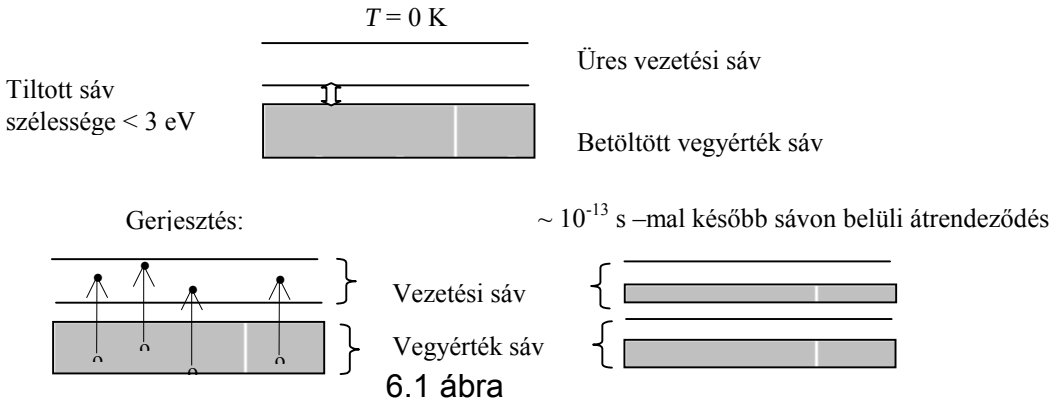
6. Félvezető lézerek

2001-ben 412 millió félvezető lézert adtak el a világban (forrás: Laser Focus World, 2002. február). Összehasonlításképpen az eladott nem félvezető lézerek száma 2001-ben ~116 ezer volt (Laser Focus World, 2002. január). Mindkét szám jelenleg kismértékben csökken évről évre.

6.1 Félvezető lézerek működése

A félvezető lézerek működése eltér az eddig tárgyalt lézerfajtákétól. Nem individuális anyagi részecskék (atomok, ionok, molekulák vagy szilárdtestben lévő adalékrészecskék) energiaállapotai közötti átmeneteken működnek, hanem a félvezető anyag kollektív elektronállapotai (sáv – sáv) között. Az elérhető hatásfok ($\eta \geq 0{,}3$), a kisfeszültségű és alacsony áramú működés, tápegységgel, optikával együtt is kis méret indokolja elterjedésük növekedését.

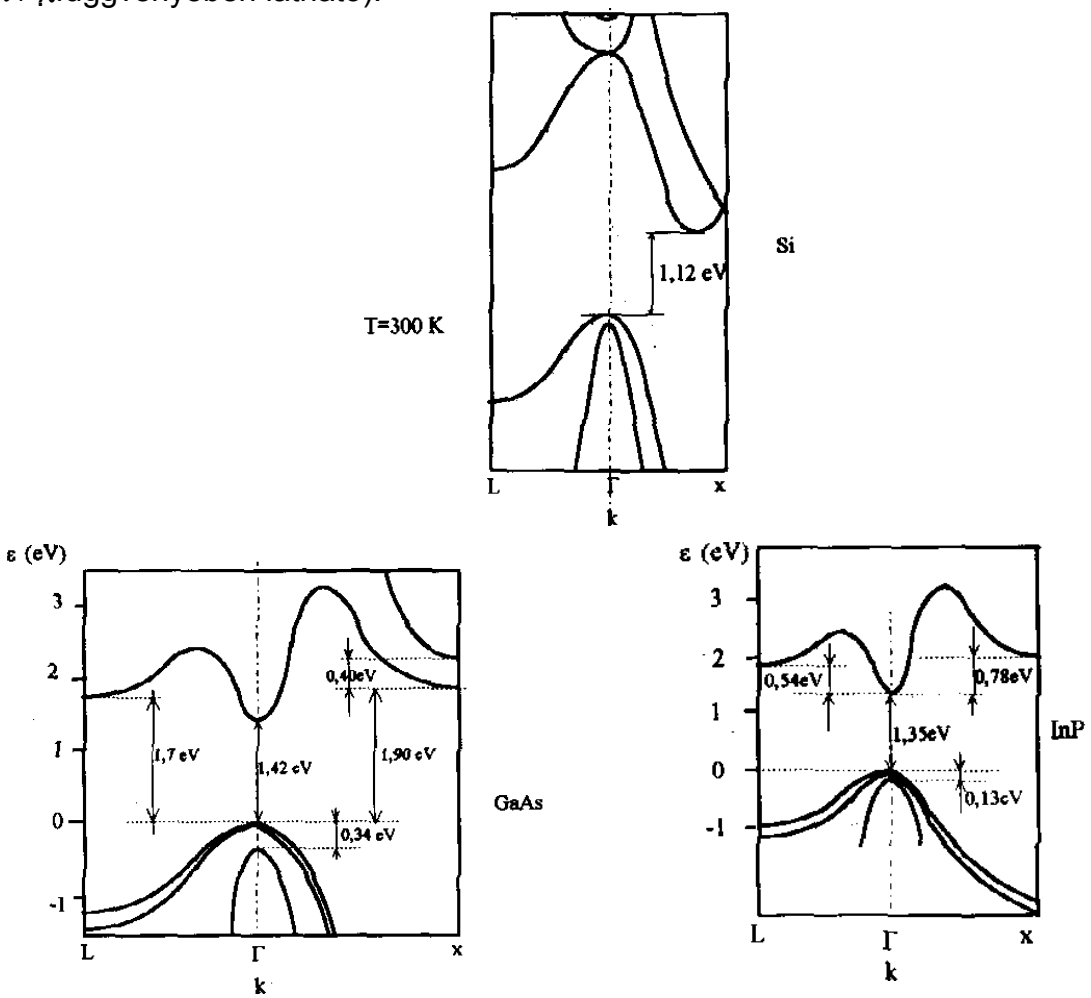
A félvezetők a szilárdtestek azon csoportjába tartoznak, ahol a legfelső betöltött sáv (a vegyérték sáv) és a következő lehetséges energiasáv (a vezetési sáv) közötti energiatartomány (a tiltott sáv) szélessége kisebb 3 eV-nál. Gerjesztetlen félvezetőben $T = 0$ K-en a vezetési sáv üres. Gerjesztés hatására a vezetési sávba elektronok kerülnek, melyek a gerjesztést követően a sávon belül gyorsan elfoglalják (10^{-13} s alatt) a legalacsonyabb lehetséges energiaszinteket. Hasonló átrendeződés zajlik a vegyértéksávban is. A tiltott sáv közelében kialakuló inverz betöltöttség és a fénykibocsátásos rekombináció biztosítja a félvezető lézer működését (6.1 ábra).



6.1 ábra

A valóságban a félvezetők sávszerkezete sokkal összetettebb. Az elektronenergiák megengedett értéke függ az elektronok momentumától. A vezetési sávból a vegyértéksávba fénykibocsátással csak olyan elektronátmenet lehetséges, amikor az elektron impulzusa gyakorlatilag változatlan marad, mivel a foton impulzusa ($|p_{foton}| = h\nu / c = h / \lambda$) nagyságrendekkel kisebb az elektron impulzusánál. Emiatt csak olyan félvezetők alkalmasak lézerműködés megvalósítására, ahol a vezetési sáv alja és a vegyérték sáv teteje azonos elektronimpulzusnál van, ezek a direkt sávú félvezetők. A 6.2 ábrán három különböző félvezető anyag (Si – indirekt sávú, GaAs és InP) valódi sávszerkezetét

láthatjuk (az energia az elektron <u>x</u> irányú impulzusa helyett az <u>x</u> irányú hullámszám, 2π / λfüggvényében látható).



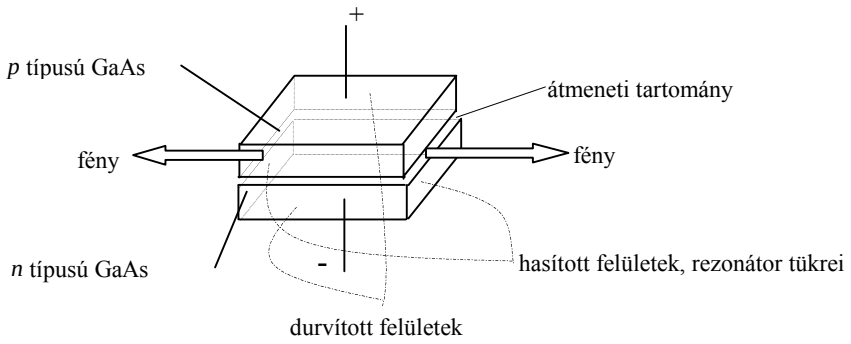
6.2 ábra Si (indirekt), GaAs (direkt) és InP (direkt) sávszerkezete.

A Si tiltott sáv szélessége kisebb, mint a másik két félvezető anyagé, mégsem lehetséges Si alapú félvezető lézert előállítani az indirekt sávszerkezet miatt. Az 6.1 táblázatban néhány lézerműködésre alkalmas direkt sávú félvezető anyag sávszélességét, illetve a sáv-sáv átmenet hullámhosszát adjuk meg.

Félvezető anyag	Sávszélesség [eV]	□ [μm]
GaAs	1,428	0,868
InP	1,351	0,918
$Ga_{0,7}Al_{0,3}As$		0,65 – 0,9
$In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$		0,9 – 1,7
$Pb_xSn_{1-x}Te$		6,3 – 30
GaN	3,39	0,366

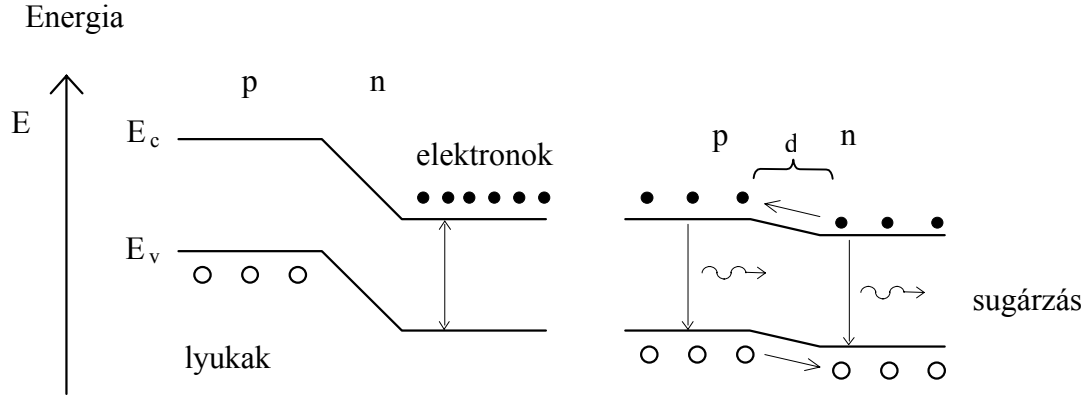
6.1 táblázat Lézeműködésre alkalmas direkt sávú félvezetők adatai.

Az első félvezető lézert nyitó irányban előfeszített *p* – *n* átmenetű GaAs-ből készítették (szerkezetét mutatja a 6.3 ábra). Az *n* típusú réteg elektrontöbblete a vezetési sáv alján helyezkedik el, a *p* típusú elektronhiánnyal (lyuk többlettel) rendelkező rétegben pedig a vegyérték sáv teteje marad betöltetlen, a két réteg atomi szintű érintkezése egyenirányító hatást eredményez. Ha a *p* és *n* vezetési típust mutató tartományokra *V* feszültséget kapcsolunk, ennek hatására a legfelső betöltött szintek (*p* rétegnél vegyérték sávban, *n* rétegnél vezetési sávban) távolsága az előfeszítés nélküli közel azonos szinthez képest eltávolodik a $\Delta E = eV$ –nek megfelelően. Ezt mutatja a 6.4 ábra. Feszültségmentes állapotban (a) ábra) a határfelületnél tértöltési tartomány alakul ki. Nyitó irányú feszültség rákapcsolásával a b) ábra szerinti átrendeződés alakul ki. Az átmeneti tartományban elektronok injektálódnak az *n* típusú rétegből a vezetési rétegbe, és lyukak – elektronhiány – a vegyértéksávba, ami biztosítja az inverzió fennmaradását. Az átmeneti aktív tartomány szélessége (*d*) μm nagyságrendű.



6.3 ábra Első működő félvezető lézer szerkezete.

A hasított kristálytani felületek tökéletes sík-párhuzamos rezonátort képeznek, merőleges beesés esetén a felületek reflexiója a félvezető anyagok nagy törésmutatója miatt 30 – 40 %.



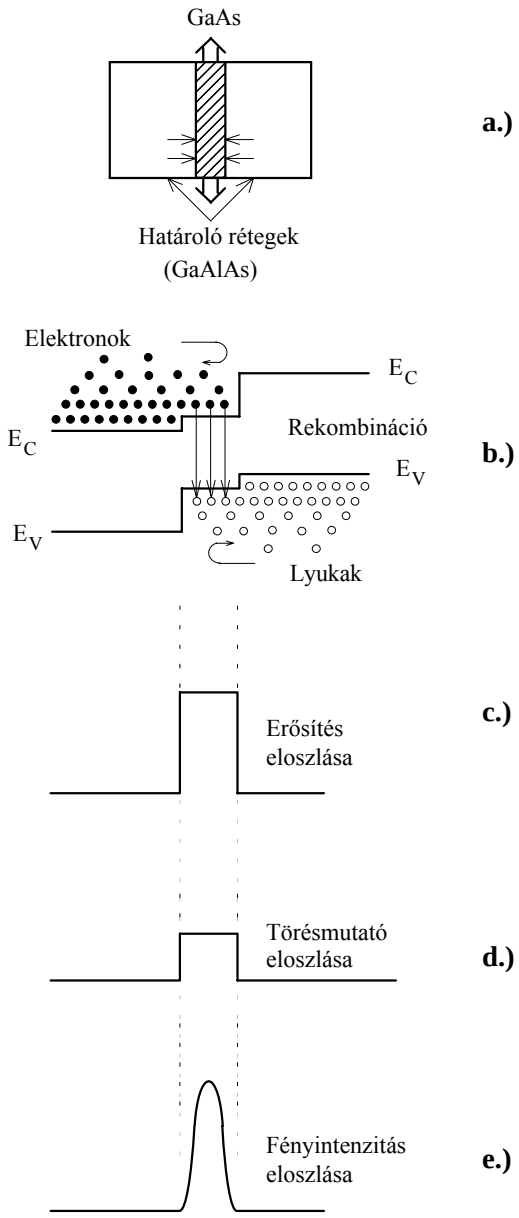
a.) Előfeszítés nélkül b.) Nyitó irányú előfeszítés

6.4 ábra *p* – *n* átmenet (E_c a vezetési sáv alja, E_v a vegyérték sáv teteje, d az átmeneti tartomány szélessége).

A 6.3 ábra szerinti konstrukciójú GaAs lézer 1,4 – 1,5 V-os előfeszítéssel impulzusban szobahőmérsékleten működött. Tipikus méretei: hossza 250-500 μm,

szélesség 100-200 μm. A lézerműködéshez az erősítési feltételnek teljesülnie kell, ami a korai kialakítású eszközöknél szobahőmérsékleten csak nagy küszöbáram, illetve áramsűrűség (10^5 A/cm^2) esetén teljesült.

A szobahőmérsékleti folyamatos működtetéshez csökkenteni kellett a fényveszteséget az eszközben, illetve meg kellett akadályozni a diffúziós töltéshordozó elvándorlást az aktív rétegből. Ehhez bonyolultabb szerkezetű, heteroátmenetes lézert kellett építeni. A heteroátmenet akkor jön létre, ha olyan félvezető anyagokat érintkeztetünk atomi közelségben, amelyeknél a tiltott sáv nagysága különbözik. Két ilyen heteroátmenettel rendelkező kettős heteroszerkezetű GaAlAs-GaAs lézer felépítését mutatja a 6.5 ábra.



6.5 ábra Kettős heteroszerkezetű GaAlAs-GaAs lézer.

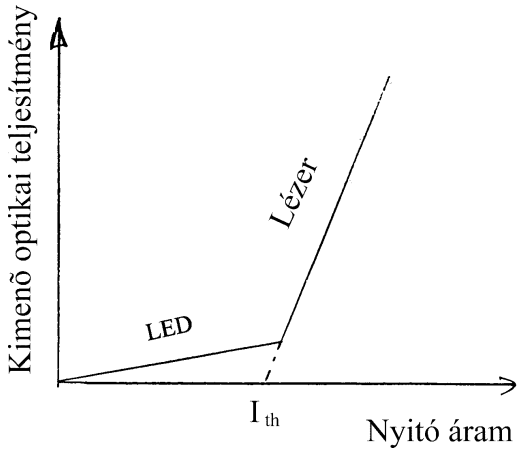
A nagyon vékony GaAs aktív réteget mindkét oldalról GaAlAs határoló réteg veszi körül. A két réteg típusa rendre *n* és *p* (6.5/a ábra) Ha mindkét rétegre nyitó

irányú feszültséget kapcsolunk, akkor mindkettő injektálni kezd a GaAs-be. Mivel mind az *n*-, mind a *p*-típusú GaAlAs-ben nagyobb a tiltott sáv szélessége, mint az aktív réteget alkotó GaAs-é, az elektronok összegyűlnek az aktív rétegben és létrejön az inverz betöltöttség. Ha az aktív réteg vastagságát kellően vékonyra választjuk, akkor már viszonylag alacsony áramsűrűség mellett is létrejön az inverz betöltöttség. Az 6.5/b. ábra a töltések, a 6.5/c. ábra az erősítés eloszlását szemlélteti. Tekintettel arra, hogy a GaAlAs kémiailag is más tulajdonságú anyag, így a törésmutatója is eltér a GaAs törésmutatójától. Ezt szemlélteti a 6.5/d. ábra. A fenti hatások figyelembevételével alakul ki a kimenő fény intenzitás-eloszlása, ezt szemlélteti a 6.5/e. ábra.

A GaAlAs optikai tulajdonságai különböznek a GaAs-étől. Az elrendezés szempontjából a törésmutató különbözőségének van döntő jelentősége. A GaAs törésmutatója ugyanis 6 %-kal nagyobb, mint a GaAlAs-é. Ezáltal a keletkező fény az aktív rétegben koncentrálódik. Így tehát a GaAlAs nagyobb sávszerkezetével az elektronokat, kisebb törésmutatójával pedig a fényt koncentrálja az aktív rétegbe (6.5/d-e. ábrák).

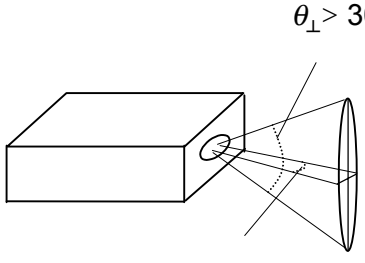
A küszöbáram csökkentéséhez szükséges az aktív tartomány oldalirányú behatárolása, mely vagy növeli a töltéshordozó-koncentrációt szigetelő rétegek beépítésével, vagy fénykoncentrációt eredményez kisebb törtésmutatójú rétegek beépítésével, csökkentve ezáltal a fényveszteséget.

A félvezető lézerek típikus teljesítmény–áram karakterisztikáját mutatja az 6.6 ábra. A küszöbáram alatt is van fénykibocsátás, de az eszköz viselkedése a LED viselkedéséhez hasonló. A küszöbáram feletti lineáris szakasz meredekségét meg szokták adni a lézerdióda adatlapján.



6.6 ábra Félvezető lézer típikus teljesítmény-áram karakterisztikája.

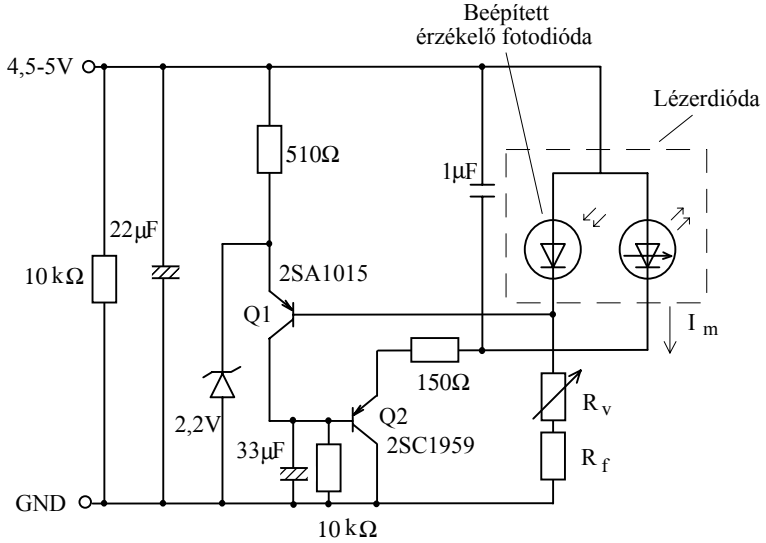
A hullámhosszal összemérhető emittáló felület miatt a félvezető lézerekből kilépő nyaláb erősen divergens, a divergencia szöge általában különbözik az átmenettel párhuzamos és merőleges irányban (6.7 ábra). A kilépő nyaláb általában asztigmatikus, elliptikus Gauss-nyaláb.



6.7 ábra Félvezető lézerekből kilépő nyaláb

A félvezető lézerek tipikus sávszélessége néhányszor 10 nm (néhány THz), a működési áramtól függően 5 – 10 módus működik. Bonyolultabb kialakítással lehetséges keskeny sávszélességű, akár egy módusban működő félvezető lézert is előállítani.

A hullámhossz a *p* – *n* átmenet hőmérsékletétől függ, annak növekedésekor a keletkező sugárzás hullámhossza is növekszik. A változás általában nem folyamatosan megy végbe, hanem diszkrét ugrásokban jelentkezik. A hullámhossz stabilizálására többféle elektromos, termikus és optikai módszer van. A hőmérséklet és az öregedés hatására a lézerdióda fény - áram-karakterisztikájának meredeksége csökken. A munkaponti körülmények megváltoztatásával egy ideig visszaállítható az eredeti kimenő teljesítmény. Szabályozó jelként a lézerdiódával egybeépített fénydióda kimenő jele szolgál. Erre az áramkörre mutat példát a 6.8 ábra. Az áramkörben lévő Zener-dióda az R_f és az R_v ellenálláson a feszültséget 1,5 V környékén stabilizálja. Ha a működés során az I_M lecsökken, ez I_B növekedéséhez kell, hogy vezessen. Ez a lézeren átfolyó áram növekedését, azaz a kimenő teljesítmény növelését jelenti. Igen fontos a zaj és tüskeszerű ingadozásoktól mentes táplálás.



6.8 ábra Lézerdióda meghajtó áramkör.

A lézerdiódák kezelésük során fokozott óvatosságot igényelnek, a MOS, CMOS eszközöknél megszokott földelt munkateret és eszközöket kell alkalmazni, kerülendő az elektrosztatikus feltöltődés.

6.2 Félvezető lézerek felhasználási területei

1. **Optikai adatátvitel** – a félvezető lézerpiac 75%-át tette ki 2000-ben (eladott lézerek összárának hányada). Csak az Internet forgalom minden félévben megduplázódik. Egyre nagyobb átviteli kapacitásra van igény, amit a sűrű hullámhossz-osztásos multiplexeléssel lehet megvalósítani (az optikai szálban egymáshoz közeli hullámhosszakon van adatátvitel, Pirelli – 32, Ciena 40, Lucent 80 □). Ehhez speciális kialakítású, drága lézerekre van szükség, az ár néhány 100 dollártól néhány ezer dollárig terjed.

Két fő felhasználási terület:
- jelátvitel, ehhez 1310 és 1550 nm- es lézerek szükségesek, ezeken a hullámhosszakon minimális az üvegszál vesztesége (2,5 Gbit/s közvetlen modulálhatóság, néhányszor 10 Gbit/s külső rezonátoros modulálás),
- a több száz km-es adatátvitelhez szükséges fényerősítő beiktatása (erbiummal adalékolt üvegszál), ennek gerjesztéséhez kellenek 980 és 1480nm-es lézerek.

2. **Optikai adattárolás**ra fordított kiadás a lézerpiac 16%-a volt 2000-ben. Négy fő felhasználási terület van:

Felhasználási terület	Lézertípus	Típikus ár
Audio CD illetve CD ROM*	780 nm, 5 mW*	≤ 1 USD*
CD-R, CD-RW, Mini Disc	780 nm, 30 mW	~ 7 USD
DVD, DVD ROM (első RW tavaly)	650 nm, 5 mW (30 mW)	~ 4 USD
Magneto-optikai RW	680 nm, 40 mW	?

* Az audio CD és CD-ROM alkalmazásokhoz ma már olcsón integrált optikai fej (lézer, detektor és optika egybeépítve) kapható kb. kevesebb, mint 3 dollárért (gyártók: Sony, Sharp, Matsushita).

3. Lézerceruza 635 – 670 nm és mW-os lézerdiódák szükségesek. 1998-ban 20 millió db-ot adtak el, melyek 90%-át Taiwanban gyártják. Az áruk tipikusan 20 dollár alatt van. Európában a szigorú biztonsági előírások miatt kisebb a felhasználás.

4. Nagy teljesítményű félvezető lézer alkalmazások a 750-980 nm-es, 1 W-nál nagyobb teljesítményű lézereket érinti. Ezek lehetnek diszkrét lézerek, vagy lézerdióda sorok 20, 40, vagy akár 60 W (100W) teljesítménnyel, száloptikás fénykivezetéssel is egybeépítve. Az 1 W teljesítményű diszkrét lézerek tipikus ára kb.

300 dollár, a 20 W-os dióda soroké nagy tételben 2000 USD. Fő alkalmazási területük van:

- nyomtatás (itt versengenek más típusú lézerekkel, mint az Ar-ion, dióda gerjesztésű szilárd test lézerek),
- anyagmegmunkálás, lehetséges alkalmazások: forrasztás, hőkezelés, vágás, mikrohegesztés, műanyaghegesztés, markírozás, stb. A lehetséges technológiák kidolgozása még csak kezdeti stádiumban van, mivel sokfajta alkalmazásra ezidáig még csak nem is gondolhattak a más típusú lézeres berendezések nagy ára miatt (a hagyományosan anyagmegmunkálásra használt berendezések főként CO_2 illetve szilárd test lézerrel működnek).
- orvosi alkalmazás, pl. szemészet, bőrgyógyászat (szörzet eltávolítás), fotodinamikus terápia (PDT, elsősorban nagy teljesítményű piros lézerek), általános sebészet
- szilárd test lézerek gerjesztése évről évre növekvő mértékben.