

A fotovoltaikus PIN fotodiódák hibái

ETO 621.383.52.004.64

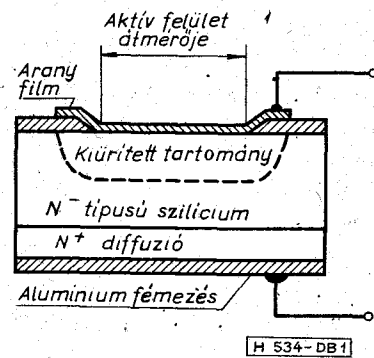
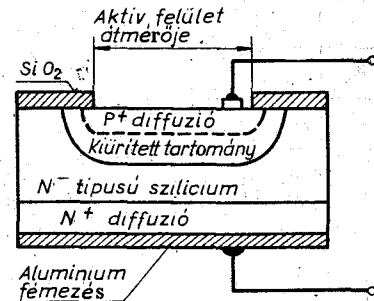
A PIN fotodiódák érzékenysége a fény hullámhosszától, a fotodióda előfeszültségétől és hőmérsékletétől függ. A fotovoltaikus PIN fotodiódák helyettesítő képe a söntellenállás, az átmeneti kapacitás és a soros ellenállás segítségével rajzolható fel. A söntellenállás hőmérsékletfüggő. Az átvitel linearitása a soros, a terhelő és a söntellenállástól, valamint a fotoáramtól függ. A soros, a terhelő és a söntellenállás olyan hőzajáramot hoz létre, amely a frekvencia függvényében egyenletes eloszlást mutat.

1. A PIN fotodióda

A PIN fotodióda egy p-i-n felépítésű fényérzékeny félvezető eszköz. A rövidítésben a p betű a p-típusú, az n az n-típusú adalékolt, az i pedig az adalékolatlan, intrinsic félvezető réteget jelenti. A középső i réteg szerepe miatt egyrészt a belső elektromos tér hatására a töltéshordozók sokkal gyorsabban eljutnak az egyik rétegből a másikba, másrészt a fotoáram—megvilágítás összefüggés is lineárisabb, mint a p-n fotodiódánál [1]. A belépő fotonok keresztüladnak a p rétegen és az i rétegben fotogerjesztéssel lyuk—elektron párokat hoznak létre, amelyeket a p és az n réteg begyűjt, miután azok az i rétegen keresztülvándoroltak [2]. A p és az n réteg erősen adalékolt (fajlagos ellenállása kisebb $0,1 \Omega\text{cm}$ -nél), az i réteg pedig gyengén (fajlagos ellenállása 10 és $10^5 \Omega\text{cm}$ közötti érték) [3]. A kivezetések a p és az n-típusú rétegen vannak. A p-típusú réteg olyan vékony, amennyire az technológiailag lehetséges [2]. Egy planárdiffúziós és egy Schottky-gátas PIN fotodióda struktúráját mutatja be az 1. ábra [4].

Típusai

Két típusa ismeretes. Az egyik a fotokonduktív, a másik a fotovoltaikus üzemmódra optimalizált típus [3]. Fotokonduktív üzemmódban a PIN fotodióda záróirányú előfeszítést kap, ezért érzékenysége a hosszabb hullámhosszak felé megnő (4. ábra), a lecsökkent átmeneti kapacitása miatt pedig a frekvenciaátvitele kiszélesedik [5]. Ezért nagy sebességű fényimpulzusok vagy nagyfrekvenciásan modulált állandó intenzitású fénysugár detektálására használják. A fotokonduktív üzemmód hátránya az, hogy sötétáram keletkezik, ami sörétzajt okoz [5]. Fotovoltaikus üzemmódban a PIN fotodióda előfeszítést, nem kap. A fotokonduktív üzemmóddal összehasonlítva az érzékenysége kisebb a nagyobb hullámhosszaknál, a nagyobb átmeneti kapacitása miatt pedig a frekvenciaátvitele keskenyebb [5]. Ezért alacsony frekvenciájú, kis zajú méréseket tudnak vele végezni [6], mivel kihasználják, hogy ebben az üzemmódban nem



1. ábra. A planárdiffúziós (felül) és a Schottky-gátas (alul) PIN fotodióda struktúrája

keletkezik sötétáram. Kis fényintenzitás méréséhez ez ideális üzemmód [4].

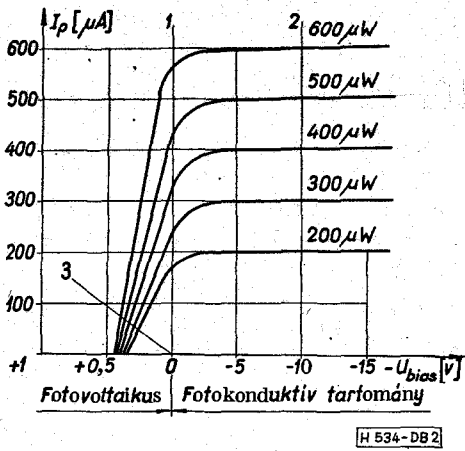
A két üzemmódot az 1. táblázat [4] hasonlítja össze. A 2. ábra egy tipikus szilícium PIN fotodióda fotoáram-előfeszültség karakterisztikáit mutatja a megvilágító fény teljesítményével paraméterezve. Az 1-es számmal jelölt terhelési görbe az előfeszítés nélküli (fotovoltaikus) üzemmódban azt az esetet mutatja, amikor a terhelő-ellenállás körülbelül zérus. Ekkor a fotodióda átvitele lineáris. A 2-es számmal jelölt egyenes (-10) V-os előfeszítéshez (fotokonduktív üzemmód) és körülbelül zérus terhelő-ellenálláshoz (rövidzár) tartozik. A fotodióda fotoáram—fényteltjesítmény összefüggése lineáris. A 3-as számú görbe zérus előfeszítéshez és nagy terhelő-ellenálláshoz tartozik. Az ábrán jól látható, hogy a fotodióda átviteli függvénye nem lineáris: a terhelési görbe a karakterisztikákat nem azonos távolságokban metszi [7].

1. táblázat

A PIN fotodiódák üzemmódjainak összehasonlítása

Fotovoltaikus
Előfeszültség zérus
Nincs sötétáram
Érzékenység 100%
Érzékelési idő 10^{-6} sec

Fotokonduktív
Előfeszültség negatív
Van sötétáram ($\approx 10^{-7}$ A)
Nagyobb érzékenység (110%)
Gyorsabb érzékelési idő:
 10^{-8} sec



2. ábra. A szilícium PIN fotodióda fotoáram-előfeszültség karakterisztikája

Érzékenysége

A PIN fotodióda érzékenysége a fényteljesítményből elektromos áramba való átalakítás hatásfokát jelenti. Általában egy foton egy elektron-lyuk párt hoz létre [4]. A PIN fotodióda érzékenysége függ:

- a beeső fény hullámhosszától, mivel a szilícium abszorpciós koefficiense és fényvisszaverése hullámhosszfüggő,
- az alkalmazott előfeszültségtől, mivel az a lyuk-elektron párok begyűjtését befolyásolja. (Az így előidézett érzékenységváltozás körülbelül 0,1%/V),
- a hőmérséklettől, mivel az egyrészt a szilícium optikai állapotát, másrészt a lyuk-elektron begyűjtési folyamatot befolyásolja [4]. Hatása körülbelül 0,2%/°C.

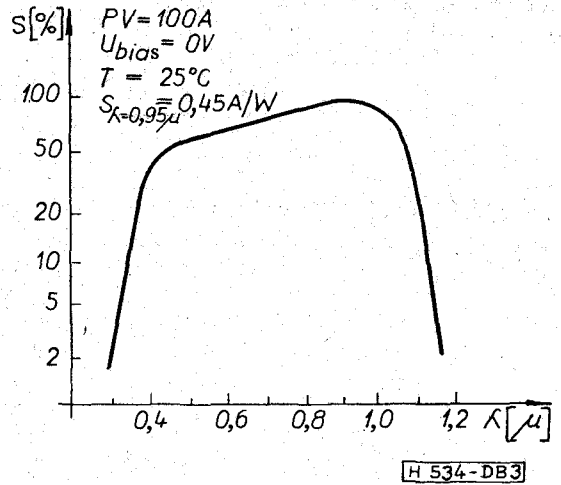
A kvantum hatások az elektron-lyuk párokat létrehozó és a szilíciumkristályba beérkező fotonok aránya. Az érzékenységgel való kapcsolatát a

$$QE = \frac{124\% S}{\lambda(\mu)}$$

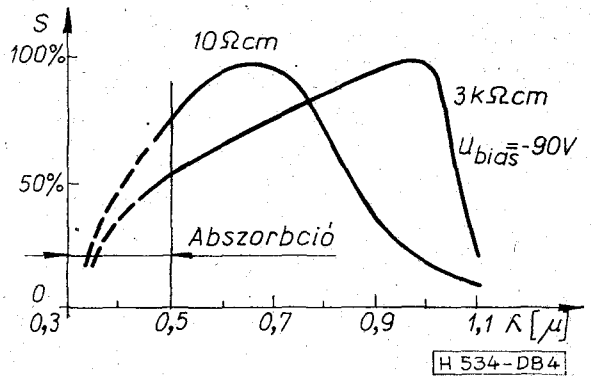
összefüggés [4] adja meg, ahol QE a kvantum hatásfok, S az érzékenység, $\lambda(\mu)$ a hullámhossz μ -ban.

A PIN diódák kvantumhatásfokával R. Fisher foglalkozik részletesebben [2].

Az elmondottak illusztrálására a 3. ábra egy PV 100A típusú fotodióda relatív spektrális érzékenységét mutatja 0V előfeszültségnél 25 °C-on. Érzékenysége 0,95 μ -nál 0,47 A/W [8]. A 4. ábra két különböző



3. ábra. A PV 100A típusú PIN fotodióda relatív spektrális érzékenysége 0V előfeszültségnél 25 °C-on



4. ábra. A PIN fotodióda relatív spektrális érzékenységi görbéi 0 és (-90) V előfeszültségnél (10, illetve 3000 Ωcm-nél)

szilícium ellenállásra mutatja be egy PIN fotodióda relatív spektrális érzékenységi görbéjét. A szilícium fajlagos ellenállása 0V előfeszültségnél itt 10 Ωcm, (-90 V)-nál 3 kΩcm [5].

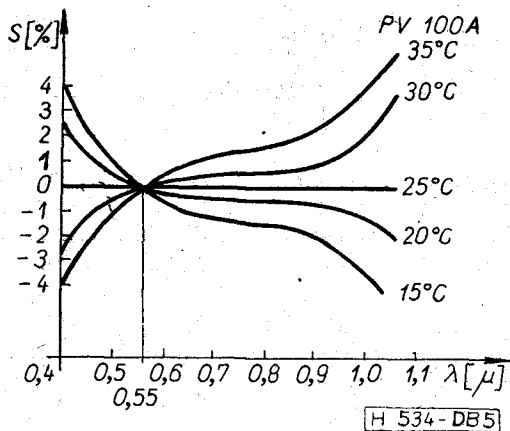
Hőmérsékletfüggése

Hőmérséklet hatására két paraméter változik jelentősen: az érzékenység és a sötétáram (az utóbbi csak fotokonduktív üzemben). A 2. táblázat ismerteti ezek nagyságát [4]. Az 5. ábra egy PV 100 A típusú PIN fotodióda érzékenységváltozását mutatja a hullámhossz függvényében, különböző hőmérsékleteknél [8].

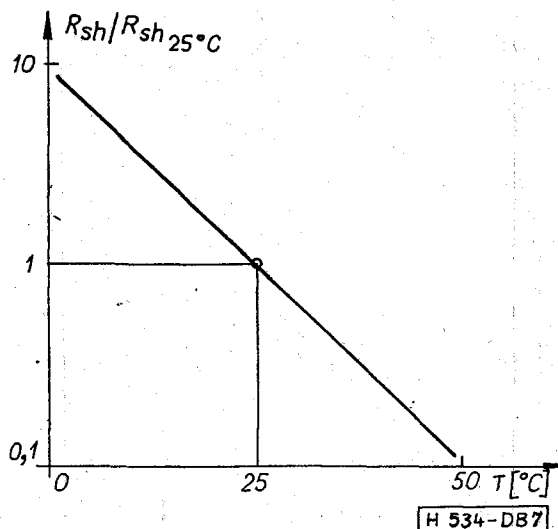
PIN fotodiódák hőmérsékleti jellemzői

2. táblázat

	FOTOVOLTAIKUS		FOTOKONDUKTÍV		
	Érzékenység változása	Érzékenységváltozás előjele	Érzékenység változása	Érzékenységváltozás előjele	Sötétáram változása
Schottky-gátas	0,6%/°C	csak negatív	0,2%/°C	pozitív vagy negatív; hőmérsékletfüggő	20 °C-onként kétszeresedik
Planárdiffúziós	0,2%/°C	pozitív vagy negatív; hőmérsékletfüggő	0,2%/°C	pozitív	20 °C-onként kétszeresedik
pozitív, negatív: meredekség előjelek		A sötétáram mindig nő a hőmérséklet növekedésével			



5. ábra. A PV 100A típusú PIN fotodióda érzékenységváltozása a hullámhossz függvényében, különböző hőmérsékleteknél

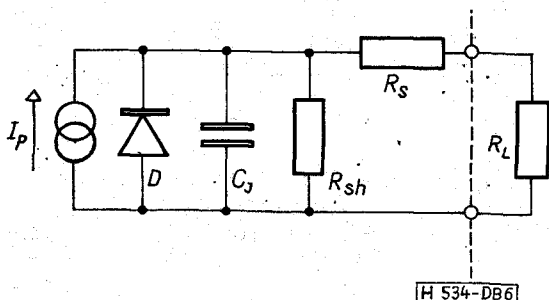


7. ábra. Tipikus sőtellenállás-változás a hőmérséklet függvényében

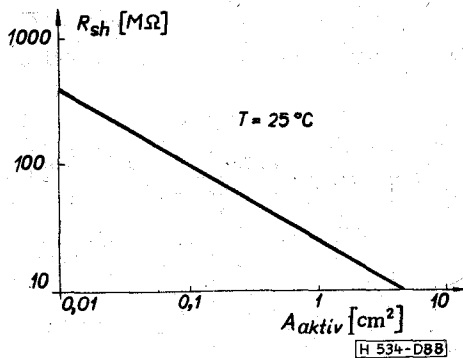
2. Fotovoltaiikus PIN fotodiódák

Helyettesítő kép

A fotovoltaiikus PIN fotodiódák helyettesítő képe a 6. ábrán látható, ahol D az ideális fotodióda, I_p a fotoáram, R_{sh} a sőtellenállás, C_j az átmeneti kapacitás, R_s a soros ellenállás, R_L a fotodióda terhelő-ellenállása [5].



6. ábra. A fotovoltaiikus PIN fotodiódák helyettesítő képe



8. ábra. Tipikus sőtellenállás az aktív felület függvényében

Paraméterek

A sőtellenállás függ a hőmérséklettől (7. ábra), a dióda $A_{aktív}$ aktív felületétől (8. ábra), a technológiától és az anyagválasztástól. A technológia és az anyagválasztás célja a maximális $R_{sh}/A_{aktív}$ elérése. Az átmeneti kapacitás az aktív felülettel egyenesen arányos. Nem függ a hőmérséklettől. Tipikus értéke 3000 pF/cm² OV előfeszültségnél.

A soros ellenállás értéke

$$R_s = \rho \frac{L}{A} + R_c,$$

ahol ρ a szilícium fajlagos ellenállása [Ωcm], L a fotodióda és a kiürített rész vastagságának különbsége [cm], A az aktív felület [cm²], R_c a kontaktus ellenállása [Ω].

A kontaktus ellenállása jó minőségű fotodiódánál körülbelül 10 Ω, a szilícium ellenállása pedig körülbelül 6 Ω felületegységenként [6].

Linearitás

A soros ellenállás jelentőségét az adja, hogy a terhelőáram átfolyik rajta, ezzel a diódát nyitóirányban előfeszíti, lerontva a linearitási tartomány felső végét. (Ez különösen kis aktív felületű fotodiódáknál nagy jelentőségű [6]).

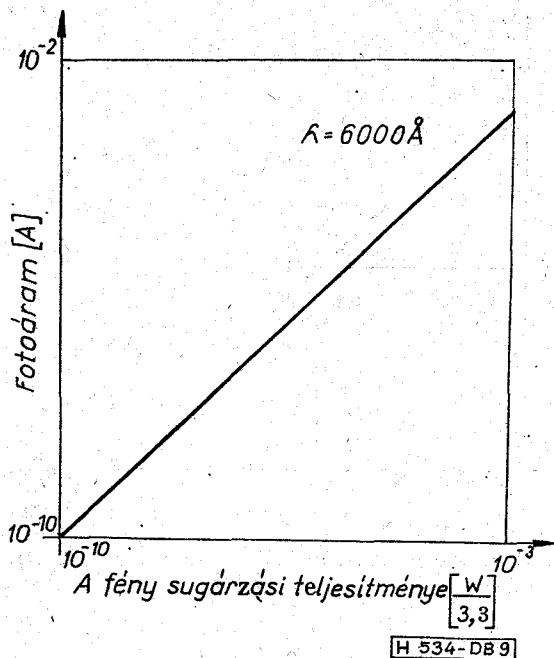
Az átvitel linearitása azonban függ még a terhelő-ellenállástól is, amelyen eső feszültség a soros ellenálláson eső feszültséggel megegyező polaritású. Witherell és Faulhaber szerint amikor a szilícium fotodióda terhelő-ellenállása kicsi (körülbelül 1 Ω), a fotoáram a megvilágítással lineárisan változik, de amikor a terhelő-ellenállás nagy (jóval nagyobb a sőtellenállásnál), és a megvilágítás erős, a terhelésen levő feszültség logaritmikusan függ a megvilágítástól [9].

Az átvitel linearitása (9. ábra) a soros és a terhelő-ellenálláson kívül függ még a fotoáramtól és a sőtellenállástól is az alábbi gyakorlati képlet szerint:

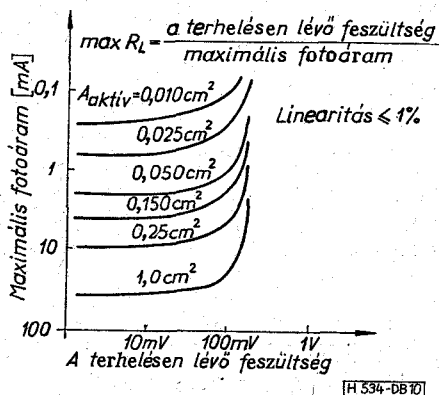
$$I_{pmax} = \frac{25 \cdot 10^{-3}}{R_s + R_L} \ln \frac{L \cdot R_{sh}}{R_s + R_L}, \quad (1)$$

ahol I_{pmax} az L linearitáshoz megengedhető maximális fotoáram, L a tervezett linearitás (1%-nál 0,01).

A 10. ábra az (1) összefüggés alapján készült: az 1% linearitáshoz megengedhető maximális fotoáram a terhelő-ellenálláson megjelenő feszültség függvényében van feltüntetve [6].



9. ábra. Az átvitel linearitása PIN fotodiódánál $\lambda = 6000 \text{ \AA}$ hullámhosszon



10. ábra. Az 1% linearitáshoz megengedhető maximális fotóáram a terhelő-ellenálláson megjelenő feszültség függvényében

Zaj

A fotovoltaiikus PIN fotodiódák sönt-, soros és terhelő-ellenállása hőzajáramot hoz létre a következő összefüggések szerint:

$$I_N = (I_{N_{sa}}^2 + I_{N_s}^2 + I_{N_L}^2)^{1/2}$$

$$I_{N_{sa}} = \left(\frac{4kTB}{R_{sh}} \right)^{1/2}$$

$$I_{N_s} = \left(\frac{4kTB}{R_s} \right)^{1/2}$$

$$I_{N_L} = \left(\frac{4kTB}{R_L} \right)^{1/2}$$

ahol I_N a teljes hőzajáram, $I_{N_{sa}}$ a söntellenállás hőzajáram, I_{N_s} a soros ellenállás hőzajáram, I_{N_L} a terhelő-ellenállás hőzajáram, k a Boltzmann-állandó, T az abszolút hőmérséklet, B a zaj sáv szélessége.

E hőzajáramok a frekvencia függvényében egyenletes eloszlást mutatnak [5], [6].

A PIN fotodiódák zaját Hamstra és Wendland mérte sötétben és megvilágítva. Az elmélettel kiválóan egyező eredményeket kaptak [10].

A fotodiódák fontos jellemzője a zajgyenérték-teljesítmény (NEP), az a fényteljesítmény, amely a fotodióda teljes zajáramával azonos fotoáramot hoz létre. Értéke az alábbi összefüggésből határozható meg:

$$NEP = \frac{I_N}{S}$$

ahol I_N a fotodióda teljes zajáram [A], S a fotodióda érzékenysége [A/W].

A zajgyenérték-teljesítmény függ a fényforrás hullámhosszától, a zaj sáv szélességétől, a hőmérséklettől és a fotodióda paramétereitől [6]. A zajgyenérték-teljesítmény nagysága például a PIN-020, vagy a PIN-040 típusú (UDT) kis zajú PIN fotodiódáknál tipikusan $5 \cdot 10^{-15} \text{ W}$ [4].

IRODALOM

- [1] Stefanik: Rádiótechnika Évkönyv, 1974, 192. o.
- [2] Fisher: Appl. Opt. 7, 1079 (1968).
- [3] Planar Diffused Silicon PIN Photodiodes, 3/72, United Detector Technology Inc.
- [4] Silicon Photodetector Design Manual, UDT, 7M/4-72.
- [5] Silicon Photodiode Application Notes D3000B-1, EG&G, Electro-Optics Division.
- [6] Silicon „Photovoltaic” Detectors and Detector/Amplifier Combinations; Data Sheet D3002A-1, EG&G, Electro-Optics Division.
- [7] Schottky Barrier Silicon PIN Photodiodes, UDT; Data Sheet: Schottky Barrier Photodiode Series.
- [8] PV-100A „Photovoltaic” Silicon Photodiode and HAV-1000 PV Photodiode/Operational Amplifier; Data Sheet, EG&G.
- [9] Witherell and Faulhaber, Appl. Opt. 9, 73 (1970).
- [10] Hamstra and Wendland, Appl. Opt. 11, 1539 (1972).
- [11] Dienes Barnabás: Lézersugar térbeli intenzitáseloszlásának meghatározására szolgáló mikrodenzitométer, Műszaki doktori értekezés, Budapest, 1977.