

10. Optoelektronikai alkatrészek

10.1. Fénytani alapfogalmak

A **fényelektromos eszközök** képesek elektromágneses sugárzást kibocsátani, amikor áram halad rajtuk keresztül, vagy az elektromágneses sugárzás elnyelésével mérhető elektromos mennyiségek előállítására (feszültség, áram, ellenállás változás) alkalmasak. Fénykibocsátó (emittáló) fotoelektromos eszköz: az izzólámpa, a fénykibocsátó dióda (LED), a lézer dióda és a különböző katódsugárcsővek. Fényenergiát villamos mennyiséggé átalakító fényelektromos eszköz: a fotoellenállás, a fotodióda, a fotoelem és a fototranzisztor.

Elektromágneses sugárzás (fény) alatt, a 0,3 + 1,5 μm hullámhosszúságú tartományt értjük. A fény a terjedési térben nem folytonosan oszlik meg, hanem diszkrét „adagokban” úgynevezett **kvantumokban** terjed, amelyeket **fénykvantumoknak** vagy **fotonoknak** nevezünk. A fény hullámhossza meghatározható az alábbi összefüggés szerint:

$$\lambda = \frac{c}{f},$$

ahol: λ a fény hullámhossza,
 c a fény sebessége vákuumban ($c \approx 300\,000\text{ km/s}$),
 f a fény frekvenciája.

A fény a hullámhossz függvényében három tartományra bontható:

- Ultraibolya fény (ultraviolet light)** - 0,4 μm alatt.
- Látható fény (visible light)** - 0,4 μm és 0,7 μm között.
- Infravörös fény (infrared light)** - 0,7 μm felett.

A látható fénysugarakat (0,4 + 0,7 μm) az emberi szem az alábbiak szerint érzékeli:

- **Ibolya (violet)** - 0,46 μm
- **Kék (blue)** - 0,50 μm
- **Zöld (green)** - 0,56 μm
- **Sárga (yellow)** - 0,59 μm
- **Borostyán (amber)** - 0,61 μm
- **Vörös (red)** - 0,66 μm

A színérzetet tehát a hullámhossz, a fényerősségérzetet a megvilágítás erőssége határozza meg. A fény mennyiségi jellemzésére használt, fontos mennyiségek a következők:

- A **fényáram** (fluxus, jele: Φ): a fény terjedésére merőleges, tetszőleges nagyságú felületen időegység alatt áthaladó fényenergia mennyiség (fényteljesítmény). Fénytechnikai mértékegysége a **lumen** (jele: lm).
- Pontszerű fényforrás (fényérzékenységet kiváltó) **fényerőssége** (jele: I): az a fényenergia mennyiség határozza meg, amelyet – meghatározott irányban – időegység alatt az 1 m sugarú gömb 1 m^2 felületén át (pontosabban egységnyi térszögbe) kisugároz:

$$I = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\Omega},$$

ahol Ω a térszög nagysága. Mértékegysége a **candela** (cd).

□ A megvilágítás erőssége (jele: E), a szemlélő előtt megjelenő, megvilágított A felület világosságára jellemző.

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta A}$$

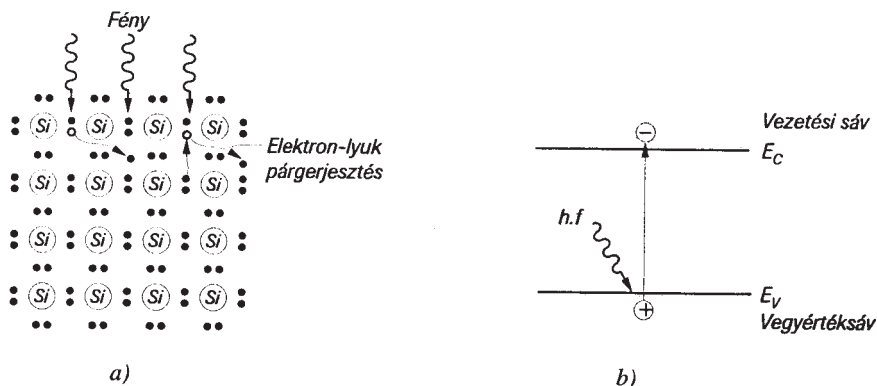
Mértékegysége a lux (lx); $1 lx = 1 lm/m^2$. Jellemző értékek a következők:

- a napfény megvilágítási erőssége nyitott területen: $\approx 100\ 000 lx$;
- telihold tiszta égbolt esetén: $\approx 0,2 lx$ megvilágítási erősséget biztosít;
- irodai munkahely megvilágítási erőssége: $\approx 500 lx$.

10.2. A fényelektromos jelenség

A fényelektromos jelenség alapja az, hogy az elektromágneses sugárzás energiát képes átadni a sugárzásnak kitett test elektronjainak. A fény fogalmát ebben a tárgyalásban minden elektromágneses sugárzásra alkalmazzuk tekintet nélkül arra, hogy hullámhossza láthatóság határain belül, vagy azokon kívül esik. A megnövekedett energiájú elektron vezetési sávba kerülhet, és mozgó töltéshordozóvá válhat (félvezető belsejében), vagy kilépési munkának megfelelő fékező potenciált leküzdve, ki is léphet a test belsejéből (fotoemisszió).

A fény modern kvantumelméletének alapján a fény kettős természetű, részben hullámszerű, részben korpuszkuláris sajátosságot mutat. Az elektromágneses sugárzás energiája 0 nyugalmi tömegű, fénysebességgel haladó, egyenként $E = h \cdot f$ energiájú kicsiny részecskékből, az úgynevezett fotonokban van koncentráva. Az összefüggésben f az illető elektromágneses hullám frekvenciája, h pedig a Planck-féle állandó ($h = 6,6 \cdot 10^{-34} W \cdot s^2$). A félvezető anyagok saját vezetőképességgel rendelkeznek, melynek értéke igen alacsony. A saját vezetőképesség energia-bevezetés, pl. az anyag felmelegítése következtében nő. Az anyag felmelegedése a hőrezgések felerősödéséhez vezet, ezáltal több kristálykötés szakad fel, és több vezetési elektron keletkezik. Ezek a töltéshordozók részt vehetnek az áramvezetési folyamatban, és növelik az anyag vezetőképességét. Az anyag többletenergiahoz juthat megvilágítás révén is, mivel a fényt alkotó fotonok (ha megfelelő energiával rendelkeznek) szétzúzzák a kristálykötéseket és elektron-lyuk párok keletkeznek (10.1.a. ábra).



10.1. ábra. Elektron-lyuk párok keletkezése megvilágított félvezetőben
 a) sík rácsmódban b) sávmodellben

Feltételezve, hogy egy foton elnyelődése egy sáv-sáv átmeneten (10.1.b. ábra) keresztül következik be, ez szükségessé teszi, hogy a fotonok legalább akkora energiájúak legyenek, ami megfelel az $E_C - E_V$ sávtávolságnak:

$$E = h \cdot f \geq E_C - E_V.$$

Szilícium esetében (a sávtávolság $E_C - E_V = 1,106$ eV) a fény minimális hullámhossza:

$$\lambda_{\min} = \frac{c}{f} = \frac{c \cdot h}{E_C - E_V} = 1,1 \mu\text{m}.$$

Tehát szilíciumalapú félvezetőkben ahhoz, hogy meginduljon a töltéshordozó párok keletkezése a fény hullámhossza a $\lambda \leq 1,1 \mu\text{m}$ feltételt kell teljesítse. A fényerőséget növelve a keletkező szabad elektronok és lyukak száma szaporodik, és nő az anyag vezetőképessége.

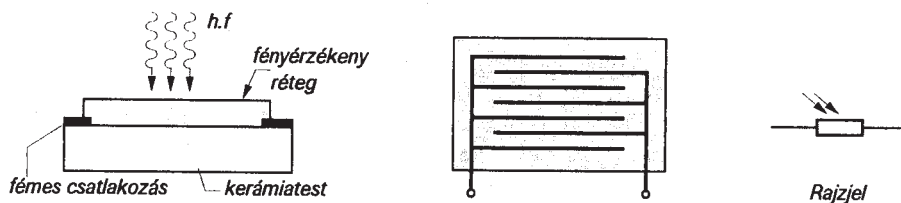
Azt a jelenséget, amelynek során egy félvezető anyag saját vezetőképessége fénysugárzás hatására megnő, **belső fotoelektromos hatásnak** nevezzük.

A fénysugárzás kisebb- nagyobb mértékben minden félvezető alkatrész elektromos viselkedését befolyásolja. Ezért ahol a jelenség nem kívánatos, általában fényzáró tokozást alkalmaznak. A belső fotoelektromos hatás jelenségét felhasználják fényérzékeny félvezető elemek készítésére.

10.3. A fotoellenállás (Light Dependent Resistor – LDR)

10.3.1. Felépítés és működés

A **fotoellenállás** egy záróréteg nélküli passzív félvezető elem, amely fénysugárzás hatására változtatja az ellenállását. A **fotoellenállások** aktív rétegei olyan vegyület típusú félvezető kristályokból állnak, amelyekben a belső fotoelektromos hatás különösen erős. A leggyakrabban alkalmazott kristályok a **kadmium-szulfid** (CdS), **ólom-szulfid** (PbS), **ólom-szelenid** (PbSe), **szelén** (Se) és az **ólom-tellurid** (PbTe). Az aktív félvezető-réteget vákuumban hordozóként szolgáló szigetelő anyagra párologtatják, amelyre előzőleg vékony rácsszerű fémcsíkokat visznek fel a jó villamos csatlakozás biztosítására (10.2. ábra). Az eszköz felületét átlátszó lakk vagy műanyag bevonattal védik.



10.2. ábra. A fotoellenállás felépítése és rajzjele

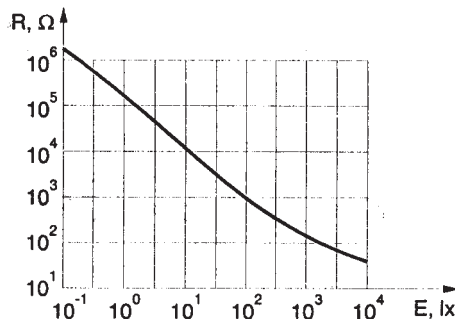
Megvilágítás nélkül a fotoellenállásra nem esik fény, a töltéshordozók nincsenek gerjesztve, emiatt a **fotoellenállás** nagy ellenállást képvisel. Megvilágítás alatt a fény töltéshordozókat gerjeszt, így a **fotoellenállás** ellenállása kisebb értékű lesz.

10.3.2. A fotoellenállás jellemzői

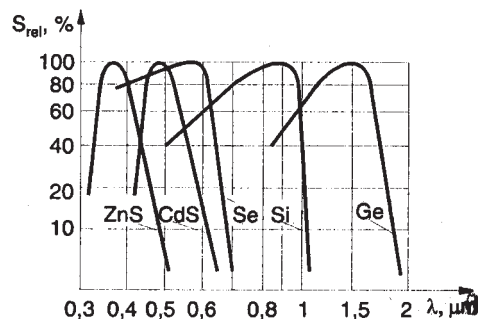
A fotoellenállás ellenállása a megvilágítás erősségének függvénye, és igen széles határok között változik (10.3. ábra). Állandó fényerősség esetén a fotoellenállás ellenállásának értéke a következő tényezőktől függ:

- a fotoellenállás alapanyagától és szennyezettségének mértékétől,
- a megvilágított felület nagyságától,
- a vezető pálya alakjától,
- a fény spektrális összetételétől,

A fotoellenállás anyaga befolyásolja az ellenállás értékét és a fotoellenállás érzékenységét, megvilágított felület növelése, a vezető pálya alakjának kialakítása megnövelheti a fotoellenállás érzékenységét. Az alapanyag szennyezettségének mértéke meghatározza a fotoellenállás vezetőképességét. A fotoellenállások nem egyformán érzékenyek minden hullámhosszú fényre: az érzékenységnek egy bizonyos hullámhossznál maximuma van.



10.3. ábra. A fotoellenállás fényerősség-ellenállás karakterisztikája



10.4. ábra. Különböző foto-félvezetőanyagok relatív spektrális érzékenysége

A **maximális fényérzékenység** λ_{ES} **hullámhossza** az a hullámhossz, amelyen a belső fotoelektromos hatás a legerősebb. A 10.4. ábra a különböző típusú foto-félvezetőanyagok spektrális érzékenységét szemlélteti a besugárzó fény hullámhosszának függvényében.

A spektrális érzékenység jelleggörbéjének alakja ugyanaz az általánosan alkalmazott fotoellenállások esetében, azonban a maximális érzékenység különböző hullámhossznál jelenik fel. A fotoellenállások fontos jellemzője a **sötétellenállás** és a **világosellenállás**, valamint a **maximális fotoérzékenység hullámhossza** és a **megszólalási idő**.

Az R_0 **sötétellenállás** a fotoellenállás sötétben mért ellenállása. A méréshez a fotoellenállást legalább egy percre sötétben kell tartani. Az R_{1000} **világos-ellenállás** az 1000 lux megvilágítási erősség esetén mért ellenállásérték. A t_r **megszólalási idő** az az idő, amíg a sötét állapotot követően 1000 lux erősségű fényrel megvilágított fotoellenállás esetén addig telik el, amíg az áram az R_{1000} -nál érvényes értékének 65% -át el nem éri.

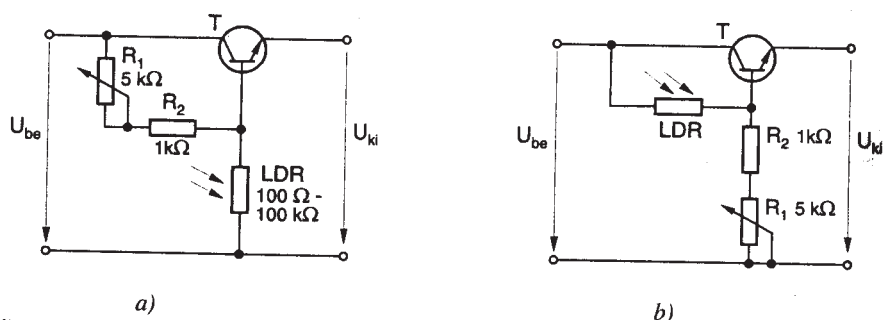
Határértékadat a P_{tot} **vesztési teljesítmény**, a legnagyobb megengedett üzemi feszültség (U) és a maximális környezeti hőmérséklet (T_{max}).

Jellemző értékek:

- $R_0 \approx 1 + 100 \text{ M}\Omega$,
- $P_{tot} \approx 50 \text{ mW} + 2 \text{ W}$,
- $R_{1000} \approx 50 \text{ }\Omega + 2 \text{ k}\Omega$,
- $U_a \approx 100 + 200 \text{ V}$,
- $t_r \approx 1 + 3 \text{ ms}$,
- $T_{max} \approx 70 \text{ }^\circ\text{C}$.

10.3.3. Alkalmazások

A fotoellenállások alkalmazási lehetőségei igen szélesek. Egy adott alkalmazáshoz a fotoellenállások közül azt kell kiválasztani, amelynek a jellemzői kielégítik az adott alkalmazáshoz szükséges paramétereket. A fotoellenállások egyik előnytelen tulajdonsága, amely behatárolja alkalmazási területüket, az ellenállásuk erős hőfüggése ($0,1+0,3 \text{ \%}/^\circ\text{C}$). A fotoellenállásoknak másik előnytelen tulajdonsága az igen nagy tehetetlenség, amely nem teszi alkalmassá őket, gyors működést igénylő gyakorlati alkalmazások esetén (pl. számítógépek és digitális információátvitel).



10.5. ábra. Fotoellenállással működő világításkapcsoló áramkörök
 a) megvilágításnál $U_{ki} \approx 0$ b) megvilágításnál $U_{ki} \approx U_{be}$

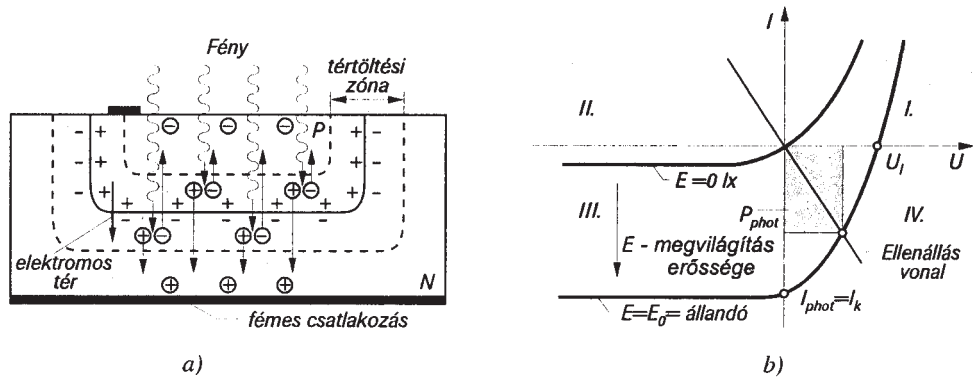
Alkalmasként viszont bizonyos lassú változást igénylő szabályozás- és vezérléstechnikai feladatok ellátására. Megtaláljuk őket fénysorompókban, közvilágítás-kapcsolókban, megvilágítási erősség mérőkben és vészjelzőkben. A 10.5. ábra fotoellenállással működő világításkapcsolókat mutat. A 10.5.a. ábra kapcsolásának kimeneti feszültsége megvilágítás esetén nulla. A másik kapcsolás pontosan fordított üzemben működik, mivel az áramkör kimeneti feszültsége mindaddig nulla míg a fotoellenállás nincs megvilágítva. A tranzisztorok B egyenáramú áramerősítési tényezője a megfelelő működés érdekében ≥ 100 , ha a fotoellenállás értéke a $100 \text{ } \Omega + 100 \text{ k}\Omega$ -os (sötét-világos) tartományban változik. Nagyobb teljesítmények kapcsolására célszerű egy Darlington-tranzisztor használata.

A kapcsolások a kimeneti feszültséget folyamatosan szabályozzák a megvilágítás függvényében, tehát a kimeneti feszültség szélső értékei csak megfelelően nagy (vagy alacsony) megvilágítás esetén érvényesek.

10.4. A PN-átmenet viselkedése fényhatás esetén

Ha a megvilágítás hatására megfelelő energiával rendelkező fotonok hatolnak be a PN-átmenetbe, akkor belső fényelektromos hatás következtében helyi töltéshordozó párok keletkeznek. A tértöltési tartományban jelenlevő villamos erőter a keletkezett töltéshordozó párokat szétválasztja (10.6.a. ábra). A szétválasztott töltéshordozók kifelé folyó áramként megjelenhetnek a külső áramkörben. A fotoáram mind nyitóirányú, mind záróirányú külső feszültség esetén is záróirányban folyik. Ennek következtében a megvilágított PN-átmenet jelleggörbéje ($E=E_0$) a megvilágítás nélküli jelleggörbéhez ($E=0$) képest lefelé tolódik el (10.6.b. ábra). Ha a dióda az I. vagy a III. tartományban üzemel fotodiódáról beszélünk.

A IV. tartományban a dióda generátor üzemben dolgozik és ilyenkor **fotoelemnek** (napelemnek) nevezzük. A fotoelem egy bizonyos megvilágításnál P_{phot} (10.6.b. ábrán látható szürke terület) hatásos teljesítményt ad le, amelynek értéke a megvilágítás erősségétől, hullámhosszától és a munkapont megválasztásától függ.



10.6. ábra. Megvilágított PN-átmenet
a) elvi vázlat; b) egy megvilágított ($E=E_0$) és egy megvilágítatlan ($E=0$) PN-átmenet jelleggörbéje

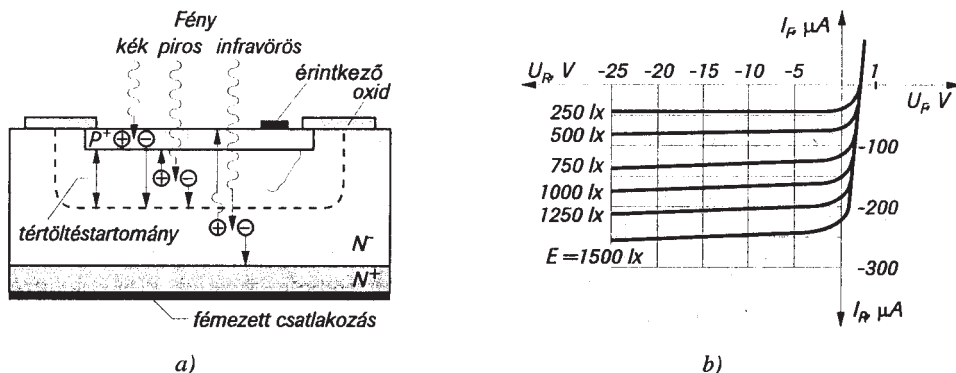
$I_k = I_{\text{phot}}$ – rövidzárási fotoáram
 U_i – üresjárási fotofeszültség
 P_{phot} – fototeljesítmény

10.5. Fotodiódák

10.5.1. Felépítés és működés

A **fotodiódák** különleges felépítésű félvezető diódák, amelyek PN-átmenete fénysugárral megvilágítható. A fotodiódákat leggyakrabban záróirányban működtetik. Alapanyaguk szilícium, vagy germánium lehet. A 10.7. ábra egy rétegtechnológiás fotodióda felépítését és feszültség-áram jelleggörbéjének, a megvilágítás erősségétől való függését ábrázolja.

A diódát záróirányban polarizálva, a megvilágítás hatására záróirányú áramuk megnő. A zárási áram növekedése egyenesen arányos a megvilágítás erősségével.

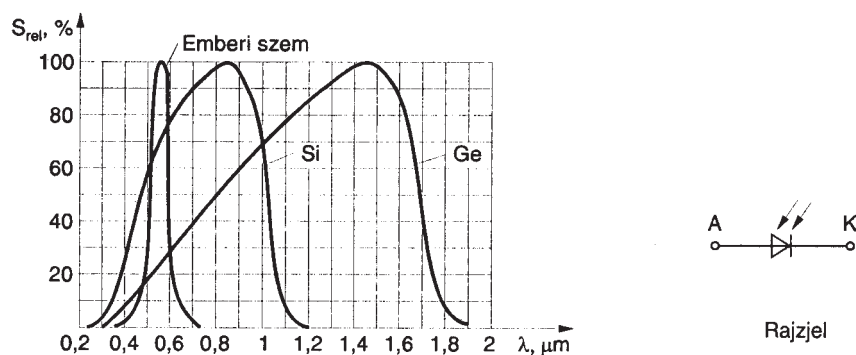


10.7. ábra. A fotodióda
a) elvi felépítése b) jelleggörbéi

A fotodióda S fényérzékenységet a zárási fotoáram és a megvilágítás hányadosaként határozzuk meg:

$$S = \frac{I_R}{E} \left[\frac{\mu\text{A}}{\text{lx}} \right].$$

A fényérzékenység függ a fénysugárzás hullámhosszától. A 10.8. ábra. Si- és Ge-fotodiódák spektrális érzékenységét és áramkörti jelölését mutatja. A maximális érzékenység hullámhossza Si-fotodiódák esetén $\lambda_{ES} \approx 0,85 \mu\text{m}$, Ge-fotodiódák esetén pedig $\lambda_{ES} \approx 1,5 \mu\text{m}$.



10.8. ábra. Fotodiódák relatív spektrális érzékenysége és áramkörti jelölése

10.5.2. Jellemző adatok és határértékek

A fotodiódák legfontosabb jellemző adatai a következők:

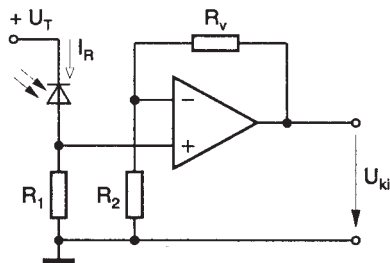
- **Fényérzékenység (S):** megadja, hogy a zárási áram hány μA -rel növekszik a megvilágítás 1 lx -os növekedése hatására. Jellemző értéke, $S \approx 0,01 + 0,12 \mu\text{A/lx}$.
- A megvilágítás nélküli állapotra érvényes az I_d sötétáram, amelyet meghatározott zárófeszültség esetén adnak meg. Jellemző értéke hőmérsékletfüggő Ge-fotodiódák esetén $1 \mu\text{A}$ nagyságrendű, Si-fotodiódák esetén pedig 1 nA körüli érték.
- A **maximális érzékenység λ_{ES} hullámhossza**, amely Si-fotodiódák esetén $\lambda \approx 0,85 \mu\text{m}$, Ge-fotodiódák esetén pedig $\lambda \approx 1,5 \mu\text{m}$.
- Az f_g működési **határfrekvencia**. A fotodiódák feléledési ideje lényegesen kisebb, mint a fotoellenállásoké. A határfrekvencia jellemző értéke Si-fotodiódák esetén kb. 1 MHz . Különleges felépítésű, úgynevezett PIN-fotodiódák esetén f_g értéke 1 GHz is lehet.
- A C_S **záróréteg-kapacitás**. Jellemző értéke $C_S \approx 10 + 150 \text{ pF}$, amely függ a zárófeszültség nagyságától.

A fotodiódákra vonatkozó határértékek általában a **maximális zárófeszültségekre** (jellemző érték $U_{Rmax} \approx 20 + 30 \text{ V}$) és a **környezeti hőmérséklet-tartományra** vonatkoznak ($T \approx - 50 + +100 \text{ }^\circ\text{C}$).

10.5.3. Alkalmazások

A fotodióda záróárama a megvilágítás erősségével arányosan növekszik, ezért különösen jól alkalmazható fénymérésre.

Nagyon sok helyen alkalmazzák még a szabályozás- és vezérléstechnikában. Nagyon kis helyigényük miatt, alkalmazásukkal nagy alkatrészsűrűség érhető el.



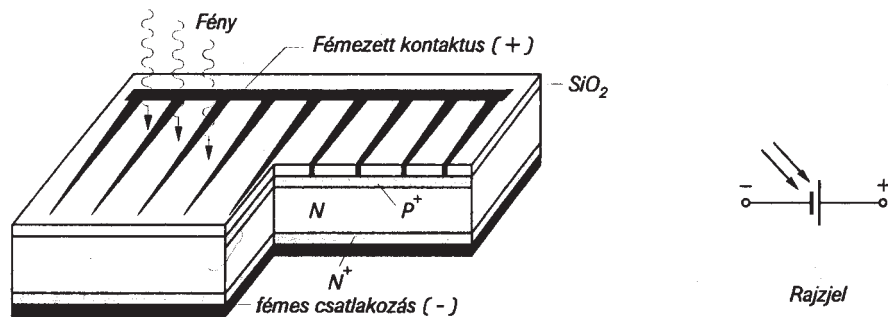
10.9. ábra. Fényerősség mérő áramkör fotodióda felhasználásával

A fotodiódák megvilágítás hatására feszültséget képesek előállítani, de kicsi fényérzékeny felületük alacsonyabb hatásfokot biztosít, mint a kifejezetten erre a célra kifejlesztett fotoelemek. A 10.9. ábrán látható kapcsolásban a fotodióda kis értékű záróirányú fotoáramát neminvertáló alkapcsolásban működő műveleti erősítő erősíti fel. Mivel a dióda záróirányú árama arányos a megvilágítás erősségével, az U_{ki} kimeneti feszültség is arányos lesz a megvilágítás erősségével.

10.6. Fotoelemek (napelemek)

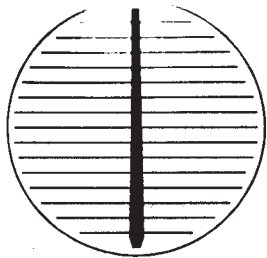
10.6.1. Felépítés és működési elv

A *fotoelem* vagy *fényelem* olyan eszköz, amely a fény sugárzási energiáját közvetlenül elektromos energiává alakítja. Ha a fotoelemet megvilágító fény a naptól ered, akkor *napelemtől* beszélünk. A fotoelemek a generátorokhoz hasonlóan, üresjárási feszültséggel és belső ellenállással rendelkeznek. Fizikai működésük alapjait a 10.4. fejezetben már megismertük. A fotoelemek készítésére alkalmazott félvezető anyagok a szelén és a szilícium. A 10.10. ábra egy szilícium-fotoelem elvi felépítését és áramköri jelölését mutatja. A 10.11. ábra egy kör alakú Si-fotoelem felületi fémkontaktusának az elrendezését szemlélteti. A fotoelem *pozitív sarka* a P tartomány záróréteg-mentes szakasza, *negatív sarka* pedig az N -zóna záróréteg-mentes szakasza.

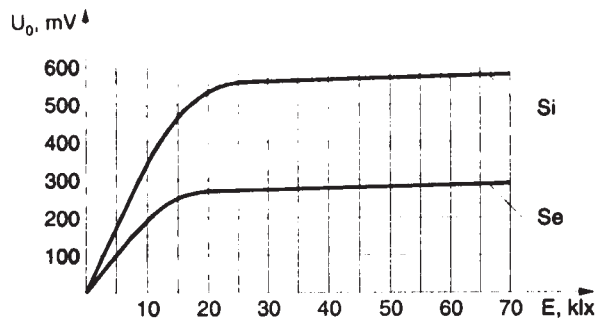


10.10. ábra. Négyzet alakú Si-fotoelem vázlatos felépítése és rajzele

A szilíciumalapú fotoelemek szerkezeti felépítése a felhasználás függvényében N^+NP^+ , vagy P^+PN^+ elrendezésű lehet. Az N^+NP^+ elrendezés előnyös tulajdonságokkal rendelkezik világűrbeli felhasználás esetén. A P^+PN^+ elrendezésű pedig földi felhasználásra előnyös (az N^+NP^+ elrendezés nagy ellenállást mutat a kozmikus sugárzással szemben).

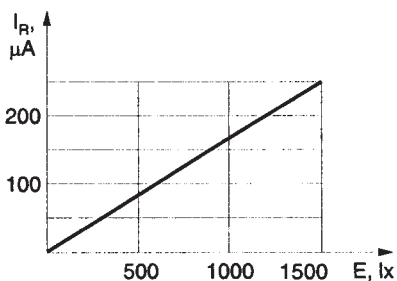


10.11. ábra. Kör alakú Si-fotoelem felületi fémkontaktusának elrendezése

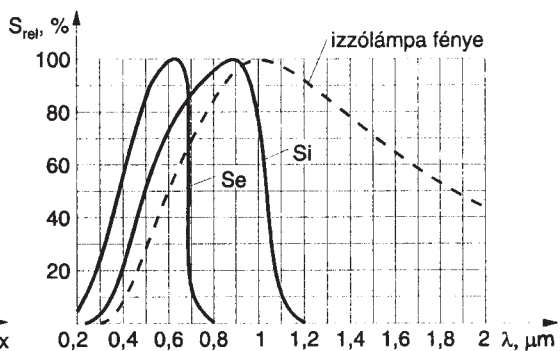


10.12. ábra. Si- és Se-fotoelem üresjárási feszültségének függése a megvilágítás erősségétől

Típustól függetlenül a Si-fotoelemek PN-átmenetének vastagsága kisebb mint $0,5 \mu\text{m}$, a teljes vastagság kb. $300 \mu\text{m}$. A felületi rácsszerű fémkontaktus a fotoelem hasznos felületének kb. $5 + 6 \%$ -át borítja és alkalmazása révén a diffúziós réteg soros ellenállása (azaz a fotoelem belső ellenállása) $0,1 + 0,25 \Omega$ értékre csökken. A 10.12. ábra szilícium és szelén fotoelem üresjárási feszültségének a változását mutatja a megvilágítás függvényében. A jelleggörbék a megvilágítás erősségének egy bizonyos értékétől (kb. 20 klx) telítési jelleget mutatnak



10.13. ábra. A fotoelem rövidzárási árama a megvilágítás erősségének függvényében



10.14. ábra. Fotoelemek spektrális érzékenysége; izzólámpák fényének spektrális eloszlása

A fotoelemek rövidzárási árama lineáris összefüggésben van a megvilágítás erősségével (10.13. ábra). A fényenergia átalakítás hatásfokát figyelembe véve a Si-fotoelemek hatásfoka kb. 13% , erős megvilágítás esetén 10 mW/cm^2 teljesítményt képesek leadni. A Se-fotoelemek 1% körüli hatásfokkal rendelkeznek, és erős megvilágítás esetén 1 mW/cm^2 a teljesítményük. Különleges Si-fotoelemek esetén közel 20% -os hatásfokot is sikerült elérni. Ez magyarázza, hogy a napelemek készítésére leggyakrabban a szilíciumot használják.

A Si- és Se-fotoelemek spektrális érzékenységét a 10.14. ábra szemlélteti, figyelembe véve egy hagyományos izzólámpa fényének spektrális eloszlását is. Megfigyelhető, hogy a szilícium fotoelemek (akárcsak a Si-fotodiódák) a megvilágító fény igen széles frekvencia-tartományában működőképeseek.

10.6.2. Jellemző adatok és határértékek

A fotoelemek jellemzésére használt legfontosabb adatok a következők:

- a fényérzékeny felület nagysága (A_L);
- maximális üresjárás feszültség (U_{0max});
- maximális rövidzárási áram (I_{kmax});
- maximális teljesítmény ($P_{phot max}$).

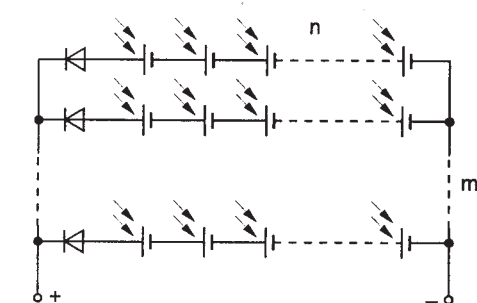
Az U_{0max} , I_{kmax} és $P_{photmax}$ értékei 100 klx megvilágítás esetén érvényesek. A fotoelem villamos paraméterei bizonyos mértékben hőmérsékletfüggők. A fotodiódákhoz hasonló jellemző adat még az S fényérzékenység és a maximális fényérzékenység λ_{ES} hullámhossza. Egy szilícium fényelem jellemző adatai:

- $A_L \approx 3,72 \text{ cm}^2$,
- $I_{kmax} \approx 130 \text{ mA}$,
- $U_{0max} \approx 0,58 \text{ V}$,
- $\lambda_{ES} \approx 0,85 \text{ }\mu\text{m}$,
- $S \approx 1,3 \text{ }\mu\text{A/lx}$,
- $P_{photmax} \approx 60 \text{ mW}$.

A fotoelemek legfontosabb határérték-adata a megengedett környezeti hőmérséklet tartomány, amelynek szokásos értéke: $-40 \text{ }^\circ\text{C} +125 \text{ }^\circ\text{C}$.

10.6.3. Alkalmazások

A fényelemeket a gyakorlatban nagyon sok területen alkalmazzák. Elsősorban a napfény villamos energiává alakítása révén, különböző berendezések (pl. műholdak, zsebszámológépek) energiaellátását biztosítják. Alkalmazznak fotoelemeket a vezérlés- és szabályozástechnikában, valamint a mérés technikában.



10.15. ábra. Fotoelemek vegyes kapcsolása

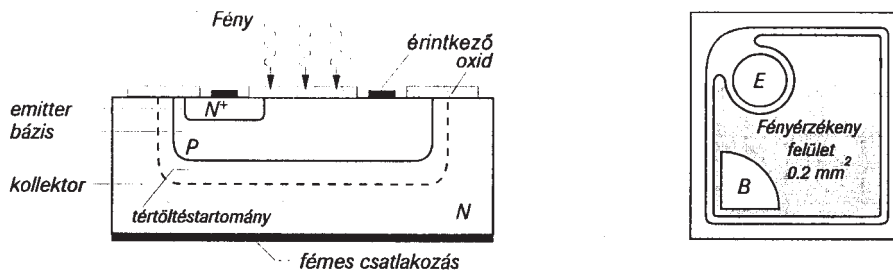
Az alkalmazásokhoz szükséges feszültség és áramértékeket a fotoelemek soros vagy párhuzamos kapcsolásával érik el. Gyakran vegyes kapcsolásokat is használnak: n elem sorbakapcsolnak, majd m darab ilyen sorcsoportot párhuzamosan kapcsolnak (10.15. ábra). A fotoelemek összekapcsolása nem véletlenszerűen történik, hanem egyenként válogatják azonos megvilágítási körülmények esetén érvényes villamos paramétereik szerint. A diódák a kapcsolásban védelmi szerepet töltenek be.

10.7. Fototranzisztorok

10.7.1. Felépítés és működési elv

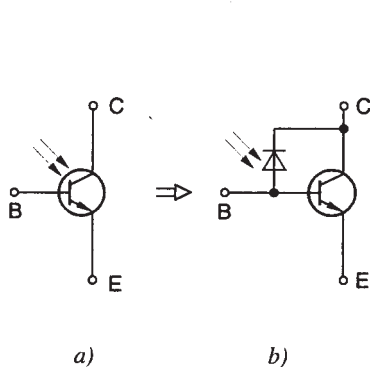
A fotodiódák érzékenysége tovább növelhető a tranzisztorhatás alkalmazásával. A fototranzisztorok megvilágítható bázis-kollektor átmenettel rendelkező speciális szilíciumtranzisztorok (10.16. ábra). Ismeretes, hogy ha egy bipoláris tranzisztor bázisárama $I_B = 0$, a kollektoráram:

$$I_C = (B + 1) \cdot I_{CB0}, \text{ ahol } I_{CB0} \text{ a kollektor-bázis átmenet záróirányú árama.}$$

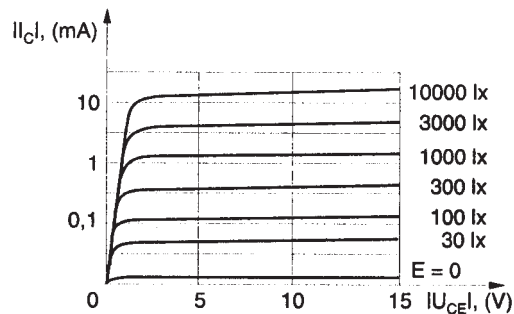


10.16. ábra. Fototranzisztor elvi felépítése

A záróirányban előfeszített PN-átmenet megfelelő megvilágítása esetén, a fellépő fényelektromos hatás révén keletkező töltéshordozók megnövelik ezt az áramot és $I_B = 0$ beállításban ennek az áramnak a $(B+1)$ -szerese jelenik meg a kollektorkörben. Tehát közös emitterkapcsolásban a kollektor a fototranzisztor B egyenáramú áramerősítési tényezőjének megfelelően megnövelt fotoáramot állít elő. A szükséges munkapont önműködően beáll, ha csupán az emitter és a kollektor közé kapcsolunk feszültséget és engedjük, hogy a szabadon hagyott bázis az áramoknak megfelelő potenciált vegyen fel. A 10.17. ábra a fototranzisztor áramköri jelölését és helyettesítő képét mutatja. Ennek alapján a fotodiódán átfolyó áram bázis áramot hoz létre, amelynek következtében felerősített kollektoráram keletkezik.



10.17. ábra. A fototranzisztor
a) rajzjele b) helyettesítő kapcsolása



10.18. ábra. A fototranzisztor U_{CE} - I_C jelleggörbéi különböző megvilágításnál ($I_B = 0$)

A 10.18. ábra egy fototranzisztor feszültség-áram jelleggörbéit ábrázolja a megvilágítás erősségének függvényében.

10.7.2. Jellemző adatok és határértékek

A fototranzisztorok legfontosabb jellemző adatai:

- kollektoráram megvilágítás nélkül
- kollektoráram, adott megvilágítás és U_{CE} feszültség esetén
- fényérzékenység
- a maximális fényérzékenység hullámhossza
- határfrekvencia

I_{Cd}
 I_{CI}
 S
 λ_{ES}
 f_g

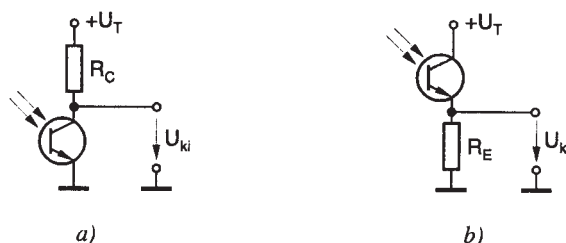
A fototranzisztorok többi jellemző adata és határértéke a hagyományos tranzisztorok jellemzőinek felelnek meg. A 10.1. táblázat a BPW 42 típusjelzésű, Siemens gyártmányú szilícium fototranzisztor legfontosabb adatait tartalmazza.

U_{CEmax} V	I_{Cmax} mA	P_{tot} mW	T_j °C	I_{Cd} , nA $U_{CE}=5$ V; $E=0$	I_{Cl} , μ A $U_{CE}=5$ V; $E=100$ lx	f_r kHz	λ_{ES} nm	S nA/lx
32	50	100	100	10÷200	300	300	800	150

10.1. táblázat.

10.7.3. Alkalmazások

A fototranzisztorok alkalmazási területei megegyeznek a fotodiódákéval. A fotodiódákhoz viszonyítva nagyobb érzékenységet, de alacsonyabb határfrekvenciát biztosítanak. A 10.19. ábra egyszerű fényvevő kapcsolásokat mutat:



10.19. ábra: Fototranzisztoros fényvevők

A kollektor-bázis fotodióda áramát I_{phot} -val jelölve, a 10.19.a. ábrán látható kapcsolás kimeneti feszültsége:

$$U_{ki} = U_T - B \cdot I_{phot} \cdot R_C.$$

A 10.19.b. ábrán látható kapcsolás esetén:

$$U_{ki} = B \cdot I_{phot} \cdot R_E.$$

10.8. Fénykibocsátó dióda (LED -Light Emitting Diode)

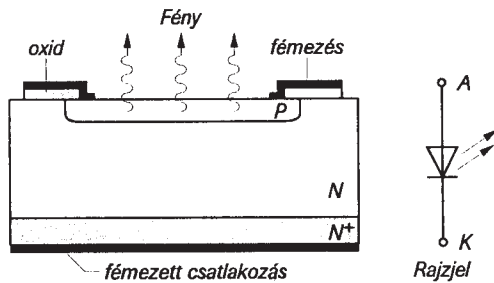
10.8.1. Felépítés és működési elv

A fénykibocsátó diódák vagy fénydiódák speciális felépítésű diódák, amelyek az elektromos energiát fényenergiává alakítják. Szerkezeti felépítésüket és áramköri jelölésüket a 10.20. ábra mutatja. Ha nyitóirányú áram folyik keresztül a PN-átmeneten az N rétegből az elektronok a P rétegbe, a P rétegből a lyukak az N rétegbe diffundálnak. A diffúziós kisebbségi és a többségi töltéshordozók között rekombinációs folyamatok indulnak meg, amelyek során a felszabaduló energia fotonok formájában kisugárzódik. A félvezető felületéből kilépő sugárzás a nagyon vékony ($\approx 1 \mu\text{m}$) P rétegben keletkezik. A 10.21. ábra a sugárzási rekombináció energia viszonyait szemlélteti.

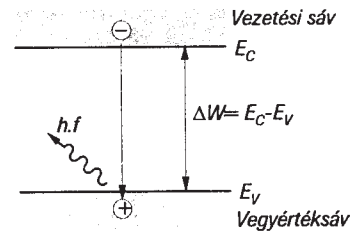
A sugárzási rekombináció csak úgy jöhet létre, ha az elektronok átkerülnek a nagyenergiájú vezetési sávból, a kisebb energiájú vegyértéksávba. A félvezető anyag sávszerkezete határozza meg, a kibocsátott fény hullámhosszát a következő összefüggés szerint:

$$\Delta W = h \cdot f, \Rightarrow \lambda = \frac{h \cdot c}{\Delta W}$$

Érdekes megjegyezni, hogy a fénykibocsátó diódában létrejövő rekombinációk csupán 1 %-a tekinthető sugárzási rekombinációnak (amely fotonok kibocsátásával jár). Tehát a rekombinációk túlnyomó többsége nem jár fotonok kibocsátásával.



10.20. ábra. Fénykibocsátó dióda szerkezeti felépítése és áramköri jelölése



10.21. ábra. Sugárzási rekombináció energiasáv-modell felhasználásával

A vegyülettípusú félvezetők esetén (mint a gallium-arsenid (GaAs), gallium-arsenid-foszfid (GaAsP), gallium-foszfid (GaP)), a sugárzási rekombinációk száma néhány nagyságrenddel nagyobb, mint például szilícium esetében. Ezért a fénykibocsátó diódák alapanyaga vegyület típusú félvezető. A 10.2. táblázat szabványos fénykibocsátó diódák fontosabb adatait és a maximális fényerősséghez tartozó hullámhosszt tartalmazza.

Szín	Hullámhossz [nm]	Alapanyag	ΔW [eV]	Nyitófeszültség 10 mA áramnál	Fényteljesítmény 10 mA áramnál
Infravörös	950	GaAs: Si	1,35	1,3 + 1,5 V	100 + 500 μW
Infravörös	800 + 900	GaAlAs	1,4	1,3 + 1,5 V	1 + 2 μW
Vörös	655	GaAsP	1,9	1,6 + 1,8 V	100 + 500 μW
Világos vörös	635	GaAsP	2,0	2,0 + 2,2 V	5 + 10 μW
Sárga	583	GaAsP	2,1	2,0 + 2,2 V	3 + 8 μW
Zöld	565	GaP	2,3	2,2 + 2,4 V	1,5 + 8 μW
Kék	480	GaN vagy SiC	2,8	3 + 5 V	1,5 + 6 μW

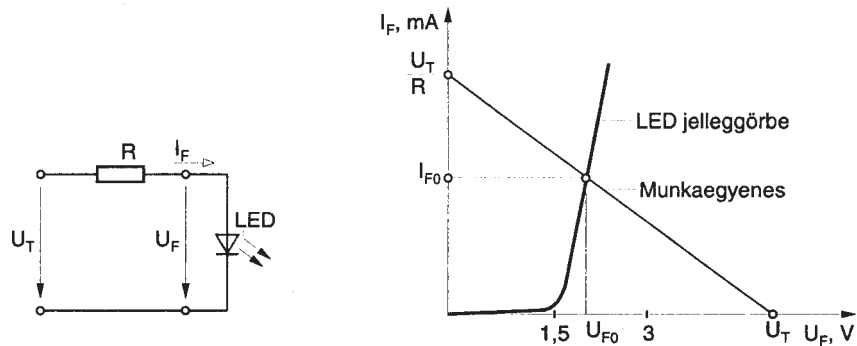
10.2. táblázat.

Megfigyelhető, hogy a legnagyobb hatásfokkal (1 + 5 %) az infravörös fénydióda rendelkezik, a többi típusnál a hatásfok 0,05 % alatt van. Emiatt a fénydióda fénye erősebb megvilágítás mellett már nem látható. További előnytelen tulajdonsága a kis sugárzási szög, amely csak 30° és 60° közötti érték.

A világítódiodák a kicsi hatásfok ellenére számos előnyös tulajdonsággal rendelkeznek:

- a hasznos kimeneti fényelőállításához alacsony áramot és feszültséget igényelnek;
- majdnem késedelem nélkül reagálnak a vezérlő jelre (nagy kapcsolási sebesség);
- nagyon kicsi helyen elférnek, ütésállóak és élettartamuk nagyon nagy (kb. 10^6 óra!).

A fotodióda fényerőssége egy bizonyos nyitóirányú áramértéken felül már nem változik számottevően. Mivel a fénydióda nagyon kis értékű dinamikus ellenállással rendelkezik nyitófeszültsége fölött, ezért általában áramgenerátoros táplálást alkalmaznak. A 10.22. ábra egy fénydióda munkapont-beállítását szemlélteti az $I_F - U_F$ jelleggörbéjét felhasználva. Ismerve a munkaponti I_{F0} áramot, U_{F0} feszültséget és az U_T tápfeszültség értékét, szükséges R ellenállásérték, az $R = \frac{U_T - U_{F0}}{I_{F0}}$ összefüggés felhasználásával kiszámítható.



10.22. ábra. A fénykibocsátó dióda munkapont-beállítása

10.8.2. Jellemző adatok és határértékek

A világítódiodákat jellemző legfontosabb adatok a következők:

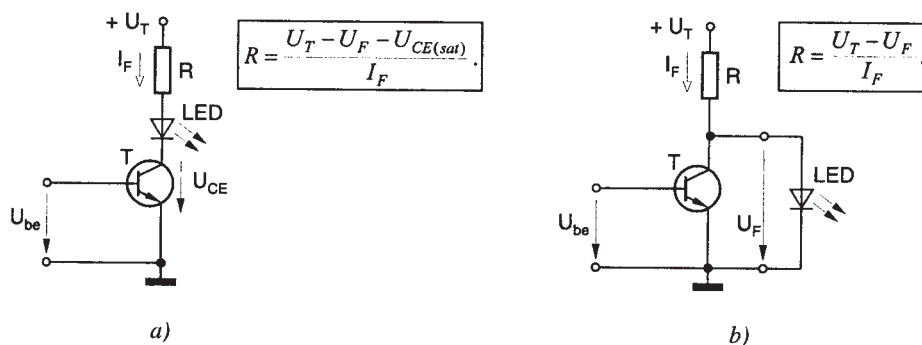
- | | |
|--|---|
| • a világítófelület nagysága | A , jellemző érték $A \approx 0,5 + 30 \text{ mm}^2$; |
| • a fényerősség | I_V , jellemző érték $I_V \approx 1 + 5 \text{ mcd}$ ($I_F = 20 \text{ mA}$ esetén); |
| • a fényáram | Φ , jellemző érték $\Phi \approx 2 \text{ mlm}$ ($I_F = 20 \text{ mA}$ esetén); |
| • maximális fényerősséghez tartozó hullámhossz | λ_p , vörös fénydióda esetén $\lambda_p \approx 655 \text{ nm}$; |
| • kisugárzási szög | α , jellemző érték $\alpha \approx 30 + 60^\circ$. |

Fontos határértékek a következők:

- | | |
|--|---|
| • maximális nyitóirányú áram | I_{Fmax} , szokásos értéke $I_{Fmax} \approx 50 \text{ mA}$; |
| • maximális zárófeszültség | U_{Rmax} , szokásos értéke $U_{Rmax} \approx 3 \text{ V}$; |
| • legnagyobb megengedett veszteségi teljesítmény | P_{tot} , jellemző értéke $P_{tot} \approx 120 \text{ mW}$. |

10.8.3. Alkalmazások

A fénykibocsátó diódák elsődlegesen jelző és kijelző-elemként kerülnek felhasználásra különböző műszer-előlapokon, hétszempenses és alfanumerikus kijelzőkben. Ugyanakkor megtaláljuk őket infravörös fényforrások fényforrásaként. Mivel működésük alacsony feszültséget és áramot igényel ezért közvetlenül illeszthetők a legtöbb digitális áramkörrel.



10.23. ábra. Kétállapotú, tranzisztoros meghajtású kijelzők
a) bekapcsolást jelző b) kikapcsolást jelző

A 10.23. ábra kétállapotú kijelzőként használható tranzisztoros meghajtású áramköröket mutat. Az R ellenállás méretezése különböző feszültségek alkalmazását teszi lehetővé.

10.9. Lézer diódák

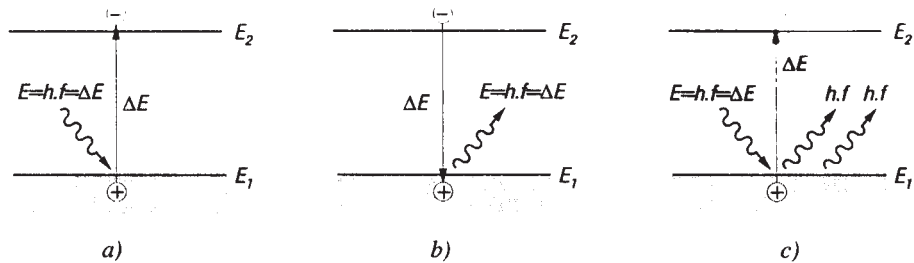
10.9.1. A félvezető lézerek fizikai működése

A lézer (*laser*) fény kibocsátására és erősítésére alkalmas eszköz, amelynek működése a kényszerített (*indukált*) fénykibocsátás (*fényemisszió*) jelenségén alapszik. A *laser* szó az angol elnevezés „light amplification by stimulated emission of radiation” rövidítése, amelynek jelentése „fény erősítés a sugárzás kényszerített emissziója révén”.

Eddig egy atom E_1 és E_2 két energiaszintje közötti átmeneti lehetőségként vizsgáltuk az atomok gerjesztését fotonoknak egy elektromágneses sugárzási térből történő elnyelésével (belső fotoelektromos hatás) és a gerjesztett állapotból alsóbb energiaállapotokba való átmenetet fotonok *spontán* kibocsátásával (10.24.a.b. ábra).

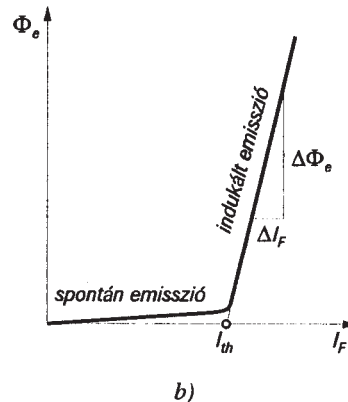
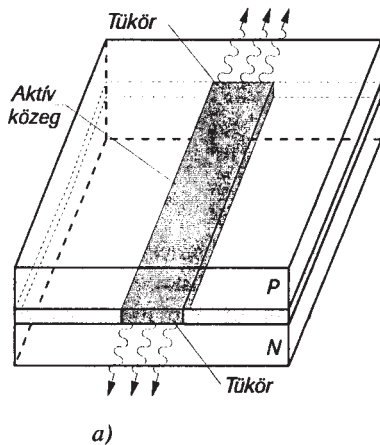
Egy további lehetséges átmeneti folyamat az úgynevezett *kényszerített* vagy *indukált emisszió* (kibocsátás). Ennek lényege: – egy gerjesztett, azaz E_2 állapotban lévő atom egy $E = hf = \Delta E$ energiájú fotonokból álló sugárzás révén rábírható arra, hogy a kölcsönhatás időpontjában indukáltan kibocsásson $hf = \Delta E$ energiájú fotonokat.

Ha egy $E = hf = \Delta E = E_2 - E_1$ energiájú foton egymás után több olyan gerjesztett atommal ütközik, amely a felső E_2 energiaállapotban van, akkor az egymást követő *indukált emissziók erősíthetik egymást*. Az erősítés fokozására a felerősített fényt párhuzamos tükrökkel, újból és újból visszairányítjuk az aktív közegbe. Ha a veszteségek kisebbek, mint az *együttes erősítés*, akkor ennek a visszacsatolásnak *öngerjedés* a következménye: az ilyen rendszer *koherens fényt* bocsát ki.



10.24. ábra. Energiaszintek közötti átmenetek atomokban
 a) fotonok elnyelése b) fotonok spontán kibocsátása c) fotonok indukált kibocsátása

A 10.25. ábra egy félvezető lézerciódára vázlatos elvi felépítést és tipikus karakterisztikáját szemlélteti. A nyitóirányban előfeszített PN-átmenetet két elválasztó felületének szomszédságában létrejön egy tartomány (aktív közeg), amelyben a sugárzás rekombinációk túlsúlyban vannak. A tartomány vastagsága a töltéshordozók diffúzióhosszával azonos nagyságrendű (100 + 200 nm), és tükörszerűen kialakított oldalai révén úgy viselkedik mint egy hullámvezető. A nyitóirányú áram egy bizonyos I_{th} küszöbértékénél a fényerősség hirtelen megnő, a kibocsátott fény spektruma elkeskenyedik, és lézersugár jön létre.



10.25. ábra. Félvezető lézer
 a) felépítése b) fénytéljesítmény-áram karakterisztikája

A félvezető lézerciódák alapanyaga vegyület típusú félvezető (pl. GaPAs, GaAlAs) és a hagyományos fénydiódákhoz viszonyítva komoly előnyökkel rendelkeznek:

- nagy, 20 % feletti átalakítási határfok;
- viszonylag nagy sugárzási teljesítmény ≈ 200 mW;
- a kibocsátott fény rendkívül kicsi divergenciája (széttartása);
- az aktív közeg anyagának megválasztásával a kibocsátott fény hullámhossza igen széles tartományban változtatható.

10.9.2. Jellemző adatok és határértékek

A 10.3. táblázat az SFH 4801 típusú, GaAlAs alapú, Siemens gyártmányú lézertióda fontosabb adatait tartalmazza. Határértékadatok: – a maximális fénytelsítmény folyamatos (Φ_e) és impulzus üzemmódban (Φ_{epuls}), a maximális záróirányú feszültség (U_R) és a maximális záróréteg-hőmérséklet (T_j).

Határértékek				Jellemző adatok ($T_j = 25\text{ °C}$)					
Φ_e [mW]	Φ_{epuls} [mW]	U_R [V]	T_j [°C]	λ [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]	η [W/A]	I_{th} [mA]	Φ_e [mW]	$\Phi_{epuls}, t_p \leq 10\ \mu s$ [mW]
200	300	3	10+65	805	2	0,35	400	150	250

10.3. táblázat.

Jellemző adatok:

- a kibocsátott sugárzás hullámhossza (λ),
- a hullámhossz változása ($\Delta\lambda$),
- a teljesítmény-áram átalakítás hatásfoka ($\eta = \frac{\Delta\Phi_e}{\Delta I_F}$),
- nyitóirányú áram küszöbértéke (I_{th}),
- fénytelsítmény folyamatos üzemmódban (Φ_e),
- fénytelsítmény impulzus üzemmódban (Φ_{epuls}).

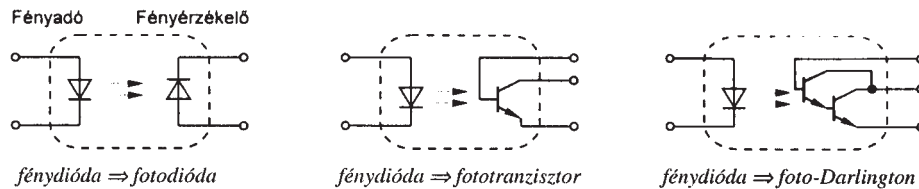
10.9.3. Alkalmazások

A lézertióda alkalmazásai során a nagy teljesítménysűrűséget, a kibocsátott fény koherenciáját és kicsi divergenciáját használják ki. Nem elhanyagolható szempont a dióda kicsi mérete sem. Alkalmazzák információk digitális rögzítésére és olvasására alkalmas berendezésekben (pl. CD lemezjátszó, CD ROM olvasó stb.) és az üvegszálas digitális információ-átvitelben.

10.10. Fénycsatolók

10.10.1. Felépítés és működés

A fénycsatolók, vagy más néven *optikai csatolók* egy fénykibocsátó és egy fényérzékelő elemből állnak (10.26. ábra). Kivitelezés szempontjából a fénycsatolókat diszkrét- és integrált áramkörös formában is gyártják. Fénykibocsátó elemként a jó hatásfok miatt általában infravörös tartományban sugárzó fénydiódákat alkalmaznak. A fényérzékelő elem lehet fotodióda, fototranzisztor vagy Darlington-fototranzisztor (nagy érzékenységet biztosít). A fénycsatolók elektronikus elemek között visszahatásmentes, galvanikusan leválasztott kapcsolatot tesznek lehetővé. A fénycsatolók lehetővé teszik mind digitális, mind analóg jelek átvitelét.



10.26. ábra. Fénycsatolók felépítése

10.10.2. Jellemző adatok és határértékek

A fénycsatolók egyik fontos jellemzője az $\alpha = \frac{I_{ki}}{I_{be}}$, *csatolási viszony*, amelyet általában a fényérzékelő elem határoz meg. A fényérzékelő elem szerint:

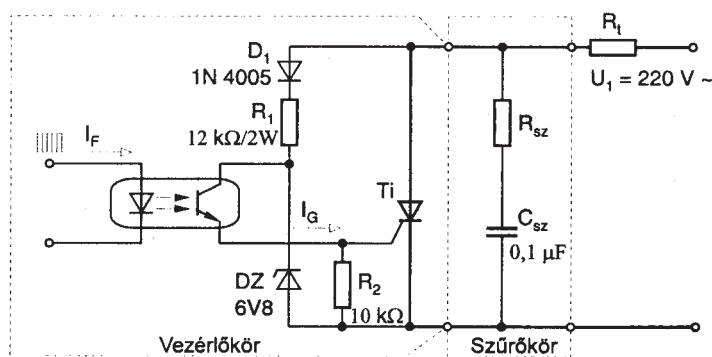
- $\alpha \approx 0,1$ *fotodióda esetén;*
- $\alpha \approx 10 + 300$ *fototranzisztor esetén;*
- $\alpha \approx 100 + 1000$ *Darlington-fototranzisztor esetén.*

Fontos adata a fénycsatolóknak az U_{is} *átütési szilárdság* (jellemző értékei $U_{is} \approx 500 + 10\,000$ V között vannak) és az f_g *határfrekvencia* (tipikus értéke $f_g \approx 10$ MHz). A többi adat és határérték azonos a fénydiódára és a fényérzékelőre érvényes adattal.

10.10.3. Alkalmazások

A fénycsatolók minden olyan helyen alkalmazhatók, ahol elektronikai elemeket galvanikusan és visszahatásmentesen el kell választani. Használják vezérlés- és szabályozástechnikai áramkörökben, különböző műszerekben, analóg és digitális jelátvitelben és az orvosi elektronikában (ahol különleges érintésvédelmi szabályok érvényesek).

A 10.27. ábra fénycsatolós megoldású tirisztor vezérlő áramkört szemléltet. A tirisztor gyújtóáramát az R_1 előtét-ellenálláson át közvetlenül a hálózatról vezetik el. A D_1 dióda egyenirányítja a váltakozó feszültséget. A D_2 Zener-dióda a fototranzisztor kollektorára táplált zárófeszültség értékét korlátozza. A vezérléshez az R_1 terheléstől függően rövid, hosszú vagy folyamatos impulzussorozatok használhatók. A fénycsatoló biztosítja a galvanikus szétválasztást a vezérlő és a teljesítményáramkör között.



10.27. ábra. Tirisztor vezérlése fénycsatolós leválasztással

10.11. Optikai kijelzők

Az optikai kijelzők analóg vagy digitális információk vizuális megjelenítésére alkalmas eszközök. Az információk optikai megjelenítésére több módszer ismeretes, amelyek közül a legfontosabbak:

- az izzólámpás kijelzők,
- a fénydiódás kijelzők,
- és a folyadékkristályos kijelzők.

Az izzólámpás kijelzők nagy fényerővel rendelkeznek, viszonylag nagy árammal működnek és fogyasztásuk jelentős. A fénydiódás és a folyadékkristályos kijelzők nagy előnye, hogy kis árammal és feszültséggel működnek.

Különleges kijelzőknek számítanak az *elektronsugárcsövek*, amelyek időfüggő elektromos jelek képi megjelenítését teszik lehetővé. Viszonylag nagy méretükkel és jelentős energia-felhasználásukkal tűnnek ki, de jelenleg a legjobb minőségű kétdimenziós megjelenítést biztosítják. A továbbiakban a fénydiódás, a folyadékkristályos és az elektronsugárcsöves kijelzőkkel fogunk részletesebben foglalkozni.

10.11.1. Folyadékkristályos kijelzők

A *folyadékkristályos kijelzők (LCD - Liquid Cristal Display)* eltérően a fénydiódáktól nem bocsátanak ki fényt, hanem csak külső megvilágítás esetén láthatók (passzív kijelzők). Működésük a folyadékkristályok azon tulajdonságán alapszik, hogy külső elektromos feszültség hatására változtatják fénytani tulajdonságaikat. A folyadékkristály külső feszültség nélkül átlátszó (*világos*), külső feszültség esetén pedig átlátszatlan (*sötét*).

A folyadékok általában *izotrop*, a kristályok pedig *anizotrop* testek. Egy testet, amelynek tulajdonságai terhelésekkel szemben minden irányban azonosak, *izotropnak* nevezünk. *Anizotropnak* nevezünk egy olyan testet, amelynek bizonyos tulajdonságai a terhelés irányától függenek. Léteznek olyan szerves vegyületek, amelyek szilárd- és folyékony halmazállapotban is úgy viselkednek, mint a kristályok. Ezeket az anyagokat folyadékkristályoknak nevezzük. Ezek a folyadékok anizotrop tulajdonságaikat, csak bizonyos hőmérséklettartományban (kb. $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ + $65\text{ }^{\circ}\text{C}$) képesek megőrizni. A hőmérséklet további emelkedése esetén, az anizotrop folyadék izotrop állapotba megy át.

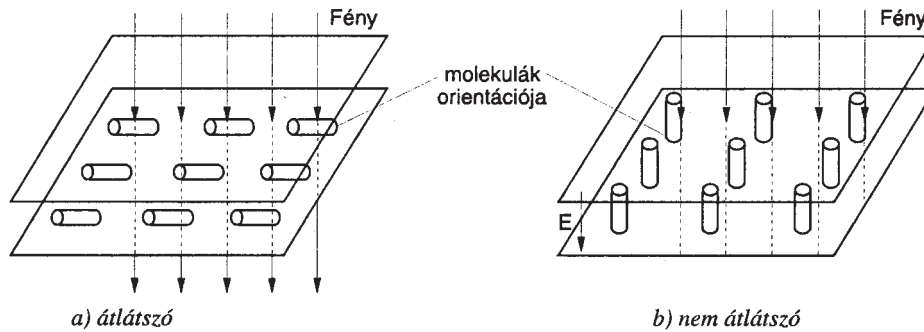
A folyadékkristály elektromos tulajdonságai szerint két típusú kijelzőt különböztetünk meg:

- **Tervezélrsű folyadékkristályos kijelzőket:** a folyadékkristály elektromos szempontból nem vezető, és a folyadék optikai tulajdonságait az elektromos tér határozza meg.
- **Dinamikus szórás elvén működő kijelzőket:** a folyadékkristály elektromosan vezető, és a rákapcsolt váltakozó feszültség hatására változtatja fényáteresztő képességét.

Tervezélrsű folyadékkristályos kijelzők

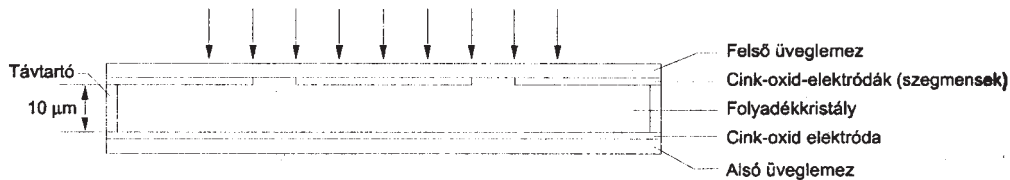
Alapállapotban a folyadékkristályok átengedik a fénysugarakat. Ha a folyadék-kristályokat megfelelően nagy erősségű elektromos térbe helyezzük, a folyadékot alkotó molekulák térbeli elhelyezkedése megváltozik, és az anyag zavaros lesz (10.28. ábra). **Megvilágítás hatására a zavaros folyadék tejfehérnek látszik.**

Ez a jelenség a villamos tér megfelelő térbeli alkalmazásával (az elektródák alakjának megfelelő kialakításával), tetszőleges karakterek megjelenítését teszi lehetővé. A kijelzőket kondenzátorszerűen alakítják ki; a két fegyverzetre feszültséget kapcsolva állítják elő a szükséges elektromos teret.



10.28. ábra. Folyadékkristály molekuláinak elrendezése
a) külső elektromos tér nélkül b) külső elektromos tér esetén (E)

A 10.29. ábra egy folyadékkristályos kijelző elvi felépítését szemlélteti. A folyadék kristály két üveglap között helyezkedik el, amelynek a belső felületére viszik fel az optikailag átlátszó, fémes elektródarészteget. A felületi elektróda geometriai kialakítása határozza meg a megjeleníthető karaktereket.



10.29. ábra. Folyadékkristályos kijelző elvi felépítése

A vezérléshez váltakozó feszültséget használnak, mivel az egyenfeszültség elektrolízist indít el, ami a folyadékkristály élettartamát jelentősen csökkenti. A váltakozó feszültség frekvenciája legalább akkora kell legyen, hogy a szem számára ne legyen érzékelhető a villódzó hatás. A zavaros állapot eléréséhez szükséges elektromos tér $0,1 \text{ +}3 \text{ V}/\mu\text{m}$ között van. A térvezérlésű LCD-nek nagyon nagy előnye a kicsi vezérlőtelsítmény (egy cm^2 felület vezérlési teljesítményigénye kb. $0,1 \text{ mW}$) és a viszonylag kicsi tápfeszültség ($3 \text{ +} 8 \text{ V}$).

A folyadékkristályos kijelzők a megvilágítás függvényében három féle kijelzési módban működhetnek:

- Visszaverő (*reflective*) kijelzési mód: – a megvilágítást külső fényforrás (pl. napfény) biztosítja és az LCD mögött fényvisszaverő felület veri vissza a ráeső fényt. Ebben az esetben minimális az LCD teljesítmény igénye és a kijelzés kontrasztja nagyon jó.
- Közvetítő (*transmissive*) kijelzési mód: – a kijelző hátulról meg van világítva mesterséges belső fényforrással. A kijelző külső megvilágítás nélkül is látható, de a teljesítmény igény nagyobb mint visszaverő módban.

- Vegyes (*transflective*) kijelzési mód: – a visszaverő és a közvetítő kijelzési eljárások keveréke. Használható külső megvilágítás mellett és külső megvilágítás nélkül is.

A dinamikus szórás elvén működő folyadékkristályos kijelzők

Felépítésük hasonló a térvezérlésű LCD-k felépítéséhez, viszont működésükhöz lényegesen nagyobb vezérlő-teljesítményt igényelnek. Az elektromosan vezető folyadékkristályban a rákapcsolt váltakozó feszültség hatására részecskemozgás indul meg, aminek következtében a folyadék zavaros lesz. Megvilágítás hatására a zavaros részek kifehérednek.

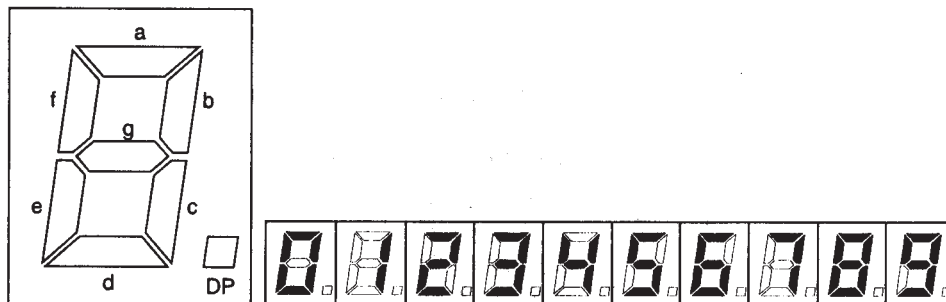
Vezérlési szempontból nagyobb tehetetlenséggel rendelkeznek, mint a térvezérlésű változat. A dinamikus szórás elvén működő kijelzőelemek főleg nagyméretű kijelzők esetén kerülnek felhasználásra.

Alkalmazások

A folyadékkristályos kijelzőknek a legnagyobb előnye a többi kijelzőtípushoz viszonyítva a nagyon kicsi teljesítmény-felhasználás (ez főleg a térvezérlésű LCD-esetében van így). A térvezérlésű folyadékkristályos kijelzők különösen alkalmasak emiatt telepes készülékekhez, amelyekben nagyon kritikus a kijelzőegység energia-felhasználása. Egyre nagyobb teret hódítanak a számítástechnikában a folyadékkristályos kijelzővel rendelkező monitorok, amelyek monokróm és színes változatban is készülnek.

10.11.2. Numerikus kijelzők

A **numerikus kijelzők** decimális számok (0 + 9) kijelzését teszik lehetővé. A legegyszerűbb megoldás az úgynevezett **hétszegmenses kijelző**, amely több egyedi elem felhasználásával több számjegy egyidejű megjelenítésére alkalmas (10.30. ábra.). A kijelző szegmenseinek megfelelő vezérlésével valamennyi számjegyet kijelezhetjük.



10.30. ábra. Hétszegmenses kijelző

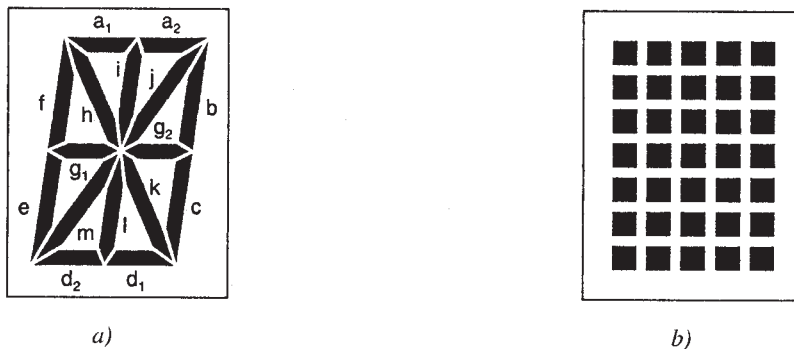
A nagyszámú csatlakoztatás csökkentése miatt a hétszegmenses kijelzők egyik kivezetése közös mindegyik szegmens-elem esetén. A szegmensek vezérlését integrált áramkörös dekódolókkal (**hétszegmenses dekódolókkal**) oldják meg. A folyadékkristályos kijelzők meghajtó **feszültségnek** váltakozó feszültségnek kell lennie.

10.11.3. Alfánumerikus kijelzők

Az alfánumerikus kijelzőket számjegyek és betűk megjelenítésére használják. A hétszegmenses kijelzők is alkalmasak néhány betű kijelzésére, azonban felbontásuk nem elégséges az egész betűkészlet (jelkészlet) megjelenítésére. Az alfánumerikus kijelzők csoportjában két típusú kijelzőt különböztetünk meg:

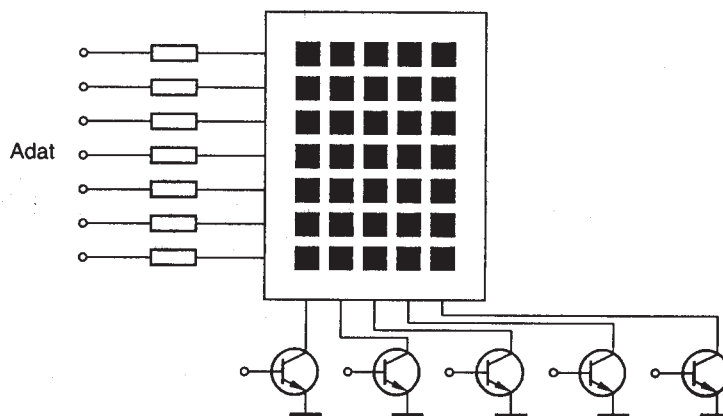
- 16 szegmenses kijelzőket,
- pont-mátrix kijelzőket.

A 16 szegmenses kijelző elrendezését a 10.31.a. ábra mutatja. A megjeleníthető jelkészlet 64 jelből áll (nagybetűk, számok és különleges jelek). Vezérlése speciális, digitális integrált áramkörökkel történik. A 16 szegmenses kijelzők fénydiódás és folyadékkristályos változatban is beszerezhetőek.



10.31. ábra. Alfánumerikus kijelzők
a) 16 szegmenses kijelző b) 35-ös pont-mátrix kijelző

A pont-mátrix kijelzők jobb felbontással rendelkeznek, mint a 16 szegmenses kijelzők. A 10.31.b. ábra egy 35-ös (5×7) pontmátrix kijelző felépítését mutatja. A nagyszámú kijelzőelem gazdaságos vezérlése az oszlopok multiplexelésével oldható meg.



10.32. ábra. 35-ös pont-mátrix kijelző multiplex vezérlése

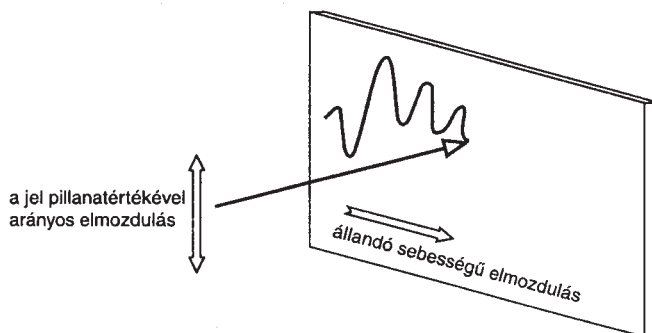
A multiplex vezérlés lényege ebben az esetben az, hogy a kijelző-oszlopok közül mindig csak egy kap vezérlést úgy, hogy az oszlop kijelzőelemei számára érvényes adat kerüljön kijelzésre (10.32. ábra). Az oszlopokat kb. 20-szor kell bekapcsolni másodpercenként, hogy az emberi szem számára folyamatosnak tűnjön a kijelzés. A megfelelő fényerősség elérése multiplex üzemmódban csak nagyobb impulzusárammal valósítható meg.

10.11.4. Elektronsugárcsővek

Felépítése, elvi működése

Az *elektronsugárcsővek* lehetővé teszik képinformációk elektromos feldolgozását vagy elektromos jelek képszerű megjelenítését. A jelenleg használatos eszközökben az elektromos jelek felrajzolását vákuumban haladó elektronsugár végzi, ami *elektromos* vagy *mágneses* erőtér segítségével szinte tehetetlenségmentesen téríthető el.

Gyakran szükség van pl. egy elektromos jellemző (feszültség, áram) időfüggését térbeli, kétdimenziós koordináta-rendszerben ábrázolnunk. Ekkor a felrajzó-elem egyenletes sebességgel mozog a képfelület mentén az időtengelynek megfelelő helykoordináta irányában, s eközben a másik helykoordináta-irányú elmozdulása az ábrázolandó jel pillanatértékével arányos (10.33. ábra).



10.33. ábra. Időfüggő jelek kétdimenziós ábrává alakításának elvi vázlata

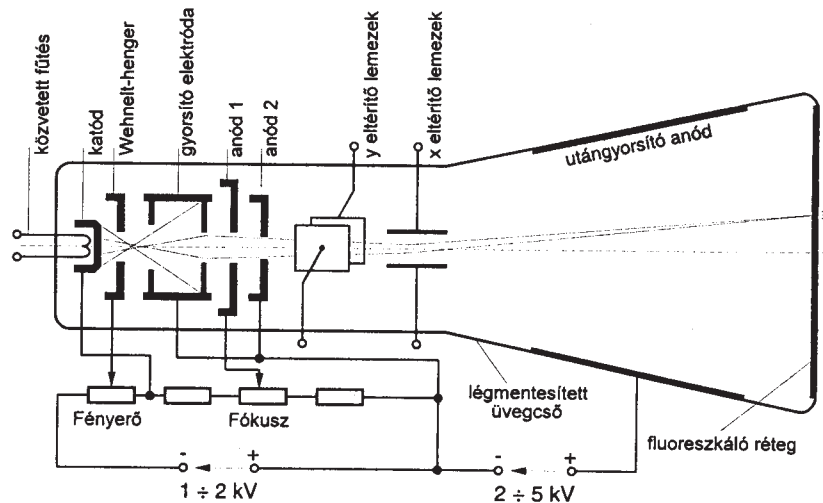
A képkötés szempontjából lényeges szerep jut egy jól fókuszált, kis keresztmetszetű, irányítható elektronnalábnak. A nagy sebességű fókuszált elektronnalábot előállító elektróda rendszert *elektronágyúnak* nevezzük. Az elektronsugárcsővek működéséhez szükség van az elektronágyúval előállított elektronsugár mozgatására, amelyet az *eltérítő rendszer* végez. Az eltérítő rendszer *elektromos* vagy *mágneses* lehet, aszerint, hogy a sugár eltérítését elektromos vagy mágneses erőtér végzi. A megfelelően eltérített és felgyorsított elektronsugár egy *világító ernyőbe* csapódik, amelynek belső felülete elektron-beecsapódásra világító réteggel (*luminoforral*) van bevonva.

Oszcilloszkópokban alkalmazott jelalakvizsgáló elektronsugárcső (*katódsugárcső*) felépítését a 10.34. ábra szemlélteti. A jelalakvizsgálat céljára kifejlesztett katódsugárcsővel szemben a következő lényeges követelményeket támasztjuk:

- Legyen az elektronsugár eltérítése szigorúan arányos az eltérítőfeszültséggel (*linearitás*), ugyanis csak így számíthatunk a vizsgált jelforma torzítatlan képére.

- A gyors elektromos változásokat is jól kövesse az elektronsugár; az eltérítés tehetetlenségi jelenségei csak igen nagy frekvencián okoznak zavarokat.
- A képernyőn élesen kirajzolt, jól kiértékelhető görbét várunk, ennek feltétele a jól fókuszált, kis átmérőjű elektronsugár.

Az eltérítőrendszer megfelelő nagyfrekvenciás viselkedését csak elektrosztatikus eltérítéssel lehet biztosítani. A mágneses eltérítésnél alkalmazott eltérítőtekercecsek induktivitásai már a kHz-es frekvenciatartományban meghúsják a frekvenciafüggetlen eltérítést.



10.34. ábra. Jelalakvizsgáló elektronsugárcső (katódsugárcső) elvi felépítése

Az elektronágyú

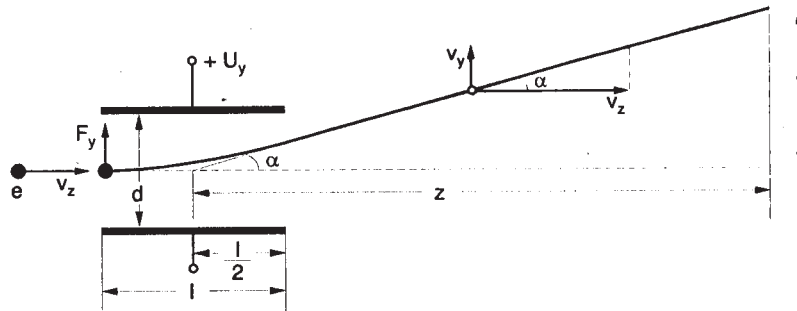
Az *elektronágyú* nagy sebességű, élesen fókuszált, igen vékony elektronsugarat szolgáltat, hogy az ernyőn az elektronbombázás hatására létrejövő fénypont átmérője igen kicsi legyen. Szerkezetiileg több elem együtteséből áll:

- a fűtőszáלבól, a katódból, a Wehnelt-hengerből, a gyorsító elektródából és két anódból.

A közvetett fűtéssel izzított katód elektronokat bocsát ki, amelyek mennyiségét a *Wehnelt-henger* potenciáljával szabályozhatjuk. A gyorsító elektróda és az utána következő két anód egy *elektrooptikai lencsét* alkot, amelynek feladata a széttartó elektronnaláb *fókuszolása* (összetartóvá tétele).

Az elektromos eltérítés

A legegyszerűbb és jelalak-vizsgáló elektronsugárcsőekben gyakran alkalmazott elektromos eltérítőrendszer egy párhuzamos síklemezpár, amelynek homogén elektromos tere az elektronsugár elektrosztatikus eltérítésére képes (10.35. ábra). Az elektronágyúval előállított elektronsugarat alkotó e elemi töltésű és m_e nyugalmi tömegű elektronok v_e sebességgel érkeznek az eltérítőlemezek elé.



10.35. ábra: Elektronsugár elektrosztatikus eltérítése

Az eltérítőlemezek között az $E_y = \frac{U_y}{d}$ térerősségű elektromos tér $F = e \cdot E_y$ erővel hat az elektronokra, ami egyenlő az m_e tömeg és az a_y gyorsulás szorzatával:

$$F_y = e \cdot E_y = m_e \cdot a_y.$$

Mivel a lemezek közötti tartózkodási idő $t = \frac{l}{v_z}$, a lemezek elhagyása után az y irányban a sebesség:

$$v_y = a_y \cdot t = \frac{e}{m_e} \cdot \frac{U_y}{d} \cdot \frac{l}{v_z}.$$

Az eltérítés α szögének tangense:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v_y}{v_z} = \frac{e}{m_e} \cdot \frac{U_y}{d} \cdot \frac{l}{v_z^2}.$$

Az y eltérítés nagyságát a következő összefüggés adja:

$$y = z \cdot \operatorname{tg} \alpha = \frac{e \cdot z \cdot l}{d \cdot m_e} \cdot \frac{U_y}{v_z^2}.$$

Megállapítható, hogy az eltérítés nagysága egyenesen arányos a lemezekre kapcsolt feszültséggel és fordítottan arányos az elektronok lemezek előtti sebességének négyzetével (amelyet az elektronágyú gyorsítópotenciálja határoz meg). A linearitás csak kis eltérítési szögek (kb. 15°) esetén marad érvényben. Ennek következtében a katódsugárcsővek hossza az ernyőátmérő három-négyszerese.

Az eltérítésre jellemző mennyiség az *eltérítés érzékenysége* (ϵ_y), amely ebben az esetben:

$$\epsilon_y = \frac{y}{U_y}.$$

Az x irányra az eltérítés érzékenységét hasonló módon lehet meghatározni.

A világitóernyő

A csőballon homloklapját régebben kissé domborúra képezték ki mechanikai szilárdsági szempontok miatt. Az újabb csövek *síkernyős* kivitelűek, ami nagyban javítja a jelalak-ábra kiértékelhetőségét. Az eltérítési érzékenység kis gyorsító feszültségek esetén nagyobb (kisebb az elektronok v_z sebessége); az ernyőn megkívánt nagy fényerő nagy feszültséget igényel. Az ellentmondást azzal oldják fel, hogy az elektronokat az *eltérítést követően* gyorsítják, a cső belső oldalára felvitt vezetőréteget használva *utángyorsító anódnak*. Ezt a módszert *utángyorsításnak* nevezzük.

Lumineszcenciának nevezünk minden olyan optikai sugárzás-kibocsátást, amelynek eredete nem a sugárzó test hőmérsékletén alapul. Többféle lumineszcenciát különböztetünk meg. Az elektronbombázás hatására létrejövő lumineszcenciát *katódlumineszcenciának* nevezzük. Attól függően, hogy a jelenség csak a gerjesztés közben és utána rövid ideig, vagy a gerjesztés után még hosszabb ideig észlelhető *fluoreszkálásról*, illetve *foszforeszkálásról* beszélünk. Azokat az anyagokat, amelyek a gerjesztő energiát nagy hatásfokkal tudják átalakítani látható fényé anélkül, hogy felmelegednének, *luminoforoknak* nevezzük.

Az elektronsugárcsővek ernyőbevonataként használatos néhány luminofor anyag tulajdonságait a 10.4. táblázat tartalmazza.

A luminofor neve és összetétele	A kibocsátott fény színe	Fényhatásfok [cd/mW]	Utánvilágítási idő [s]
Ezüsttel aktivált cink-szulfid, ZnS.Ag	Kék	0,5 ÷ 2	10 ⁻³
Ezüsttel aktivált cink-kadmium-szulfid, (Zn,Cd)S.Ag	Sárga	5,0 ÷ 8	10 ⁻³
ZnS.Ag + (Zn,Cd)S.Ag	Fehér	7,0 ÷ 8,0	10 ⁻³
Rézzelel aktivált cink-kadmium szulfid, (Zn,Cd)S.Cu	Sárga	1,5 ÷ 2,0	3 ÷ 8
Villemit, Zn ₂ SiO ₄ Mn	Zöld	2,0 ÷ 3,5	5 · 10 ⁻²
Kalcium-wolframát, CaWO ₄	Kék	0,18 ÷ 0,20	10 ⁻⁵

10.4. táblázat.

Összefoglaló kérdések:

1. Mit nevezünk belső fényelektromos hatásnak?
2. Milyen jellemzői vannak egy fotoellenállásnak?
3. Milyen folyamatok jönnek létre egy nyitóirányban- és egy záróirányban előfeszített PN-átmenetben?
4. Mitől függ egy fotoelem által leadott rövidzárási áram nagysága?
5. Miért érzékenyebb egy fototranzisztor mint egy fotodióda?
6. Tervezzen egy olyan áramkört fototranzisztor felhasználásával, amely a megvilágítás erősségének egy bizonyos szintre való csökkenése esetén bekapcsol egy elektromos fogyasztót (pl. egy izzólámpát)!
7. Milyen előnyökkel rendelkeznek a félvezető lézardiódák a hagyományos fénydiódákhoz viszonyítva?
8. Milyen feladatot lát el az elektronágyú, és szerkezetileg milyen *részegységek*ből áll?