

Lavina fotodiódák multiplikációs tényezőjének mérése

ETO 621.383.52:621.317.7

A korszerű fénydetektorok között első helyen kell megemlítenünk a félvezető (germánium, szilícium) alapú foto és lavina fotodiódákat. Jelenleg intézetünkben is folynak kutatások lavinaüzemű fotodiódák előállítására vonatkozóan [1].

A fotodióda kis behatolási mélységű $p-n$ átmenetet tartalmaz, amely záróirányú feszültséget kap. A beeső fotonok elektron-lyukpárokat keltenek, amelyek áthaladva a kiürített rétegen fotoáramot eredményeznek. Az átmenethez kapcsolt külső ellenálláson a fotoáram által keltett feszültségesés a detektálandó fényjel elektromos válaszejele. Ha a $p-n$ átmenet struktúrája olyan, hogy a generált elektron-lyukpárok ütközési ionizáció révén újabb töltéshordozókat képesek létrehozni, akkor lavinaüzemű fotodiódáról beszélünk. A lavinamechanizmus erősen megnöveli az eszköz fényérzékenységét.

Fotodiódák működését jellemző paraméterek

A fotodiódák működését jellemezzük azok érzékenységével, érzékeny spektrumtartományával, működési sebességével, továbbá e paraméterek hőmérsékletfüggésével. A fotodióda érzékenységén értjük az adott beeső fényenergia hatására fellépő elektromos válaszjel nagyságát. Az eszköz küszöbérzékenységét annak zajszintje határozza meg. Lavina fotodiódák esetében az eszköz válaszjelét az M multiplikációs tényezővel jellemzik. A multiplikációs tényező definíciója:

$$M(U) = \frac{I(U)}{I_0}, \quad (1)$$

ahol $I(U)$ az adott U zárófeszültséghez tartozó fotoáram és I_0 a nulla zárófeszültséghez tartozó fotoáram.

Az U_B letörési feszültség közelébe eső U' zárófeszültségnél a multiplikációs tényező kifejezése Shockley szerint [2]

$$\frac{1}{M} = \left(\frac{U_B - U'}{U_B} \right)^n \quad (2)$$

ahol n egy konstans. Ez a kifejezés nagyon jól egyezik a mérések által kapott eredményekkel abban az esetben, ha a letörés az átmenet területén egyenletesen következik be. Az n kitevő értéke a szennyezésprofiltól és a generálódás helyétől függ.

Méréstechnikai szempontból nagyon kedvező az érzékenység meghatározása céljából az M tényező vizsgálata, mért relatív mérést igényel. A nulla zárófeszültségnél (a gyakorlatban inkább $2 \div 5$ V zárófeszültségnél) meghatározott válaszjelhez viszonyít-

juk a nagyobb zárófeszültségeknél adódó értékeket. A zárófeszültség növelésével a multiplikációs tényező kezdetben lassan, majd hirtelen nő. Például a Texas-cég TIXL-55 típusú szilícium lavina fotodiódája [3] kb. 50 V zárófeszültségig egységnyi M értéket mutat, 140 V-nál éri el az $M=10$ és 160 V-nál az $M=100$ -as értéket. A TIXL-57 típusú germánium lavina fotodióda alacsonyabb zárófeszültségű; itt kb. 15 V-ig egységnyi az M érték; 39 V-nál adódik $M=10$ és kb. 41 V-nál az $M=100$ -as érték. Az intézetünkben előállított kísérleti lavina fotodiódák (szilícium alapanyagú) jellemző multiplikációs tényezői: kb. 30 V-ig $M=1$; 80 V-nál adódik $M=10$ és kb. 85 V körül az $M=100$ -as multiplikáció. A zárófeszültséget addig növelhetjük, amíg bekövetkezik a lavinaletörés. Ennek megindulásakor erősen megnövekszik az eszköz zaja, és a jel/zaj viszony hirtelen leesik. Ez az a határ, ameddig a detektor igénybe vehető, ezt a feszültséget túllépve nemcsak a válaszjel értéke csökken, hanem az eszköz tönkremenetele is hamarabb bekövetkezik. Az optimális multiplikációs tényező (M_{opt}) tehát a maximális jel/zaj viszonyhoz tartozó zárófeszültségnél mérhető érték.

A multiplikációs tényező jól definiáltsága és pontos mérhetősége következtében a lavina fotodiódák jellemzőit a multiplikációs tényezők keresztlimitje határozzák meg. Így beszélhetünk a sokszorozási tényező hullámhosszfüggéséről, fényintenzitás-függéséről, hőfokfüggéséről, frekvenciafüggéséről és a fentebb tárgyalt zárófeszültség-függéséről.

A multiplikációs tényező hullámhosszfüggését lényegében az eszköz alapanyaga határozza meg. Ahhoz, hogy egy beeső foton elektron-lyuk párt keltsen, energiájának nagyobbának kell lenni a félvezetőanyag E_G tiltott sáv szélességénél, tehát a $\lambda > \frac{hc}{E_G}$ hullámhosszakra nézve a félvezető átlátszó. Ez a hullámhosszhatár germánium esetében $1,71 \mu\text{m}$ és szilícium esetében $1,11 \mu\text{m}$ értékű. A $\lambda < \lambda_{\max}$ hullámhosszak esetében a fény elnyelését leíró egyenlet

$$F = F_0 e^{-ax} \quad (3)$$

alakú, ahol F a fény intenzitása, x a felülettől mért távolság és a az abszorpciós állandó.

$$a \approx \frac{\sigma}{\epsilon_0 c_0 n} \quad (4)$$

ahol σ az anyag vezetőképessége, n az abszorbeáló elemek száma, c_0 a fénysebesség, ϵ_0 a dielektromos állandó [4].

A lavinamechanizmusban azok a töltéshordozók játszanak elsődleges szerepet, amelyek a $p-n$ átme-

net kiürített rétegében generálódnak. Az átmenet helyének és a kiürített réteg struktúrájának megválasztása tehát befolyásolja a hullámhosszfüggést.

Alsó határt jelent a hullámhossz számára az a körülmény, hogy a félvezető felszínén elhelyezkedő felületi állapotok a felszín közelében abszorbeálódott fotonok keltette töltéshordozók gyors rekombinációját eredményezik úgy, hogy azok nem vehetnek részt az áramvezetési mechanizmusban. Kb. 0,4–0,5 μm hullámhossznál kisebb fotonok tehát nem jöhetnek számításba.

Tervezési feladatot jelent, hogy a készítendő eszközt multiplifikációs tényezőre, vagy a fenti hatások figyelembevételével meghatározott hullámhosszterekre optimalizálják. A multiplifikációs tényező megvilágítási intenzitástól való függését H. Melchior és W. T. Lynch [5] az alábbi összefüggéssel adja meg:

$$M_{Ph\max} = \sqrt{\frac{U_B}{nRI_p}} \quad (5)$$

ahol U_B a letörési feszültség, R a soros ellenállás, n a (2)-ben szereplő konstans, és

$$M_{Ph} = \frac{I - I_{MD}}{I_p - I_D} \quad (6)$$

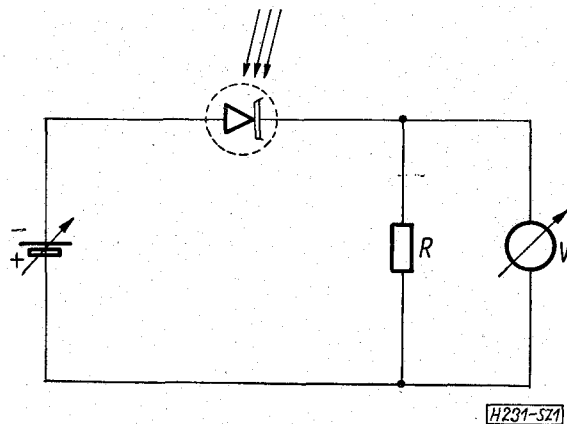
I a totál kimenőáram, I_D a sötétáram, I_{MD} a multiplifikálódott sötétáram, I_p a totál nem multiplifikálódott fotoáram.

I_p arányos a megvilágítási intenzitással adott hullámhossz esetén, tekintettel a kvantumhatásfokra.

Elvileg kedvezőbb a mérések szempontjából a kis fényintenzitás mellett való mérés, azonban ennek határt szab az a körülmény, hogy az egységnyi multiplifikációjú zárófeszültség-tartományban a dióda válaszele nem emelkedik ki a zajszintből.

A lavina fotodiódák frekvenciafüggését ugyancsak a multiplifikációs tényező frekvenciafüggésével jellemzik. Mint ismeretes [6], [7], ezek az eszközök megfelelő konstrukció esetén a GHz-es tartományokban is működtethetők. A multiplifikációs tényező mérése ilyen frekvenciákon mikrohullámú mérés technikát igényel [8], [9], és komoly problémát jelent a megvilágító fényjel intenzitásmódulációja. Csökken a működési frekvencia, ha nagyobb érzékenység kedvéért a $p-n$ átmenet területét megnövelik. Ezáltal nő az átmeneti kapacitás és a határfrekvenciát az átmeneti kapacitás – soros ellenállás szorzatból adódó időállandó fogja limitálni.

A lavinamechanizmus hőfokfüggését tekintve a letörési feszültség hőfokfüggése és a lavinaeffektus hőkoeficiense lesz mérvado. A letörési feszültség a szobahőmérséklet környezetében növekvő hőmérséklettel kis mértékben nő. [10] közlése szerint az M_{opt} -hoz tartozó zárófeszültség-érték 60 mV/C° hőkoeficienssel bír. Ha a lavina fotodiódát tartós üzemben, abszolút detektorként akarjuk felhasználni, akkor zárófeszültségét néhány mV-ra stabilizálni kell ahhoz, hogy állandó multiplifikációt és stabil jel/zaj viszonyt kapjunk. A [10] és [11] irodalom javasol erre nézve egy-egy alkalmas kapcsolást.



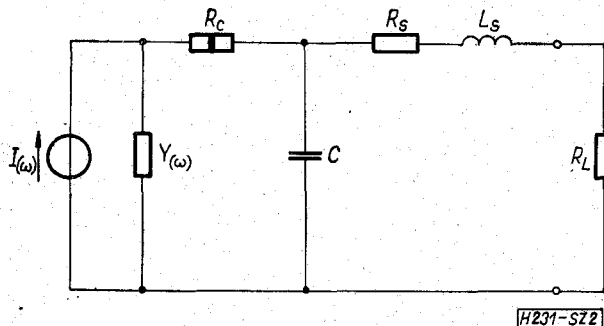
1. ábra

A multiplifikációs tényező mérése

A lavina multiplifikáció mérés lényege, hogy a vizsgálandó diórával ellenállást kötünk sorba és a rendszert feszültséggenerátorral tápláljuk. Megvilágítva az átmenetet, az ellenállás sarkain a fotoárammal arányos feszültséget mérhetünk. A feszültséggenerátor szabályozásával változtathatjuk az átmenetre jutó zárófeszültséget és a fotoáram mérhető a lavina fotodiódára kapcsolt zárófeszültség függvényében. Az elrendezést az 1. ábra szemlélteti. A mérés történhet állandó fényintenzitás mellett (egyenáramú mérés) és szaggatott fényjel mellett (váltóáramú mérés). Egyenáramú méréseknél a sötétáram is hozzáadódik a mérendő fotoáramhoz és ez a kis zárófeszültségek tartományában alacsony megvilágítási szintnél nagyon pontatlanná teheti a mérést. Előnyvel szemben, hogy a mérés kivitelezése egyszerűbb [12], [13]. Váltóáramú méréseknél a mérést zavaró tényezők jobban kiküszöbölhetők és a válaszjel pontosabban mérhető. Ugyanakkor lehetőség van a multiplifikáció frekvenciafüggésének meghatározására is. A fotodióda nagyfrekvenciás helyettesítőképét a 2. ábra szemlélteti. A fotoáramot az $I(\omega)$ áramgenerátor reprezentálja, $Y(\omega)$ a sötétadmittancia; R_c a tértöltési réteg ellenállása; C a tértöltési réteg kapacitása; R_s és L_s a dióda soros ellenállása, illetve induktivitása; R_L a diódára kapcsolt terhelő-ellenállás. Váltóáramú méréseknél R_L értékét úgy kell megválasztani, hogy

$$\omega \ll \frac{1}{(R_L + R_c)C}$$

egyenlőtlenség teljesüljön, ahol ω a fényzaggatás



2. ábra

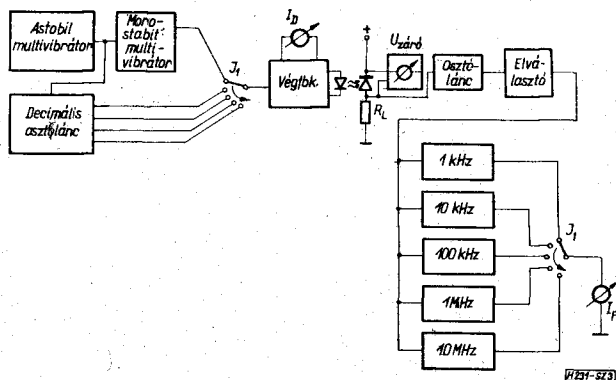
körfrekvenciája. Az L_s soros induktivitásnak csak a mikrohullámú frekvenciatartományban való mérésnél van jelentősége.

Alacsonyabb frekvenciák esetén a multiplikációs mérés céljára alkalmas fényforrás a fényemittáló fotodióda, amelyet váltófeszültséggel vezérelünk. A dióda sebességétől függően állíthatunk elő kisebb vagy nagyobb frekvenciás modulált fényjelet.

A multiplikáció mérés ilyenformán a fotoncsatolt pár elvére vezethető vissza. Tekintettel a detektáló diódák és a fényemittáló diódák keskeny spektrumtartományára, egymással kompatibilis párokat kell választani. Szilícium lavina fotodiódához megfelelően illeszthető a GaAs fényemittáló dióda, amelynek emissziós maximuma $0,90 \div 0,93 \mu\text{m}$ hullámhossztartományba esik. A fotoncsatolt pár elvén történő mérés lehetővé teszi, hogy ugyanazon mérési összeállításban vizsgáljuk a fényemittáló dióda emisszióképességét: ebben az esetben a lavina fotodiódát választjuk referenciának.

A mérési berendezés ismertetése

Az előzőekben tárgyalt mérési elv alapján mérőberendezést készítettünk a HIKI-gyártmányú lavina fotodiódák multiplikációs tényezőjének mérésére. A mérés öt diszkrét frekvencián végezhető el: 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz, 1 MHz és 10 MHz frekvenciákon. Így a multiplikációs tényező frekvenciafüggése is meghatározható a fenti frekvenciatartományban.



3. ábra

A készülék két nagyobb egységből áll: az adórészből, amely a fényemittáló diódát kiszolgáló áramkört tartalmazza és a vevőrészből, ahol a lavina fotodióda tényleges mérése történik. A mérőműszer blokkvázlatát a 3. ábra szemlélteti.

Az adóoldalon egy TTL inverterekből felépített astabil multivibrátor állítja elő a 10 MHz-es alapjelet, amelyet négy decimális számlánc (SN 7490 integrált áramkör) 1 MHz, 100 kHz, 10 kHz, illetve 1-kHz-re oszt le.

A 10 MHz-es jelet ugyanakkor rávezetjük egy multivibrátor-fokozatra (SN 74121) is, jelformálás cél-

jából. A J_1 kapcsoló segítségével a kívánt frekvenciájú jelet továbbítjuk a fényemittáló diódát meghajtó végfokozatra. A végfokozat kapcsolóüzemben működik és a fényemittáló diódán 1:1 kitöltési tényezőjű áramimpulzusokat hajt keresztül. A diódán átfolyó áramot mérő műszer ezen áram átlagértékét mutatja. A 10 MHz-es frekvencián igen rövid kapcsolási idők szükségesek, ezért a végfokozat hat darab párhuzamosan kapcsolt 2N 744 gyorskapcsoló tranzisztort tartalmaz. A fényemittáló diódával sorba kapcsolt ellenállás változtatásával változtatható a dióda csúcsárama 20 mA—100 mA—1 A műszervégkiterések tartományában. Az egyes végkiteréseknek megfelelő mérési tartományokon belül a végfokozat tápfeszültségét szabályzó potméter segítségével a dióda áramának folyamatos szabályozása is lehetséges.

A fényemittáló dióda és a lavina fotodióda árnyékolást biztosító rézdozobban helyezkedik el egymással szembe fordítva úgy, hogy a fénycsatlakozás optimális legyen. A mérődozobban helyezkedik el a lavina fotodiódával sorba kapcsolt 600 Ω -os mérőellenállás is, amely az osztólánc eredő ellenállásával párhuzamosan kapcsolódik. Az eredő soros ellenállás, tehát a lavina fotodióda mérőellenállása valójában 380 Ω -nak felel meg.

A megvilágított lavina fotodiódában keletkező fotoáram a mérőellenálláson feszültséget kelt. Ez a feszültség az osztóláncon egy illesztőfokozaton keresztül öt darab párhuzamosan kapcsolt szelektív erősítőre kerül az öt diszkrét mérési frekvenciának megfelelően. A szelektív erősítők kimenetére a J_1 kapcsoló segítségével kapcsolódik a fotoáramot jelző műszer. A mérhető fotoáramok 3 μA —3 mA műszervégkiterésekben mérhetők az osztólánc által szabályozhatóan 7 mérőállásban.

A lavina fotodióda zárófeszültsége 0 és 100 V között folyamatosan változtatható egy durva és egy finom szabályzó potméter segítségével.

A műszer felépítésénél fogva nemcsak a lavina fotodiódák, hanem a fényemittáló diódák vizsgálatára is alkalmas.

I R O D A L O M

- [1] Pásztor Gyula—Bársony István: „Hazai kísérletek lavinaüzemű fotodióda létrehozására” Híradástechnika, XXII., 11. p. 341. (1971.)
- [2] W. Shockley. Solid-State Electronics 2. p. 35. (1961.)
- [3] Halbleiterdatenbuch, Texas Instruments, 1970/71.
- [4] P. W. Kruse et al. Elements of Infrared Technology, J. Wiley 1962. p. 123—127. (1962.)
- [5] H. Melchior et al. IEEE Trans. El. Dev. ED—13. No. 12. p. 812. (1966.)
- [6] K. M. Johnson. Microwawe J., p. 71. 1963. Juli
- [7] K. M. Johnson. Proc. IEEE, p. 1368. 1963. Oct.
- [8] R. A. Meyers—P. S. Pershan. J. Appl. Phys. 36. p. 21. (1965.)
- [9] I. P. Kaminov—W. M. Sharpless. Appl. Optics 6. p. 351. (1967.)
- [10] EG. et G. Electronic Products Division, Printed USA 6/69 1969.
- [11] J. A. Raines et al. J. Phys. E. 3—8. p. 621 (1970.)
- [12] K. G. McKay, et al. Phys. Rev. 91. p. 1079. (1953.)
- [13] J. L. Moll—R. V. Overstraten. Solid-State Electronics 6. p. 147. (1963.)