

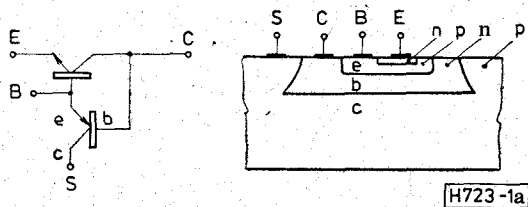
Félvezető rétegek soros ellenállásának szerepe és vizsgálata az adalékeloszlás mérése alapján

DR. GOTTWALD PÉTER
BME Elektronikus Eszközök
Tanszék

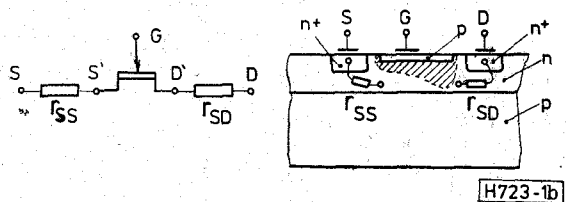
A félvezető eszközök tulajdonságait az adalékatomok eloszlása döntően befolyásolja. Az adalékeloszlástól függ néhány parazita elemnek, mint például a p-n átmenetekhez kapcsolódó kristályréteg soros ellenállásnak a nagysága is. Ebben a cikkben a Budapesti Műszaki Egyetemen kifejlesztett adalékeloszlásmérő berendezés egy kiegészítő egységét ismertetjük, amely az adalékeloszlásból kiindulva határozza meg egy kristályréteg közelítő soros ellenállását. Ez a mérés szeleten levő eszközön is elvégezhető, mert a mérőfrekvencia alacsony, míg pl. ha a lezárt átmenet kapacitásának jóságai tényezőjéből következtünk a soros ellenállás nagyságára, mérés-technikai okokból rendszerint igen magas mérőfrekvenciát kell alkalmaznunk.

1. Bevezetés

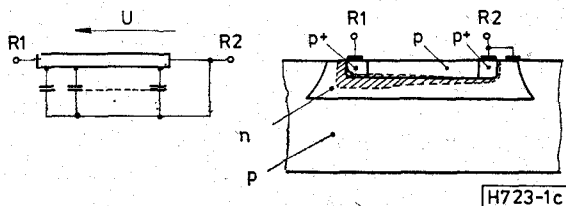
A félvezető eszközök előállításánál általában mindig létrejönnek nem tervezett, ún. parazita áramköri elemek is. Így például egy integrált áramköri bipoláris tranzisztorttal mindig összekapcsolódik egy nem kívánt komplementer tranzisztor is, és egy térvezérlésű tranzisztor csatornáját rendszerint csak egy-egy soros ellenállásként megjelenő, nem vezérelt csatornaszakaszon keresztül tudjuk az áramkörbe iktatni. Integrált áramköri ellenállásainkat mindig terheli egy elosztottan jelentkező réteggkapacitás, és a p-n átmenethez — az „átszúrás” esetét kivéve — soha sem férhetünk hozzá közvetlenül, csupán egy kristályréteg soros ellenállásán keresztül. A felsorolt eseteket mutatjuk be az 1/a, b, c, d ábrákon.



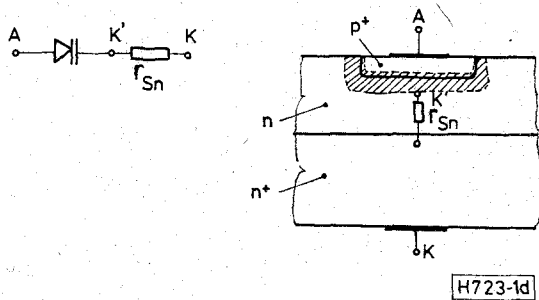
1a ábra. IC tranzisztorhoz kapcsolódó parazita tranzisztor



1b ábra. Vezérelt csatornaszakaszok ellenállása JFET tranzisztorban



1c ábra. Parazita kapacitás IC ellenállás mentén



1d ábra. Planáris dióda soros ellenállása záróirányban

Az áramköri elemek konstrukciójánál arra kell törekedni, hogy a parazita elemek az „alap”-eszköz működését csak kevésbé befolyásolják. Emellett a félvezető eszközöket tartalmazó áramkörök kialakításában általában tekintetbe kell venni ezeknek a nem szándékosan jelenlevő elemeknek a hatását is.

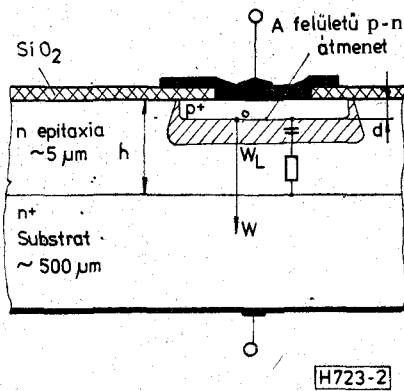
2. A félvezető kristályréteg soros ellenállásának szerepéről

Az áramköri elemek konstrukciójánál arra kell törekedni, hogy a parazita elemek az „alap”-eszköz működését csak kevésbé befolyásolják. Emellett a félvezető eszközöket tartalmazó áramkörök kialakításában általában tekintetbe kell venni ezeknek a nem szándékosan jelenlevő elemeknek a hatását is.

Beérkezett: 1980. II. 14.

ellenállása. Ennek eredetét mutatja be egy záróirányban előfeszített planáris kivitelű p-n dióda met-szetén a 2. ábra.

Ez a soros ellenállás nagy nyitóirányú áramoknál linearizálja az egyébként exponenciális jellegű I-U karakterisztikát, záróirányban pedig elrontja a differenciális kapacitásként viselkedő dióda jósági tényezőjét. A jósági tényező romlása hátrányos azoknál az eszközöknél, ahol éppen a p-n átmenet elektromosan változtatható kapacitását hasznosítják. (Pl. kapacitás- vagy varikap-diódák, amelyeket legtöbbször rezonáns körök hangolására használnak.) Ha viszont a változó kapacitású diódát valamely nagyfrekvenciás áramkörben szabályozott elemként alkalmazzuk, sokszor okoz gondot, hogy a kapacitás változása mellett a dióda soros ellenállása is változik. Ilyen probléma léphet fel pl. egy automatikus kiegyenlítésű kapacitásmérő hídban, amelynek egyik ágában kiegyenlítő kapacitásként kapacitásdiódát alkalmazzunk [1].

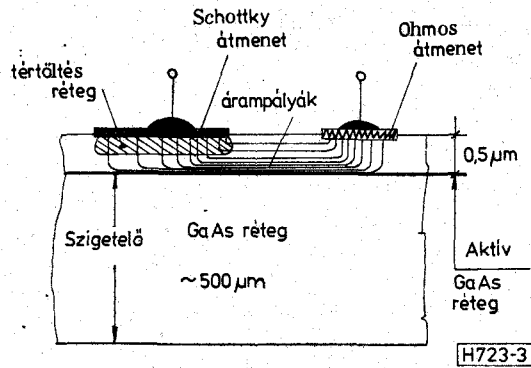


2. ábra. Áramutak igen vékony epitaxiális rétegben létrehozott Schottky diódában

A mikrohullámú technika speciális kivitelű változó kapacitású diódákat is alkalmaz, parametrikus erősítésre. Ezen diódák soros ellenállása az erősítő saját zajának túlnyomó részét adja, s így jelenléte kifejezetten káros. A félvezető rétegellenállás sok alapvető fontosságú mérési feladat megoldását is megnehezíti. Ismeretes pl., hogy egy félvezető réteg adalékeloszlása a rajta létrehozott p-n (vagy Schottky-) átmenet tértöltés-kapacitásának feszültségfüggéséből meghatározható [2], [3].

Gyakran fordul elő, hogy a vizsgálandó struktúra egy igen vékony (pl. 1 μm-nél vékonyabb) epitaxiális réteg, amelyet egy nagy fajlagos ellenállású hordozóra növesztettek. (Ilyen struktúrában alakítják ki a legtöbb mikrohullámú GaAs eszközt.) Az adalékeloszlás meghatározására ilyenkor egy planáris kivitelű Schottky-diódát alakítanak ki. A 3. ábrán látható jelentős és különböző hosszúságú áramutak miatt nehéz elkülöníteni a mérhető impedanciából a rétegek kapacitás tényleges értékét. Így az adalékeloszlás meghatározása nehezebbé és pontatlanabbá válik [4].

A felhozott példák alátámasztják a soros ellenállás mérés útján történő meghatározásának jelentőségét. A mérési módszerek a feladat jellegétől függően eltérőek lehetnek. (Pl. [5].)



3. ábra. Planáris Si varikap dióda vázlatos szerkezete

Ez a cikk a planáris dióda-struktúrák (pl. varikap-diódák) soros ellenállásával arányos mennyiség mérésével foglalkozik. Az ismertetésre kerülő berendezéssel pl. egy varikap-dióda gyengébben adalékolt oldalán egy tetszőlegesen kiválasztott kristályréteg által képviselt ellenállás megvizsgálható.

3. A mérés elméleti alapjai

Vékony epitaxiális rétegben létrehozott, elegendően nagy felületű planáris p-n átmenetnél — ilyen pl. egy planáris Si varikap-dióda szerkezete — a szélhatások elhanyagolása kevés hibát okoz. Ez a hatás egyébként figyelembe vehető [6], de ha indokolt esetben elhanyagoljuk, számításaink jelentősen egyszerűsödnek. A 2. ábra jelöléseivel ekkor az A felületű, h vastagságú epitaxiális rétegben d mélységben létrehozott p-n átmenet alatt a keletkező soros ellenállás:

$$r_s = \frac{1}{q \cdot A} \cdot \int_{w_L}^{h-d} \frac{dw}{N(w) \cdot \mu(w)} = \frac{1}{q \cdot A \cdot \bar{\mu}} \int_{w_L}^{h-d} \frac{dw}{N(w)} \quad (1)$$

Itt w_L a tértöltésréteg feszültségfüggő vastagsága a gyengén adalékolt oldalon, $N(w)$ pedig az átmenet síkjától számított mélység (w) függvényében változó adalékkoncentráció. q az elektron töltése, μ pedig a töltéshordozó mozgékonyosság. Bár a mozgékonyosság általában az adalékkoncentráción keresztül függ a helytől is, olyan esetekben, amikor a soros ellenállást (1) alapján értékeljük ki, rendszerint helyfüggetlen, átlagosmozgékonyosság-értékkel ($\bar{\mu}$) számolunk. Az átmenet ellenkező oldalán adódó soros ellenállást azért hanyagoltuk el, mert a p-n átmenet rendszerint sekély diffúzióval készül ($d \ll h$), és mert rendszerint ezen az oldalon sokkal magasabb az adalékkoncentráció. (Némileg ellene szól az elhanyagolásnak, hogy ezen az oldalon viszont általában sokkal kisebb μ értéke, mint a másik — rendszerint n típusú — rétegben.) Varikap-diódák optimális kialakításánál nemcsak a kapacitás feszültségfüggésére kell figyelmet fordítani, hanem a soros ellenállás nagyságára és változására is [7].

Segítségét jelent a fejlesztés fázisában, ha lehetőség van annak kiértékelésére, hogy egy, az átmenet alatt tetszőlegesen kiválasztott profilszakasz milyen mértékben járul hozzá a teljes soros ellenálláshoz.

Ez az alábbi mennyiség mérését jelenti:

$$S = \int_{w_L}^{w_H} \frac{dw}{N(w)}. \quad (2)$$

A kiválasztott profilszakaszt a w_L és w_H koordinátákkal jellemzett síkok fogják közre. A (2) szerinti S mennyiség mérését teszi lehetővé az általunk kifejlesztett adalékeloszlás-mérő berendezés egy részegysége, amelyet most ismertetünk.

4. Az áramkör működési alapelve

A berendezés alapvető része az adalékeloszlásmérőegység, amelynek ismertetése [1]-ben megtalálható. A működést ezért itt csak vázlatosan érintjük.

A megvizsgált struktúra (Schottky- vagy p-n átmenet) zárófeszültsége kb. 2 perc alatt végigfut egy beállított kezdő- és végérték között. Eközben a tértöltésréteg széle az átmenet síkja felől a szubsztrátum felé mozog. Ezalatt folyamatosan létrejön a tértöltésréteg szélének az átmenet síkjától mért távolságával arányos feszültség, valamint egy, az adalékkoncentrációnak ezen a helyen felvett ériékével is összefüggő feszültség:

$$U_w = \text{Konst}_1 \cdot w, \quad (3a)$$

$$U_T = \text{Konst}_2 \cdot N(w) \cdot w^3. \quad (3b)$$

Ezek képezik a berendezés analóg aritmetikai egységének bemenő jeleit, amelyekből az előállítja az x - y rajzolóat vezérlő, w -vel és $(\lg N(w))$ -vel arányos feszültséget, illetve az elektronikusan integrálandó

$$U_v = \text{Konst}_3 \cdot \frac{1}{N(w)} \quad (4)$$

feszültséget.

Az integrálásnak a w változó szerint kell megtörténnie, beállítható w_L és w_H értékek között. Mivel azonban a profil mérése közben az idő függvényében változó U_v és U_w feszültségek állnak rendelkezésre, az áramkör az integrálást az időtartományban végzi el, a következő módon. Az U_v feszültséggel áramgenerátort vezérlünk, amelyek áramát minden olyan időpillanatban τ ideig rávezethetjük egy integráló kapacitásra, amikor a tértöltésréteg széle w_L és w_H értékek között áthaladván éppen

$$\Delta w = \frac{w_H - w_L}{10} \quad (5)$$

értékkel tovább tolódott.

A profilszakasz átpásztázása közben az integráló kapacitás így

$$U_c = \text{Konst} \cdot \frac{1}{w_H - w_L} \cdot \int_{w_L}^{w_H} \frac{dw}{N(w)} \quad (6)$$

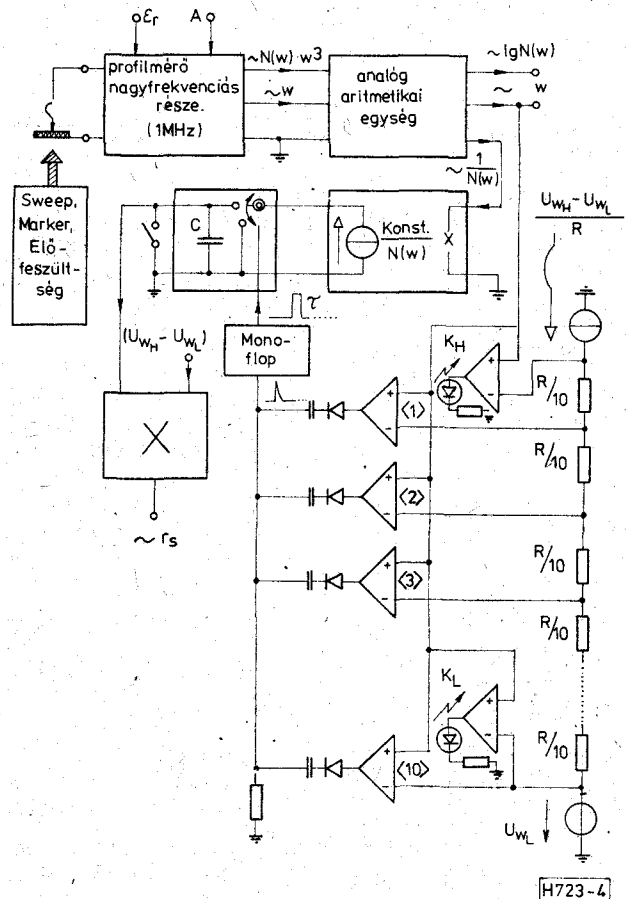
feszültségre töltődik fel. (Ez érthető, hiszen az integrálközelítő összeg egy tagja $w/N(w)$ helyett $\tau/N(w)$ -vel arányos. Míg w (5) szerint $(w_H - w_L)$ -l arányos, addig τ az integrálközelítő összeg minden tagjában mindig ugyanakkora, függetlenül az in-

tegrálási intervallum szélességétől.) (2)-höz hasonló eredményt akkor kapunk, ha az integráló kapacitás U_c feszültségét a mindenkor $(w_H - w_L)$ -l arányos mennyiséggel megszorozzuk:

$$U_c' = U_c \cdot (w_H - w_L) = \text{Konst} \cdot \int_{w_L}^{w_H} \frac{dw}{N(w)} \sim S. \quad (7)$$

5. A feladat áramkörti megoldása

A megvalósított áramkör működését a 4. ábrán követhetjük nyomon. Az adalékeloszlásmérőegységgel az adalékprofil tetszőleges pontját izoláltan is megmérhetjük. Ekkor a vizsgált struktúra előfeszültsége egy előre beállított, időben nem változó érték. Ily módon kikereshető, milyen előfeszültség-értékekhez tartozik a profilnak az a w_L és w_H értékpárral közrezárt része, amelyet éppen vizsgálni szeretnénk. A határpontok izolált mérések előáll a w_L és w_H -nak megfelelő U_{w_L} és U_{w_H} feszültség. A 4. ábrán található 10 tagú ellenálláslánc alsó pontjának feszültségét U_{w_L} -re kell állítani, amelynek megtörténtét a K_L jelű komparátor jelzi. A felső pont feszültsége pedig U_{w_H} -ra állítandó, a lánc áramának szabályozásával. Ez a beállítás K_H jelű komparátorral ellenőrizhető. A C integráló kapacitás előzetes kiütése után elindítva egy olyan profilszakasz mérését, amely a soros ellenállás szempontjából vizsgál-



4. ábra. Soros ellenállás mérése az adalékprofil felhasználásával

landó réteget magában foglalja, az $\langle 1 \rangle \langle 2 \rangle \langle 3 \rangle \dots \langle 10 \rangle$ komparátorsorozat egymás után indítani fogja a $\text{Konst}/N(w)$ forrásáramú áramgenerátort kapuzó monostabil multivibrátort.

Az áram tehát minden olyan időpillanattól kezdődően τ időtartamig tölni fogja a C kapacitást, amikor a kiürített réteg széle — a kijelölt intervallumon áthaladván — éppen Δw értékkel tovább tolódott.

Az integráló kapacitás így fokozatosan feltöltődik, s a végfeszültség értékét kb. 10 sec-ig meg is őrzi, hogy a kiértékelés megtörténhessen.

A profilszakasz soros ellenállásával arányos feszültséget egy szorzó áramkör kimenetén kapjuk meg, mivel (7) szerint a kapacitás feszültségét még ($U_{wh} - U_{wl}$) értékkel meg kell szorozni.

6. Értékelés

A félvezető eszközök előállításának folyamatában fontos ellenőrző mérés az adalékeloszlás vizsgálata. Számos esetben döntő fontosságú az is, hogy egy változó adalékeloszlású félvezető réteg mekkora soros ellenállást képvisel.

Varikap-diódák esetében pl. a soros ellenállás nagysága és változása éppoly fontos eszközparaméter, mint maga a rétegek kapacitása. A varikap-diódák jósági tényezője még 100 MHz frekvencián is 100 nagyságrendjében van, ezért a jósági tényező (vagy maga a soros ellenállás) alacsony frekvencián nagyon

nehéz mérhető. A gyártás közbeni, szeleten való mérés azonban 100 MHz körüli mérőfrekvencián nem megoldható. Ezért lehet nagy jelentősége a soros ellenállás szeleten kialakított struktúrában történő vizsgálatának, amely az ismertett áramkörrel az adalékeloszlás felvételével egy időben megtörténhet.

A szerző köszönetét fejezi ki a feladat kitűzéséért Huszka Zoltán oki. villamosmérnöknek, valamint Dr. Ambrózy András professzornak a megvalósítás során nyújtott értékes együttműködésért.

I R O D A L O M

- [1] Dr. Gottwald Péter—Dr. Ambrózy András: Adalékeloszlás mérése vékony GaAs és Si epitaxiális rétegekben. Híradástechnika XXX/11—12, 363—366 old. 1979.
- [2] C. Opdorp: Evaluation of doping profiles from capacitance measurements. Sol. State. El. Vol. 11. pp. 397—406., 1968
- [3] Szentpáli B.: Félvezető rétegek adalékprofiljának mérésére szolgáló készülékek. Híradástechnika XXIX/11., 321—352. old., 1978
- [4] J. D. Wiley—G. L. Miller: Series Resistance Effects in Semiconductor C-V Profiling, IEEE Tr. on ED., Vol. ED.-22, No. 5. pp. 265—272., 1975
- [5] Gottwald P.: Változó kapacitású diódák soros ellenállásának mérése 330 MHz-en. II. Országos Méréstechnikai Konferencia, Budapest. 293—304. old., 1969
- [6] J. A. Copeland: Diode edge effect on doping-profile measurements, IEEE Tr. on E. D., Vol. ED-17., No. 5., pp. 404—407., 1970
- [7] G. Motál—B. Balogh: Optimization of varicap diode design, Sol. State El., Vol. 20., pp. 159—161., 1977