

Energiband i krystallar

Halvleiarar (intrinsikke og ekstrinsikke)

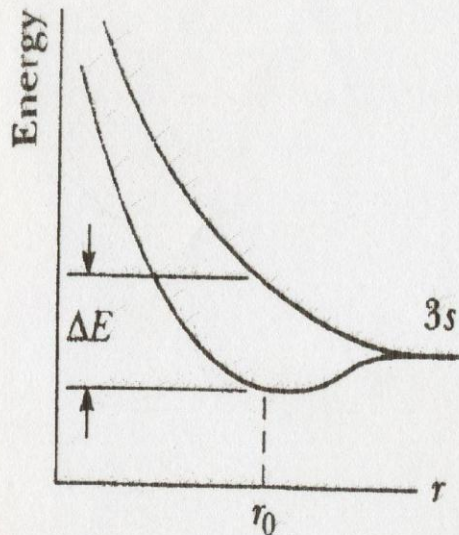
Litt om halvleiarteknologi

Energibandstrukturen til eit material avgjer om det er ein leiar (metall), halvleiar, eller isolator

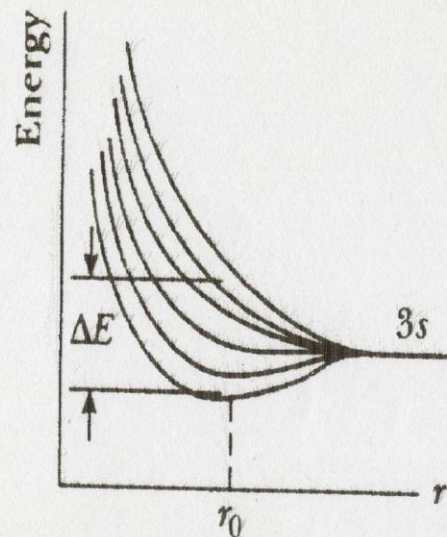
Energiband i material

Diskrete degenererte energinivå for individuelle atom splittar opp når atoma blir bringa nær kvarandre og elektrona i atoma vekselverkar via Coulomb-krafta.

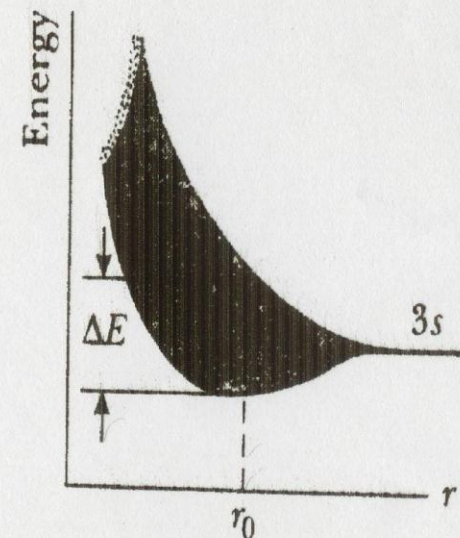
- (a) 2 atom bringa nær kvarandre
- (b) 6 atom bringa nær kvarandre
- (c) eit stort antal atom bringa nær kvarandre



(a)



(b)

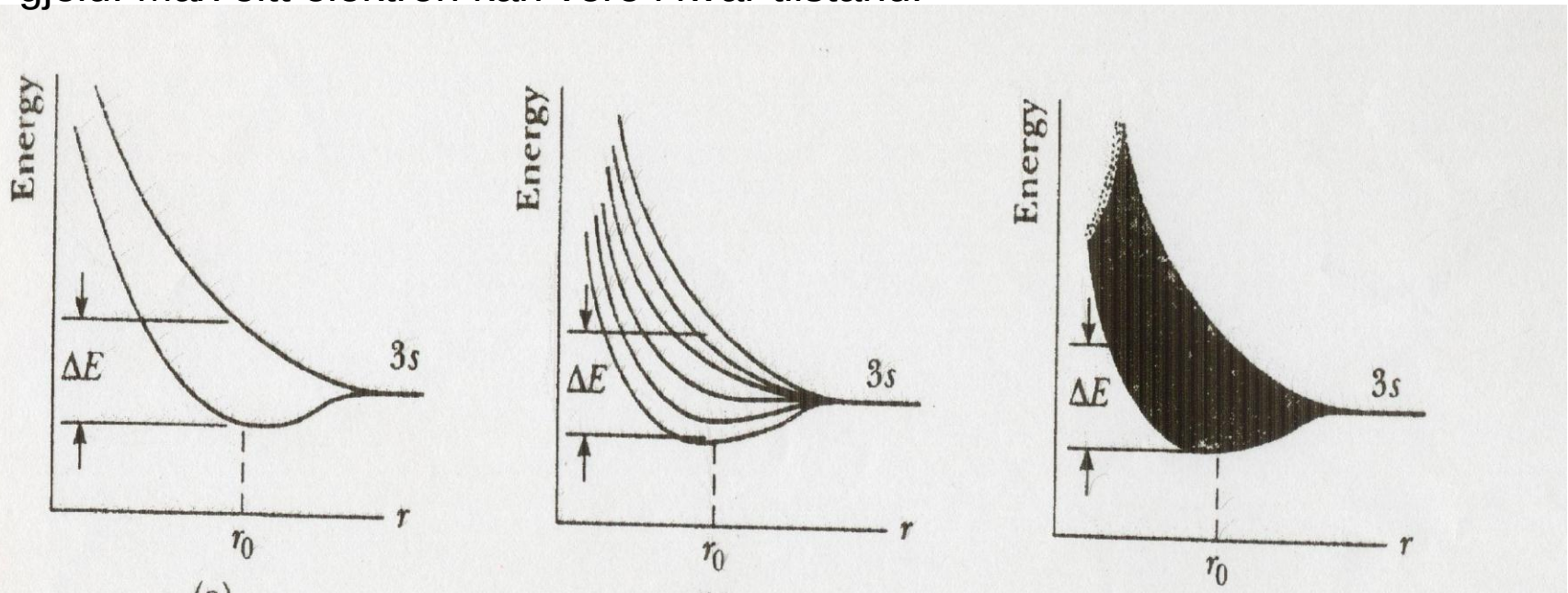


(c)

Dersom eit energinivå har degenerasjon g i eit isolert atom, og vi bringer N atom nær kvarandre, vil nivået gi opphav til eit energiband med gN tilstander. Når N er veldig stor vil energiane i bandet liggje så tett at vi for mange formål kan sjå på dei som kontinuerlege. (Merk at energinivå i bandet kan også ha degenerasjon.)

Det totale antalet tilstander summert over alle atom er bevart i prosessen med å bringe atoma nær kvarandre.

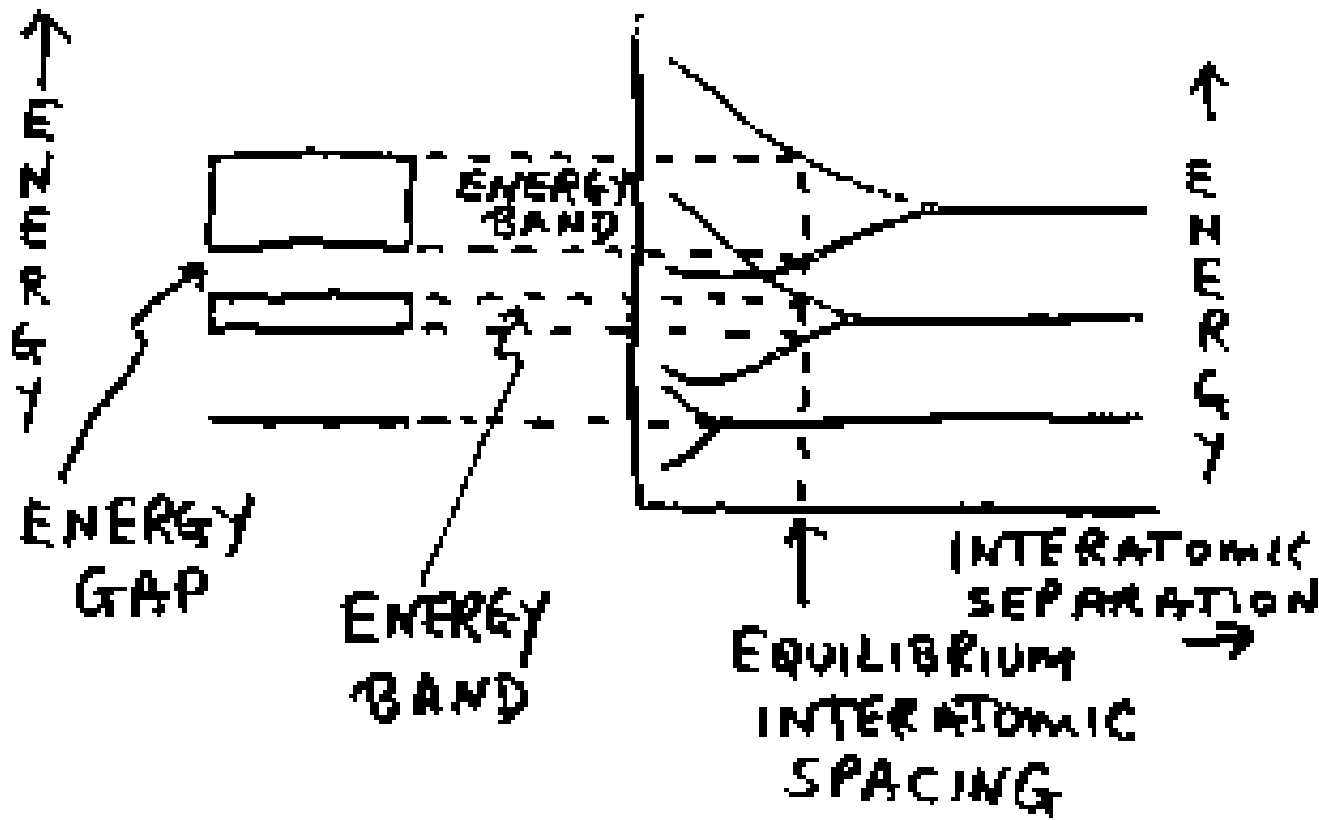
Eit energinivå med kvantetal n og l i eit isolert atom har degenerasjon $2(2l+1)$. F.eks. eit $3s$ nivå har degenerasjon $2(2 \cdot 0 + 1) = 2$. Dermed har eit band danna frå eit $3s$ nivå $2N$ elektrontilstander, der N er antal atom. Eksklusjonsprinsippet gjeld: Max eitt elektron kan vere i kvar tilstand.



I eit isolert atom er elektron i høgare energinivå i middel lengre frå atomkjernen enn elektron i lågare energinivå (f.eks. midlere avstand frå kjernen aukar med n).

Når ein bringer atoma nærare kvarandre, vil dei ytterste elektronen bli påverka av elektron i naboatom før (dvs. for større avstand mellom atoma) elektron nærare kjernen. Dermed vil energisplittinga bli større for band med høgare energi. Band som ligg høgare i energi blir difor breiare enn band som ligg lågare i energi.

“Naboband” er separerte av energigap (energiintervall utan tillatte energiar)



Ein krystall ved null temperatur ($T = 0$)

- Ved den lågast mogelege temperaturen ($T = 0$) har den totale energien den minste verdien som det er mogeleg å ha.
- Anta at krystallen har M elektron. Elektronkonfigurasjonen ved $T = 0$ består i at dei M lågaste (i energi) tilstandene har 1 elektron kvar, mens alle andre tilstander har 0 elektron. Dette gir den minste mogelege totalenergien konsistent med eksklusjonsprinsippet. Vi seier at tilstandene med elektron er fylte, tilstandene utan elektron er tomme.
- Ein fyller altså tilstander i energibanda ved å starte på botnen av det lågaste energibandet. Dersom ein har fylt alle tilstander i eit band, og framleis treng å fylle fleire, blir den neste fylte tilstanden i botnen av neste band.
- (Ein kallar ofte denne elektronkonfigurasjonen for krystallen som heilheit for grunntilstanden til krystallen. Vi snakkar altså då om ein tilstand for eit mange-elektron-system, og ikkje om ein tilstand for eitt enkelt elektron, som er den betydninga av ordet “tilstand” vi har brukt før.)

Valensbandet (engelsk: valence band): Det øverste bandet som er **fullstendig fylt** ved null temperatur.

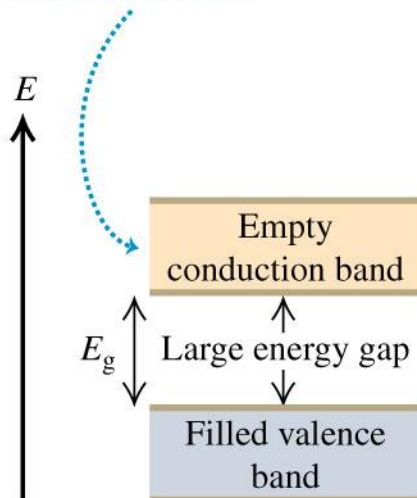
Leiingsbandet (engelsk: conduction band): Bandet som kjem etter (over) valensbandet i energi. Ved null temperatur er det **tomt** i isolatorar og halvleiarar, og **delvis fylt** i metall.

Evne til å leie elektrisk straum

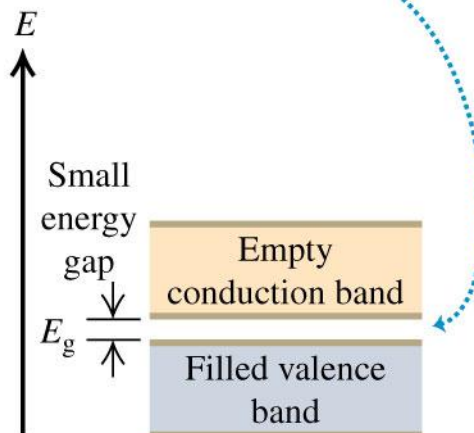
For at eit material skal leie elektrisitet må det finnast elektron som kan respondere til eit ytre elektrisk felt ved å “forflytte seg” til tilstander som ligg nær i energi. For at dette skal vere mogeleg må det finnast tomme tilstander som er nær i energi til tilstander som er fylte. Ved null temperatur er dette ikkje tilfelle for situasjonane (a) og (b) under, sidan dei lågaste tomme tilstandene ligg i leiingsbandet, som er skilt frå dei fylte tilstandene med ein betydeleg energi (minst lik energigapet). Kun for situasjon (c) finst det tomme tilstander som ligg nær i energi til fylte tilstander.

Material karakterisert av (a) = isolator, (b) = halvleiar, (c) = leiar (metall).

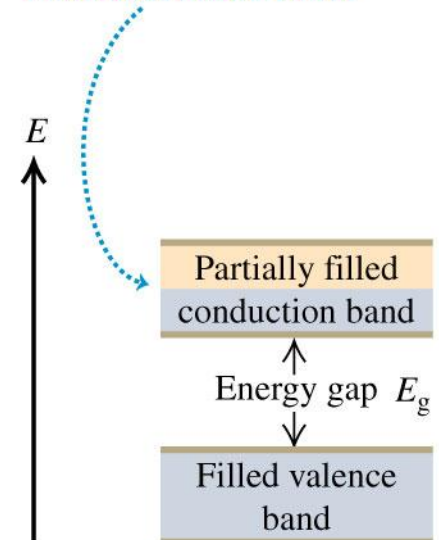
(a) In an insulator at absolute zero, there are no electrons in the conduction band.



(b) A semiconductor has the same band structure as an insulator but a smaller gap between the valence and conduction bands.

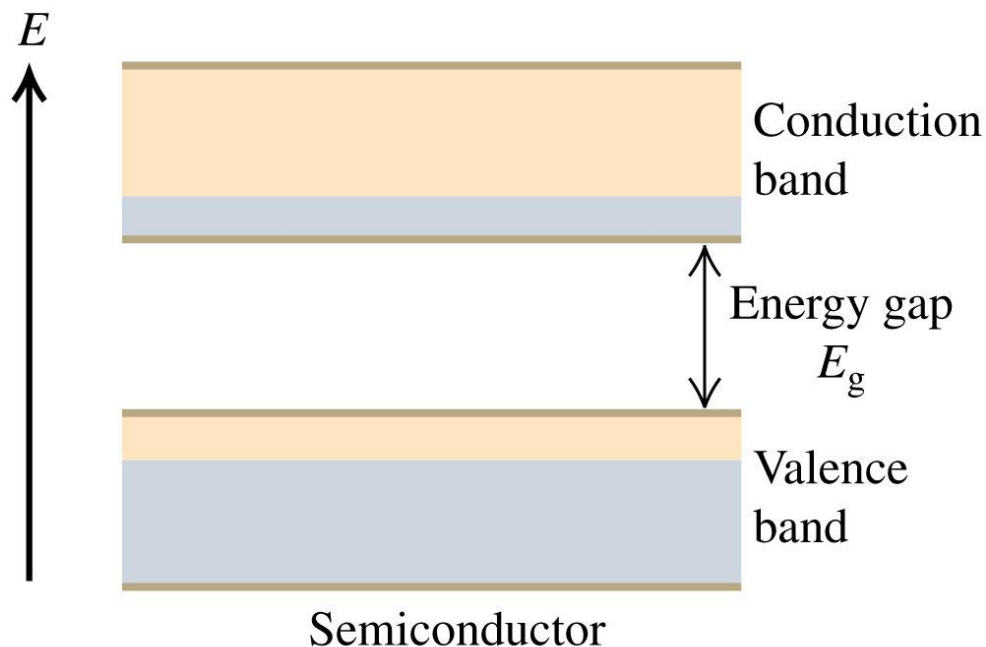


(c) A conductor has a partially filled conduction band.



Når temperaturen er større enn 0 er det termisk energi tilgjengeleg som gir ein viss (liten) sannsynlegheit for at elektron kan “hoppe” fra ein tilstand høgt i valensbandet til ein tilstand lågt i leiingsbandet:

Dette gir ein viss (liten) sannsynlegheit for at tilstander lågt i leiingsbandet er fylte og tilstander høgt i valensbandet er tomme.



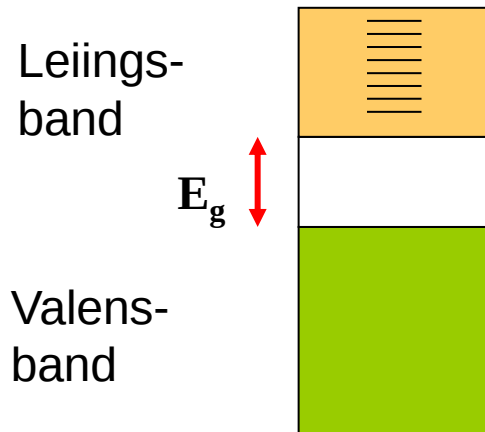
© 2012 Pearson Education, Inc.

I tur gir dette ein viss (liten) elektrisk konduktivitet for isolatorar og halvleiarar, som aukar med temperaturen. Konduktiviteten er rett nok mykje mindre enn for metall. Den er enno mindre for isolatorar enn for halvleiarar pga. forskjellen på energigapet (typisk energigapet er ~ 5 eV for isolatorar og ~ 1 eV for halvleiarar). Ved romtemperatur kan forhold mellom konduktivitetar typisk vere rundt

$$\frac{\sigma_{\text{metall}}}{\sigma_{\text{halvleiar}}} \sim 10^{10}$$

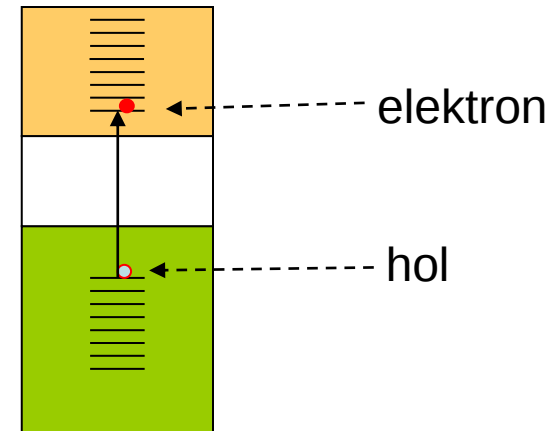
$$\frac{\sigma_{\text{halvleiar}}}{\sigma_{\text{isolator}}} \sim 10^{10}$$

Hol



Eksitasjon av eit elektron fra valensbandet til leiingsbandet gir:

- eit elektron i leiingsbandet
- eit hol (fråver av eit elektron) i valensbandet



- Like mange hol i valensbandet som elektron i leiingsbandet
- Kan beskrive eit band sitt bidrag til elektrisk straum enten vha. dei fylte tilstandene (elektron) eller dei tomme (hol)
- Sidan det er mange færre hol enn elektron i valensbandet, vel vi å beskrive valensbandet vha. hol
- For leiingsbandet er det omvendt: mange færre elektron, så vel å beskrive leiingsbandet vha. elektron
- Bidrag til elektrisk straum kjem både frå elektron i leiingsbandet og hol i valensbandet
- Hol oppfører seg som ein positiv ladning

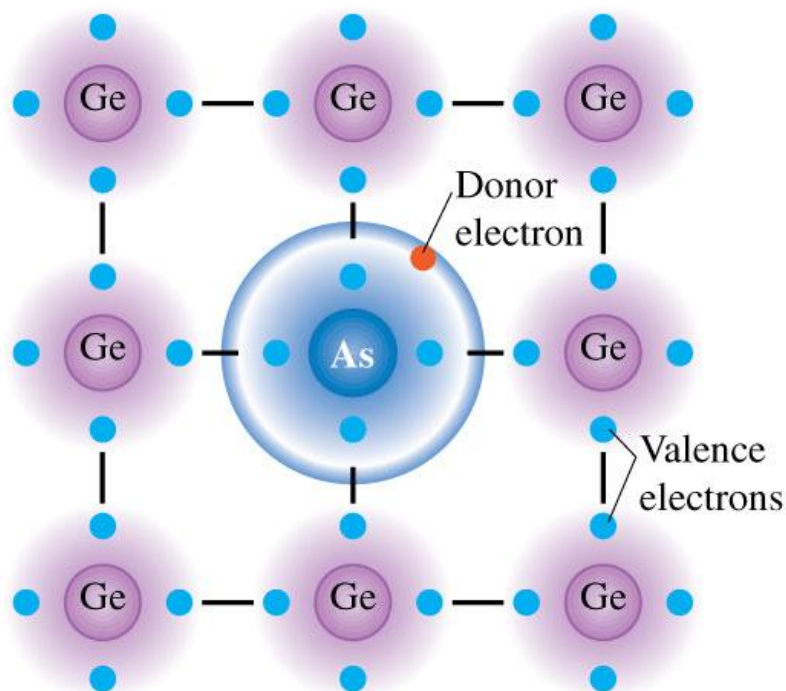
Intrinsikke vs. ekstrinsikke (“dopa”) halvleiarar

- Så langt har vi diskutert **intrinsikke** halvleiarar:
“Reine” material, har like mange elektron i leiingsbandet som hol i valensbandet
- **Ekstrinsikk** halvleiar: halvleiar “dopa” med frammandatom. Avhengig av om frammandatoma har fleire eller færre valenselektron enn atoma i vertsmaterialet, kallast slike dopa halvleiarar **n-type** eller **p-type**.
- Dopinga endrar dei elektriske eigenskapane. Gjer det mogeleg å lage svært nyttige elektroniske komponentar basert på kombinasjonar av ekstrinsikke halvleiarar.

n-type ekstrinsikk halvleiar

Eks: Germanium (Ge, $Z = 32$, 4 valenselektron) dopa med små mengder arsenikk (As, $Z = 33$, 5 valenselektron).

(a) A donor (*n*-type) impurity atom has a fifth valence electron that does not participate in the covalent bonding and is very loosely bound.



© 2012 Pearson Education, Inc.

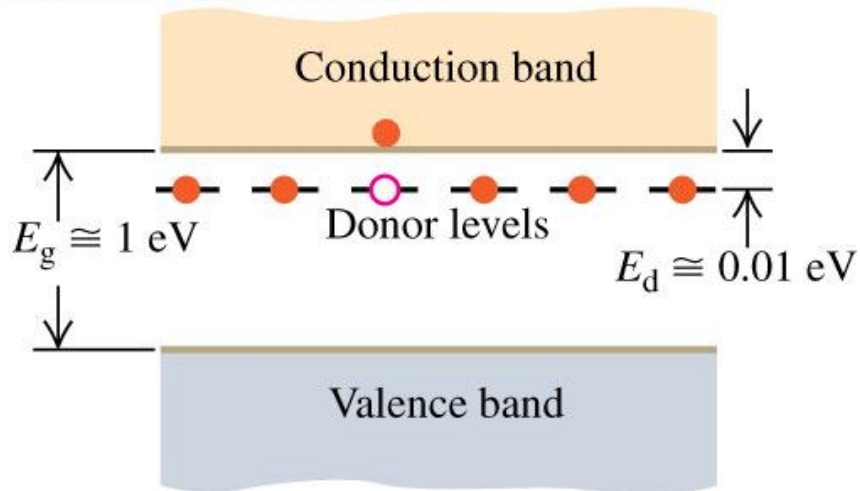
Kun 4 av As sine 5 valenselektron trengst for å danne bindingar. Det femte valenselektronet er difor veldig svakt bunde til As-atomet. Det trengst veldig lite energi for å frigjere det slik at det kan bevege seg fritt.

Set ein på eit elektrisk felt kan det da bidra til elektrisk straum.

As- atomet kallast ein donor fordi det donerer eitt elektron til systemet.

Energivået til det femte valenselektronet kallast eit donornivå og ligg i bandgapet, like under (ca. 0.01 eV) botnen av leiingsbandet.

(b) Energy-band diagram for an *n*-type semiconductor at a low temperature. One donor electron has been excited from the donor levels into the conduction band.



© 2012 Pearson Education, Inc.

Denne energiforskjellen er liten nok til at ved romtemperatur er det relativt lett å eksitere elektronet fra donornivået til leiingsbandet. Der er mange andre ledige tilstander nær i energi slik at elektronet kan bidra til å leie straum.

Konduktiviteten er primært bestemt av **elektrona i leiingsbandet som kjem av dopinga**, fordi det er mange fleire av desse enn elektrona som er eksitert fra valensbandet.

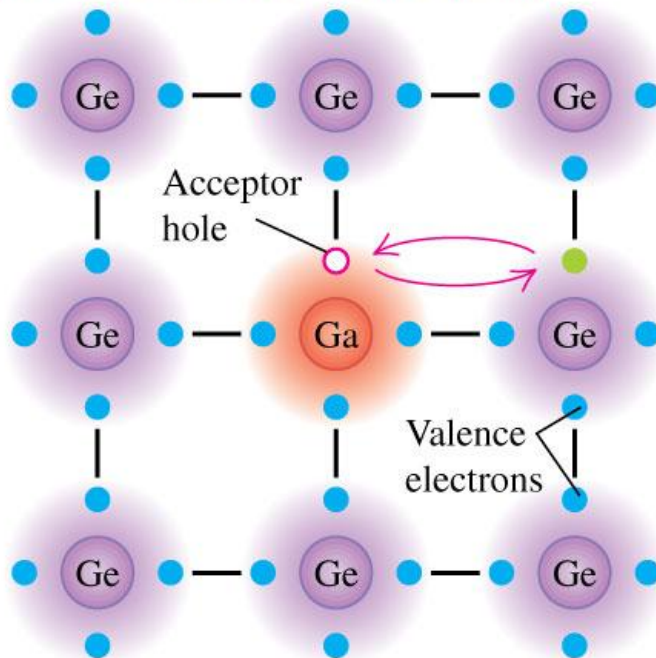
Mange fleire elektron i leiingsbandet enn hol i valensbandet, så elektron i leiingsbandet er majoritetsberarane av straum.

Denne typen ekstrinsikk halvleiar kallast *n*-type fordi majoritetsberarane er negativt lada.

p-type ekstrinsikk halvleiar

Eks.: Dope Germanium med små mengder gallium (Ga, $Z = 31$, 3 valenselektron)

(a) An acceptor (*p*-type) impurity atom has only three valence electrons, so it can borrow an electron from a neighboring atom. The resulting hole is free to move about the crystal.

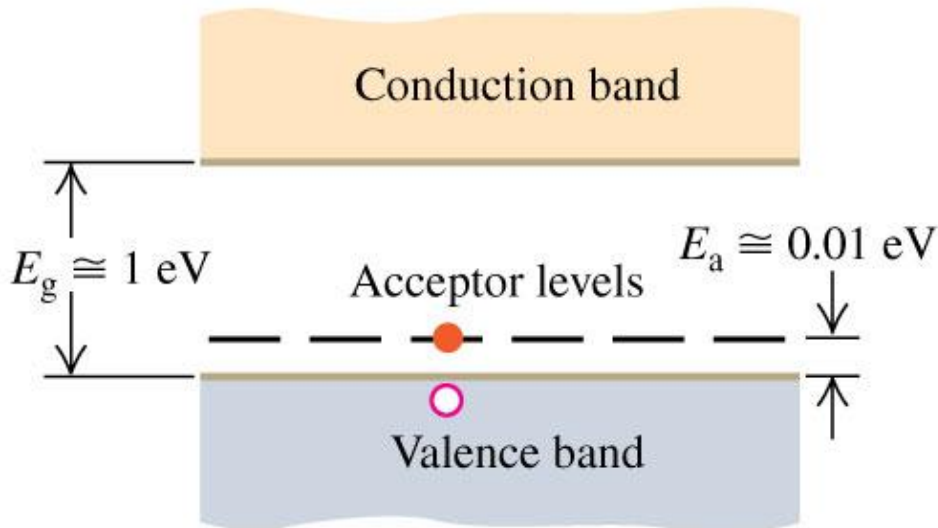


© 2012 Pearson Education, Inc.

Ga treng da eitt ekstra elektron for å danne bindingar med 4 Ge-naboar. Kan få dette ved å "stele" eit elektron fra eit Ge-atom, som da får eit hol (fråver av elektron) som kan bevege seg fritt.

Ga-atomet aksepterer eit elektron og kallast difor ein akseptor.

(b) Energy-band diagram for a *p*-type semiconductor at a low temperature. One acceptor level has accepted an electron from the valence band, leaving a hole behind.



© 2012 Pearson Education, Inc.

Gir energinivå ("akseptornivå") i gapet like over valensbandet. Nivået er i utgangspunktet tomt, men blir fylt når elektronet fra eit Ge-atom (elektron i valensbandet) hoppar inn i det og fyller det (skjer lett ved romtemperatur sidan energiforskjellen er kun ca. 0.01 eV).

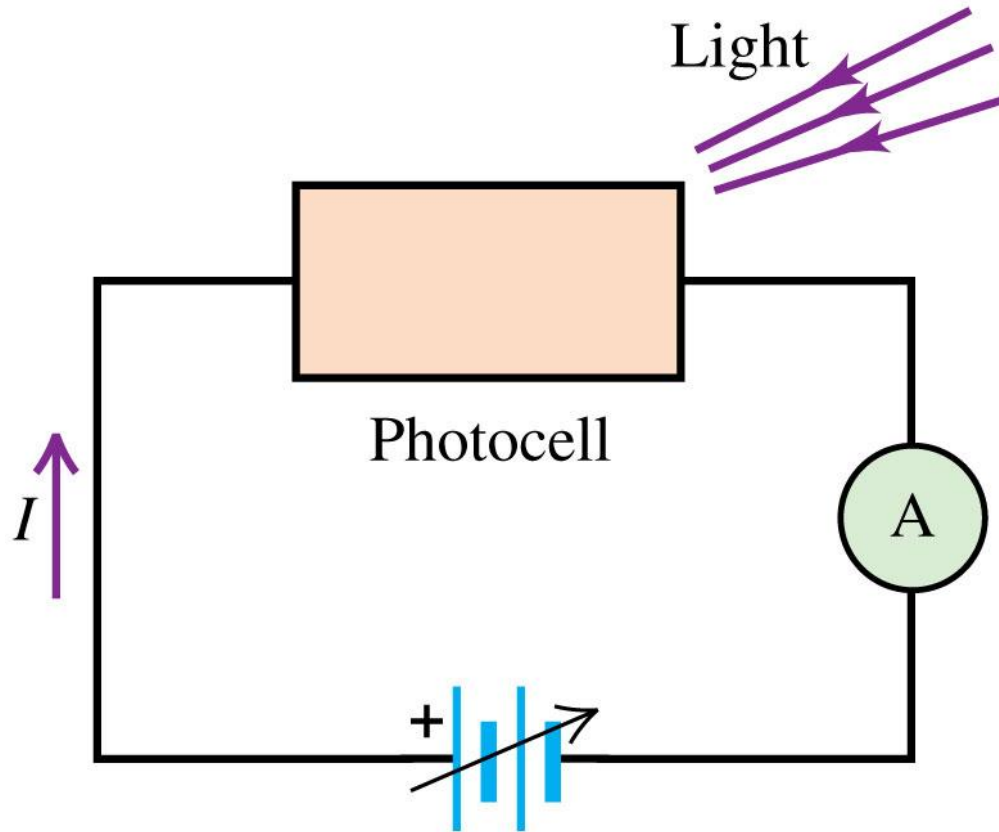
Gir eit hol i valensbandet, som da kan bidra til elektrisk straum.

Konduktiviteten er primært bestemt av **hola** i **valensbandet** som **kjem av dopinga**.

Mange fleire hol i valensbandet enn elektron i leiingsbandet, så hol er majoritetsberarane av straum.

Denne typen ekstrinsikk halvleiar kallast *p*-type fordi majoritetsberarane er positivt lada.

Fotocelle

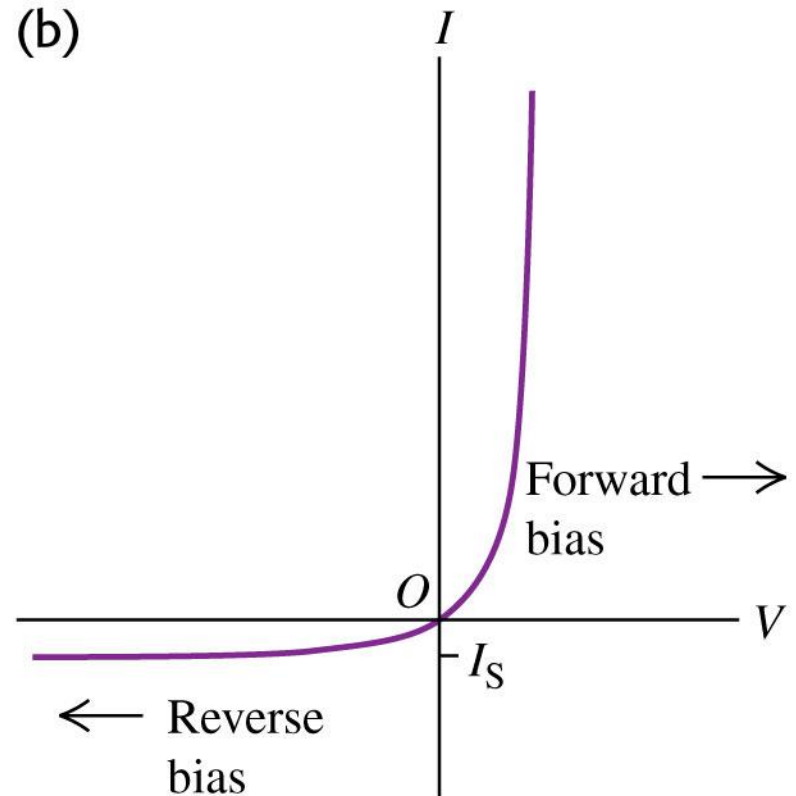
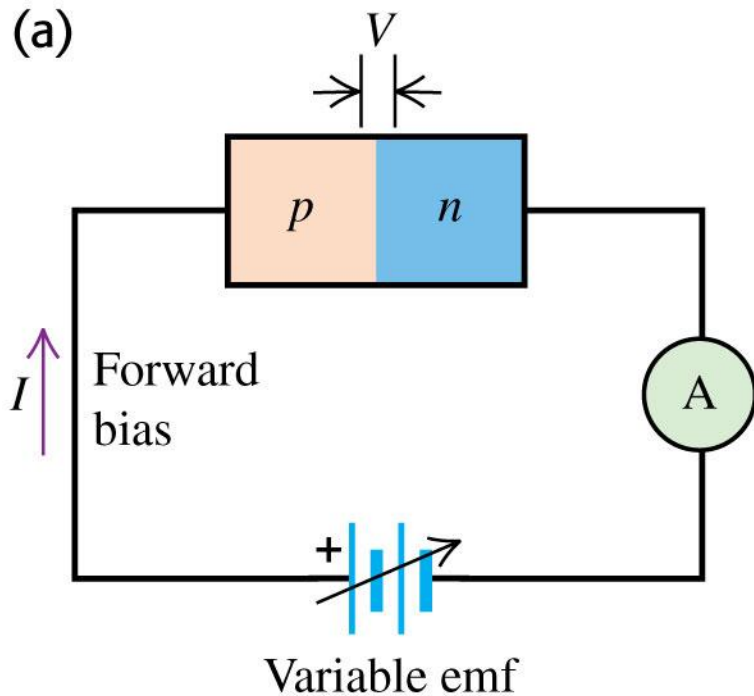


© 2012 Pearson Education, Inc.

- intrinsikk halvleiar
- basert på at konduktiviteten aukar når ein induserer eksitasjon av elektron fra valensband til leiingsband, gir elektron-hol par som kan bidra til straum.
- eksitasjonen blir her indusert av foton (lys) med $hf > E_{\text{gap}}$ (dvs. bølgjelengda må vere lita nok).
- straumen er proporsjonal med intensiteten i lyset.
- brukt som lysdetektor/lysmålar.

pn-overgang

- består av ein bit som er p-type halvleiar kopla til ein bit som er n-type
- elektrisk straum mykje større i ein retning enn i den andre: diode
- kvalitativ forklaring: når batteriet er slik at + er kopla til p og - er kopla til n (forward bias) vil straum gå fra p til n gjennom pn-overgangen. Mykje straum sidan det er mange hol i p-regionen og mange elektron i n-regionen. Omvendt kopling (reverse bias) gir lite straum fordi det er få hol i n-regionen og få elektron i p-regionen.



Lysemitterende diode (LED)

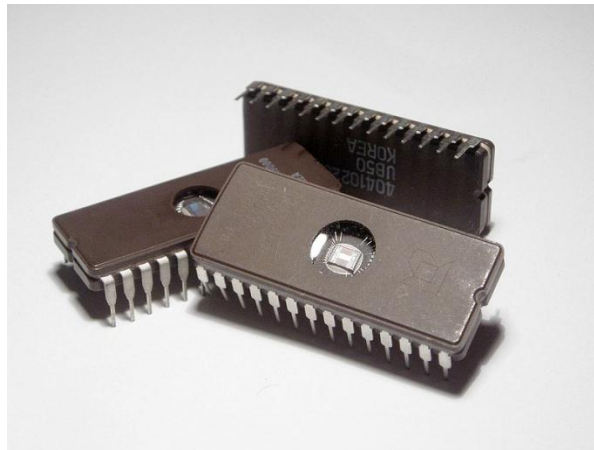
- pn-overgang som sender ut lys
- forward bias: hol går frå p-region til overgangsregionen, det same gjer elektron i n-regionen. I overgangsregionen kan elektronet "dette ned" i holet (rekombinasjon) med energien frigjort som lys (foton) med frekvensen approksimativt gitt ved bandgapet.
- energieffektive lyskjelder
- brukt i billys, trafikklys, elektroniske display.

Fotovoltaisk effekt

- pn-overgang, "lysdiode i revers"
- foton med energi større enn bandgapet kjem utanfrå, blir absorbert, kreerer elektron-hol par som kan bidra til straum og drive ytre krets
- kallast ofte solcelle
- brukt f.eks. i digitale kamera

Meir avanserte elektroniske komponentar basert på halvleiarfysikk

- **transistorar**: pnp og npn-strukturar, brukt som **forsterkarar** og **brytarar** for elektroniske signal
- **integrerte kretsar** (microchips): inneheld eit stort # transistorar ($\sim 10^6$ pr. mm²)



- Halvleiarsteknologi er grunnlaget for elektronikk-revolusjonen