



SZÉCHENYI ISTVÁN
EGYETEM
GYŐR

A félvezetők fizikája

Horváth András
SZE, Fizika és Kémia Tsz.

2006. szeptember 29.

Magyarország célba ér



Készült a HEFOP 3.3.1-P.-2004-09-0102/1.0 pályázat támogatásával



Bevezetés

- Bevezetés

Tiszta és adalékolt
félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzisztor

A félvezető eszközök
gyártásáról

Bevezetés



Bevezetés

● Bevezetés

Tiszta és adalékolt
félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzisztor

A félvezető eszközök
gyártásáról

Bevezetés

A félvezető eszközök igen nagy fontosságúak az utóbbi 50 év technikai fejlődésében. Félvezető eszközök találhatók lényegében az összes mai elektronikai termékben.

A fejezet célja a **fizikai alapok** megértése.

Az alkalmazásokra is utalunk röviden.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

- Elektronok tiszta félvezetőkben
- A Si szerkezete
- Az elektronok viselkedése Si-ban
- 5 vegyértékű adalék atom hatása
- 3 vegyértékű adalék atom hatása
- A lyukvezetés
- Adalékolt félvezetők sávszerkezete
- Speciális jelenségek a félvezetőkben
- Lyukvezetés
- Diffúziós áram
- Párkeltés és rekombináció

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzisztor

A félvezető eszközök gyártásáról

Tiszta és adalékolt félvezetők



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

● Elektronok tiszta félvezetőkben

- A Si szerkezete
- Az elektronok viselkedése Si-ban
- 5 vegyértékű adalék atom hatása
- 3 vegyértékű adalék atom hatása
- A lyukvezetés
- Adalékolt félvezetők sávszerkezete
- Speciális jelenségek a félvezetőkben
- Lyukvezetés
- Diffúziós áram
- Párkeltés és rekombináció

Érintkezési jelenségek

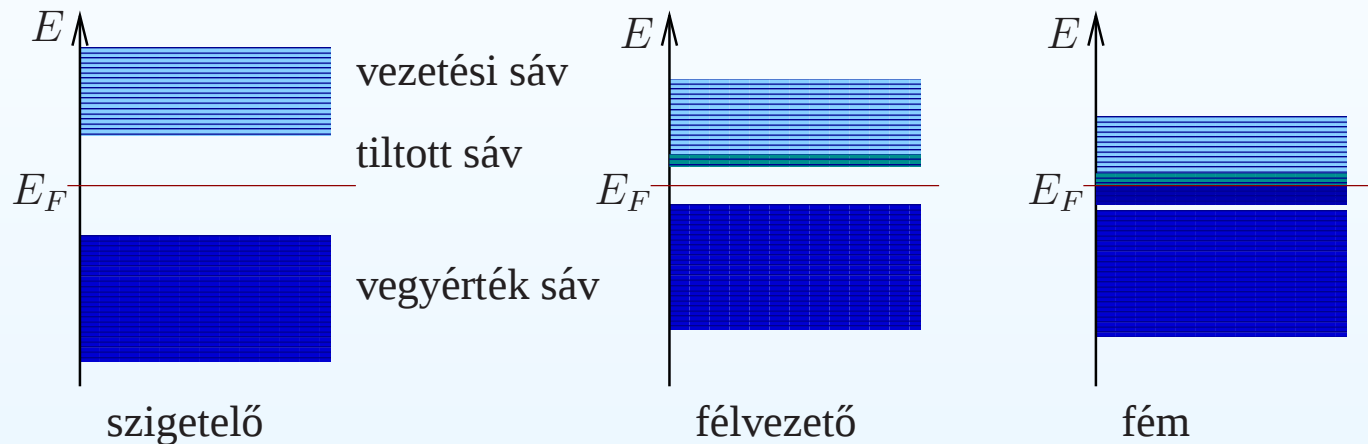
A félvezető dióda

A tranzisztor

A félvezető eszközök gyártásáról

Elektronok tiszta félvezetőkben

Erről az előző fejezetben már szoltunk: Az elektronok nagy része a vegyértéksávban van, a tiszta félvezető lényegében szigetelő.

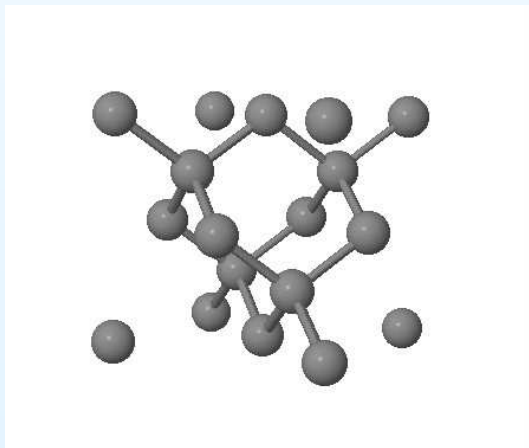
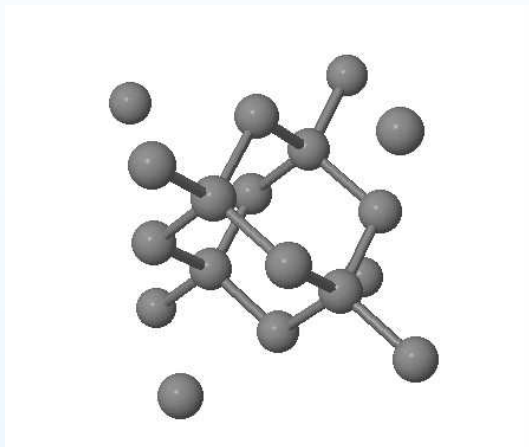


Most részletesebben megvizsgáljuk a félvezetők esetét.

Beszéljünk konkrétan a szilíciumról. (A többi félvezető anyagra ugyanezt el lehet mondani.)

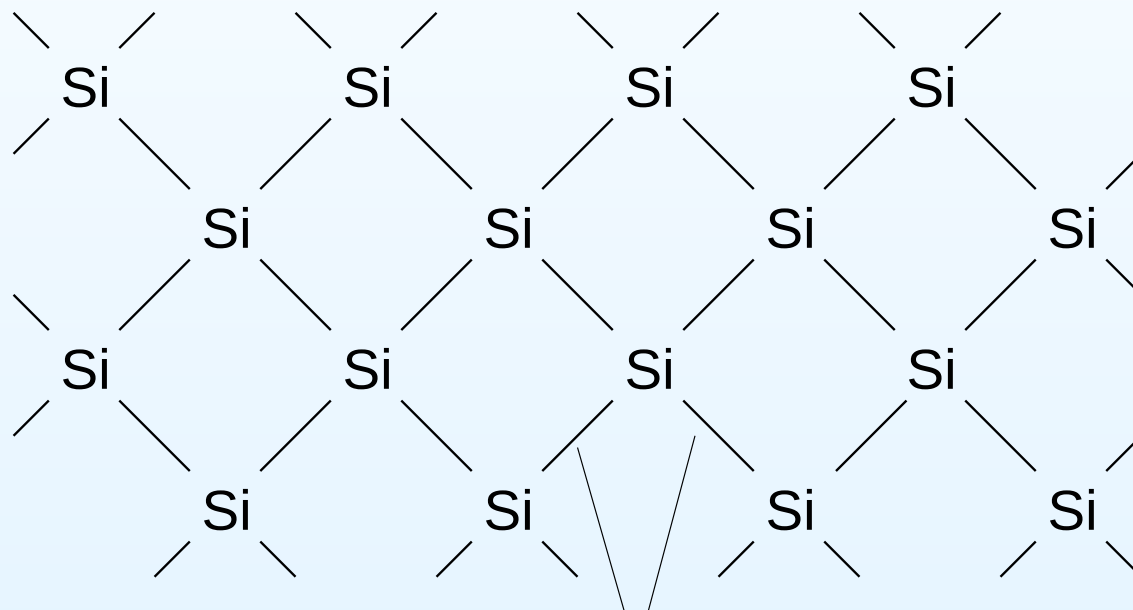
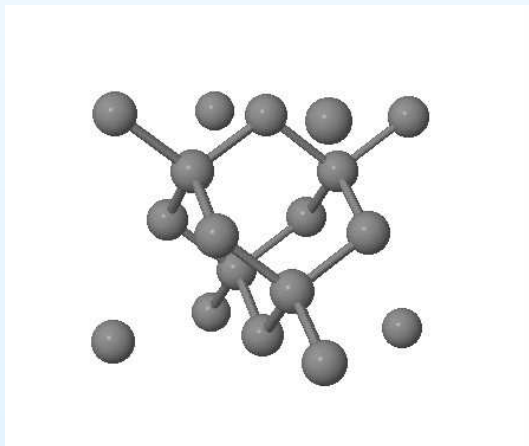
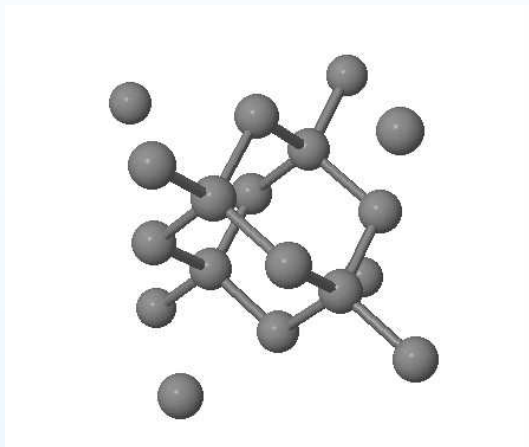
A Si szerkezete

A Si 4 vegyértékű kovalens rács ugyanolyan térbeli szerkezettel, mint a gyémánt:



A Si szerkezete

A Si 4 vegyértékű kovalens rács ugyanolyan térbeli szerkezettel, mint a gyémánt:



kötő, lokalizált elektronpárok

Egyszerűsítés: a lényeg, hogy minden Si atom 4 szomszédal van kötésben.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

- Elektronok tiszta félvezetőkben
- A Si szerkezete
- Az elektronok viselkedése Si-ban
- 5 vegyértékű adalék atom hatása
- 3 vegyértékű adalék atom hatása
- A lyukvezetés
- Adalékolt félvezetők sávszerkezete
- Speciális jelenségek a félvezetőkben
- Lyukvezetés
- Diffúziós áram
- Párkeltés és rekombináció

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzisztor

A félvezető eszközök gyártásáról

Az elektronok viselkedése Si-ban

Az elektronok lényegében **helyhez kötöttek**:

- az atomtörzsek elektronjai több eV-tal szakíthatók csak ki az atomból
- a kovalens kötést kialakító elektronok 1,1 eV-tal szakíthatók ki a két atom közül

A hőmozgás energiáját jellemző kT érték pedig kb. 0,025 eV szobahőmérsékleten.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

- Elektronok tiszta félvezetőkben
- A Si szerkezete
- Az elektronok viselkedése Si-ban
- 5 vegyértékű adalék atom hatása
- 3 vegyértékű adalék atom hatása
- A lyukvezetés
- Adalékolt félvezetők sávszerkezete
- Speciális jelenségek a félvezetőkben
- Lyukvezetés
- Diffúziós áram
- Párkeltés és rekombináció

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzisztor

A félvezető eszközök gyártásáról

Az elektronok viselkedése Si-ban

Az elektronok lényegében **helyhez kötöttek**:

- az atomtörzsek elektronjai több eV-tal szakíthatók csak ki az atomból
- a kovalens kötést kialakító elektronok 1,1 eV-tal szakíthatók ki a két atom közül

A hőmozgás energiáját jellemző kT érték pedig kb. 0,025 eV szobahőmérsékleten.

A hőmérséklet emelésével több elektron tud kiszakadni a helyhez kötött állapotokból (vegyértéksáv) és lényegében szabaddá válni (vezetési sáv).



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

- Elektronok tiszta félvezetőkben
- A Si szerkezete
- Az elektronok viselkedése Si-ban
- **5 vegyértékű adalék atom hatása**
- 3 vegyértékű adalék atom hatása
- A lyukvezetés
- Adalékolt félvezetők sávszerkezete
- Speciális jelenségek a félvezetőkben
- Lyukvezetés
- Diffúziós áram
- Párkeltés és rekombináció

Érintkezési jelenségek

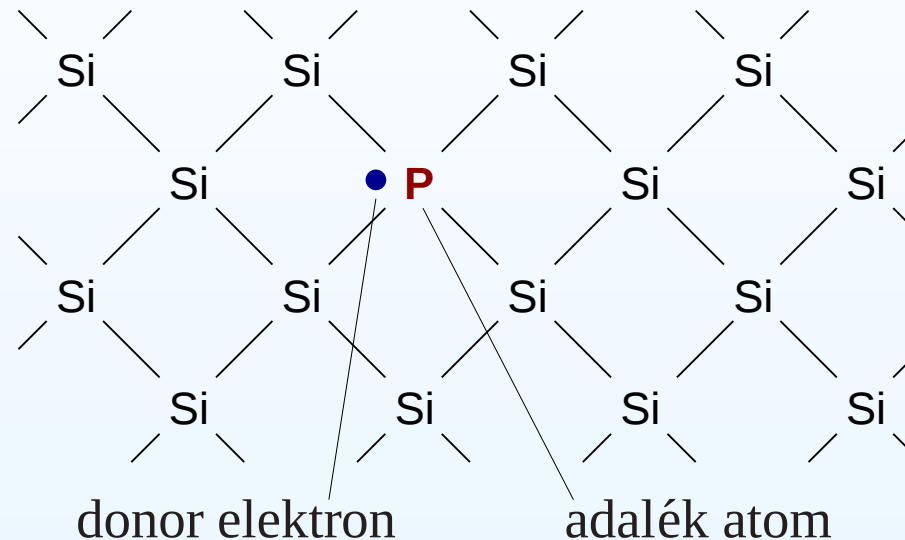
A félvezető dióda

A tranzistor

A félvezető eszközök gyártásáról

5 vegyértékű adalék atom hatása

Adjunk pl. foszfor (P) atomot a Si-rácshoz! A P 5 vegyérték elektronja közül 1 „felesleges”:



A plusz elektron majdnem teljesen szabad: a P-ion vonzása köti kissé. Ez csak 0,01 eV nagyságrendű kötési energiát jelent, ezért szobahőmérsékleten is majdnem minden adalék atom egy-egy vezetési elektront jelent.

Elnevezés: P a **donor atom**, a plusz elektron a **donor elektron**. Ez az adalékolás **n-típusú**.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

- Elektronok tiszta félvezetőkben
- A Si szerkezete
- Az elektronok viselkedése Si-ban
- 5 vegyértékű adalék atom hatása
- **3 vegyértékű adalék atom hatása**
- A lyukvezetés
- Adalékolt félvezetők sávszerkezete
- Speciális jelenségek a félvezetőkben
- Lyukvezetés
- Diffúziós áram
- Párkeltés és rekombináció

Érintkezési jelenségek

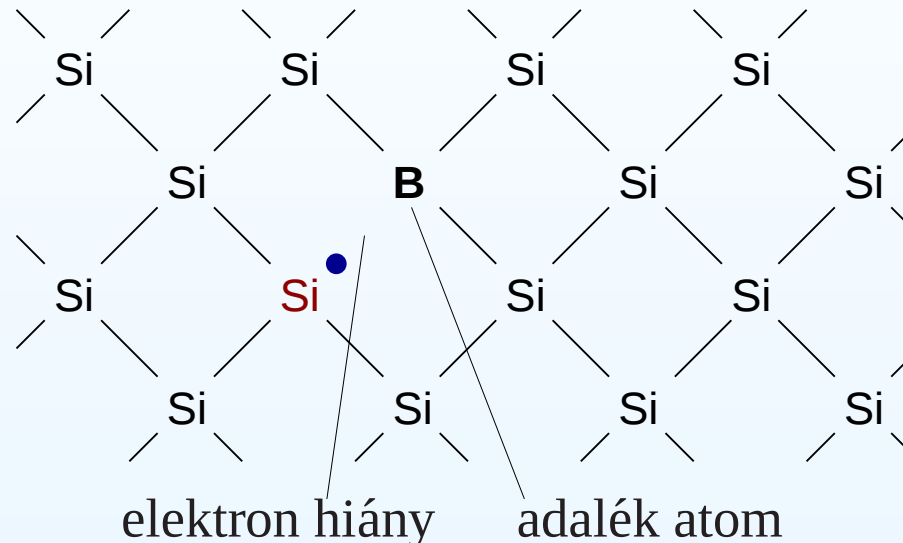
A félvezető dióda

A tranzistor

A félvezető eszközök gyártásáról

3 vegyértékű adalék atom hatása

Adjunk pl. bór (B) atomot a Si-rácshoz! A B 3 vegyérték elektronja hiányt jelent: az egyik kötő elektronpár hiányos lesz.



A B-Si kötés elektronhiánya az egész kristályra kiterjedő elektron-átrendeződést indít meg, mert az energiaminimum-elv miatt szeretne kiegészülni, de ezt csak a szomszédok rovására tudja megtenni. (Részletek a következő lapon.)

Elnevezés: B az **akceptor atom**. Ez az adalékolás **p-típusú**.

A lyukvezetés

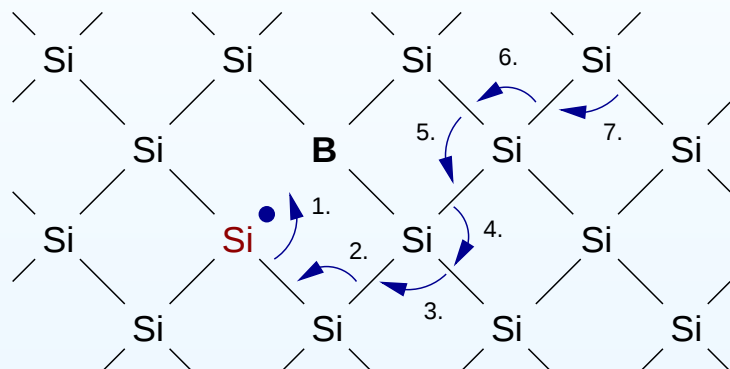
Akceptor jelenléte esetén a hiányos kötés az energiaminimum-elv miatt ki akar egészülni.

A lyukvezetés

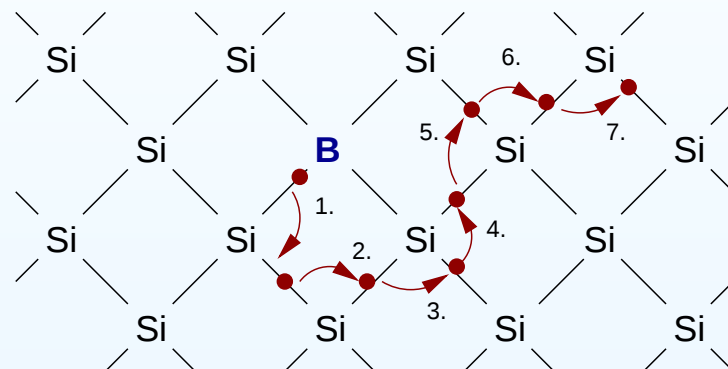
Akceptor jelenléte esetén a hiányos kötés az energiaminimum-elv miatt ki akar egészülni. A szomszédból szerez egy elektront,

A lyukvezetés

Akceptor jelenléte esetén a hiányos kötés az energiaminimum-elv miatt ki akar egészülni. A szomszédból szerez egy elektront, de akkor ott lesz hiány, és akkor az a kötés szerez egy elektront valahonnan, ...



elektronok átrendeződése

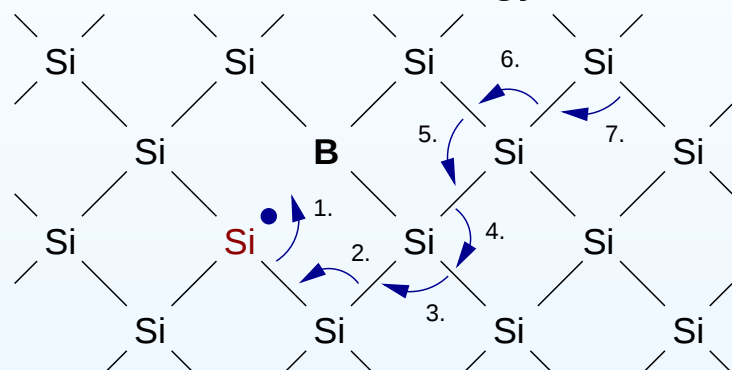


egyetlen "lyuk" mozgása

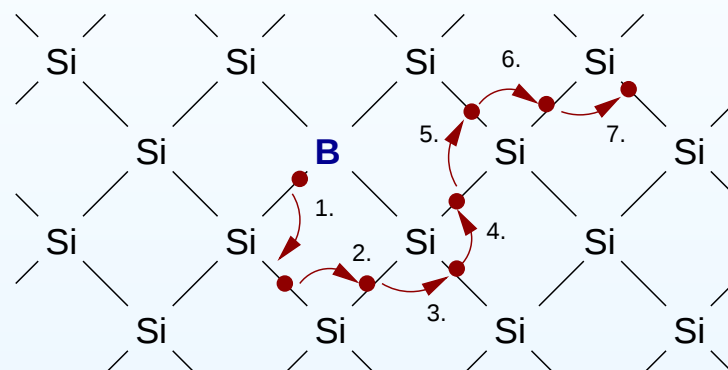
Az átrendeződés bonyolult: egyszerűbb, ha azt mondjuk meg, honnan hiányzik az elektron.

A lyukvezetés

Akceptor jelenléte esetén a hiányos kötés az energiaminimum-elv miatt ki akar egészülni. A szomszédból szerez egy elektront, de akkor ott lesz hiány, és akkor az a kötés szerez egy elektront valahonnan, ...



elektronok átrendeződése



egyetlen "lyuk" mozgása

Az átrendeződés bonyolult: egyszerűbb, ha azt mondjuk meg, honnan hiányzik az elektron.

Lyuk: az elektronhiány helye.

A lyuk úgy mozog a rácsban, mint egy pozitív töltésű részecske! Egyszerűbb erről beszélni, mint a sok-sok elektron átrendeződéséről.

A lyuk 0,01 eV nagyságrendű energiával kötődik az akceptor atomhoz.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

- Elektronok tiszta félvezetőkben
- A Si szerkezete
- Az elektronok viselkedése Si-ban
- 5 vegyértékű adalék atom hatása
- 3 vegyértékű adalék atom hatása
- A lyukvezetés
- **Adalékolt félvezetők sávszerkezete**
- Speciális jelenségek a félvezetőkben
- Lyukvezetés
- Diffúziós áram
- Párkeltés és rekombináció

Érintkezési jelenségek

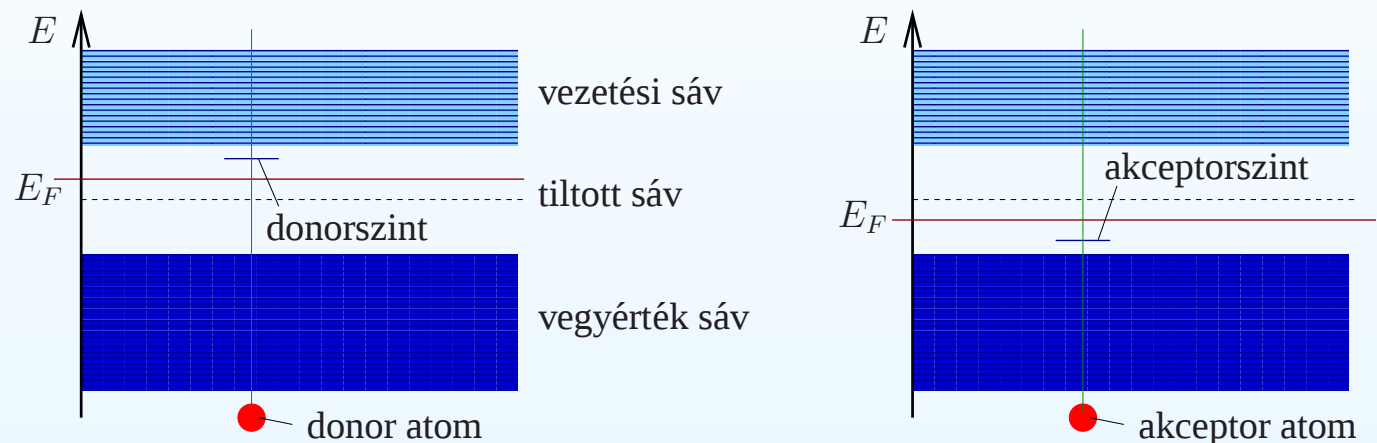
A félvezető dióda

A tranzisztor

A félvezető eszközök gyártásáról

Adalékolt félvezetők sávszerkezete

Az előzőek szerint a donor elektronok szintjei kicsivel (néhány 0,01 eV-nyival) a vezetési sáv alatt, az akceptorszintek kb. ugyanennyivel a vegyértéksáv felett vannak.



A donor- és akceptorszintek lokalizáltak.

A donorszintek felfelé, az akceptorszintek lefelé mozdítják el az átlagos Fermi-szintet.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

- Elektronok tiszta félvezetőkben
- A Si szerkezete
- Az elektronok viselkedése Si-ban
- 5 vegyértékű adalék atom hatása
- 3 vegyértékű adalék atom hatása
- A lyukvezetés
- **Adalékolt félvezetők sávszerkezete**
- Speciális jelenségek a félvezetőkben
- Lyukvezetés
- Diffúziós áram
- Párkeltés és rekombináció

Érintkezési jelenségek

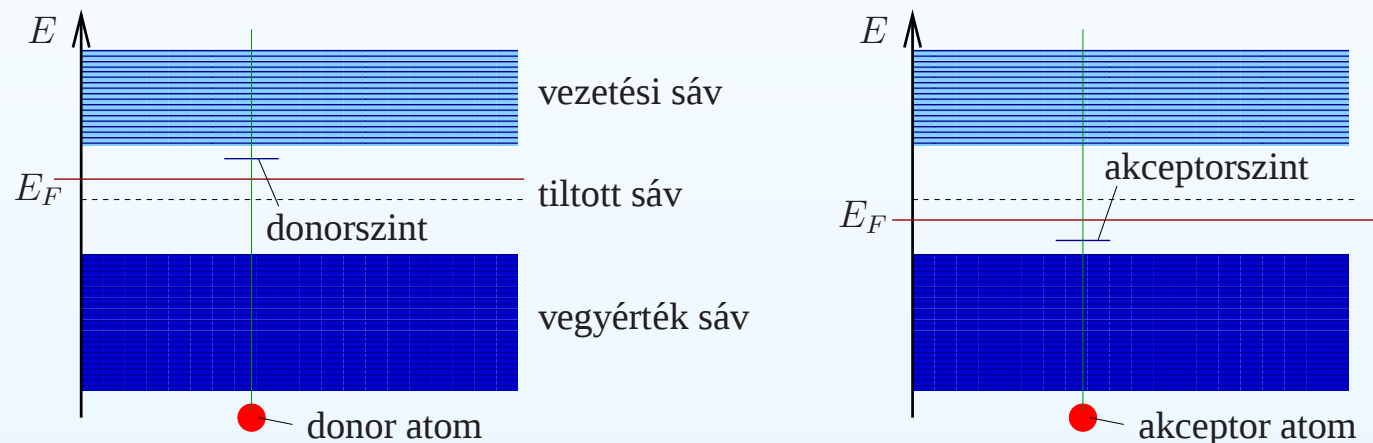
A félvezető dióda

A tranzistor

A félvezető eszközök gyártásáról

Adalékolt félvezetők sávszerkezete

Az előzőek szerint a donor elektronok szintjei kicsivel (néhány 0,01 eV-nyival) a vezetési sáv alatt, az akceptorszintek kb. ugyanennyivel a vegyértéksáv felett vannak.



A donor- és akceptorszintek lokalizáltak.

A donorszintek felfelé, az akceptorszintek lefelé mozdítják el az átlagos Fermi-szintet.

Ugyanabban az anyagdarabban p- és n-típusú adalék atomok is lehetnek.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

- Elektronok tiszta félvezetőkben
- A Si szerkezete
- Az elektronok viselkedése Si-ban
- 5 vegyértékű adalék atom hatása
- 3 vegyértékű adalék atom hatása
- A lyukvezetés
- Adalékolt félvezetők sávszerkezete
- **Speciális jelenségek a félvezetőkben**
- Lyukvezetés
- Diffúziós áram
- Párkeltés és rekombináció

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzistor

A félvezető eszközök gyártásáról

Speciális jelenségek a félvezetőkben

Ezek a jelenségek néha más anyagokban is felbukkannak, de félvezetők esetén válnak jelentőssé:

- lyukvezetés
- diffúziós áram
- párkeltés és rekombináció



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

- Elektronok tiszta félvezetőkben
- A Si szerkezete
- Az elektronok viselkedése Si-ban
- 5 vegyértékű adalék atom hatása
- 3 vegyértékű adalék atom hatása
- A lyukvezetés
- Adalékolt félvezetők sávszerkezete
- Speciális jelenségek a félvezetőkben
- **Lyukvezetés**
- Diffúziós áram
- Párkeltés és rekombináció

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzistor

A félvezető eszközök gyártásáról

Lyukvezetés

Az előzőekben már elmondtuk a jelenség alapjait.

Normál vezetőkben is előfordulhat a jelenség, de ott mindig elhanyagolható.

Ha n a vezetési elektronok, p a -lyukak koncentrációja, μ_n ill. μ_p a megfelelő mozgékonyági értékek, akkor a drift áramsűrűség:

$$j = en\mu_n + ep\mu_p$$

(e az elemi töltés.)

Általában egy félvezetőben n és p is különbözik 0-tól.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

- Elektronok tiszta félvezetőkben
- A Si szerkezete
- Az elektronok viselkedése Si-ban
- 5 vegyértékű adalék atom hatása
- 3 vegyértékű adalék atom hatása
- A lyukvezetés
- Adalékolt félvezetők sávszerkezete
- Speciális jelenségek a félvezetőkben
- **Lyukvezetés**
- Diffúziós áram
- Párkeltés és rekombináció

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzisztor

A félvezető eszközök gyártásáról

Lyukvezetés

Az előzőekben már elmondtuk a jelenség alapjait.

Normál vezetőkben is előfordulhat a jelenség, de ott mindig elhanyagolható.

Ha n a vezetési elektronok, p a -lyukak koncentrációja, μ_n ill. μ_p a megfelelő mozgékonyági értékek, akkor a drift áramsűrűség:

$$j = en\mu_n + ep\mu_p$$

(e az elemi töltés.)

Általában egy félvezetőben n és p is különbözik 0-tól.

A lyukak hasonlóan, de „ellentétes előjellel” viselkednek, mint az elektronok: számukra a vezetési- és a vegyértéksáv szerepe megcserélődik.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

- Elektronok tiszta félvezetőkben
- A Si szerkezete
- Az elektronok viselkedése Si-ban
- 5 vegyértékű adalék atom hatása
- 3 vegyértékű adalék atom hatása
- A lyukvezetés
- Adalékolt félvezetők sávszerkezete
- Speciális jelenségek a félvezetőkben
- Lyukvezetés
- Diffúziós áram
- Párkeltés és rekombináció

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzistor

A félvezető eszközök gyártásáról

Diffúziós áram

Drift-áram: a „hagyományos” áram, amit feszültség-különbség kelt. Ez jellemző pl. a fém vezetésekre.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

- Elektronok tiszta félvezetőkben
- A Si szerkezete
- Az elektronok viselkedése Si-ban
- 5 vegyértékű adalék atom hatása
- 3 vegyértékű adalék atom hatása
- A lyukvezetés
- Adalékolt félvezetők sáv szerkezete
- Speciális jelenségek a félvezetőkben
- Lyukvezetés
- Diffúziós áram
- Párkeltés és rekombináció

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

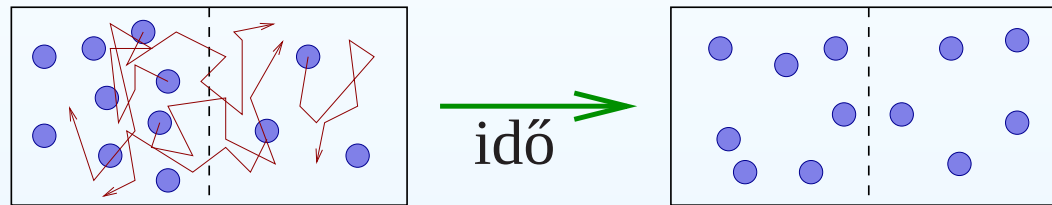
A tranzistor

A félvezető eszközök gyártásáról

Diffúziós áram

Drift-áram: a „hagyományos” áram, amit feszültség-különbség kelt. Ez jellemző pl. a fém vezetésekre.

Diffúziós áram: a töltéshordozók koncentráció-különbsége okozza.



Kezdetben legyen bal oldalon nagyobb elektronsűrűség. Ha nincs feszültség-különbség, az elektronok a hőmozgás miatt véletlenszerűen bolyonganak.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

- Elektronok tiszta félvezetőkben
- A Si szerkezete
- Az elektronok viselkedése Si-ban
- 5 vegyértékű adalék atom hatása
- 3 vegyértékű adalék atom hatása
- A lyukvezetés
- Adalékolt félvezetők sávszerkezete
- Speciális jelenségek a félvezetőkben
- Lyukvezetés
- **Diffúziós áram**
- Párkeltés és rekombináció

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

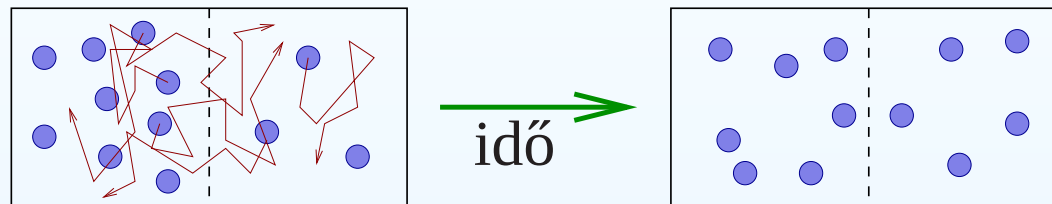
A tranzistor

A félvezető eszközök gyártásáról

Diffúziós áram

Drift-áram: a „hagyományos” áram, amit feszültség-különbség kelt. Ez jellemző pl. a fém vezetésekre.

Diffúziós áram: a töltéshordozók koncentráció-különbsége okozza.



Kezdetben legyen bal oldalon nagyobb elektronsűrűség. Ha nincs feszültség-különbség, az elektronok a hőmozgás miatt véletlenszerűen bolyonganak.

Mivel bal oldalon n nagyobb, ezért a véletlenszerű mozgás miatt is balról jobbra több elektron megy, mint fordítva.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

- Elektronok tiszta félvezetőkben
- A Si szerkezete
- Az elektronok viselkedése Si-ban
- 5 vegyértékű adalék atom hatása
- 3 vegyértékű adalék atom hatása
- A lyukvezetés
- Adalékolt félvezetők sávszerkezete
- Speciális jelenségek a félvezetőkben
- Lyukvezetés
- **Diffúziós áram**
- Párkeltés és rekombináció

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

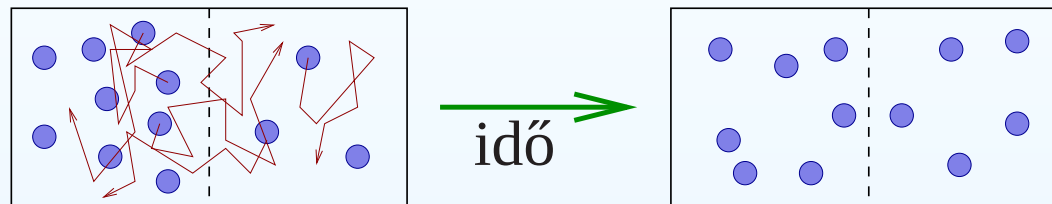
A tranzistor

A félvezető eszközök gyártásáról

Diffúziós áram

Drift-áram: a „hagyományos” áram, amit feszültség-különbség kelt. Ez jellemző pl. a fém vezetésekre.

Diffúziós áram: a töltéshordozók koncentráció-különbsége okozza.



Kezdetben legyen bal oldalon nagyobb elektronsűrűség. Ha nincs feszültség-különbség, az elektronok a hőmozgás miatt véletlenszerűen bolyonganak.

Mivel bal oldalon n nagyobb, ezért a véletlenszerű mozgás miatt is balról jobbra több elektron megy, mint fordítva.

Ez jobbról balra mutató áramerősséget jelent.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

- Elektronok tiszta félvezetőkben
- A Si szerkezete
- Az elektronok viselkedése Si-ban
- 5 vegyértékű adalék atom hatása
- 3 vegyértékű adalék atom hatása
- A lyukvezetés
- Adalékolt félvezetők sáv szerkezete
- Speciális jelenségek a félvezetőkben
- Lyukvezetés
- **Diffúziós áram**
- Párkeltés és rekombináció

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

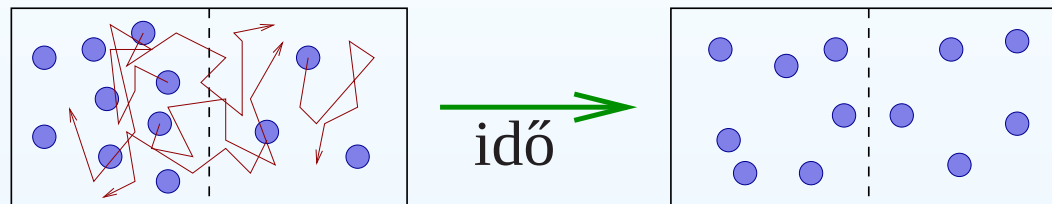
A tranzistor

A félvezető eszközök gyártásáról

Diffúziós áram

Drift-áram: a „hagyományos” áram, amit feszültség-különbség kelt. Ez jellemző pl. a fém vezetésekre.

Diffúziós áram: a töltéshordozók koncentráció-különbsége okozza.



Kezdetben legyen bal oldalon nagyobb elektronsűrűség. Ha nincs feszültség-különbség, az elektronok a hőmozgás miatt véletlenszerűen bolyonganak.

Mivel bal oldalon n nagyobb, ezért a véletlenszerű mozgás miatt is balról jobbra több elektron megy, mint fordítva.

Ez jobbról balra mutató áramerősséget jelent.

Fémekben n = állandó. Félvezetőkben n az adalékolásnak megfelelően helyről helyre változhat, ezért ott jelentős.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

- Elektronok tiszta félvezetőkben
- A Si szerkezete
- Az elektronok viselkedése Si-ban
- 5 vegyértékű adalék atom hatása
- 3 vegyértékű adalék atom hatása
- A lyukvezetés
- Adalékolt félvezetők sávszerkezete
- Speciális jelenségek a félvezetőkben
- Lyukvezetés
- Diffúziós áram
- **Párkeltés és rekombináció**

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzisztor

A félvezető eszközök gyártásáról

Párkeltés és rekombináció

Párkeltés:

Külső energia (fény, hőmozgás) hatására egy vegyértékelektron feljut a vezetési sávba. Lesz egy vezetési elektronunk és egy vezetési lyukunk is!



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

- Elektronok tiszta félvezetőkben
- A Si szerkezete
- Az elektronok viselkedése Si-ban
- 5 vegyértékű adalék atom hatása
- 3 vegyértékű adalék atom hatása
- A lyukvezetés
- Adalékolt félvezetők sávszerkezete
- Speciális jelenségek a félvezetőkben
- Lyukvezetés
- Diffúziós áram
- **Párkeltés és rekombináció**

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzisztor

A félvezető eszközök gyártásáról

Párkeltés és rekombináció

Párkeltés:

Külső energia (fény, hőmozgás) hatására egy vegyértékelektron feljut a vezetési sávba. Lesz egy vezetési elektronunk és egy vezetési lyukunk is!

Rekombináció:

A párkeltés fordított folyamata: egy vezetési elektron és egy lyuk találkozásakor mindkettő „megszűnik” és az energia hő vagy fotonok formájában felszabadul.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

- Elektronok tiszta félvezetőkben
- A Si szerkezete
- Az elektronok viselkedése Si-ban
- 5 vegyértékű adalék atom hatása
- 3 vegyértékű adalék atom hatása
- A lyukvezetés
- Adalékolt félvezetők sávszerkezete
- Speciális jelenségek a félvezetőkben
- Lyukvezetés
- Diffúziós áram
- **Párkeltés és rekombináció**

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzistor

A félvezető eszközök gyártásáról

Párkeltés és rekombináció

Párkeltés:

Külső energia (fény, hőmozgás) hatására egy vegyértékelektron feljut a vezetési sávba. Lesz egy vezetési elektronunk és egy vezetési lyukunk is!

Rekombináció:

A párkeltés fordított folyamata: egy vezetési elektron és egy lyuk találkozásakor mindkettő „megszűnik” és az energia hő vagy fotonok formájában felszabadul.

Megjegyzés: Természetesen nem semmisül vagy keletkezik semmi, mert a lyuk csak az elektronhiányos állapot szemléletes jelzése.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

- Elektronok tiszta félvezetőkben
- A Si szerkezete
- Az elektronok viselkedése Si-ban
- 5 vegyértékű adalék atom hatása
- 3 vegyértékű adalék atom hatása
- A lyukvezetés
- Adalékolt félvezetők sávszerkezete
- Speciális jelenségek a félvezetőkben
- Lyukvezetés
- Diffúziós áram
- Párkeltés és rekombináció

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzisztor

A félvezető eszközök gyártásáról

A szorzatállandóság törvénye

A párkeltés és a rekombináció egyidejűleg zajlik. Egyensúlyi állapotban n és p időben állandó.

Adott hőmérséklet és megvilágítás esetén a párkeltések térfogategységenkénti száma egy állandó K érték.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

- Elektronok tiszta félvezetőkben
- A Si szerkezete
- Az elektronok viselkedése Si-ban
- 5 vegyértékű adalék atom hatása
- 3 vegyértékű adalék atom hatása
- A lyukvezetés
- Adalékolt félvezetők sávszerkezete
- Speciális jelenségek a félvezetőkben
- Lyukvezetés
- Diffúziós áram
- **Párkeltés és rekombináció**

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzisztor

A félvezető eszközök gyártásáról

A szorzatállandóság törvénye

A párkeltés és a rekombináció egyidejűleg zajlik. Egyensúlyi állapotban n és p időben állandó.

Adott hőmérséklet és megvilágítás esetén a párkeltések térfogategységenkénti száma egy állandó K érték.

A rekombinációk száma nyilván arányos n -nel is és p -vel is, azaz $R = C \cdot np$, ahol C állandó.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

- Elektronok tiszta félvezetőkben
- A Si szerkezete
- Az elektronok viselkedése Si-ban
- 5 vegyértékű adalék atom hatása
- 3 vegyértékű adalék atom hatása
- A lyukvezetés
- Adalékolt félvezetők sáv szerkezete
- Speciális jelenségek a félvezetőkben
- Lyukvezetés
- Diffúziós áram
- **Párkeltés és rekombináció**

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzisztor

A félvezető eszközök gyártásáról

A szorzatállandóság törvénye

A párkeltés és a rekombináció egyidejűleg zajlik. Egyensúlyi állapotban n és p időben állandó.

Adott hőmérséklet és megvilágítás esetén a párkeltések térfogategységenkénti száma egy állandó K érték.

A rekombinációk száma nyilván arányos n -nel is és p -vel is, azaz $R = C \cdot np$, ahol C állandó.

Egyensúlyban $R = K$, azaz $Cnp = K$, így $np = K/C = \text{állandó}$.

Szorzatállandóság törvénye: egy félvezető anyagban egyensúlyban $np = \text{állandó}$.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt
félvezetők

Érintkezési jelenségek

- Bevezetés
- A p-n átmenet
egyensúlyi állapota
- Fém-félvezető
átmenet egyensúlyi
állapota
- Érdekességek
- A termoelem
- A p-n átmenet
kapacitása

A félvezető dióda

A tranzistor

A félvezető eszközök
gyártásáról

Érintkezési jelenségek



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

● Bevezetés

- A p-n átmenet egyensúlyi állapota
- Fém-félvezető átmenet egyensúlyi állapota

● Érdekességek

- A termoelem
- A p-n átmenet kapacitása

A félvezető dióda

A tranzisztor

A félvezető eszközök gyártásáról

Bevezetés

Speciális és a gyakorlat szempontjából igen fontos jelenségek zajlanak ott, ahol a félvezető anyagok minősége változik.

A fontos jelenségek:

- **Diffúziós áram.** n és p különbsége esetén indul, a kiegyenlítődésként irányába hat.
- **Drift áram.** Ha feszültségkülönbség is fellép, akkor ez is elindul.
- **Rekombináció.** A határon szembe haladó vezetési elektronok és lyukak rekombinálódnak, ami csökkenti a vezetőképességet.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

● Bevezetés

- A p-n átmenet egyensúlyi állapota
- Fém-félvezető átmenet egyensúlyi állapota

● Érdekességek

- A termoelem
- A p-n átmenet kapacitása

A félvezető dióda

A tranzistor

A félvezető eszközök gyártásáról

Bevezetés

Speciális és a gyakorlat szempontjából igen fontos jelenségek zajlanak ott, ahol a félvezető anyagok minősége változik.

A fontos jelenségek:

- **Diffúziós áram.** n és p különbsége esetén indul, a kiegyenlítődésként irányába hat.
- **Drift áram.** Ha feszültségkülönbség is fellép, akkor ez is elindul.
- **Rekombináció.** A határon szembe haladó vezetési elektronok és lyukak rekombinálódnak, ami csökkenti a vezetőképességet.

Egyensúlyban:

- az eredő áramerősség 0
- az (átlagos) Fermi-szintek kiegyenlítődnek



Bevezetés

Tiszta és adalékolt
félvezetők

Érintkezési jelenségek

- Bevezetés
- A p-n átmenet
egyensúlyi állapota
- Fém-félvezető
átmenet egyensúlyi
állapota
- Érdekességek
- A termoelem
- A p-n átmenet
kapacitása

A félvezető dióda

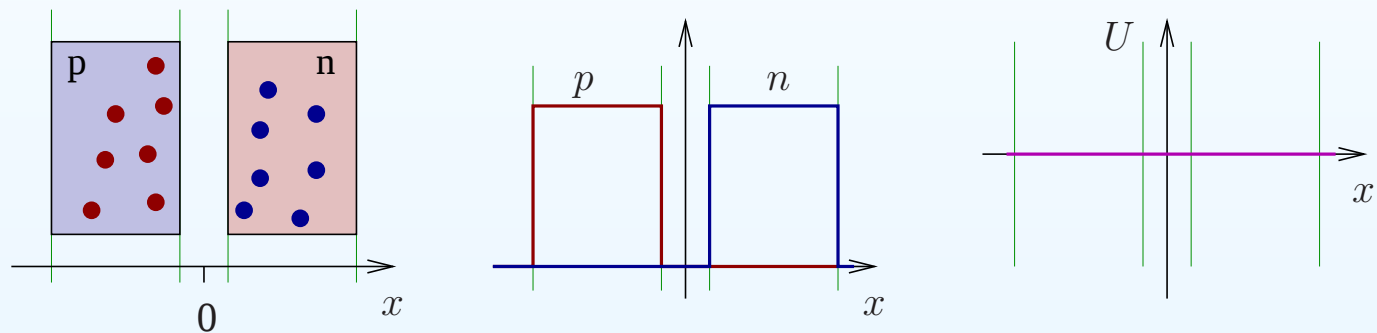
A tranzisztor

A félvezető eszközök
gyártásáról

A p-n átmenet egyensúlyi állapota

Gondolatkísérlet: érintsünk össze egy n- és egy p-típusú anyagdarabot!

Eredetileg: Mindkét oldal semleges, azonos feszültségen van, az n-típusú oldalon p értéke elhanyagolható és viszont.





Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

- Bevezetés
- A p-n átmenet egyensúlyi állapota
- Fém-félvezető átmenet egyensúlyi állapota
- Érdekessegek
- A termoelem
- A p-n átmenet kapacitása

A félvezető dióda

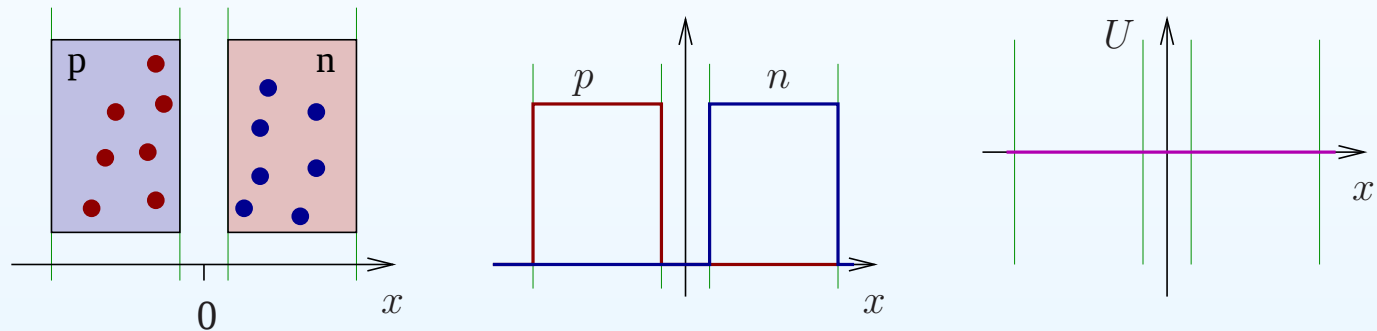
A tranzisztor

A félvezető eszközök gyártásáról

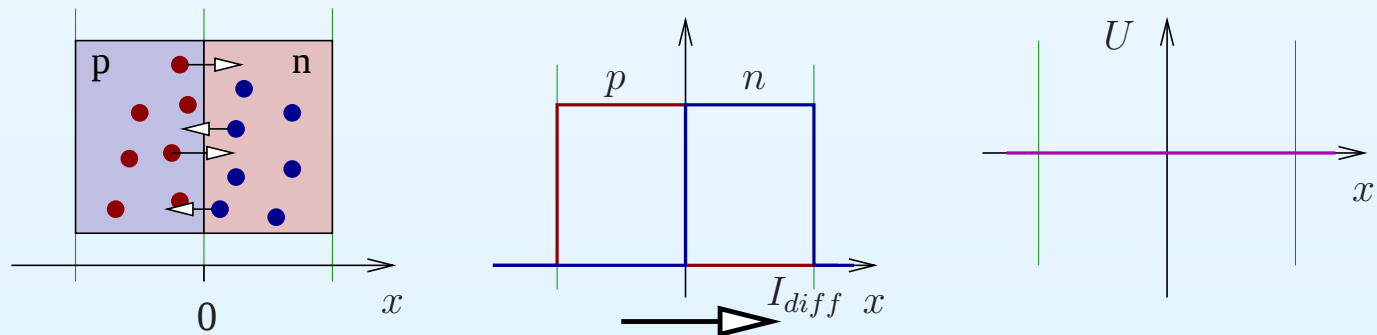
A p-n átmenet egyensúlyi állapota

Gondolatkísérlet: érintsünk össze egy n- és egy p-típusú anyagdarabot!

Eredetileg: Mindkét oldal semleges, azonos feszültségen van, az n-típusú oldalon p értéke elhanyagolható és viszont.



1. Az összeérintés után közvetlenül: megindul a diffúziós áram.





Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

- Bevezetés
- A p-n átmenet egyensúlyi állapota
- Fém-félvezető átmenet egyensúlyi állapota
- Érdekességek
- A termoelem
- A p-n átmenet kapacitása

A félvezető dióda

A tranzistor

A félvezető eszközök gyártásáról

A p-n átmenet egyensúlyi állapota (folyt.)

2. A két oldal polarizálódik: a kezdetben semleges oldalak feltöltődnek a diffúziós áram miatt: a p-típusú negatív, az n-típusú pozitív töltést szerez. Ez feszültség-különbséget is okoz.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

- Bevezetés
- A p-n átmenet egyensúlyi állapota
- Fém-félvezető átmenet egyensúlyi állapota
- Érdekességek
- A termoelem
- A p-n átmenet kapacitása

A félvezető dióda

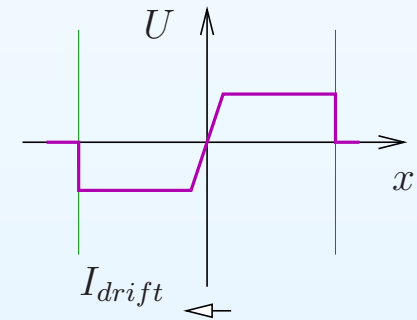
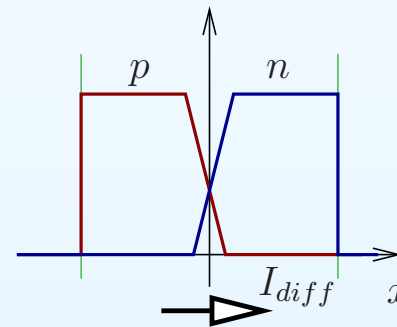
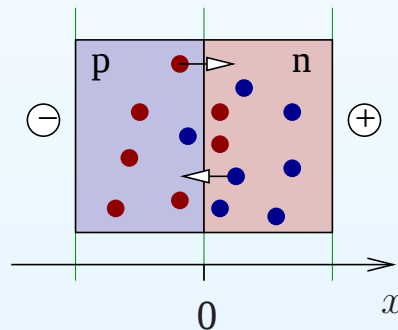
A tranzisztor

A félvezető eszközök gyártásáról

A p-n átmenet egyensúlyi állapota (folyt.)

2. A két oldal polarizálódik: a kezdetben semleges oldalak feltöltődnek a diffúziós áram miatt: a p-típusú negatív, az n-típusú pozitív töltést szerez. Ez feszültség-különbséget is okoz.

3. Elindul a drift-áram: a létrejött feszültség-különbség miatt. Ez épp ellentétes irányú lesz a diffúziós árammal:





Bevezetés

Tiszta és adalékolt
félvezetők

Érintkezési jelenségek

- Bevezetés
- A p-n átmenet
egyensúlyi állapota
- Fém-félvezető
átmenet egyensúlyi
állapota
- Érdekességek
- A termoelem
- A p-n átmenet
kapacitása

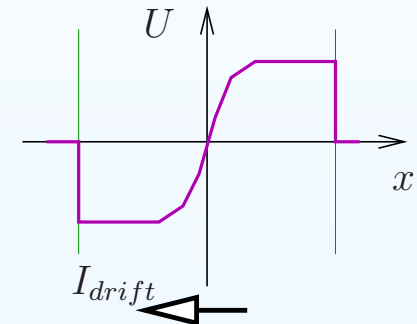
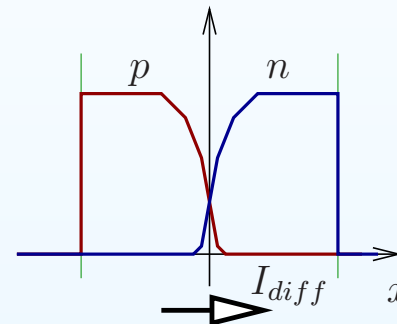
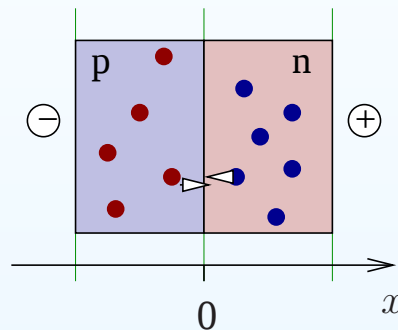
A félvezető dióda

A tranzisztor

A félvezető eszközök
gyártásáról

A p-n átmenet egyensúlyi állapota (folyt.)

4. **Beáll az egyensúly:** kiegyenlítődnek a Fermi-szintek, a határ közelében a rekombinációk miatt megjelenik a **kiürített zóna**.





Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

- Bevezetés
- A p-n átmenet egyensúlyi állapota
- Fém-félvezető átmenet egyensúlyi állapota
- Érdekességek
- A termoelem
- A p-n átmenet kapacitása

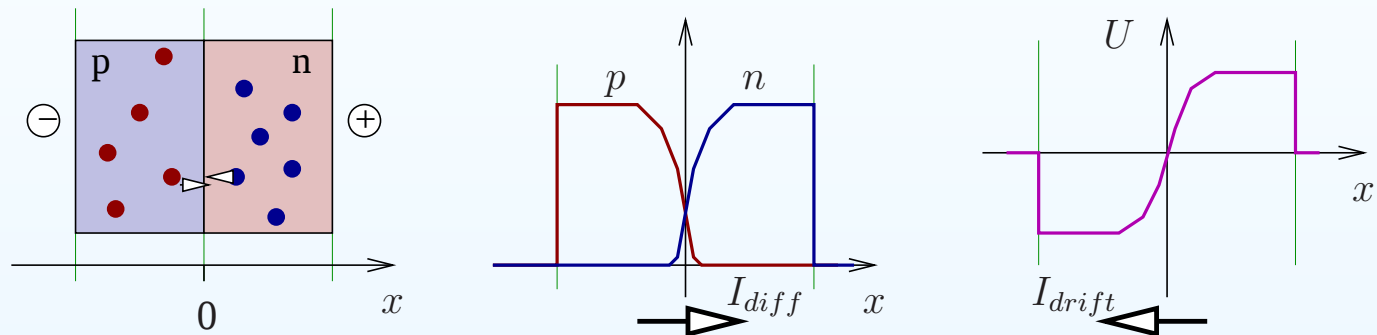
A félvezető dióda

A tranzisztor

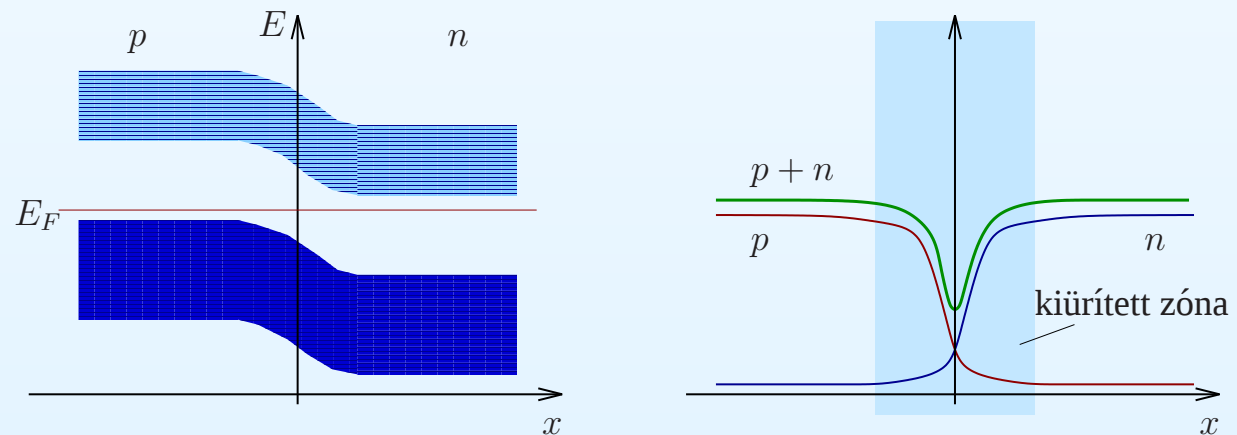
A félvezető eszközök gyártásáról

A p-n átmenet egyensúlyi állapota (folyt.)

4. **Beáll az egyensúly:** kiegyenlítődnek a Fermi-szintek, a határ közelében a rekombinációk miatt megjelenik a **kiürített zóna**.



Az egyensúlyi sávszerkezet:





Bevezetés

Tiszta és adalékolt
félvezetők

Érintkezési jelenségek

- Bevezetés
- A p-n átmenet
egyensúlyi állapota
- **Fém-félvezető
átmenet egyensúlyi
állapota**
- Érdekességek
- A termoelem
- A p-n átmenet
kapacitása

A félvezető dióda

A tranzistor

A félvezető eszközök
gyártásáról

Fém-félvezető átmenet egyensúlyi állapota

A p-n átmenethez hasonló jelenségek történnek:

- Fermi-szintek kiegyenlítődnek
- a diffúziós és a drift áram kioltja egymást egyensúlyban



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

- Bevezetés
- A p-n átmenet egyensúlyi állapota
- **Fém-félvezető átmenet egyensúlyi állapota**
- Érdekessegek
- A termoelem
- A p-n átmenet kapacitása

A félvezető dióda

A tranzistor

A félvezető eszközök gyártásáról

Fém-félvezető átmenet egyensúlyi állapota

A p-n átmenethez hasonló jelenségek történnek:

- Fermi-szintek kiegyenlítődnek
- a diffúziós és a drift áram kioltja egymást egyensúlyban

Fém és n-típusú félvezető érintkezését vizsgáljuk.

Számít, hogyan viszonyul a fém és a félvezető összeérintés előtti Fermi-szintje egymáshoz.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

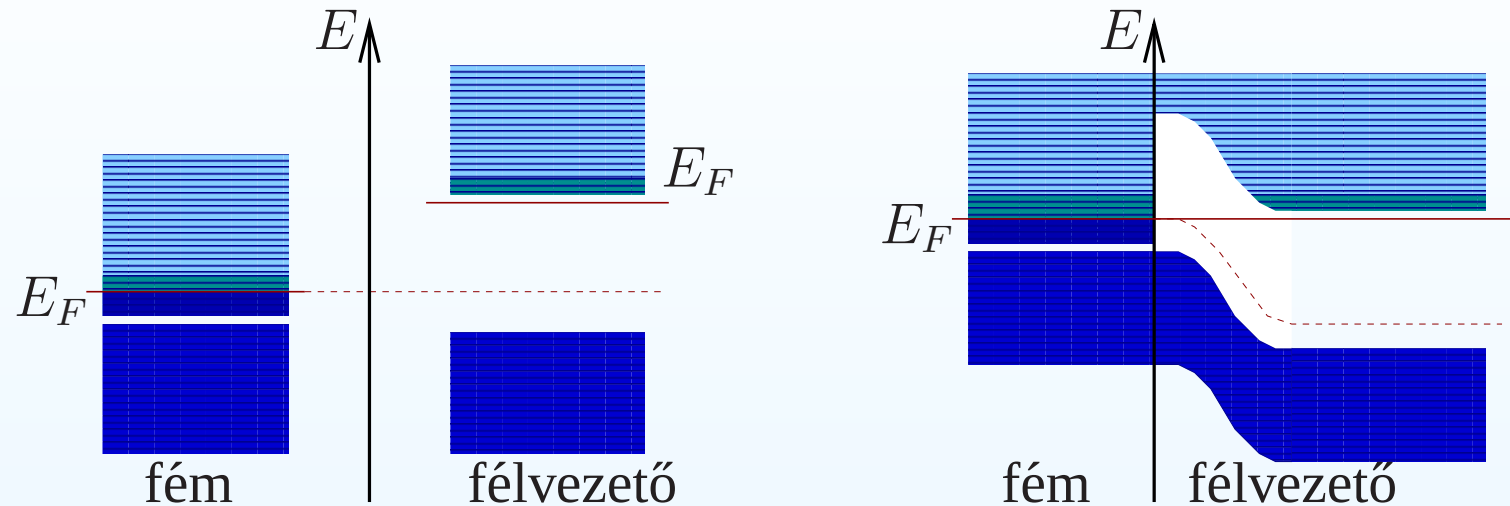
- Bevezetés
- A p-n átmenet egyensúlyi állapota
- **Fém-félvezető átmenet egyensúlyi állapota**
- Érdekeségek
- A termoelem
- A p-n átmenet kapacitása

A félvezető dióda

A tranzisztor

A félvezető eszközök gyártásáról

a félvezető kezdeti Fermi-szintje a magasabb



A határ közelében a félvezető oldalán a kis energiájú vezetési elektronok nem juthatnak át: szigetelő réteg, hasonló a p-n átmenet esetéhez.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

- Bevezetés
- A p-n átmenet egyensúlyi állapota
- **Fém-félvezető átmenet egyensúlyi állapota**

Érdekességek

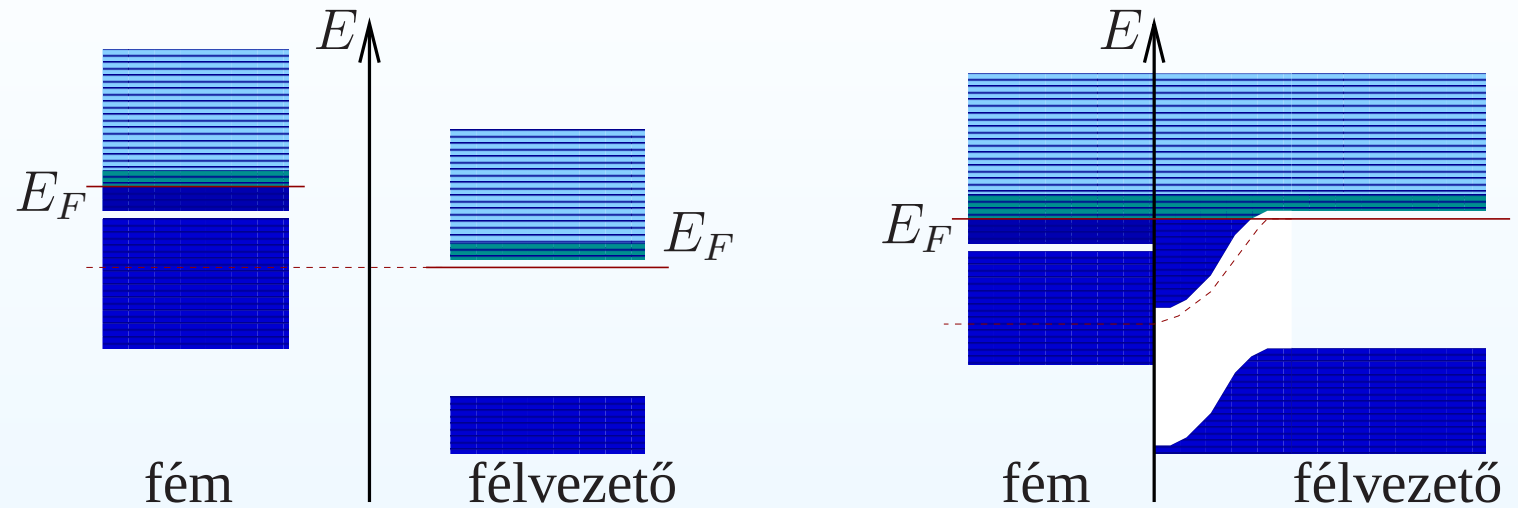
- A termoelem
- A p-n átmenet kapacitása

A félvezető dióda

A tranzistor

A félvezető eszközök gyártásáról

a fém kezdeti Fermi-szintje a magasabb



Nem alakul ki szigetelő réteg, a kapcsolat olyan, mint fém-fém érintkezéskor. Elnevezés: **galvanikus kapcsolat**.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt
félvezetők

Érintkezési jelenségek

- Bevezetés
- A p-n átmenet
egyensúlyi állapota
- Fém-félvezető
átmenet egyensúlyi
állapota

● Érdekességek

- A termoelem
- A p-n átmenet
kapacitása

A félvezető dióda

A tranzisztor

A félvezető eszközök
gyártásáról

Érdekességek

Lehet-e áramforrásként használni egy p-n átmenetet?

A két oldal között feszültség-különbség alakul ki. (0,1–1 V nagyságrendű)



Bevezetés

Tiszta és adalékolt
félvezetők

Érintkezési jelenségek

- Bevezetés
- A p-n átmenet
egyensúlyi állapota
- Fém-félvezető
átmenet egyensúlyi
állapota

• Érdekességek

- A termoelem
- A p-n átmenet
kapacitása

A félvezető dióda

A tranzistor

A félvezető eszközök
gyártásáról

Érdekességek

Lehet-e áramforrásként használni egy p-n átmenetet?

A két oldal között feszültség-különbség alakul ki. (0,1–1 V nagyságrendű)

Ha egy p-n átmenet két oldalára vezetéket csatlakoztatunk, a félvezető-fém kontaktusokon is feszültség-különbség alakul ki, így a vezeték két vége között egyensúlyban nem lesz feszültség, tehát áram sem folyik.

Nem használható tehát feszültségforrásként a p-n átmenet.

(A levezetést mellőztük.)



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

- Bevezetés
- A p-n átmenet egyensúlyi állapota
- Fém-félvezető átmenet egyensúlyi állapota
- Érdekességek
- **A termoelem**
- A p-n átmenet kapacitása

A félvezető dióda

A tranzisztor

A félvezető eszközök gyártásáról

A termoelem

A számítások szerint az előbb elmondottak akkor teljesülnek, ha a két oldal azonos hőmérsékletű. Ha hőmérséklet-különbség van, akkor lesz eredő áram!

Elnevezés: **termoelem**.

A termoelemek nem képesek nagy teljesítmény leadására, ezért inkább csak a hőmérséklet-különbség mérésére használják fel a kapott feszültséget.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

- Bevezetés
- A p-n átmenet egyensúlyi állapota
- Fém-félvezető átmenet egyensúlyi állapota
- Érdekességek
- **A termoelem**
- A p-n átmenet kapacitása

A félvezető dióda

A tranzistor

A félvezető eszközök gyártásáról

A termoelem

A számítások szerint az előbb elmondottak akkor teljesülnek, ha a két oldal azonos hőmérsékletű. Ha hőmérséklet-különbség van, akkor lesz eredő áram!

Elnevezés: **termoelem**.

A termoelemek nem képesek nagy teljesítmény leadására, ezért inkább csak a hőmérséklet-különbség mérésére használják fel a kapott feszültséget.

A termoelem megfordítása: feszültség-különbség hatására hőmérséklet-különbség lép fel.

Ez használható hőátvitelre, hűtésre. (Pl. számítógépekben a Peltier-hűtők.)



Bevezetés

Tiszta és adalékolt
félvezetők

Érintkezési jelenségek

- Bevezetés
- A p-n átmenet
egyensúlyi állapota
- Fém-félvezető
átmenet egyensúlyi
állapota
- Érdekességek
- A termoelem
- A p-n átmenet
kapacitása

A félvezető dióda

A tranzisztor

A félvezető eszközök
gyártásáról

A p-n átmenet kapacitása

A kiürített zóna két oldala ellentétes polaritására töltődik fel, ami ugyanaz a töltéselrendezés, mint a kondenzátoroké.

A kiürített zóna vastagsága, így a kapacitás külső feszültséggel szabályozható.

A kapacitás pF nagyságrendű, de kis helyen elér és szabályozható. Ez igen fontos pl. kis méretű rezgőkörök létrehozásakor.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt
félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

- A félvezető dióda
- Az ideális dióda
- Az ideális dióda
karakterisztikája
- A valódi félvezető
diódák
- A valódi félvezető
diódák néhány
jellemzője
- A Zener-dióda
- A fénykibocsátó dióda
(LED)
- Egyszerű
alkalmazások

A tranzistor

A félvezető eszközök
gyártásáról

A félvezető dióda



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

● A félvezető dióda

- Az ideális dióda
- Az ideális dióda karakterisztikája
- A valódi félvezető diódák
- A valódi félvezető diódák néhány jellemzője
- A Zener-dióda
- A fénykibocsátó dióda (LED)
- Egyszerű alkalmazások

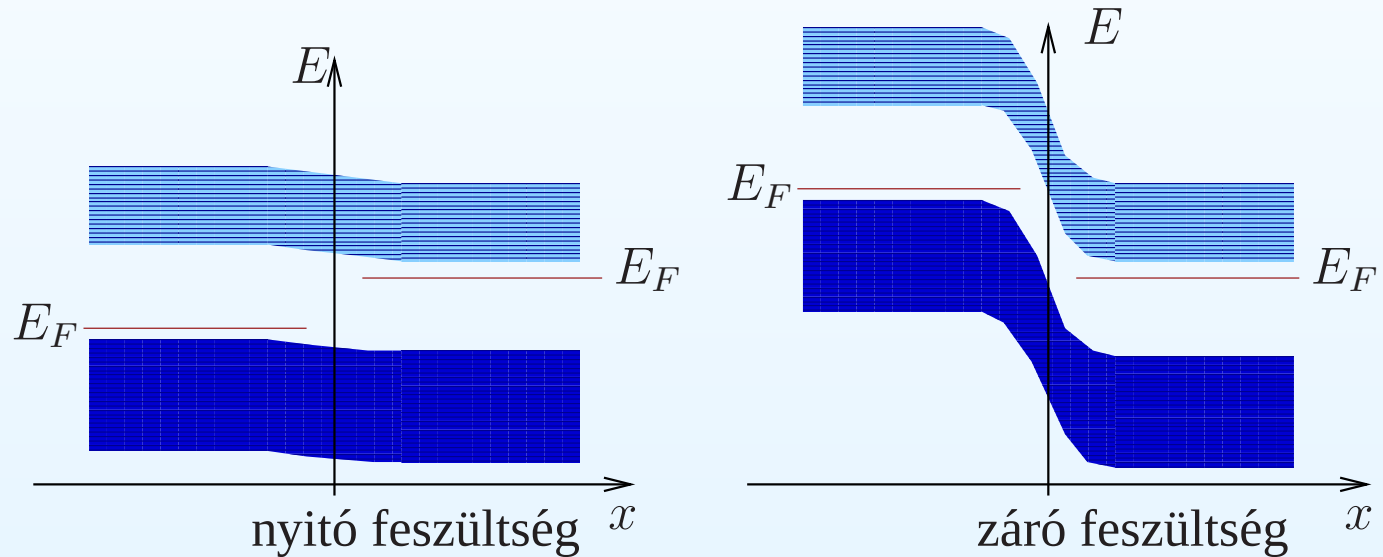
A tranzisztor

A félvezető eszközök gyártásáról

A félvezető dióda

A p-n átmenet és a fém-félvezető átmenet egyik fajtája esetén kiürített zóna alakul ki erősen aszimmetrikus feszültség-eloszlással.

Az aszimmetria befolyásolható külső feszültséggel:



Az egyik irány esetén a vezetési sáv alja kisimul, a másikban a lépcső növekszik.

A p-n átmenet esetén tehát beszélhetünk **nyitó-** vagy **zárófeszültségről**.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

- A félvezető dióda
- **Az ideális dióda**
- Az ideális dióda karakterisztikája
- A valódi félvezető diódák
- A valódi félvezető diódák néhány jellemzője
- A Zener-dióda
- A fénykibocsátó dióda (LED)
- Egyszerű alkalmazások

A tranzisztor

A félvezető eszközök gyártásáról

Az ideális dióda

Hogyan függ a diódán átfolyó áram I erőssége a rákapcsolt U feszültségtől?

Ezt csak összetett számításokkal lehet követni.

Ha csak a drift- és diffúziós áramokat, a hőmozgás hatására történő párkeltést és rekombinációt vesszük figyelembe és a kiürített rétegen kívül teljesen elhanyagoljuk azokat, a **Shockley-féle ideális dióda karakterisztikát** kapjuk:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{U}{nU_T}} - 1 \right)$$

Itt k a Boltzmann-állandó, q_e az elemi töltés, $U_T = kT/q_e$ a **termikus feszültség**, n az **emissziós együttható**, I_0 a dióda **záróárama**.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt
félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

- A félvezető dióda
- Az ideális dióda
- **Az ideális dióda karakterisztikája**
- A valódi félvezető diódák
- A valódi félvezető diódák néhány jellemzője
- A Zener-dióda
- A fénykibocsátó dióda (LED)
- Egyszerű alkalmazások

A tranzisztor

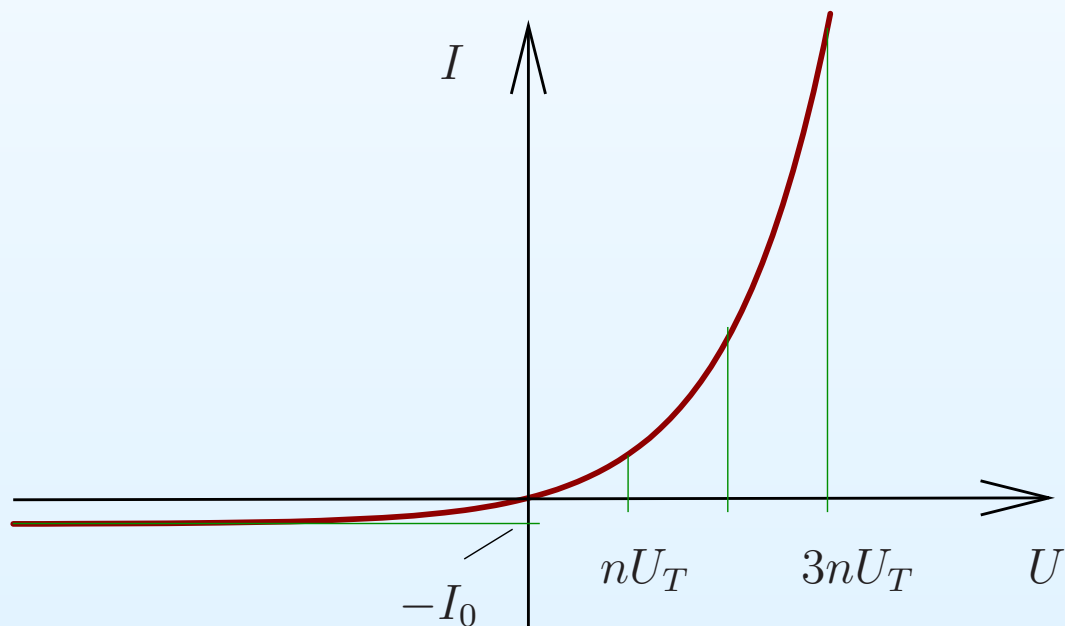
A félvezető eszközök
gyártásáról

Az ideális dióda karakterisztikája

$$I = I_0 \left(e^{\frac{U}{nU_T}} - 1 \right)$$

Könnyű belátni:

- $U = 0$ esetén $I = 0$.
- $U \ll -nU_T$ esetén $I \approx I_0$
- $U \gg nU_T$ esetén $I \gg I_0$





Bevezetés

Tiszta és adalékolt
félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

- A félvezető dióda
- Az ideális dióda
- **Az ideális dióda
karakterisztikája**
- A valódi félvezető
diódák
- A valódi félvezető
diódák néhány
jellemzője
- A Zener-dióda
- A fénykibocsátó dióda
(LED)
- Egyszerű
alkalmazások

A tranzisztor

A félvezető eszközök
gyártásáról

Az ideális dióda karakterisztikája (folyt.)

I_0 nagyságrendje: nA.

Szobahőmérsékleten $U_T \approx 0,026 V$.

Ezért záróirányú feszültségen elhanyagolható áram folyik,
nyitóirányban U_T néhányszorosánál pedig jelentős áram folyhat.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt
félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

- A félvezető dióda
- Az ideális dióda
- **Az ideális dióda
karakterisztikája**
- A valódi félvezető
diódák
- A valódi félvezető
diódák néhány
jellemzője
- A Zener-dióda
- A fénykibocsátó dióda
(LED)
- Egyszerű
alkalmazások

A tranzistor

A félvezető eszközök
gyártásáról

Az ideális dióda karakterisztikája (folyt.)

I_0 nagyságrendje: nA.

Szobahőmérsékleten $U_T \approx 0,026 V$.

Ezért záróirányú feszültségen elhanyagolható áram folyik,
nyitóirányban U_T néhányszorosánál pedig jelentős áram folyhat.

Példa: Mekkora a termikus feszültség értéke $T = 300 K$ -en?



Bevezetés

Tiszta és adalékolt
félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

- A félvezető dióda
- Az ideális dióda
- **Az ideális dióda karakterisztikája**
- A valódi félvezető diódák
- A valódi félvezető diódák néhány jellemzője
- A Zener-dióda
- A fénykibocsátó dióda (LED)
- Egyszerű alkalmazások

A tranzisztor

A félvezető eszközök
gyártásáról

Az ideális dióda karakterisztikája (folyt.)

I_0 nagyságrendje: nA.

Szobahőmérsékleten $U_T \approx 0,026 \text{ V}$.

Ezért záróirányú feszültségen elhanyagolható áram folyik, nyitóirányban U_T néhányszorosánál pedig jelentős áram folyhat.

Példa: Mekkora a termikus feszültség értéke $T = 300 \text{ K}$ -en?

Megoldás: Egyszerű behelyettesítéssel:

$$U_T = \frac{kT}{q_e} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 0,0259 \text{ V} = 25,9 \text{ mV}.$$



Bevezetés

Tiszta és adalékolt
félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

- A félvezető dióda
- Az ideális dióda
- **Az ideális dióda
karakterisztikája**
- A valódi félvezető
diódák
- A valódi félvezető
diódák néhány
jellemzője
- A Zener-dióda
- A fénykibocsátó dióda
(LED)
- Egyszerű
alkalmazások

A tranzistor

A félvezető eszközök
gyártásáról

Még egy példa

Példa: Egy ideális dióda emissziós együtthatója 2, hőmérséklete 300 K. Mekkora nyitófeszültség esetén lesz a rajta folyó áram erőssége a záróáram egymilliószerosa?



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

- A félvezető dióda
- Az ideális dióda
- **Az ideális dióda karakterisztikája**
- A valódi félvezető diódák
- A valódi félvezető diódák néhány jellemzője
- A Zener-dióda
- A fénykibocsátó dióda (LED)
- Egyszerű alkalmazások

A tranzisztor

A félvezető eszközök gyártásáról

Még egy példa

Példa: Egy ideális dióda emissziós együtthatója 2, hőmérséklete 300 K. Mekkora nyitófeszültség esetén lesz a rajta folyó áram erőssége a záróáram egymilliószorosa?

Megoldás: A karakterisztikát felírva:

$$10^6 I_0 = I_0 \left(e^{\frac{U}{nU_T}} - 1 \right),$$

$$n = 2, U_T = 0,0259 \text{ V.}$$

Az U feszültség könnyen kifejezhető:

$$U = nU_T \cdot \ln(10^6 + 1) = U_T \cdot 27,6 = 0,716 \text{ V.}$$

A termikus feszültség kb. 28-szorosa esetén a nyitóáram I_0 milliószorosa lesz, tehát tényleg igen aszimmetrikus a dióda viselkedése.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt
félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

- A félvezető dióda
- Az ideális dióda
- **Az ideális dióda
karakterisztikája**
- A valódi félvezető
diódák
- A valódi félvezető
diódák néhány
jellemzője
- A Zener-dióda
- A fénykibocsátó dióda
(LED)
- Egyszerű
alkalmazások

A tranzistor

A félvezető eszközök
gyártásáról

Még egy példa

Példa: Egy ideálisnak tekinthető félvezető diódán 2 V zárófeszültség esetén 25 nA erősségű áram folyik át. Mekkora a dióda záróárama? Mekkora nyitófeszültség esetén fog rajta 1 mA erősségű áram folyni, ha emissziós tényezője 1 , a dióda hőmérséklete 310 K ?



Bevezetés

Tiszta és adalékolt
félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

- A félvezető dióda
- Az ideális dióda
- **Az ideális dióda karakterisztikája**
- A valódi félvezető diódák
- A valódi félvezető diódák néhány jellemzője
- A Zener-dióda
- A fénykibocsátó dióda (LED)
- Egyszerű alkalmazások

A tranzistor

A félvezető eszközök
gyártásáról

Még egy példa

Példa: Egy ideálisnak tekinthető félvezető diódán 2 V zárófeszültség esetén 25 nA erősségű áram folyik át. Mekkora a dióda záróárama? Mekkora nyitófeszültség esetén fog rajta 1 mA erősségű áram folyni, ha emissziós tényezője 1, a dióda hőmérséklete 310 K?

Megoldás: A dióda-karakterisztikából:

$$I_0 = \frac{I}{e^{\frac{U}{nU_T}} - 1},$$

ahol $n = 1$, $U_T = kT/q_e = 0,0267 \text{ V}$

Záróirány miatt negatív előjel: $U_1 = -2 \text{ V}$ és $I = -25 \text{ nA}$:

$$I_0 = \frac{-25 \text{ nA}}{e^{-74,8} - 1} \approx 25 \text{ nA}.$$

A dióda záróárama tehát 25 nA. (Az exponenciális tag elhanyagolható az 1 mellett.)



Bevezetés

Tiszta és adalékolt
félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

- A félvezető dióda
- Az ideális dióda
- **Az ideális dióda
karakterisztikája**
- A valódi félvezető
diódák
- A valódi félvezető
diódák néhány
jellemzője
- A Zener-dióda
- A fénykibocsátó dióda
(LED)
- Egyszerű
alkalmazások

A tranzisztor

A félvezető eszközök
gyártásáról

a példa folytatása

A nyitóirányú U_2 feszültség esetén a karakterisztika:

$$I_2 = I_0 \left(e^{\frac{U_2}{nU_T}} - 1 \right),$$

ahonnan

$$U_2 = nU_T \ln \left(\frac{I_2}{I_0} + 1 \right).$$

$I_2 = 0,001$ A alapján:

$$U_2 = 1 \cdot 0,0267 \ln(40\,000 + 1) = 0,283 \text{ V}.$$

Tehát 283 mV nyitófeszültségnél lesz 1 mA a nyitóáram.

Itt az exponenciális tag mellett az 1 volt elhanyagolható.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

- A félvezető dióda
- Az ideális dióda
- Az ideális dióda karakterisztikája
- **A valódi félvezető diódák**
- A valódi félvezető diódák néhány jellemzője
- A Zener-dióda
- A fénykibocsátó dióda (LED)
- Egyszerű alkalmazások

A tranzistor

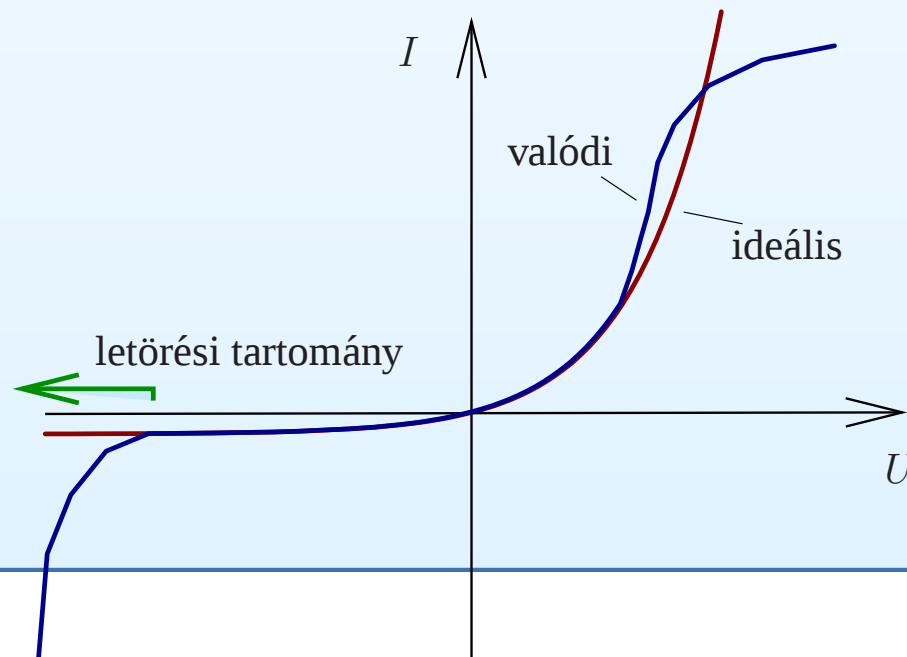
A félvezető eszközök gyártásáról

A valódi félvezető diódák

Az ideális dióda első közelítésnek megfelel.

Nagy nyitó- és zárófeszültségek esetén jelentő eltérések lesznek:

- Nagy zárófeszültségnél a karakterisztika hirtelen „letörik”, azaz a dióda átvezet.
- Nyitóirányban eleinte jó az egyezés, majd a valódi karakterisztika meredekebb lesz az ideálisnál, nagy nyitófeszültség esetén pedig a meredekség rohamosan csökken. (Utóbbi a dióda ohmos ellenállásának következménye.)





Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

- A félvezető dióda

- Az ideális dióda

- Az ideális dióda

karakterisztikája

- A valódi félvezető diódák

- **A valódi félvezető diódák néhány jellemzője**

- A Zener-dióda

- A fénykibocsátó dióda (LED)

- Egyszerű alkalmazások

A tranzistor

A félvezető eszközök gyártásáról

A valódi félvezető diódák néhány jellemzője

A gyakorlat szempontjából fontos paraméterek: (a geometriai kialakítás és az adalékolás segítségével változtathatók)

- **Nyitófeszültség.**

A valódi karakterisztikák is folytonosak, de van egy viszonylag szűk feszültségtartomány, amikor a nyitóáram belekerül a legtöbb eszköz számára hasznos mA nagyságrendű tartományba.

Nem precíz fogalom.

Si alapú: kb. 0,6 V; Ge alapú: kb. 0,3 V; fém-félvezető: kb. 0,2 V.

- **Maximális áramerősség.**

Hűtési problémák is fellépnek. Speciális burkolat is kell, ha ezt nagyra kell választani.

- **Kapcsolási idő.**

A nyitó-záró állapot közti váltás ideje. Fontos, ha gyors jeleket kell továbbítani.

- **Kapacitás.**

Fontos, ha a diódát, mint kondenzátort akarjuk használni.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

- A félvezető dióda
- Az ideális dióda
- Az ideális dióda karakterisztikája
- A valódi félvezető diódák
- A valódi félvezető diódák néhány jellemzője
- **A Zener-dióda**
- A fénykibocsátó dióda (LED)
- Egyszerű alkalmazások

A tranzistor

A félvezető eszközök gyártásáról

A Zener-dióda

Speciális félvezető diódák.

- a letörési feszültség hasznos tartományba essen (3–20 V)
- kibírják ezen a feszültségen a viszonylag nagy áramerősséget
- a letörés után meredek legyen a karakterisztika

A geometria és az adalékoltság mértékével szabályozható, milyen feszültségen következik ez be.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

- A félvezető dióda
- Az ideális dióda
- Az ideális dióda karakterisztikája
- A valódi félvezető diódák
- A valódi félvezető diódák néhány jellemzője
- **A Zener-dióda**
- A fénykibocsátó dióda (LED)
- Egyszerű alkalmazások

A tranzistor

A félvezető eszközök gyártásáról

A Zener-dióda

Speciális félvezető diódák.

- a letörési feszültség hasznos tartományba essen (3–20 V)
- kibírják ezen a feszültségen a viszonylag nagy áramerősséget
- a letörés után meredek legyen a karakterisztika

A geometria és az adalékoltság mértékével szabályozható, milyen feszültségen következik ez be.

Haszon: A letörési tartományban I -től alig függ U , így stabil feszültséget lehet vele előállítani. (Tápegységek.)



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

- A félvezető dióda
- Az ideális dióda
- Az ideális dióda karakterisztikája
- A valódi félvezető diódák
- A valódi félvezető diódák néhány jellemzője
- **A Zener-dióda**
- A fénykibocsátó dióda (LED)
- Egyszerű alkalmazások

A tranzistor

A félvezető eszközök gyártásáról

A Zener-dióda

Speciális félvezető diódák.

- a letörési feszültség hasznos tartományba essen (3–20 V)
- kibírják ezen a feszültségen a viszonylag nagy áramerősséget
- a letörés után meredek legyen a karakterisztika

A geometria és az adalékoltság mértékével szabályozható, milyen feszültségen következik ez be.

Haszon: A letörési tartományban I -től alig függ U , így stabil feszültséget lehet vele előállítani. (Tápegységek.)

A fizikai hatások, melyek a letörést okozzák:

- **alagút-effektus**
- **lavina-hatás**



Bevezetés

Tiszta és adalékolt
félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

- A félvezető dióda
- Az ideális dióda
- Az ideális dióda
karakteristikája
- A valódi félvezető
diódák
- A valódi félvezető
diódák néhány
jellemzője
- **A Zener-dióda**
- A fénykibocsátó dióda
(LED)
- Egyszerű
alkalmazások

A tranzistor

A félvezető eszközök
gyártásáról

A Zener-letörés magyarázata

Alagút-effektus

Az elektronok hullámtulajdonságuk miatt bizonyos valószínűséggel átjutnak a kiürített zónán. (Lásd: kvantummechanika.)

Nagy zárófeszültség esetén gyorsabban és több elektron „bombázza” a kiürített zóna szélét, így egyre több fog átjutni, ami növeli a dióda áramát.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt
félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

- A félvezető dióda
- Az ideális dióda
- Az ideális dióda
karakterisztikája
- A valódi félvezető
diódák
- A valódi félvezető
diódák néhány
jellemzője
- **A Zener-dióda**
- A fénykibocsátó dióda
(LED)
- Egyszerű
alkalmazások

A tranzistor

A félvezető eszközök
gyártásáról

A Zener-letörés magyarázata

Alagút-effektus

Az elektronok hullámtulajdonságuk miatt bizonyos valószínűséggel átjutnak a kiürített zónán. (Lásd: kvantummechanika.)

Nagy zárófeszültség esetén gyorsabban és több elektron „bombázza” a kiürített zóna szélét, így egyre több fog átjutni, ami növeli a dióda áramát.

Lavina-hatás

Egy nagy energiájú elektron képes párkeltést okozni.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt
félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

- A félvezető dióda
- Az ideális dióda
- Az ideális dióda
karakteristikája
- A valódi félvezető
diódák
- A valódi félvezető
diódák néhány
jellemzője
- **A Zener-dióda**
- A fénykibocsátó dióda
(LED)
- Egyszerű
alkalmazások

A tranzisztor

A félvezető eszközök
gyártásáról

A Zener-letörés magyarázata

Alagút-effektus

Az elektronok hullámtulajdonságuk miatt bizonyos valószínűséggel átjutnak a kiürített zónán. (Lásd: kvantummechanika.)

Nagy zárófeszültség esetén gyorsabban és több elektron „bombázza” a kiürített zóna szélét, így egyre több fog átjutni, ami növeli a dióda áramát.

Lavina-hatás

Egy nagy energiájú elektron képes párkeltést okozni.

Nagy zárófeszültségnél olyan erős az elektromos térerősség, hogy a töltéshordozók még az előtt összeszednek egy párkeltésnyi energiát, hogy rekombinálnának.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt
félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

- A félvezető dióda
- Az ideális dióda
- Az ideális dióda
karakteristikája
- A valódi félvezető
diódák
- A valódi félvezető
diódák néhány
jellemzője
- **A Zener-dióda**
- A fénykibocsátó dióda
(LED)
- Egyszerű
alkalmazások

A tranzisztor

A félvezető eszközök
gyártásáról

A Zener-letörés magyarázata

Alagút-effektus

Az elektronok hullámtulajdonságuk miatt bizonyos valószínűséggel átjutnak a kiürített zónán. (Lásd: kvantummechanika.)

Nagy zárófeszültség esetén gyorsabban és több elektron „bombázza” a kiürített zóna szélét, így egyre több fog átjutni, ami növeli a dióda áramát.

Lavina-hatás

Egy nagy energiájú elektron képes párkeltést okozni.

Nagy zárófeszültségnél olyan erős az elektromos térerősség, hogy a töltéshordozók még az előtt összeszednek egy párkeltésnyi energiát, hogy rekombinálnának.

Ilyenkor láncreakció-szerű folyamat történik: a keltett elektron-lyuk párok rekombinálódásuk előtt újabb párkeltést okoznak, azok újabbakat, stb.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

- A félvezető dióda
- Az ideális dióda
- Az ideális dióda karakterisztikája
- A valódi félvezető diódák
- A valódi félvezető diódák néhány jellemzője
- A Zener-dióda
- A fénykibocsátó dióda (LED)
- Egyszerű alkalmazások

A tranzisztor

A félvezető eszközök gyártásáról

A fénykibocsátó dióda (LED)

Elnevezés: **LED** = Light Emitting Diode.

Egy olyan félvezető dióda, melyben a kiürített rétegben történő rekombinációk energiájának egy jelentős része fény formájában szabadul fel.

Átlátszó burkolat esetén ez fényforrásként működik.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

- A félvezető dióda
- Az ideális dióda
- Az ideális dióda karakterisztikája
- A valódi félvezető diódák
- A valódi félvezető diódák néhány jellemzője
- A Zener-dióda
- A fénykibocsátó dióda (LED)
- Egyszerű alkalmazások

A tranzisztor

A félvezető eszközök gyártásáról

A fénykibocsátó dióda (LED)

Elnevezés: **LED** = Light Emitting Diode.

Egy olyan félvezető dióda, melyben a kiürített rétegben történő rekombinációk energiájának egy jelentős része fény formájában szabadul fel.

Átlátszó burkolat esetén ez fényforrásként működik.

Az első ledek GaAs (gallium-arzenid) alapúak voltak és vörös színű fényt bocsátottak ki.

Ma már infravöröstől ultraibolyáig mindenféle színű van.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

- A félvezető dióda
- Az ideális dióda
- Az ideális dióda karakterisztikája
- A valódi félvezető diódák
- A valódi félvezető diódák néhány jellemzője
- A Zener-dióda
- A fénykibocsátó dióda (LED)
- Egyszerű alkalmazások

A tranzistor

A félvezető eszközök gyártásáról

A fénykibocsátó dióda (LED)

Elnevezés: **LED** = Light Emitting Diode.

Egy olyan félvezető dióda, melyben a kiürített rétegben történő rekombinációk energiájának egy jelentős része fény formájában szabadul fel.

Átlátszó burkolat esetén ez fényforrásként működik.

Az első ledet GaAs (gallium-arzenid) alapúak voltak és vörös színű fényt bocsátottak ki.

Ma már infravöröstől ultraibolyáig mindenféle színű van.

A ledet előnye a megbízhatóság és a gyors vezérlés, hátránya a kis teljesítmény.

Mai alkalmazás: jelzőfények.

Lehetséges jövőbeli alkalmazás: sok led kis helyen komoly fényforrás lehet.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

- A félvezető dióda
- Az ideális dióda
- Az ideális dióda karakterisztikája
- A valódi félvezető diódák
- A valódi félvezető diódák néhány jellemzője
- A Zener-dióda
- A fénykibocsátó dióda (LED)

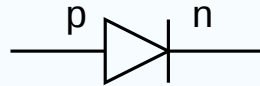
• Egyszerű alkalmazások

A tranzisztor

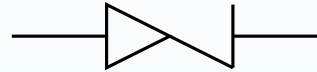
A félvezető eszközök gyártásáról

Egyszerű alkalmazások

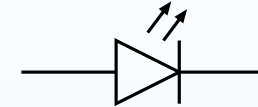
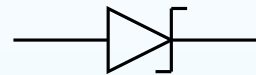
Áramköri jelek:



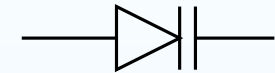
normál dióda



Zener-dióda



LED



varicap dióda



Bevezetés

Tiszta és adalékolt
félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

- A félvezető dióda
- Az ideális dióda
- Az ideális dióda karakterisztikája
- A valódi félvezető diódák
- A valódi félvezető diódák néhány jellemzője
- A Zener-dióda
- A fénykibocsátó dióda (LED)

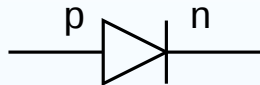
Egyszerű alkalmazások

A tranzistor

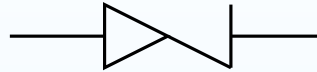
A félvezető eszközök
gyártásáról

Egyszerű alkalmazások

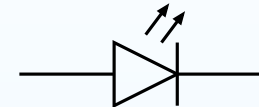
Áramköri jelek:



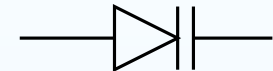
normál dióda



Zener-dióda

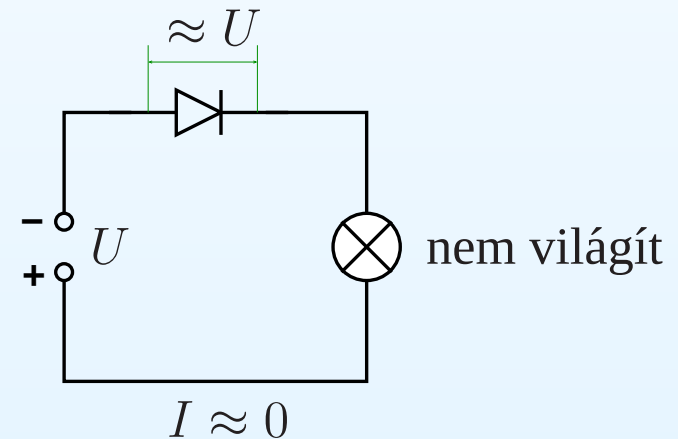
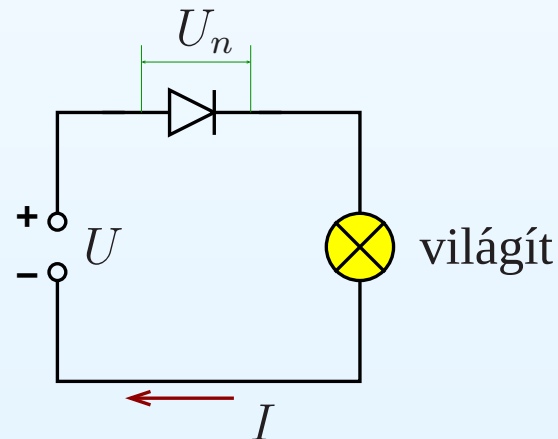


LED



varicap dióda

Egyenirányítás:





Bevezetés

Tiszta és adalékolt
félvezetők

Érintkezési jelenségek

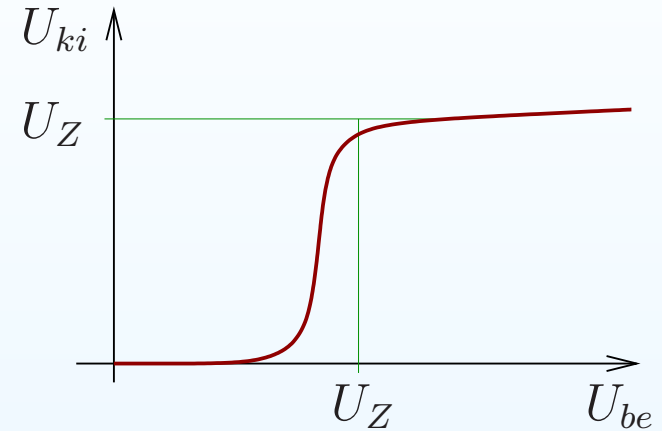
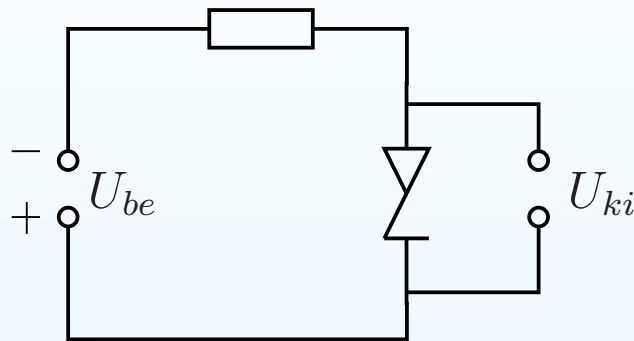
A félvezető dióda

- A félvezető dióda
- Az ideális dióda
- Az ideális dióda karakterisztikája
- A valódi félvezető diódák
- A valódi félvezető diódák néhány jellemzője
- A Zener-dióda
- A fénykibocsátó dióda (LED)
- Egyszerű alkalmazások

A tranzisztor

A félvezető eszközök
gyártásáról

A Zener-dióda egyszerű alkalmazása





Bevezetés

Tiszta és adalékolt
félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzisztor

- A bipoláris tranzisztor elvi felépítése
- A bipoláris tranzisztor működési elve
- A bipoláris tranzisztor áramviszonyai
- A tranzisztor egyszerű alkalmazása
- A tervezérlésű tranzisztor
- A FET-ek sajátosságai

A félvezető eszközök gyártásáról

A tranzisztor



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzisztor

- A bipoláris tranzisztor elvi felépítése

- A bipoláris tranzisztor működési elve

- A bipoláris tranzisztor áramviszonyai

- A tranzisztor egyszerű alkalmazása

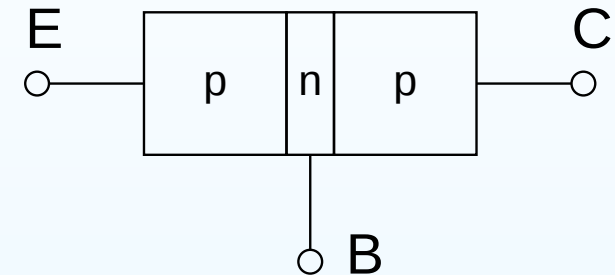
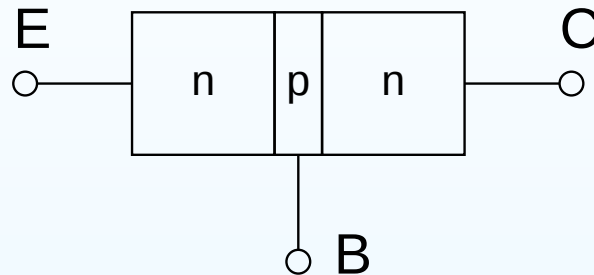
- A tervezérlésű tranzisztor

- A FET-ek sajátosságai

A félvezető eszközök gyártásáról

A bipoláris tranzisztor elvi felépítése

A bipoláris tranzisztor 3 rétegű félvezető eszköz váltakozó adalékolással: lehet n-p-n vagy p-n-p típusú.





Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzisztor

- A bipoláris tranzisztor elvi felépítése

- A bipoláris tranzisztor működési elve

- A bipoláris tranzisztor áramviszonyai

- A tranzisztor egyszerű alkalmazása

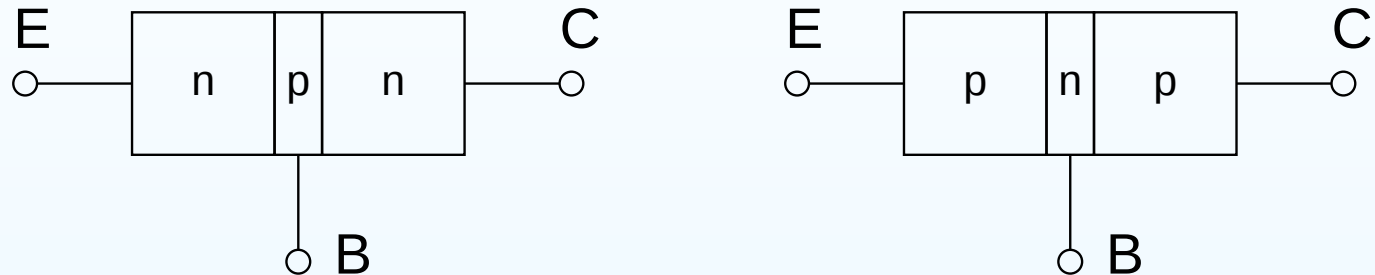
- A tervezérlésű tranzisztor

- A FET-ek sajátosságai

A félvezető eszközök gyártásáról

A bipoláris tranzisztor elvi felépítése

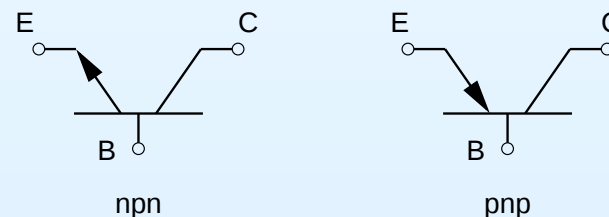
A bipoláris tranzisztor 3 rétegű félvezető eszköz váltakozó adalékolással: lehet n-p-n vagy p-n-p típusú.



Elnevezések:

- középső réteg: **bázis** (B)
- egyik szélső réteg: **emitter** (E)
- másik szélső réteg: **kollektor** (C)

(A valóságban az E és C rétegek nem teljesen egyformák, de erről majd később esik szó.)



Áramköri jel:



Bevezetés

Tiszta és adalékolt
félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzisztor

- A bipoláris tranzisztor elvi felépítése
- A bipoláris tranzisztor működési elve
- A bipoláris tranzisztor áramviszonyai
- A tranzisztor egyszerű alkalmazása
- A tervezérlésű tranzisztor
- A FET-ek sajátosságai

A félvezető eszközök
gyártásáról

A bipoláris tranzisztor működési elve

B-E és B-C párok: külön-külön nézve egy-egy dióda.

Leggyakoribb alkalmazás: **B-C zárva, B-E nyitva.**

A működés lényege: a B-C és E-B diódák nem függetlenek egymástól, mert egyik rétegük közös. Ha a bázisréteg elég vékony, akkor az **E-B dióda nagy nyitóáramának jelentős része a kollektorba jut**, ezért a B-C zárt dióda záróárama megnövekszik.

E-B szabályzásával B-C feszültsége befolyásolható. Jó tranzisztornál kis szabályzással nagy változás érhető el, ami a jelek **erősítését** jelenti.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt
félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

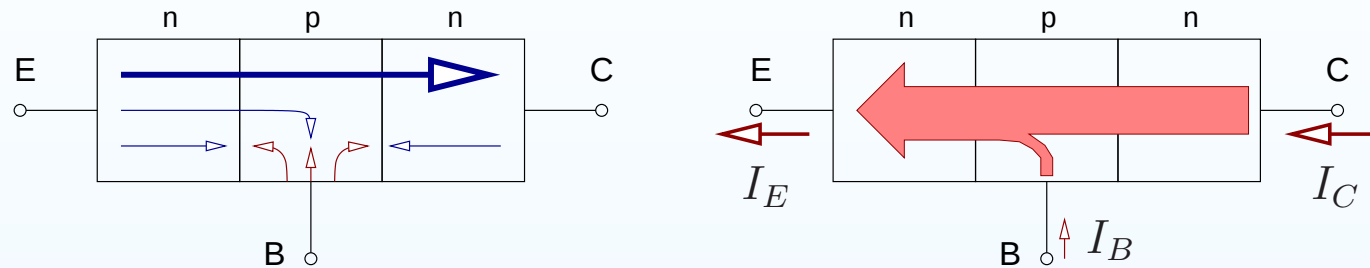
A tranzisztor

- A bipoláris tranzisztor elvi felépítése
- A bipoláris tranzisztor működési elve
- A bipoláris tranzisztor áramviszonyai
- A tranzisztor egyszerű alkalmazása
- A tervezérlésű tranzisztor
- A FET-ek sajátosságai

A félvezető eszközök
gyártásáról

A bipoláris tranzisztor működési elve (folyt.)

npn-tranzisztorra:



Kék nyilak: elektronok áramlása, piros nyilak: lyukak áramlása.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

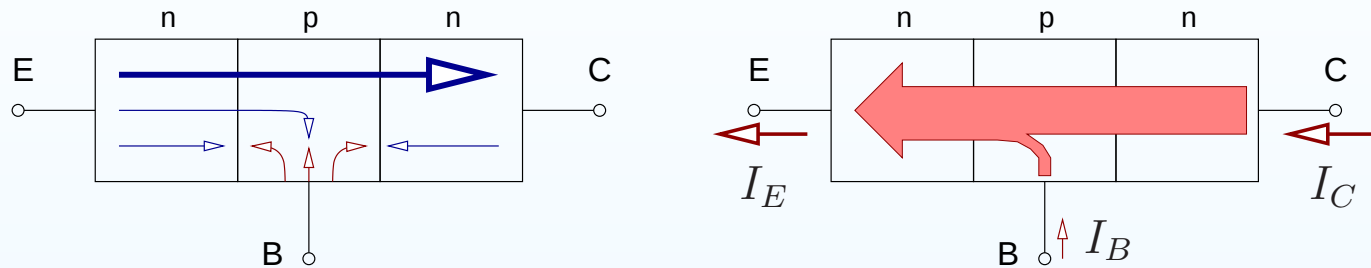
A tranzisztor

- A bipoláris tranzisztor elvi felépítése
- **A bipoláris tranzisztor működési elve**
- A bipoláris tranzisztor áramviszonyai
- A tranzisztor egyszerű alkalmazása
- A tervezérlésű tranzisztor
- A FET-ek sajátosságai

A félvezető eszközök gyártásáról

A bipoláris tranzisztor működési elve (folyt.)

npn-tranzisztorra:



Kék nyilak: elektronok áramlása, piros nyilak: lyukak áramlása.

Ha a bázisréteg vékony az emitterből induló elektronok nagy része rekombináció nélkül „megússza” és átkerül a kollektorba.

Elnevezések oka: az emitter = kibocsátó bocsátja ki az elektronokat, a kollektor = gyűjtő begyűjti őket.

A használat szempontjából csak a kivezetéseken mérhető össz áramok, azaz I_E , I_B és I_C érdekesek.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt
félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzisztor

- A bipoláris tranzisztor elvi felépítése
- A bipoláris tranzisztor működési elve
- **A bipoláris tranzisztor áramviszonyai**
- A tranzisztor egyszerű alkalmazása
- A tervezérlésű tranzisztor
- A FET-ek sajátosságai

A félvezető eszközök
gyártásáról

A bipoláris tranzisztor áramviszonyai

A töltésmegmaradás miatt: $I_E = I_C + I_B$.

Jó tranzisztornál: $I_E \approx I_C$, azaz $I_B \ll I_C$, $I_B \ll I_E$.

Elnevezés: **nagyjelű áramerősítési tényező**: $\alpha = I_C / I_E$.

Ennek tipikus értékei: 0,98–0,995.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt
félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzisztor

- A bipoláris tranzisztor elvi felépítése
- A bipoláris tranzisztor működési elve
- **A bipoláris tranzisztor áramviszonyai**
- A tranzisztor egyszerű alkalmazása
- A tervezérlésű tranzisztor
- A FET-ek sajátosságai

A félvezető eszközök
gyártásáról

A bipoláris tranzisztor áramviszonyai

A töltésmegmaradás miatt: $I_E = I_C + I_B$.

Jó tranzisztornál: $I_E \approx I_C$, azaz $I_B \ll I_C$, $I_B \ll I_E$.

Elnevezés: **nagyjelű áramerősítési tényező**: $\alpha = I_C / I_E$.

Ennek tipikus értékei: 0,98–0,995.

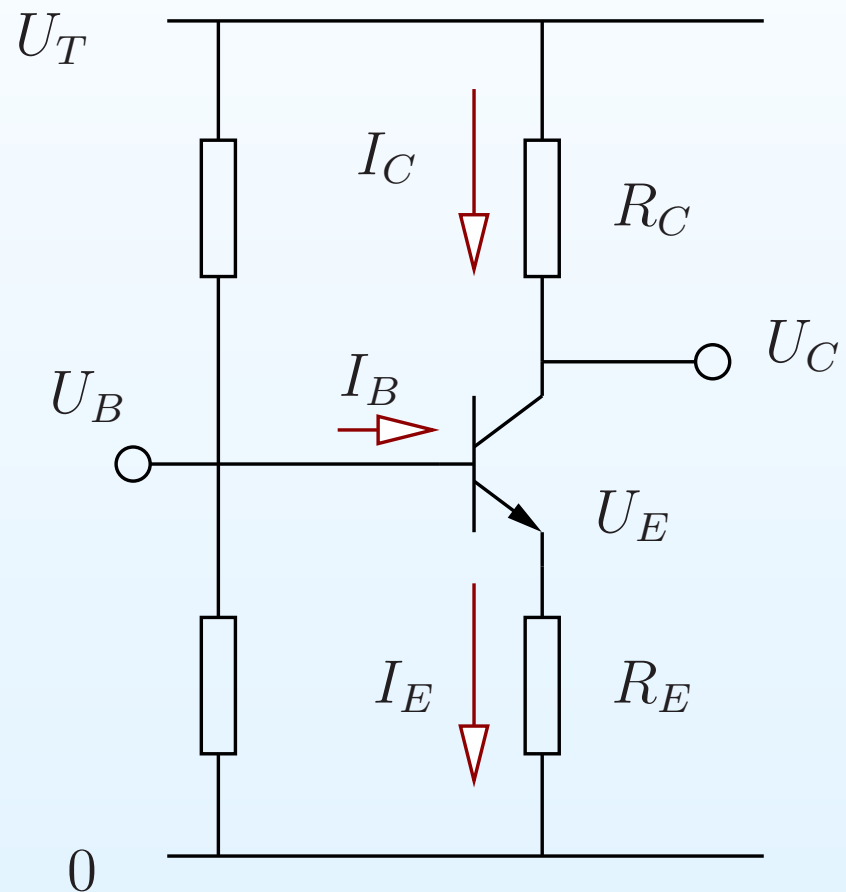
A kollektoráram és a bázisáram erősségének aránya:

$$\frac{I_C}{\alpha} = I_C + I_B \quad \Rightarrow \quad \frac{I_C}{I_B} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

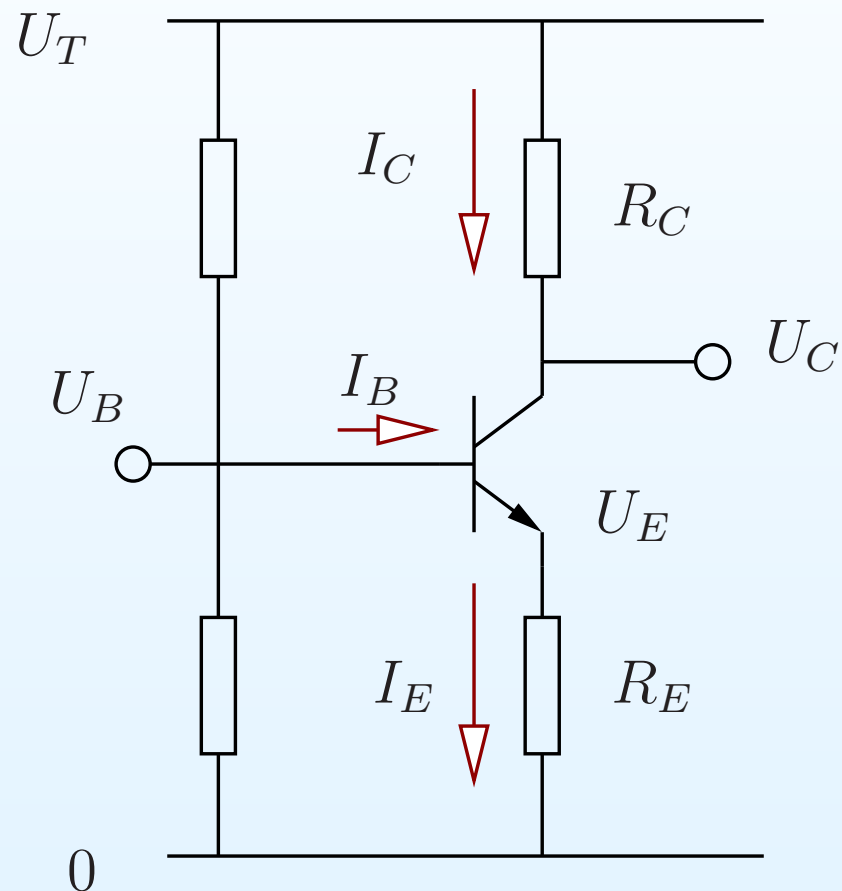
Elnevezés: $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$ a **kisjelű áramerősítési tényező**.

Ez mutatja meg, hogy a bázisáram kis változásainak hányszorosa lesz a kollektoráram változása. Tipikus értéke: $\beta = 50\text{--}200$.

A tranzisztor egyszerű alkalmazása



A tranzisztor egyszerű alkalmazása



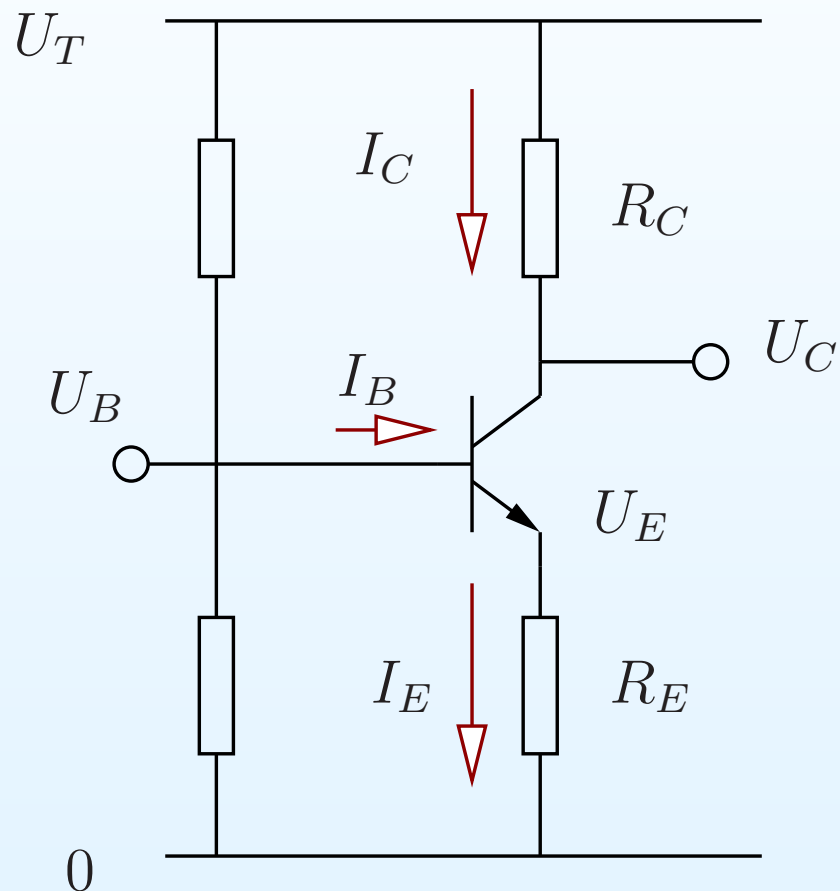
U_T tápfeszültség állandó, B-E nyitva (ellenállások).

B-E dióda nyitva: $U_{BE} = U_n \approx 0,6 \text{ V}$

$U_E \approx U_B - U_n$, ezért:

$$I_E = \frac{U_E}{R_E} \approx \frac{U_B - U_n}{R_E}$$

A tranzisztor egyszerű alkalmazása



U_T tápfeszültség állandó, B-E nyitva (ellenállások).

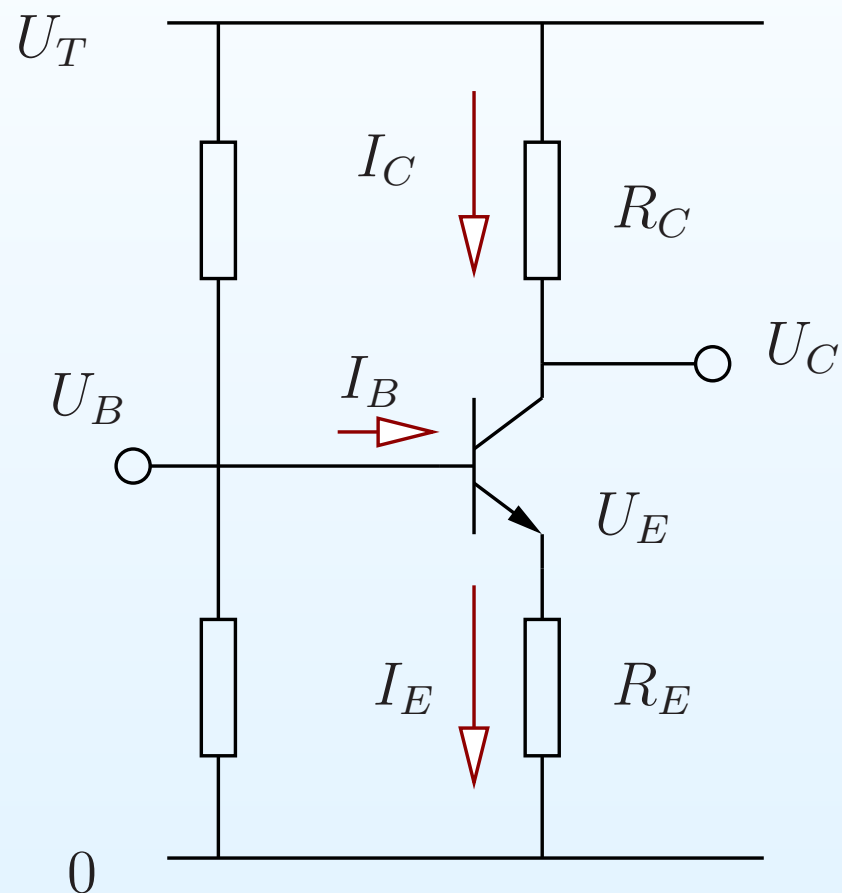
B-E dióda nyitva: $U_{BE} = U_n \approx 0,6 \text{ V}$

$U_E \approx U_B - U_n$, ezért:

$$I_E = \frac{U_E}{R_E} \approx \frac{U_B - U_n}{R_E}$$

$$I_C = \alpha I_E \approx \alpha \frac{U_B - U_n}{R_E}$$

A tranzisztor egyszerű alkalmazása



U_T tápfeszültség állandó, B-E nyitva (ellenállások).

B-E dióda nyitva: $U_{BE} = U_n \approx 0,6 \text{ V}$

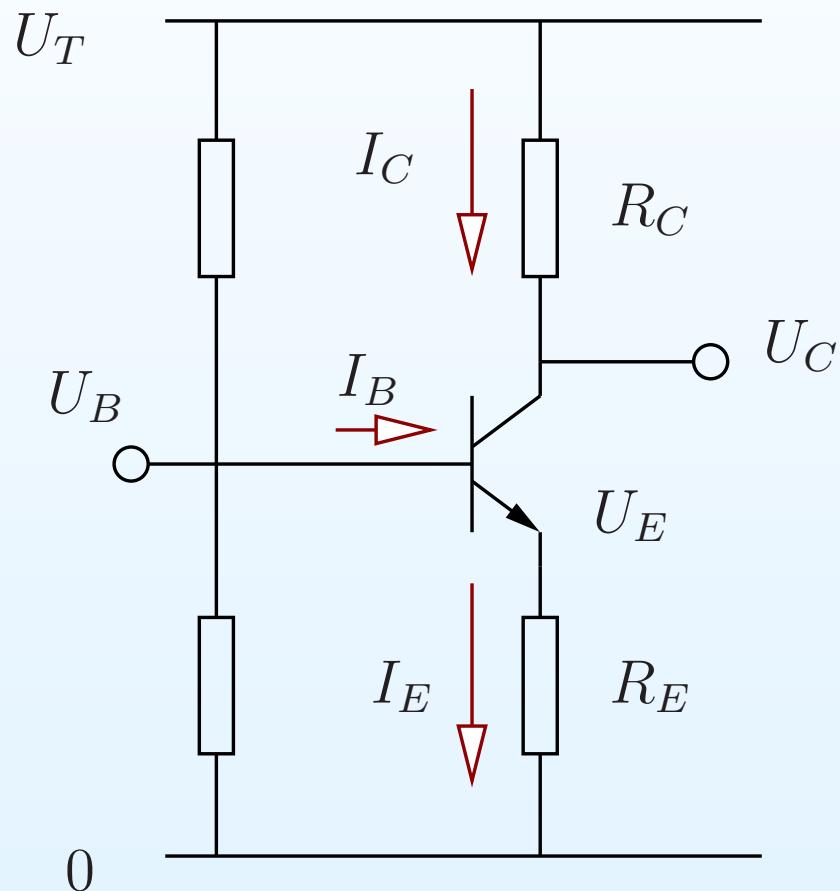
$U_E \approx U_B - U_n$, ezért:

$$I_E = \frac{U_E}{R_E} \approx \frac{U_B - U_n}{R_E}$$

$$I_C = \alpha I_E \approx \alpha \frac{U_B - U_n}{R_E}$$

$$U_C = U_T - I_C R_C \approx U_T - \frac{R_C}{R_E} \alpha (U_B - U_n)$$

A tranzisztor egyszerű alkalmazása



U_T tápfeszültség állandó, B-E nyitva (ellenállások).

B-E dióda nyitva: $U_{BE} = U_n \approx 0,6 \text{ V}$

$U_E \approx U_B - U_n$, ezért:

$$I_E = \frac{U_E}{R_E} \approx \frac{U_B - U_n}{R_E}$$

$$I_C = \alpha I_E \approx \alpha \frac{U_B - U_n}{R_E}$$

$$U_C = U_T - I_C R_C \approx U_T - \frac{R_C}{R_E} \alpha (U_B - U_n)$$

$$\Delta U_C \approx -\alpha \frac{R_C}{R_E} \Delta U_B$$



Bevezetés

Tiszta és adalékolt
félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzisztor

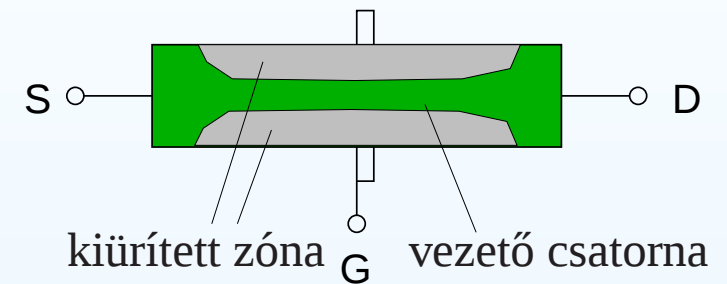
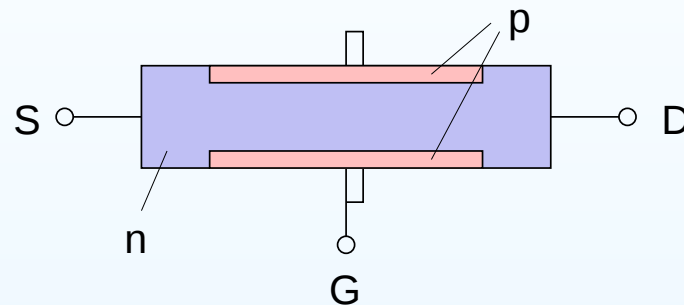
- A bipoláris tranzisztor elvi felépítése
- A bipoláris tranzisztor működési elve
- A bipoláris tranzisztor áramviszonyai
- A tranzisztor egyszerű alkalmazása
- **A térvezérlésű tranzisztor**
- A FET-ek sajátosságai

A félvezető eszközök
gyártásáról

A térvezérlésű tranzisztor

Szokásos rövidítés: FET = Field Effect Transistor.

Elvi felépítés:





Bevezetés

Tiszta és adalékolt
félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzisztor

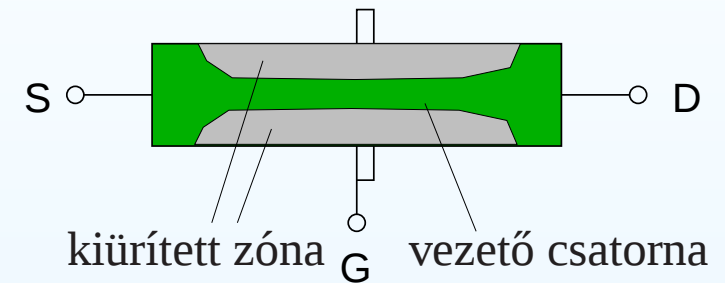
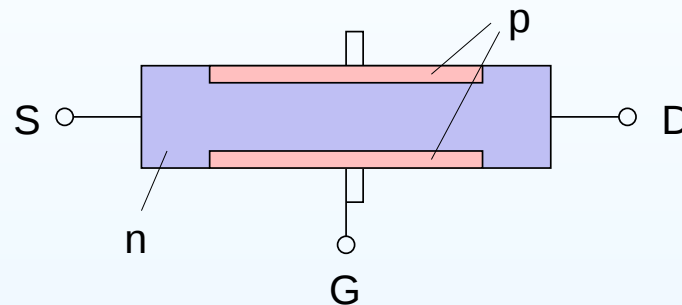
- A bipoláris tranzisztor elvi felépítése
- A bipoláris tranzisztor működési elve
- A bipoláris tranzisztor áramviszonyai
- A tranzisztor egyszerű alkalmazása
- A tervezérlésű tranzisztor
- A FET-ek sajátosságai

A félvezető eszközök
gyártásáról

A tervezérlésű tranzisztor

Szokásos rövidítés: FET = Field Effect Transistor.

Elvi felépítés:



Elnevezések:

- két végpont: **forrás** (S, source), **nyelő** (D, drain)
- középső kivezetés: **kapu** (G, gate)

A G kivezetés környéke ellentétesen adalékolt, mint a FET alapja.

Alapötlet: U_G változtatásával változik a kiürített zóna mérete, ezért változik a vezető csatorna mérete, azaz S és D közti ellenállás.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzisztor

- A bipoláris tranzisztor elvi felépítése
- A bipoláris tranzisztor működési elve
- A bipoláris tranzisztor áramviszonyai
- A tranzisztor egyszerű alkalmazása
- A tervezérlésű tranzisztor
- A FET-ek sajátosságai

A félvezető eszközök gyártásáról

A FET-ek sajátosságai

Fő különbség a bipolárishoz képest: a vezérlés feszültséggel, nem árammal történik.

Ideális esetben $I_G = 0$.

Ez azt jelenti, hogy sokkal kisebb teljesítménnyel vezérelhetők, mint a bipolárisok. Ez előnyös tulajdonság.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzisztor

- A bipoláris tranzisztor elvi felépítése
- A bipoláris tranzisztor működési elve
- A bipoláris tranzisztor áramviszonyai
- A tranzisztor egyszerű alkalmazása
- A tervezérlésű tranzisztor
- A FET-ek sajátosságai

A félvezető eszközök gyártásáról

A FET-ek sajátosságai

Fő különbség a bipolárishoz képest: a vezérlés feszültséggel, nem árammal történik.

Ideális esetben $I_G = 0$.

Ez azt jelenti, hogy sokkal kisebb teljesítménnyel vezérelhetők, mint a bipolárisok. Ez előnyös tulajdonság.

A gyakorlatban $I_G \neq 0$. Csökkentése érdekében a G kivezetést fém-oxid réteggel választják el az alaptól: **MOSFET** típusú tranzisztor.

Ezek bemenő ellenállása akár a $10^9 \Omega$ -ot is elérheti.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt
félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzistor

A félvezető eszközök
gyártásáról

- A tisztaság jelentősége
- A tisztítás folyamata
- Olvadékból való kristályosítás
- Zónás olvasztás
- Adalékolás
- Valódi geometriai viszonyok
- Fotolitográfia
- Jövőbeli miniatürizáció

A félvezető eszközök gyártásáról



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzistor

A félvezető eszközök gyártásáról

● A tisztaság jelentősége

- A tisztítás folyamata
- Olvadékból való kristályosítás
- Zónás olvasztás
- Adalékolás
- Valódi geometriai viszonyok
- Fotolitográfia
- Jövőbeli miniatürizáció

A tisztaság jelentősége

Tiszta félvezető: gyakorlatilag szigetelő.

3 vagy 5 vegyértékű adalék atom: új töltéshordozó.

Ezért **milliomod résznyi adalék atom is jelentősen befolyásolja a vezetőképességet.**



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzistor

A félvezető eszközök gyártásáról

● A tisztaság jelentősége

- A tisztítás folyamata
- Olvadékból való kristályosítás
- Zónás olvasztás
- Adalékolás
- Valódi geometriai viszonyok
- Fotolitográfia
- Jövőbeli miniatürizáció

A tisztaság jelentősége

Tiszta félvezető: gyakorlatilag szigetelő.

3 vagy 5 vegyértékű adalék atom: új töltéshordozó.

Ezért **milliomod résznyi adalék atom is jelentősen befolyásolja a vezetőképességet.**

A gyártásnak, az előírt adalékolásnak **igen tiszta alapból** kell kiindulnia: tipikusan 10^{10} Si-atomra jut egy szennyező, azaz nem Si-atom.

Ilyen tisztaság hagyományos kémiai eljárásokkal nem érhető el.

(Eleinte zavarta is a kutatókat, hogy a kémiailag tisztának számító félvezető anyagok vezetőképessége látszólag érthetetlenül változott.)



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzistor

A félvezető eszközök gyártásáról

● A tisztaság jelentősége

- A tisztítás folyamata
- Olvadékból való kristályosítás
- Zónás olvasztás
- Adalékolás
- Valódi geometriai viszonyok
- Fotolitográfia
- Jövőbeli miniatürizáció

A tisztaság jelentősége

Tiszta félvezető: gyakorlatilag szigetelő.

3 vagy 5 vegyértékű adalék atom: új töltéshordozó.

Ezért **milliomod résznyi adalék atom is jelentősen befolyásolja a vezetőképességet.**

A gyártásnak, az előírt adalékolásnak **igen tiszta alapból** kell kiindulnia: tipikusan 10^{10} Si-atomra jut egy szennyező, azaz nem Si-atom.

Ilyen tisztaság hagyományos kémiai eljárásokkal nem érhető el.

(Eleinte zavarta is a kutatókat, hogy a kémiailag tisztának számító félvezető anyagok vezetőképessége látszólag érthetetlenül változott.)

Ráadásul **igen kevés rácshiba** megengedett: **egykristály.**



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzisztor

A félvezető eszközök gyártásáról

- A tisztaság jelentősége
- **A tisztítás folyamata**
- Olvadékból való kristályosítás
- Zónás olvasztás
- Adalékolás
- Valódi geometriai viszonyok
- Fotolitográfia
- Jövőbeli miniatürizáció

A tisztítás folyamata

Alapötlet: olvadt állapotból fokozatosan hűlő és szilárduló anyag képes a lehető legalacsonyabb energiájú állapot megtalálására, ami épp a szabályos egykristály állapotot jelenti.

Igen fontosak a részletek. Pl. túl gyors hűlés esetén nincs idő az egykristály állapot felvételére.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzisztor

A félvezető eszközök gyártásáról

- A tisztaság jelentősége
- **A tisztítás folyamata**
- Olvadékból való kristályosítás
- Zónás olvasztás
- Adalékolás
- Valódi geometriai viszonyok
- Fotolitográfia
- Jövőbeli miniatürizáció

A tisztítás folyamata

Alapötlet: olvadt állapotból fokozatosan hűlő és szilárduló anyag képes a lehető legalacsonyabb energiájú állapot megtalálására, ami épp a szabályos egykristály állapotot jelenti.

Igen fontosak a részletek. Pl. túl gyors hűlés esetén nincs idő az egykristály állapot felvételére.

A nagyfokú tisztítás két lépése:

- olvadékból való kristályosítás.
- zónás olvasztás



Bevezetés

Tiszta és adalékolt
félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzistor

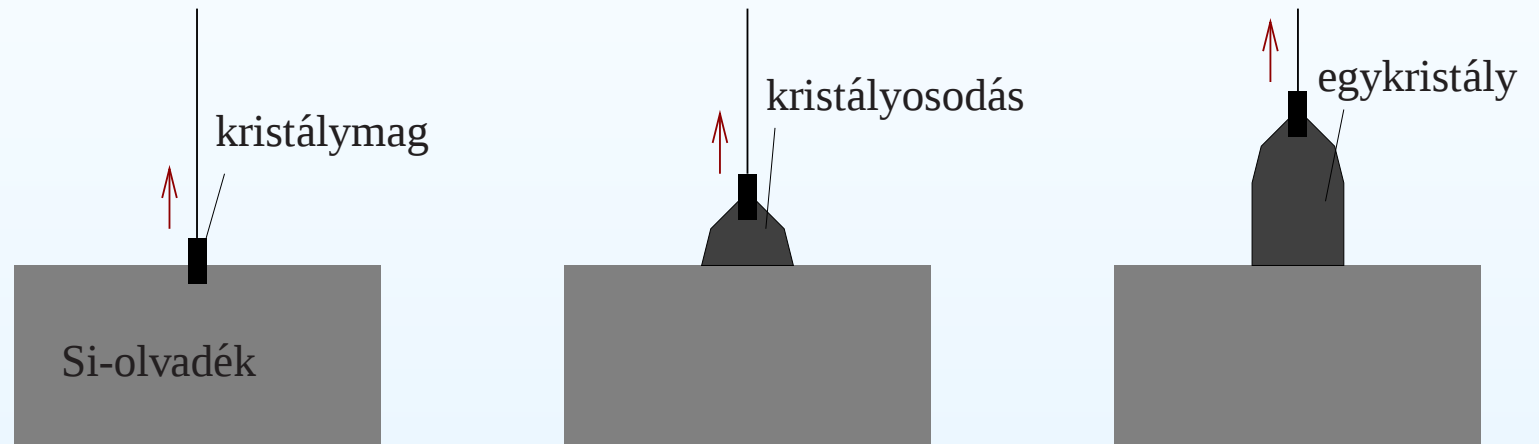
A félvezető eszközök
gyártásáról

- A tisztaság jelentősége
- A tisztítás folyamata
- **Olvadékból való kristályosítás**
- Zónás olvasztás
- Adalékolás
- Valódi geometriai viszonyok
- Fotolitográfia
- Jövőbeli miniatürizáció

Olvadékból való kristályosítás

Elnevezés: **Czochralski-eljárás.**

Kis kristálydarabkát olvadékból lassan húznak kifelé; a kristályra szabályos, tiszta egykristály dermed rá fokozatosan.





Bevezetés

Tiszta és adalékolt
félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzistor

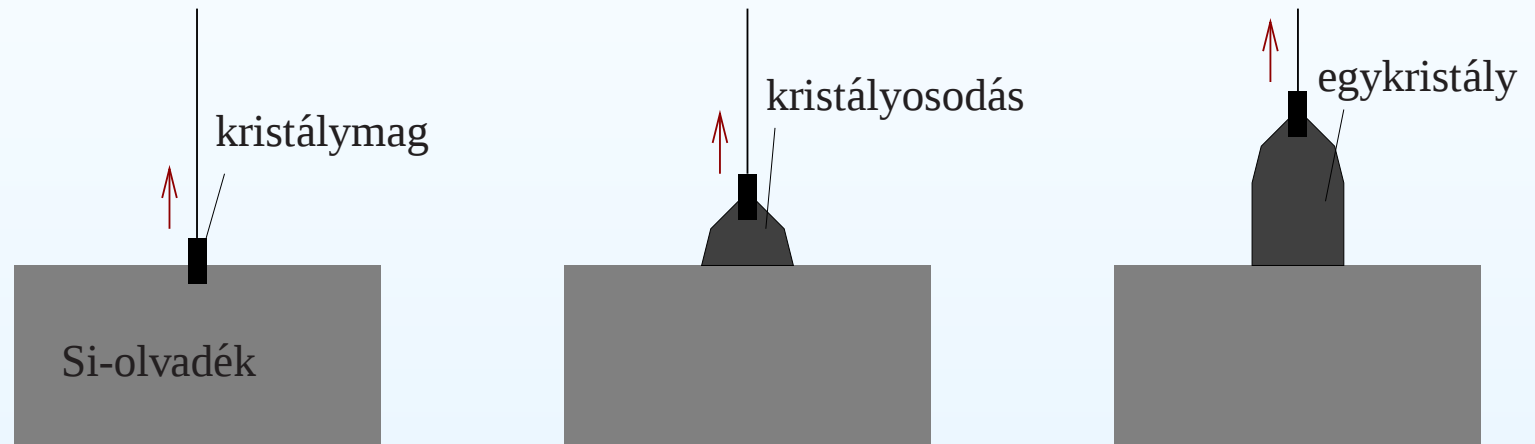
A félvezető eszközök
gyártásáról

- A tisztaság jelentősége
- A tisztítás folyamata
- **Olvadékból való kristályosítás**
- Zónás olvasztás
- Adalékolás
- Valódi geometriai viszonyok
- Fotolitográfia
- Jövőbeli miniatürizáció

Olvadékból való kristályosítás

Elnevezés: **Czochralski-eljárás.**

Kis kristálydarabkát olvadékból lassan húznak kifelé; a kristályra szabályos, tiszta egykristály dermed rá fokozatosan.



Oszlop átmérő: 20–40 cm.

Ez sokkal tisztább, mint amit a hagyományos kémiai módszerekkel elérhet érn, de sokszor a tisztaság további fokozására van szükség.



Zónás olvasztás

Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

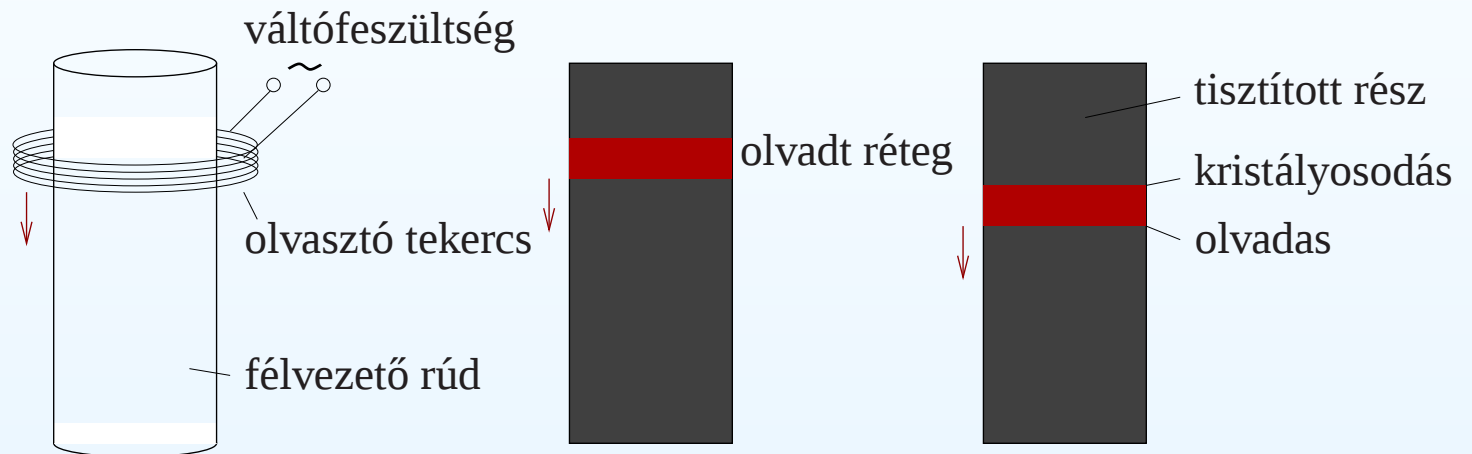
A félvezető dióda

A tranzisztor

A félvezető eszközök gyártásáról

- A tisztaság jelentősége
- A tisztítás folyamata
- Olvadékból való kristályosítás
- Zónás olvasztás
- Adalékolás
- Valódi geometriai viszonyok
- Fotolitográfia
- Jövőbeli miniatürizáció

A viszonylag tiszta rúd anyagát rétegenként megolvasztják és hagyják újra kristályosodni; a szennyezések kisebb valószínűséggel épülnek be újra.





Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

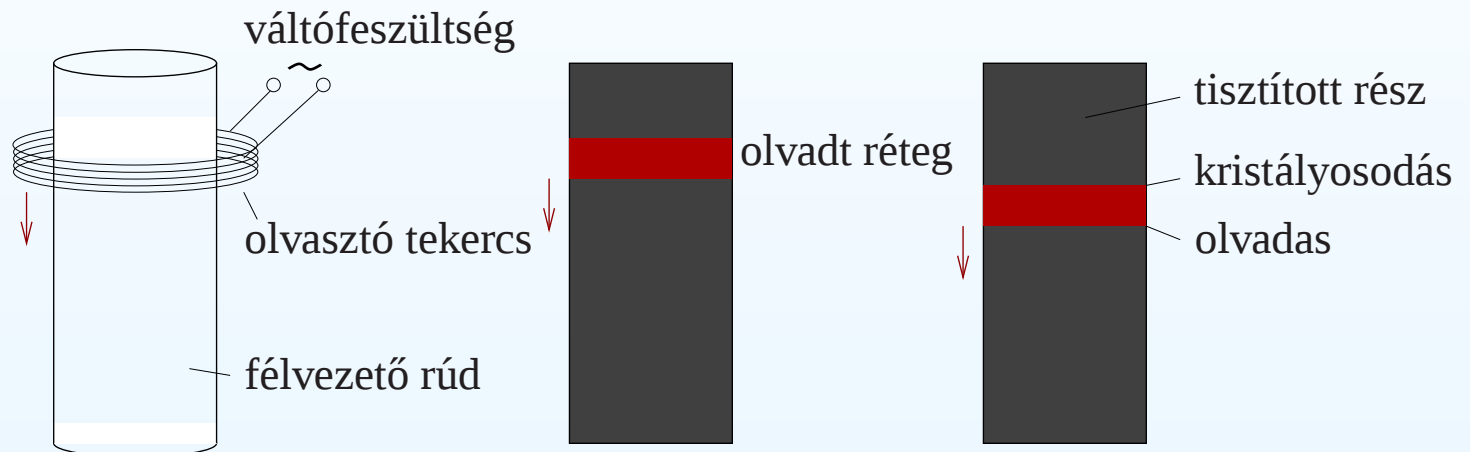
A tranzisztor

A félvezető eszközök gyártásáról

- A tisztaság jelentősége
- A tisztítás folyamata
- Olvadékból való kristályosítás
- **Zónás olvasztás**
- Adalékolás
- Valódi geometriai viszonyok
- Fotolitográfia
- Jövőbeli miniatürizáció

Zónás olvasztás

A viszonylag tiszta rúd anyagát rétegenként megolvasztják és hagyják újra kristályosodni; a szennyezések kisebb valószínűséggel épülnek be újra.



Olasztás: gyorsan változó mágneses tér által indukált örvényáramokkal.

A zóna lassú mozgatásával a szennyező anyagok „kiseperhetők”, mert nagyobb eséllyel maradnak a mozgó olvadt zónában, mint épülnek be a kristályba újra.

A seprés akárhányszor ismételhető.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzistor

A félvezető eszközök gyártásáról

- A tisztaság jelentősége
- A tisztítás folyamata
- Olvadékból való kristályosítás
- Zónás olvasztás
- **Adalékolás**
- Valódi geometriai viszonyok
- Fotolitográfia
- Jövőbeli miniatürizáció

Adalékolás

Tömb adalékolása: a zónás olvasztás módszerével az adalék „szétkenhető” a rúdban.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzistor

A félvezető eszközök gyártásáról

- A tisztaság jelentősége
- A tisztítás folyamata
- Olvadékból való kristályosítás
- Zónás olvasztás
- Adalékolás
- Valódi geometriai viszonyok
- Fotolitográfia
- Jövőbeli miniatürizáció

Adalékolás

Tömb adalékolása: a zónás olvasztás módszerével az adalék „szétkenhető” a rúdban.

Helyi adalékolás:

- maszk a felületre (a kívánt részek kiválasztása)
- gőzölögtetés (az adalék atomok felvitele a felszínre)
- melegítés (az adalék diffundáltatása mélyebbre)



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzistor

A félvezető eszközök gyártásáról

- A tisztaság jelentősége
- A tisztítás folyamata
- Olvadékból való kristályosítás
- Zónás olvasztás
- Adalékolás
- Valódi geometriai viszonyok
- Fotolitográfia
- Jövőbeli miniatürizáció

Adalékolás

Tömb adalékolása: a zónás olvasztás módszerével az adalék „szétkenhető” a rúdban.

Helyi adalékolás:

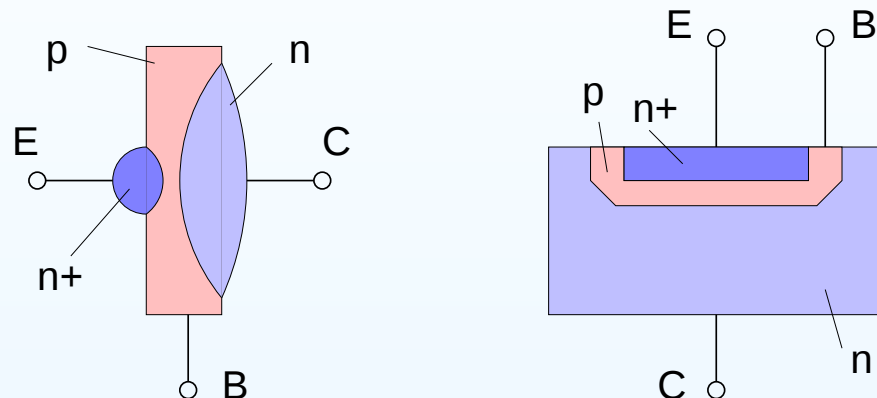
- maszk a felületre (a kívánt részek kiválasztása)
- gőzölögtetés (az adalék atomok felvitele a felszínre)
- melegítés (az adalék diffundáltatása mélyebbre)

A valóságban a félvezető eszközöket nem darabokból rakják össze, hanem egy darab különböző részeit különféleképp adalékolják.

(Régi megoldás a diódára: n-típusú alaplappba p-típusú tűt szúrtak. Ebből lett a dióda áramköri jele.)

Valódi geometriai viszonyok

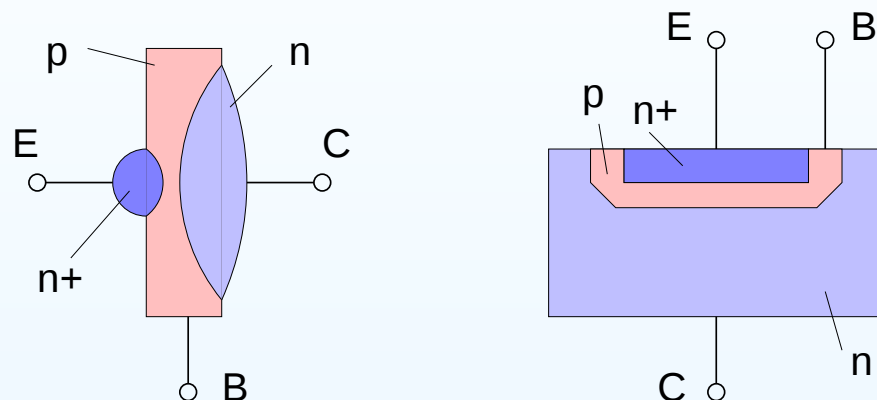
A valódi tranzisztorok nem olyan egyszerű szendvics-szerkezetűek, mint eddig rajzoltuk. Két megvalósítási lehetőség:



„n+”-szal azt jelöltük, hogy az emitter erősebben adalékolt, mint a kollektor. A kollektor nagy felületű, hogy az emitterből jövő töltések nagy részét befogja. Egy valódi tranzisztor emittere és kollektora nem cserélhető fel.

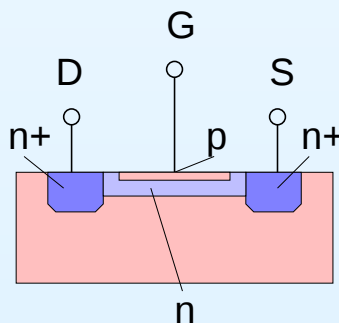
Valódi geometriai viszonyok

A valódi tranzisztorok nem olyan egyszerű szendvics-szerkezetűek, mint eddig rajzoltuk. Két megvalósítási lehetőség:



„n+”-szal azt jelöltük, hogy az emitter erősebben adalékolt, mint a kollektor. A kollektor nagy felületű, hogy az emitterből jövő töltések nagy részét befogja.

Egy valódi tranzisztor emittere és kollektora nem cserélhető fel.



Valós FET-geometria:



Bevezetés

Tiszta és adalékolt
félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzisztor

A félvezető eszközök gyártásáról

- A tisztaság
jelentősége
- A tisztítás folyamata
- Olvadékból való
kristályosítás
- Zónás olvasztás
- Adalékolás
- Valódi geometriai
viszonyok
- **Fotolitográfia**
- Jövőbeli
miniatürizáció

Fotolitográfia

Ezen alapul a legtöbb nagy integráltságú eszköz (processzorok, mobil telefon chipek) gyártása.

Néhány tucat munkafázissal milliós szám készülnek egymással pontosan összekötött áramköri elemek.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzistor

A félvezető eszközök gyártásáról

- A tisztaság jelentősége
- A tisztítás folyamata
- Olvadékból való kristályosítás
- Zónás olvasztás
- Adalékolás
- Valódi geometriai viszonyok
- **Fotolitográfia**
- Jövőbeli miniatürizáció

Fotolitográfia

Ezen alapul a legtöbb nagy integráltságú eszköz (processzorok, mobil telefon chipek) gyártása.

Néhány tucat munkafázissal milliószám készülnek egymással pontosan összekötött áramköri elemek.

Alapötlet: mindent egy lapka (ostya) felszínén alakítunk ki. Egy maszkkal adalékoljuk az n-típusú részeket, egy másikkal a p-típusúakat, egy harmadikkal az átlagnál erősebben adalékolt p-típusúakat, stb.

Kulcskérdés: hogyan készítünk ilyen kicsi maszkokat?

Megoldás:

- védőréteg (polimer) feljuttatása egyenletesen
- kicsinyítő optikán keresztül megvilágítás, exponálás
- az exponált részekben meggyengült részek kémiai eltávolítása



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzisztor

A félvezető eszközök gyártásáról

- A tisztaság jelentősége
- A tisztítás folyamata
- Olvadékból való kristályosítás
- Zónás olvasztás
- Adalékolás
- Valódi geometriai viszonyok
- **Fotolitográfia**
- Jövőbeli miniatürizáció

Fotolitográfia (folyt.)

Ezután jöhet az adalék felvitele, a melegítés, majd a maszk eltávolítása kémiai úton.

Ezek természetesen csak a fő gondolatok. A megfelelő technológiai részletek kikísérletezése, a gyártás közben a pontos paraméter-tartás igen költséges és bonyolult.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzisztor

A félvezető eszközök gyártásáról

- A tisztaság jelentősége
- A tisztítás folyamata
- Olvadékból való kristályosítás
- Zónás olvasztás
- Adalékolás
- Valódi geometriai viszonyok
- **Fotolitográfia**
- Jövőbeli miniatürizáció

Fotolitográfia (folyt.)

Ezután jöhet az adalék felvitele, a melegítés, majd a maszk eltávolítása kémiai úton.

Ezek természetesen csak a fő gondolatok. A megfelelő technológiai részletek kikísérletezése, a gyártás közben a pontos paraméter-tartás igen költséges és bonyolult.

Korlát: az exponáláskor használt fény hullámhossza. Ennél sokkal vékonyabb alkatrészek nem készíthetők.

Ma (2006) már 200 nm-nél is kisebb hullámhosszúságú fényt használnak, mely 65 nm szélességű alkatrészek gyártását teszi lehetővé.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzisztor

A félvezető eszközök gyártásáról

- A tisztaság jelentősége
- A tisztítás folyamata
- Olvadékból való kristályosítás
- Zónás olvasztás
- Adalékolás
- Valódi geometriai viszonyok
- **Fotolitográfia**
- Jövőbeli miniatürizáció

Fotolitográfia (folyt.)

Ezután jöhet az adalék felvitele, a melegítés, majd a maszk eltávolítása kémiai úton.

Ezek természetesen csak a fő gondolatok. A megfelelő technológiai részletek kikísérletezése, a gyártás közben a pontos paraméter-tartás igen költséges és bonyolult.

Korlát: az exponáláskor használt fény hullámhossza. Ennél sokkal vékonyabb alkatrészek nem készíthetők.

Ma (2006) már 200 nm-nél is kisebb hullámhosszúságú fényt használnak, mely 65 nm szélességű alkatrészek gyártását teszi lehetővé.

Elvileg elérhetőnek tűnik a 10 nm-es alkatrész méret. Az 1 nm-es biztosan nem, mert ez már a kristály rácsállandója nagyságrendjébe esik.



Bevezetés

Tiszta és adalékolt félvezetők

Érintkezési jelenségek

A félvezető dióda

A tranzisztor

A félvezető eszközök gyártásáról

- A tisztaság jelentősége
- A tisztítás folyamata
- Olvadékból való kristályosítás
- Zónás olvasztás
- Adalékolás
- Valódi geometriai viszonyok
- Fotolitográfia
- Jövőbeli miniatűrizáció

Jövőbeli miniatűrizáció

Sokan kísérleteznek a legnagyobb miniatűrizáció elérésével: atomi szélességű huzalok (kvantumhuzalok), néhány atomból álló áramkörü elemek, stb.

Ilyen skálán mindenképp kvantummechanikai számítások szükségesek.

Nem tudni, milyen eszköz lesz az, amivel tömeggyártást lehet megvalósítani. Talán a pásztázó alagútmikroszkóp?