

5. Liitokset

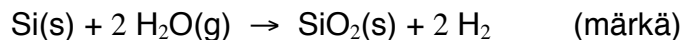
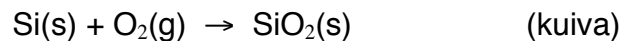
Tarkastellaan seuraavaksi puolijohdeliitoksia (engl. junction) ja puolijohde–metalli-liitoksia. Jos liitettyjen puolijohdeiden kaistaraot ovat erisuuret, sanotaan liitosta heteroliitokseksi (engl. heterojunction).

5.1. p–n LIITOKSEN VALMISTUS

5.1.1. Terminen oksidointi

Piin pinnalle voidaan kasvattaa hyvin kontrolloidusti piidioksidikerros (SiO_2), joka on hyvä eriste. Piidioksidia käytetään **eristeenä, diffuusiomaskina, liitosten passivointiin** ja **hilaoksidina**. Osittain piidioksidin käyttökelpoisuuden vuoksi pii on saanut hallitsevan aseman puolijohdeteknologiassa.

Teollisesti piin **oksidointi tapahtuu korkeassa lämpötilassa**, 800 – 1200 °C, minkä vuoksi sitä sanotaan **termiseksi oksidoinniksi**. Kaksi tavallisinta termistä oksidointimenetelmää ovat **kuivaoksidointi** ja nopeampi **"märkäoksidointi"**

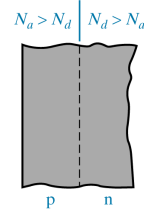


Piidioksidilla on useita kiderakenteita, mutta termisellä oksidoinnilla tuotettu SiO_2 on yleensä amorfista lasia (fused silica). Amorfinen SiO_2 kiteytyy hitaasti, riippuen lämpötilasta. Se on myös rakenteeltaan avointa (2.15 – 2.27 g/cm³) verrattuna kiteiseen piidioksidin (2.65 g/cm³), minkä vuoksi epäpuhtaudet ja happi diffundoituvat siinä helpommin.

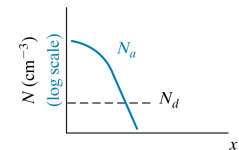
Kerros piidioksidia, jonka paksuus on x , kasvaa piikerroksesta x_0 , jonka paksuus on vain noin 44% syntyneestä oksidikerroksesta, ($x = 2.3 x_0$)

5.1.2. Diffuusio

Diffuusiota käytetään mm. puolijohteen seostukseen. Siten voidaan tehdä pn-liitoksia, kanava-alueita, lähde- ja nielualueita, jne. Tyypillisessä diffuusioprosessissa kerrostetaan ensin seostusainetta ns. seostuskaasusta seostettavan aineen pinnalle. Tämän jälkeen lämpökäsittelyllä "ajetaan" seoste syvälle seostettavaan pintaan (drive-in).



Seosteaineiden diffuusiovakiot ovat voimakasti lämpötilasta riippuvia, "Arrhenius"-muotoa



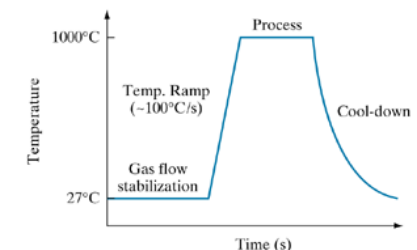
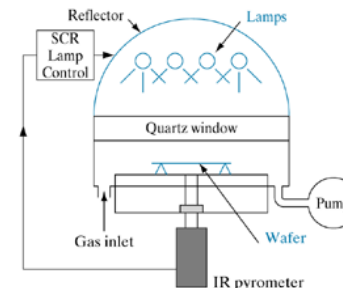
$$D = D_0 \exp(-E_A / kT),$$

missä **aktivaatioenergia** $E_A \approx 1 - 5$ eV ja keskimääräinen **diffuusiosyvyys** on $(Dt)^{1/2}$. Lauseketta $2(Dt)^{1/2}$ sanotaan joskus **karakteristiseksi diffuusiopituudeksi**.

Litografiamaskeina käytetään tyypillisesti SiO_2 -kerroksia.

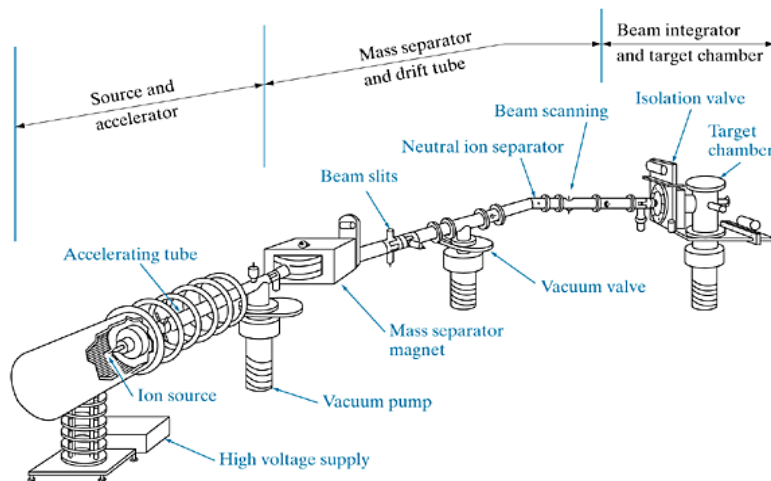
5.1.3. Nopea lämpökäsittely (RTP)

Nopealla lämpökäsittelyllä saadaan aikaan hallittu diffuusio ja diffuusiosyvyys $(Dt)^{1/2}$. Lämpötilan muutos on tavallisesti luokkaa 50 – 100 °C/s aina noin 1000 °C saakka.



5.1.4. Ioni-istutus

Ioni-istutuksessa (engl. ion implantation) seosteaineen atomit ammutaan ioneina sähkökentällä (30 kV – 10 MV) kiihdytettynä suurella nopeudella ($\sim 10^7$ cm/s) suoraan substraatin sisään 10 – 100 nm syvyydelle. Nesteen tai kaasun muodossa oleva seosteaine johdetaan ionisaatiokammioon, höyrystetään siellä ja ionisoidaan energeettisillä elektroneilla positiivisiksi ioneiksi. Ionisuihkua ohjataan sähkö- ja magneettikentillä sekä substraatin pinnalle tehdyillä maskeilla (fotolitografia).



Ioni-istutus on tarkempi ja kontrolloidumpi menetelmä kuin diffuusiosteostus. Se ei myöskään vaadi korkeita lämpötiloja, jotka voisivat vaikuttaa jo aikaisemmin tehtyihin (diffusoituihin) rakenteisiin. Toisaalta implantoitujen ionien voidaan antaa tarvittaessa myös diffundoitua lämpökäsittelyä käyttäen.

Ioni-istusta voidaan käyttää myös silloin kun diffuusiomenetelmä ei sovellu huonojen diffuusi ominaisuuksien vuoksi.

Ioni-istutuksen avulla saatua seostusta kuvataan *keskimääräisellä tunkeutumissyvyydellä* R_p (engl. projected range) sekä seosteen jakautumalla. Jos substraattikiteen orientaatio ei ole vaikuttanut lopputulokseen, niin tietyillä parametreilla saatu konsentraatioprofiili on Gaussin käyrän muotoinen

$$N(x) = \phi / [(2\pi)^{1/2} \Delta R_p] \times \exp\{-1/2 [(x-R_p)/\Delta R_p]^2\}, \quad (5.1a)$$

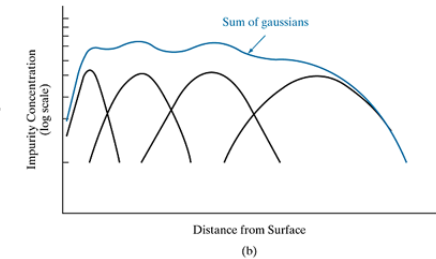
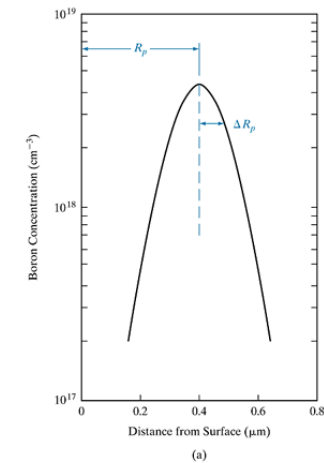
missä ϕ on istutettu annos (ionia/cm²). Jakautuman puoliarvoisuus on

$$\Delta x_p = 2(2 \ln 2)^{1/2} \Delta R_p \approx 2.35 \Delta R_p,$$

missä ΔR_p on engl. straggle.

Säätämällä ionien energiaa voidaan hallitusti tehdä seostuksia eri syvyyksille, ks. kuva.

Tietyissä kidesuunnissa ionit voivat kulkea substraatissa hyvin pitkkiä matkoja vähäisin törmäyksin. Tätä sanotaan kanavoitumiseksi. Kanavoituminen on yleensä haitallinen ilmiö, koska sitä ei voida kontrolloida riittävästi. Siksi implantoinnissa tehdään usein näytteenpitimiin 7° kallistus kanavoitumisen estämiseksi.



Implantoinnissa syntyy ionien ja kiteen atomien välisissä törmäyksissä erilaisia kidevikoja. Kevyet ionit jarruuntuvat enemmän elektronisissa törmäyksissä, mutta raskaat ionit taas törmäyksissään ytimiin, jolloin syntyy runsaasti kidevikoja. Tavallisimpia näin syntyviä kidevikoja ovat:

- vakanssit
- välisija-atomit ja
- amorfiset alueet

Raskaat energeettiset ionit voivat aiheuttaa ketjureaktion tapaisia kaskadeja, ja siten laajempia kidevikoja.

Implantoinnin aiheuttamien atomien siirtymien määrä on itse asiassa suurempi kuin implantoitujen atomien luku. Implantointi aiheuttaa siten epäjärjestystä siinä määrin, että tuloksena on kerros, jonka resistiivisyys on suuri ja se sisältää paljon loukkuja sekä rekombinaatiokeskuksia.

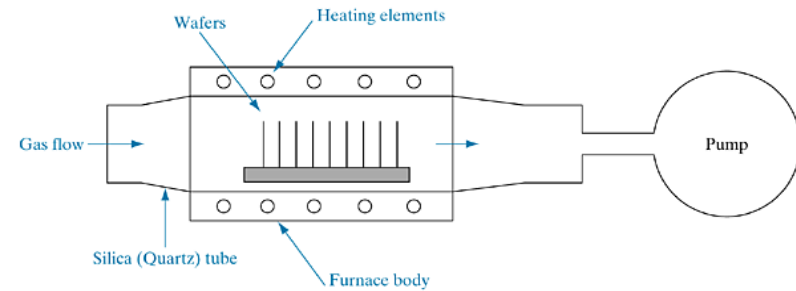
Lämpökäsittelyllä (engl. annealing), esim. 900 – 1000 °C noin 30 min ajan, voidaan palauttaa kiteen järjestys. Tällöin implantoituneet ionit tulevat korvausepäpuhtauksiksi ja aktivoituvat halutunlaisiksi donoreiksi tai akseptoreiksi. Joissakin tapauksessa lämpökäsiteltävä näyte (esim. GaAs) voidaan "kapseloida" höyrystymisen estämiseksi tai voidaan käyttää RTP-tekniikkaa.

Lämpökäsittelyn jälkeen

$$N(x) = \phi / [(2\pi)^{1/2} (\Delta R_p^2 + 2Dt)^{1/2}] \exp\{-1/2 [(x-R_p)^2 / (\Delta R_p^2 + 2Dt)]\}. \quad (5.1b)$$

5.1.5. Höyryfaasikasvatus CVD

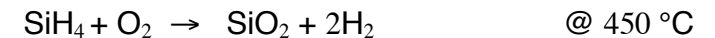
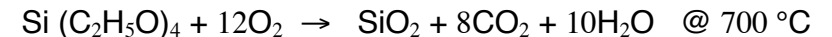
Höyryfaasikasvatuksella (engl. chemical vapor deposition, CVD) kasvatetaan mm. materiaaleja SiO₂ ja Si₃N₄, yleensä suojakerroksia, maskeja, metallikerrosten välisiä eristeitä. CVD:llä ei voida kasvattaa esim. kenttäoksidia tai hilaoksidia.



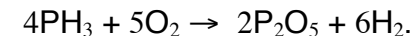
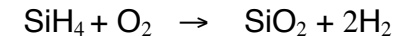
Erlaisia kasvatusmenetelmiä ovat mm.

- hot wall system (resistiivinen kuumennus)
- cold wall system (RF-kuumennus)
- ilmanpaineessa toimiva (APCVD)
- tyhjiössä toimiva (LPCVD)
- plasma-avusteinen (PECVD)

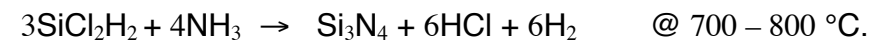
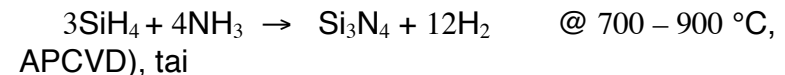
Piidioksidikalvot



Fosfosilikaattilasi, fosforilla seostettua piidioksidia



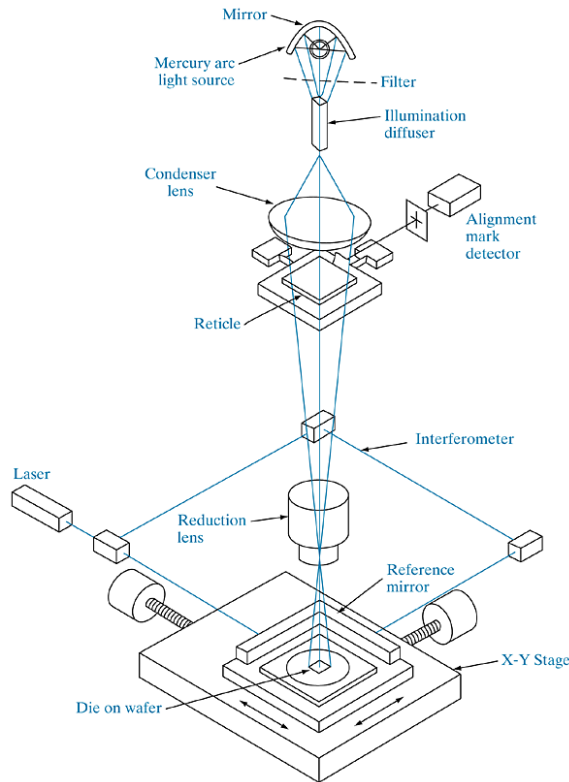
Piinitridikalvot, käytetään passivointiin. Ne estävät vesihöyryn ja natriumin diffuusion.



5.1.6. Fotolitografia

Fotolitografialla (engl. photolithography) tarkoitetaan eräänlaista valokuvaustekniikkaa, jolla siirretään halutut kuvat lastun pinnalle. Ensin valmistetaan ohut ns. resisti (orgaaninen polymeeri) esim. rautaoksidilla päällystetylle kvartsilevyllä.

Resistiä "valotetaan" halutulla tavalla ja sen jälkeen se kehitetään ja lopuksi siihen tehdyt kuvat syövytetään rautaoksidikerroksen läpi. Tätä (engl. reticle) käytetään kuvioden muodostamiseen kiekon pinnalle, ensin valottamalla kiekon pinnalla olevaa esim. fotesistiä syövyttämällä se ja sopivien käsittelyiden jälkeen seostamalla tai syövyttämällä alla olevaa puolijohdemaateriaalia tai kerrostamalla sen kuvioden läpi.



Resoluutio eli pienimpien yksityiskohtien "tarkkuus" (johtimien leveys, hilan pituus, jne.) riippuvat käytetystä tekniikasta, joissa kuvan voi muodostaa

- UV-valo < 0.25 μm
- röntgensäteet < 0.1 μm
- hiukkassuihkut

Resoluutiota rajoittavat diffraktio

$$I_{\min} = 0.8 \lambda / NA, \quad (5-2a)$$

missä λ on valon aallonpituus ja NA käytetyn optiikan "numeerinen aperttuuri", sekä "fokuksen syvyys" (engl. depth-of-focus)

$$\text{DOF} = \lambda / 2(\text{NA})^2. \quad (5-2b)$$

Hiukkassuihkuilla päästään valon aallonpituutta paljon pienempiin (de Broglie-) aallonpituuksiin

$$\lambda = h / p. \quad (5-2c)$$

Esim. 10 keV elektroneille $\lambda \approx 0.1 \text{ \AA}$.

5.1.7. Syövytysmenetelmät (etching)

Märkäsyövytys

Piini märkäsyövytyksessä on kolme osaa:

- oksidoija, esim. HNO_3
- kompleksoija, esim. HF
- liuotin, esim. vesi

Oksidoija oksidoi piiniä, kompleksoija muuttaa molekyyliyrakenteen sellaiseksi yhdisteeksi, että se liukenee liuottimeen. Piini tapauksessa reaktiot ovat (liuos $\text{HNO}_3 : \text{HF} : \text{H}_2\text{O}$)

- oksidointi: $2\text{HNO}_3 + \text{Si} \rightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{NO}_2 + \text{H}_2$
- oksidin syövytys: $\text{SiO}_2 + 6\text{HF} \rightarrow \text{H}_2\text{SiF}_6 + 2\text{H}_2\text{O}$

Pelkän SiO_2 :n syövytykseen käytetään usein bufferoitua HF-happoa ($\text{HF} : \text{NH}_4\text{F} : \text{H}_2\text{O}$), jonka syövytysnopeus on paremmin vakio. HF-liuoksia voidaan käyttää myös Si_3N_4 -kalvojen syövytykseen. Näitä voidaan syövyttää selektiivisesti H_3PO_4 -liuosten avulla (ei syövytä SiO_2 :ta).

GaAs:n syövytys tehdään usein liuoksella ($\text{H}_2\text{O} : \text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}$).

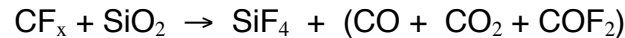
Kuivasyövytys

Tavallisimmat menetelmät:

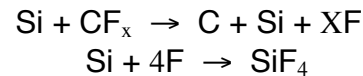
- sputterointi ("mekaaninen ionipommitus")
- reaktiivinen plasmasyövytys (kemialliset reaktiot)
- edellisten yhdistelmä: reaktiivinen ionietsaus (RIE)

Tyypillisiä kuivasyövytysreaktioita:

Piidioksidi:



Pii:

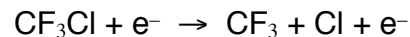


Edellisissä reaktioissa syntyvä piitetrafluoridi (SiF_4) on haihtuva yhdiste.

CF_x -radikaaleja voidaan valmistaa esim. ionisoimalla freonikaasua CF_4



tai klooriyhdisteestä CF_3Cl



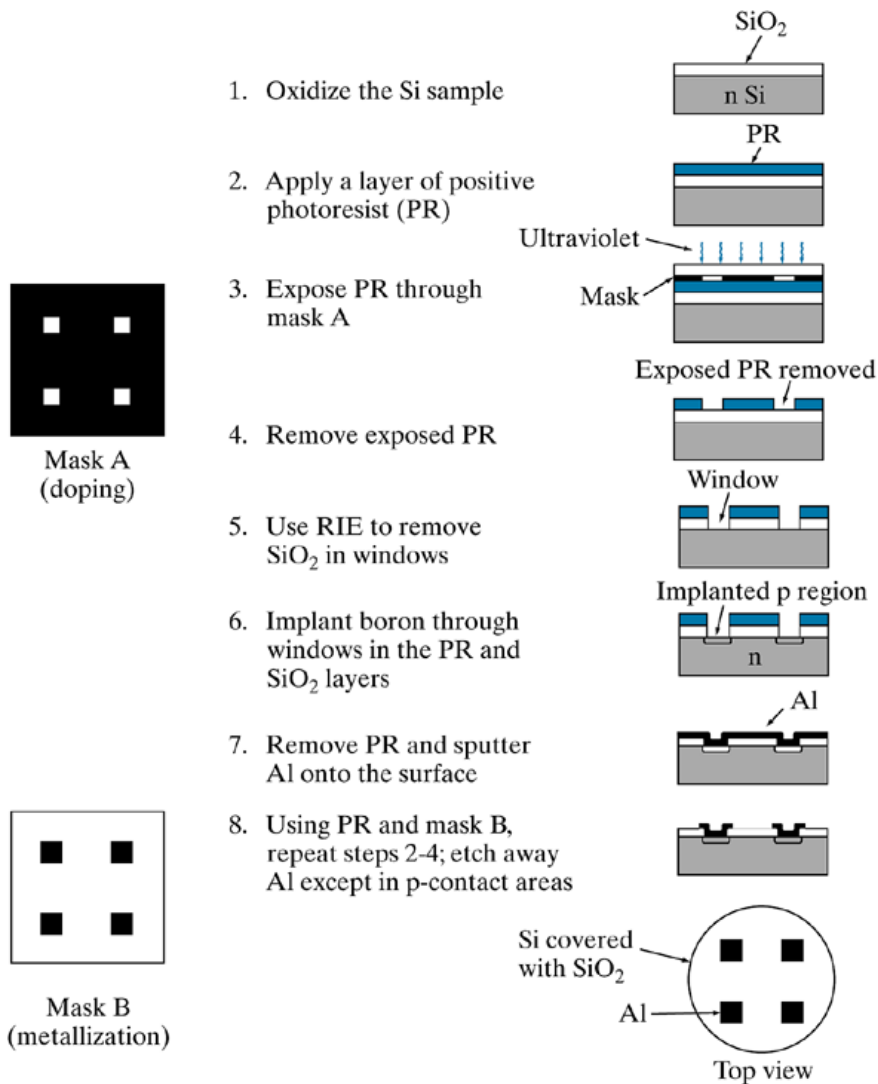
Märkä ja kuivasyövytyksen vertailua

5.1.8. Metallointi

Metalloinnilla tarkoitetaan lähinnä kontaktien valmistamista kielel- kelle prosessoituihin komponentteihin. Metalloinnissa on oleellista löytää sellainen metalli, joka ei tunkeudu puolijohdeeseen liian syväälle. Siksi metalli-puolijohde-faasidiagrammien tuntemus on oleellista.

Metalloinnissa yleensä kiinnostavat binääriset ja ternääriset faasidiagrammit eli 2- ja 3-komponentti-diagrammit. Tarkastellaan esimerkkinä 2-komponenttiseoksen $\text{Si}_{0.47}\text{Ge}_{0.53}$ faasidiagrammia:

Jos seoksen alkuaik- neiden atomit ovat hyvin erilaisia, ne eivät liukene hyvin toisiinsa ja tuloksena voi olla ns. *eutek- tinen seos* (engl. eutectic system, kreik. = helposti sulava). IC-tekniikassa käytetyistä sellaisia ovat mm. Au-Si, Al-Si ja Pb-Sn.



Kuva 5–10

5.2. JÄNNITTEETÖN p–n-LIITOS

Pn-liitos (engl. pn junction) on tärkein toiminnallinen osa monissa puolijohdekomponenteissa. Tarkastellaan seuraavassa jyrkkää (engl. sharp, step junction) pn-liitosta, jollainen saadaan valmistettua esim. MBE-tekniikalla. Diffuusiotekniikalla valmistetut liitokset ovat enemmänkin asteittaisia, koska toinen seostuksista muuttuu "vähitellen" (engl. graded).

5.2.1. Liitospotentiaali

Liitoksessa muodostuu potentiaalivalli (engl. barrier) qV_0 tai liitospotentiaali (engl. contact potential) varauksenkuljettajille, kun p- ja n-osien Fermi-tasot asettuvat samaan potentiaaliin.

Vallin voidaan sanoa syntyvän liitoksen läpi tapahtuvan varauksenkuljettajien diffuusion aiheuttaman varausepätasapainon seurauksena, sillä varausepätasapaino muodostaa varausepätasapainoa vastustavan potentiaalivallin V_0 .

Tasapainotilanteeseen päästään siis silloin, kun liitospotentiaali on kasvanut niin suureksi, että sen aiheuttamat drift-virrat kumoavat enemmistövarauksenkuljettajien diffuusiovirrat. Tällöin enemmistövarauksenkuljettajia ei käytännöllisesti katsoen ole enää liitospinnan välittömässä läheisyydessä. Tätä aluetta sanotaan *tyhjennysalueeksi* (engl. depletion region, space charge region, transition region).

Tasapainossa virtojen summa häviää kaikkialla. Itse asiassa molemmille varauksenkuljettajatyypeille erikseen

$$J_p^{\text{drift}} + J_p^{\text{diff}} = 0 \quad (5-3a)$$

ja

$$J_n^{\text{drift}} + J_n^{\text{diff}} = 0. \quad (5-3b)$$

Tästä seuraa aukoille, että

Koska $p_n n_n = n_i^2$ ja $n_n \approx N_d$, niin

$$V_0 = kT/q \ln (N_a N_d / n_i^2). \quad (5-8)$$

Toisaalta yhtälöstä (5-7) saadaan myös

$$p_p / p_n = e^{qV_0 / kT} \quad (5-9)$$

ja

$$n_n / n_p = e^{qV_0 / kT}. \quad (5-10)$$

Esim. 5-1. Tarkastele piin jyrkkää pn-liitosta, jossa p-puolella $N_a = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ja n-puolella $N_d = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Laske lämpötilassa 300 K Fermi-tasojen paikat molemmilla puolilla kaukana liitoksesta. Määritä liitospotentiaali sekä Fermi-tasojen avulla että yhtälön (5-8) avulla.

Siten

$$V_0 = kT/q \ln (p_p / p_n). \quad (5-7)$$

5.2.2. Tasapainotilan Fermi-tasot

Yhtälön (3–19) $p = N_v e^{-(E_F - E_v)/kT}$ avulla saadaan yhtälöstä (5–9)

ja edelleen

$$e^{qV_0/kT} = \exp[(E_{F_n} - E_{F_p})/kT] \exp[(E_{v_p} - E_{v_n})/kT] \quad (5-11b)$$

Koska tasapainossa ja ilman ulkoista jännitettä $E_{F_n} = E_{F_p}$, niin

$$qV_0 = E_{v_p} - E_{v_n}. \quad (5-12a)$$

Samoin tietysti myös

$$qV_0 = E_{c_p} - E_{c_n}. \quad (5-12b)$$

5.2.3. Liitoksen tyhjennysalue

Tarkastellaan varausjakautumaa, sähkökenttää ja potentiaalia liitoksen tyhjennysalueella.

Varaustasapainon vuoksi

$$qAx_{p0} N_a = qAx_{n0} N_d, \quad (5-13)$$

missä tyhjennysalueen paksuus on $W = x_{p0} + x_{n0}$. Ratkaistaan sähkökentän lauseke Poissonin yhtälöstä

$$d\mathcal{E}(x)/dx = q/\epsilon (p - n + N_d^+ - N_a^-). \quad (5-14)$$

Liitospotentiaalille ja liitosalueen paksuudelle saadaan siis relaatio

$$V_0 = -1/2 \mathcal{E}_0 W = 1/2 q/\epsilon N_d x_{n0} W. \quad (5-19)$$

Edelleen

Esim. 5–2. Tarkastele piin pn-liitosta 300 K lämpötilassa, kun $N_d = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ja $N_a = 4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Määritä edellä esitetyt liitoksen parametrit ja fysikaaliset suureet.

5.3. JÄNNITTEELLINEN pn-LIITOS TASAPAINOTILANTEESSA

Tarkastellaan seuraavaksi myötä- ja estosuuntiin esijännitteisiä pn-liitoksia, jolloin nähdään mm. liitoksen tasasuuntausominaisuus ja ns. diodin toiminta.

5.3.1. Kvalitatiivinen tarkastelu

Puolijohdelliitoksen yli kytketty jännite vaikuttaa oleellisesti vain liitosalueella (ja mahdollisesti kontakteissa) elleivät jännitteet ole merkittävän suuria.

Ulkoiset jännitteet "kytkettyvät puolijohdeiden Fermi-energioihin" ja siten joko pienentävät (myötäsuuntainen) tai suurentavat (estosuuntainen) sekä liitospotentiaalia että liitosalueen paksuutta.

Driftvirrat ovat melko riippumattomia potentiaalivallin korkeudesta, kun taas diffuusiovirrat riippuvat siitä voimakkaasti. Myötäsuuntaisessa kytkennässä diffuusiokomponentit ovat dominoivia.

Ns. *generaativirta* (engl. generation current) aiheutuu liitosalueella syntyvien varauksenkuljettajien seurauksena. Tämä on merkittävä komponentti estosuuntaisessa kytkennässä.

Jännitteettömässä tilanteessa diff/drift- ja generaativirtojen voidaan katsoa kumoavan toisensa

$$I^{\text{diff/drift}} - I^{\text{gen}} = 0. \quad (5-24)$$

Virta-jännite-riippuvuus voidaan esittää ns. ideaalisen diodin virtayhtälönä

$$I = I^{\text{gen}} [\exp(qV/kT) - 1]$$

5.3.2. Vähemmistövarauksenkuljettajien injektio; myötäsuuntainen jännite

Tarkastellaan aukkokonsentraatiota p_n -liitoksen molemmiin puoliin. Yhtälön (5–10) mukaan jännitteettömässä tapauksessa

$$p_p/p_n = e^{qV_0/kT}, \quad (5-26)$$

ja kun jännite on V , niin

$$p_p(-x_{p0}) / p_n(x_{n0}) = e^{q(V_0-V)/kT}. \quad (5-27)$$

Edellisten yhtälöiden suhteena saadaan vähemmistövarauksenkuljettajien (vvk) eli tässä aukkojen konsentraation suhteellinen muutos n-puolella, kun $p_p(-x_{p0}) \approx p_p$,

$$p_n = e^{qV/kT} \cdot \frac{p(x_{n0})}{p_p} \quad (5-28)$$

Siten siis myötäjännite lisää vvk-konsentraatiota merkittävästi tyhjennysalueen ulkopuolella. Tätä sanotaan *injeksioksi* (engl. injection).

Myötäjännitteen aiheuttama aukkojen injektio n-puolelle on siten yht. (5–28) mukaan

$$\Delta p_n = p(x_{n0}) - p_n = p_n (e^{qV/kT} - 1) \quad (5-29)$$

ja samoin elektronien injektio liitosalueen läpi p-puolelle

$$\Delta n_p = n(-x_{p0}) - n_p = n_p (e^{qV/kT} - 1). \quad (5-30)$$

Injektoidut vvk:t diffundoituvat ja rekombinoituvat, kuten kappa-
leessa 4.4.4 esitetään. Siten yht. (4–36) tavalla

$$\delta n(x_p) = \Delta n_p e^{-x_p/L_n} \quad (5-31a)$$

ja

$$\delta p(x_n) = \Delta p_n e^{-x_n/L_p}. \quad (5-31b)$$

Aukkojen aiheuttama virta on yht. (4–40) mukaan

$$I_p(x_n) = -q A D_p d\delta p(x_n)/dx_n = q A D_p/L_p \Delta p_n e^{-x_n/L_p}, \quad (5-32)$$

ja juuri tyhjennysalueen reunalla ($x_n = 0$),

$$I_p(x_n=0) = q A D_p/L_p \Delta p_n. \quad (5-33)$$

Samoin elektronien aiheuttamalle virralle p-puolelle

$$I_n(x_p=0) = -q A D_n/L_n \Delta n_p. \quad (5-34)$$

Jos rekombinaatiovirtaa transitoalueella ei oteta huomioon
(pienenä), niin kokonaisvirta on kahden edellisen summa

$$I = I_p(x_n=0) - I_n(x_p=0) = q A [D_p/L_p \Delta p_n + D_n/L_n \Delta n_p], \quad (5-35)$$

josta yhtälöiden (5–29) ja (5–30) avulla saadaan *diodiyhtälö*
(engl. diode equation)

$$I = q A [D_p/L_p p_n + D_n/L_n n_p] (e^{qV/kT} - 1) = I_0 (e^{qV/kT} - 1). \quad (5-36)$$

Diodiyhtälön johtamisessa ei tehty mitään oletuksia, jotka eivät
soveltuisi myös estosuuntaiselle jännitteelle $V = -V_r$. Siten
esim. estosuuntainen saturaatiovirta saadaan diodiyhtälöstä,

$$I_0 = q A [D_p/L_p p_n + D_n/L_n n_p]. \quad (5-37)$$

Diodiyhtälöstä nähdään, että kertoimena olevassa I_0 -tekijässä
on merkittävintä p_n tai n_p sen mukaan kumpi tulee vahvemmas-
ta seostuksesta ja on siten suurempi. Merkittävää on siis
injektoitujen vvk:n ylimäärä, johon voidaan vaikuttaa myös
enemmistöseostusta vähentämällä.

Tyhjennysalueella, jossa kvasi-Fermi-tasot eivät yhdy pätee

$$n_p = n_i^2 \exp([F_n - F_p] / kT) = n_i^2 \exp(qV / kT). \quad (5-38)$$

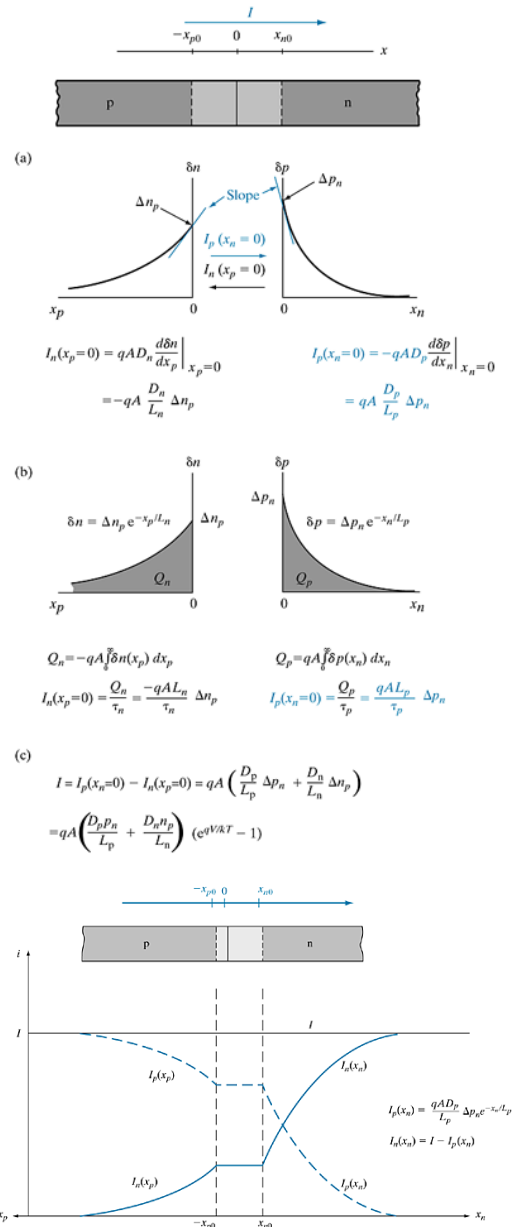
Siten liitoksen yli kytketyllä jännitteellä muutetaan generaatio–
rekombinaatio-tasapainoa.

Seuraavalla sivulla olevassa kuvassa, kohdassa (a), on ha-
vainnollistettu diodiyhtälön johtoa ja virran syntyä vvk-injektion
ja sen aiheuttaman vvk-gradientin seurauksena.

Oheisen kuvan kohdassa (b) on esitetty toinen tapa diodivirran selittämiseksi: Tarkastellaan vvk-konsentraation rekombinaatiota tyhjennysalueen ulkopuolella ja määritetään rekombinaation ylläpitämiseksi tarvittava virta.

Pn-liitoksen ulkopuolella vvk-virta muuttuu rekombinaatioiden seurauksena muutaman diffuusiopi- tuuden matkalla miltei kokonaan enemmistö- varauksenkuljettajien vir- raksi.

Kun edellä esitetyllä ta- valla määritetään vvk-vir- ta, saadaan enemmistövarauksen- kuljettajien osuus vähentämällä em. koko- naisvirrasta, ks. kirjan esimerkki 5–3.



5.3.3. Estosuuntainen jännite

Virta ja varauksenkuljettajakonsentraatiot estosuuntaisen jännitteen tapauksessa saadaan edellä esitetyistä yhtälöistä asettamalla $V = -V_r$. Näin esimerkiksi yhtälöstä (5–29)

$\Delta p_n = p_n (e^{qV/kT} - 1)$ saadaan

$$\Delta p_n = p_n (e^{-qV_r/kT} - 1) \approx -p_n$$

ja samoin

$$\Delta n_p \approx -n_p.$$

(5–41)

Siten $p(x_n=0) = p_n + \Delta p_n \approx 0$ ja $n(x_p=0) = n_p + \Delta n_p \approx 0$. Tämä on **vvk-injektioille vastakkainen ilmiö**, engl. *minority carrier extraction*. Se on seurausta liitoksessa lisääntyneestä drift-virrasta, jota diffuusio-virta ei kompensoi.

Tyhjennysalueella voidaan nyt yhtälön (5–38) tapaan kirjoittaa

$$np = n_i^2 \exp([F_n - F_p] / kT) \approx 0, \quad (5-42)$$

myötäjännitteen yhtälöä (5–38) vastaavasti.

5.4. ESTOSUUNTAINEN LÄPILYÖNTI

Jos diodin estosuuntainen jännite kasvaa riittävän suureksi, tapahtuu ns. läpilyönti (engl. reverse breakdown). Läpilyönti ei välttämättä vahingoita diodia, jos virtaa rajoitetaan niin, etteivät ohmiset häviöt kuumenna liitosta liiaksi. Läpilyönti-ilmiötä voidaankin itse asiassa käyttää hyväksi esim. jännitteen "reguloinnissa".

Läpilyöntejä on kahta päätyyppiä: Zener-ilmiö ja avalanche-läpilyönti.

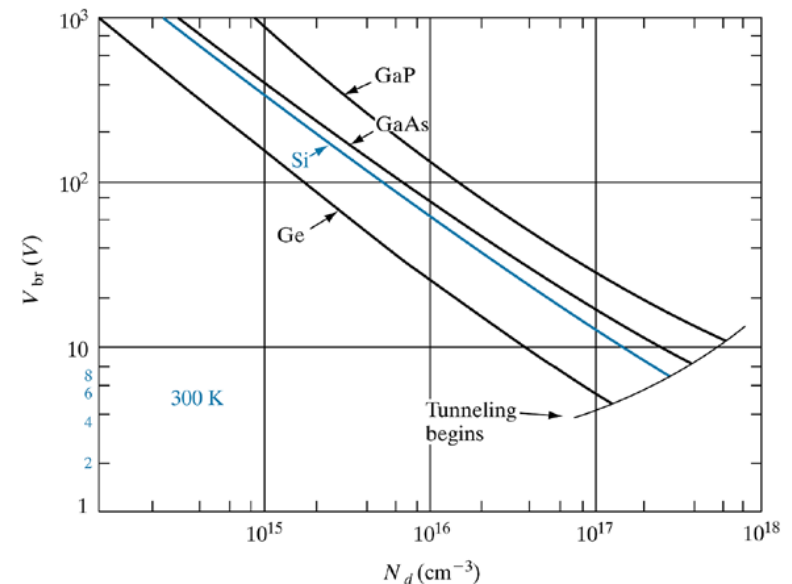
5.4.1. Zener-läpilyönti

Zener-läpilyönti voi tapahtua suurilla seostuksilla, jolloin tyhjennysalue on ohut. Tällöin **varauksenkuljettajat voivat tunneloitua tyhjennysalueen läpi**, kun p-puolen valenssikaistan yläreunan elektronien energiatasot tulevat samalle korkeudelle kuin n-puolen johtavuuskaistan alareunan elektronien energiatasot.

5.4.2. Avalanche-läpilyönti

Avalanche-läpilyönti (vyöryilmiö) tapahtuu, kun varauksenkuljettajat saavat liitosalueen suuressa sähkökentässä riittävästi energiaa irroittaakseen atomeista törmäyksillään lisää varauksenkuljettajia.

Yleisesti avalanche-läpilyöntijännite kasvaa, kun puolijohteen kaistarako kasvaa, koska suuremman kaistaraon tapauksessa tarvitaan enemmän energiaa irrottamaan varauksenkuljettajia. Seostuksen kasvaessa taas läpilyöntijännite alenee, koska liitosalueen suurin sähkökenttä kasvaa seostuksen kasvaessa.



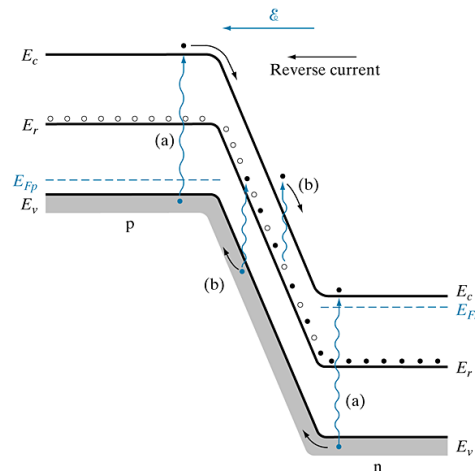
5.5. VAIHTOJÄNNITEVASTE

Diodin yli kytketyn vaihtojännitteen tarkastelussa on otettava huomioon varausten siirtymisten aikavakiot. Tärkein suure on pn-liitoksen kapasitanssi.

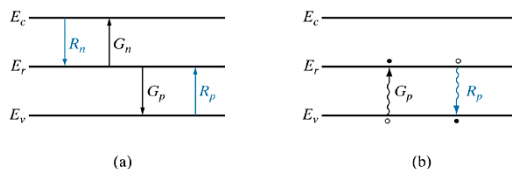
5.6. TÄSMENNYKSIÄ YKSINKERTAISIIN MALLEIHIN

Edellä esitetyissä yksinkertaisissa malleissa ei otettu huomioon liitospotentiaalin ja enemmistövarauksenkuljettajien muutosten vaikutuksia injektioon, rekombinaatioon ja generaatioon liitosalueella. Myöskään ohmisten efektien tarkastelua ei tehty. Lisäksi oletettiin pn-liitosten olevan jyrkkiä, mikä on huono approksimaatio diffusiomallilla valmistetuille liitoksille.

Käytännössä tulisi myös epäpuhtauksien vaikutus rekombinaatiokeskuksina ottaa huomioon.



R_n — Electron capture
 R_p — Hole capture
 G_n — Electron generation
 G_p — Hole generation



5.7. METALLI–PUOLIJOHDELIITOKSET

Monet pn-liitoksen käyttökelpoiset ominaisuudet kuten tasa-suuntaavuus voidaan toteuttaa paljon helpommin valmistettavilla metalli–puolijohdeliitoksilla. Metalli–puolijohdeliitosten vasteajat ovat tyypillisesti myös paljon lyhyemmät.

Metalli–puolijohdeliitosten ominaisuuksien tunteminen on tärkeää myös siksi, että niitä tarvitaan komponenttien kytkemiseksi ulkoisiin jännitteisiin.

5.7.1. Schottky-liitos

Metallin tai puolijohteen Fermi-tason etäisyyttä vakuumitasosta sanotaan *työfunktiksi* $q\Phi_m$ ja $q\Phi_s$ (engl. work function). Se on energia, joka tarvitaan elektronin irrottamiseen metallista tai puolijohteesta. Tyypillisesti metalleilla $q\Phi_m \approx 4 - 5$ eV. Käytännössä, kun metallipinnan lähelle tuodaan negatiivinen varaus, idusoituu metallin pintaan positiivinen "image charge", joka tavallaan alentaa työfunktia. Tätä sanotaan Schottky-ilmiöksi.

Tarkastellaan metallin ja n-tyyppisen puolijohteen liitosta sellaisessa tapauksessa, että $\Phi_m > \Phi_s$:

Liitosalue syntyy siis samalla periaatteella, kuin pn-liitoskin, paitsi ettei metallin puolelle synny tyhjennysaluetta. Nähdään, että liitospotentiaali V_0 muodostaa kynnyksen $qV_0 = q(\Phi_m - \Phi_s)$ elektroneille puolijohdeesta metalliin. Metallin puolelta puolijohdeeseen taas kynnyks on äkkijyrkkä ja $q\Phi_B = q(\Phi_m - \chi)$, missä χ on puolijohdeeseen *elektroniaffiniteetti* (engl. electron affinity). Puolijohdeeseen tyhjennysalueen leveys saadaan liitospotentiaalilla avulla esim. yhtälöstä (5–20) tai (5–21) p+n-approksimaatiolla eli merkitsemällä, että $N_a = \infty$. Tällöin

$$W = [2\varepsilon V_0 / qN_d]^{1/2}.$$

Tarkastellaan seuraavaksi metallin ja p-tyyppisen puolijohdeeseen liitosta sellaisessa tapauksessa, että $\Phi_m < \Phi_s$. Tässä tapauksessa siirtyy elektroneja metallista puolijohdeeseen päin, päin vastoin kuin edellisessä tapauksessa. Aukkojen kannalta tyhjennysalue toimii kuitenkin samoin vallina metalliin päin siten, että $qV_0 = q(\Phi_s - \Phi_m)$.

5.7.2. Tasasuuntaavat liitokset

Edellisen kappaleen Schottky-liitokset, n: $\Phi_m > \Phi_s$ ja p: $\Phi_m < \Phi_s$ toimivat tasasuuntaajina. Tarkastellaan metalli–n-liitosta:

Myötäsuuntaista kynnystä voidaan pienentää ulkoisella jännitteellä V samaan tapaan kuin pn-liitoksessakin arvoon $q(V_0 - V)$. Estosuuntainen kynnyks sen sijaan on aina $q(\Phi_m - \chi)$. Virta–jännite-ominaiskäyrä on diodiyhtälön (5–36) mukainen

$$I = I_0 (e^{qV/kT} - 1). \quad (5-79)$$

Koska estosuuntainen kynnyks on vakio $q\Phi_B = q(\Phi_m - \chi)$, voidaan päätellä, että

$$I_0 \propto \exp(-q\Phi_B / kT). \quad (5-80)$$

Metalli–p-liitoksessa tasasuuntaavuus on myös ilmeinen. Molemmissa tapauksissa myötävirtaa kuljettavat puolijohdeeseen enemmistövarauksenkuljettajat ja siksi toiminta on nopeaa verrattuna pn-liitokseen.

Schottky-liitosten valmistaminen fotolitografiatekniikoilla on myös helpompaa kuin pn-liitosten valmistaminen.

5.7.3. Ohmiset liitokset

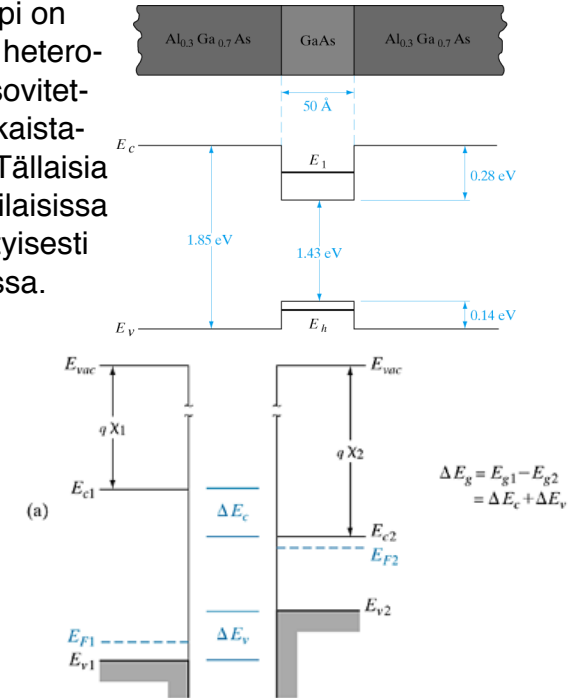
Ohminen metalli-puolijohde-liitos, jonka V-I-ominaiskäyrä on likimain lineaarinen, saadaan aikaan jos työfunktiot valitaan siten, että n: $\Phi_m < \Phi_s$ ja p: $\Phi_m > \Phi_s$. Tällöin puolijohdeeseen ei synny tyhjennysalueita, vaan enemmistövarauksenkuljettajien ylimäärä sen sijaan.

Toinen paljon käytetty menetelmä on puolijohdeen hyvin voimakas seostus, jolloin mahdollinen tyhjennysalue on niin ohut, että varauksenkuljettajat voivat tunnetoitua helposti sen läpi.

Myös eutektisia seoksia voidaan käyttää ohmisina kontakteina tai seostusaineena käytettyä metallia diffusoituna puolijohdeeseen, esim. Au(+Sb) n-tyyppiseen piihin ja Al p-tyyppiseen piihin.

5.8. HETEROLIITOKSET

Edellä on tarkasteltu *pn-homoliitoksia* (engl. homojunction), joissa p- ja n-tyypin puolijohdeet ovat samaa materiaalia seostusta lukuunottamatta, sekä metalli-puolijohde-liitoksia. Kolmas tärkeä liitostyyppi on *heteroliitokset* (engl. heterojunction), joissa hilasovitetujen puolijohdeiden kaistaraot ovat erisuuret. Tällaisia liitoksia käytetään erilaisissa transistoreissa ja erityisesti kvanttikaivorakenteissa.



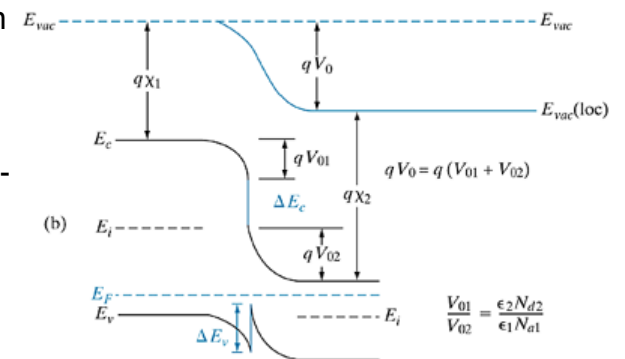
Nähdään, että ideaalisessa tapauksessa johtavuus- ja valenssikaistojen epäjatkuvuuksille on voimassa

$$\Delta E_c = q(\chi_2 - \chi_1) \text{ ja}$$

$$\Delta E_v = \Delta E_g - \Delta E_c.$$

Tämä on ns. *Ander-sonin affiniteetti-sääntö*, joka on vain likimääräinen.

Käytännössä epäjatkuvuudet on määritettävä kokeellisesti.



$$\Delta E_g = E_{g1} - E_{g2} = \Delta E_c + \Delta E_v$$

$$\frac{V_{01}}{V_{02}} = \frac{\epsilon_2 N_{d2}}{\epsilon_1 N_{a1}}$$

Tyhjennysalueiden syntyminen riippuu puolijohteiden seostuksista. Tällöin on otettava huomioon myös puolijohteiden erilaiset permittiivisyydet ϵ_1 ja ϵ_2 . Tästä seuraa, ettei sähkökenttä ole jatkuva, mutta sen vuo on, $\epsilon_1 \mathcal{E}_1 = \epsilon_2 \mathcal{E}_2$. Liitospotentiaali jakautuu myös sekä seostusten että permittiivisyyksien suhteessa.

Esim. 5–6. Hahmottele $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ – GaAs -liitoksen kaavio N^+ - N -liitoksen ja AlGaAs – GaAs -kvanttikaivorakenteen tapauksissa, kun tiedetään, että $\Delta E_c \approx 2/3 \Delta E_g$.

Sopivasti suunnitellulla heteroliitoksella saadaan liitokseen loukkuunnetuksi kaksidimensioiden elektronikaasu, jolla voi olla poikkeuksellisen suuri liikkuvuus. Tämä on seurausta siitä, että varauksenkuljettajat ovat peräisin vahvasti seostetusta puolijohteesta, mutta ne ovat loukkuuntuneet vähemmän seostettuun puolijohteeseen liitoksen toiselle puolelle, jossa liikkuvuutta alentava sironta on vähäisempää.

6. Kanavatransistorit

Tarkastellaan seuraavaksi kanavatransistorien (engl. field-effect transistor, FET) rakennetta ja toimintaperiaatteita lyhyesti. Kanavatransistorin *lähteen* (engl. source) ja *nielun* (engl. drain) yhdistää *kanava* (engl. channel), jossa kulkevaa virtaa voidaan ohjata *hilan* (engl. gate) jännitteellä.

Kanavatransistoreja on useita tyyppejä:

Liitoskanavatransistori (junction-FET, JFET)

JFETissä toiminta perustuu siihen, että estosuuntaan biasoidun hilan alle muodostuu tyhjennysalue, jonka paksuutta ja siten siinä kulkevaa virtaa I_{SD} hilajännitteellä V_G ohjataan. Kanavan resistanssi on kääntäen verrannollinen kanavan paksuuteen.

MESFET (Metal–semiconductor-FET, Schottky FET)

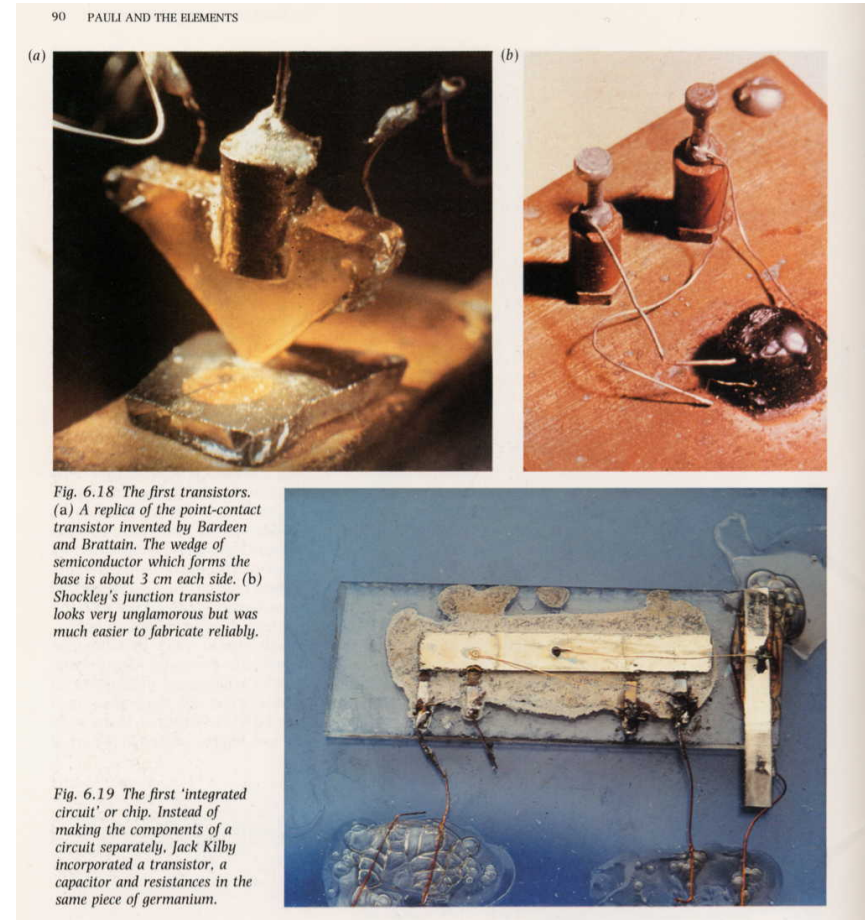
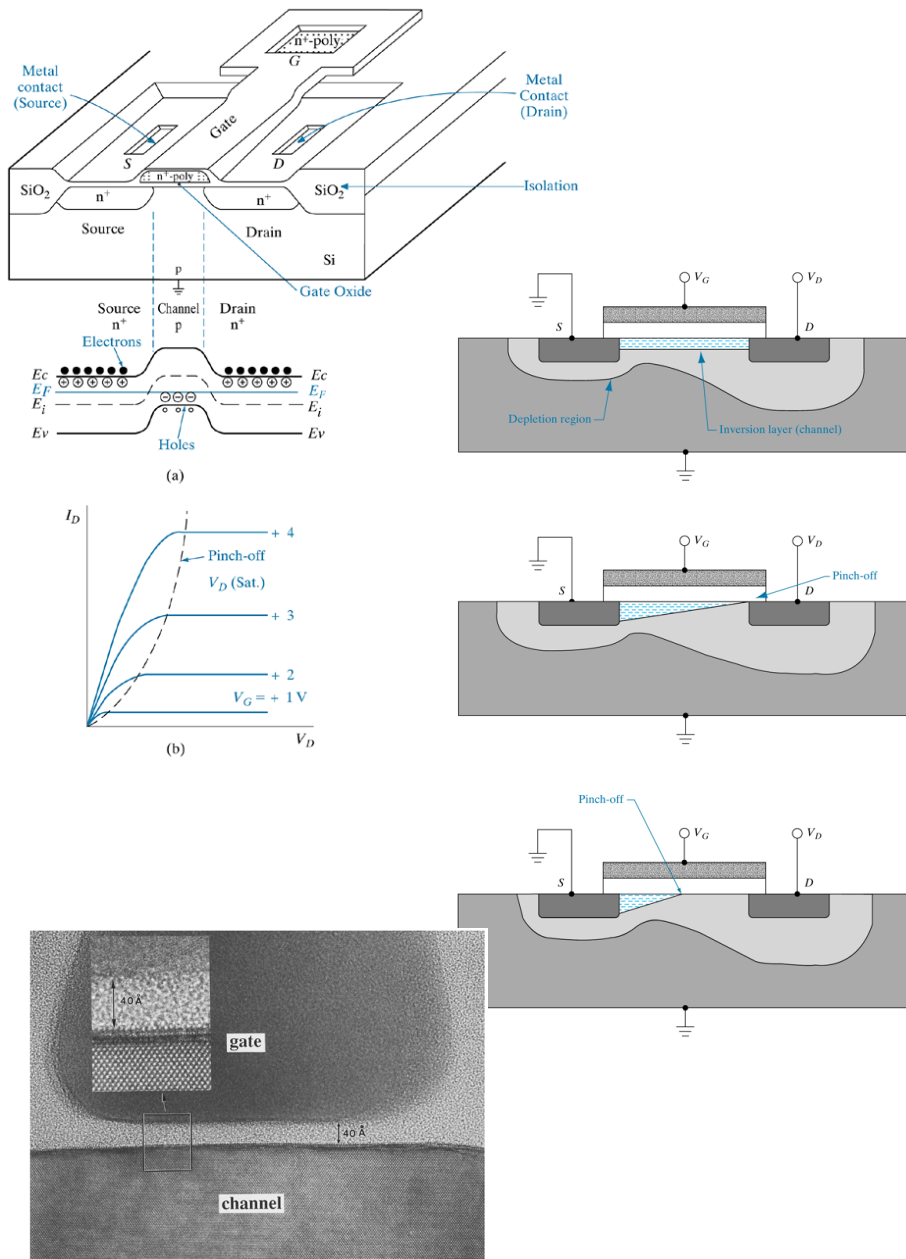
Metalli-puolijohdeliitos ja siihen liittyvä tyhjennysalue toimivat samalla tavalla kuin JFET edellä.

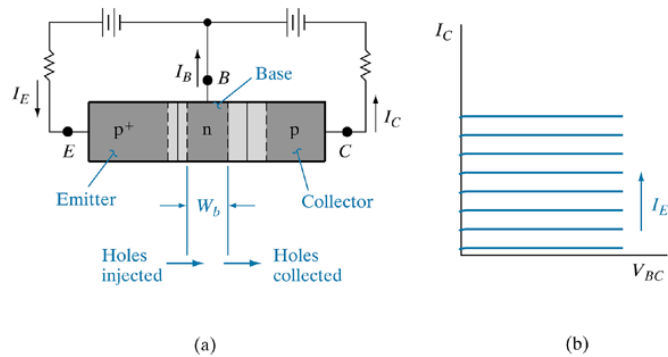
Metallioksidi–puolijohde FET (MOSFET)

Insulated-gate FET (IGFET, MISFET) rakenteessa hila on eristetty (oksidikerros => MOSFET) kanavasta, joka syntyy hilajännitteen indusoimana.

/ Bipolaaritransistorit

Bipolaaritransistori "keksittiin" (Bardeen ja Brattain v. 1947; Shockley; Nobel 1956) ennen kanavatransistoria, jota taas Lilienfeld oli ehdottanut jo aikaisemmin (v. 1930).

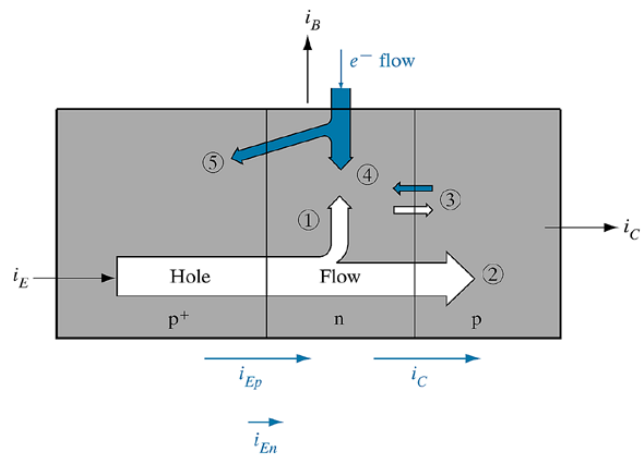




Bipolaaritransistorin toiminta perustuu injektoitujen vähemmistövarauksenkuljettajien liikkeeseen liitosalueiden läpi. Siinä sekä enemmistö että vähemmistövarauksenkuljettajien rooli on tärkeä, josta tulee nimitys *bipolaari*. Siksi kanavatransistoreita, joissa toiminta perustuu vain enemmistövarauksenkuljettajien liikkeeseen, sanotaan joskus homopolaaritransistoreiksi.

Tavallaan bipolaaritransistoria ohjataan virralla, kun taas kanavatransistoria jännitteellä.

Molempia transistorityyppejä käytetään vahvistimina ja kytkiminä.



8. Optoelektroniikkaa

Tarkastellaan seuraavaksi valon ja (puolijohde)materiaalien vuorovaikutusta sekä siihen perustuvia sovellutuksia. Sellaisia ovat *aurinkokennot*, *detektorit* ja *valolähteet*, joista jälkimmäiset ovat optoelektroniikan peruskomponentteja. Edelliset muuttavat sähkömagneettisen säteilyn energiaa sähköiseen muotoon, kun taas valolähteet, valoa emittoivat diodit (engl. *light-emitting diode, LED*) ja laserit (engl. *light amplification by stimulated emission of radiation. LASER*) tekevät päinvastoin.

8.1. FOTODIODIT

Fotodiodi eli valodiodi on pn-liitos, jossa varauksenkuljettajien määrä riippuu herkästi liitosalueelle absorboituvan valon intensiteetistä. Generoidut varauksenkuljettajat lisäävät voimakkaasti pn-liitoksen estosuuntaista virtaa. Tähän ilmiöön perustuvia komponentteja voidaan käyttää valon ilmaisimina ja valoenergian muuttamiseen sähköiseen muotoon aurinkokennoissa.

8.1. Fotodiodin virta–jännite-ominaiskäyrä

Liitosalueelle W tai diffuusiopituutta L lähemmäksi liitosaluetta generoituvat vvk:t joutuvat osaksi liitospotentiaalın aiheuttamaa drift-virtaa. Tällaisten absorboituvien fotonien ($h\nu > E_g$) aiheuttama elektroni–aukko-parien generaatio liitosalueella on $g_{op}WA$ ja sen välittömässä läheisyydessä $g_{op}LA$, missä g_{op} on generaationopeus ja A liitoksen efektiivinen poikkileikkauksen pinta-ala.

Siten absorption aiheuttama lisäys estosuuntaiseen virtaan on

$$I_{op} = qAg_{op}(L_p + L_n + W). \quad (8-1)$$

Diodiyhtälön (5–36) $I = I_{th}(e^{qV/kT} - 1)$ estosuuntainen saturaatiovirta on termistä alkuperää, joten merkitään

$$\begin{aligned} I_{th} &= qA [D_p p_n / L_p + D_n n_p / L_n] \\ &= qA [L_p p_n / \tau_p + L_n n_p / \tau_n]. \end{aligned} \quad (5-37)$$

Koska $L = (D\tau)^{1/2}$, niin $D_p/L_p = L_p/\tau_p$ ja $D_n/L_n = L_n/\tau_n$. Siten optisen absorption vaikuttaessa kokonaisvirta on

$$\begin{aligned} I &= I_{th}(e^{qV/kT} - 1) - I_{op} \\ &= qA [L_p p_n / \tau_p + L_n n_p / \tau_n] (e^{qV/kT} - 1) - qAg_{op}(L_p + L_n + W). \end{aligned} \quad (8-2)$$

Tämän mukaan valaistuksen ja optisen generaation seurauksena diodiyhtälön I – V -käyrä siirtyy I_{op} verran alaspäin.

Käyrästä on luettavissa virta silloin, kun $V = 0$ (oikosulku, sc), ja toisaalta pn-liitoksen ulkoinen jännite silloin, kun $I = 0$ (avoin piiri, oc).

Oikosulkuvirta I_{sc} (short circuited) saadaan yhtälöstä (8–2)

$$I = qA [L_p p_n / \tau_p + L_n n_p / \tau_n] (e^{qV/kT} - 1) - qA g_{op} (L_p + L_n + W)$$

merkitsemällä siinä $V = 0$, saadaan

Vastaavasti avoimen piirin jännite V_{oc} (open circuit) saadaan yhtälöstä (8–2) merkitsemällä siinä $I = 0$. Tällöin

(8–3a)

Jos liitos on siten symmetrinen, että $p_n = n_p$ ja $\tau_p = \tau_n$, ja $p_n / \tau_n = g_{th}$, sekä oletetaan, että $W \ll L_p = L_n$, niin edellinen supistuu muotoon

(8–3b)

Avoimeen piiriin näin muodostuva myötäjännite on kuitenkin maksimissaan tasapainotilanteen liitospotentiaalin suuruinen, koska sen ylittävillä jännitteillä drift-virran suunta vaihtuisi.

Liitos muuttaa valon energiaa sähköiseksi silloin, kun virta ja jännite ovat eri merkkisiä.

8.1.2. Aurinkokennot

Jotta aurinkokennojen tuottama teho olisi merkittävää, vaaditaan niiltä suuria pinta-aloja. Tällöin yleensä kytketään yhteen lukuisia aurinkokennoja sopivien jännitteiden ja virtojen saamiseksi. Yhden **kennon antama jännite on jonkin verran pienempi kuin liitospotentiaali, joka taas on yleensä pienempi kuin energiarasta saatava E_g/q .**

Tyypillinen aurinkokennon rakenne on oheisen kuvan mukainen.

Aurinkokennosta saatava suurin teho $I_m V_m$ voidaan arvioida tarkastelemalla I–V-ominaiskäyrää. Ns. *"fill factor"* $I_m V_m / I_{sc} V_{oc}$ kuvaa kennon hyvyttä.

8.1.3. Fotodetektorit

Estosuuntaan kytkettyä fotodiodia käytetään optisen signaalin muuntamiseen sähköiseen muotoon. Jotta detektorin toiminta olisi nopeaa, pyritään sellaiseen konstruktion, jossa valo absorboituu liitoksen tyhjennysalueella. Tällöin varauksenkuljettajien (hitaan) diffuusion merkitys vähenee liitosalueen nopeaan driftiin verrattuna. Tällainen rakenne on "depletion layer photodiode".

Paksun tyhjennysalueen synnyttämiseksi voidaan tehdä ns. *p-i-n-rakenne* (p-i-n-diodi), jossa p- ja n- liitoksessa on välissä intrinsisen puolijohteen alue. Suuren resistiivisyyden vuoksi miltei koko liitospotentiaali on i-alueessa, jossa kuitenkin sirona ja rekombinaatio ovat vähäisiä.

Heikkojen signaalien havaitsemiseen voidaan käyttää avalanche-fotodiodia, jonka vaste on nopea, luokkaa ns. Tällaisia käytetään erityisesti nopeassa tiedonsiirrossa kuituoptiikan avulla.

Fotodetektori voidaan suunnitella myös siten, että valon absorptio tapahtuu sille räätälöidyssä kerroksessa (esim. pieni E_g), mutta liitos, joka "kerää" varauksenkuljettajat on toista materiaalia (esim. suuri E_g , avalanche-fotodiodi).

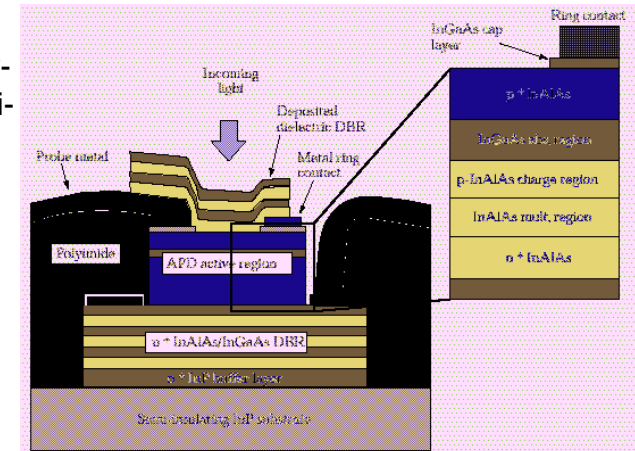
8.1.4. Fotodetektorien kohina ja kaistanleveys

Optisissa tietoliikennesysteemeissä detektorien tärkeitä ominaisuuksia ovat *herkkyys* ja *vasteaika* (nopeus). *Vahvistus* ja siten herkkyys riippuvat varauksenkuljettajien elinajan ja transit-ajan suhteesta. *Siten varauksenkuljettajien elinajan kasvattaminen lisää herkkyyttä, mutta toisaalta vähentää taajuusvastetta ja siten kaistanleveyttä*. Fotodetektorin hyvyttä kuvaataankin *vahvistus-kaistanleveys-tulolla* (engl. gain-bandwidth product).

Signaali-kohina-suhde (engl. signal-to-noise ratio) on toinen tärkeä hyvyttä kuvaava luku, joka tulisi saada suureksi. Ns. Johnson-kohina on lämpötilan aiheuttamaa satunnaisvaihtelua ja "shot noise" termisen/satunnaisen elektroni-aukko-parien generaation aiheuttamaa kohinaa. Suuri vahvistus lisää/vahvistaa myös kohinaa.

Optisten kuitujen määräämät (alhaisten häviöiden ja pienen dispersion) tyypilliset aallonpituudet ovat n. $1.55 \mu\text{m}$ ja $1.3 \mu\text{m}$. Pii on näillä aallonpituuksilla läpinäkyvää ja siksi käytetäänkin paljon absorboivana materiaalina yhdistepuolijohteita, esim. $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$.

Resonance-cavity-rakenteita voidaan käyttää myös fotodiodissa.

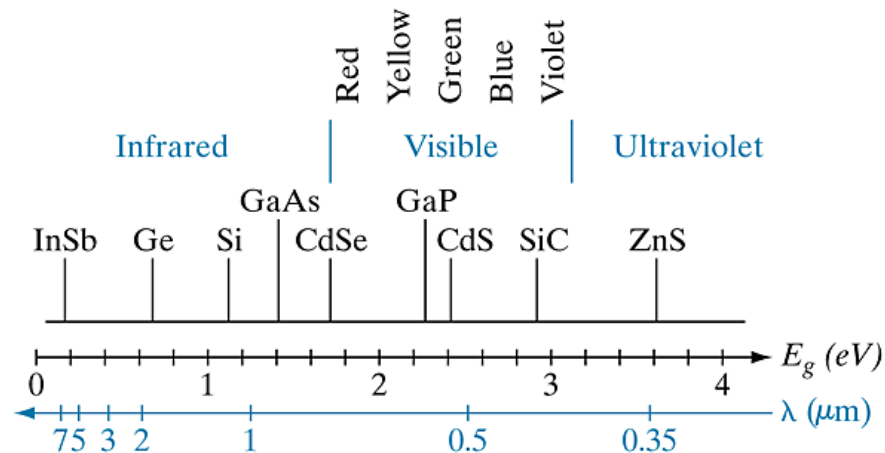


8.2. VALOAEMITTOIVAT DIODIT

Suorarakoisissa puolijosteissa varauksenkuljettajien rekombinaatio tuottaa valoa, jonka aallonpituus vastaa kaistaraon energiaa. Myötäsuntaan kytketyssä pn-liitoksessa saadaan hallitusti aikaan voimakas rekombinaatio. Ilmiötä sanotaan elektroluminesenssiksi.

8.2.1. Valoaemittävät materiaalit

Yhdistepuolijosteiden kaistaraot ovat tyypillisesti välillä 0.18 eV (InSb) ja 3.4 eV (GaN).

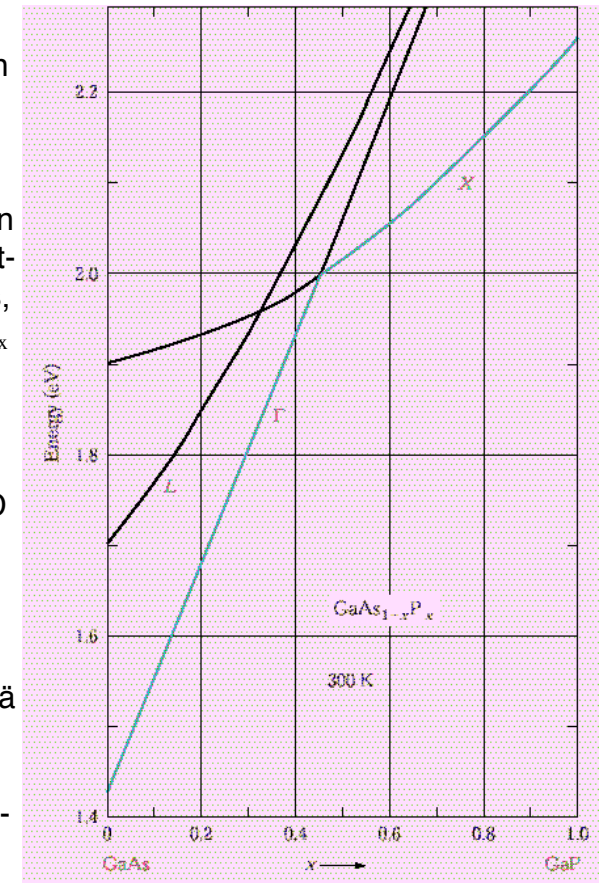


Huom! $(E / \text{eV}) (\lambda / \mu\text{m}) = 1.24$.

Yhdistepuolijosteiden seossuhteilla voidaan säätää sekä kaistaraon suuruutta että sen laatua. Samalla muuttuu myös materiaalin hilavakio, joten esim. MBE-tekniikan avulla tuotetuissa rakenteissa on otettava huomioon myös "hilasovitus" (engl. lattice matching).

Oheisessa kuvassa $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ -yhdisteen kaistaraon nähdään olevan suora, kun $x < 0.45$. Tyypellä seostettuna saadaan tämä materiaali emittoimaan valoa myös, kun $x > 0.45$. Vrt. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -yhdisteen vastaava kaavio sivulla 31.

Valoa emittoiva LED tai laser ja fotodiodi muodostavat *optoelektronisen parin*. Sellainen on esim. CD-soittimessa. Sitä voidaan käyttää myös sähköisesti eristettyyn tiedonsiirtoon.



Voidaan sanoa, että III-V-puolijosteiden käyttö on yleisempää kuin II-VI-puolijosteiden, koska jälkimmäisten seostaminen ja pn-liitosten valmistaminen on vaikeampaa. Toisaalta II-VI-puolijosteet ovat tehokkaita valonemittöijia.

Koska GaN emittoi sinistä valoa, voidaan koko näkyvän valon alue kattaa III-V-puolijosteilla.

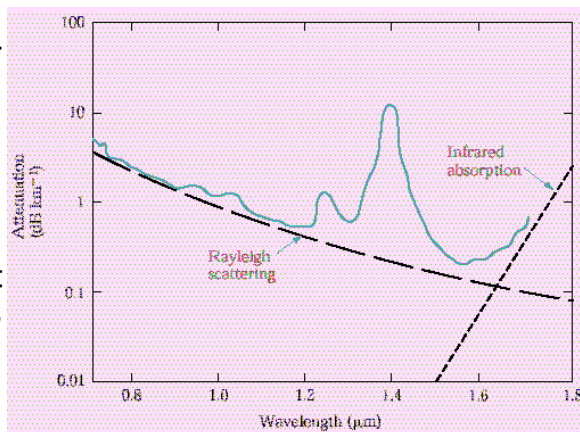
8.2.2. Kuituoptinen tietoliikenne

Valon siirtämiseen lähettimestä detektoriin käytetään tyypillisesti lasi- tai muovikuituja, joiden läpimitta on tyypillisesti luokkaa 5 – 25 μm . Kuidun sisäosan (engl. core) taitekerroin tehdään suuremmaksi (esim. Ge-seostettu lasi) kuin kuoriosan (esim. silica, SiO_2), jolloin valo pysyy kuidussa kokonaisuheijastuksen vuoksi. Taitekertoimen muutos voi olla askelmainen tai asteittainen.

Valon intensiteetti vaimenee kuidussa relaation

$$I(x) = I_0 \exp[-\alpha(\lambda) x] \quad (8-5)$$

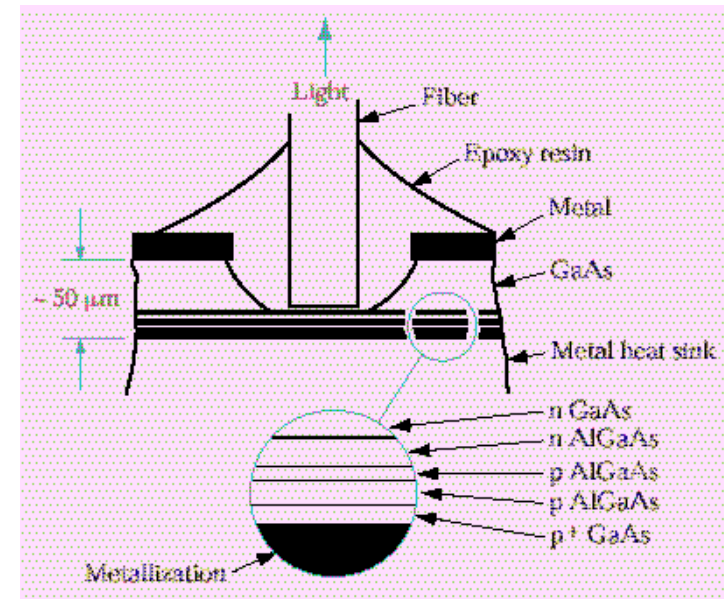
mukaisesti kuidun pituuden x funktiona. Vaimennuskerroin $\alpha(\lambda)$ riippuu voimakkaasti valon aallonpituudesta. Sopivimmat aallonpituudet ovat 1.55 μm ja 1.3 μm .



Kun informaatiota siirretään samanaikaisesti useilla eri aallonpituuksilla, tulee ongelmaksi myös *kromaattinen dispersio*. Tämä tarkoittaa sitä, että eri aallonpituuksilla on eri taitekertoimet ja siten ne etenevät kuidussa eri nopeuksilla, ja sen seurauksena niistä koostuva pulssi hajoaa vähitellen. Ilmiö on vähäisempi aallonpituudella 1.3 μm .

8.2.3. Monikerroksiset heteroliitos-LEDit

LEDejä voidaan käyttää valonlähteinä silloin, kun signaalin taajuus ei ole kovin suuri tai kun signaali on analoginen. LEDin emittoima intensiteetti riippuu lineaarisesti virrasta laajalla alueella.



8.3. LASERIT

LASER

(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

on laite, joka/jonka

- tuottaa ja vahvistaa voimakkaan yhdensuuntaisen ja monokromaattisen valosädekimpun
- koko: tuskin paljain silmin havaittava – "talon kokoinen"
- teho: 10^{-9} – 10^{20} W
- aallonpituus: mikroaallot – röntgensäteet, 10^{11} – 10^{17} Hz
- jatkuvatoiminen tai pulsseittain säteilevä (jopa 10^4 J / pulssi ja jopa 6×10^{-15} s)
- käyttö: valonlähde, työstö, elektroniikka, lämpökäsittelyt, kirurgia, etäisyyden mittaaminen (tutka), tiedon luku, tallennus ja siirto jne.

Laservalon ominaisuudet:

- koherenssi
- monokromaattisuus
- yhdensuuntaisuus
- suuri tehotiheys
- aallonpituudet (nykyisin): kaukainen IR – pehmeä röntgen

Stimuloitu emissio

Lämpötasapainossa ylemmän ja alemman tilan miehitysten suhde on

$$n_2 / n_1 = \exp[-(E_2 - E_1)/kT] = \exp[-h\nu_{12}/kT]. \quad (8-6)$$

Tasapainossa säteilykentän, energiatiheys $\rho(\nu_{12})$, kanssa

$$B_{12} n_1 \rho(\nu_{12}) = A_{21} n_2 + B_{21} n_2 \rho(\nu_{12}) \quad (8-7)$$

Vakiot B_{12} ,

A_{21} ja B_{21}

ovat ns.

Einsteinin

kertoimia,

joiden avulla

voitetaan

kirjoittaa

suhde

$$\text{Emiss}_{\text{sti}} / \text{Emiss}_{\text{spo}} = B_{21} \rho(\nu_{12}) / A_{21}, \quad (8-8)$$

jota voidaan kasvattaa kasvattamalla kentän energiatheyttä $\rho(\nu_{12})$. Laserissa se saadaan aikaan resonaattorilla. Suhdetta

$$\text{Emiss}_{\text{sti}} / \text{Abs} = B_{21}/B_{12} \times n_2/n_1, \quad (8-9)$$

voitetaan kasvattaa populaatioita muuttamalla. Laserin toiminnalle on välttämätöntä ns. *populaatioinversio* $n_2 > n_1$.

Resonaattorin muodostavat esim. kaksi peiliä (interferometri), joiden etäisyys on

$$L = m\lambda / 2. \quad (8-10)$$

Jos laserväliaineen taitekerroin on n , niin laserista saatavan valon aallonpituus on

$$\lambda_0 = n \lambda. \quad (8-11)$$

8.4. PUOLIJOHDELASERIT

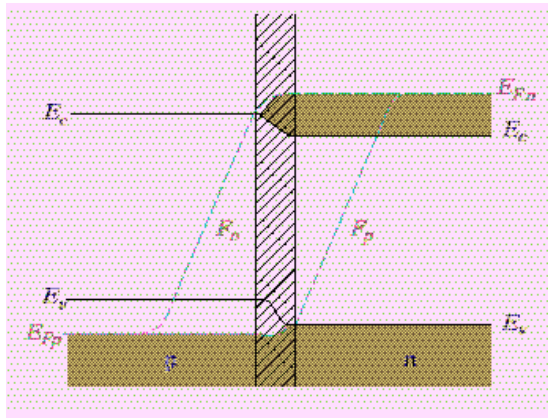
Puolijohde- eli diodilaserit ovat tärkeimpiä nykypäivän elektronikan kannalta. Niitä käytetään massiivisesti tiedon tallennuksessa, lukemisessa ja siirtämisessä sekä viihde-elektronikassa. Yleensä ne ovat kooltaan varsin pieniä, tyyppillisesti luokkaa $0.1 \times 0.1 \times 0.3 \text{ mm}^3$. Niitä on **helppo moduloida yksinkertaisen pumppausmenetelmän kautta**.

Puolijohdeessa syntyvää elektronien ja aukkojen rekombinaatio- säteilyä voidaan käyttää lasertoiminnassa, kunhan viritysmekanismi (pumppaus) saadaan tehokkaasti toteutetuksi. Elektroneja ja aukkoja on tuotettava paljon samalle alueelle. Tämä saadaan toteutetuksi pn-liitoksella.

8.4.1. Populaatioinversio

Poikkeuksellisesti voidaan puolijohdelasereita pumpata myös optisesti, mutta pääsääntöisesti se tehdään kytkemällä pn-liitospinta myötäsuuntaiseen esijännitteeseen. **Myötäsuuntaisella jännitteellä liitospinnan yli** saadaan varauksenkuljettajia runsaasti liitosalueelle, josta syntyy ns. inversioalue.

Inversioalueella on helppo saada syntymään **jatkuva rekombinaatioprosessi**, kunhan virransyöttö on riittävää. Pienintä virrantiheyttä, jolla lasertoimintaan riittävä rekombinaationopeus voidaan synnyttää, sanotaan **kynnysvirrantiheydeksi** (engl. threshold current density).



Populaatioinversion muodostumista inversioalueelle, voidaan kuvata kvasi-Fermitasojen käsitteiden (4–15) avulla. Siten

$$n = N_c e^{-(E_c - F_n)/kT} = n_i e^{(F_n - E_i)/kT} \quad (8-12a)$$

ja

$$p = N_v e^{-(F_p - E_v)/kT} = n_i e^{(E_i - F_p)/kT}. \quad (8-12b)$$

Elektroni–aukko-rekombinaatiolle voidaan kirjoittaa ehto

$$(F_n - F_p) > h\nu \quad (8-13a)$$

ja minimivaatimus puolijohde tapauksessa on tietysti $h\nu > E_g$, josta seuraa, että

$$(F_n - F_p) > E_g. \quad (8-13b)$$

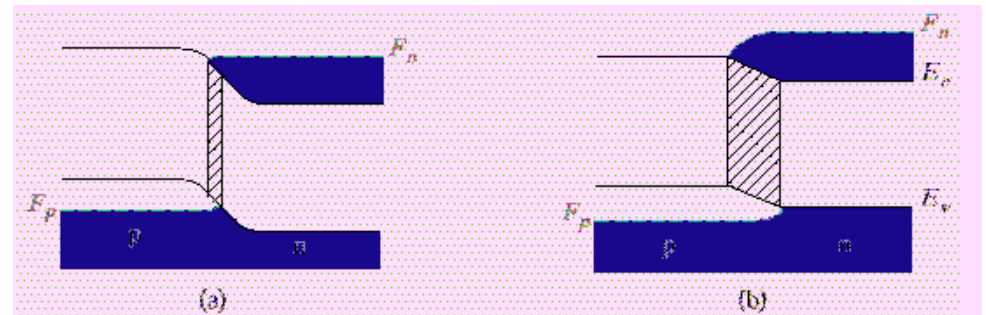
Edellytyksenä riittävälle intensiteetille stimuloitussa emissiossa on suora transiio ja siten suorarakoinen puolijohde.

8.4.2. Pn-liitoksen emissiospektri

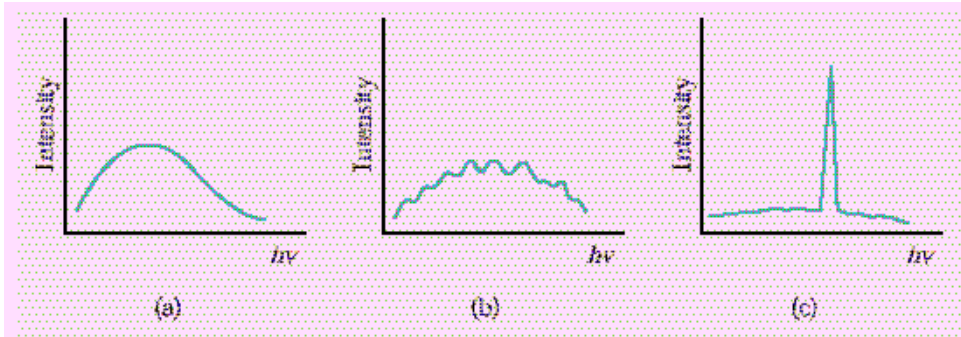
Inversioalueella tapahtuvan rekombinaation emittoiman fotonin $h\nu$ energia on rajoissa

$$E_c - E_v = E_g < h\nu < F_n - F_p,$$

missä yläraja riippuu biasjännitteestä oheisen kuvan mukaisesti.



Spontaanin emission aallonpituus/energia on em. rajoissa, mutta lasertoiminnan aallonpituuden määrää resonattori eli kaviteetti.



Relaation (8–10) mukaan

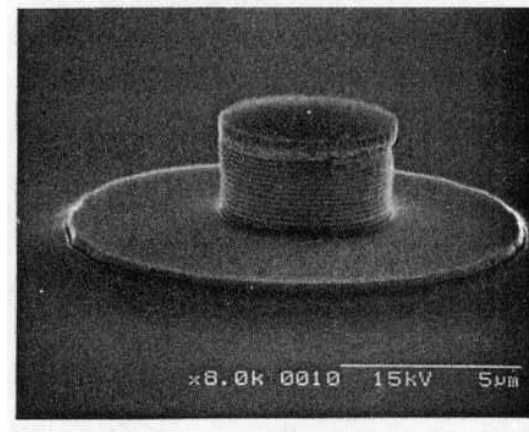
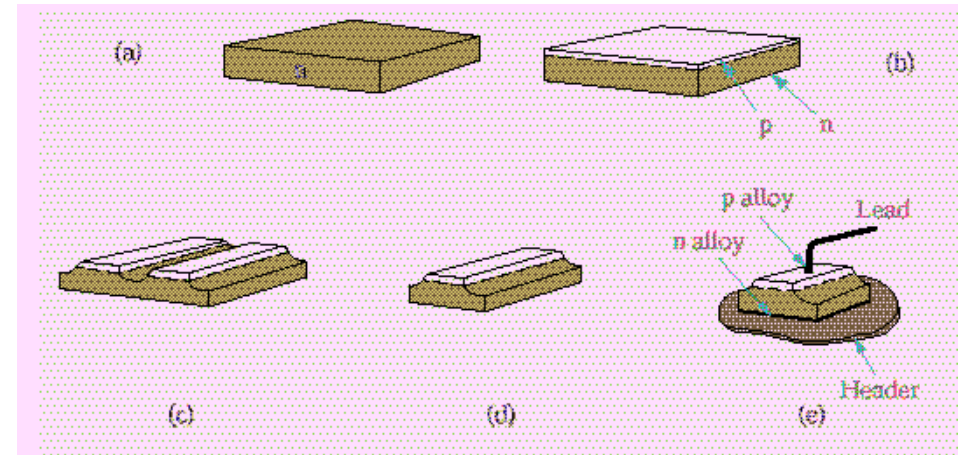
$$m = 2Ln / \lambda_0, \quad (8-14)$$

missä m on puoliaaltojen lukumäärä ja n väliaineen taitekerroin, joka voi riippua voimakkaastikin aallonpituudesta.

8.4.3. Laserdiodin valmistaminen

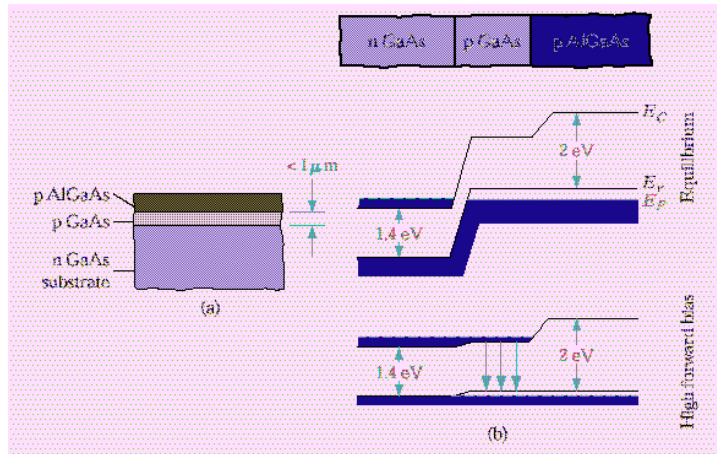
Yksinkertaisen laserdiodin valmistamiseksi tarvitaan:

- pn-liitos voimakkaasti seostetuista puolijohteista
- resonattori (kaviteetti)
- kontaktit ja lämmönpoisto



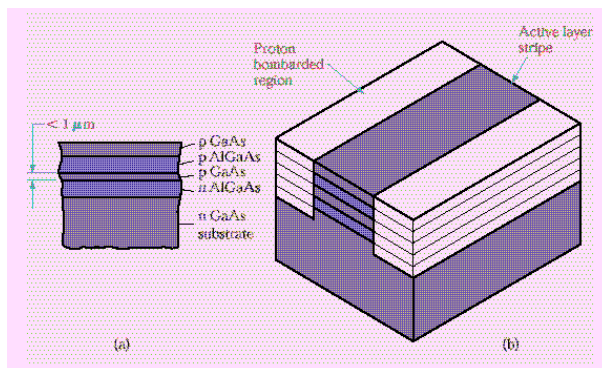
8.4.4. Heteroliitoslaserit

Edellä kuvatun *homoliitoslaserin* haittana on liian paksu kerros, jossa rekombinaatio tapahtuu. Tällöin kaikkia rekombinaatioita ei saada "hyötykäyttöön". Aktiivista aluetta voidaan rajoittaa oheisen kuvan mukaisella *heteroliitosrakenteella*. Sopivalla myötä-



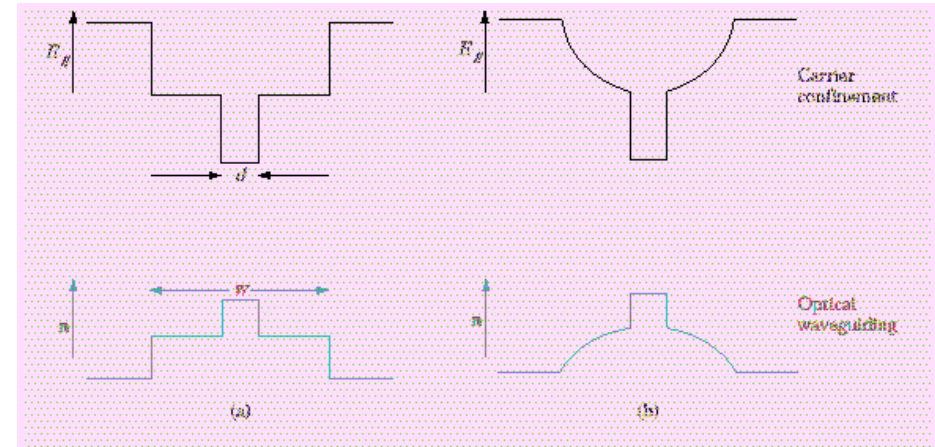
Rajoittamalla aktiivista aluetta saadaan myös laseroinnin kynnysvirran arvo pienemmäksi. Samalla erilaisia taitekertoimia eri kerroksissa voidaan käyttää ohjaamaan fotoneita, ts. pitämään ne resonatorissa (engl. waveguide).

Kaksois-heterorakenne on vielä tehokkaampi varauksenkuljettajien ja valon ohjaamiseen. Lisäksi ohjaamalla liitokseen tulevaa virtaa oheisen kuvan mukaisella rakenteella saadaan inversioalue ja resonattori halutunlaisiksi.



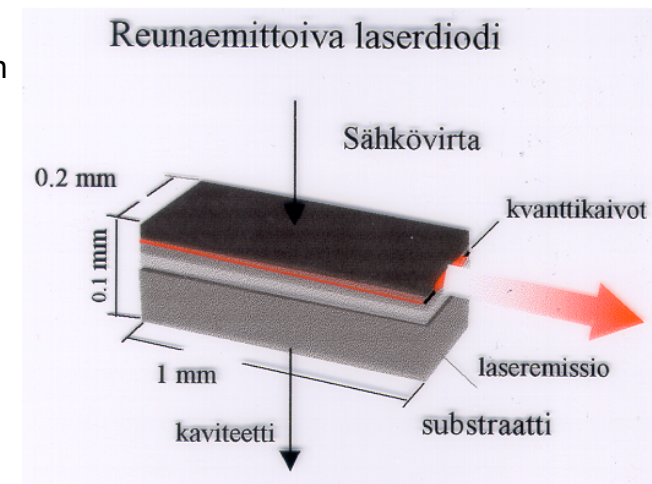
Kvanttikaivolaserit (engl. Quantum Well, QW)

Varauksenkuljettajien rajoittamiseen ja valon ohjaamiseen voidaan käyttää myös eri rakenteita, jolloin laserin rakenne ja toiminta voidaan vapaammin suunnitella mahdollisimman tehokkaaksi.



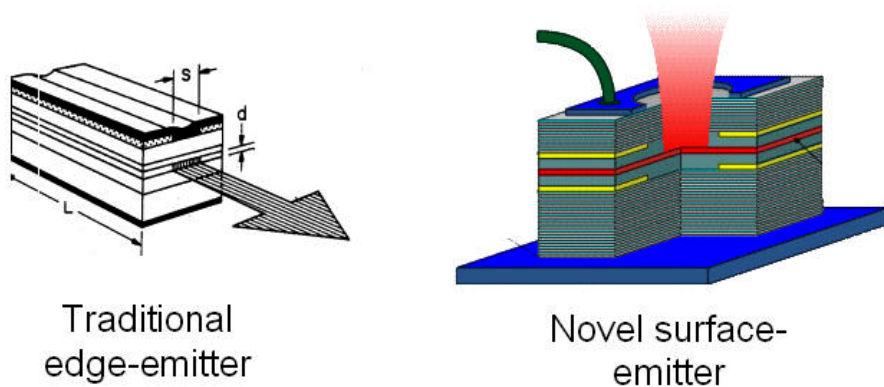
Yllä olevassa kuvassa on kvanttikaivokaavion alla esitetty myös taitekertoimen arvot graafisesti; (a) tavallinen monikerrosrakenne, ja (b) jatkuvasti muuttuva ns. GRINSCH (graded index separate confinement heterostructure).

Tällaista valon ohjausta voidaan käyttää *reuna-emittioivissa lasereissa* (engl. edge-emitting laser, EEL).



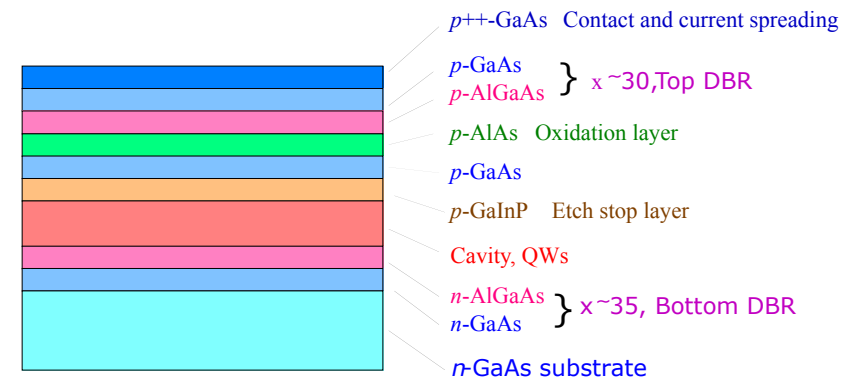
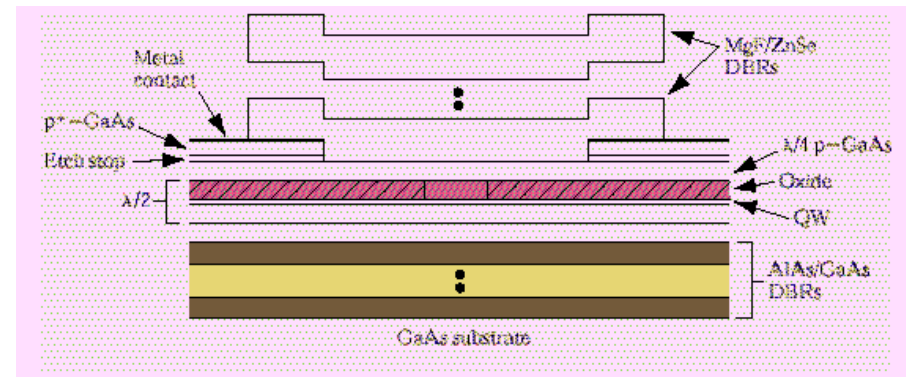
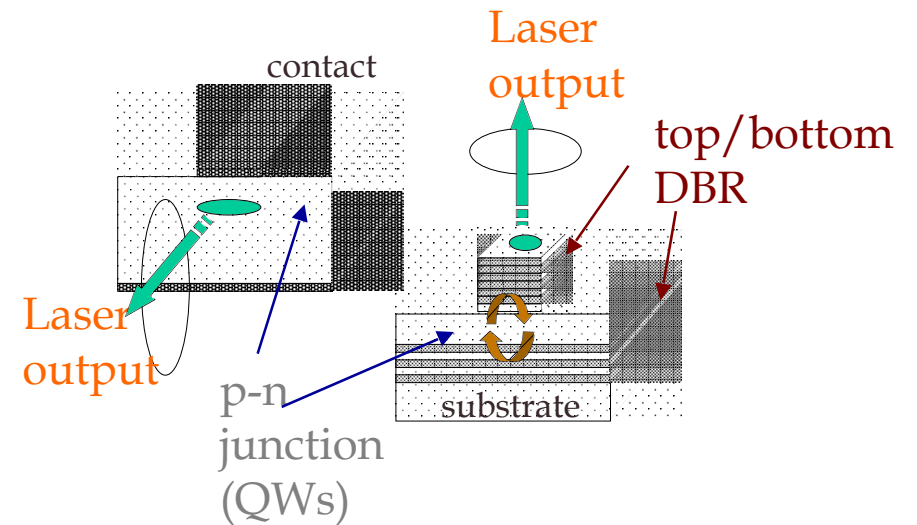
Vertical Cavity Surface-Emitting Laser (VCSEL)

Pintaemittioivissa lasereissa (VCSEL) resonaattori muodostetaan DBR-peileillä (distributed Bragg reflector). VCSEL-rakenteen resonaattori on aallonpituuksien luokkaa, jolloin moodien hallinta on helpompaa ja laseroinnin kynnysvirtakin saadaan hyvin pieneksi, $< 50 \mu\text{A}$.



Advantages of VCSELs

- Potentially low cost (higher yield) – wafer level processing & characterization
- Integration in 1D and 2D arrays on chip
- High speed modulation
- High beam quality
- Low power, high power efficiency



8.4.5. Lasereissa käytetyt materiaalit

- **Optoelectronics** mostly based on **indium phosphide** (InP) or **gallium arsenide** (GaAs) technology = substrate materials

- Some semiconductor material systems used optoelectronics:
 - GaInAs / GaAs

- GaInAsP / InP
- AlGaInAs / GaAs
- InGaP / GaAs
- GaInAsN / GaAs (new)
- GaN / sapphire (new)
- InGaN / sapphire (new) + many more

12.3. MOODILUKITUS

Ns. moodilukitustekniikalla voidaan tuottaa äärimmäisen lyhyitä pulsseja, jopa fs:n luokkaan saakka. Tämä voidaan toteuttaa, jos laserissa värähtelevät useat pitkittäiset moodit voidaan lukita niin, että niiden vaihe-ero säilyy muuttumattomana. Pulssin muodostumista voidaan verrata sen esittämiseen Fourier-sarjana.

Tarkastellaan laserin moodeja, joiden amplitudit ovat likipitään yhtä suuret E_0 ja

$$E_n(t) = E_0 e^{i(\omega_n t + \phi_n)}. \quad (12.46)$$

Jos moodeja on N kappaletta, niiden muodostama yhteinen kenttä on

$$E(t) = E_0 \sum_{n=0}^{N-1} e^{i(\omega_n t + \phi_n)}. \quad (12.47)$$

Moodien taajuuserot ovat

$$\Delta\omega = \omega_{n+1} - \omega_n = 2\pi \Delta\omega = 2\pi (c/\eta / 2d) = \pi c / \eta d. \quad (12.48)$$

Jos moodien vaiheet ϕ_n ovat satunnaisia, niin

$$I(t) = N E_0^2, \quad (12.49)$$

mutta jos vaiheet saadaan lukituksi

$$\phi_n = \phi_0, \quad (12.50)$$

niin

$$E(t) = E_0 e^{i\phi_0} \sum_{n=0}^{N-1} e^{i\omega_n t} \quad (12.51)$$

$$= E_0 \sum_{n=0}^{N-1} e^{i(\omega_{N-1} - n \Delta\omega) t}, \quad (12.53)$$

kun

$$\omega_n = \omega_{N-1} - n \Delta\omega. \quad (12.52)$$

Tällöin

$$E(t) = E_0 e^{i(\phi_0 + \omega_{N-1} t)} \sum_{n=0}^{N-1} e^{in \Delta \omega t}, \quad (12.54)$$

Koska

$$E(t) = E_0 e^{i(\phi_0 + \omega_{N-1} t)} [(e^{iN \Delta \omega t} - 1) / (e^{i \Delta \omega t} - 1)]. \quad (12.56)$$

Tästä saadaan intensiteetti

$$I(t) = E_0^2 [\sin^2(N \Delta \omega t / 2) / \sin^2(\Delta \omega t / 2)]. \quad (12.57)$$

Intensiteetti siis oskilloi kulmataajuudella $N \Delta \omega t / 2$ ja amplitudina $E_0^2 / \sin^2(\Delta \omega t / 2)$. Amplitudi saa maksimiarvonsa, kun

$$\Delta \omega t / 2 = 0, \pi, 2\pi, \dots \quad (12.58)$$

Siten peräkkäisten maksimien eli pulssien väli on

$$\Delta t_{\text{sep}} = 2\pi / \Delta \omega = 2\eta d / c. \quad (12.59)$$

Maksimi intensiteetti saadaan, kun $t \rightarrow 0, \pi, 2\pi, \dots$, jolloin $\sin^2 Nx / \sin^2 x \rightarrow (Nx)^2 / x^2 = N^2$ ja maksimi intensiteetiksi tulee

$$I_{\text{max}} = E_0^2 N^2 \quad (12.61)$$

sekä pulssin kestoksi

$$\Delta t_p = 2\eta d / Nc = 1 / N\Delta v. \quad (12.62)$$

Moodilukituksen toteuttaminen

Moodilukitus voidaan toteuttaa asettamalla resonaattoriin sulkija, joka avautuessaan asettaa kaikki moodit samaan vaiheeseen. Aktiivinen sulkija on modulaattori, jota ohjataan ulkoisella taajuudella $\Delta t = 2\eta d / c$. Passiivinen sulkija taas on kyllästytvä absorbaattori, jolloin saadaan samalla kertaa Q-kytkentä ja moodilukitus.

Aktiivinen lukitus

- Akusto-optinen kytkin

- Synkroninen pumppaus toisella moodilukitulla laserilla

Passiivinen lukitus

Ei tarvita ulkoista kontrollia

- CPM (colliding pulse mode-locking)

- APM (additive pulse mode-locking)

- KLM (Kerr lense mode-locking)

15.7. KYLLÄSTYVÄ ABSORBAATTORI

Absorption kyllästymisen aiheuttama läpinäkyvyys (engl. bleaching) voidaan katsoa myös epälineaariseksi ilmiöksi. Kyllästyminen on seurausta siitä, että suurella intensiteetillä kaikki kyseiselle taajuudelle sopivat viritykset tapahtuvat nopeasti eikä sen jälkeen kyseinen taajuus voi enää absorboitua.

Ilmiötä käytetään mm. Q-kytkennän ja moodilukituksen toteuttamisessa. Sillä saadaan toteutetuksi myös optinen bistabiilisuus.

15.8. KAHDEN FOTONIN ABSORPTIO

Viritys voi tapahtua myös niin, että kaksi fotonia absorboituu yhtä aikaa, jos niiden yhteenlaskettu energia sopii viritysenergiaksi. Kahden fotonin absorption todennäköisyys on pieni, mutta se kasvaa valon intensiteetin myötä. Siten myös se on epälineaarinen ilmiö.