



Elektronika és mérés technika

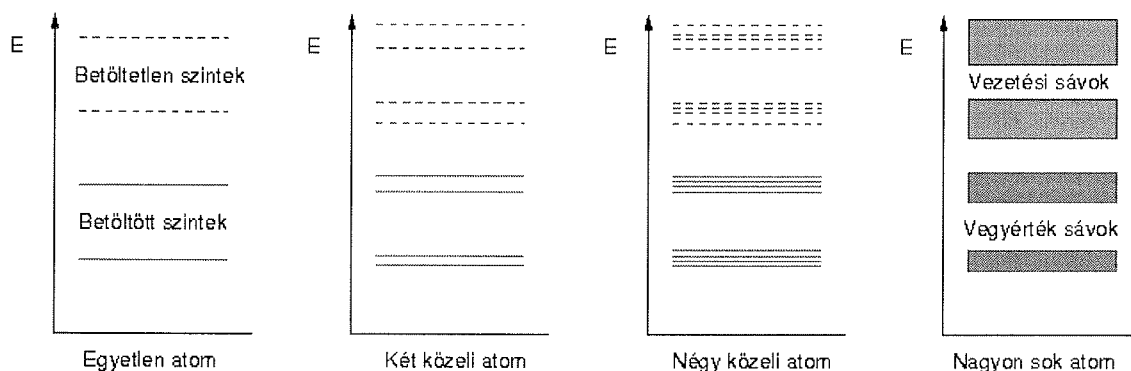
Varga Dezső és Bagoly Zsolt

2013.05.31

1. fejezet

Alapfogalmak

jóslata szerint a két egymáshoz közeli állapot szétválik, „felhasad”. Minél több atom kerül egymás mellé, annál több energiaszintet kapunk, a felhasadás éppen az atomok számának megfelelő, egymáshoz közeli energiaszintet eredményez. Mindezeket a 2.1 ábra szemlélteti. Nagyon sok (Avogadro-szám nagyságrendű) atom esetén az energiaszintekből annyira sok lesz, hogy gyakorlatilag sűrűn betöltenek egy energia-intervallumot, ez utóbbit „sávnak” (angolul band) nevezzük. A sáv helye nagyjából az eredeti atomi energiaszint közelében van, szélességét viszont nagyon erősen befolyásolja, hogy milyen erősségű a kölcsönhatás az atomok (elektronfelhők) között.

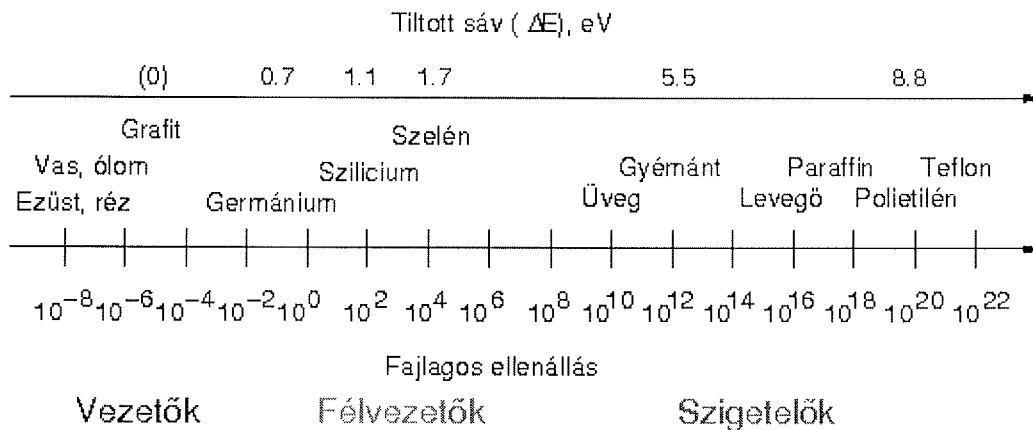


2.1. ábra. Atomi energiaszintek: Bal oldalon egyetlen (fiktív) atom energiaszintjei, melyek egy bizonyos értékig be vannak töltve. Két atom esetén az energiaszintek felhasadnak két-két közeli szintre, négy atomnál négy-négy szintre. Nagyon sok atom esetén (jobbra) a nagyon sok közeli szint egyetlen folytonos sávnak tekinthető

A teljesen betöltött sávokat (legfontosabb a legfelső ilyen) vegyérték-sávnak (valence band) szokás nevezni. Mivel teljesen betöltött, az elektronok kötöttek és nem is mobilizálódhatnak – ezek a szigetelők (2.2 ábra bal oldala).

Ha az atomok között erősebb a kölcsönhatás, illetve az eredeti energiaszintek nem voltak túl messze egymástól, a legalsó betöltetlen sáv és a vegyérték-sáv közeledhet egymáshoz (2.2 ábra középső eset). Ha egy elektron a betöltetlen sávba jut, ott kis energiáfordítással mozoghat (egy sávon belül egymáshoz igen közel különböző sebességű energiaszintek is vannak), azaz az anyag vezetni kezdi az elektromos töltést (elektronokat) – az alsó betöltetlen sávot vezetési sávnak (conduction band) hívjuk. Szélsőséges de gyakran előforduló esetben a legfelső betöltött és a legalsó betöltetlen sáv át is fedhet: ekkor igen könnyen kerülnek elektronok a mozgékony, vezetési sávnak nevezett tartományba (2.2 ábra jobb oldala). A fémek tipikusan ilyenek.

Az, hogy egy anyag vezető vagy szigetelő, azon múlik, hogy a hőmozgás miatt átjuthatnak-e elektronok a felső vegyérték-sávból a legalsó vezetési sávba, azaz a két utóbbi sáv közötti minimális ΔE energiakülönbség (tiltott sáv, bandgap) jelentősen nagyobb-e mint a $kT \approx 0.025eV$ termikus energia. Ha ΔE kisebb mint körülbelül



2.3. ábra. Anyagok fajlagos ellenállása (SI egységekben). Ennek a harminc nagyságrendet átfogó fizikai mennyiségnek az alján a vezetők, felső végén a szigetelők vannak, köztük a félvezetőknek nevezett, előző két csoport tulajdonságaitól jelentősen különböző anyagok. A tiltott sáv mérete elektronvolt (eV) egységekben a felső sorban van jelölve. Vezetőkre az átfedés miatt nincs tiltott sáv, erre utal a zérus érték

tisztaságban félvezető. Kristályrácsa gyémántrács, a tiltott sáv szélessége 1,1 eV (2.4 ábra). Ha a kristályrácsba nagyon kis mennyiségben olyan atomot juttatunk, aminek eggyel több vegyértékelektronja van – legyen ez foszfor (P) – akkor az új atom belekényszerül a kristályrácsba, de fölös elektronja magas energiaállapotba kerül, ezt a 2.4 ábra középső része szemlélteti. Mivel ez utóbbi közel lesz a vezetési sávhoz, a hőmozgás miatt könnyen vezetővé válik, mobilizálható.

Az ilyen módon a kristályrácsba kényszerített idegen atomok száma mindig igen kicsi: tipikusan minden tízezredik-százvezredik Si atomot cseréljük csak le, azaz ha a fölös elektron egyszer levált a P atomról, akkor valójában a Si kristályrácsban kezd bolyongani, és csak ritkán talál vissza egy P atomhoz.

A módosított, szennyezett szilícium sávszerkezetét a 2.4 ábra alsó sorában középen láthatjuk. A kis számú, elektronfölösleggel rendelkező atom nem sokkal a vezetési sáv alatt kelt új, betöltött energiaszinteket, melyek aztán könnyen a vezetési sávba juttat elektronokat (hőmozgással) – az anyag vezetőképessége drasztikusan megnövekedett ezáltal.

Van egy másik, igen érdekes lehetőség arra hogy a vezetőképességet kontrolláltan növeljük szennyezés által. Ha olyan atomot illesztünk a kristályrácsba, ami elektronhiányos (például bór), akkor az szívesen (kis energiabefektetéssel) átvesz elektront a szomszédos Si atomok egyikétől. Ez az „elektronhiány” vándorlásnak indulhat, és a hiányzó elektron atomról atomra egyre távolabb juthat az eredeti szennyező helytől. A helyzet ténylegesen olyan, mintha egy pozitív töltéshordozó jelent volna meg az anyag-

méret csökkentése javítja a gazdaságosságot, és - mint később látni fogjuk - nagymértékben (négyzetesen) csökkenti a fogyasztást.

A szennyezések segítségével egyetlen félvezető lapkán létre lehet hozni P és N típusú, változatos szennyezettségű tartományokat, összeköttetéseket, komplett áramköröket. A kritikus pontokban, a P és N típusú tartományok határán érdekes jelenségek játszódnak le.

2.2. PN átmenet: a dióda

A félvezető eszközök fizikai felépítése olyan, hogy egy félvezető kristályrácsban (például egy szilícium szemcsében vagy lapkán) kialakítunk olyan tartományokat, amelyek P vagy N típusú módon szennyezettek, azaz a kristály egyes részein az elektronok, máshol a lyukak a domináns töltéshordozók. Ha egy elektron és egy lyuk egymás közelébe kerül, akkor az elektromos vonzás miatt gyorsan rekombinálódnak: energiefelszabadulás mellett mindkettő megsemmisül. Az energiefelszabadulás jelentős, általában a tiltott sáv ΔE méretének nagyságrendjébe esik.

Tekintsük azt az esetet, amikor a kristály egyik fele P, másik N típusú, a távolabbi részeire pedig elektromos kivezetést alakítunk ki (például fémréteg felpárologatásával). Ezt a 2.5 ábra bal oldala szemlélteti. A két szennyezettségi tartomány érintkezésénél (a PN átmenetnél) az ellentétes töltéshordozók találkozhatnak, azaz rekombinálódhatnak: középen emiatt „elfogynak” a töltéshordozók. A maradék szennyező atomok töltése elektromos teret alakít ki, hiszen a P oldalon a szennyező atomok negatív, az N oldalon pozitív töltésűek.

A középen kialakult üres zóna stabilan megmarad. Képzeljük el hogy a P oldalról egy lyuk elindulna a zóna közepe felé. A PN átmenet környékén ez a pozitív töltés szemben kell haladjon az N tartomány pozitív (szennyező atomtörzsektől származó) töltéseivel, ami az elektromos taszítás miatt visszafordítja. Egy olyan egyensúlyi rendszer alakul ki, ahol a töltésmentes, kiürített zóna szélessége pont akkora, ami éppen megakadályozza a folyamatos rekombinációt.

Kapcsoljunk most feszültséget a rendszerre, úgy, hogy a P oldalra pozitív, N oldalra negatív feszültség kerül. Ha ez elegendően nagy értékű, a lyukak a P oldalról elindulhatnak a PN átmenet felé, az elektronok pedig – lévén negatív töltésűek – az N oldalról szintén az átmenet felé. A kiürített tartomány így bezárul, a töltéshordozók (mindkét típus tehát a rendszer *közepe felé haladva!*) folyamatosan rekombinálódnak. A töltéshordozók folytonos áramlása konstans áramot jelent, azaz az átmenet vezet. Mindezt a 2.5 ábra középső része szemlélteti.

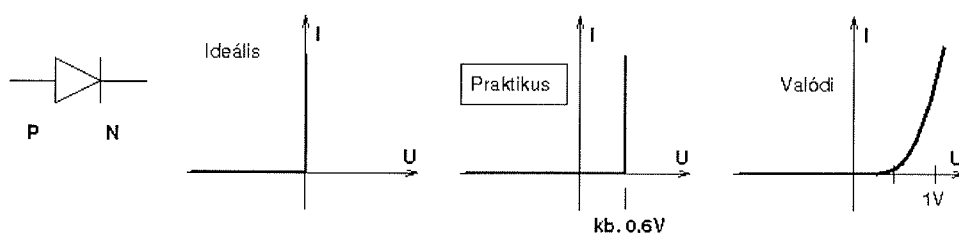
Ha olyan feszültséget kapcsolunk a kivezetésekre, ahol az N oldalon van a pozitív, a P oldalon a negatív pólus, akkor az átmenettől *elfelé áramlanak* a töltéshordozók. A középső, üres tartomány szélessége valamennyire megnövekszik, de folyamatos töltésáramlás nem indul meg, a rendszer ebben az irányban nem vezet. Ez a 2.5 ábra jobb oldalán

ekkor is esik 0,6V!), A 0,6 V nyitófeszültség anyagfüggő: pl. Ge diódák 0.3 V körül nyitnak, míg a különböző GaAs alapanyagú diódák nyitófeszültsége 1.2 V feletti.

A diódák áramát a Shockley egyenlet adja meg:

$$I = I_s(e^{U_d/(nkT)} - 1) \quad (2.1)$$

ahol I_s a szaturációs áram (tipikusan $I_s = 10^{-14}$ A körül van), U_d a diódán eső feszültség, n pedig az un. minőségi tényező (tipikusan $n = 1 - 2$ körüli). Az exponenciális függés miatt az áram erősen függ a hőmérséklettől.

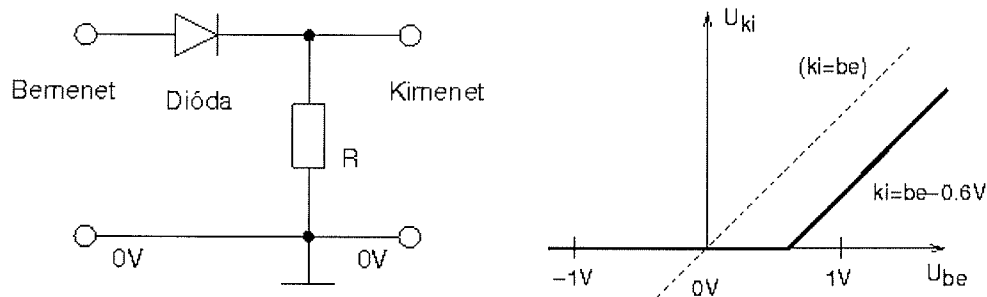


2.6. ábra. Dióda rajzjele (balra), illetve tipikus $I(U)$ karakterisztikái. A gyakorlatban legjobban használható, praktikus verzió az, ha akkor tekintjük vezetőnek, mikor körülbelül 0.6V-os nyitófeszültség esik rajta.

A diódák legelterjedtebb alkalmazása az egyenirányítás (XXXX fejezet), de emellett változatos módon használhatjuk őket, a technológiai kialakítástól függően. A főbb ilyen lehetőségek az alábbiak:

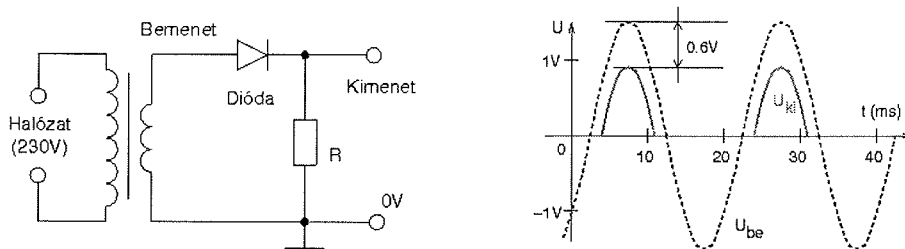
- A lyuk-elektron párok megsemmisülése, azaz a rekombináció jelentős energiaszabadulással jár. Ez nem csak hővé alakulhat, hanem megfelelő anyagválasztás mellett az elektromágneses sugárzás fotonjaivá, azaz fénné. Ezek az úgynevezett LED-ek (Light Emitting Diodes), ami az elektronikus berendezések apró fényjelzéseinek zömét is adják. A rekombináció energiájától függően a fény keletkezhet a látható tartományban tetszőleges színben, de lehet infravörös is (IR LED-ek) vagy – az elmúlt évtized technológiai fejlesztéseinek köszönhetően – ultraibolya (UV). A fehér színű LED-ek mára olcsók és energiahatékonyak lettek: ezek a fehér fényt úgy állítják elő (jobb vagy rosszabb színminőségben) hogy egy erős kék LED fényének egy részét a sárga tartományba tolják fluoreszcens anyagnak a félvezető kristály melletti elhelyezésével. A különböző GaAs és GaN diódák a teljes látható fény tartományt lefedhetik.
- A manapság egyre jobban terjedő napelemek a LED hatás fordítottjakén működnek: a beeső fény fotonja elektron-luk párt hoz létre a kiürített zónában, majd ezek szétválnak a P és N oldalra. Ez az effektus hozza létre a napelem áramát.

lás soros eredőjén eső feszültséget. A praktikus dióda modellt használva, az ellenálláson eső feszültség (amit tekintünk „kimeneti feszültségnek”) vagy zérus (ha nem folyik áram), vagy a bemenethez képest 0,6V-tal kevesebb (hiszen a diódán éppen a 0,6V-os nyitófeszültség esik). A 2.7 ábra szemlélteti ezt az egyszerű a kapcsolást, illetve a be- és kimenő feszültség közötti kapcsolatot.



2.7. ábra. Egyszerű egyenirányító kapcsolás, ahol a bemenő feszültség pozitív értéke esetén folyik áram az ellenálláson. A kimenet ekkor is legfeljebb a dióda nyitófeszültségével, körülbelül 0,6V-tal alacsonyabb értékű mint a bemenet.

Ha a bemenetre szinuszos feszültséget kapcsolunk, ami a gyakorlatban gyakran egy transzformátor szekunder tekercse, a kimenet a szinuszos jelek felső fele, mínusz a nyitófeszültség. Mindezeket a 2.8 ábra szemlélteti. Itt az ellenállás reprezentálja azt az eszközt, aminek az egyenfeszültségű táplálásra szüksége van.

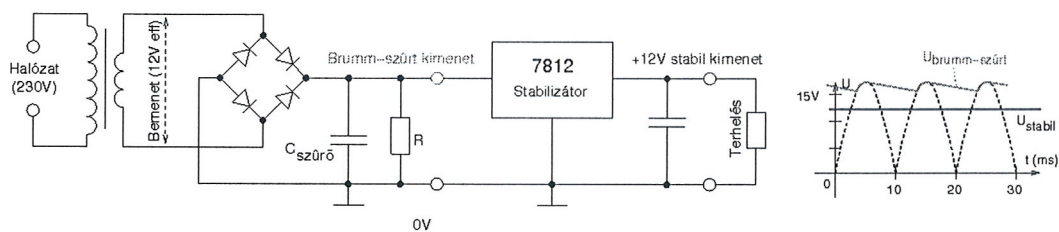


2.8. ábra. Egy transzformátor váltakozó feszültségének egyenirányítása, 1,5V-os amplitúdójú szekunder feszültség esetén

A 2.7 ábra kapcsolásában hátrányt jelent, hogy a szinuszos bemenetnek csak az egyik (itt pozitív) felét használjuk ki, a másik irányban (negatív) a dióda zár, azaz az ellenálláson nem esik hasznos teljesítmény. A szinuszos jel másik irányát egy egyszerű, négy diódából álló kapcsolással, az úgynevezett Graetz-híddal használhatjuk ki. A kapcsolást, illetve a kimenő feszültséget a 2.9 ábra szemlélteti.

szatérünk rá a XXX fejezetben. A módszer a következő: előállítunk egy referenciafeszültséget (legtöbbször egy Zener-diódával). A kimenetet szabályozhatóvá tesszük (a későbbiekben látott tranzisztorral, gyakorlatilag egy vezérelhető értékű ellenállás), majd a kimenetet úgy szabályozzuk, hogy az nagy pontossággal egyenlő legyen a referenciával (a pontos összehasonlítást egy szintén későbbiekben előkerülő műveleti erősítővel végezve). Erre a feladatra megbízható, olcsó, precíziós eszközöket lehet vásárolni, ami egyetlen alkatrészben tartalmazza a teljes stabilizáló áramkört. A legerjedtebb verziót mutatja a 2.10 ábra, ahol egy 7812-es jelű eszközzel állítunk elő 12V-os stabil kimeneti feszültséget egy 16V-os transzformátor kimenetéből (az eszköz nevében a 12 a kimeneti feszültségre utal, és 2013-as áron 30-50 Ft-ért beszerezhetők 5 és 24V között többféle fix feszültségértékben).

nem lenne jobb később tárgyalni?



2.10. ábra. Stabilizált tápegység megvalósítása. A Graetz-féle egyenirányítás után jól látható a brumm-szűrés a szűrőkondenzátorral. A stabilizálást, ami egyben további brumm-szűrést is jelent egy 7812-es jelű alkatrész segítségével lehet megoldani (ez esetben az R ellenállásra valójában nincs szükség).

Az egyenirányítás fentiekben tárgyalt módszere egy jelentős hátránnyal rendelkezik. A kimeneten megjelenő áram átlagosan mindig ugyanakkora mint amekkora a bemeneten befolyik, a kimenő feszültség pedig mindig néhány voltal kevesebb a bemenetnél. A rendszer hatásfoka tehát nem közelíti meg a 100%-ot alacsony kimeneti feszültségeknél. Modern berendezésekben ekkora hatékonyság-vesztés nem optimális, nagyobb feszültség/áram értékeknél jelentős lehet. Tekintve hogy maguk az összetett elektronikai eszközök olcsóbbak lettek, kialakult az egyenirányító átalakítók (tápegységek) egy nagy hatásfokú osztálya, ezek az úgynevezett kapcsolóüzemű tápegységek. Mint látni fogjuk, ezeknek szerves alkotórésze egy igen gyors „kapcsoló”, amit félvezetőkkel valósítanak meg. Tekintsük át az egyik legalapvetőbb elrendezést a sok közül, kizárólag arra koncentrálva, hogy miképpen érhető el a nagy hatásfok.

A 2.11 ábrán látható a hálózati feszültségről kis egyenfeszültségre átalakító kapcsolóüzemű tápegység áramköri rajza. Az első lépés egy, a fentiekben már látott egyenirányítás, azzal a különbséggel, hogy transzformátor nélkül, azonnal egyenfeszültséget (közel 320V-ot!) állít elő. Itt relatíve kicsi az energiavesztés, hiszen az egyenirányításkor csak 1,2V veszik el (ami a 320-hoz képest kicsi), illetve kimarad a rossz hatásfokú transzformátor is.

selektlangues {magyar}?

denzátor párhuzamosan a kimeneten lévő terhelő ellenállás mellé. A kapcsolóüzemű tápok mostanra nagyon elterjedtek, a modern mobiltelefon töltők is ilyen rendszerűek, nem beszélve az összes számítástechnikai rendszerben használt tápegységről. A kapcsolóüzemű tápegységek egyik potenciális problémája éppen a nagyfrekvenciás kapcsolásból származik: nagy teljesítmények gyors kapcsolásakor erős elektronikus zaj keletkezik, ami rádióhullámokkal vagy hálózati vezetékekkel is terjedhet. 2000-es évek elején ezeket a problémákat sikerült kiküszöbölni, és várhatóan az árban, súlyban és hatásfokban is kedvezőbb kapcsolóüzemű tápok teljesen kiszorítják a klasszikus transzformátoros rendszereket.

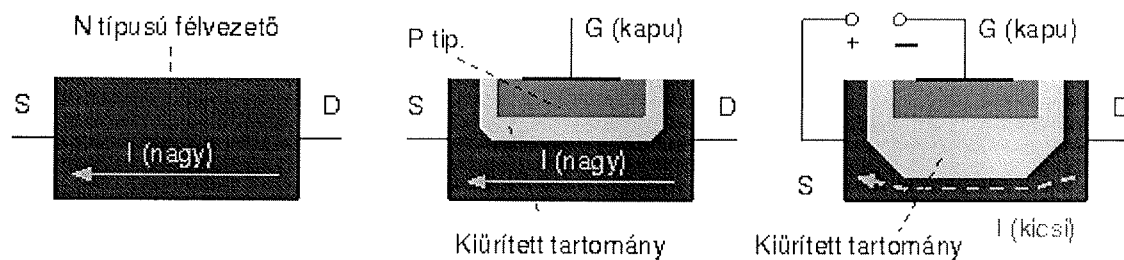
A fenti áramkör csak egy elvi példa, a gyakorlatban a kimenetet és a hálózati feszültséget az induktivitás helyére tett transzformátorral oldják meg. A ?? fejezetben említett $3 - 6W/cm^2$ teljesítményhatár 50Hz-es frekvencián érvényes. A kapcsolótápok több 10-100 kHz-es frekvenciája a frekvenciával arányosan csökkenti a szükséges keresztmetszetet. A méretcsökkenés a súlyt és az anyagmennyiséget - azaz a két jelentős árképző faktort - is csökkenti.

2.4. Tranzisztorok

A félvezető eszközök közül a fentiekben a diódával ismerkedtünk meg. Az elektronika forradalma szempontjából viszont a tranzisztor az, ami a huszadik század végére kiforrva igazi áttörést jelentett. Mára annyiféle tranzisztor létezik olyan változatos alkalmazásokban, hogy a jelen jegyzet nem tudja ezeket részletesen tárgyalni. Ahelyett hogy néhány jól definiált típust mutatnánk be az alábbiakban, megpróbálunk egy átfogó képet adni a lényegi elvekről, az Olvasóra bízva a részletekben való igény szerinti elmerülést (a technológiai fejlődés miatt érdemes a 2000 után dátumozott szakirodalmat tanulmányozni).

Egy tranzisztort úgy érdemes elképzelni, mint egy olyan eszközt, amivel valamilyen konkrét két kivezetése közötti áramot egy harmadik kivezetésére adott feszültséggel vagy árammal vezérel. Mintha tehát egy változtatható kapcsolónk vagy áramot átteresztő eszközünk lenne, amit egy jóval kisebb értékű árammal, vagy gyakorlatilag zérus áram melletti feszültséggel vezérelnénk. Jó analógia az is, mintha egy változtatható értékű ellenállás (potenciométer) beállítását külső feszültségjellel, nagy sebességgel vezérelhetnénk.

A legtöbb tranzisztornak valóban három kivezetése van, mindegyikre kapcsolható egy adott feszültség és mérhető egy adott áram (ez hat mennyiség). A Kirchoff-törvények miatt az áramok összege zérus, a feszültségek közül pedig választhatjuk bármelyiket referenciának, azaz négy független mennyiség jellemez egy állapotot. Ha visszaemlékszünk a ?? fejezetben bemutatott általános kétpólusra, ott mindig volt egy függvénykapcsolat (a karakterisztika) az áram és a feszültség között. A tranzisztor esetében két ilyen függvénykapcsolat van a négy független mennyiségre vonatkozóan. Az alábbiakban elhanyagoljuk hogy ezek az összefüggések frekvenciafüggők: leggyakrabban romlanak egy



2.12. ábra. Térvezérelt (JFET) tranzisztor működési elvének szemléltetése. Kiindulunk egy N típusú félvezető kristályból, aminek két oldalára elektródákat rögzítünk (S és D). Feszültség rákapcsolásával megindulhat az áram (bal oldalon). Helyezzünk el most egy P típusú tartományt az N típusú kristályon, és ehhez is rögzítsünk elektródát (G). A P és N tartomány találkozásánál kialakul a kiürített réteg, de áram ismét folyhat S és D között (középen). Ha a G elektródára jelentős (néhány V) negatív feszültséget kapcsolunk, akkor a kiürített tartomány mérete megnövekszik, az áram által használható csatorna beszűkül (jobbra), ezáltal a D és S közötti áramerősség vezérelhető lesz.

szélességét. Ez a MOS-FET, a „Metal Oxide Semiconductor” FET, ahol a név a szigetelő anyagára utal, ami jellemzően szilícium-dioxid (néhány száz atomrétegni kvarc). Amíg a feszültség a G elektródán negatív vagy enyhén pozitív, a D és S között nem folyik áram (hiszen két egymással szemben lévő PN átmeneten kellene átlépnie a töltéshordozóknak). Ha viszont G-re jelentős pozitív feszültség kerül, akkor az a negatív töltéshordozókat a P típusú tartomány közepére vonzza, melyek így megindulhatnak keresztirányban is és áram folyhat D és S között. A MOSFET ki- és bekapcsolt állapotának vázlatát a 2.13 ábra mutatja.

2.4.2. Bipoláris tranzisztorok

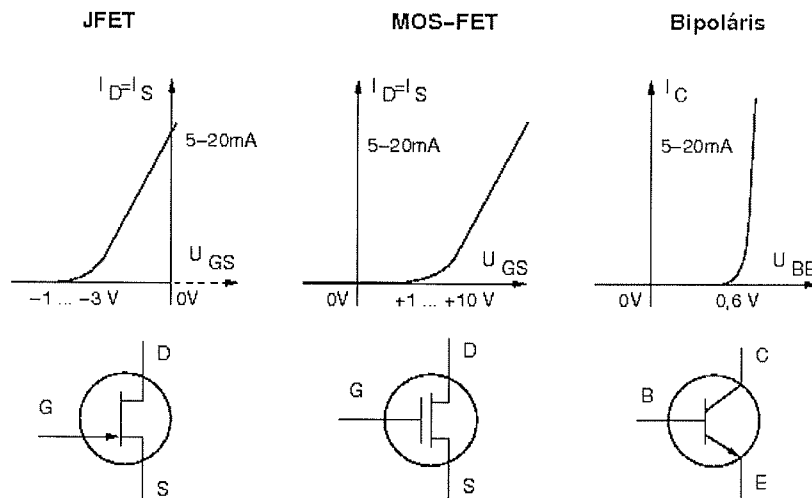
A tranzisztorok másik, a 90-es évekig igen népszerű csoportja a bipolárisnak nevezett tranzisztorok. Ezek vázlatát a 2.14 ábra mutatja. A terminológia változik: a vezérlő elektródát bázisnak (Base, B) hívják, és a kollektor (Collector, C) és emitter (Emitter, E) közötti áramot vezérli. A bipoláris tranzisztor tulajdonképpen két, egymással szembe kötött diódának fogható fel (ilyen értelemben hasonlít a MOS-FET-hez, de nincs szigetelőréteg, és más a geometria). Ha a bázis-elektroda nagyon vékony, akkor a bázis-tartományba juttatott kis mennyiségű töltéshordozó (lyuk) lavinaszerűen nagyon sok töltéshordozót (elektront) hajt keresztül a C és E elektródák között (gondoljunk bele, hogy a kiürített réteg mérete a bázis méretével lesz összemérhető). Az effektus eléggé összetett, felfedezéséért Bardeen, Brattain és Shockley 1956-ban fizikai Nobel-díjat kaptak.

Tekintve hogy a bázis felől be kell juttatni töltéshordozót, a B elektródán (kicsi de

a tranzisztor nem vezet.

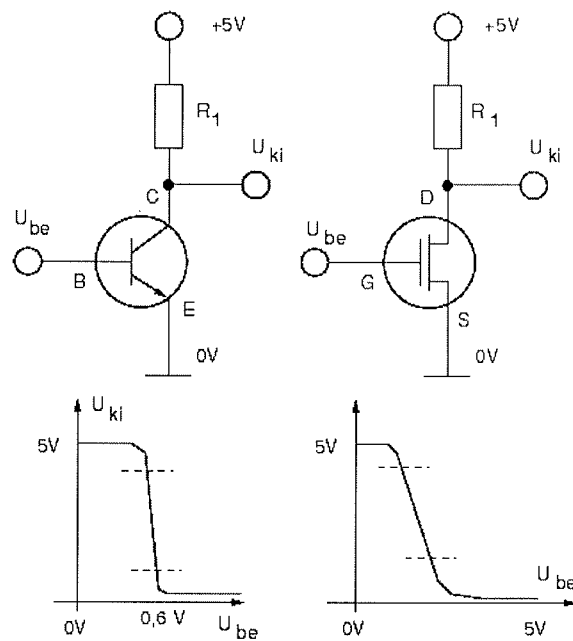
A 2.14 ábrán látható, N-P-N elrendezésnek van egy tükörképe is, ahol a bázis az N típusú félvezető: ez a P-N-P, ahol a feszültségek és áramok is ellentétes előjelűek. Igaz ez szinte minden tranzisztorra: megtalálhatók a „tükörképek”, ahol minden P tartományt N-re, minden N-et P-re cserélünk, és invertáljuk a feszültségeket is. Ekkor a működés – az áramirányt is tükrözve – nagyjából ugyanolyan marad. Ezt a fajta „tükrözést”, vagyis a komplementer alkatrész lehetőségét széles körben ki fogjuk majd használni.

A három megismert tranzisztor-típus (JFET, MOSFET és bipoláris) leggyakoribb rajzjelét, valamint a vezérlőelektróda feszültségétől függő vezérelt áram vázlatos függvényét a 2.15 ábra mutatja. JFET esetén a G és S közötti feszültség mindig negatív kell legyen, a MOSFET-nél nincs ilyen megkötés. Bipoláris tranzisztoroknál a B és E közötti U_{BE} feszültség a gyakorlatban nem megy 0,6V fölé (látható is hogy milyen meredek a vezérelt áram függése ettől a mennyiségtől).



2.15. ábra. Mindhárom megismert tranzisztor-típusnál (JFET, MOS-FET és bipoláris) alapvetően a vezérlőelektróda (G kapu vagy B bázis) feszültsége határozza meg (U_{GS} illetve U_{BE}) hogy mennyi áramot enged át az eszköz (a D és S illetve a C és E között). Felül ezt a függést láthatjuk vázlatosan. JFET-nél U_{GS} mindig negatív kell legyen, MOS-FET-nél nincs ilyen megkötés. A bipoláris tranzisztoroknál mindig élesen 0,6V-nál indul meg a vezetés, a másik két típusnál ez változó a néhány V tartományban. Mindhárom eszköznek létezik a pontos tükörképe, ahol minden feszültség és áram ellentétesre változik

A tranzisztorok története érdekesen alakult. Tulajdonképpen a FET-eket találták fel előbb – akkor még csak elvileg, fizikai megvalósítás nélkül – már a 30-as években. A fent említett Nobel-díjat érő 1948-as felfedezés után a bipoláris tranzisztorok uralták a palettát három évtizeden keresztül, melyeket az elmúlt alig két évtizedben, a technológiai



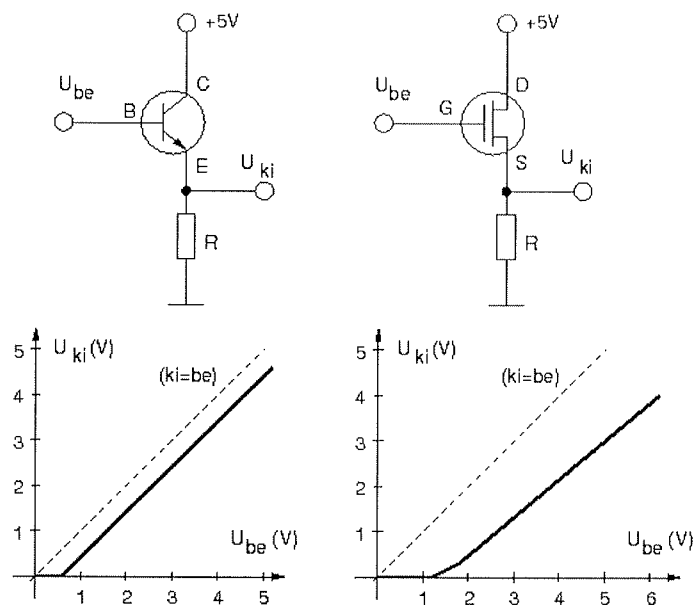
2.16. ábra. Egy tranzisztor áramot vezérel (akárcsak egy kapcsoló). Tipikusan úgy alkalmazzuk, hogy a vezérelt ágba egy R_1 ellenállást helyezünk (fent), és ezen mérjük a feszültséget. A fenti kapcsolások U_{be} bemenő és U_{ki} kimenő feszültsége közötti kapcsolatot mutatják az alsó ábrák vázlatosan. Bipoláris tranzisztoroknál (balra) a változás 0,6V környékén van, MOS-FET-eknél (jobbra) ez típusfüggő és nem annyira meredek. A függvénykapcsolatoknak van egy jó közelítéssel lineáris, jelentős negatív meredekségű szakasza (szaggatott vonalakkal jelölve)

szavard a felteker sok közbeszítet megjegyzés.

egyenáramú leválasztásról gondoskodó kondenzátor is innen töltődik fel megfelelő tranzienst után). A munkaponti feszültséget érdemes úgy megválasztani, hogy a 2.16 ábrán mutatott görbe leginkább egyenesnek tekinthető tartományának közepére legyen belőve.

A fentiekben tárgyalt és a 2.17 ábrán mutatott kapcsolás jellemzője, hogy az emitter vagy a source elektróda zérus (de legalábbis időben konstans) potenciálon van, innen az elnevezés: földelt emitteres vagy földelt source-ú kapcsolás. (Az utóbbi, erőltetett elnevezés közvetlenül az angol irodalom alapján tükörfordítással adódik, ebből is látható hogy a magyar szaknyelv, jelen jegyzet írásakor, nem alakított még ki egységes terminológiát a FET tranzisztorokra. A kapcsolással közös emitteres vagy közös source-ú kapcsolás néven is találkozhatunk.)

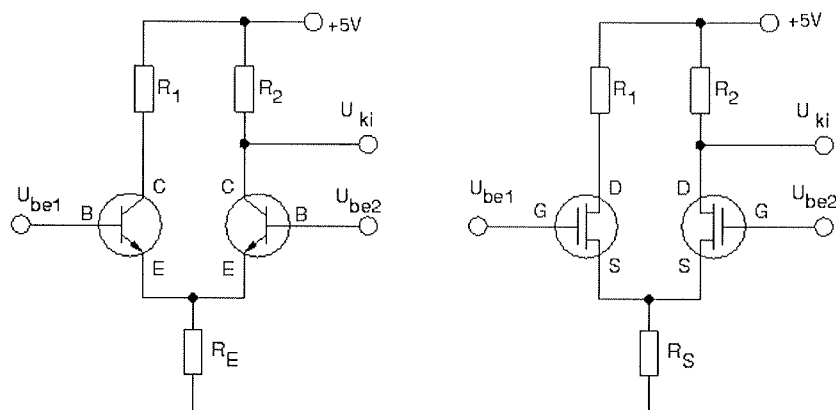
A közös emitteres (vagy source-ú) kapcsolás jellemzője, hogy nagy feszültségerősítésű és nagy áramerősítésű. A feszültségerősítés értéke a 2.16 ábra meredekségéből adódik, és tipikusan 5 és 100 közötti (12-40 dB) abszolútértékű. Mivel a ki- és bemenő feszültség görbéjének meredeksége negatív, ezért az erősítés is negatív előjelű (mondhatjuk hogy



2.18. ábra. Ha a tranzisztoros kapcsolás kimenő feszültségét az emitter-ről (vagy a source-ról) vesszük le egy soros R ellenállás beiktatásával, akkor az emitterkövető (balra) vagy source-követő (jobbra) alapkapcsolást kapjuk. A ki- és bemenet között csak az U_{BE} vagy U_{GS} feszültség esik, ettől a nagyjából konstans értéktől (bipolárisnál épp $0,6V$) eltekintve a kimenet követi a bemenetet (az alsó ábrákon ez látható vastag vonallal)

Érdeemes ezt a kérdést finomabban, általánosan körüljárni. Ha a bemenet értéke egy kis ΔU_{be} értékkel növekszik, akkor a bemeneti áram ΔI_{be} növekedést mutat. A kettő hányadosát, mint differenciális ellenállást bemeneti ellenállásnak nevezzük: $R_{be} = \Delta U_{be} / \Delta I_{be}$. A rendszer kívülről olyan, mintha egy ekkora ellenállással helyettesíthetnénk a bemenetét. Ha R_{be} kicsi, akkor az előző fokozatnak jelentős áramot kell kiadnia magából, ami nem mindig ^{megvalósítható} elhanyagolható. Az R_{be} bemenő ellenállás tehát azt jellemzi, hogy egy elektronikai erősítőkapcsolás mennyire jelentős terhelést jelent az őt megelőző lépcsőfokokra (ideális esetben semennyit, azaz ideálisan R_{be} végtelen lenne).

Hasonlóan feltehetjük a kérdést, hogy mennyire terhelhető a kimenet. Terhelés nélkül nyilván zérus a kimeneti áram, ekkor ΔU_{ki} feszültséget ad ki a fokozat. Tekintsük a másik szélsőséges esetet: ha a kimenetet annyira leterheljük, hogy egyáltalán nem is tud kiadni magából zérustól különböző feszültségváltozást (azaz $\Delta U_{ki} = 0$, a rövidzár analógiájára), akkor is csak véges áramot ad ki az eszköz, legyen ez ΔI_{ki} . A két fenti mennyiség hányadosát kimenő ellenállásnak nevezzük: $R_{ki} = \Delta U_{ki} / \Delta I_{ki}$ (figyeljünk arra, hogy ΔU_{ki} és ΔI_{ki} nem ugyanolyan körülmények között van mérve!). A rendszer jó közelítéssel úgy viselkedik, mintha egy ideális (végtelen áramot kiadni képes) kimenettel sorbakötnénk egy R_{ki} értékű ellenállást.

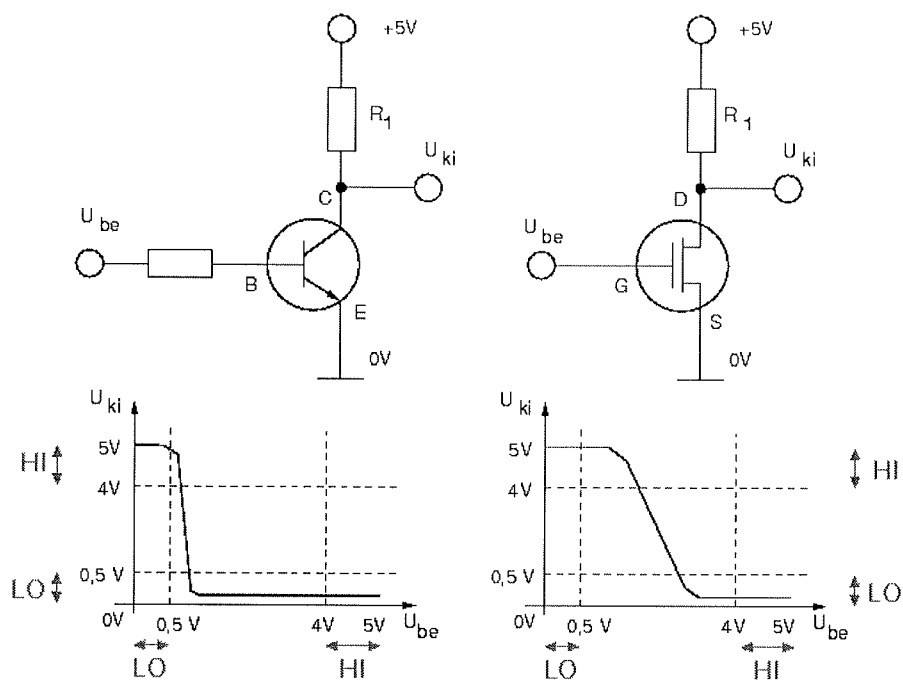


2.19. ábra. A differenciális tranzisztorkapcsolás. Ha a két bemenet, U_{be1} és U_{be2} egyformán változik, akkor a közös ágban (R_E) az áram kicsit növekszik, és a kimenőfeszültség is enyhén változik csak. Ha viszont ellentétes a két bemenet feszültségváltozási iránya (ekkor az áramok összege konstans, és ezért az emitter- vagy source-feszültségek is változatlanok), akkor a 2.16 meredekségének megfelelő jelentős áramváltozás lesz R_1 és R_2 -n (ellentétes irányban). A kimenőfeszültség tehát elsősorban a két bemenet feszültségének különbségétől függ, innen adódik a „differenciális” név

kollektor- vagy drain-ágban lévő R_1 (vagy az ugyanekkora értékű R_2) ellenállásról adódik, akárcsak ahogy a földelt emitteres esetben volt. Az emitter-ágban lévő R_E ellenállás (vagy a source-ágban lévő R_S ellenállás) tipikusan hasonló értékű mint R_1 vagy R_2 .

Tegyük fel hogy a két bemenő feszültség, U_{be1} illetve U_{be2} egy *kis egyforma értékkel megváltozik*, mondjuk pozitív irányba. A szimmetria miatt minden feszültségváltozás szimmetrikus. Az emitter (vagy source) ágban lévő ellenálláson a feszültségváltozás éppen az emitterkövető kapcsolás analógiájára nagyjából annyit változik mint a bemenet(ek), és emiatt a kollektor-ágban lévő ellenállásokon is hasonló a feszültségváltozás (az R_E vagy R_S illetve az R ellenállások körülbelül hasonlóak). Az U_{ki}/U_{be} arány legfeljebb egy nagyságrendű, de semmiképp sem nagy.

Drasztikusan más a helyzet, ha a változás nem egyforma a két bemeneten, hanem az egyik bemeneti feszültség pozitív, másik negatív irányban mozdul: $U_{be1} = -U_{be2}$. Az emitter- vagy source-ágban lévő feszültség ekkor változatlan (hiszen egyik bemenet felfelé, másik lefelé húzza). Ha az emitterfeszültség konstans, akkor éppen a földelt emitteres kapcsolás analógiáját kapjuk, azaz a kollektor-ágban lévő áramváltozás, és ezzel együtt a kimenő feszültség változása nagyon jelentős. Kicsit másképp mondva: ha a bemenetek egymással ellentétesen változnak, akkor a tranzisztorok (mivel az emitterek vagy source-ok közösek) egymással szemben elindulnak a 2.15 ábrának megfelelő görbén, aszimmetrikus módon jelentős áramváltozást okozva a megfelelő oldalon lévő kollektoron vagy drain-en.



2.20. ábra. Tranzisztoros inverter kapcsolás. Ha kinevezünk alacsony (LO) és magas (HI) feszültségtartományokat, akkor a földelt emitteres kapcsolás úgy is tekinthető, mint ami ezen tartományok közötti váltást oldja meg: ha a bemenet LO (HI), akkor a kimenet ellentétes, azaz HI (LO). Az átviteli függvény köztes tartományai lényegtelenek, és a két típus (bipoláris balra és MOS-FET jobbra) esetén különböznek is

számítógépes rendszerekben kifejezetten ezeket használják a logikai műveletek megvalósítására (lásd XXXX fejezet). További előnye, hogy szimmetrikus: a ki- és bemenő feszültség függvény közepén vált, ezért a HI és LO tartományok általában a teljes feszültségtartomány felső és alsó egyharmadát foglalják el. Első ránézésre furcsa, hogy a kapcsolás csak tranzisztort tartalmaz, ellenállás nincs is benne. Ez azért igen előnyös, mert gyártástechnológiailag egy félvezető lapkán nem könnyű ellenállást készíteni – konkrétan egyszerűbb egy tranzisztort kivitelezni mint ellenállást vagy kondenzátort.

Az a fontos tulajdonság, hogy zérus áram folyik a rendszeren amikor nem éppen vált a két állapot között, azt is magával vonja, hogy nagyon alacsony lesz a fogyasztás akkor is ha sok ilyen kombinálunk. Csak konkrétan a váltáskor folyik egy kis, nem elhanyagolható áram. *Az átlagfogyasztást tehát az fogja meghatározni, hogy hányszor kell kapcsolnia az eszköznek másodpercenként - azaz az f_0 átlagos kapcsolási sebességgel (órájelsebességgel) lesz arányos.* A FET-ben a kapu-elektroda és a tőle elszigetelt félvezető által alkotott rendszert kondenzátornak tekinthetünk, amit a kapu-elektroda felől fel kell tölteni. A kondenzátor energiája arányos az U_{tp} tápfeszültség négyzetével és a C kapacitással, ami