

Schottky-diódák működésének és készítésének alapjai*

ETO 621.385.2

A Schottky-dióda az egyik legegyszerűbb felépítésű félvezető eszköz, amelynél egy fémfegyverzet közvetlen kapcsolatba kerül a félvezetővel [1]. Az így kialakult eszközök sok hasonlóságot mutat a $p-n$ átmenetekkel, azzal a különbséggel, hogy a $p-n$ átmenetekkel ellentétben a Schottky-diódáknál a kisebbségi töltéshordozók nem játszanak szerepet és ezért igen nagy frekvenciákon is jól alkalmazhatók. Felhasználásuk ma már igen széles körű. Önálló félvezető eszközként: mikrohullámú varaktorok, varisztorok, detektorok, keverők, mikrohullámú generátorok (pl. IMPATT-diódák) és vezérlő elektródáként: tranzisztorok bázis-kollektor körében, FET kapujaként, Gunn-diódák indító elektródjaként, memória-elemekként stb. használják.

Elterjedésüket elsősorban azok a technológiai nehézségek gátolták, amelyek az említett közvetlen fém-félvezető kapcsolat kialakításával fűgnek össze. A fém és félvezető között kialakuló közbülső, nehezen kézben tartható oxidréteg és a félvezető felületi állapotai nehezítették meg az egyszerű elméleti modell követő diódák reprodukálható készítését.

A jelen cikk célja, hogy a Schottky-diódák legfontosabb fizikai jellemzőit ismertesse és röviden vázoljuk azokat a technológiai követelményeket, amelyek szükségesek az ideális dióda karakterisztikák kialakításához.

I. A potenciál-gát kialakulása

Valamilyen fém és félvezető anyag összeérítésekor egy potenciál-gát („barrier”) alakul ki, melynek értéke meghatározza a dióda főbb tulajdonságait (1. ábra).

A Φ_{Bn} értékét nem csak a fém kilépési munkája ($q\Phi_M$), illetve a félvezető ún. elektronaffinitása (χ) határozza meg, hanem a fém és félvezető között levő közbülső oxid réteg (dielektromos állandója ϵ_i , vastagsága δ), valamint a felületi állapotok is. A számítás azt mutatja [2]–[5], hogy

$$\Phi_{Bn} = \gamma(\Phi_M - \chi) + (1 - \gamma)(E_g/q - \Phi_0) \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{\epsilon_i \epsilon_0}{\epsilon_i \epsilon_0 + q^2 \delta^2 D_s}$$

ahol E_g a tilos sáv szélesség, Φ_0 a felületi állapotokra jellemző nívó, D_s állapot sűrűségük a tilos sávban, ϵ_0 a vákuum dielektromos állandója. A fenti egyenlet alapján igazolni lehet azt a kísérleti megfigyelést, hogy vannak olyan félvezetők (pl. GaAs), ahol a barriermagasság nem függ a használt fémtől. Valóban,

ha $D_s \rightarrow \infty$, akkor $\gamma \rightarrow 0$ és a Φ_{Bn} -t a felületi állapotokra jellemző Φ_0 határozza meg. Megjegyezzük, hogy a $q\Phi_0$ nívó, a kísérleti tapasztalatnak megfelelően a valencia sáv felett $1/3 \cdot W_g$ magasságban van („egyharmados szabály”). Ideális esetben $\gamma = 1$ (pl. $D_s \rightarrow 0$) és ilyenkor az ismert eredmény adódik:

$$\Phi_{Bn} = \Phi_M - \chi. \quad (2)$$

Ha egy bizonyos fémet n , ill. p -típusú félvezetőre viszünk fel, akkor a Φ_{Bn} és Φ_{Bp} között nevezetes összefüggés vezethető le:

$$q(\Phi_{Bn} + \Phi_{Bp}) = E_g$$

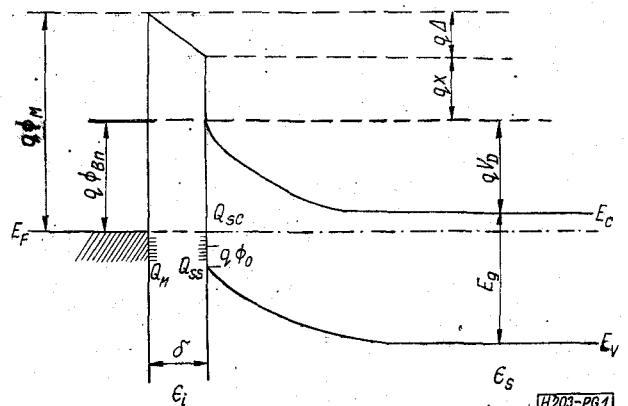
azaz a különböző típusú félvezetőn mért barriermagasságok összege éppen a tilos sáv szélességével egyenlő [5].

2. Ideális C–V karakterisztika

A félvezető oldalon kialakult elszegényedési réteg (tértöltési tartomány), melyet a Q_{sc} felületegységre vonatkoztatott töltéssel lehet jellemezni, a fémmel és a félvezetővel együtt egy „sík” kondenzátort képez, melynek értékét könnyű kiszámítani. A számítás mutatja, hogy az S felületű dióda kapacitása és a V feszültség között a következő összefüggés érvényes [6]:

$$\left(\frac{S}{C}\right)^2 = \frac{2(V_D - V - kT/q)}{\epsilon_0 \epsilon_s q N_D} \quad (3)$$

ahol N_D a donorok koncentrációja, V_D az ún. diffúziós potenciál (lásd 1. ábra). A fenti kifejezés lehetőséget ad az N_D kísérleti meghatározására.



1. ábra. Fém-félvezető kontaktus sávképe, közbülső oxidréteggel. A képerő („image force”) hatása nincs feltüntetve. Q_{sc} tértöltés, Q_M a fém, Q_{ss} a felületi állapotok töltése. Δ az oxidon keletkező potenciálesés, q elektron töltése

* A kecskeméti Mikroelektronikai Alkatrészek Anketon elhangzott előadás alapján készült.

Beérkezett: 1972. XII. 10-én.

3. Ideális I–V karakterisztika

A Schottky-diódák legfontosabb és legérzékenyebb karakterisztikája az áram-feszültség karakterisztika. Mivel a barriermagasság elég nagy az elektronok termikus energiájához képest ($kT=0,026\text{eV}$ szobahőmérsékleten), csak kevés elektron képes átjutni a barrieren. A potenciál-gát jelentése nyilván egy egyenirányító-karakterisztikát eredményez. Nyitó irányban, n-típusú félvezető esetén, a fém pozitív és az elektronok a félvezetőből a fém felé áramlanak. Pontosabban azok az elektronok képesek ezt megtenni, amelyeknek a barrierre merőleges v_{0x} sebesség komponense olyan, hogy $m^*v_{0x}^2/2 \geq q(V_D - V)$. A számítások elvégzése után a következő I–V karakterisztika adódik [2], [3], (I-áramsűrűség):

$$I = I_{ST} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (4)$$

$$I_{ST} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right)$$

és az A^* Richardson-állandó kifejezhető az m^* effektív tömeg, a k Boltzmann-állandó és a h Planck állandó segítségével: $A^* = 4\pi qm^*k^2/h^3$. (A^* értéke $\approx 120 \text{ amp/cm}^2$)

4. Reális Schottky-diódák jellemzése

Sajnos, az „egyszerű” technológiával készült Schottky-diódán (2A. ábra) nem lehet megkapni az előzőekben ismertetett C–V és I–V karakterisztikákat. A reális diódák kisebb vagy nagyobb mértékben eltérő karakterisztikákat mutatnak, ami lényegében két okra vezethető vissza. Az első ok, hogy nehéz megvalósítani (még nagy vákuumban is) a fém és félvezető között a közvetlen kontaktust és nyilvánvaló, hogy egy viszonylag vékony oxidréteg is komoly akadályt jelent az elektronok számára, eltekintve attól, hogy mint soros járulékos kapacitás könnyen figyelembe vehető.

A második ok a dióda széleinek hatása („edge effect”), amely mind a C–V, mind az I–V karakterisztikát lényegesen befolyásolja. Mivel a technoló-

gia kialakításánál éppen a fenti két hatást kell minimumra csökkenteni, érdemes ezekkel kissé részletesebben is foglalkozni.

A fém-félvezető határreteg („interface”) tökéletlen volta elsősorban az I–V karakterisztikánál jelentkezik. A kísérletileg megfigyelt karakterisztika

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (5)$$

alakú, ahol az n paraméter a határreteg minőségétől függ. Ideális dióda esetén $n=1$. Szokásos értéke 1 és 2 közé esik. Az n megjelenésének következménye, hogy pl. a nyitó irányú áram jelentősen lecsökken, a dióda, szobahőmérsékleten pl., nem 26 mV-nál, hanem $n \cdot 26$ mV-nál nyit ki. A jelen ismertetés keretében nincs mód azokat a modelleket tárgyalni, amelyek az n felléptét a felületi állapotokra, a különböző rétegre, vagy a rekombinációs centrumokra vezetik vissza. Nem nehéz kimutatni viszont, hogy ha a Φ_{Bn} barrier valamilyen oknál fogva függ a V feszültségtől, azaz $d\Phi_{Bn}/dV \neq 0$, akkor ez ekvivalens egy olyan n paraméterrel, melyre igaz, hogy [2]:

$$\frac{d\Phi_{Bn}}{dV} = \frac{n-1}{n} \quad (6)$$

Fizikailag várható, hogy az n faktor fellépte, mely az áramot jelentősen befolyásolja, csak kevésbé hat a C–V karakterisztikára. Ez belátható, hiszen (6) szerint az n ekvivalens egy V-től függő potenciál-gát megjelenésével és Φ_{Bn} az áramban az exponensben szerepel [lásd a (4) képletben az I_{ST} kifejezését], míg a C–V karakterisztikában csak hatványfüggvényként, a V_D diffúziós potenciálon keresztül lép fel. (Mint az 1. ábrából látható, a qV_D -hez az E_F Fermi-nívónak a vezetési sávától mért távolságát kell hozzáadni, hogy a $q\Phi_{Bn}$ mennyiséget megkapjuk.)

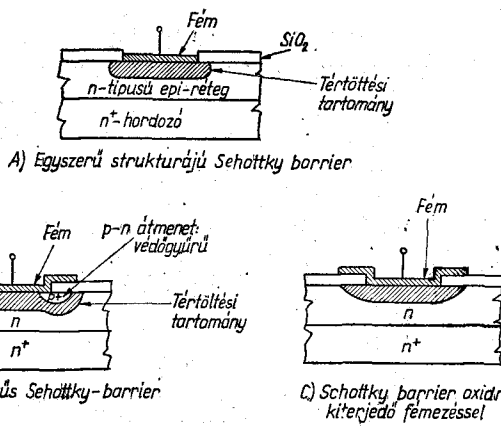
Az n paraméter („ideality factor”) a Schottky-diódák zajában is szerepet játszik. A dióda ekvivalens zaj-hőmérséklete T_{eq} pl. a következő összefüggéssel [7], [8] adható meg:

$$T_{eq} = nT \left[\frac{1}{2} + \frac{I_0}{nI} \right] \quad (7)$$

Az I , ill. I_0 áramsűrűségek az (5) egyenletben szerepeltek. A fenti kifejezésben a dióda soros ellenállásának és a széleken fellépő szivárgási („leakage”) áramnak a hatását, valamint az esetleges rekombinációs centrumoktól származó ún. generációs-rekombinációs zajt nem vettük figyelembe. Ily módon a Schottky-diódának az a nevezetes tulajdonsága, hogy a p–n átmenetekhez képest kis zajúak, az n paraméter megjelenése miatt erősen romlik.

A másik lényeges probléma a széleffektusok hatása, mely elsősorban a diódaméretnek csökkentésével válik jelentőssé. A C–V karakterisztika mérésekor, nagy záróirányú feszültségeknél a C értéke csökken és ilyenkor a C_{edge} kapacitás összemérhető lehet magával a C-vel. Egyszerű becslés mutatja [6], hogy

$$C_{edge} = \epsilon_0 \epsilon_s \frac{\pi^2}{2} d = 5,23 \cdot 10^{-4} d [\text{pF}],$$



2. ábra Különböző technikával készített Schottky-diódák vázlatos képe

ha a d átmérőt μm -ben helyettesítjük be. ($\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-14} \text{F/cm}$; $\epsilon_{\text{Si}} = 11,8$)

A szélek hatása különösen a záróirányú karakterisztika kialakulásánál játszik fontos szerepet. Mint ismeretes, a diódák meg nem engedett nagy záróirányú árama és korai letörése, az esetek többségében a szélek hatására vezethető vissza. Valóban, adott fajlagos ellenállású minta, epitaxiális réteg esetén, pontosan ki lehet számítani a terfogati letörési feszültséget, melynek szokásos értéke 50–70 V körül van. Azoknál a diódnál viszont, ahol nem gondoskodnak a szélek káros hatásának csökkentéséről, már néhány voltnál bekövetkezik a letörés. A fenti problémák megoldását a megfelelő technológia kialakításában lehet megtalálni.

5. Technológiai alapelvek

Mivel a jelen cikk keretében nincs mód az egyes technológiai eljárások részletes ismertetésére, azokat az elveket írjuk le, amelyek segítségével sikerült kialakítani a fém és félvezető között a szoros érintkezést, másrészt a széleffektusokat is a szükséges mértékben sikerült csökkenteni. A Bell-laboratóriumban [9], a szoros fém-félvezető érintkezést úgy érték el, hogy a vákuumban felpárolgatott Pt-réteget hőkezeléssel PtSi-dé alakították és így végül is PtSi–Si Schottky-diódát állítottak elő ($q\Phi_{B_1} = 0,85 \text{ eV}$). A lényeges körülmény az, hogy a PtSi viszonylag alacsony hőmérsékleten jön létre, szilárd fázisok között végbemenő reakció során, és így el lehet kerülni a folyékony fázis keletkezését, amely tönkreteszi a határreteget. Mivel a PtSi a legstabilabb az összes platinaszilicid között, igen jó minőségű átmenetek állíthatók elő.

A szélek hatását egy p - n átmenetből kialakított védőgyűrűvel csökkentették, amint azt a 2B. ábra mutatja.

Az így nyert dióda sok nagyságrenddel pontosabban követte az alábbi karakterisztikát:

$$I = 10^{-12} \left[\exp\left(\frac{qV}{1,02kT}\right) - 1 \right] \text{ amp/cm}^2$$

A Fairchild-laboratóriumban más úton indultak el [10]. Azt használták ki, hogy az Al könnyen oxidálódik és a Si felületén levő vékony oxidréteget is képes redukálni és így jön létre, viszonylag alacsony hőmérsékleten (400°C), a fém és félvezető között a közvetlen érintkezés ($q\Phi_{B_1} = 0,69 \text{ eV}$). A széleffektusok hatását oly módon csökkentették, hogy az alumíniumot egy igen keskeny sávban az oxidréteg fölé is párolgatták, ahol végül is egy fém-oxid-félvezető (MOS) dióda alakul ki, amely záróirányban megakadályozza nagy visszaramok kialakulását (2C. ábra).

A dióda karakterisztikája jól leírható az alábbi kifejezéssel:

$$I = 3 \cdot 10^{-5} \left[\exp\left(\frac{qV}{1,01kT}\right) - 1 \right] \text{ amp/cm}^2.$$

Ez a módszer azért látszik előnyösnek, mert lényegesen kevesebb technológiai lépést igényel, mint a védőgyűrűs eljárás, és ezt egy olyan egyszerű felépítésű eszköznél, mint a Schottky-dióda, el is vár-

juk. Igaz viszont, hogy az oxid minőségével szemben nőnek a követelmények.

Természetesen nem csak Pt vagy Al használható a dióda készítésénél, hanem számos más fém is. A korábban részletesen vizsgált Au alkalmazása a rossz tapadás miatt előnytelen, továbbá nehezen lehet előállítani időben stabil átmenetet. Jól használható viszont a Mo és a Cr is. A problémát mindig a néhány atomi rétegben jelen levő oxidréteg eltávolítása okozza, amelyhez a kémiai eljárások (pl. HF-es oldás) már elégtelenek. Szokásos ezért a párolgatás előtt a felületet ion-bombázással tisztítani. Az alumínium esetén ez nem feltétlenül szükséges.

Az elmondottak alapján röviden összefoglalhatjuk azokat a követelményeket, amelyeket nagyfrekvencián, vagy mikrohullámon működő Schottky-diódák készítésénél teljesíteni kell:

1. Nagy tisztaságú fémek párolgatás céljára (99,999),
2. $p \leq 5 \cdot 10^{-7}$ Hgmm-es vákuum-párolgató,
3. Speciális felülettisztítás,
4. Közel töltésmentes oxid készítése,
5. Fotoreziszttechnika (pl. $\varnothing 20 \mu\text{m}$),
6. Meredek profilú, $1 \mu\text{m}$ -nél vékonyabb epitaxiális réteg.

Az utolsó ponthoz annyi kiegészítés tartozik, hogy az epitaxiális réteggel szemben támasztott követelmények lényegesen függenek attól, hogy milyen soros ellenállású diódát akarunk készíteni, milyen frekvenciákra. Ebből a szempontból az alacsony megválasztása (pl. Si vagy GaAs) is lényeges, mert pl. a GaAs-ben az elektronok mozgékonyasága lényegesen nagyobb, mint a Si-ben, másrészt a barriermagasság nem függ a használt fémtől, ami egyszerűbb technológiát biztosíthat. A Si alkalmazása azért előnyös, mert a különböző technológiai lépések legjobban a szilíciumra vannak kidolgozva. A legmeredekebb profil jelenleg ion-implantációval állítható elő, ami jelentősen javítja a mikrohullámú diódák paramétereit [11]. A felsorolt hat pontot tekintve bátran állítható, hogy a modern félvezető-technika általános színvonala mellett, a jó minőségű Schottky-diódák előállításához viszonylag szerény követelmények szükségesek, amelyek teljesítése, figyelembe véve a sokirányú alkalmazási lehetőséget [4], [12], feltétlenül megéri a befektetést.

I R O D A L O M

- [1] W. Schottky: Z. für Naturwiss. 26, 843 (1938)
- [2] C. R. Crowell and S. M. Sze: Solid-St. Electron. 9, 1035 (1966)
- [3] H. K. Henisch: Rectifying Semiconductor Contacts. Oxford, University Press, 1955.
- [4] S. M. Sze: Physics of Semiconductor Devices, John Wiley, New York, 1969.
- [5] M. Hirose, N. Altaf and T. Arizumi Jap. J. Appl. Phys. 9, 260 (1970)
- [6] A. M. Goodman: J. Appl. Phys. 34, 329 (1963)
- [7] A. van der Ziel: Fluctuation Phenomena in Semiconductors, Butterworth, London, 1959.
- [8] R. J. Minniti et al.; J. Appl. Phys. 42, 1886 (1971)
- [9] M. P. Lepselter and S. M. Sze; Bell Syst. Techn. J. 47, 195 (1968)
- [10] A. Y. Yu; Solid-St. Electron. 13, 239 (1970)
- [11] T. Misawa et al.; Solid-St. Electron. 15, 189 (1972)
- [12] Microwave Semiconductor Devices and their Circuit Applications; Edited by H. A. Watson; McGraw-Hill Inc. 1969.