahelyek miatt ezen lézerek megbízhatósága kisebb, mint az egylépcsős növesztéssel készített lézereké. Az előző szakaszokban megmutattuk, hogy a növesztési paraméterek megfelelő megválasztásával nagyon változatos laterális tagoltsággal rendelkező InP és InGaAsP rétegek növeszthetők strukturált InP hordozón, ezáltal lehetséges a fenti funkciókat ellátó rétegek egyidejű létrehozása egyetlen folyadéképítési növesztéssel. Az elvégzett kísérletek alapján lehetővé vált kiváló működési paraméterekkel rendelkező új lézerszerkezetek megalkotása, a rétegszerkezet és összetétel, valamint a rétegek töltéshordozó-koncentrációjának pontos beállítása.



2. ábra  
A duplacsatornás hordozójú, eltemetett aktív réteget és beépített záró réteget tartalmazó kettős heteroszerkezetű InP/InGaAsP lézerdióda felépítése

A duplacsatornás InP hordozón végzett növesztési kísérleteink megmutatták, hogy a legkedvezőbb eszközparamétereket biztosító félvezető heteroszerkezet valamennyi rétegét a kívánt formában elő lehet állítani a hordozón fellépő rendkívül nagy nukleációs és rétegnövekedési különbségek kihasználásával. Az <110> kristálytani iránnyal párhuzamos csatornapár között kialakuló mezacsíkon a mezhordozójú lézerhez hasonlóan megnöveszthető a keskeny eltemetett aktív réteget tartalmazó kettős heteroszerkezet, és ugyanakkor könnyen kialakul a meza felett nyitott zárószerkezet is (2. ábra). A duplacsatornás InP hordozó biztosítja a megfelelő rétegszerkeztúra kialakulását. A szerkezet 8-10 µm széles és 4-5 µm mély csatornákat tartalmazó n-InP hordozón épül fel. A csatornák páronként helyezkednek el, úgy hogy a csatornák közötti mezacsík szélessége 2 µm.

A szerkezet félvezető rétegei a következő sorrendben követik egymást:

- n-InP puffer réteg  
(Sn:  $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ , 0,5-1 µm vastag)
- InGaAsP aktív réteg  
(adalékolatlan,  $\lambda_g = 1,3 \mu\text{m}$ , 0,1-0,2 mm vastag)
- p-InP határolóréteg  
(Zn:  $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ , 0,5-1 µm vastag)

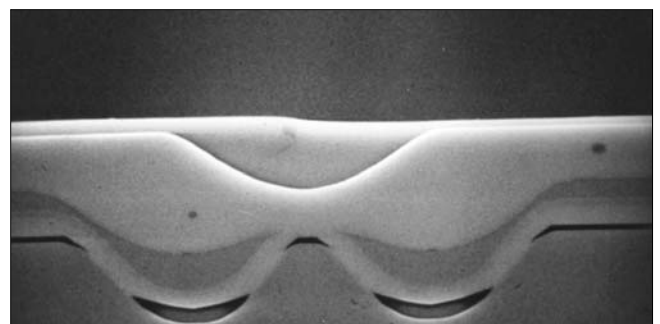
- n-InP záró réteg  
(Sn:  $3 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ , 0,5-1 µm vastag)
- p-InP betöltő réteg  
(Zn:  $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ , 2-4 µm vastag)
- p<sup>+</sup> InGaAsP kontaktus réteg  
(Zn: 3-5  $\times 10^{18}/\text{cm}^3$ , 0,5-1,5 µm vastagságú)

A hordozó felületét befedő n-InP puffer réteg közel egyenletes vastagságú, ugyanakkor a legnagyobb görbületű felületeket kissé vastagabban fedi. A puffer réteget követő aktív réteg 5 szeparált részből áll, amelyekből 2 rész a csatornapár jobb és bal oldalán, kettő a csatornák aljában, egy pedig a keskeny mezacsíkon helyezkedik el. Az InGaAsP aktív réteg a meza felett a legvékonyabb, a csatorna aljában pedig a legvastagabb. Az aktív réteget p-InP határoló réteg fedi be, mely a puffer réteghez hasonló szerkezetű folytonos réteg. A következő n-típusú InP réteget ismét p-InP réteg követi. Az n-InP záró réteg a meza felett megszakad, a p-InP réteg pedig betölti a két csatornát, és a meza felett kissé vékonyabb, mint a sík felületen.

A szerkezet p<sup>+</sup>-InGaAsP kontaktus réteget tartalmaz, amely általában a mezacsík feletti mélyedésben a legvastagabb. A nagy vezetőképességű mezán elhelyezkedő keskeny aktív réteg a legkisebb ellenállású áramútbán helyezkedik el, az aktív tartományon kívül pedig az áram átfolyását megakadályozza a p-rétegek közé ágyazott n-típusú záró réteg, ezért a lézerszerkezetből kis küszöbáramú és nagy teljesítményű eszközök egyaránt készíthetők. A kis tiltott sávú InGaAsP réteg a tirisztor jellegű p-n-p-q-n zárószerkezetet annyira hatékonyá teszi, hogy az átfolyó szivárgóáram elhanyagolható mértékűvé válik. A lézereküszöb eléréséig a meza oldalfalai mentén, a csatorna alján elhelyezkedő átmenet felé is folyhat áram a keskeny p-InP határoló rétegen keresztül. Ennek a szivárgó áramnak a nagysága a két kvaterner réteg közötti szeparációs távolság növelésével csökken, ezért a legkisebb küszöbáramú lézereket a legnagyobb növekedési szelektivitást mutató 1,3 µm-es InGaAsP aktív réteget tartalmazó lézerszerkezetből sikerült előállítani.

A zárószerkezetet alkotó rétegek töltéshordozó koncentrációja  $1-3 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ , ezért a zárószerkezet nagy parazita kapacitású, amely rontja a lézerek nagyfrekvenciás tulajdonságait. A lézerszerkezet keresztmetszetének elektromikroszkópos (SEM) felvételét a 3. ábra mutatja.

3. ábra  
SEM kép az 1,3 µm-es duplacsatornás lézerszerkezet hasított és mart felületéről. A marker 10 µm-nek felel meg.



### 3.1. Kis parazita kapacitású lézerszerkezetek

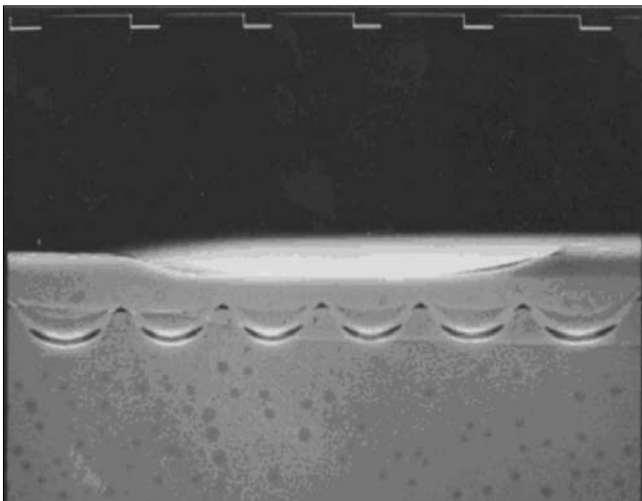
A záró rétegek adalékoltságának csökkentésével ugyan csökken a parazita kapacitás, de az áram-teljesítmény karakterisztika – különösen magas hőmérsékleten – görbülté válik a szivárgó áramok megnövekedése miatt. A záró szerkezet kapacitását döntően a legkisebb kapacitású átmenet kapacitása szabja meg, ezért a működés közben záró irányban előfeszített átmenet rétegeinek töltéshordozó koncentrációját kell elsősorban csökkenteni.

Megállapítottuk, hogy ha az n-InP záró réteg és a p-InP határoló réteg közé egy adalékolatlan réteget építünk, akkor a lézerszerkezet kapacitása alig növekszik a többi záró réteg adalékoltságának növelésével. Ezzel a kettős záróréteget tartalmazó szerkezettel kevesebb mint felére csökkent a lézerek kapacitása a csak  $3 \times 10^{18}/\text{cm}^3$  töltéshordozó koncentrációjú záróréteget tartalmazó lézerekhez képest.

### 3.2. Lézersorok sokcsatornás InP hordozón

A sokcsatornás hordozón felépített lézerszerkezetek egyedülálló lehetőséget adnak olyan nagyteljesítményű lézerek készítésére, amelyek egyetlen transzverzális módusban sugároznak, ezért stabil távolférf sugárzás-eloszlással rendelkeznek. 3- és 5-elemű lézersort készítettünk multimódusú optikai szálakat tartalmazó távközlési rendszerek számára. A 4 illetve 6 csatornát tartalmazó hordozó 3 és 5, egymástól  $8 \mu\text{m}$  távolságban levő keskeny mezacsíkot tartalmazott, amelyen a duplacsatornás lézerszerkezettel azonos rétegsorrendet alakítottunk ki (4. ábra).

4. ábra  
SEM felvétel az 5-elemű lézersor hasított és szelektív maróval előhívott felületéről. Az elemek távolsága  $8 \mu\text{m}$ .



A mezák feletti eltemetett kis keresztmetszetű eltemetett aktív réteg csíkok biztosítják az egymódusú működést, a csatornában és a planár részeken elhelyezkedő záró rétegek pedig az áramátfolyást az aktív csíkokra korlátozzák. A tirisztor jellegű záró szerkezet még a mezák közötti csatornában sem nyithat ki, mert kis tiltott sávú InGaAsP rétegeket tartalmaz, amely csökkenti az áramerősítést. A lézersorok egy aktív elemre

számolt küszöbárama a fenti okok miatt megegyezik a legjobb egyelemű szerkezetek küszöbáramával ( $12 \text{ mA}$ ). A lézersorokból kivehető maximális teljesítmény nem éri el az egyedi duplacsatornás lézerek teljesítményének 3-, illetve 5-szörösét, de sokkal nagyobb, mint a hasonló szélességű szalaglézereké. A lézersor távolférf közel szimmetrikus, és a sugárzás kúpszöge független a teljesítménytől.

### 3.3. Alacsony hőmérsékleten növesztett kettős heteroszerkezetű lézerek felépítése

$590^\circ\text{C}$ -on mind a rövid hullámhosszú, mind pedig a hosszú hullámhosszú InGaAsP rétegek szelektívebben növekednek mint  $630^\circ\text{C}$ -on, ezért az alacsony hőmérsékleten növesztett lézerszerkezetekben a szeparációs távolságok egyértelműen nagyobbak, mint a  $630^\circ\text{C}$ -on növesztettekben. Az alacsony hőmérsékletű növesztés másik előnye, hogy a kvaternerek visszaoldódási hajlama csökken, ezért a rétegszerkezet megválasztása szabadabbá válik. Elméletileg korlátozó tényező, hogy a hőmérséklet csökkenésével a szilárdfázisú elegyedési korlát kiszélesedik, de a lézerépítésnél a gyakorlatban nem tapasztaltam konkrét hatását.

Az  $1,3 \mu\text{m}$ -es duplacsatornás lézeréhez hasonló rétegszerkezetű  $1,12\text{-}1,22 \mu\text{m}$ -es és  $1,45\text{-}1,60 \mu\text{m}$ -es aktív réteget tartalmazó eltemetett aktív réteget és beépített záró szerkezetet egyaránt tartalmazó félvezető lézerszerkezeteket készítettem. Az alacsony hőmérsékleten növesztett  $1,55 \mu\text{m}$ -es lézerszerkezet szembevetésű előnyökkel rendelkezett a hagyományos visszaoldásgátló réteggel rendelkező  $630^\circ\text{C}$ -on növesztett szerkezethez viszonyítva.

A nagyobb szeparációs távolságok miatt a küszöbárama jelentősen kisebb, a szimmetrikus hullámvezetés miatt kedvezőbb a sugárzás téreloszlása, a visszaoldásgátló réteg hiánya miatt kisebb a szerkezet elektromos ellenállása és valamivel jobb a hővezető képessége. A kevesebb számú réteg egyben a rétegnövesztés nagyobb megbízhatóságát is jelenti. A hosszú hullámhosszú ( $1,45\text{-}1,60 \mu\text{m}$ -es) alacsony hőmérsékleten növesztett lézerek közös jellemzője, hogy küszöbáramuk kicsi (kb.  $20 \text{ mA}$ ), hatásfokuk pedig a sugárzási hullámhossz növekedésével kissé csökken. Ez a csökkenés a nagyobb hullámhosszú rétegek erősebb visszaoldódási hajlamával magyarázható. A lézerszerkezetekből készített eszközök paramétereit részletesebben az alkalmazások fejezetben foglaljuk össze.

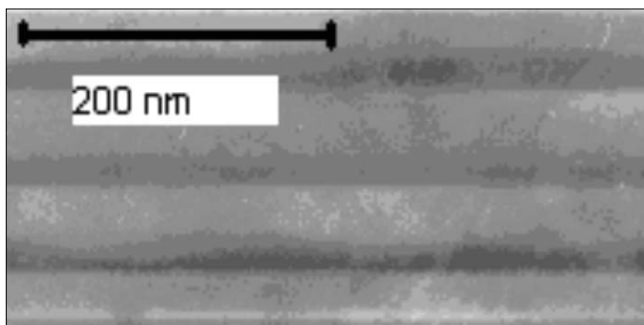
Az  $1,12\text{-}1,22 \mu\text{m}$ -es lézerszerkezetek alacsony hőmérsékleten növesztve az  $1,55 \mu\text{m}$ -es lézerhez hasonló felépítést mutattak. A szeparációs távolságok megnövekedése miatt az alacsony hőmérsékleten növesztett szerkezetekből készített lézerek küszöbárama kisebb, mint a  $630^\circ\text{C}$ -on növesztetteké.

### 3.4. Eltemetett kvantum-heteroszerkezetes lézerek duplacsatornás hordozón

Az LPE berendezés továbbfejlesztésében és az alacsony hőmérsékleten végzett növesztések során elért eredmények alapján lehetővé vált, hogy az egylépcsős

szerkezetépítés előnyeit kvantumvölgyes lézerek esetében is bizonyítsuk. Egyrészt, az automatikus gyors mozgatás és a szűkíthető olvadékres segítségével 10 ms-os növesztési idők pontos beállítása is lehetővé vált, másrészt pedig 590°C-on az 1,5 µm-es kvaternerek viszaoldódási hajlama rendkívüli módon lecsökkent, ezért nagyon vékony, éles heteroátmenetekkel rendelkező rétegeket sikerült előállítani. Az eltemetett kvantum-heteroszerkezeteket szintén duplacsatornás hordozón készítettük.

5. ábra  
A kvantum-heteroszerkezetes lézer aktív tartományának SEM felvétele. A négy barrier és három aktív réteg együttes vastagsága 200 nm.



A lézerszerkezetben az InP rétegek alakja és sorrendje megegyezik az 1,3 mm-es duplacsatornás hor-

dozójú lézer rétegeivel. A három kvantumvölgyes aktív tartományban a 20 nm vastag 1,55 µm-es InGaAsP rétegeket szintén 20-30 nm vastag 1,16 µm-es barrier rétegek határolják. A rétegszerkezetet a 5. ábra szemlélteti.

A mély kvantumvölgyes és viszonylag vastag rétegeket tartalmazó szerkezetben a töltéshordozók összetartása rendkívül jó, a termikus töltéshordozó „túlfolyás” szinte elhanyagolható. A rétegek száma nem túl nagy, ezért a heteroátmenetek hibái okozta problémák is kevésbé jelentkeznek. A szerkezetben az abszorpciós veszteség a nagyobb tiltott sávú barrier rétegek jelenléte miatt kisebb, mint a hagyományos kettős heteroszerkezetű lézerekben, ezért a hatásfok kevésbé függ a rezonátor hosszától.

Az egylépcsős folyadékepitaxiás módszerrel előállított három kvantumvölgyes lézerszerkezet paramétereit összehasonlítottuk a csak egy aktív rétegből álló hasonló felépítésű lézer paramétereivel. A legjobban szembeötlő különbség a sugárzási hullámhossz megváltozása volt.

Ez az eltolódás megfelelt az elmélet alapján várható értéknek (kb. 14 nm). A 250 mm-es hosszúságú kvantumvölgyes lézer küszöbárama 15 mA, hatásfoka pedig 0,15 mW/mA volt. Mindkét paraméter jobb volt (20, illetve 50%-kal), mint a hasonló kettős heteroszerkezetű lézereké.

1. táblázat  
Az MFKI-ban és MFA Kutatóintézetben kifejlesztett GaInAsP/InP fényforrások főbb jellemzőinek összefoglalása [4, 13, 18-22]

Felhasználási terület	Eszköztípus és hullámhossz [µm]	Főbb paraméterek		
		I <sub>th.min</sub> [mA]	η <sub>d.max</sub> [mW/mA]	P <sub>max</sub> [mW]
Optikai távközlés	DCS-BH 1,30-LD	8	0,21	35
	*LC-DCS-BH 1,30-LD	10	0,22	22
	DCS-SC-BH 1,55-LD	24	0,13	17
	*LTC-DCS-BH 1,55-LD	17	0,12	15
Szállézeres pumpálása	HP-DCS-BH 1,12-LD	52	0,34	85
	*HP-DCS-BH 1,15-LD	44	0,37	121
	*HP-DCS-BH 1,22-LD	40	0,40	140
	DCS-3QW-BH 1,5-LD	14	0,17	17
Szelektív spektroszkópia				
vízgőz	LC-DCS-BH 1,37-LD	10	0,21	18
CO, CO <sub>2</sub>	LTC-DCS-BH 1,57-LD	18	0,11	16
Gabona vizsgálat	*LA-1,015-INFRALED	–	0,012	10
	*LA-1,06-INFRALED	–	0,025	15
Orvosi diagnosztika	*LA-1,02-INFRALED	–	0,015	12
	*LA-1,04-INFRALED	–	0,022	15
Vércukor mérés, élelmiszer spektroszkópia	*MFA-INFRALED sor 1000-1700 nm		0,02-0,04	20-100

#### 4. Az eredmények alkalmazása

Az 1. táblázatban felhasználási területek szerint ismertetjük az MFKI-ban kifejlesztett félvezető fényforrásokat, csillaggal jelölve azokat a típusokat, amelyek esetében értékesítés is történt.

A magyar elnevezések kialakulatlanok, mert a szakirodalom szinte kizárólag angol nyelvű és a megrendelőink többsége is külföldi.

A lézertípusok nevei az angol elnevezések szerinti mozaikszavak:

*DCS-BH-LD* (Double-Channeled Substrate Buried Heterostructure Laser Diode)  
– Duplacsatornás hordozójú, eltemetett heteroszerkezetű lézervedió

*LC* (Low Capacity)

– Kis parazita-kapacitású

*SC* (Separate Confinement)

– Szeparált összetartású

*QW* (Quantum Well)

– Kvantumvölgyes

*LTC* (Low Temperature, Capacity)

– Alacsony hőmérsékleten növesztett kis parazita-kapacitású

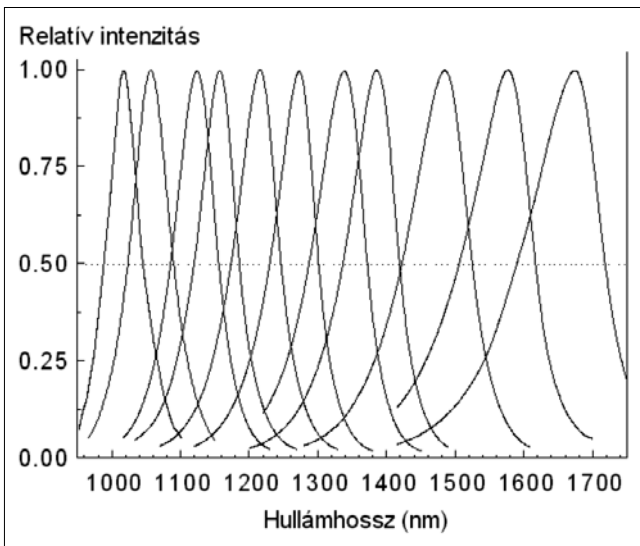
*LA* (Low Angle)

– Kis kúpszögben sugárzó

*HP* (High Power)

– Nagy teljesítményű

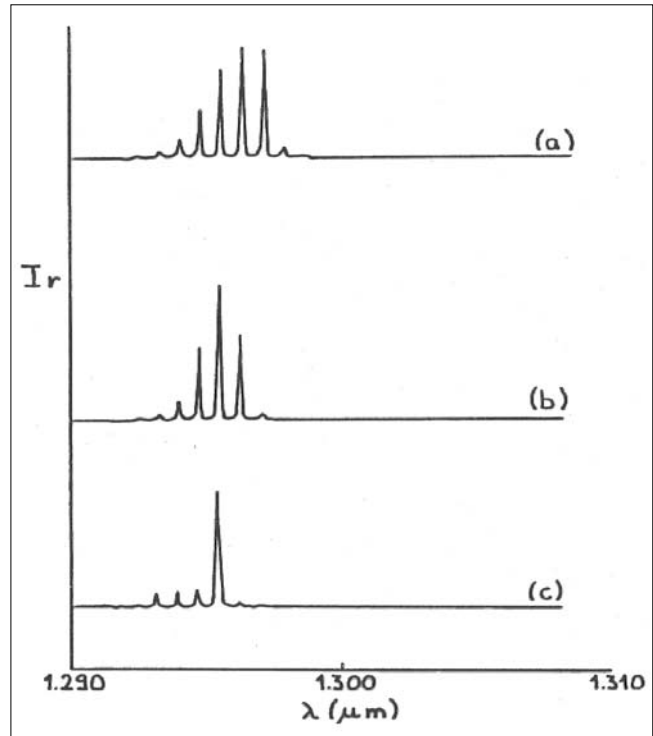
A lézerek esetén feltüntetett paraméterek folyamatos üzemre, a világító diódáké pedig impulzus üzemű működtetésre vonatkoznak.



6. ábra  
11 LED spektruma lefedi a 900-tól 1700 nm-ig terjedő hullámhossztartományt

A továbbiakban a különböző hullámhosszúságú LED-ek (6. ábra), és néhány tipikus lézer karakterisztika bemutatásával szemléltetjük az elért eredményeket.

A 7. ábra az 1,3  $\mu\text{m}$ -es hullámhosszon sugárzó duplacsatornás hordozójú eltemetett heteroszerkezetű lézerek spektrumát mutatja.

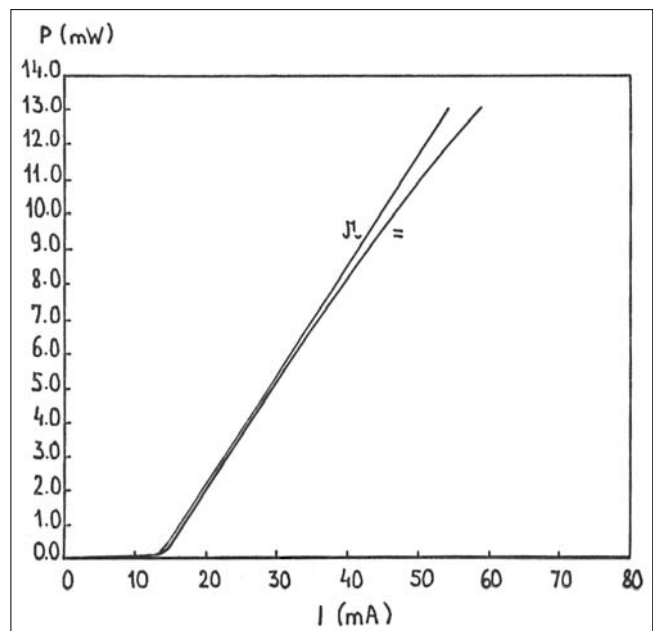


7. ábra  
Az 1,3  $\mu\text{m}$ -es hullámhosszon sugárzó InP/InGaAsP duplacsatornás hordozójú eltemetett heteroszerkezetű lézervedióa spektruma (a= 60 mA, b= 40 mA, c= 20 mA)

A lézerek áram-teljesítmény karakterisztikái széles működési tartományban lineárisak (8. ábra), és magas hőmérsékleten is képesek folyamatos üzemben működni.

Az általunk kifejlesztett lézereknek mind a közeltéri, mind pedig a távolféri sugárzáseloszlása közel szimmetrikus, ezért könnyen csatlakoztathatók optikai szálakhoz.

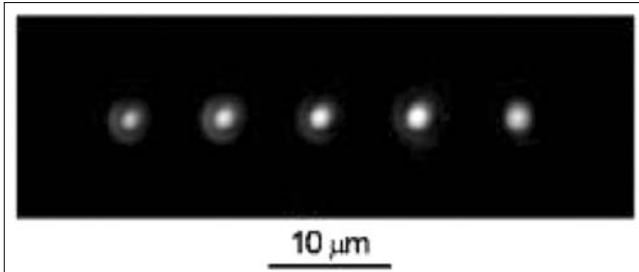
8. ábra  
A kommunikációs lézerek jellemző áram-teljesítmény karakterisztikái folytonos és impulzus üzemmódban



A 9. ábra egy ötelemű lézerson köztéri sugárzás-eloszlását mutatja éppen a küszöbáram elérésekor. A szélső elemek távolsága  $40\ \mu\text{m}$ , ezért az ilyen lézerson sugárzása hatékonyan csatlakoztatható az  $50\ \mu\text{m}$  magátmérőjű multimódusú szálakba.

9. ábra

Az ötelemű lézerson köztéri sugárzáseloszlása



### Irodalom

- [1] M. Hirao, S. Tsui, K. Mizuishi, A. Doi, M. Nakamura: Journal Opt. Commun. 1, 10. (1981)
- [2] Lendvay Ödön: Félvezető lézerek. Az elektronika újabb eredményei, 2. kötet, szerk.: Pap László, Akadémiai Kiadó, Budapest (1985)
- [3] Lajtha György, Szép Iván: Fénytávközlő rendszerek és elemeik. Budapest (1987)
- [4] L. Bartha, F. Koltai, S. Püspöki, V. Rakovics, M. Serényi: Proc. of 19th Int. Semiconductor Conference, CAS'96, 9-12 October 1996, Sinaia, Romania, Vol.1, p.197.
- [5] H.C. Casey, Jr.: Journal of Applied Physics 49, p.3684. (1978)
- [6] M. Ettemberg, H. Kressel: Journal of Applied Physics 43, p.1204. (1972)
- [7] R.F. Murison, A.J.N. Houghton, A.R. Goodwin, A.J. Collar, I.G.A. Davies: Electron. Letters 23, p.601. (1987)
- [8] H. Horikawa, S. Oshiba, A. Matoba, Y. Kawai: Applied Physics Letters 50, p.374. (1987)
- [9] T. Murotani, E. Oomura, H. Namizaki, W. Susaki: Electron. Letters 16, p.566. (1980)
- [10] H. Ishikawa, H. Imai, I. Umberto, K. Hori, K. Takusagawa: Journal of Applied Physics 53, p.2851. (1982)
- [11] I. Mito, M. Kitamura, K. Kobayashi, S. Murata, M. Seki, Y. Odagiri, H. Nishimoto, M. Yamaguchi, K. Kobayashi: IEEE Journal Lightwave Techn. 1, p.195. (1983)
- [12] V. Rakovics, M. Serényi, F. Koltai, S. Püspöki, Z. Lábadi: Material Science & Engineering, B28, p.296. (1994)
- [13] R.J. Nelson, P.D. Wright, P.A. Barnes, R.L. Brown, T. Cella, R.G. Sobers, Applied Physics Letters 46, p.358. (1980)
- [14] K. Kishino, Y. Suematsu, Y. Itaya: Electron. Letters 15, p.134. (1979)
- [15] K. Moriki, K. Wakao, M. Kitamura, K. Iga, Y. Suematsu: Jpn. Journal Applied Physics 19, p.2191. (1981)
- [16] M. Sugimoto, A. Suzuki, H. Nomura, R. Lang: Journal Lightwave Technology 2, p.496. (1984)
- [17] S. Püspöki, V. Rakovics, F. Koltai, M. Serényi: Semicond. Science and Techn. 11, p.1468. (1996)
- [18] V. Rakovics, G. Nagy, F. Koltai, S. Püspöki, M. Serényi, C. Frigeri, F. Longo: Proc. of 8th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, 21-25 April 1996, Schwabisch Gmünd, Germany, p.459.
- [19] V. Rakovics, M. Serényi, S. Püspöki: Physica E 23, p.334. (2004)
- [20] V. Rakovics, J. Balázs, S. Püspöki, C. Frigeri: Material Science and Engineering B80, p.18. (2001)
- [21] V. Rakovics, S. Püspöki, J. Balázs, I. Réti, C. Frigeri: Mater. Science and Engineering B91-92, p.491. (2002)
- [22] V. Rakovics, J. Balázs, I. Réti, S. Püspöki, Z. Lábadi: Physica Status Solidi (C) 0, No.3, p.956. (2003)