

Félvezető rétegek adalékprofiljának mérésére szolgáló készülékek

ETO 621.382.002.2:620.168

A félvezető eszközök működése szempontjából meghatározó jelentőségű az adalékanyag eloszlása az eszközök aktív tartományában. Jellemző példaként megemlíthetjük a Gunn-eszközt [1], ahol a működési frekvenciát az aktív réteg vastagsága határozza meg, a kivethető teljesítmény pedig adott adalékszint esetén lesz maximális, ezenkívül a működési módot is alapvetően befolyásolják az adalékanyag-eloszlás inhomogenitásai, de a konvencionális p-n átmenetet tartalmazó eszközök elektromos paramétereit is elsősorban a félvezető kristályba beépített adalékok minősége, mennyisége és eloszlása szabja meg.

Ilyen, ppm nagyságrendű, adalékkoncentrációk mérése kívül esik a klasszikus kémiai módszerek szokásos tartományán. Speciális esetekben alkalmazható az aktivációs analízis, Auger elektron-spektroszkópja, mikroszonda, SIMS, back scattering. Szokásos eljárás a réteg vezetőképességének mérése négytűs módszerrel vagy kifolyási ellenállás mérésével [2], ekkor viszont a mélység szerinti változást csak a minta roncsolásával lehet meghatározni. Jelen cikkben a félvezető rétegen készített erősen aszimmetrikus (fém-félvezető, illetve p⁺-n típusú) diódák kapacitás-feszültség karakterisztikájának mérésén alapuló módszerekkel foglalkozunk. A módszer előnye, hogy viszonylag olcsó berendezésekkel igen jó felbontás (a mikroszondás mérésnél nagyságrendekkel jobb) érhető el, a mintapreparálás sem bonyolult (pl. Hg dióda), illetve kompatibilis az eszköz-készítés technológiájával. Az adalékkoncentráció mérése roncsolásmentesen történik, sok esetben a kész eszközön is elvégezhető a vizsgálat.

A módszer elvét az 1. ábra alapján tekinthetjük át. Az ábra az elektronenergiának hely szerinti változását mutatja egy záróirányban előfeszített fém-n típusú félvezető, ill. p-n dióda n oldalán. Az ábrán vázolt energiaviszonyok magyarázatát illetően az általános irodalomra utalunk [3], [4].

A kiürített réteg w szélességét az egydimenziós Poisson-egyenlet:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = \frac{-\rho}{\epsilon} = \frac{-qN}{\epsilon} \quad (1)$$

megoldásával határozhatjuk meg, ahol q , N és ϵ rendre az elemi töltést, a donorok koncentrációját és a félvezető dielektromos állandóját jelölik. A határfeltételek:

$$V(w) = 0 \quad \text{és} \quad F(w) = -\frac{dV}{dx} \Big|_{x=w} = 0,$$

ahol w a kiürített réteg határa az n oldalon. A kiürített tartományon belül a feszültség változását

(1) integrálásával számíthatjuk ki:

$$V(x) = \frac{-q}{\epsilon} \int_x^w \int_{x'}^w N(x'') dx'' dx'. \quad (2)$$

Parciális integrálással a fenti formulák más, gyakran hasznos alakjához jutunk:

$$V(x) = +\frac{q}{\epsilon} x \int_x^w N(x') dx' - \frac{q}{\epsilon} \int_x^w x' N(x') dx', \quad (3)$$

ill.

$$V = -\frac{q}{\epsilon} \int_0^w x N(x) dx. \quad (4)$$

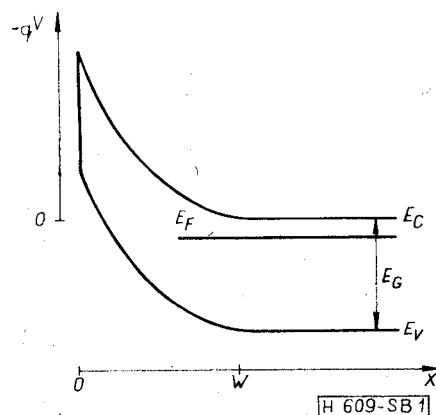
A tértöltési tartomány szélességének Δw megváltozásához tartozó ΔV feszültségváltozás pedig:

$$\begin{aligned} \Delta V &= -\frac{q}{\epsilon} \int_w^{w+\Delta w} x N(x) dx = -\frac{q}{2\epsilon} N(w) [(w+\Delta w)^2 - w^2] = \\ &= -\frac{q}{\epsilon} N(w) w \cdot \Delta w - \frac{q}{2\epsilon} N(w) (\Delta w)^2, \end{aligned} \quad (5)$$

ahol $N(x)$ értékét a w és $w + \Delta w$ között állandónak tekintjük. Ha $\Delta w/w$ elég kicsi ahhoz, hogy a másodrendű tagot elhanyagolhassuk, úgy (5) egyenlet átrendezésével kapjuk, hogy

$$N(w) = -\frac{\epsilon}{q} \frac{1}{w} \frac{dV}{dw}. \quad (6)$$

w értékét a legegyszerűbb módon a dióda differenciális kapacitásának mérésével határozhatjuk meg.



1. ábra. Az elektron energiájának hely szerinti változása záróirányban előfeszített aszimmetrikus diódaátmenet n oldalán

A dióda olyan kondenzátorként viselkedik, melyben a két fegyverzet távolsága a kiürített réteg vastagsága, ϵ pedig a félvezető dielektromos állandója. Ily módon a dióda differenciális kapacitása:

$$C = \frac{\epsilon A}{w} \quad (7)$$

(7) felhasználásával (6) az alábbi alakba írható:

$$N(w) = \frac{C^3}{q\epsilon A^2} \left(\frac{dC}{dV}\right)^{-1} = -\frac{2}{q\epsilon A^2} \left(\frac{d(C^{-2})}{dV}\right)^{-1} \quad (8)$$

(6), illetve (8) és (7) a C-V módszerrel történő profil-mérés alapegyenlete. Meg kell jegyezni, hogy a vizsgálat csak a kiürített tartományra terjedhet ki, a maximális mélységet a vizsgált dióda záróirányú letörése korlátozza. Tapasztalataink szerint n-GaAs esetén a maximális mélységet az alábbi tapasztalat formula fejezi ki:

$$\int_0^{w_{max}} N(x) dx \approx 10^{12} \text{ cm}^{-2} \quad (9)$$

Ezen a helyen kell megemlíteni, hogy ebben a dolgozatban feltételezzük, hogy a vizsgálandó félvezetőben csak ún. sekély donorok vannak, azaz olyan adalékok, melyek a mérés hőmérsékletén teljesen ionizáltak. Amennyiben a mintában nagyobb ionizációs energiájú adalékok (ún. mélynívók) is vannak — a sekély donorokhoz képest számottevő koncentrációban — úgy ezek vizsgálata külön kérdés, csak profilmérő készülékekkel nem végezhető el teljesen, más módszerek alkalmazására is szükség van. Ugyancsak korlátozzuk tárgyalásunkat a diódákon végezhető mérésekre és nem foglalkozunk más szerkezetekben (pl. FET) való profilmérési módszerekkel.

Kezdetben a profilkiértékelés az általában híd-módszerrel pontonként felvett C-V karakterisztika alapján numerikus számítással történt, először ilyen munkát C. O. Thomas és munkatársai közölték 1962-ben [5]. 1964-ben I. Amron [6] írt le egy logaritmikus segédeszközt a numerikus számítások gyorsítása céljából. Mindkét munka a Bell Laboratóriumban készült.

A profilok kiértékelése pontonkénti C-V mérések alapján meglehetősen hosszadalmas és nehézkes, jóllehet gyakran van igény ilyen vizsgálatra. Például Gunn-eszközök esetén, a chip értéke töredéke csak a mikrohullámú tok árának, s ezért igen fontos előzetes válogatási lehetőséget nyújt a profilmérés, a kész eszközt üi. már csak mikrohullámú tokban lehet kipróbálni.

A nagyszámú, gyors, rutinszerű mérés igénye és talán magának a problémának az érdekessége miatt is világszerte komoly erőfeszítéseket tettek olyan készülékek építésére, melyek automatizálják ezt a munkát. Ennek a kutató-fejlesztő tevékenységnek jó hátteret adott az analóg elektronikus alkatrészek és rendszerek fejlődése (pl. műveleti erősítő integrált áramkörök megjelenése a piacon). Manapság a digitális technika fejlődésével (olcsó, mérések vezérlésére is alkalmas kalkulátorok, ill. mikroprocesszorok elterjedése) ez az út talán már kissé korszerűtlennek tűnik, laboratóriumi körülmények közt egyszerűbb

és rugalmasabb programvezérelt mérőrendszert használni. Az első ilyen jellegű mérési összeállítást a Bell Laboratórium munkatársai közölték [7]. Ez off-line típusú berendezés volt, és valószínűleg az ezzel kapcsolatos nehézség miatt nem oldotta meg az ilyen jellegű gondokat. Mindenesetre tény, hogy a Bell Laboratóriumban is további sok munkát fordítottak profilmérő célműszerek építésére.

E dolgozat célja áttekintést adni e készülékekről.

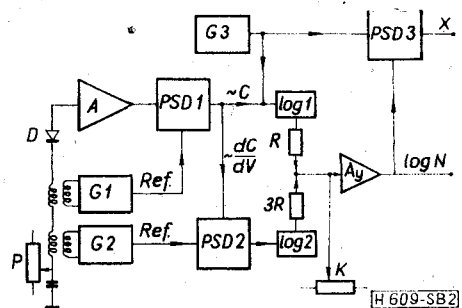
Modulációs rendszerű műszerek

A modulációs rendszerű berendezések direkt kapacitásmérést végeznek és valamilyen modulációs technikával mérik $\frac{dC}{dV}$ -t is, a kimenő jelek ezen jelek logaritmálás utáni összeadásával, kivonásával, ill. állandó szintek hozzáadásával képződnek (7) és (8) szerint.

Szinte egyidőben három független dolgozat jelent meg erről a témáról: F. P. Califano és A. Luciano A Nápolyi Egyetemről [8], B. J. Gordon és munkatársai a Dél-kaliforniai Egyetemről [9] és P. J. Baxandall és munkatársai pedig a Boyal Radar laboratóriumából [10] számoltak be ilyen készülék építéséről. Ezek közül az utóbbi kereskedelmi forgalomba is került [11]. Ezt a műszert az MFKI-ban is elkészítettük [12], blokkvázlatát a 2. ábra mutatja.

A készülék működését az alábbiak szerint követhetjük végig: a G_1 oszcillátor szinuszos mérőfeszültséget ad a D mérendő diódára. Kis kimenő impedanciájú, feszültséggenerátoros meghajtás. A dióda kapacitásán átfolyó árammal arányos jelet az A kis bemenő impedanciájú erősítő érzékeli, majd a $PSD 1$ jelű fázisérzékeny detektor kimenetén a dióda kapacitásával arányos egyenszint jelenik meg. A G_2 generátor hasonló módon alacsonyfrekvenciás moduláló feszültséget ad a diódára, és így a $PSD 1$ kimenetén a C -vel arányos egyenszintre szuperponálva megjelenik a $\frac{dC}{dV}$ -vel arányos váltójel, melyet a $PSD 2$

egység egyenirányít. A C -vel és $\frac{dC}{dV}$ -vel arányos jelek logaritmálás után 3:1 arányban adódnak össze az A_y erősítő bemenetén, a (8) formula szerinti konstansokkal arányos egyenszintek is itt adódnak hozzá a jelhez (ezeket a konstansokat potencióméterrel lehet beállítani). A mélységgel arányos jel képzése úgy történik, hogy a $\log I$ egység bemenetére



2. ábra. A Royal Radar laboratóriumban készített profilmérő blokkvázlata

a G_3 generátor kis amplitúdójú szögelfeszültséget ad, s így a logaritmálás és erősítés után az alábbi jel képződik:

$$\begin{aligned} \log(BC + V_3) &= \log BC(1 + V_3) = \\ &= \log BC + \log\left(1 + \frac{V_3}{BC}\right) \approx \log BC + \frac{V_3}{BC}, \quad (10) \end{aligned}$$

ahol B állandó, V_3 pedig a G_3 generátor kimenő jelének amplitúdója. A fenti számításnál figyelembe vettük, hogy $V_3 \ll BC$, és így elegendő a sorfejtést első rendig végezni. A (10) egy egyenáramú és egy váltóáramú jel összege, a PSD3 jelű fázisérzékeny detektor ebből a váltóáramú komponenst választja ki, mely — tekintve, hogy V_3 állandó — $C^{-1} \sim w$ -vel arányos. A G_1 , G_2 , G_3 generátorok frekvenciái rendre: 100 kHz, 1 kHz, 10 kHz.

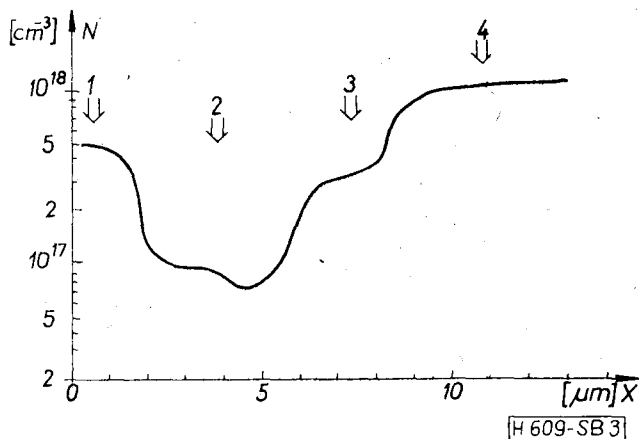
Hasonló elven működik Prágában a TESLA gyár laboratóriumában készített berendezés is, bár ebben néhány konkrét elektronikai probléma másként van megoldva. Ezeket a megoldásokat szabadalom védi. Az egyik működő készüléket — tudomásom szerint 1976 végéig összesen nyolc darab készült — módomban volt megtekinteni, lényegileg ugyanolyan paraméterekkel rendelkezik, mint az MFKI-ben épített.

Ugyancsak ilyen elven működő mérési összeállítást közölt C. A. Salama és P. Homes [13]. Ők egy kereskedelmi forgalomban kapható fázisérzékeny detektorral működő kapacitásmérőt (Boonton 71/A) használtak, a minta előfeszítését időben lineárisan változtatva a kimenő jel a kapacitással, a kimenő jel időderiváltja pedig $\frac{dC}{dV}$ -vel arányos. A mélységgel arányos jelet osztó áramkörrel, a koncentráció logaritmusával arányos jelet pedig szintén a C és $\frac{dC}{dV}$ -vei arányos jelek logaritmálás utáni megfelelő arányú összeadásával, valamint a konstansoknak megfelelő egyenszintek hozzáadásával állították elő.

Szólni kell itt a modulációs technika két lényeges jellemző vonásáról:

1. A $\frac{dC}{dV}$ mérés pontossága nem állandó. Vegyük észre ui., hogy $\frac{dC}{dV}$ a dióda egyenáramú előfeszítésének növelésével gyorsan csökken. (Homogén koncentrációeloszlás esetén (4) alapján $C \sim V^{-1/2}$ és $\frac{dC}{dV} \sim V^{3/2}$.) Ez a modulálójel amplitúdójának megválasztásánál okoz gondot, ui. ha még a maximális előfeszítés környékén is kellő pontosságot kívánunk elérni, úgy a moduláló jel amplitúdója kis előfeszítéseknel túl nagy lesz, összemérhető az egyenáramú előfeszítéssel. A leírt készülék éppen ezért 0,5 V záróirányú előfeszítésnél kisebb előfeszítésekkel nem is működik.

2. A mérési módszer viszonylag kevésbé érzékeny a parazita kapacitásokra. A dióda kapacitásával párhuzamosan jelentkező szórt kapacitás könnyen korrekcióba vehető (pl. ahogy az a konkrét kiviteli formánál történik a PSD 1 után alkalmazott szinteltolással), a hozzávezetéseknek a testhez viszonyított kapacitásai pedig egyrészt a generátor, másrészt



3. ábra. A SZUTA Novoszibirszki Félvezető Intézetében készített GaAs epitaxia profilja. A jelölt szakaszok: 1. n^* kontaktálást megkönnyítő fedőréteg; 2. aktív réteg; 3. buffer réteg; 4. hordozó kristály

az A bemenő erősítő kis impedanciáival kapcsolódnak párhuzamosan és így nem okoznak lényeges hibát.

Ugyancsak modulációs elven működik az egyik legújabb ilyen készülék is, a Post Office Profile Plotter [14]. A lényeges különbség a többi műszerhez képest az, hogy állandó előfeszítés mellett méri a koncentrációt, a mélységet pedig elektrokémiai marással változtatja. A dióda elektrolit oldat (KOH) és a félvezető közt jön létre, a félvezető az oldatban folyamatosan oldódik (n típusú félvezető esetén az oldódáshoz megvilágítás szükséges). A készülék méri az oldódás során a rendszerben átfolyt töltést, melyet mélységre számít át, ehhez hozzáadja a mért kapacitás reciprokéval arányos jelet, ily módon a kimeneten a mélységgel arányos jel jelenik meg. Ennek a mérési módnak hátránya, hogy roncsoló, viszont módot nyújt szinte tetszőleges mélységig való vizsgálatra a (9) korlátozástól függetlenül, és lévén az előfeszítés állandó C és $\frac{dC}{dV}$ mérési pontossága

nem függ a mélységtől, csak a koncentráció mélység szerinti változásától. A 3. ábrán látható profilt ezzel a készülékkel vettük fel az MFKI-ben. Az említett elektrolit diódát T. Ambridge és M. M. Faktor dolgozták ki [15], [16], [17]. Az elektrolit miatt a dióda kapacitása csak alacsonyfrekvenciás (3 kHz) mérőjellel mérhető, a moduláló frekvencia 30 Hz. A mérődióda átmérője nagy (3–4 mm), ennek két oka van: egyrészt a kapacitást kell növelni, hogy ilyen alacsonyfrekvenciás módszerrel is jól mérhető legyen (az elektrolit diódán a felületi szivárgási áram meglehetősen nagy!), másrészt így a marásnál fellépő széleffektusok csökkennek. A berendezés elsősorban GaAs vizsgálatára alkalmas, használható még más $A^{III}B^V$, ill. $A^{II}B^VI$ vegyületfélvezetők mérésére is. Elemi félvezetők (Si, Ge) marása azonban még nincs megoldva ezzel a módszerrel.

Egy másik alapvetően eredeti készülék Ambrózy nevéhez fűződik [18]. A különlegessége ennek a módszernek az, hogy a kapacitásmérés híd módszerrel történik. Az alkalmazás azon a felismerésen alapszik, hogy egy kiegyenlített hídba kapcsolt dióda egyen-

áramú előfeszítést szimmetrikus trapéz alakú impulzussal modulálva a híd kimenő jelének csúcserőteke a $C^{-1} \frac{dC}{dV}$ mennyiséggel arányos. Kiegyenlítettlen híd esetén a jel ennél nagyobb. A mérőberendezés felépítése ezután a következő: a váltóáramú mérőhíd egyik ágába a dióda, a másik ágába pedig egy változtatható kapacitás van kapcsolva, a trapéz alakú moduláló jel okozta kimenő feszültség csúcserőteke negatív visszacsatolással vezérli a dióda egyenáramú előfeszítést s így a híd állandóan kiegyenlített, a kimenő jel pedig az említett módon $C^{-1} \frac{dC}{dV} \sim N(w)w^2$

tel arányos. A változtatható kapacitást (forgókon-denzátort vagy varicap diódát) kézzel vagy motorral változtatva a mérés a dióda teljes zárófeszültség-tartományában elvégezhető. A megfelelő analóg áramkörökkel szimulált számítások után a kimenetek log N-nel és w-vel arányos jelek vehetők le. Előnye ennek a módszernek, hogy a trapéz alakú moduláló jelet negatív visszacsatolással vezérli oly módon, hogy $C^{-1} \frac{dC}{dV}$ állandó legyen és így az 1. pont alatt említett hiba nem lép fel. Egy ezen az elven működő készülék, melyet Ambrózy András és Gottwald Péter építettek, az EIVRT-ben működik.

Nagyfrekvenciás módszerek

A Copeland-féle profilmérők

A profilmérők másik csoportját az irodalomban Copeland-féle profilmérőknek nevezik. Az első ilyen automata készülék megépítése és a működési elv szép fizikai magyarázata valóban az ő nevéhez fűződik [19], ez a munka is a Bell Laboratóriumban készült. A gondolat lényege az, hogy a dióda kapacitását mérő nagyfrekvenciás jel a dióda nem lineáris C-V karakterisztikája miatt torzul, felharmonikusok jelennek meg. Elméleti elektronikai szempontból a kérdést először N. I. Meyer és T. Guldbansen [20] vizsgálták, kimutatták, hogy ha egy diódára ω körfrekvenciájú szinuszos gerjesztést adnak, akkor 2ω és 3ω körfrekvenciájú felharmonikusok képződnek, és a 2ω körfrekvenciájú jel mérésével az adalék-koncentrációra lehet következtetni. Reprezentatív méréseket is közölnek ötvözött Ge tranzisztorkon. Az ő munkájukra támaszkodva D. Leenov és R. G. Stewart [21] tett javaslatot egy egyszerű profilmérő készülék építésére, ami lényegében igen hasonló a Copeland által később megépített készülékhez.

A mérés elvét az (5) egyenlet alapján követhetjük végig, nem elhanyagolva a másodrendű tagot. Figyelembe véve, hogy a tértöltési tartomány szélességének Δw megváltozása során a külső előfeszítő körben

$$\Delta Q = AqN(w) \Delta w \tag{11}$$

töltés folyik a dióda katódjáról az anódjára, írhatjuk, hogy

$$\Delta V = -\frac{w}{A\varepsilon} \Delta Q - \frac{1}{qA^2\varepsilon} \frac{1}{N(w)} \Delta Q^2. \tag{12}$$

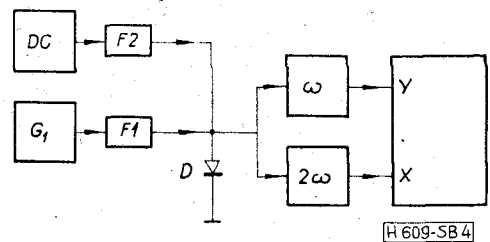
A diódára áramgenerátorból $I(t) = I \sin(\omega t)$ gerjesztést adva, a töltés változása $Q(t) = -\Delta Q \frac{\cos(\omega t)}{\omega}$ lesz, tehát:

$$\Delta V = -\frac{J \cos(\omega t)}{A\varepsilon\omega} w + \frac{J^2 \cos^2(\omega t)}{2\omega^2 q\varepsilon A^2 N(w)}. \tag{13}$$

Felhasználva, hogy $\cos^2(\omega t) = \frac{1}{2} [1 + \cos(2\omega t)]$ írhatjuk hogy

$$\Delta V = -\frac{J \cos(\omega t)}{A\varepsilon\omega} w + \frac{J^2 [1 + \cos(2\omega t)]}{4\omega^2 q\varepsilon A^2 N(w)}. \tag{14}$$

Tehát a diódára ω körfrekvenciájú mérőáramot kényszerítve, a rajta mérhető váltófeszültség ω és 2ω körfrekvenciájú komponenseket fog tartalmazni, ezek közül az előbbi a w-vel, az utóbbi pedig $N(w)^{-1}$ vel lesz arányos. A dióda egyenáramú előfeszítésének változtatásával a kiürített réteg határain belül lehet N^{-1} -et mérni.



4. ábra. A Copeland-féle profilmérő elvi blokkvázlata

A Copeland által megépített készülék blokkvázlatát a 4. ábra mutatja. A G_1 jelű generátor szolgáltatja az 5 MHz frekvenciájú mérőáramot. Az $F1$ szűrő a generátor esetleges falharmonikusait szűri ki. A vizsgálandó D dióda egyenáramú előfeszítését a DC jelű egység végzi az $F2$ aluláteresztő szűrőn keresztül. A diódán létrejövő nagyfrekvenciás feszültséget az ω és 2ω jelű 5 MHz, ill. 10 MHz-re hangolt szelektív detektorok mérik, ezek kimenete az X-Y íróhoz kapcsolódik, ahol a megfelelő konstansok figyelembevételével az $N^{-1}(w) + w$ profil jelenik meg. Későbbi változatokban a 2ω jelű szelektív vevő kimenete és az író bemenete közé logaritmáló egységet iktattak, s így a profil egyébként szokásos, kényelmesebb ábrázolását lehetett elérni.

A készülék működési elve és blokkvázlata valóban igen egyszerű és szellemes. A megvalósítás során viszont bonyolult problémák merülnek fel. Az egyik ilyen nehézség, mely az eredeti munkában is szerepel, az impedanciaillesztés — a dióda áramkörét ui. úgy kell illeszteni a generátorhoz, hogy 2ω frekvencián végtelen impedanciájú legyen, ennek megfelelően kell a dióda szórt kapacitását is kihangolni. A parazita áramköri elemek hatásával E. G. Schibli [22] foglalkozott részletesen. Ő hívta fel a figyelmet többek közt arra is, hogy a második harmonikus nemcsak a dióda nemlineáris C-V karakterisztikája miatt jöhet létre, hanem egyéb nonlinearitások miatt is, pl. főként a dióda átvezetésének nonlinearitása miatt. Itt kell megjegyezni, hogy a modulációs módszernél, illetve a pontonkénti méréseknél is fi-

gyelembe kell venni a dióda ohmos átvezetését, ill. annak feszültség szerinti változását [23], de mivel itt a mérés elve nem a nonlinearitáson alapszik, ez a hatás sokkal kisebb, elsősorban a kapacitásmérő műszer minőségétől függ. Csak gyenge egyenirányító hatást mutató diódáknál (pl. Hg kontaktus tiszta Si felületen) jön szóba.

Franciaországban a Thomson-CSF laboratóriumban építettek Copeland-féle elven működő, de némi-
leg módosított készüléket [24].

Magyarországon a Copeland-féle mérési elvet tudomásom szerint a HIKI-ben és a TKI-ban tanulmányozták tüzetesebben. Ennek során a TKI-ban új elven működő készüléket hoztak létre, melynek működése szintén a dióda nem lineáris karakterisztikáján alapul, de nem olyan érzékeny a bemenő kör hangolásra [25]. E módszer szerint az 1 MHz frekvenciájú mérőjelet 50 kHz-cel modulálják és az így létrejövő 1,05 MHz, 1 MHz és 0,95 MHz frekvenciájú jeleket adott amplitúdókkal a mintára kapcsolják. A nonlinearis C-V karakterisztika miatt a diódán a jelek keverednek és az 1 MHz vivőfrekvencián kívül megjelenik az 50 kHz különbségi frekvencia is, melynek amplitúdója a koncentrációra lesz jellemző. Erre a mérési elvre a TKI szabadalmat kapott.

Impulzus módszerek

A nagyfrekvenciás méréseknek ezt a másik csoportját elméletileg Fourier-transzformációval származtathatjuk az előzőből. A koncentrációmérés itt a tértöltési tartomány változásához tartozó töltés-változás mérésére van visszavezetve.

Az első ilyen módszert Gray és Adler [26] írták le. Ők töltés- C^{-1} mérést végeztek. A töltést egy négyszög alakú záróimpulzus hatására a külső körben folyó áram integrálásával, a C^{-1} -et pedig erre az impulzusra szuperponált nagyfrekvenciás mérőjellel mérték. A töltés C^{-1} szerinti deriváltja a (7) és (11) egyenlet szerint

$$\frac{dQ}{d\left(\frac{1}{C}\right)} = \varepsilon A \frac{dQ}{dw} = \varepsilon A^2 q N(w) \quad (15)$$

arányos a koncentrációval. A megépített mérőberendezés csak töltés- C^{-1} karakterisztikát vett fel, melynek grafikus deriválásával állították elő a profilt.

Direkt profilmérési módszert írt le Ladbrooke és Carrol [27]. E módszer szerint a diódára áramgenerátorból záróirányú négyszögimpulzust kapcsolnak és mérik a dióda feszültségének idő szerinti első és második deriváltját. A diódára kényszerített záróirányú áram, a tértöltési réteg szélességét növeli (11) szerint:

$$I dt = dQ = AqN(w) dw, \quad (16)$$

illetve

$$I = AqN(w) \frac{dw}{dt},$$

ahol I a diódán átfolyó záróirányú áramsűrűség.

A kiürített réteg növekedésével együttjáró feszültségnövekedés pedig (6) alapján:

$$dV = \frac{-q}{\varepsilon} wN(w) dw. \quad (17)$$

(16) és (17) összevetésével

$$\frac{dV}{dt} = \frac{-w}{\varepsilon} I, \quad (18)$$

tehát állandó árammal való meghajtáskor a feszültség első deriváltja a kiürített réteg vastagságával arányos. A második derivált pedig:

$$\frac{d^2V}{dt^2} = \frac{-I}{\varepsilon} \frac{dw}{dt}, \quad (19)$$

ide (16)-ot behelyettesítve és átrendezve kapjuk hogy

$$N^{-1}(w) = \frac{-qe}{I^2} \frac{d^2V}{dt^2}, \quad (20)$$

azaz a feszültség idő szerinti második deriváltja a koncentráció reciprokával arányos.

Ennek a módszernek egy analogonját ugyan-
ebben az évben közölték le [28]. Ebben az esetben adott feszültségre feltöltött diódaátmenetet sütnék ki állandó árammal, és mérik a feszültség idő szerinti deriváltjait.

Ezek a mérési elvek a laboratóriumi megvalósítás szintjéig jutottak. A fő probléma az, hogy a diódára kapcsolt áram egy része a dióda záróirányú átvezetésén keresztül záródik és nem hoz létre tértöltést. A szokásos mérődiódák (pl. Hg dióda) záróirányú átvezetése nagyrészt felületi szivárgási áram, ami bonyolult és nem jól reprodukálható módon függ a feszültségtől és a felület-előkészítéstől. Az egyetlen kiút az, hogy a meghajtó impulzust ennél a szivárgási áramnál jóval nagyobbra kell választani, ekkor viszont a jelenség igen gyorsan játszódik le, ami nagyfrekvenciás meghajtó és differenciáló áramkörök alkalmazását teszi szükségessé. Pl. a [27] publikációban szereplő becslés alapján a felületi szivárgási áram felső korlátja 10^{-4} A/cm², ezért a meghajtó áramimpulzus amplitúdóját 10^{-3} A cm⁻² értékűnek, a deriváló áramkörök időállandóit pedig 6,4 μ s, illetve 0,78 μ s értékűnek választották. (A diódák előfeszítés nélküli kapacitása 50...10 pF nagyságrendű volt.)

A két mérési elv egyesítése

Az 1. táblázatban szemügyre vehetjük a két módszer főbb különbségeit.

Összefoglalva megállapíthatjuk, hogy mind a két módszernek vannak előnyei és hátrányai. A modulációs módszerek a mérendő diódával szemben kisebb követelményeket támasztanak, a nagyfrekvenciás módszerek viszont az elektronikai megoldás szempontjából elegánsabbak, nagyobb stabilitást biztosítanak. A két módszer közötti választásnál inkább az látszik döntőnek, hogy az illető kutatóhelyen az alacsonyfrekvenciás és analóg, vagy a nagyfrekvenciás technika területén rendelkeznek-e több szakértelemmel.

Tulajdonság	Modulációs módszer	Nagyfrekvenciás módszer
Meghajtás	V generátor	I generátor
W mérés	C mérés + reciprok képzés	C ⁻¹ mérés
N mérés	$\frac{dC}{dV}$ képzés; dV állandó + számítás	N ⁻¹ -gyel arányos jel mérése $dQ \sim N(w)dw$ állandó
Pontosság	függ az egyenáramú előfeszítéstől	az egyenáramú előfeszítéstől nem függ
Felépítés	bonyolult analóg áramkörök, stabil DC szintek	konvencionális alapáramkörök
Kis kapacitás mérése*	viszonylag könnyen megoldható	nehéz a parazita elemekre való túlérzékenység miatt
Mérendő diódák illesztése (hangolás)	nem kritikus	alapvetően fontos
Parazita elemek	könnyen korrekcióba vehetők	illesztésnél figyelembe kell venni
Dióda átvezetése		az átvezetés N mérésnél hibát okoz

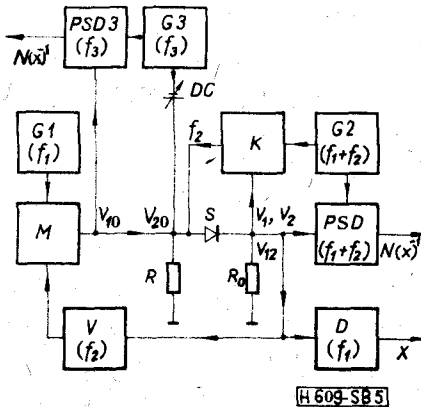
* Kis kapacitások mérésére akkor lehet szükség, ha pl. kis felületű próbadiódákkal akarunk laterális inhomogenitást vizsgálni, vagy kis kapacitású kész eszközt mérünk.

Az utóbbi időben két egymástól független helyen számoltak be olyan készülék építéséről, melynél a két módszer előnyei egyesítve vannak a hátrányok nélkül.

Az egyik ilyen készüléket a SZUTA Novoszibirszki Félvezető Intézetében készítették [29]. Személyes közlés szerint ebből a berendezésből több működik a Szovjetunió különböző intézeteiben. A készülék egyszerűsített blokkvázlatát az 5. ábra mutatja. A készülék működését az alábbiak szerint követhetjük végig. A G₁ jelű generátor f₁ frekvenciájú jele az M modulátoron keresztül az S jelű mérendő diódára kerül (V₀₁). Az $R \ll \frac{1}{\omega C}$ ellenállás a generátor kimenő impedanciája, tehát a meghajtás feszültség-generátorból történik. A diódán átfolyó árammal arányos jel (V₁) az R₀ ellenálláson jelenik meg.

A V₁ jelet a K jelű keverő egység a G₂ generátor f₁+f₂ frekvenciájú jelével keveri, kimenetén megjelenik az f₂ frekvenciájú jel (V₂₀), melynek amplitúdója a V₁-gyel arányos. A diódán átfolyó f₂ frekvenciájú árammal arányos jel az R₀ ellenálláson jelenik meg (V₂), innen a V negatív visszacsatoló egységen keresztül az M modulátorba jut és így szabályozza a V₁₀-et, hogy V₂ állandó szintű legyen, azaz

$$\text{konst.} = V_2 \sim V_{20} C \sim V_1 C \sim V_{10} C^2, \quad (21)$$



H 609-SB 5

5. ábra. A SZUTA Novoszibirszki Félvezető Intézetében készített profilmérő elvi blokkvázlata

innen látszik, hogy

$$C^{-1} \sim V_1; \quad C^{-2} \sim V_{10}. \quad (22)$$

A D jelű detektor, mely csak az f₁ frekvenciájú jelet egyenirányítja a térkitöltési tartomány szélességével arányos kimenő jelet szolgáltat. A koncentrációval arányos kimenő jel képzéséhez figyelembe kell venni a mérendő dióda nonlineáris C-V karakterisztikáján létrejövő keveredését a két mérőjelnek. Ennek eredményeképpen az R₀ ellenálláson f₁+f₂ frekvenciájú jel is megjelenik, ennek amplitúdója

$$V_{12} \sim V_{10} V_{20} \frac{dC}{dV}. \quad (23)$$

(21) és (22) összefüggésekből (23)-ba V₁₀ és V₂₀-t behelyettesítve kapjuk

$$V_{12} \sim \frac{1}{C^3} \frac{dC}{dV} \sim N^{-1}, \quad (24)$$

ezt a jelet a PSD jelű fázisérzékeny detektor érzékeli. A D és PSD egységek kimenő jelei — az utóbbi esetleg logaritmálás után — megjelenítő műszerre csatlakoztathatók és a dióda egyenáramú előfeszítését változtatva a profil megjeleníthető. A készülék tartalmaz egy másik, modulációs rendszerű lehetőséget is N mérésére. A G_s alacsonyfrekvenciás (30...50 Hz) generátor modulálja a dióda egyenáramú előfeszítését és a PSD 3 jelű fázisérzékeny detektor kimenetén a V₁₀ szint f₃ frekvenciás modulációjával arányos jel jelenik meg. Mivel a visszacsatolás következtében V₁₀ ~ C⁻², ez a jel:

$$\frac{dV_{10}}{dV} \sim \frac{d(C^{-2})}{dV} \sim N^{-1} \quad (25)$$

szintén a koncentráció reciprokával lesz arányos. Mindkét üzemmód esetén a meghajtás vezérelt amplitúdójú feszültséggenerátorral történik, tehát a módszer rendelkezik az előbbi két mérési módszer előnyeivel, azok hátrányai nélkül. (Nem érzékeny a hangolásra, a szórt kapacitásokra, lehet kis kapacitásokat is mérni és a derivált mérésének pontossága nem függ az egyenáramú munkaponttól.)

A másik ilyen készüléket G. L. Miller építette a Bell Laboratóriumban [30]. Ennek megoldása

analog az előbbi készülék alacsonyfrekvenciás részével. A kapacitásmérő áramkör itt is szabályzott feszültséggenerátorból ad jelet a diódára, oly módon, hogy a rajta átfolyó áram állandó legyen. Így a diódán mérhető feszültség a kiürített réteg vastagságával arányos, ennek a jelnek bizonyos hányadát egy kb. 200 Hz frekvenciájú szaggató hozzáadja a dióda egyenáramú előfeszítéséhez és méri a készülék az ennek hatására létrejövő dw változást, mely arányos N^{-1} -gyel [l. (6) ui. $dV = \text{állandó}$]. Logaritmálás után a kimeneten $\log N$ -nel és w -vel arányos kimenő jelek jelennek meg.

Összefoglalás

Ebben a dolgozatban az elektronikus berendezések egy speciális családjáról, a félvezető anyagok technológiai kutatásánál alkalmazott profilmérő készülékekről igyekeztünk irodalmi összefoglalást adni. A felosztás talán önkényesnek tűnik, lehetett volna pl. az említett Post Office Profile Plotter-t külön említeni, mint olyan készüléket, mellyel roncsolásos módon ugyan, de szinte tetszőleges vastagságú rétegek vizsgálhatók.

Terjedelmi korlátok miatt nem foglalkoztunk a mérődióda készítésének problémáival.

Az adatjellegű információkon kívül reméljük sikerült bepillantást adni korunk elektronikai kutatófejlesztő munkáinak egy érdekes, sok eredeti ötlettel bíró területére, ahol a régen ismert diódaműködésnek egy-egy független újra átgondolása eredményezett új elven működő készülékeket.

Köszönetnyilvánítás

A szerző köszönettel tartozik dr. Szép Iván tudományos igazgatóhelyettesnek azért a támogatásért, amiben az MTA MFKI-ben a profilmérési munkákat részesítette.

Henk Károlyt a modulációs rendszerű készülékek megépítéséért illeti köszönet.

A kézirat készítésekor kapott hasznos tanácsokat és kiegészítéseket pedig Ambrózy András professzornak, Gergely Istvánnak és Pödör Bálintnak szeretném megköszönni.

I R O D A L O M

- [1] András A.-né, Barna Á., Barna B. P., Beleznyay F., Mojzes I., Pödör B., Sebestyén T., Stark Gy., Szentpáli B., Szép I.: GaAs alapú Gunn-diódák a 7–10 GHz-es frekvenciasávra. Híradástechnika, 1977. 2. sz. 42.
- [2] NBS Special Publication 400–10. Ilyen készüléket (ASR–100) gyárt a Solid State Measurements Inc. Monroville. Pa.
- [3] H. K. Henisch: Rectifying semiconductor contacts. Oxford, Clarendon Press, 1957.
- [4] A. Ambrózy: Periodica polytechnica. Electronics Letters 20/2, 142–155, 1976.
- [5] C. O. Thomas, D. Kahng, R. C. Manz: Impurity distribution in epitaxial silicon film. J. of the Electrochemical Soc. 109. 1055–1061, 1962.
- [6] I. Amron: A slide rule for computing dopant profiles in epitaxial semiconductor films. Electrochemical Technology 2, 327–334, 1964.
- [7] G. W. Rentlinger, S. J. Heqas, D. J. Sidor, B. Schwarzl: Au automatic test set for measuring concentration profiles in epitaxial films. Solid-State Electronics 12, 31–39, 1969.
- [8] F. P. Califano, A. Luciano: Au automatic test set for measuring the doping profile of semiconductor epitaxial layers. The Rev. of Sci. Instr. 41, 865–869, 1970.
- [9] B. J. Gordon, H. L. Stover, R. S. Marp: A new impurity profile plotter for epitaxy and device. Silicon Device Conf. Gaithersburg, Maryland 1970.
- [10] P. J. Bazandall, D. J. Collier, A. F. Rray: An instrument for the rapid determination of semiconductor impurity profiles. J. of Physics E. 4, 213–221, 1971.
- [11] A Shandon Southern cég hozta forgalomba Profile Plotter Type 367 jelzéssel. Újabban az MSI Electronics Inc. is forgalomba hozott ilyen készülékeket, különböző tartozékokkal (pl. Hg dióda).
- [12] Henk, K., Szentpáli B.: Félvezető rétegszerkezetek szennyvezéslésének automatikus vizsgálata. A szilárdtestkutatás korszerű berendezései c. konferencia, Budapest, 1973.
- [13] C. A. T. Salama, F. Holmes: A technique for directly plotting the doping profile of semiconductor wafers. Solid-State Electronics 19, 178–181, 1971.
- [14] A műszert a Syncrest Ltd. gyártja és hozza forgalomba a British Post Office kutatólaboratóriumában kidolgozott szabadalom alapján.
- [15] T. Ambridge, C. R. Elliott, M. M. Raktor: The electrochemical characterization of n-type gallium arsenide. J. of Appl. Electrochemistry 3, 1–15, 1973.
- [16] T. Ambridge, M. M. Raktor: Electrochemical capacitance characterization of n-type gallium-arsenide. J. of Appl. Electrochemistry 4, 135–142, 1974.
- [17] T. Ambridge, M. M. Raktor: An automatic carrier concentration profile plotter using an electrochemical technique. J. of Appl. Electrochemistry 5, 319–328, 1975.
- [18] A. Ambrózy: A simple dC/dV measurement method and its applications. Solid-State Electronics 13, 347–353, 1970.
- [19] J. A. Copeland: A technique for directly plotting the inverse doping profile of semiconductor wafers. IEEE Trans. on El. Dev., ED–16, 445–449, 1969.
- [20] N. I. Meyer, T. Guldbandsen: Method for measuring impurity distributions in semiconductor crystals. Proc. of the IEEE 51, 1631–1637, 1963.
- [21] D. Leenov, R. G. Stewart: A proposed method for rapid determination of doping profiles in semiconductor layers. Proc. of the IEEE 56, 2095–2096, 1968.
- [22] E. G. Schibli: Effects of parasitic elements on the second-harmonic method. Int. J. Electronics 334, 679–687, 1973.
- [23] P. Kramer, C. de Vries, L. J. van Ruyven: The influence of leakage current on concentration profile measurements. J. of the Electrochem. Soc. 122, 314–316, 1975.
- [24] B. Baroux, M. Dugué, A. Sev: Étude et réalisation d'un analyseur de profil pour la mesure de la répartition des impuretés dans un matériau semiconducteur. Rev. Techn.
- [25] Simek M., Kálmán L., Gerő J.: Új nagyfrekvenciás mérési módszer félvezető szeletek koncentráció profiljának regisztrálására. TÁKI Évkönyv, 1975. 227–244, 1975.
- [26] P. E. Gray, R. B. Adler: A simple method for determining the impurity distribution near a p-n junction. IEEE Trans. on Electron Devices ED–12, 475–477, 1965.
- [27] P. H. Ladbroke, J. E. Carroll: The use of a rectangular current pulse for tracing semiconductor resistivity profiles. Int. J. Electronics 31, 149–172, 1971.
- [28] R. Stocker, E. Baldinger: Eine Methode zur Messung des Dotierungs profilen von Halbleiter-Dioden. Helvetica Phys. Acta 44, 199, 1971.
- [29] R. S. Naknmanson: A technique for directly plotting the doping profile of semiconductor wafer ("8-shaped way"). Solid-State Electronics, 19, 87–91, 1976.
- [30] G. L. Miller: A feedback method for investigating carrier distribution in semiconductors. IEEE trans. on Electron. Devices ED–19, 1103–1108, 1972.
- [31] G. L. Miller, D. A. H. Robinson: Looking inside semiconductor devices Bell Lab. Record 129–135, Febr. 1975. A készüléket a Leighton Electronics Inc. hozza forgalomba.