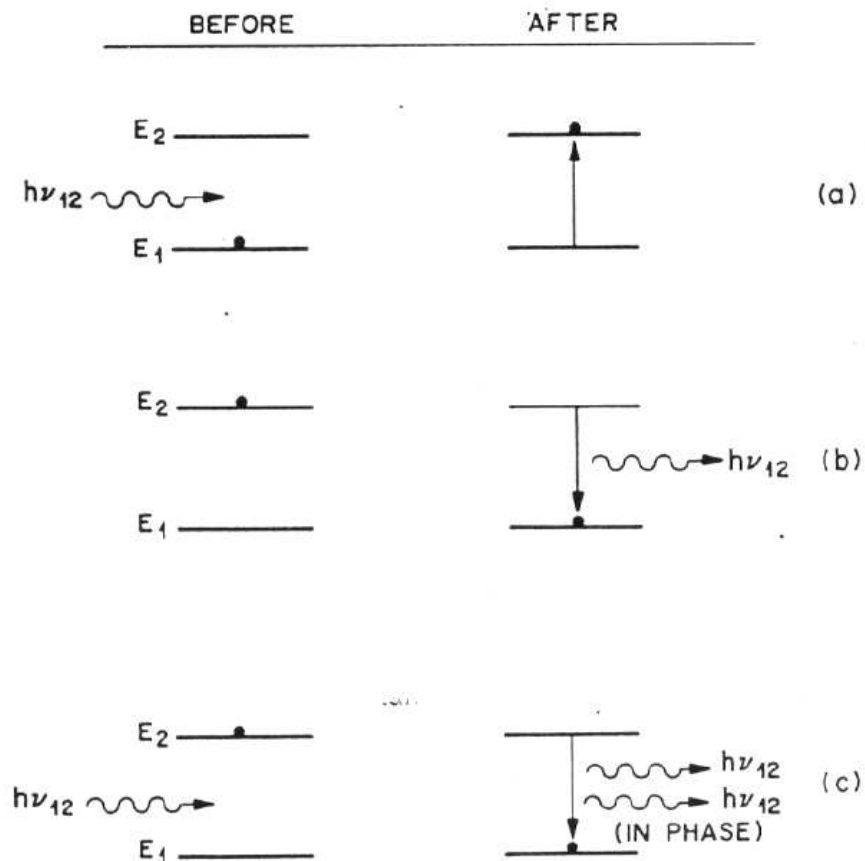


Fotoelektromos eszközök

Foton-elektron kölcsönhatás - alapjelenségek



Alkalmazás:

- a., fotodetektorok és napelemek
- b., fényemittáló diódák (LED-ek)
- c., lézerek

a., Abszorpció: a beérkező foton elnyelődik, energiája átadódik a kölcsönható elektronnak, ami a vegyértéksávból a vezetési sávba kerül - elektron-lyuk pár keletkezik. Feltétel: $h\nu \geq E_g$.

b., Spontán emisszió (sugárzásos rekombináció): az elektron a vezetési sávból a vegyértéksávba esik, az energiakülönbséget foton formájában sugározza ki. A fénykibocsátó diódákban (LED-ekben) alkalmazzák.

c., Stimulált emisszió: a belépő foton kölcsönhat egy, a vezetési sávban lévő elektronnal. Az elektron a vegyértéksávba esik és kisugároz egy ugyanakkora frekvenciájú, ugyanolyan irányú, ugyanolyan fázisú és ugyanolyan polarizációjú fotont, mint a belépő foton - fényerősítés.

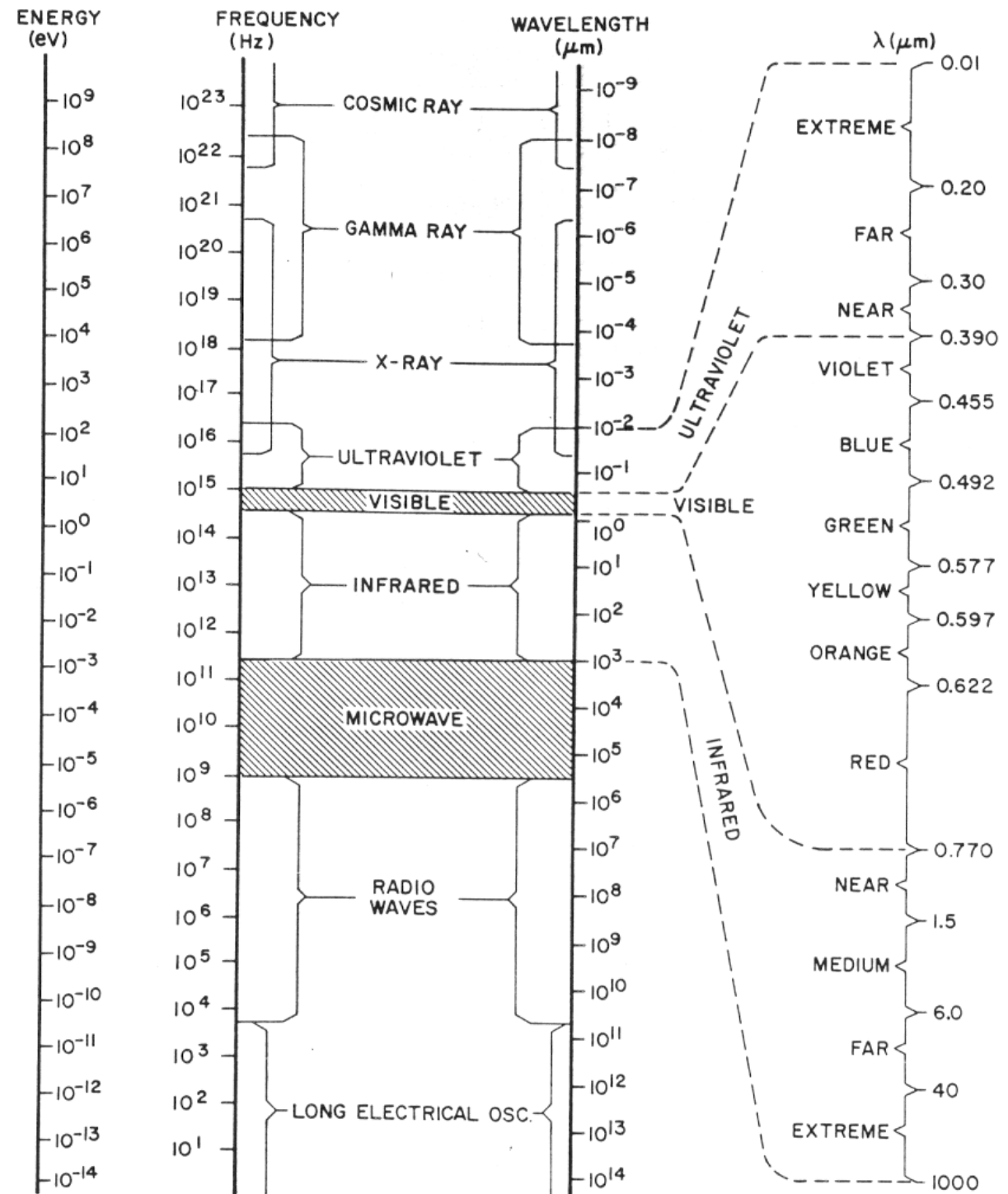
Az elektromágneses spektrum

A látható fény kb. egy oktávot ölel fel (kétszeres frekvencia a tartomány felső szélén, mint az alsón).

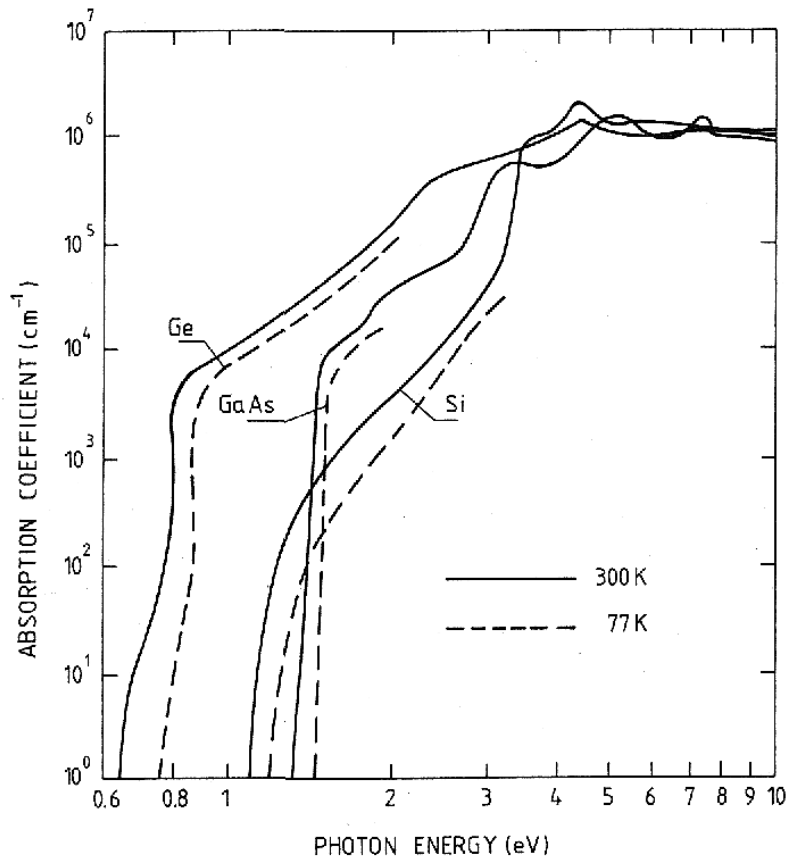
A hullámhossz és a foton energiája közötti összefüggés:

$$\lambda = c/\nu = hc/h\nu = 1,24/h\nu$$

ahol λ a hullámhossz, c a fénysebesség, h a Planck állandó. A foton energiáját eV-ban kell behelyettesíteni, a hullámhosszat μm -ben kapjuk.



A Ge, a Si és a GaAs abszorpciós spektruma



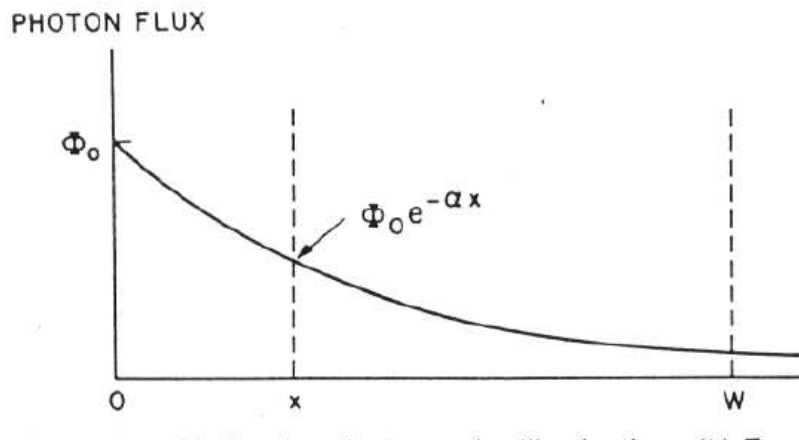
Az abszorpciós él a tiltott sáv szélességével egyezik meg. Alacsonyabb hőmérsékleten szélesebb a tiltott sáv.

Abszorpció esetében a fény intenzitása exponenciálisan csökken a felülettől befelé haladva:

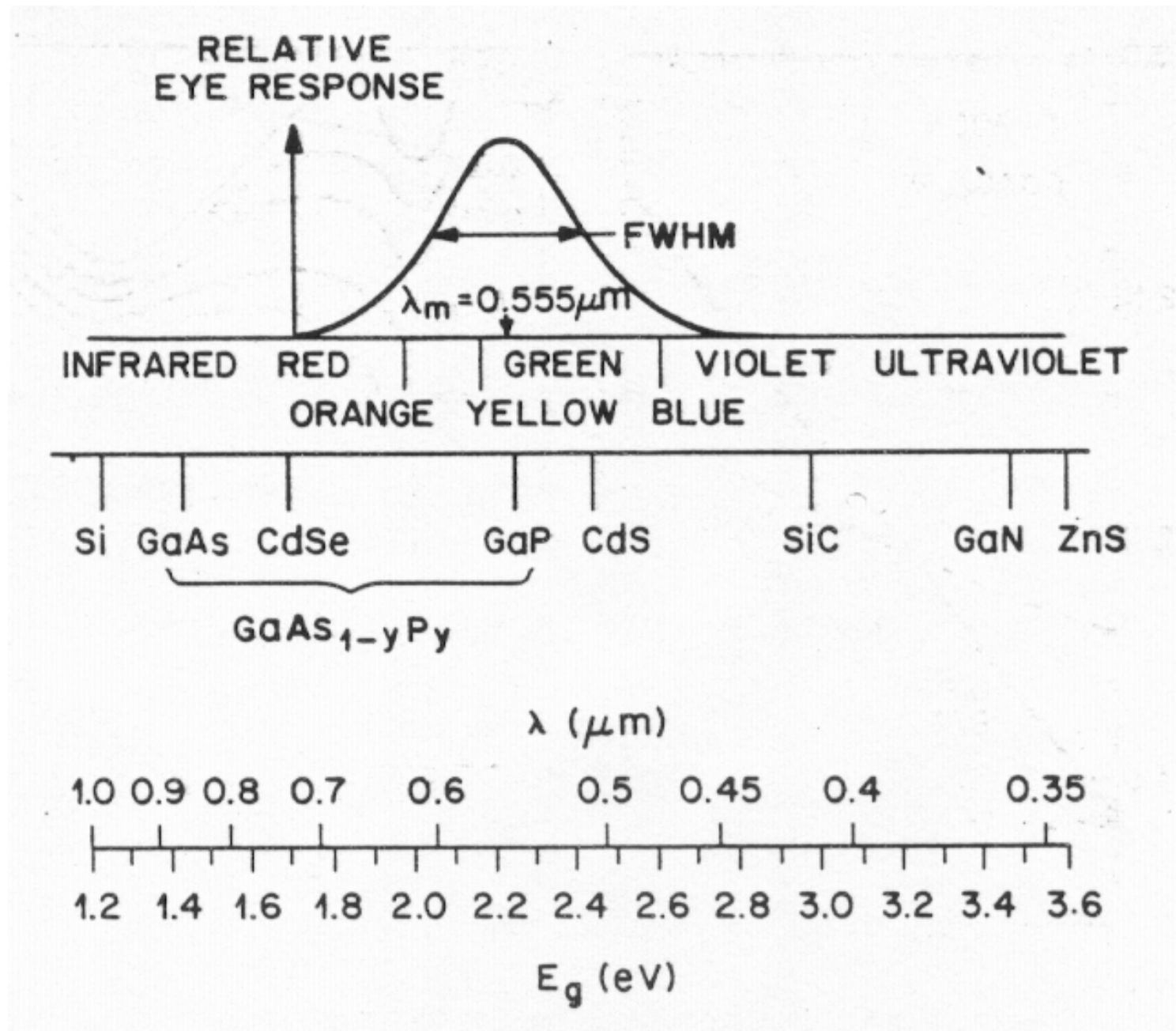
$$I = I_0 \exp(-\alpha x)$$

ahol I_0 és I az intenzitás a felületen és x távolságban a felülettől, α az abszorpciós tényező (az intenzitás csökkenés gyorsasága a mélység mentén):

$$dI/dx = -\alpha I$$



A félvezetők tiltott sáv szélessége és az emberi szem érzékenysége



Fényemittáló diódák

A LED-ek direkt tiltott sávú félvezetőkől készült pn diódák. Nyitóirányú előfeszítés esetén intenzív sugárzásos rekombináció megy végbe a p-n átmenetben, a dióda világít.

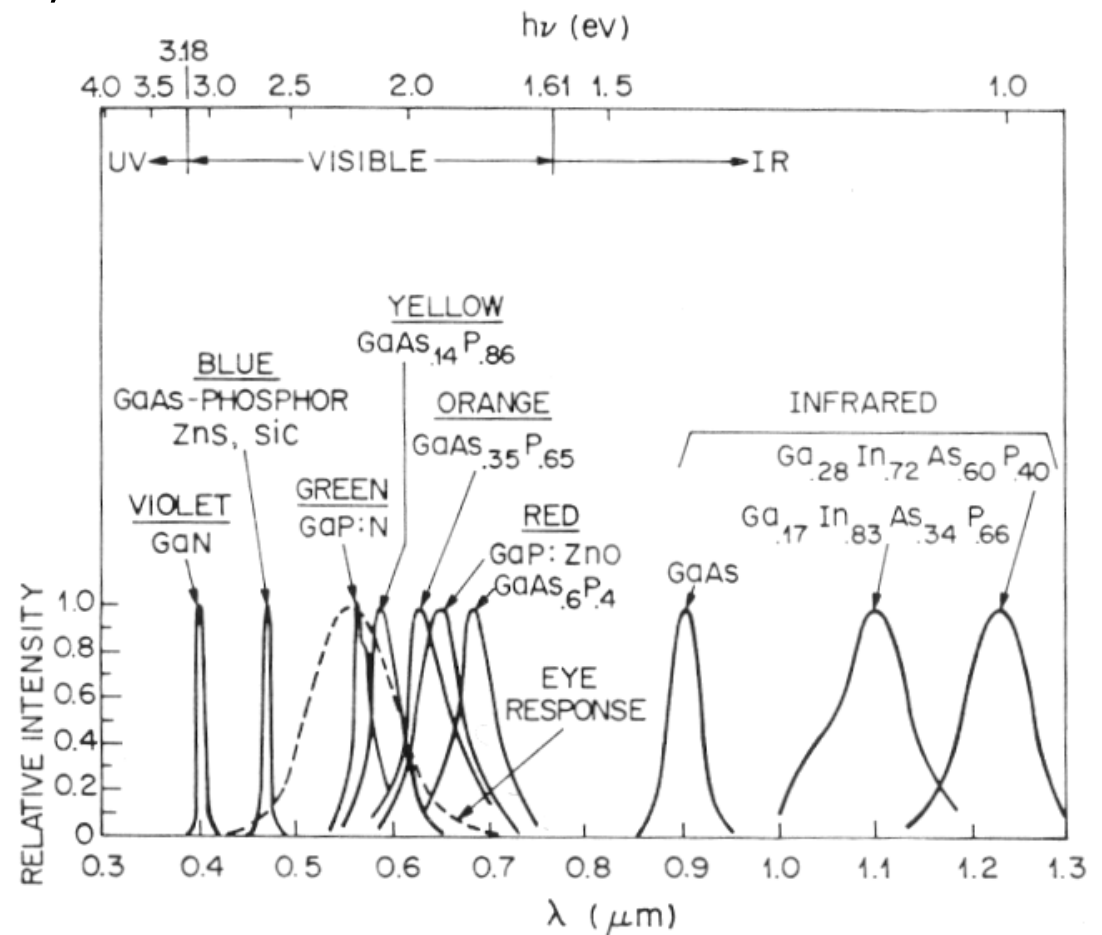
Látható spektrum: GaP, CdS (zöld), GaAsP (vörös-zöld az összetétel függvényében), GaInN (kék), GaN (ibolya).

Infravörös spektrum: GaAs, GaInAsP, GaInSb.

Alkalmazás:

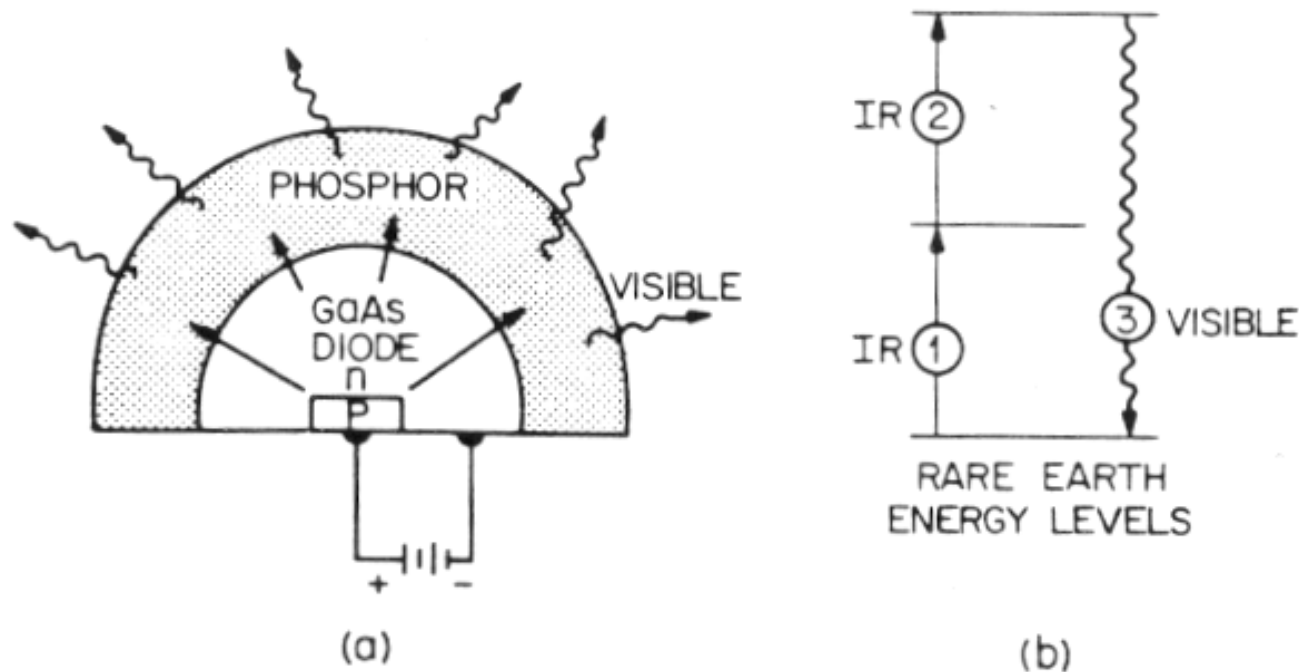
optikai csatolók,
optikai távközlés,
kijelzők,
képernyők, kivetítők
világítás.

Az izzólámpáénál jobb hatásfok.



Fénypor bevonatú LED

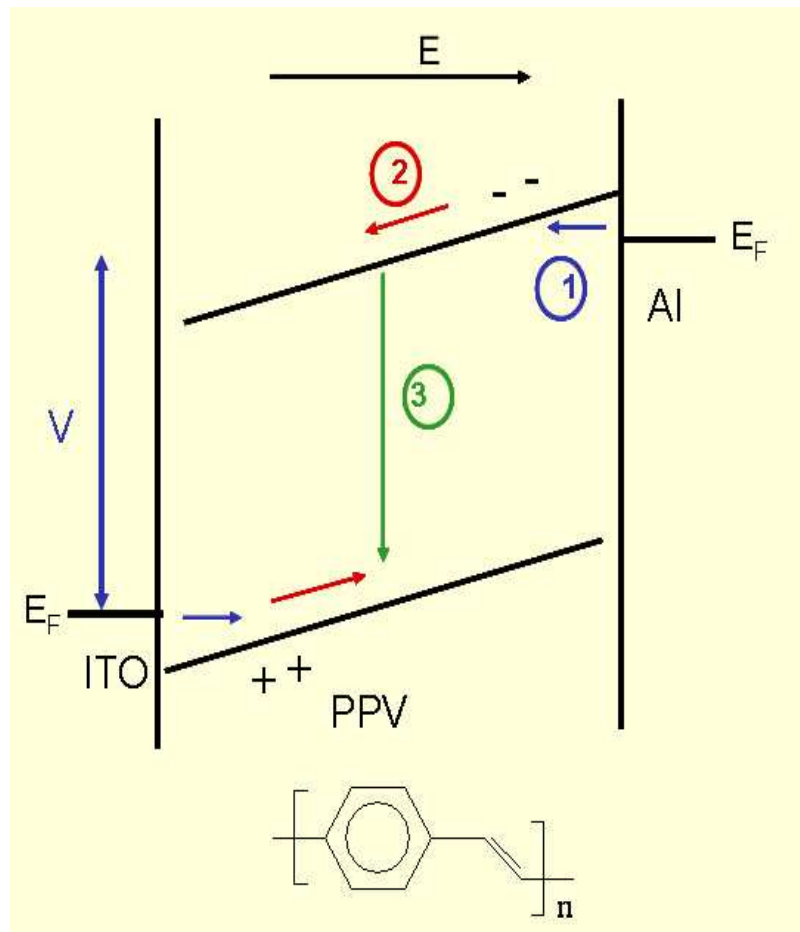
A LED felületét fényporral vonják be, amit a LED fénye gerjeszt: kék vagy fehér fénykibocsátás.



Er (erbium) vagy Yb (ytterbium) tartalmú fénypor bevonatú GaAs LED szerkezete (a). Az infravörös fény két lépésben gerjeszti a fényport. Ennek eredményeként a dióda látható (kék) fényt emittál (b).

Organikus LED (OLED)

Vezető szerves polimérekben szintén létrejöhet sugárzásos rekombináció, ha elektronokat és lyukakat juttatunk be.



Az OLED működési elve:

- 1 - töltéshordozó injekció, 2 - drift,
- 3 - sugárzásos rekombináció

A lézer

A lézerek a stimulált emisszió alapján működnek:
fényerősítés és pozitív visszacsatolás.

LASER- Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
(fényerősítés a sugárzás stimulált emissziójával)

Működési feltételek:

- 1., Nagy mennyiségű adott energiájú (hullámhosszú) foton jelenléte - visszacsatolás: optikai rezonátor.
- 2., Populáció inverzió: a magasabb energiaszinten több az elektron, mint az alacsonyabb energiaszinten. (Félvezető lézerdiódák esetében a vezetési sávban több elektron, mint a vegyértéksávban: nagy mennyiségű elektron-lyuk pár van jelen.)

Lézer fajták:

gázlézerek
folyadék (festék) lézerek
szilárdtest lézerek (pl. rubinlézer)
félvezető lézerek.

A lézerek működési tartománya:
 10^{11} - 10^{17} Hz (3 mm – 3 nm): mikro-
hullámtól a lágy Röntgen sugarakig

A félvezető lézer előnyei:

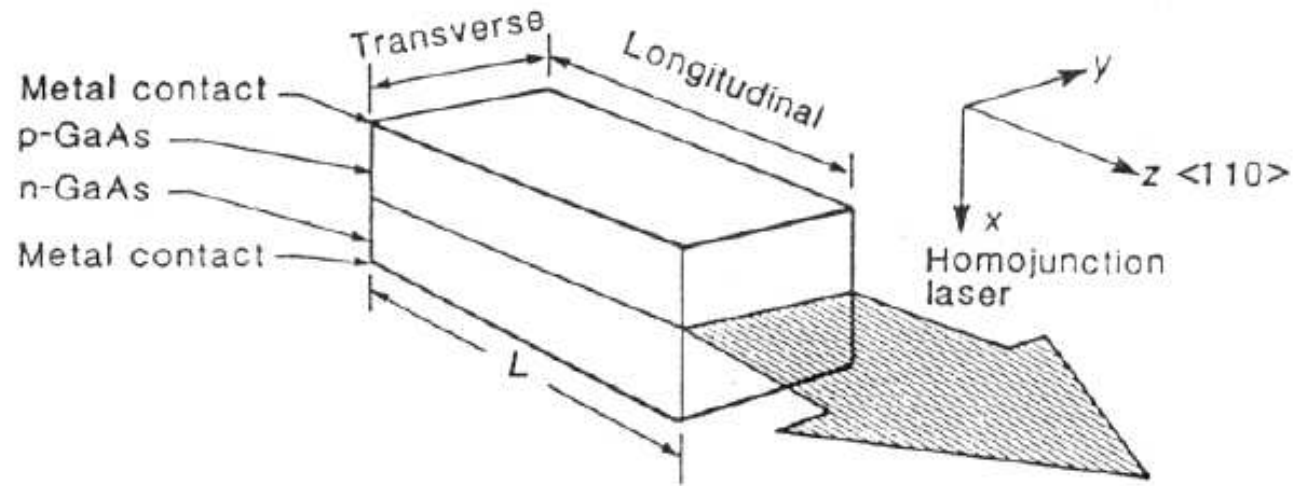
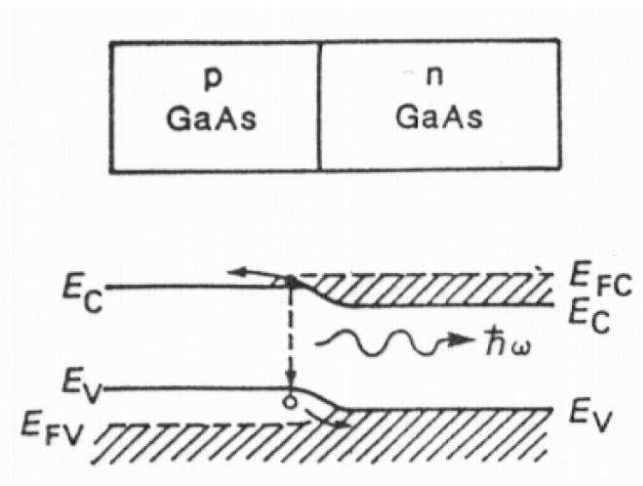
kis méretű, könnyen modulálható (áramerősség).

Félvezető lézerdióda

Mindkét oldalon nagyon erősen adalékolt (elfajult) direkt tiltott sávú félvezetőből készült pn dióda.

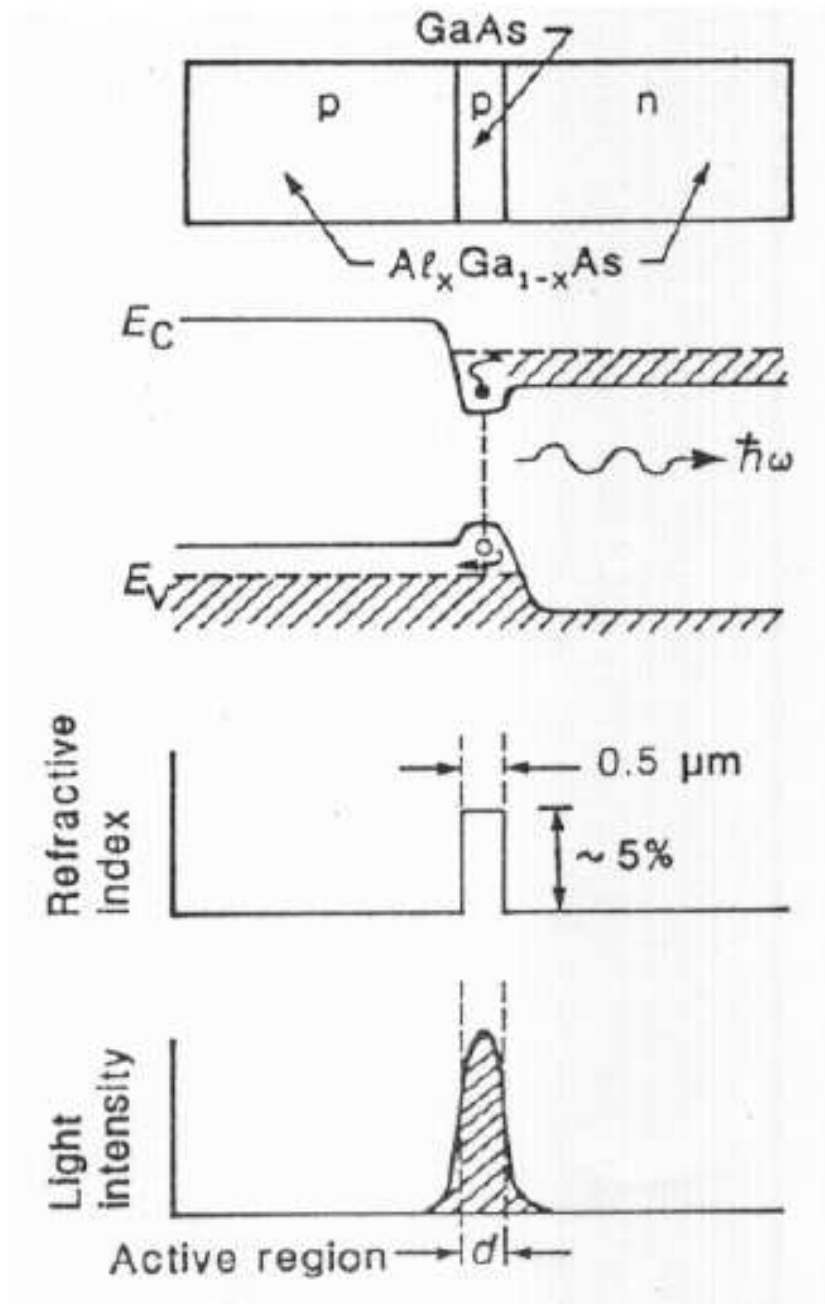
Nyitó irányú feszültség esetén populáció inverzió a p-n átmenetben.

Visszacsatolás Fabry-Perot rezonátor segítségével: matt oldallapok, hasított, féligáteresztő tükör véglapok. Rezonancia a véglapok között, fényemisszió a véglapokon át. A rezonátor (a chip) hossza 300-500 μm .



GaAs lézerdióda működési elve és felépítése

Kettős heteroátmenetes lézerdióda

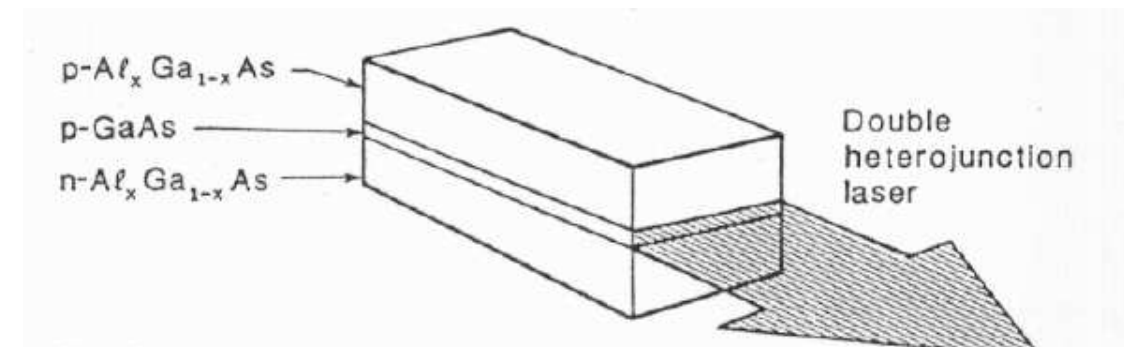


A p-n átmenetnél beépítenek egy keskenyebb tiltott sávú félvezetőből készült vékony réteget - potenciálgödör jön létre mind a lyukak, mind az elektronok számára.

Előnyök:

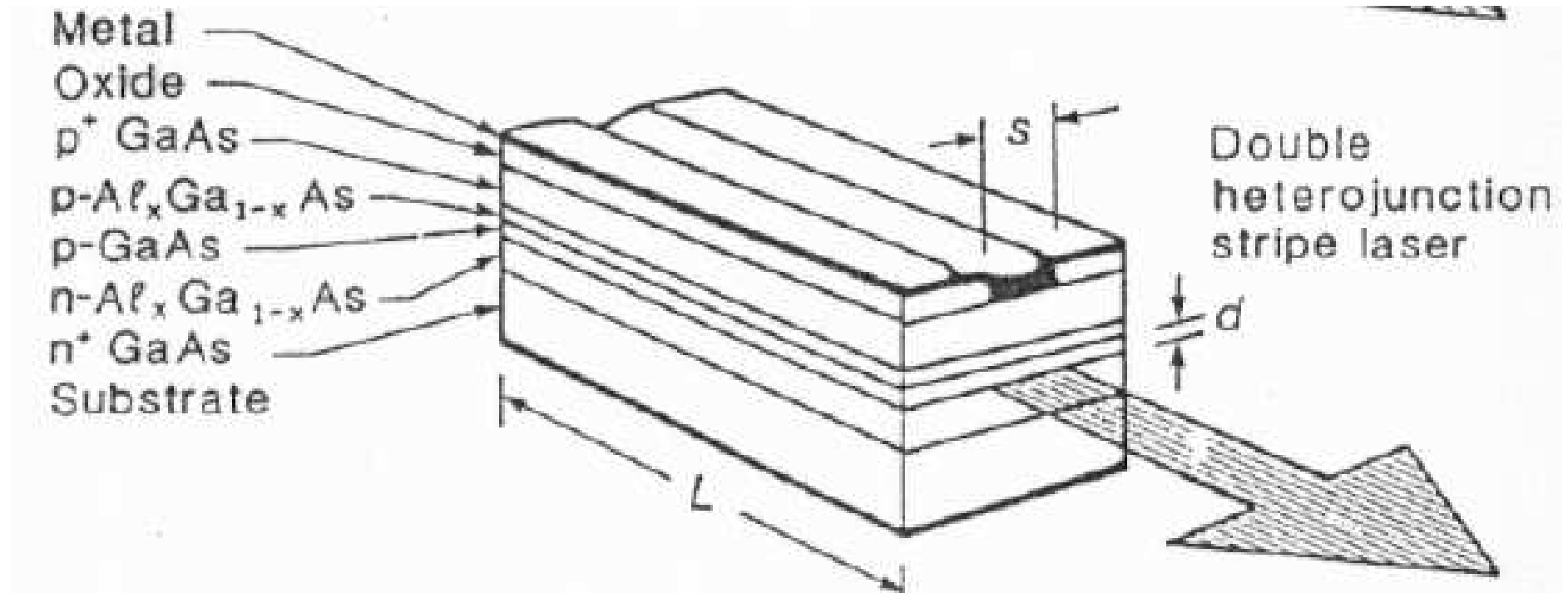
- erősebb a populáció inverzió
- a beépített rétegnek kisebb a törésmutatója - hullámvezetőként működik, kevesebb a szórt fényvesztés

Nagyobb a hatásfok.



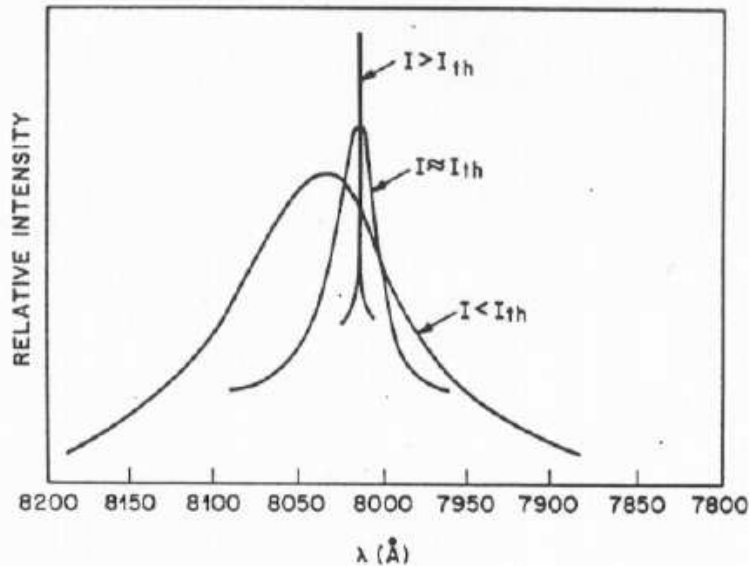
Kettős heteroátmenetes csíklézer

További hatásfok növelés az aktív terület laterális korlátozásával: eltávolítjuk a felülettől, nem lesz közvetett rekombináció a felületi csapdákon keresztül. Az aktív tartomány (a csík) szélessége 5-30 μm .



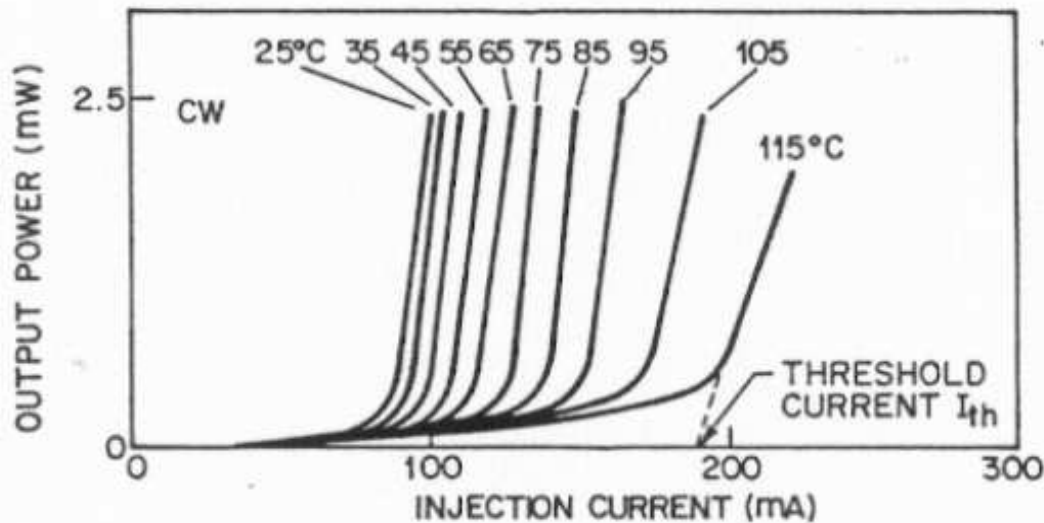
Küszöbáram

Az a legkisebb áramerősség (I_{th}), ahol a stimulált emisszió beindul. Ez alatt spontán emisszió, a dióda LED-ként működik.



A LED spektruma széles, a lézer monokromatikus.

Egy InP/GaInAsP kettős heteroátmenetes lézer relatív intenzitása a diódán átfolyó áram függvényében



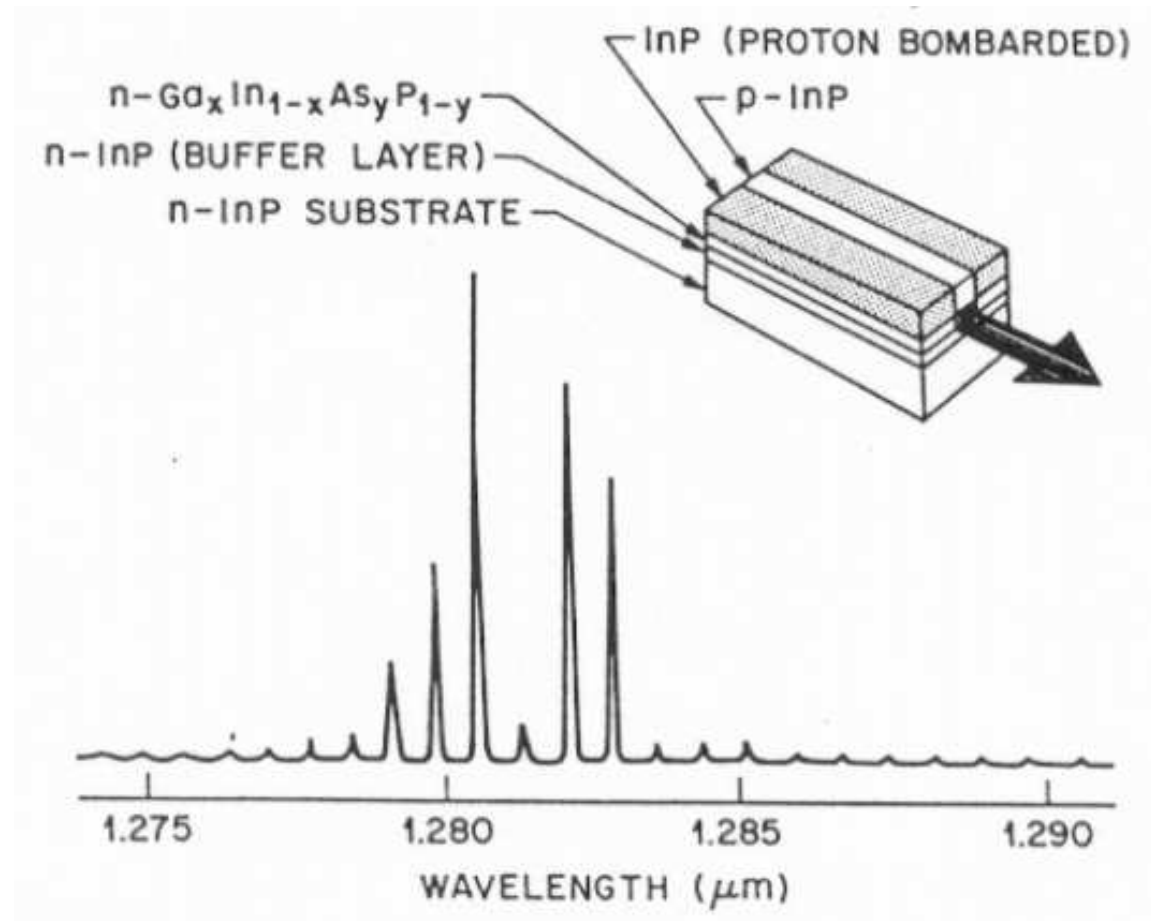
A küszöbáram függ a chip hőmérsékletétől.

Egy GaAs/AlGaAs kettős heteroátmenetes lézer kimenő teljesítménye a diódán átfolyó áram és a chip hőmérsékletének függvényében

A valós spektrum

A spektrum a valóságban nem teljesen monokromatikus.

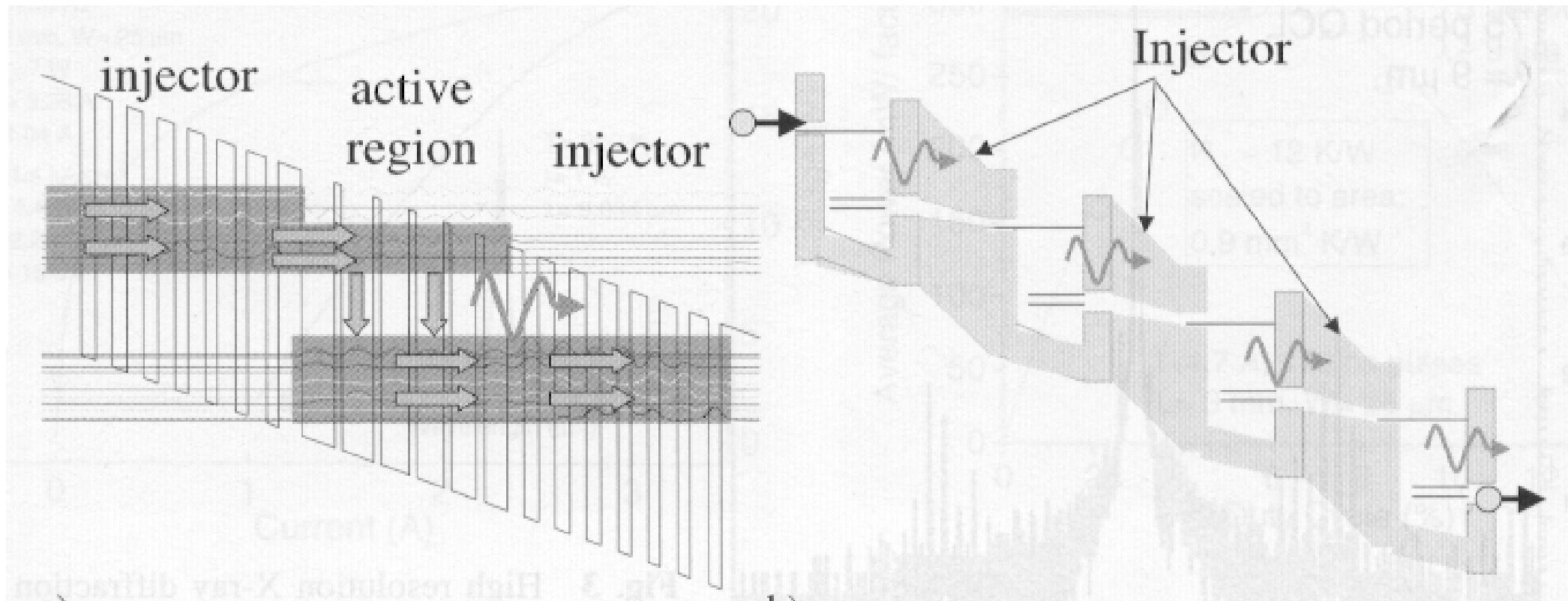
Hangolás: áramerősséggel, hőmérséklettel, mágneses térrel vagy mechanikai nyomással.



Egy InP/GaInAsP kettős heteroátmenetes lézer spektruma finom felbontásban

Kvantum-kaszád lézer

Több heteroátmenetes rétegszerkezetet alakítanak ki úgy, hogy a vezetési sávban csatolt potenciálgödrök jöjjenek létre. Ezeket a tartományokat más periodicitású rétegszerkezetekkel elválasztják egymástól. A szerkezetre kapcsolt elektromos tér hatására az elektron alagúteffektussal mozog az elektromos tér irányába és fényt sugároz ki mindegyik térbeli periódusban. Kis energiájú átmenetek: infravörös tartományban működik ($3\text{-}12\text{ }\mu\text{m}$).



InGaAs/AlInAs/InP kvantum-kaszád lézer: a vezetési sáv éle és a működési elv.

A lézerek jellemzői és alkalmazása

1., Monokromatikus - egyszínű ($\Delta\nu \approx 1-2$ Hz)

2. Rövid impulzusok állíthatók elő ($t_{\min} = 6$ fs)

Alkalmazás: - szerves és szervetlen kémia
- biológia, orvostudomány (kötések felépítése és bontása)
- üvegszálak távközlés

3. Kis divergenciájú - kis széttartás (Föld – Hold sugár $d = 30$ m)

Alkalmazás: - geodéták (iránykijelölés)
- optikai írók, olvasók, lézerprinter
- katonai felhasználás (fegyverek)

4. Nagy intenzitású

Alkalmazás: $P = 0,1-1$ mW - lézer mutató pálca

$P = 100$ mW - 1 W - kisebb műtételnél

$P = 50$ W - 10 kW - ipari lézer

$P > 10$ kW - katonai lézerek

SZTE 1 TW = 10^{12} W

Extreme Light Infrastructure (ELI) - $P > 10^{23}$ W/cm²

Világcsúcs: 1250 TW

5. Koherens - interferenciára képes, azonos frekvenciájú, irányú, fázisú és polarizációjú fotonok alkotják

Alkalmazás: - hologram

Fotodetektorok

Fotorezisztor

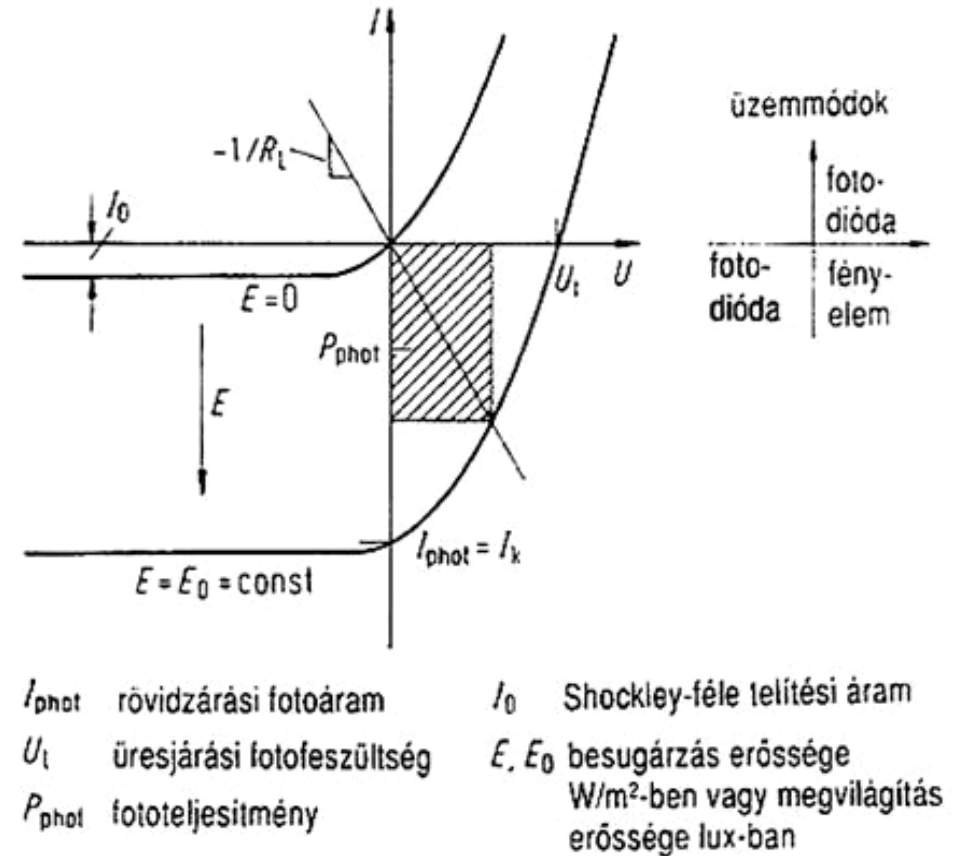
Ha a beeső fotonok energiája eléri vagy meghaladja a tiltott sáv szélességét, elektron-lyuk párokat generálnak - nő a vezetőképesség.

Fotodiódák

Ha a beeső fotonok olyan tartományban abszorbeálódnak, ahol beépült vagy rákapcsolt elektromos tér van, az elektron-lyuk párok szeparálódnak, a diódában fotoáram indul meg (fotodióda) ill. külső feszültség nélküli állapotban feszültség lép fel a sarkain (fényelem).

Jellemzők:

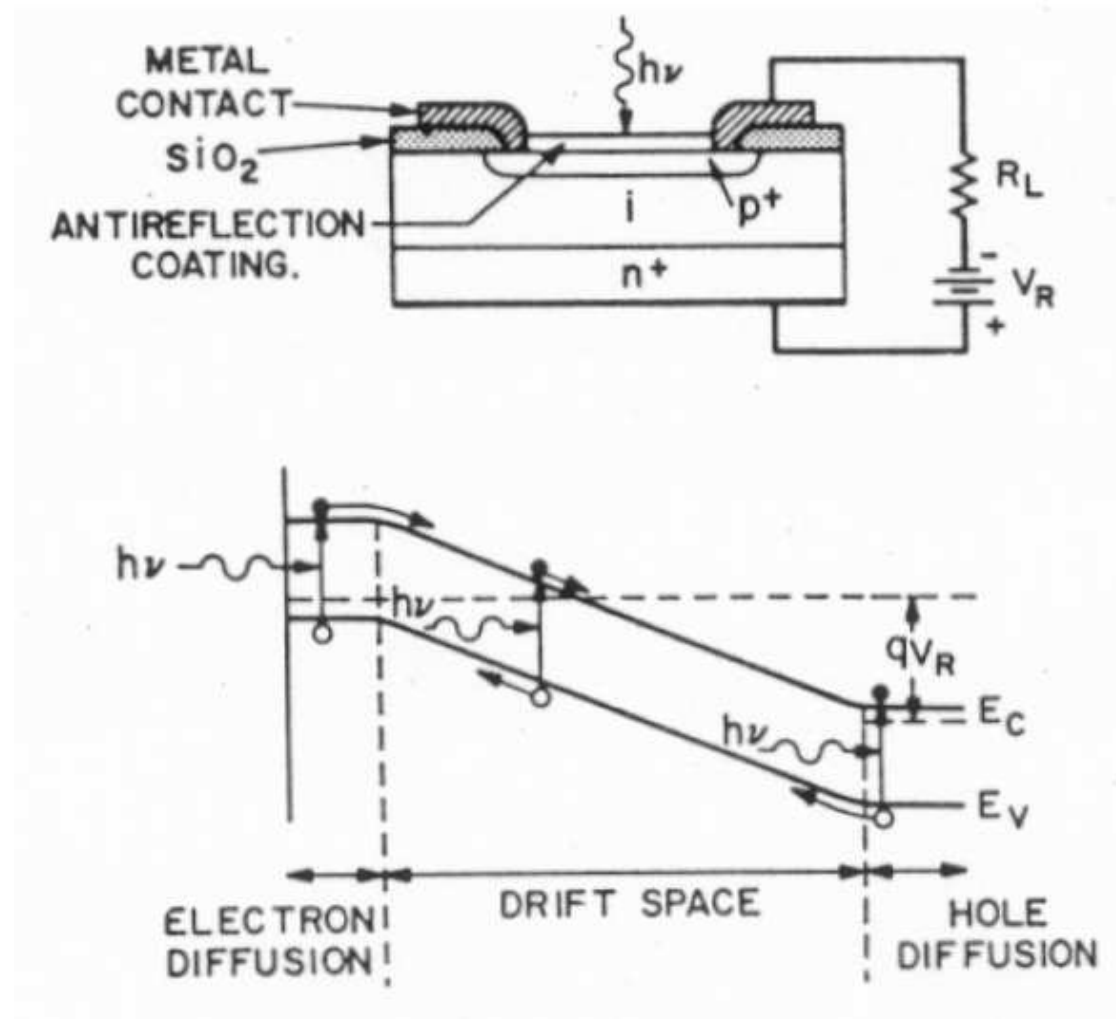
- kvantumhatásfok (η)- egy beeső fotonra hány hasznos elektron-lyuk pár jut: $\eta < 1$ (széles p-n átmenet)
- válaszüidő (keskeny p-n átmenet)



Megvilágítás hatására az áram-feszültség karakterisztika eltolódik

pin fotodióda

A zárófeszültség hatására létrejövő elektromos tér a teljes intrinsic tartományra kiterjed - jó kvantumhatásfok. A hatásfok és a válaszidő az adalékoltatlan réteg szélességével szabályozható (ellentétes hatás).



A pin fotodióda szerkezete és működési elve

Schottky fotodióda

Schottky átmeneten alapszik a működése.

Lavina fotodióda

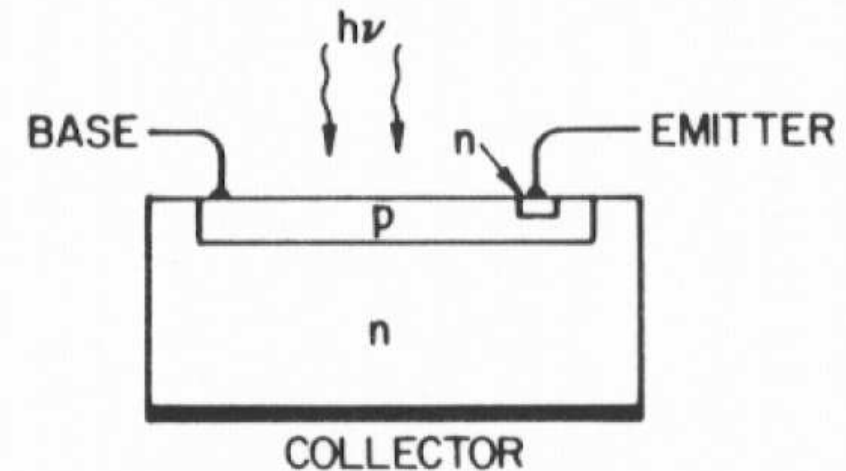
A letörés közelébe feszítik elő. A fotonok által keltett elektron-lyuk párok beindítják a lavina letörést. Erősítés: $\eta > 1$.

Hátrány: zajos.

Fototranzisztor

nnp bipoláris tranzisztor, amelyben a bázis lebeg. A fotonok a bázisban abszorbeálódnak. A BC záróirányú elektromos tér átrántja a generálódó elektronokat a kollektorba. A visszamaradó lyukak megnövelik a bázis potenciálját, az EB átmenet jobban kinyit, megnő az emitter és kollektor áram. Erősítés: $\eta > 1$.

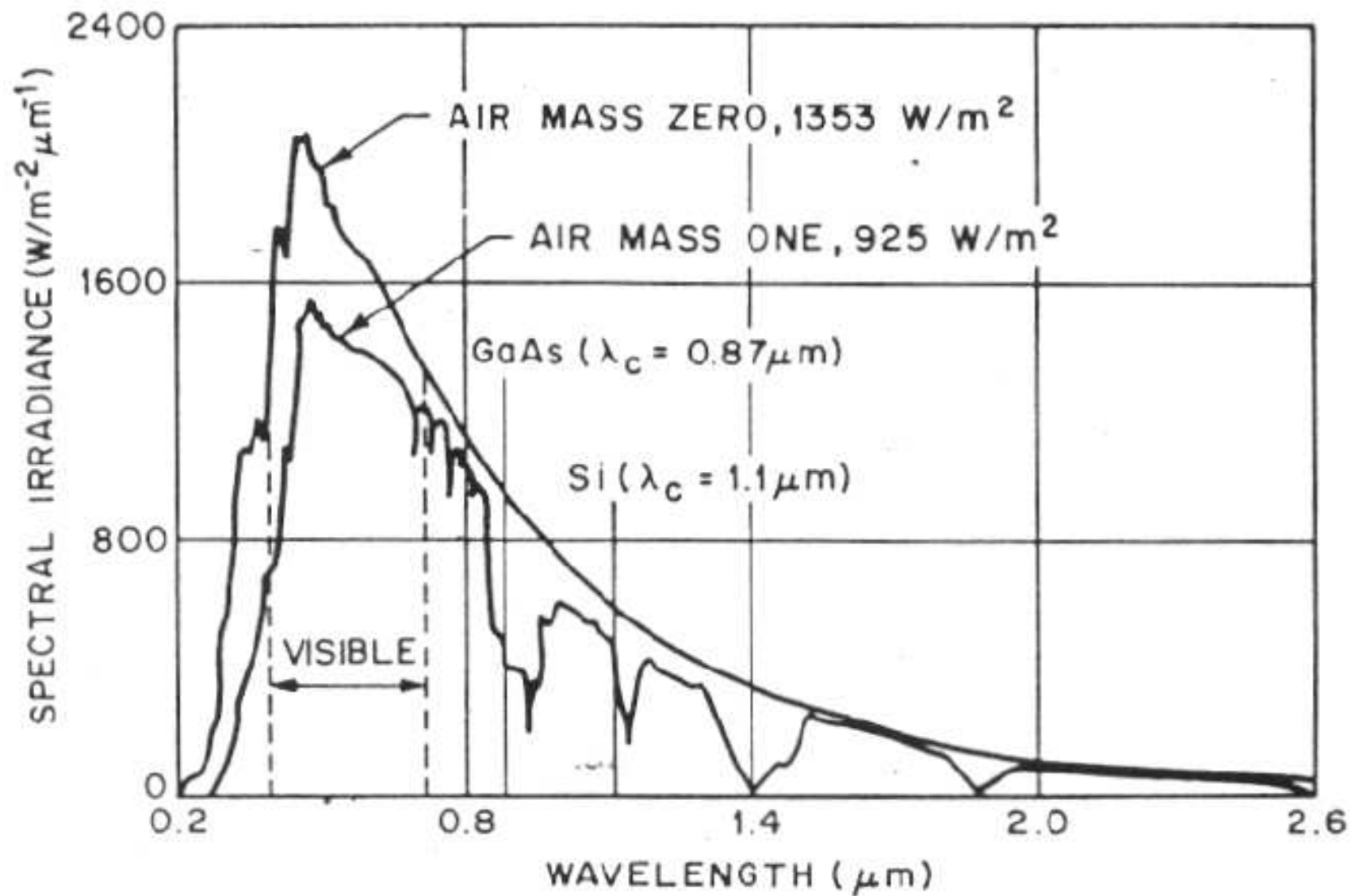
A fotodetektorokat keskeny sáv szélességre készítik. A felületüket antireflexiós bevonattal borítják a beeső fény visszaverődésének csökkentése végett.



Fototranzisztor

Napelemek

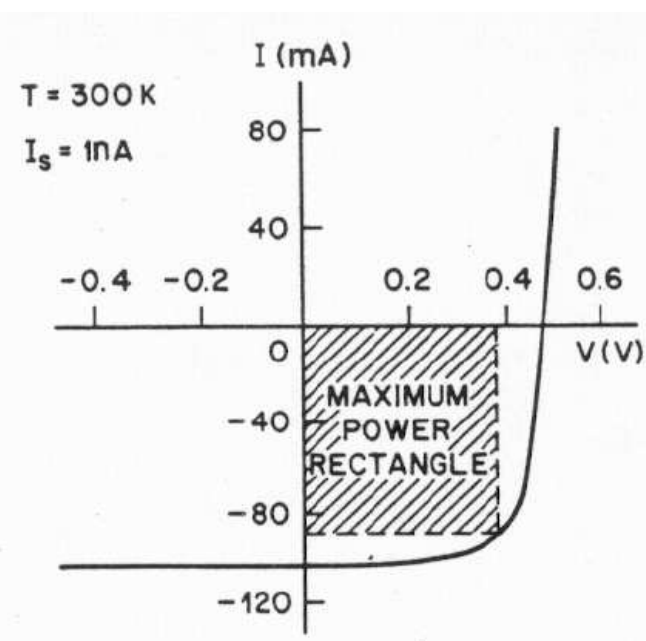
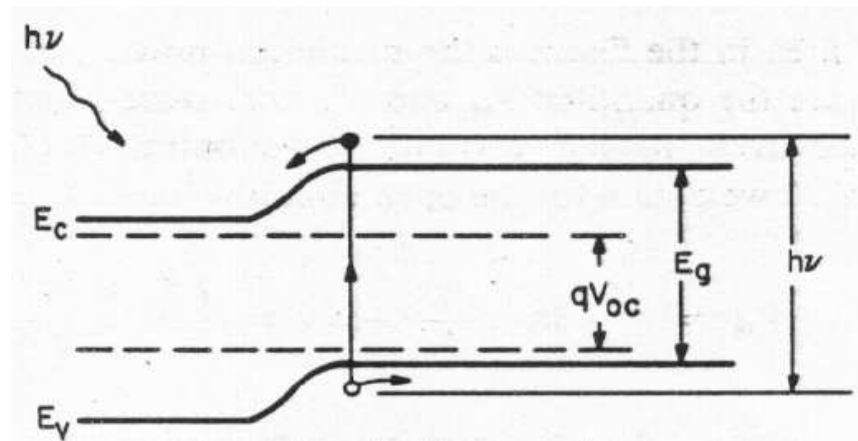
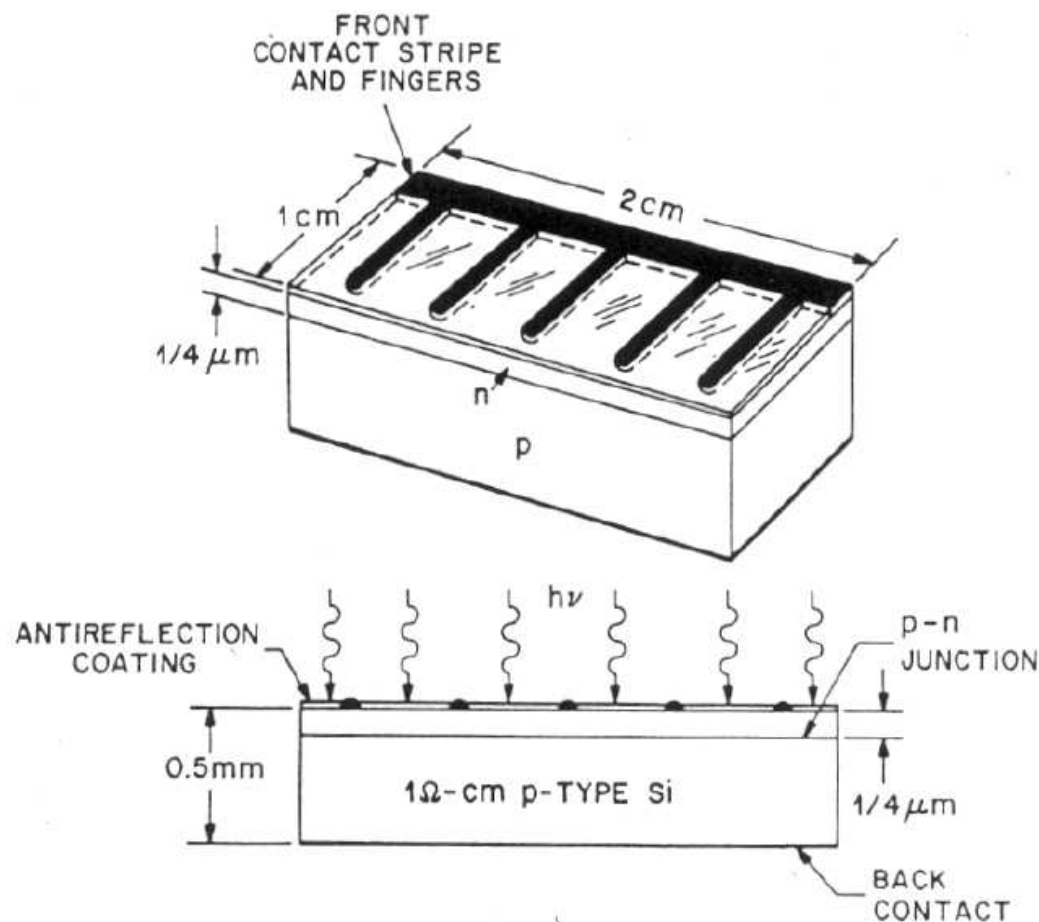
A Nap spektruma (a világűrben és a Föld felszínén)



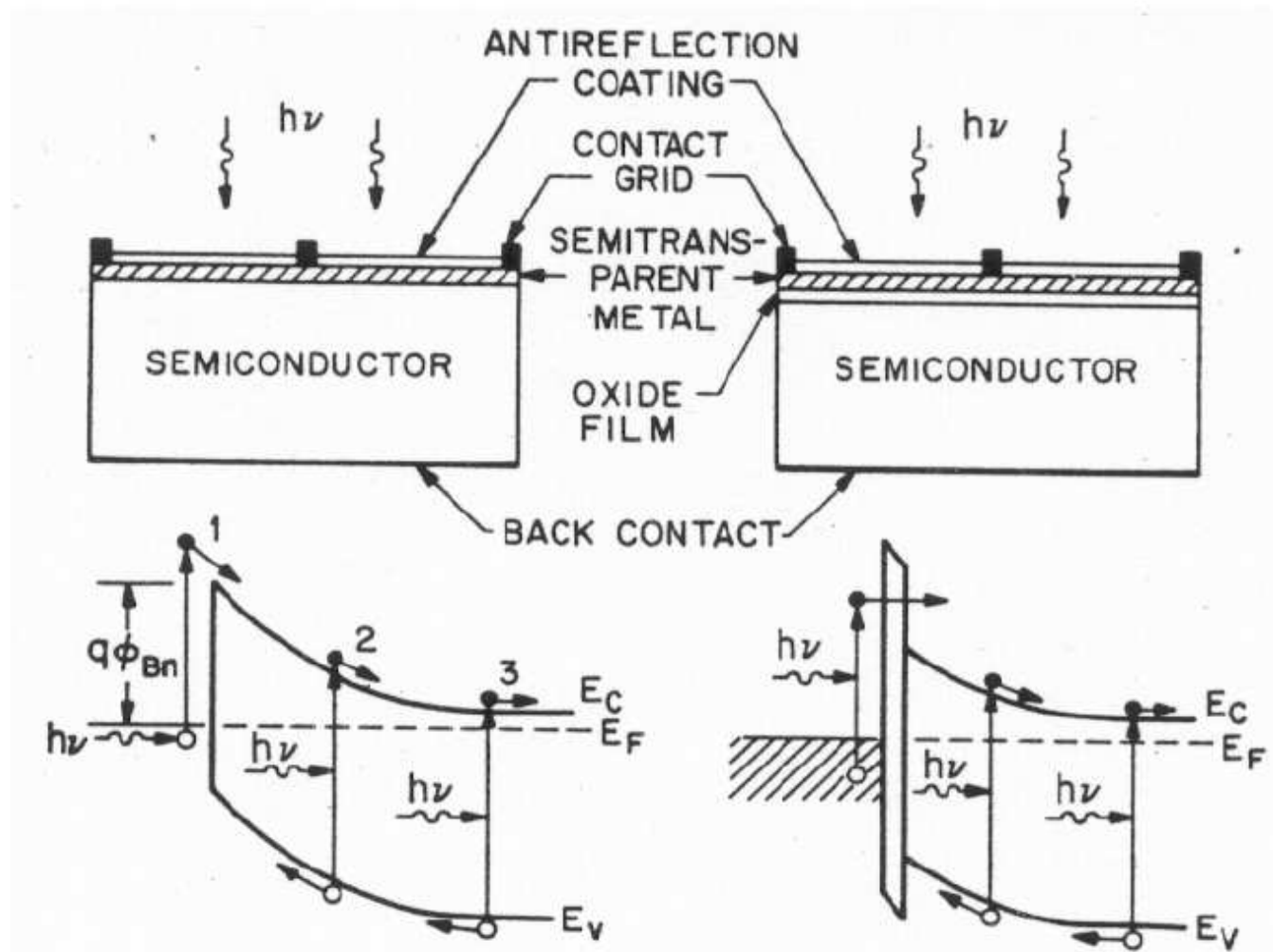
pn napelem

Cél: a beeső napenergiát elektromos energiává alakítani - lehetőleg minél szélesebb hullámhossztartományban.

Működési elv: elektron-lyuk pár keltés a p-n átmenetben - az elektromos tér hatására szeparálódnak.



Schottky és MIS napelem



MIS: Metal-Insulator-Semiconductor (fém-szigetelő-félvezető)
Schottky és MIS napelem: elektron generáció a félig áteresztő fémrétegből és elektron-lyuk pár keltés a félvezetőben. A MIS napelemben a generált elektronok és lyukak alagúteffektussal jutnak át a vékony oxidrétegen.

Fejlesztési irányok

Két fejlesztési irány:

- nagy hatásfokú napelemek az űrkutatás és űrtávközlés számára - vegyületfélvezetők, tandem napelemek - drágák
- kis hatásfokú olcsó napelemek földi használatra - vékonyréteg napelemek

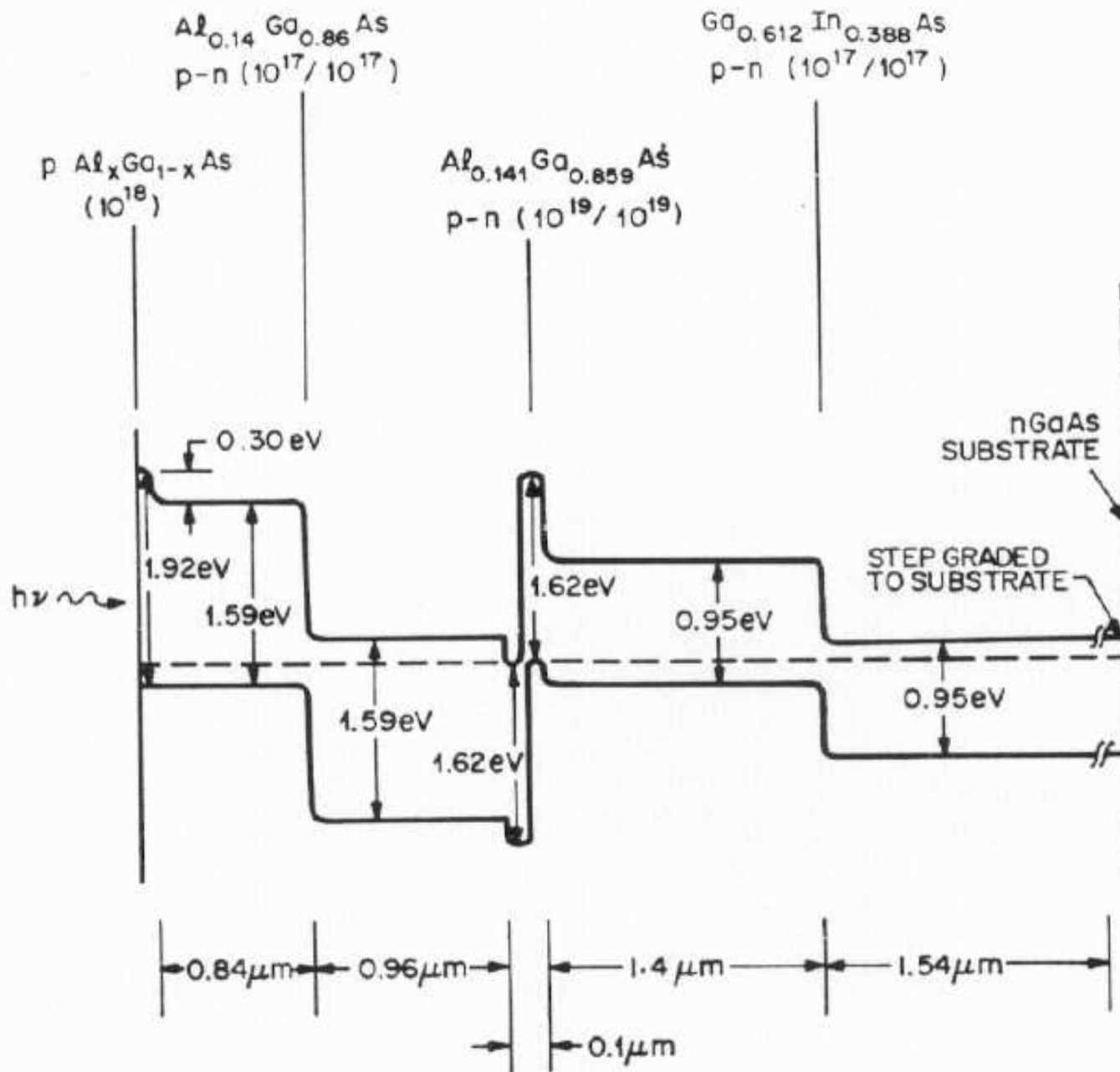


Űrtávcső
elektronikájának
táplálása
napelemekkel

Vékonyréteg napelemek

Amorf vagy multikristályos rétegek (Si, SiGe, CuInSe₂, CuInGaSe₂, CdS, CdTe) fémen, műanyagon, üvegen. Olcsó, de öregszik (környezeti hatások). Az amorf anyag változik a fény hatására. Szerves félvezetőkől is.

Tandem napelem



AlGaAs és GaInAs tandem napelem:

A felső cella az 1,59 eV-nál nagyobb energiájú fotonokat abszorbeálja, az alsó a 0,95-1,59 eV közötti fotonokat.

A két cella alagútdióda segítségével van sorba kötve.

A felső 1.92 eV sávszélességű réteg ablakréteg, amely eltávolítja az aktív tartományt a felülettől a keltett töltéshordozók rekombinációjának megakadályozása végett.

Ellenőrző kérdések

Melyik félvezető eszköz működik a spontán emisszió alapján?

Hogy működik a fotorezisztor?

Mi a stimulált emisszió?

Mi a lézer küszöbárama?

Melyek a lézer működési feltételei?

Hogyan működik a napelem?

Hány kivezetése van a fototranzisztornak?

Mi a kvantumhatásfok a fotodetektoroknál?

Milyen jelenségen alapszik a lézerdióda működése?

Hogy működik a fototranzisztor?

Mire használják az antireflexiós réteget?

Milyen az abszorpciós tényező hullámhosszfüggése?

Melyik a két fő irányvonal a napelemfejlesztésben?

Miért előnyös, ha a lézerdióda aktív tartományában potenciálgödröt hozunk létre egy kisebb tiltott sávú vékony réteggel?

Mi a tandem napelemek működési elve?