

**Mikroelektronika és technológia, V. sz gyakorlat**  
Technológiai mérések a monolit IC gyártási eljárás ellenőrzésére  
(Az „a” és „b” mérések közül az egyik előre megadottat kell elvégezni.)

a.) Kapacitás-feszültség mérése félvezető rétegszerkezeteken

Célkitűzés:

A gyakorlat célja a kapacitás-feszültség módszerek alapvető sajátosságainak megismerése, különös tekintettel a technológiát minősítő paraméterek meghatározási lehetőségeire. További cél a MOS rendszerek fizikai viselkedésének mélyebb megértése is.

A méréshez szükséges elméleti ismeretek:

A C-V módszerek adják a félvezető gyártástechnika egyik legjobban elterjedt ellenőrző eszközrendszerét. A C-V mérésekből nyert paraméterek egyaránt jellemezhetik a technológiát, illetve a legyártott eszközt.

Az 5.1 ábra foglalja össze röviden azokat a jellemzőket, amelyek egy MOS rendszerben szoros kapcsolatban vannak az előállítási technológiával.

Meghatározható a szilícium adalékolása, az adalékolás helyfüggése, és a felület közeli tartományok vezetési típusa. Ez annál is inkább fontos, mert az oxidnövesztés magas hőmérsékletű technológiai művelet, ennek során az adalékolás kisebb-nagyobb mértékben megváltozhat.

A szilícium tömb nehézfém szennyezői, valamint más kristályhibák a tiltott sáv sávszélektől távol eső tartományában hoznak létre megengedett energia állapotokat, amelyek a kisebbségi töltéshordozók élettartamát csökkentik. Az élettartamokra szintén jó becslés adható C-V módszerek alapján.

A szilícium és oxidjának határfelülete megfelelő technológia alkalmazása esetén igen közel áll az ideálshoz. Mindazonáltal az oxidáció során az oxid-szilícium átmeneten felszakadt kötések közül egyesek lekötetlenek maradhatnak. Ez a határfelületre lokalizált energia állapotokat eredményez a tiltott sávban. Ezek töltése ( $Q_{ss}$ ), az állapotok eloszlása ( $D_{it}$ ) és a sávgörbülés mentes esethez (flat-band, FB) tartozó felületi töltés ( $Q_f$ ) is igen pontosan vizsgálható.

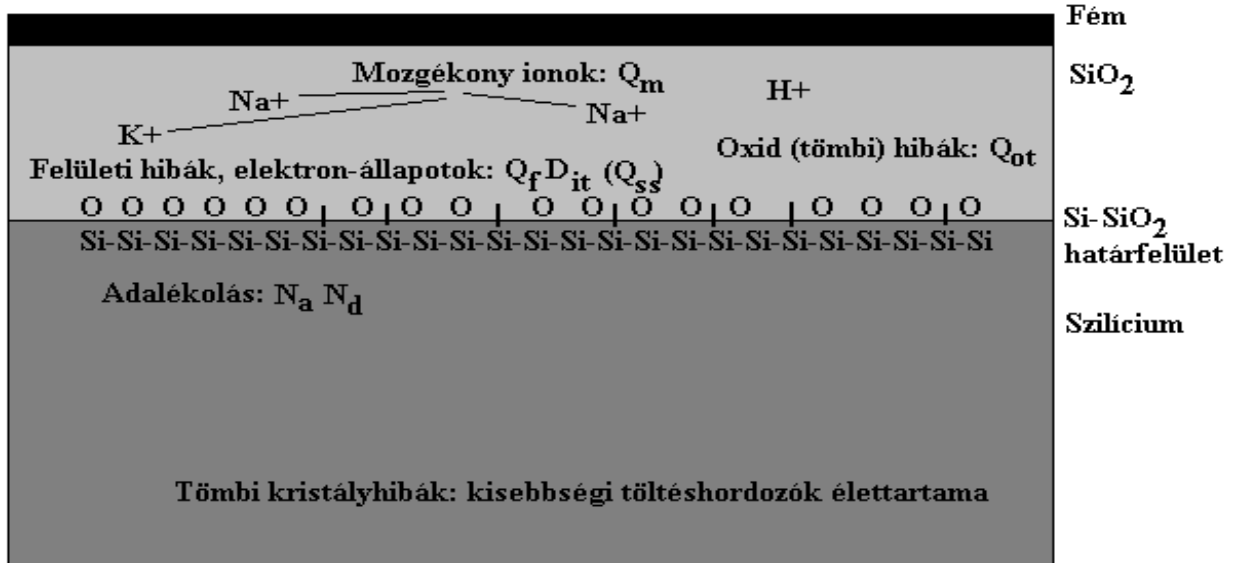
A szilícium oxidjában a technológiával vagy egyéb körülményekkel összefüggésben további töltések találhatóak. Az oxid tömbi hibái is töltöttek lehetnek, ionizáló sugárzás, vagy lavinaletörés során keletkezett forró-elektronok is bekerülhetnek a szigetelőbe ( $Q_{ot}$ ). Nem megfelelő tisztaság mellett az oxid tartalmazhat alkáli ionokat, amelyek magasabb hőmérsékleten térerő hatására elmozdulhatnak. Ez a mozgóképes töltés ( $Q_m$ ) instabilitásokat okozhat a MOSFET nyitófeszültségében.

A különféle töltések összegződött hatása az eszközök működését tekintve abban nyilvánul meg, hogy a vezérlő elektródára adott feszültség (töltés) egy része ezeket a töltéseket kompenzálja. Az eszköz nyitófeszültségét tehát a töltések jelenléte megváltoztatja. A tiltott sávba eső gyors felületi állapotok ( $D_{it}$ ) jelenléte az eszköz meredekségét is csökkenti, s növeli az eszközök zaját is.

A C-V mérés fő célja, hogy információt adjon a MOS a rendszer töltésviszonyairól, és a kész eszköz várható működéséről, még annak elkészülte előtt. Ezek a technológiát jellemző információk a MOS rendszer C-V görbéjének elemzéséből kaphatók meg. Az állandó értékű töltések hatására a görbe a feszültség tengely mentén eltolódik, a felületi potenciáltól függő töltések ( $D_{it}$ ) hatására a görbe ellaposodik (5.2 ábra). Ugyancsak a görbe eltolódása az eredménye a fém és a félvezető közötti kilépési munka különbségnek (kontakt-potenciál). Ennek megfelelően a töltések elkülönítése nem egyszerű, fel kell használni a töltések eredetével és tulajdonságaival kapcsolatos, egyéb ismereteket is (pld. hőmérséklet-függő tulajdonságok).

A technológus feladata, hogy a mérésből meghatározott töltések ismeretében olyan változtatásokról, esetleg új technológiai lépésekről döntsön, amelyek lehetővé teszik az eszközök működését károsan befolyásoló töltések csökkentését, esetleg más töltésekkel való kompenzálását.

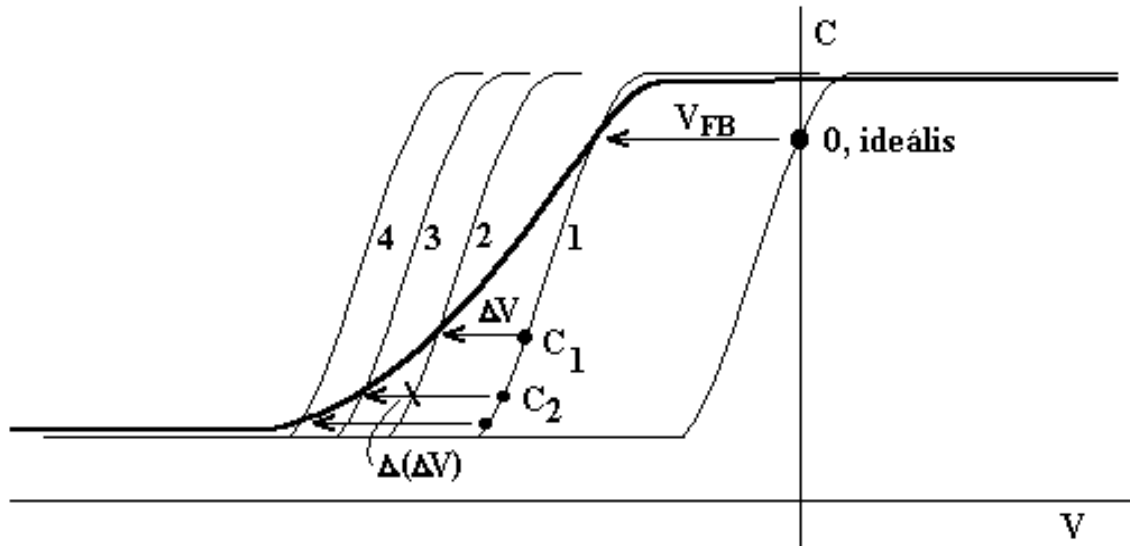
A mozgékony ionok száma kizárólag a tisztasági követelmények növelésével és szigorú betartásával tartható kellően alacsony szinten. A határfelületi állapotok sűrűsége ( $Q_{ss}$ ,  $Q_f$ ,  $D_{it}$ ) semleges gázban vagy redukáló atmoszférában való hőkezeléssel csökkenthető. Ilyen atmoszférában ugyanis az oxidáció folyamata leáll, a magas hőmérsékleten azonban lehetőség nyílik a határfelületi kötések további rendeződésére. Lehetőség van az oxidtöltések hatásának kompenzációjára és a nyitófeszültség adott értékre való beállítására az inverziós csatorna tartomány implantációjával is.



5.1. ábra. A MOS rendszerben C-V módszerekkel vizsgálható, technológiával összefüggő mennyiségek

A határfelületi töltések nemcsak az aktív eszközök működésében játszanak fontos szerepet, hanem az egész félvezető lapkán. Minthogy ezek általában pozitív töltést jelentenek, ezért az N típusú félvezető felületet borító oxid alatt akkumuláció található. Gyengén adalékolt P felületen ezzel szemben inverziós réteg alakul ki, ami a P tartományban kialakított összes eszközt rövidre zárhatja. Az efféle parazita csatornák kialakulásának megakadályozására a felület

közeliében erősen adalékolt rétegeket kell létrehozni az egymástól elválasztandó területek körül (csatorna stop).



5.2 ábra. Az oxid töltések és a felületi állapotok hatása a MOS szerkezet C-V görbéire (n félvezető felület esetére). A görbe eltolódása a  $Q_f$ ,  $Q_{ot}$ ,  $Q_m$  töltések és a fém-félvezető kilépési munkák eltéréseinek következménye. A görbe ellaposodását a felületi potenciállal változó betöltöttségű csapdák ( $D_{it}$ ) okozzák

#### Félvezető-felület, fém-felület

A felület, mint a tömbtől eltérő fizikai tulajdonságokat mutató tartomány, a félvezetők esetében meglehetősen nagy kiterjedésű térrészt foglalhat magába. Ennek oka az, hogy a félvezetőkben a töltések koncentrációja kicsi, így a határfelületen érvényesülő térerő vagy felületi töltés árnyékolásához jelentős térbeli kiterjedésű tértöltés tartomány szükséges.

A tértöltés tartomány töltése és a felületi potenciál közötti összefüggés a Poisson egyenlet megoldásával adható meg. A Poisson egyenlet a mozgékony töltések elhanyagolásával (kiürítéses közelítés) a következő:

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = -\frac{q}{\epsilon_{si}} N, \quad (5.1)$$

ahol  $\varphi$  a felület környezetében kialakuló elektrosztatikus potenciál,  $q$  az elemi töltés,  $\epsilon$  a félvezető dielektromos állandója,  $N$  az ionizált adalék atomok koncentrációja. A differenciálegyenlet kétszeri integrálásával (peremfeltétel:  $x = x_d$  esetén a térerő és a potenciál is nulla) az elektrosztatikus potenciál helyfüggése adódik

$$\varphi = \frac{qN(x^2 - x_d^2)}{2\epsilon_{si}}, \quad (5.2)$$

ahol  $x_d$  a kiürített réteg vastagsága. A felületen ( $x = 0$ ) a potenciál eltér a tömbi értéktől:

$$\varphi_s = \frac{qN x_d^2}{2\epsilon_{si}} \quad (5.3)$$

Figyelembe véve a tértöltést:

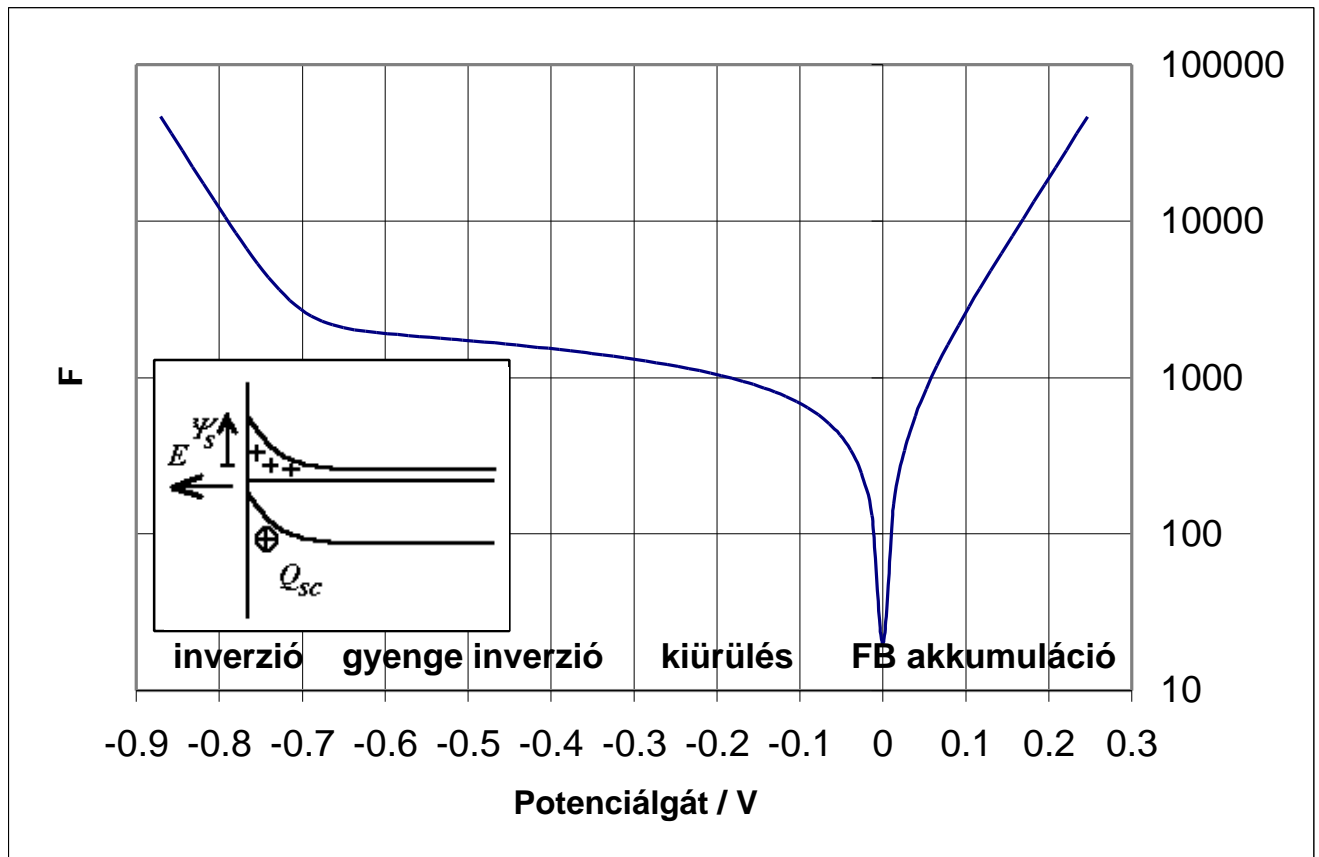
$$Q_{sc} = qN x_d \quad (5.4)$$

A félvezető felületegységére eső töltés az előbbi összefüggések alapján

$$Q_{sc} = \sqrt{2\epsilon_{si} q N \varphi_s} \quad (5.5)$$

A fenti összefüggések csak a felület kiürülése és gyenge inverziója esetén adnak igen jó közelítést, akkumulációra és erős inverzióra nem érvényesek.

A tértöltés tartomány összes töltése és a felületi potenciál közötti pontosabb összefüggés a Poisson egyenlet megoldásával adható meg. A megoldást ( $F(Y_s; F_F)$  függvény) az 5.3 ábra szemlélteti.



5.3 ábra. A félvezetők fizikájában alapvető fontosságú  $F(Y_s; F_F)$  függvény. A függőleges tengelyen a függvényérték, vagyis  $Q_{sc}/9 \times 10^{-12} \text{ As/cm}^2$  (logaritmikus ábrázolásban), a vízszintes tengelyen a  $Y_s$  felületi potenciálgát N félvezetőre (az adalékolás  $2.5 \times 10^{15} / \text{cm}^3$ , a tömbpotenciál  $F_F = -0.31$  V).

Látszik a kiürülés és a gyenge inverzió tartományában a négyzetgyökös kapcsolat  $Q_{sc}$  és  $\Psi_s$  között (5.5 összefüggés). A beillesztett ábra a felület közeli tartomány energia sávdiaagramját mutatja az erős inverzió esetére.

A  $Q_{sc}(\Psi_s)$  tértöltés analitikusan, zárt formában megadja az akkumuláció, kiürülés és inverzió esetére érvényes valamennyi töltés összegét (elektronok, lyukak, ionizált adalékatomok). A felületegységre eső tértöltés-kapacitás megadható a tértöltés deriváltja segítségével:

$$C_{sc}(\Psi_s) = -\frac{dQ_{sc}}{d\Psi_s}. \quad (5.6)$$

MOS szerkezet esetén az oxidkapacitás és a tértöltés-kapacitás soros eredője adja a MOS kapacitás értékét:

$$C(\Psi_s) = \frac{C_{ox}C_{sc}(\Psi_s)}{C_{ox} + C_{sc}(\Psi_s)}. \quad (5.7)$$

A MOS rendszeren eső feszültség az oxidon eső feszültség és a félvezetőn eső feszültség összege:

$$V = V_{ox} + \Psi_s = -\frac{Q_{sc}}{C_{ox}} + \Psi_s. \quad (5.8)$$

Az előbbi összefüggések lényegében a MOS rendszer ( $\Psi_s$ -sel paraméterezett formában megadott) egyensúlyi (alacsonyfrekvenciás, 1-5 Hz !) C-V görbéje (5.3 ábra, a).

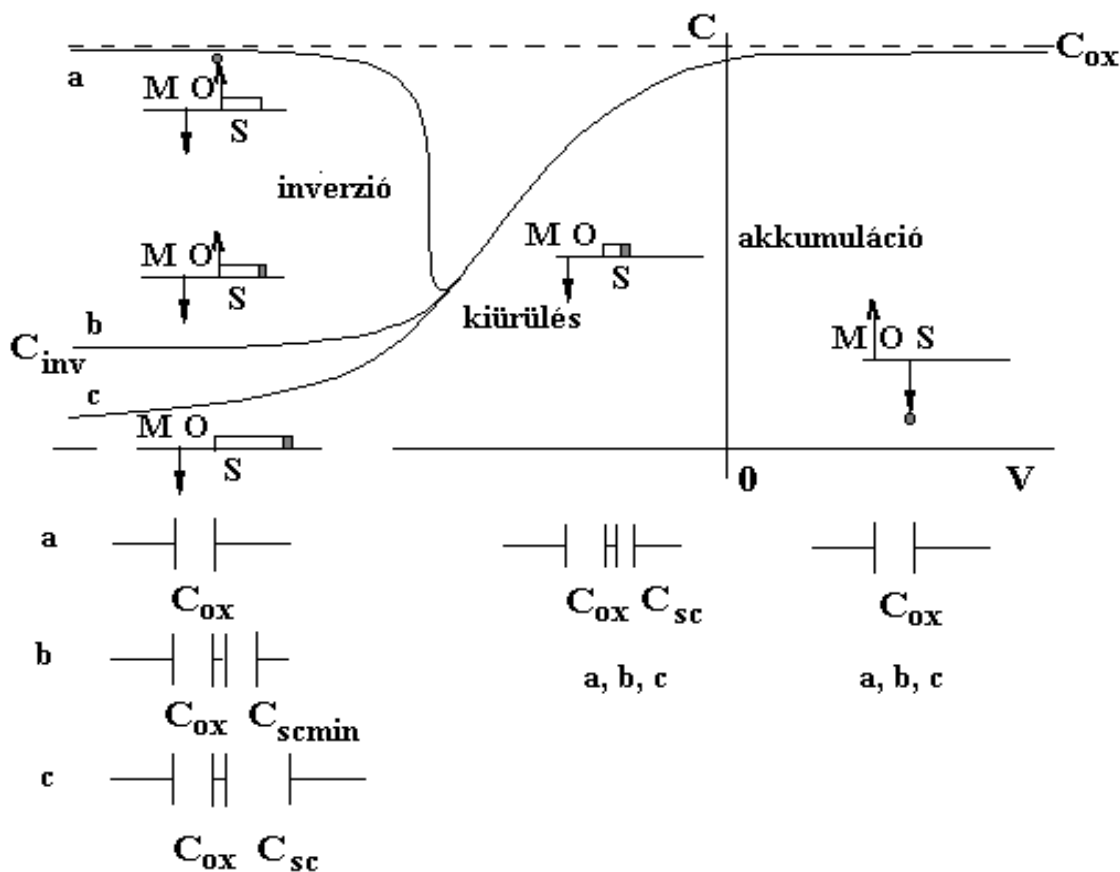
Ha a kapacitásmérő mérőjelének (kb. 10 Hz! fölötti, tipikusan 1MHz-es) frekvenciáját az inverziós réteg generációs-rekombinációs folyamatokon keresztül változó töltése nem képes követni, akkor a mérőjellel kapcsolatos töltésváltozás az erős inverzióhoz ( $\Psi_s = 2F_F$ ) tartozó állandósult  $x_{dmax}$  távolságban, a kiürített réteg szélénél jön létre. Ekkor a **b** jelű görbe adódik (közel állandó  $C_{inv}$  kapacitás).

Igen gyors előfeszítő impulzust alkalmazva (kb. 10 V/s) az az inverziós réteg töltése nem képes követni sem a mérőjel, sem pedig az előfeszítő jel változását. Ebben az esetben a vezérlő elektróda töltését csak a kiürített réteg (nem egyensúlyi,  $x_{dmax}$  értékénél jóval nagyobb) megnövekedése kompenzálhatja, amit jól mutat a mért kapacitás további csökkenése (**c** jelű görbe). A szerkezetre kapcsolt feszültségből ilyen körülmények között  $2F_F$ -nél jóval nagyobb rész is eshet a félvezetőre.

A fentiekben elmondottak érvényességéhez fel kell tételezni, hogy a vezérlőelektród töltése elhanyagolhatóan vékony rétegben helyezkedik el. Ez a feltételezés fém-elektrodák esetén többnyire jogos: fémek felületén a töltésréteg vastagságát elhanyagolhatónak tekintve a felületi tartományban a potenciálváltozás is elhanyagolhatóan kicsi. Polikristályos Si elektród esetében előfordulhat, hogy a vezérlőelektród oldalán is figyelembe kell venni a töltések valós eloszlását.

Az akkumuláció és a kiürülés tartományában a többségi töltéshordozók eloszlásának módosulása a jellemző. Ezek a folyamatok a dielektromos relaxációs idő alatt lejátszódnak, a görbe ezekben a tartományokban igen nagy frekvenciáig elméletileg nem frekvenciafüggő.

PN átmeneten vagy fém-félvezető átmeneten vizsgálva a kapacitás feszültségfüggését a **c** görbéhez hasonló adódik, azzal a különbséggel, hogy nagyobb nyitóirányú előfeszítés esetén a szigetelés hiánya miatt a szerkezet nem kapacitásként viselkedik.



5.4 ábra. Ideális MOS szerkezet C-V görbéi és helyettesítő kapacitásai. A beillesztett ábrák mutatják a töltések térbeli eloszlását, jelölve a mérőjellel kapcsolatos töltésváltozást a kiürített rétegek szélén, illetve az inverziós vagy akkumulációs rétegben

#### Útmutató a felkészüléshez:

A gyakorlatra ismerni kell a PN átmeneten és a MOS szerkezeteken különféle előfeszítések során kialakuló töltéseloszlásokat, a térerőket és a potenciálokat (energia-sávdiaagramokat). A mérés fizikai háttéréhez a jegyzet végén található "Olvasmány" ad kiegészítő ismereteket.

Könyv, jegyzet:

Valkó-Tarnay-Székely: Elektronikus eszközök J5-1367,  
72-76.,200-205., 435-449.o.

Dr.Mojzes Imre (szerk.), Mikroelektronika és elektronikai technológia, Műszaki Könyvkiadó,  
1995. 40.-41.o.

Internet oldalak: <http://jas.eng.buffalo.edu/applets/index.html>

<http://ece-www.colorado.edu/~bart/book/>

### A felkészülést ellenőrző kérdések:

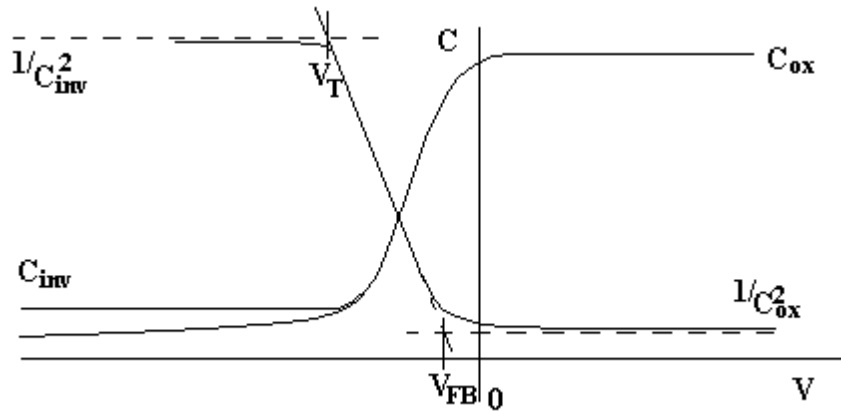
Hasonlítsa össze a csak fémelektródákból álló, és a félvezetőt is tartalmazó kapacitásokat!  
Milyen lehet a töltések eloszlása a félvezetők felületi tartományában, és milyen a fémek felületén?  
Milyen összetevőkre bontható a MOS rendszeren eső feszültség?  
Milyen térerő és potenciál eloszlás tartozik homogén tértöltés réteghez?  
Hogyan függ a kiürített réteg kiterjedése a PN átmenetre kapcsolt záró irányú feszültségtől?  
Milyen kapacitás mérhető N hordozón készített MOS szerkezet vezérlő elektródájára (nagy) negatív (pozitív) feszültséget kapcsolva? Milyen kapacitás mérhető P hordozón készített MOS szerkezet vezérlő elektródájára pozitív (negatív) feszültséget kapcsolva?  
Milyen kapacitív elemeket tartalmaz a MOS rendszer helyettesítő kapcsolása?  
Hogyan alakul a transzfer karakterisztika ugyanilyen az N ill. P hordozón megvalósított MOS tranzisztor esetén?  
Milyen irányban tolódik el a C-V görbe pozitív határfelületi töltések esetén?  
Rajzolja fel az N ill. P hordozón megvalósított MOS szerkezet C-V görbéit (az oxidtöltések általában pozitív előjelűek)!  
Milyen lesz a görbe alakja, ha nagyszámú olyan állapot van a felületen, melynek betöltöttsége függ a félvezetőn eső feszültségtől?  
Milyen irányban tolódik el a C-V görbe, ha letörésből származó forróelektronok kerülnek az oxidrétegbe? Függ-e az eltolódás iránya a hordozó vezetési típusától?  
Hogyan becsülhető a kisebbségi töltéshordozók élettartama MOS kapacitás mérés segítségével?  
A MOS kapacitás inverziós rétege a kisebbségi töltéshordozók élettartamánál több nagyságrenddel hosszabb idő (~1 sec) alatt épül fel. Miért lehetséges mégis a MOS tranzisztor be- és kikapcsolása ns alatti időállandóval?

### Mérési feladatok, a kiértékelés konkrét módszerei:

1. Nagyfrekvenciás C-V görbe felvétele MOS szerkezeten. (MOSCAP menüpont, a műszer az inverzió irányából indulva méri és tárolja a kapacitás értékét, majd akkumulációba feszíti elő a mintát, és igen rövid impulzusokkal a nem egyensúlyi mély kiürüléshez tartozó görbét is megméri.)  
Állapítsuk meg a flat-band állapothoz, illetve az inverzió kialakulásához szükséges feszültségeket, és az adalékolás közelítő értékét!  
A számításához szerkesszük rá a mért C-V görbére az  $1/C^2$ -V görbét,  $1/C_{ox}^2$  és  $1/C_{inv}^2$  értékeket!  
A nyitófeszültség az erős inverzió határához tartozó fémelektróda feszültség. A nagyfrekvenciás görbén az állandó  $C_{inv}$  kapacitás megjelenése kötődik az erős inverzióhoz:

$$\frac{1}{C_{inv}} = \frac{1}{C_{sc\ min}} + \frac{1}{C_{ox}} \quad (5.9) \quad \text{és} \quad C_{sc\ min} = \frac{e_{Si}}{x_{dinv}}, \quad (5.10)$$

ekkor az inverziós réteg leárnyékolja a teret a kiürített réteg növekedése már elhanyagolható. (Az alacsony frekvenciás görbe kiürítés utáni újra emelkedése jelzi az inverziós réteg kiépülését.)



5.5 ábra. MOS szerkezet C-V görbéi átszerkesztve

A  $V_{FB}$  keresése esetén az  $1/C^2-V$  görbe (egyenes)  $1/C_{ox}^2$  értékkel való metszését vesszük meghatározónak, a  $V_T$  nyitófeszültség pedig az  $1/C^2-V$  görbe (egyenes) és az  $1/C_{inv}^2$  egyenes metszéspontjaként határozható meg ( $Y_s = 0$  a flat-band, illetve  $Y_s = 2F_b$  az erős inverzió esetén). Az adalékolás (ha a kiürítés során állandónak tekinthető, és a felületi állapotok sűrűsége sem túl nagy) a görbe középső szakaszára illesztett egyenes meredekségéből a

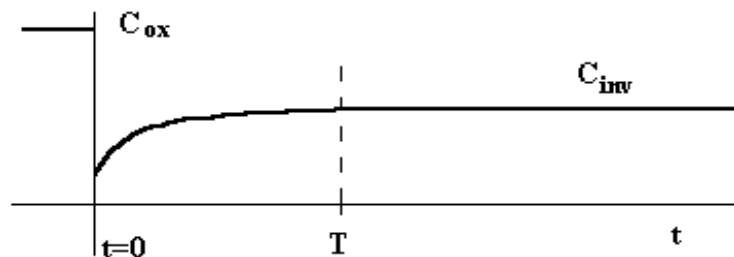
$$\frac{\Delta \frac{1}{C^2}}{\Delta V} = \frac{2}{qeNA^2} \quad (5.11)$$

képlettel határozható meg. Ez az összefüggés PN átmeneten (vagy fém-félvezető átmeneten) mért C-V görbére is igaz, ahol a gyengébben adalékoló oldal adalékolását adja meg. (Itt  $A$  az elektród felülete,  $C$  a mért kapacitás.)

Határozzuk meg az adalékolást az inverziós kapacitás és az oxidkapacitás értékéből is!

2. C-T görbe felvétele ugyanazon a MOS kapacitáson. (C-T menüpont, a műszer akkumulációba, majd ugrásszerűen nem egyensúlyi, mély kiürített állapotba feszíti elő a mintát és méri az inverziós réteg kialakulása következtében fellépő kapacitás tranzienszt. Az oxidvastagság megadásával, az akkumulációban mért oxidkapacitással és az egyensúlyi inverziós kapacitással az adalékolás értékét is kiszámolja a program.)

Becsüljük meg a C-T diagram alapján a kisebbségi töltéshordozók élettartamát!



5.6 ábra. MOSszerkezet C-t görbéje



A nem egyensúlyi előfeszítés ( $x-x_{dinv}$ ) nagyságú (nem egyensúlyi) növekedést okoz a kiürített réteg mélységében (5.4 ábra, **c** görbe). A megnövekedett kiürített rétegben az  $I_g$  generációs áram a kapacitás tranziensre jellemző  $T$  idő alatt létrehozza az inverziós réteget, melynek töltése a kiürített réteg nem egyensúlyi részének töltésével közel azonos, tehát:

$$I_g T = \frac{qn_i(x-x_{dinv})A}{2t} T = qN(x-x_{dinv})A. \quad (5.12)$$

A kapacitás az 5.4 ábra, **c** görbéről tehát  $T$  idő alatt átmegy az 5.4 ábra, **b** görbéjére.

$$\text{Ebből az élettartam becsülhető: } t = \frac{n_i}{2N} T. \quad (5.13)$$

3. Az ideális MOS C-V görbéjének számítása. (MOSSIM menüpont, az előbbieken a C-T program végrehajtása során kapott adalékolás és elektróda átmérő értékkel.)

Az ideális és a mért görbe összehasonlításával becsüljük meg a  $Q_f$  fix oxidtöltést és a  $D_{it}$  tiltott sávbéli határfelületi állapotsűrűséget!

A fix töltés ( $Q_f$ ) és a kilépési munkák különbsége ( $\Phi_{MS}$ ) ideális görbe (0) egy állandó értékkel való eltolódását eredményezik (1), azaz

$$V_{FB} = \Phi_{MS} - \frac{Q_f}{C_{ox}}, \quad (5.14)$$

amiből ( $\Phi_{MS} = -0.3$  V, vagy elhanyagolva)  $Q_f$  egyszerűen adódik (a mozgékony ionok töltését, és az oxid tömbi töltését egyaránt zérusnak tekintve).

A  $D_{it}$  tiltott sávbéli határfelületi állapotsűrűség a felületi töltések sávgörbüléstől ( $\psi_s$ ) való függését jellemzi. Ha  $D_{it}$  értéke nagy, akkor az a mért C-V görbe (az 5.2 ábrán vastag vonallal jelölve) ellaposodását okozza. A fix határfelületi töltés ( $Q_f$ ) és a kilépési munkák különbsége ( $\Phi_{MS}$ ) ugyanis csak az ideális görbe (0) egy állandó értékkel való eltolódását eredményezik (1). Ha azonban a felületi potenciál változásakor változik a töltés a felületi állapotokon is, akkor pld. a kiürítés felé haladva az ideális görbe pontjaiból a valós görbe pontjai egyre nagyobb eltolódással adódnak. (2, 3, 4, jelű görbék). Az egyes pontok eltolódása:

$$\Delta V = V_{ox} + \Phi_{ms} = -\frac{Q_{ss}}{C_{ox}} + \Phi_{ms} = -\frac{Q_f + \int_0^{\psi} D_{it} d\Psi}{C_{ox}} + \Phi_{ms}. \quad (5.15)$$

A  $D_{it}$  fizikai jelentése tehát: felület egységenként mekkora a felületi töltés megváltozása leV felületi potenciál (sávgörbülés) megváltozásra nézve.

A görbe pontjainak eltolódásából differenciál illetve differencia módszerrel  $D_{it}$  közelítő értéke adódik:



## b.) Adalékanyag profil mérése terjedési ellenállásméréssel

### Célkitűzés:

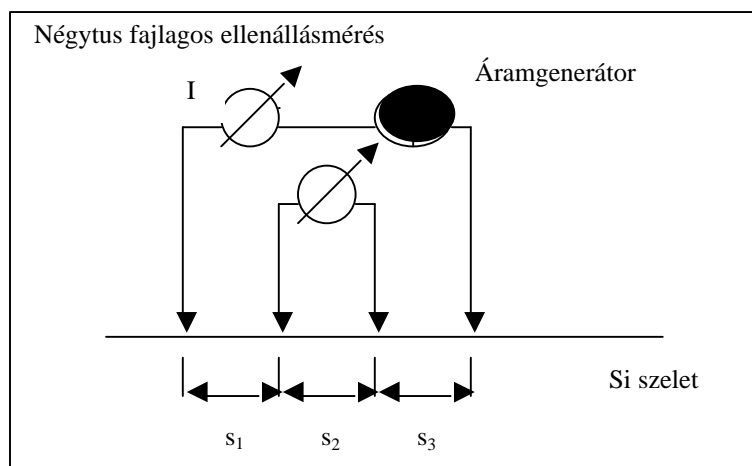
A gyakorlat célja azon módszerek elsajátítása, amellyel a szilíciumba a technológia során bevitt adalékanyagok mennyisége, valamint azok térbeli eloszlása, vagyis az adalékanyag (koncentráció) profilok meghatározhatók. (Pld. bórdiffúziós vagy implantált koncentráció profil mérése.)

### A méréshez szükséges elméleti ismeretek:

A félvezetők alapvető tulajdonsága, hogy fajlagos ellenállásuk igen erősen függ az adalékolás szintjétől:

$$r = \frac{1}{qmN}, \quad (5.19)$$

ahol  $m$  az elektronok, ill. a lyukak mozgékonyasága,  $N$  a donor vagy az akceptor adalékkoncentráció, ami a félvezetőkben kb.  $10^{13}$ - $10^{20}/\text{cm}^3$  tartományban mozoghat. Az egyenletből következik, hogy az adalékolás szintje a fajlagos ellenállás mérésével meghatározható.



5.8 ábra. Fajlagos ellenállás mérése négytűs módszerrel.

A négytűs fajlagos ellenállásmérő módszer lényege az, hogy egyszerű és olcsó mérési elrendezéssel meg tudjuk határozni egy félvezető tömb vagy egy vékony szelet fajlagos ellenállását. Ehhez egy félvezető tömbbel négy tűt érintkeztetünk az ábra szerinti elrendezésben, és a szélső két tűn "I" áramot bocsátunk keresztül, akkor a két középső tűn

keletkező feszültségeseéséből számítható a félvezető tömb fajlagos ellenállása:

$$r = \frac{2\rho}{\frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_3} - \frac{1}{s_1 + s_2} - \frac{1}{s_2 + s_3}} \frac{U}{I} \quad (5.20)$$

ahol  $s_1, s_2, s_3$  a tűtávolságok az ábra jelölései szerint. Abban az esetben, ha a tűtávolságok egyenlők, azaz  $s_1 = s_2 = s_3 = s$ , akkor írhatjuk, hogy:

$$r = 2\rho s \frac{U}{I} \quad (5.21)$$

Az összefüggések csak akkor adják a fajlagos ellenállás pontos értékét, ha a mérendő félvezető kristály méretei a tûtávolságnál jóval nagyobbak (a vastagság  $>3s$ , és a tûk jóval távolabb helyezkednek el a minta szélétől, mint a tûtávolság.)

Vékony, homogén adalékolású lemezek mérése esetén, ha a lemez vastagsága  $w$  kisebb, mint  $0,6s$ , akkor a fajlagos ellenállás kiszámításához a következő összefüggés alkalmazható:

$$r = \frac{\rho}{\ln 2} \frac{U}{I} w = 4.53 \frac{\rho}{I} w \quad (5.22)$$

Az összefüggésben nem szerepel a tûtávolság 's' tehát a mérő fejfel szemben csupán az a követelmény, hogy a tûtávolságok egyformák legyenek.

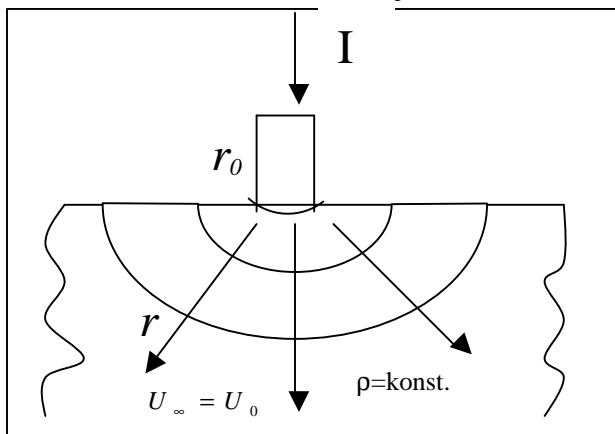
Inhomogén adalékolás esetén csak átlagos fajlagos ellenállás adható csak meg. p-n átmenetek minősítése esetén a p-n átmenet határán levő kiürített réteg csak a tûvel érintkező rétegben engedélyezi az áramfolyást, így az adalékolt réteg átlagos fajlagos ellenállása számítható.

Tekintettel arra, hogy a planáris technológiában alkalmazott Si szeletek vastagsága 0.3-0.6 nm körüli, továbbá a minősítendő adalékolt rétegek vastagsága csupán  $\mu\text{m}$  nagyságrendű, a mm nagyságrendű tûtávolság alkalmazása esetén a közelítő összefüggés jól alkalmazható a fajlagos ellenállás meghatározására. Ki kell emelni, hogy a képlet csupán abban az esetben mutatja a fajlagos ellenállás pontos értékét, ha a mérendő szelet átmérője a tûtávolságnál jóval nagyobb.

A négytûs mérés homogén adalékolású anyag esetén alkalmas az adalékkoncentráció mérésére. Diffúziós, vagy implantált rétegek adalékolása erősen inhomogén. Ilyen rétegek minősítésére is használható, de az adalékeloszlás meghatározására nem ad lehetőséget. A mért négyzetes ellenállásból viszont kiszámítható a felületegység alatt található adalék-atomok összes száma (v.ö. bázis-integrál, Gummel szám, implantált dózis).

### A terjedési ellenállás mérés

A mérés úgy történik, hogy kis sugarú, kis fajlagos ellenállású ( $\text{m}\Omega\text{cm}$ ), kemény ötvözetből készült tûket helyezünk a mérendő félvezető anyag felületére és nyomást adunk rá. A tûk közti ellenállást kis egyenáramú előfeszítés mellett mérjük. A mérések kiértékelése azon a felismerésen alapul, hogy egy makroszkópikus testhez egy mikroszkópikus felületet csatlakoztatva, az áram szétterjedése az áramkörben egy ellenállás komponens eredményez.



A villamosságtan ismereteit felhasználva néhány lépésben levezethető a szétterjedési ellenállás első közelítésben használt képlete. A geometriai elrendezést az 5.9 ábra mutatja.

5.9 ábra. Geometriai elrendezés, a félgömb felülete  $A = 2r^2\rho$

A tûn  $I$  áram folyik keresztül, az áramsűrűség az  $Y$  ponttól  $r$  távolságra:

$$j(r) = \frac{I}{2r^2 \mathbf{p}} \quad (5.23)$$

Az Ohm törvény:

$$E = \mathbf{r}j, \quad (5.24)$$

valamint

$$U = -\int E dl \quad (5.25)$$

felhasználásával az Y ponttól r távolságra a potenciál:

$$U(r) = \int_{r_0}^r E dr = \int_{r_0}^r \mathbf{r} \frac{I}{2r^2 \mathbf{p}} dr = \frac{\mathbf{r}I}{2\mathbf{p}} \left[ -\frac{1}{r} \right]_{r_0}^r \quad (5.26)$$

Ebből a potenciál függvény:

$$U(r) = \frac{\mathbf{r}I}{2r_0 \mathbf{p}} \left( 1 - \frac{r_0}{r} \right) \quad (5.27)$$

Ebből felrajzolhatók az ekvipotenciális felületek is. Látható, hogy a mért ellenállást

$$R_m = \frac{U(\infty)}{I} = \frac{\mathbf{r}}{2r_0 \mathbf{p}} \quad (5.28)$$

elsősorban a tû hegyéhez közeli rétegek határozzák meg. Felületszerû érintkezésnél levezethetõ, hogy az ellenállás értéke:

$$R = \frac{P}{4r_0} \quad (5.29)$$

Ekkor az ekvipotenciális felületek ellipszoidok, amelyek igen közel vannak a gömbhöz. Látható még, hogy azonos érintkezési sugár esetén a két képlet így írható fel:

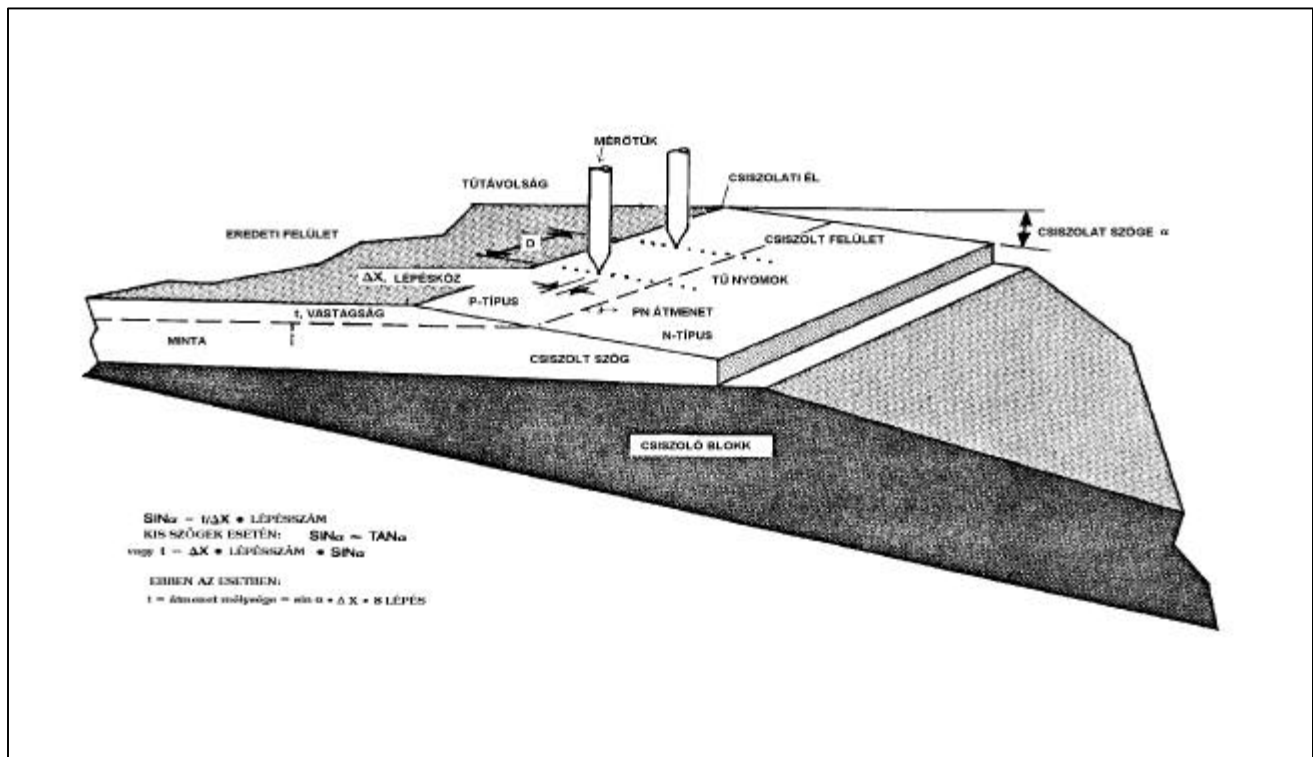
$$R = \frac{1}{Kr_0} p \quad (5.30)$$

Ahol  $K = 4$  lapos, felületszerû érintkezés esetén, míg  $K=2\pi$ , ha az érintkezés félgömbszerû. Az elõzõekben kiszámítottuk a terjedési ellenállás értékét homogén anyagban. Diffúziós, ionimplantált és epitaxiális rétegeknél sohasem tekinthetõ az anyag homogénnek. Ezért a klasszikus képletet a terjedési és a fajlagos ellenállás között alkalmazzák. A mért terjedési ellenállás bonyolultabb összefüggésben áll a vertikális fajlagos ellenállás profiljával. Ezért kell a klasszikus képletet megváltoztatni a korrekciós faktorial, amely függ a fajlagos ellenállás profiljától.

## A szelet preparálása

A mérés megkezdése előtt az első lépés a minta preparálása. A szeletből ki kell vágni egy téglalap vagy négyzet alakú mintát, és ferdeciszollal kell ellátni. Fontos, hogy a minta mindig egyforma nagyságú legyen, mert ez befolyásolja a mért szétterjedési ellenállást.

A ferdeciszolat szerepe a következő: a csiszolat szögének ismeretében a mélység mérését vissza lehet vezetni egy sík irányú mozgás mérésére, amit pedig a gépen pontosan lehet irányítani. A ferdeciszolat minősége egyik fontos tényezője a profilmérés pontosságának.



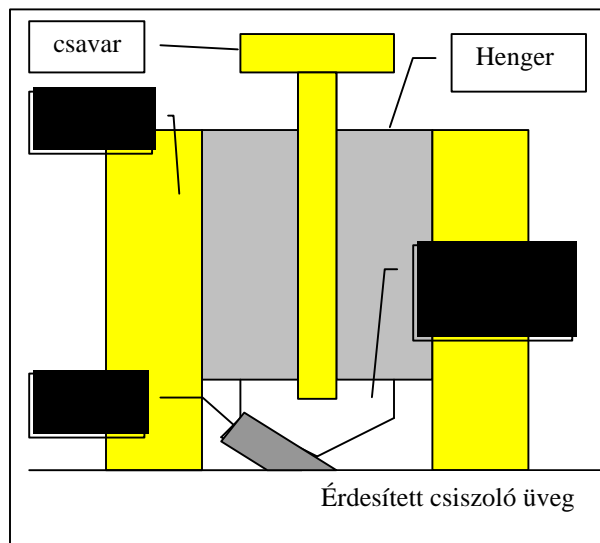
5.10 ábra. A ferdeciszolat.

## A ferdeciszolat létrehozása

Erre a célra csiszoló berendezés áll rendelkezésre. A mintát, kivágása után, fel kell ragasztani méhviasszal a mintatartóra. Több ilyen mintatartó van, amelyek a hajlásszög nagyságában különböznek egymástól. Tipikus szögtartomány: 16'-11°44'. Attól függően, hogy milyen mélyen van a vizsgálandó tartomány, és milyen felbontásban kívánjuk végezni a mérést, választjuk ki, hogy milyen hajlásszögű mintatartón mérjük a mintát. A mintatartót felmelegítjük, így megolvad a ráhelyezett méhviasz. Ebbe belehelyezzük a mintát úgy, hogy az egyik éle a szög csúcsánál és azzal párhuzamos legyen. Vigyázni kell továbbá, hogy a kis minta a mintatartó közepén helyezkedjék el, mert ez fontos a csiszolt szög optikai mérésénél. Ha ez kész, akkor a

mintát erősen, egyenesen rá kell szorítani a mintatartó ferde felületére, és le kell hűteni. A hűtés után a felesleges megkötött viaszt el kell távolítani alkohollal.

A minta csiszolása egy sík üveglapon történik, melynek felületi érdessége  $1\mu\text{m}$ . A csiszoló üveg felületére  $\frac{1}{4}\mu\text{m}$  szemcseátmérőjű gyémánt pasztát kenünk fel egyenletesen. A mintatartó blokk, rajza az 5.10 ábrán látható.



5.11. ábra. A mintatartó blokk. A mintatartót csavarral kell rögzíteni a nehéz fémhengerhez, figyelembe véve a megfelelő csiszolási irányt az ábra szerint. A nehéz fémhenger súlyánál fogva a mintát az üveghez szorítja, ezáltal csiszolódik a minta felülete.

A csiszoláskor fontos, hogy a fémhenger ne forduljon el, mert az a csiszolat tönkremenéséhez vezet. A hajtókart kézzel vagy motoros meghajtással lehetőleg egyenletesen, rángatás nélkül kb. 1 ford./s fordulatszámmal kell forgatni. A csiszolási időt a minta minősége (keménysége) és a vizsgálandó tartomány kiterjedése határozza meg.

## A terjedési ellenállásmérő felépítése

Az SSM 130 típusú terjedési ellenállásmérő készülék főbb részei a következők:

- sűrített levegővel működő *léptető motor*, amely áttétel segítségével mozgatja az X-Y asztalt X irányba előre. A motort számítógép vezérli és mindig az aktuális mérés után kapcsolja be. Az áttétel változtatható, így az asztal 0, 25-250  $\mu\text{m}$ -es tartományban különböző fix lépésekben tud mozogni. Az asztalt kézi irányítással is lehet pontosan mozgatni csavarmikrométerrel.
- *A tû felfüggesztési rendszere*. A berendezésben 2 tû foglal helyet, melyek emelését sűrített levegővel működő emelőrendszer végzi. Ezt a rendszert is számítógép vezérli, minden mérés után felemeli a tûket, majd az asztal továbbléptetése után újból lerakja. A tûk terhelését és az egymástól való távolságát manuális úton lehet változtatni. Nagyon fontos, a tûk mozgatásakor a terhelés és a köztük levő távolság ne változzon, mert akkor hibás eredményeket kapunk. *Ezért a tûkhöz nyúlni tilos !*
- *mikroszkóp* A mikroszkóp alatt helyezkedik el az X-Y asztal. A mikroszkóp segítségével lehet a mintát pozícionálni, a csiszolási szöveget optikai úton megmérni és az asztal magasságát beállítani, hogy a terhelés pontos legyen.
- *Számítógép*: IBM PC személyi számítógép plotterrel és printerrel ellátva irányítja a mérést és értékeli a mért adatokat. A mért terjedési ellenállás értékéből kiszámolja a fajlagos ellenállás és a koncentráció mélységtől való függését, majd a plotteren ki is rajzolja a függvényeket. A

számítógéphez speciális program tartozik, amely az ellenállásmérő sokrétű felhasználását teszi lehetővé.

### A készülék kalibrációja

A mérés előtti második lépés a mérőtűk felületének vizsgálata. A tűk felületén apró kiemelkedések vannak, amelyek a Si felületével mikrokontaktusokat alkotnak. Ezek száma határozza meg a kontaktus minőségét. Minél több kiemelkedés van a tűk felületén, annál jobb a kontaktus.

A kontaktus ellenőrzése a következő módon történik: a minta helyére beteszünk 1µm vastag epitaxiális réteggel ellátott, kalibráló Si szeletet. Az epi réteg alatt egy nagyon jól vezető anyag van. Ez biztosítja, hogy az ellenállás mérésekor csak a kontaktus ellenállását mérjük, ez pedig jellemző a tű állapotára. A kontaktus ellenállás értéke egy adott tűnél 600-1000 Ω tartományban legyen, két tűnél ez kétszeres értékű. Ha ez nem teljesül, akkor a tűk felületét "kondicionálni" kell. Ezt speciális csiszoló szerszámokkal végezzük, amelyeket sorban a minta helyére teszünk, és 5-10-szer ráengedjük a tűket. Először a durvábbal (1 µm-es szemcseméretű), utána a finomabbal (0,25 µm-es szemcseméretű) végezzük a tűk csiszolását. Ezután ellenőrizzük a tűk állapotát, és ha még mindig nem felelnek meg, ismételjük az eljárást.

A mérőtűk anyaga nagy keménységű wolfram-ozmium ötvözet. Gyártói kísérletekkel igazolták, hogy egyformán ohmos kontaktust létesít az n<sup>-</sup>, n<sup>+</sup>, p<sup>-</sup>, p<sup>+</sup> anyaggal. (Nem alakul ki a tű és a szilícium érintkezésekor fém-félvezető átmenet.)

A klasszikus képlet félvégtelen homogén mintán:

$$R = \frac{r}{4a}, \quad (5.31)$$

ahol  $a$  a kontaktus sugara  $r$  a minta fajlagos ellenállása.

Az összefüggés két tű esetén, melyek átmérője jóval nagyobb, mint a kontaktus sugara, az alábbi: ( $D \gg a$ )

$$R_2 = \frac{P}{2a}, \quad (5.32)$$

ahol az  $R_2$  jelölés a két tűvel mért terjedési ellenállást jelenti.

A gyakorlatban a fenti képlet helyett egy kalibrációs görbét használnak, amelyben a mért terjedési ellenállást ábrázolják a fajlagos ellenállás függvényében az  $R_m = Cr^m$ , összefüggés szerint, ahol  $R_m$  a mért terjedési ellenállás,  $\rho$  a fajlagos ellenállás,  $C$  konstans.

Az effektív kontaktus sugarat megkaphatjuk a görbe  $r = 1\Omega cm$  -es pontjából:

$$a = \frac{1}{2C}. \quad (5.33)$$

Megfigyelték, hogy az  $m$  kitevő értéke  $n$  típusú mintánál 1 köré esik, míg  $p$  típusú mintánál ennél kisebb. Másodszer az  $n$  típusú effektív kontaktus sugara mindig 1/2, 1/3 szorosa a  $p$  típusúnak, ez a piezoelektromos hatásnak tulajdonítható.



Az elméletileg számított <111> p típusú kontaktus sugara 10 %-kal nagyobb, mint az ugyanilyen anyagon mért tényleges sugár, míg <111> n típusnál a fele. A méréseket SEM fotókon végezték. Mindezek alapján belátható a kalibráció szükségessége.

#### A kalibráció művelete

Ehhez n és p típusú <111> és <100> orientációjú szabályos mintasorozatok mintákat használunk, amelyek fajlagos ellenállásai a 0,001  $\Omega\text{cm}$  – 400  $\Omega\text{cm}$  tartományba esnek, és pontosan ismerjük az értéküket.

A tük megfelelő előkészítése után megmérjük a kalibráló minták terjedési ellenállását. Mindegyiket több pontban kell mérni, a számítógép kiszámítja ezek átlagát. Ehhez megadjuk az ismert fajlagos ellenállás értékeit. Ezekből az adatokból speciális program számítja ki a kalibrációs görbét. Ez a tük állapotának megfelelően az elméleti görbétől eltérhet.

#### Útmutató a felkészüléshez:

A gyakorlatra ismerni kell az ellenállás mérési módszerek közül a négytűs- és a kéttűs-mérés elméletét és gyakorlatát, a méréshez szükséges minta előkészítési módszereket, a ferdeciszolat készítésének technikáját, a technológia során előállított adalékeloszlások várható jellemzőit. A mérés fizikai hátteréhez a jegyzet végén található "Olvasmány" ad kiegészítő ismereteket.

Könyv: Simonyi Károly: Villamosságtan, Akadémiai kiadó(1973) 260-261., 408-415.o.

Internet oldalak: [http://www.eet.bme.hu/semic\\_lab/](http://www.eet.bme.hu/semic_lab/)

#### A felkészülést ellenőrző kérdések:

Mitől függ a mért terjedési ellenállás értéke?  $R_m = f(\dots\dots)$

Hogyan határozhatjuk meg szilíciumon a mért terjedési ellenállásból a fajlagos ellenállást?

A ferde csiszolaton történő mérés menete.

Hogyan változik egy pn átmenetet is tartalmazó ferdeciszolaton a terjedési ellenállás?

Hogyan változik egy npn bipoláris tranzistorban az adalékkoncentráció?

Milyen az adalékolás mélység függése különféle integrált áramkörökön (bipoláris, CMOS), illetve az integrált áramkörök egyes tartományaiban (szigetelő P+, n zsebek, bázisdiffúzió, megnyomott ellenállás, npn és pnp vertikális tranzistorok)?

#### Feladatok:

1. Ferde csiszolat készítése diffundáltatott szilícium egykristályon. Terjedési ellenállásmérés (SRT demonstráció). A diffúziós réteg ellenállás profiljának adalékanyag koncentrációs profillá konvertálása.

2. A kapott eredményeket kiértékelése.