



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Elektronikus Eszközök Tanszék

Szilícium-karbid elektromos minősítése

TDK dolgozat

Czett Andor

Konzulens:

Mizsei János

BME, Elektronikus Eszközök Tanszéke

Külső konzulens:

Légrádi Gábor

Semilab ZRt, Dielektrikum Csoport

Budapest, 2011. November

Tartalomjegyzék

Tartalom

Jelölésjegyzék	5
1 Bevezetés	7
2 A szilícium-karbid általános tulajdonságai, alkalmazásai	8
2.1 Szilícium-karbid a mindennapokban.....	8
2.2 Szilícium-karbid a mikroelektronikában.....	9
3 V-Q és C-V mérés szilíciumon	11
3.1 V-Q mérés	11
3.1.1 Töltésfelvitel koronakisüléssel	11
3.1.2 Rezgőelektródás (Kelvin-féle) mérőfej	12
3.1.3 A V-Q görbe jellegzetességei	13
3.1.4 Mérés sötétben és megvilágítással.....	14
3.2 C-V mérés	15
3.2.1 A hagyományos C-V mérés	15
3.2.2 Higany C-V.....	16
3.2.3 MIS C-V mérések	17
3.2.4 Schottky C-V mérés.....	19
4 C-V és V-Q mérés elméleti háttere.....	21
4.1 A Poisson-egyenlet megoldása	21
4.2 Felületi állapotok hatása a V-Q és C-V mérésre.....	26
5 V-Q és C-V mérések szilícium-karbidon.....	29
5.1 Változások a szilíciumhoz képest	29
5.2 Felhasznált minták	30
5.3 V-Q mérések eredményei.....	30
5.4 HgC-V mérések eredményei	33
5.4.1 Schottky mérések eredménye szilícium-karbid mintákon.....	33
5.4.2 MOS mérések eredménye szilícium-karbid mintákon.....	34
6 Szilícium-karbid mérések a Q-V módszerrel.....	36

6.1	A Q-V mérések elmélete	36
6.2	A Q-V mérések eredményei.....	38
7	További tervek, lehetőségek	42
8	Összefoglalás	43
9	Irodalomjegyzék	44
10	Függelék.....	45

Jelölésjegyzék

c	–	fénysebesség vákuumban	–	m/s
c_n	–	elektronbefogási valószínűség	–	cm ³ /s
c_p	–	lyukbefogási valószínűség	–	cm ³ /s
C_{MOS}	–	MOS struktúra kapacitás	–	F/m ²
C_{sh}	–	söntkapacitás	–	F/m ²
C_x	–	szórt kapacitás	–	F/m ²
C_w	–	vezetékkapacitás	–	F/m ²
C_{iLF}	–	soros referenciakapacitás	–	F/m ²
C_{LF}	–	kisfrekvenciás kapacitás	–	F/m ²
C_{HF}	–	nagyfrekvenciás kapacitás	–	F/m ²
C_s	–	félvezető sávhajlásából eredő felületi kapacitás	–	F/m ²
C_{ox}	–	oxid/dielektrikum kapacitás	–	F/m ²
C_{depl}	–	kiürített réteg kapacitás	–	F/m ²
C_{diff}	–	differenciális kapacitás	–	F/m ²
C_{stat}	–	statikus kapacitás	–	F/m ²
C_{FBs}	–	félvezető flat-band kapacitása	–	F/m ²
C_{FB}	–	teljes struktúra flat-band kapacitása	–	F/m ²
D_{it}	–	felületi állapotssűrűség	–	1/cm ³ eV
ΔE_{ox}	–	térerősségváltozás az oxidban/dielektikumban	–	V/m
h	–	Planck-állandó	–	eV*fsec
k	–	Boltzmann-állandó	–	
K_s	–	relatív dielektromos állandó	–	1
n_i	–	intrinsic töltéshordozó koncentráció	–	1/cm ³
N_A	–	akceptorsűrűség	–	1/cm ³
N_D	–	donorsűrűség	–	1/cm ³
$n(x)$	–	elektroneloszlás félvezetőben	–	
$p(x)$	–	lyukeloszlás félvezetőben	–	
q	–	elektron töltés	–	C
Q_s	–	felületi töltés	–	C
Q_{total}	–	összes töltés	–	C
ΔQ_i	–	töltésváltozás a belső mérőponton	–	C
ΔQ_{MOS}	–	töltésváltozás a MOS kapacitáson	–	C
ΔQ_w	–	töltésváltozás a vezetékkapacitáson	–	C
ΔQ_{iLF}	–	töltésváltozás a soros referenciakapacitáson	–	C

t_{ox}	–	oxid/dielektrokum rétegvastagság	–	m
T	–	hőmérséklet	–	K
V_i	–	belső, mért feszültség	–	V
V_O	–	külső, rábocsátott feszültség	–	V
w	–	felülettől mért mélység	–	m
W_g	–	tiltott sáv szélessége	–	eV
x	–	felülettől mért mélység	–	m
ε_0	–	vákuum dielektromos állandó	–	As/Vm
ε_{ox}	–	oxid/dielektrikum dielektromos állandó	–	As/Vm
ε_s	–	félvezető dielektromos állandója	–	As/Vm
Φ_{bulk}	–	bulk potenciál	–	V
λ	–	hullámhossz	–	m
λ_p	–	extrinsic Debye-hossz	–	m
Ψ_s	–	felületi sávehajlás	–	V
Ψ_{s0}	–	felületi sávhajlás 0 V gatefeszültség esetén	–	V
$\Psi(x)$	–		–	
$\Phi(x)$	–	töltéshordozó potenciál félvezetőben	–	V
Ψ_B	–	sávhajlás a bulkban	–	V
Ψ_T	–	tömbi csapdapotenciál	–	V
$\delta(x)$	–	töltéshordozó eloszlás félvezetőben	–	
τ_n	–	elektronélettartam	–	s
τ_p	–	lyukélettartam	–	s
τ_r	–	relaxációs idő	–	s

Megjegyzés: A TDK munkában a megjelenő kapacitás jelölések jellemzően fajlagos kapacitást takarnak. Ez alól kivételt képeznek a közölt mérési eredmény diagramok, ahol tényleges kapacitások szerepelnek, illetve a 7.1-7.8 egyenletek.

1 Bevezetés

A gyártástechnológia fejlődése szükségszerűen magával hozza, hogy a mérés technikának is fejlődnie kell, különben az új eszközök minősítése, ill. a későbbi sorozatgyártás felügyelete nem lenne megfelelően biztosított. A Semilab ZRt egyre több különböző érintéses és érintésmentes technológiát kínál a különböző félvezető struktúrák jellemző paramétereinek mérésére.

Manapság egyre több egykristályos szilíciumtól eltérő félvezető anyagot használnak, főleg, ha valamilyen speciális alkalmazási területre gyártanak elektronikus eszközöket. Ilyenek pl. a gyorsan fejlődő kijelző ipar számára a vegyületfélvezetők, főleg a gallium-nitrid (GaN) és a teljesítményeszközök számára a szilícium-karbid (SiC). A szilícium-karbid mérés technika közel sem annyira kiforrott és ismert, mint a szilíciumé. TDK munkám célja ennek megfelelően a jelenlegi mérés technikák alkalmazhatóságának vizsgálata szilícium-karbidon. Munkám során a Semilab által fejlesztett és gyártott mérőberendezéseket használtam; a V-Q mérésekhez a WT-2000 platformot és a WinTau szoftvert, a HgC-V mérésekhez az MCV-530 és MCV-2500 platformot és a WinCap szoftvert.

Mindezek bemutatása előtt szeretnék rövid áttekintést adni a szilícium-karbid jelenlegi alkalmazásairól, majd a félvezetőipar napjainkban is széles körben alkalmazott V-Q és C-V mérés technikáiról és röviden az azok mögött álló elméletről. Ezek ismeretében mutatom be a szilícium-karbidon végzett néhány jellemző mérés eredményeit, illetve az elméletre alapozva értékelem, hogy milyen eltérések, hátrányok vagy előnyök mutatkoznak a szilíciumon végzett mérésekhez képest. A V-Q mérések esetében új kiértékelési módszert is ki kellett fejleszteni, a dolgozatban ezt is bemutatom.

2 A szilícium-karbid általános tulajdonságai, alkalmazásai

A természetben megtalálható szilícium-karbid, más néven moissanit, nagyon ritka, mindössze csak néhány meteorit maradványaiban található meg. A világon felhasznált összes szilícium-karbid mesterséges eredetű, még az ásványként árusítottak is. Természetes formájában először 1893-ban Dr. Ferdinand Henry Moissan talált kis mennyiségben Arizonában a Canyon Diablo meteoritban. Az ő nevét rejti a moissanit elnevezés.

2.1 Szilícium-karbid a mindennapokban

A szilícium-karbid előállítására 2000 °C-nál magasabb hőmérsékleten kvarcokból (szilícium-dioxid – SiO₂) és kokszból (tiszta szén - C) történik (1.1).



	4H-SiC	6H-SiC	Si	Gyémánt
Tiltott sáv szélessége [eV]	3,26	3,02	1,12	5,45
Olvadáspont [°C]	>2800 (szublimáció)	>2800 (szublimáció)	1410	>1500 (grafitizáció)
Elektronmozgékonyosság [10 ⁻⁴ m ² /Vs]	900	600	1400	2200
Lyukmozgékonyosság [10 ⁻⁴ m ² /Vs]	40	40	600	1600
Villamos szilárdság [10 ⁸ V/m]	2,2	2,5	0,3	10
Termikus vezetőképesség [W/m K]	490	490	150	2000
Szaturációs drift sebesség [10 ⁵ m/s]	2,7	2	1	2,7
Relatív dielektromos állandó	10	9,7	11,8	5,5
Mohs keménység	9,2-9,3	9,2-9,3	7	10

1. táblázat - 4H és 6H-SiC fontosabb paraméterei; összehasonlításképp szerepel a Si és a gyémánt [2][6]. Jól látható, hogy a SiC bizonyos tulajdonságai félvezetőkhez, mások szigetelőkhez hasonlít.

A tiszta, mesterségesen előállított szilícium-karbid, más néven karborundum a kovalens karbidok közé tartozik, rácsszerkezete nagyon hasonló a gyémántéhoz, az atomok sp³ kovalens kötésekkel kapcsolódnak egymáshoz. A kovalens kötések miatt nagyon kemény és ellenálló anyag, ezért is alkalmazzák pl. nagyteljesítményű fékrendszereknél a féktárcsák anyagaként (ismertebb nevén karbonszálas féktárcsa), golyóálló mellények betétjeiben, ill. horgászbottok damilvezető gyűrűiben a gyűrű belső felén, ahol a damil súrlódik.

2.2 Szilícium-karbid a mikroelektronikában

A szilícium-karbid elektromos alkalmazásairól 1907-ből származik az első feljegyzés, amikor a félvezető szilícium-karbid elektrolumineszcens tulajdonságairól számoltak be. A XX. század során nagyon változó volt ezen anyag fontosságának és alkalmazásának megítélése, ezáltal a megismerésére irányuló kutatások intenzitása is. Ahogyan az emberiség egyre jobban feszegeti a technikai eszközeinek határait, egyre inkább szükség van szélsőséges viszonyok között is - pl. magas hőmérséklet, ionizáló háttérsugárzás - stabilan működtethető megbízható elektronikai eszközökre. Ilyen alkalmazások pl. az űrtechnika számára elengedhetetlenül fontosak, főleg, hogy a robusztusság mellett a kis hely és tömeg is fontos szerepet játszik. A nagyteljesítményű elektronikus eszközök általában saját méreteiknél jóval nagyobb hűtőbordákat igényelnek az optimális hőmérsékleten történő működés biztosítása céljából, így ha sikerül magas hőmérsékleten is stabilan működő elektronikát gyártani, azzal megspórolható a hűtésből adódó plusz térfogat és tömeg.

A szilícium alapú elektronikák működési hőmérsékletének maximuma olyan 150-175 °C körül van, attól függően, hogy milyen technológiával készült az adott készülék. Ezen hőmérséklet felett a diffúziós folyamatok felgyorsulása miatt az eszköz élettartama rohamosan csökken. A szilícium-karbid alapú elektronikák képesek akár 5-600 °C-on is stabilan működni. A SiC rendkívül jó hővezető képessége is elősegíti a magasabb teljesítményű működést.

A szilícium-karbid másik fontos felhasználási területe az optoelektronika. Nagy tiltott sávjának köszönhetően (kb. 3 eV – kristályszerkezettől függően) 400 nm körüli fény kibocsátására alkalmas kék, ill. UV LED-ek és lézerek alapjául is szolgál.

Nagyon magas hőmérsékletre (kb. 2300 °C) történő hevítéskor a szén kiválik a szilícium-karbidból és grafént hoz létre, tehát irányított körülmények között alkalmas akár grafén előállítására is.

A szilícium-karbidnak 250-nél is több különböző kristálytípusa, ún. politípusa létezik. A kristálytani eltérésekből adódóan a fizikai paraméterekben, mint pl. Young-modulus, rácsállandó, tiltott sáv szélessége, dielektromos állandó is eltérést mutatnak (1. táblázat). A gyártástechnológiában azonban csak kevés kristálytípus terjedt el, ezek a 2H, 3C

(beta-SiC), 4H és 6H (alfa-SiC). Napjainkban a legelterjedtebb a 4H és közel hasonlóan elterjedt a 6H struktúra. A politípusokról bővebben ír [9].

3 V-Q és C-V mérés szilíciumon

Az itt bemutatott mérés technikák a később alkalmazott mérési eljárások alapját képező módszerek. Napjainkban, ahol lehet, roncsolásmentes módszereket használnak, mivel a speciális rétegek előállításának költsége, nem növelik tovább a költségeket kísérőszeletek árával.

A V-Q és C-V görbe levezethető a félvezető potenciálterének, és a töltéshordozók eloszlásának behelyettesítésével a Poisson-egyenletből. A részletes levezetésről a későbbi fejezetben részletesen lesz szó. Jelen fejezetben a V-Q és C-V mérést, illetve a megfelelő görbéket és a mögötte levő fizikai folyamatokat heurisztikusan ismertetem.

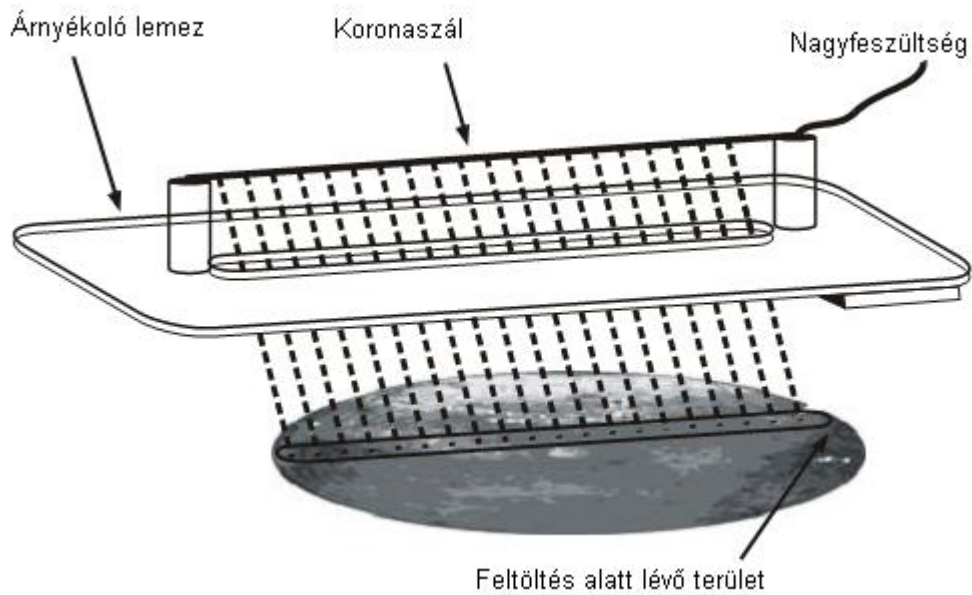
3.1 V-Q mérés

3.1.1 Töltésfelvitel koronakisüléssel

A V-Q mérés nagy előnye, hogy érintésmentes elektromos minősítő módszer. A mérés során ún. koronakisüléssel töltésfelvitel segítségével viszünk egyre nagyobb mennyiségű töltést a félvezető szeleten található dielektrikum felületére. Az elektromos neutralizáció a földelésen keresztül a szubsztrátban felgyűlő azonos mennyiségű töltéssel valósul meg. Minél nagyobb a felületen lévő töltésmennyiség, és ennek megfelelően a szubsztrátban felgyűlő azonos mennyiségű, ellentétes előjelű töltés, annál nagyobb feszültség esik a két töltésmennyiséget elválasztó MIS (Metal Insulator Semiconductor – Fém szigetelő félvezető) struktúrán. Fokozatosan, azonos egységekkel növelve a töltést, pontonként felvehető a V-Q görbe a következő fejezetben bemutatott Kelvin mérőelektrodával.

A felületre légköri nyomáson visszük fel a töltéseket, ahogy az 1. ábra mutatja. Így a részecskék szabad úthossza nagyon kicsi, tehát meglehetősen kis mozgási energiával érnek a szelet felületéhez, így a felület roncsolásmentesen tölthető fel.

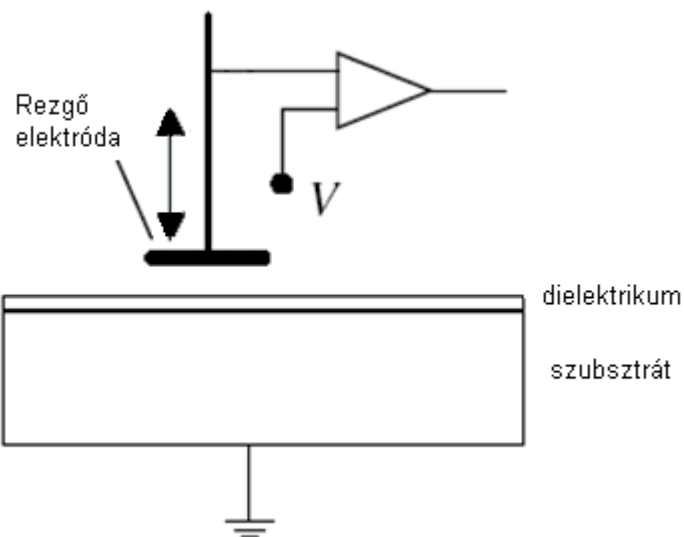
Az eddigi mérések reprodukálhatósága ezt igazolja, így az iparban a V-Q az egyik legelterjedtebb félvezető-dielektrikum rendszer minősítő eljárásáá nőtte ki magát. Az ionforrás elektróda és a szelet között egy árnyékoló lemez található, ami a kibocsátott ionokat tereli a szelet megadott területére. A mérést követően a szelet visszakerülhet a gyártási folyamatba egy közbeiktatott szelettisztítás után.



1. ábra - Koronakisüléses töltésfelvitel

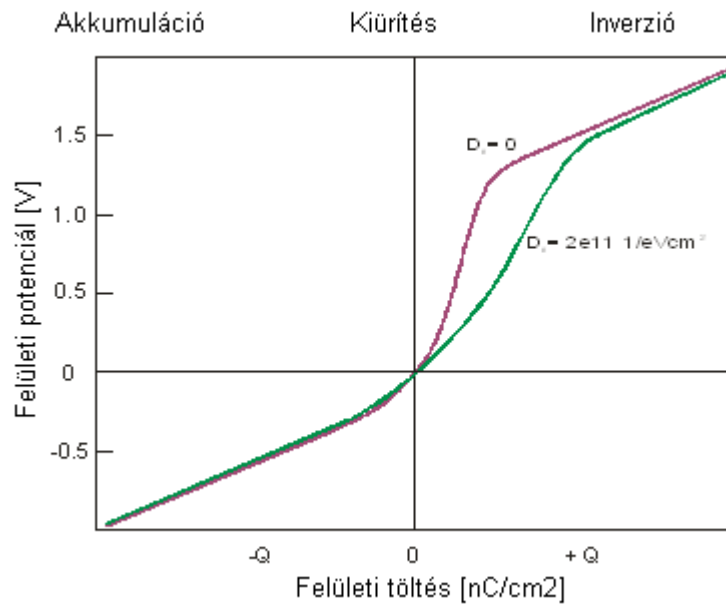
3.1.2 Rezgőelektródás (Kelvin-féle) mérőfej

A Kelvin mérőfej egy rezgő elektródát tartalmaz, a mérés elvi elrendezése a 2. ábrán látható. A mérés során az elektróda mintától mért távolsága kb. 1 mm, rezgésének amplitúdója és frekvenciája állandó. Ha a felület és az elektróda potenciálja különbözik, akkor a rezgés hatására váltóáram indukálódik. Az elektróda potenciálját (V) változtatva keressük a rajta folyó minimális áramot. Ekkor a Kelvin-fej potenciálja a felület potenciálját adja.



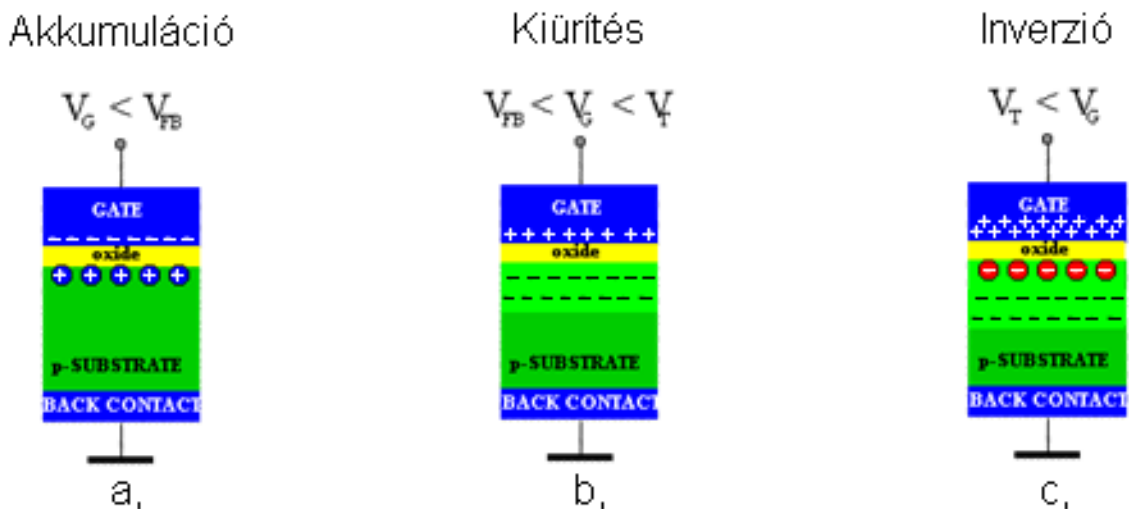
2. ábra - Kelvin-féle rezgőkondenzátoros mérőfej

3.1.3 A V-Q görbe jellegzetességei



3. ábra – Ideális (lila) és mért (zöld) V-Q görbe

Az ideális V-Q görbe gyakorlatilag két függvény replusz összegeként írható fel. Egyrészt van egy lineáris függvény, ami az oxidkapacitást írja le. Lényegében tisztán ez írja le az akkumulációs és inverziós szakaszt. Emellett van egy nemlineáris függvény, ami a kiürített réteg változó tértöltés kapacitását írja le. Ezen két függvény replusz összege adja az 3. ábrán látható ideális V-Q görbe inverzió és akkumuláció közötti kiürítési szakaszát (lásd alább).



4. ábra - A félvezető felület közelében a töltések elhelyezkedése (a) akkumuláció, (b) kiürítés és (c) inverzió esetén p-típusú szeletnél.

A V-Q mérés közben a mérendő MIS (Metal-Insulator-Semiconductor) rendszer állapotait a 4. ábra mutatja szemléletesen. A félvezető többségi töltéshordozóival (p típus esetében pozitív lyukak, n típus esetében szabad elektronok) ellentétes töltést juttatva a dielektrikumra, a többségi töltéshordozók felhalmozódnak a félvezető felületén. Ezt a szakaszt hívjuk akkumulációs (4/a ábra) tartománynak. Ebben a szakaszban az elektromos tér a félvezetőbe nem tud behatolni. Amennyiben a dielektrikumra a többségi töltéshordozókkal azonos töltést viszünk fel megfelelően nagy mennyiségben, akkor a félvezető felület közelében a kisebbségi töltéshordozók többségbe kerülnek a félvezetőbe behatoló nagy elektromos térerő hatására és ismét egy vékony rétegben elhelyezkedve semlegesítik az újabb és újabb lépésekben felvitt töltést. Ezt a szakaszt hívjuk inverziós (4/c ábra) szakasznak. Mivel a lépésenként felvitt töltéseket akkumuláció és inverzió esetében a félvezető felület közelében egy vékony rétegben felgyűlő töltések semlegesítik, a V-Q görbe ezen szakaszai lineárisak, és meredekségük az dielektrikum vastagságát, vagyis kapacitását (C_{ox}) jellemzi. Az akkumuláció és az inverzió között található a kiürítés tartománya, amikor korlátozott mennyiségben a többségi töltéshordozókkal azonos töltéseket viszünk a dielektrikumra. Ekkor a félvezető felülete közeléből a szabad többségi töltéseket eltávolítjuk, a tér behatol a félvezetőbe, de még nem elég nagy ahhoz, hogy a kisebbségi töltések többségbe kerülhessenek a felületnél. A lépésenként felvitt töltéseket a kiürülés (4/b ábra) egyre vastagodó tartományában maradó ionizált adalékatomok töltése semlegesíti. Ekkor tehát a dielektrikum kapacitásához sorosan kapcsolódik a félvezető kiürített rétegének kapacitása (C_s) is (4.1). Ennek megfelelően a V-Q görbe ezen a szakaszon meredekebb a 4.1 egyenletnek megfelelően.

$$C_{depl} = \frac{C_s C_{ox}}{C_s + C_{ox}} \quad (4.1)$$

Az ideális és a mért görbe összevetésével határozhatjuk meg a különböző oxidban lévő töltések mennyiségét, határfelület (interface) minőségét.

3.1.4 Mérés sötétben és megvilágítással

A felvitt töltés és a szelet vezetési típusának függvényében a szigetelő réteg alatt a félvezetőben akkumuláció, kiürülés, ill. inverzió jöhet létre (4. ábra), amely járulékos

tértöltés kapacitást eredményez. Tehát ekkor nem csak az oxidkapacitáson eső feszültséget mérjük, hanem a félvezető szelet felületi potenciálját is.

Egy félvezetőt nagy intenzitású és megfelelő energiájú (hullámhosszú) fényel megvilágítva elektron-lyuk párok keletkeznek. Ha a világítás folyamatos, akkor flat-band állapot (lásd később) alakul ki a félvezetőben, mely a megvilágítás kikapcsolása után megszűnik.

Az előzőeket kicsit továbbgondolva, ha adott mennyiségű felvitt töltés esetén mérünk feszültséget sötétben, aztán megvilágítással, akkor azt vehetjük észre, hogy a két esetben nem ugyanazt a feszültséget mérjük a V-Q görbe egy adott pontjától kezdődően. A megvilágítással és anélkül mért görbék elágazásánál a félvezető megvilágítás nélkül is flat-band állapotban van (hacsak nem különösen rossz interface minőségű dielektrikumról van szó).

A V-Q mérés nem csak szilícium-dioxid, hanem a napjainkban egyre elterjedtebb high-k (SiO_2 -nél nagyobb dielektromos állandójú) és low-k (SiO_2 -nél kisebb dielektromos állandójú) dielektrikumrétegek mérésére is alkalmas. A speciális dielektrikum anyagok rétegszerkezete és összetétele a gyártók féltve őrzött technológiai titka, ezért a mérések során ún. EOT-ben (Equivalent Oxide Thickness) szokás megadni ezen anyagok rétegvastagságát. Ez azt jelenti szemléletesen, hogy a mért kapacitásnak milyen vastag szilícium-dioxid réteg felelne meg. Ebből majd a gyártó kiszámíthatja a számára kellő rétegvastagságokat ismerve a technológia és a felhasznált anyagok, rétegek tulajdonságait.

3.2 C-V mérés

3.2.1 A hagyományos C-V mérés

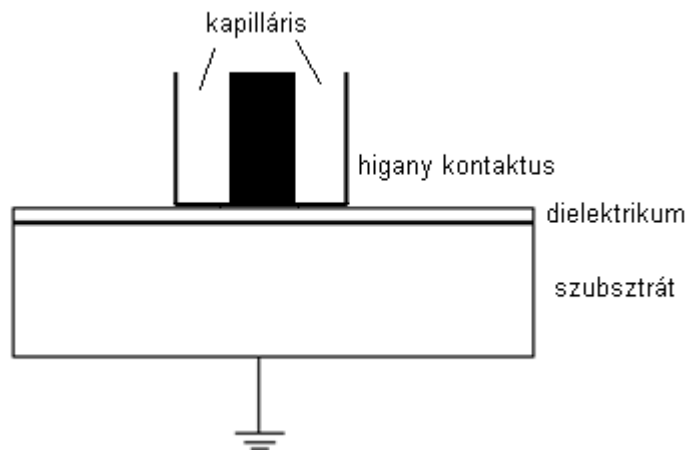
A módszer lényege, hogy a kialakított oxidhoz, egyéb dielektrikumhoz, vagy magához a félvezető, ill. epitaxiális réteg felületéhez egy felgőzölt fém elektróda segítségével kapcsolódunk, ahogy az 6. ábrán látható. Ezen az elektródán keresztül eltérő DC feszültségeket alakítunk ki, és a létrejövő szerkezet differenciális kapacitását AC gerjesztéssel mérjük.

Az eljárás roncsolásos, mivel a szelet, amin kialakítjuk a méréshez szükséges fémelektrodát, nem mehet vissza a gyártás esetleges további fázisaiba; emiatt nem is

tudunk minden szeletet végigmérni. Mindössze a mért szeletből tudunk következtetni arra, hogy a többi is hasonló paraméterekkel bír, mert azonos technológiai lépéseken mentek keresztül kb. azonos feltételek között és felételezzük, hogy a gyártósor állapota időben csak lassan változik.

3.2.2 Higanyc-V

A Hg C-V mérés népszerűségét annak köszönheti, hogy nagyon gyorsan létrehozható és megszüntethető a kontaktus. A kontaktust ebben az esetben ugyanis egy kapillárisban lévő higany teremti meg a szelettel (5. ábra). A módszer tehát érintéses, de a hagyományos C-V technikával ellentétben roncsolásmentes és a gyártói ajánlás szerint az esetleges felületi szennyeződések egy mérés utáni mosással el lehet távolítani, majd a szelet visszakerülhet a gyártás további fázisaiba. Tehát a C-V mérés minden eddig ismert tulajdonsága vonatkozik erre a módszerre is, csak a fémes kontaktus kialakításában, ill. a mérést érintő felület nagyságában tér el attól, ami HgC-V esetén nagyságrendileg 2 mm átmérőjű kör.



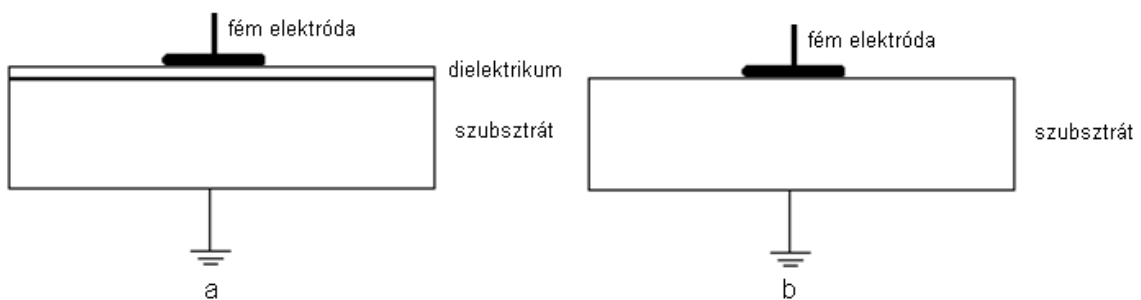
5. ábra – HgC-V kontaktus

A kontaktus kialakítása egy légpárnás emelőszerkezet és egy emelőkar segítségével történik az MCV platformok esetében. A könnyű kapillárisos mérőfej a kar végén található. A higany nem nedvesíti a SiO_2 felületeket, ezért túlnyomás szükséges ahhoz, hogy megfelelő legyen a kontaktus. Mivel az elektróda igazodik a felületi egyenetlenségekhez, kiválóan alkalmas porózus rétegek minősítésére is, mint pl. az alacsony dielektromos állandójú, ún. low-k anyagok.

A higany jelenléte környezet- és munkavédelmi problémákat vet fel, mivel a higany alkalmazását igyekeznek az ipari alkalmazásokban is a lehető legnagyobb mértékben

visszaszorítani. Fontos kérdés, hogy a kontaktus megszüntetésekor marad-e higany a szelet felületén, vagy sem. Mivel a higany a SiO_2 felületet nem nedvesíti, ezért jól beállított készüléknél elhanyagolható mértékű szennyeződés marad a szelet felületén.

Alapvetően kétféle mérési elrendezést különböztetünk meg, attól függően, hogy az elektróda és a szubsztrát között van-e dielektrikumréteg, vagy nincs. Amennyiben van dielektrikumréteg, MIS (Metal-Insulator-Semiconductor – Fém-szigetelő-félvezető), ill. MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) mérésről van szó (5/a ábra), ha nincs, akkor Schottky mérésről (5/b ábra).



6. ábra – MIS (a) és Schottky (b) mérés keresztmetszeti elrendezése

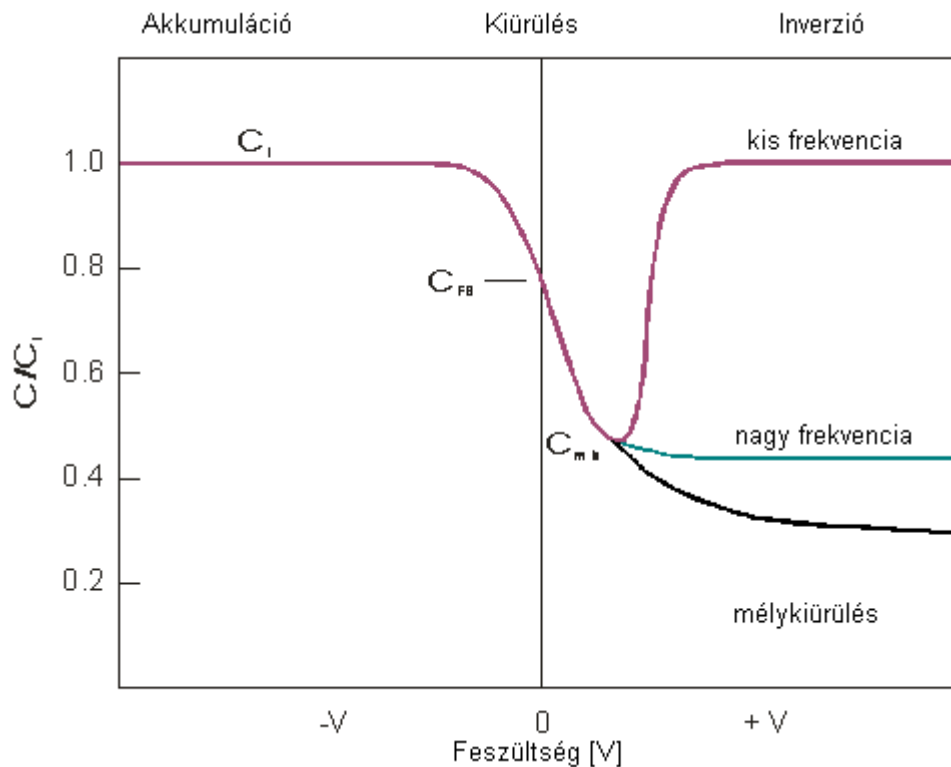
3.2.3 MIS C-V mérések

MIS mérés esetén megkülönböztetünk kis- és nagyfrekvenciás mérést. Nagyfrekvenciás mérésnél a felületi állapotok és a kisebbségi töltéshordozók reagálási sebessége a lényeges. Ha nagyon nagy a frekvencia, akkor nem képesek követni a mérőjelet, ezáltal a mért kapacitás értékét nem befolyásolják, ahhoz csak a többségi szabad töltéshordozók járulnak hozzá. Külön nehézség, hogy ezek mindegyike más frekvencián határolja a mérést és mindent befolyásol a sávhajlás mértéke is.

A változás sebességét tekintve megkülönböztetünk lassú és gyors felfutású (ramp rate-ű), ill. impulzusszerű mérést, amikor az egyre nagyobb bias feszültséget lépésenként mindig 0V feszültségről indítva, impulzusszerűen hozzuk létre. Lassú mérés esetén ún. steady-state állapotban (kisjelű szempontból egyensúlyinak tekinthető) történik a mérés. A steady-state állapotot részletesen leírja az [1] irodalom 3.1-es fejezete. Gyors változással lehetséges az ún. mélykiürüléssel (deep depletion) állapot elérése, impulzusszerű méréssel szintén mélykiürülés érhető el, továbbá a statikus átütési (breakdown) feszültségnél nagyobb feszültségek is alkalmazhatóak a minta

roncsolása nélkül. Azt, hogy a ramp rate-et gyorsnak vagy lassúnak tekintjük, az szintén a töltéshordozók reagálási sebességétől függ.

A 7. ábrán lassú ramp rate-tel felvett kisfrekvenciás (low frequency - LF) és nagyfrekvenciás (high frequency - HF), ill. egy gyors ramp rate-tel felvett nagyfrekvenciás mélykiürüléssel $C-V$ görbe látható. A kisfrekvenciás görbe gyakorlatilag a megfelelő $V-Q$ görbe feszültség szerinti deriválásával kapható. Ettől a nagyfrekvenciás görbe az inverziós tartományban tér el. Ekkor a kisebbségi töltéshordozók hozzájárulása a gerjesztésre adott válaszban elmarad, így továbbra is az oxid és a kiürített réteg együttes kapacitását mérjük, ahol a kialakult inverzió miatt, a kiürülés mélysége maximum értéket vesz fel (vízszintes szakasz a pozitív oldalon). A mélykiürüléssel a görbe esetében az inverzió nem is alakul ki, így kisebbségi töltések egyáltalán nincsenek, vagyis a kiürülés folyamatosan növekszik a pozitív feszültség növelésével, és a mért kapacitás csökken.



7. ábra – Különböző $C-V$ görbék a mérőjel típusa szerint.

A kapott grafikonból meglehetősen sok információt lehet megtudni a struktúra minőségét illetően, mint pl. szelet vezetési típusa, flatband feszültség, oxidkapacitás,

(ekvivalens) oxidvastagság, oxid szennyezettsége, interface minősége, oxid szivárgási áram. A kapott értékekből természetesen sok paraméter még közvetve meghatározható.

Az elméleti görbét érdemes ábrázolni a mért görbékkel, mert a mért és a számítás eredményeként kapott görbe közti eltérés az oxidban található hibákkal szoros összefüggésben van.

A két görbe között az alábbi különbségek figyelhetők meg:

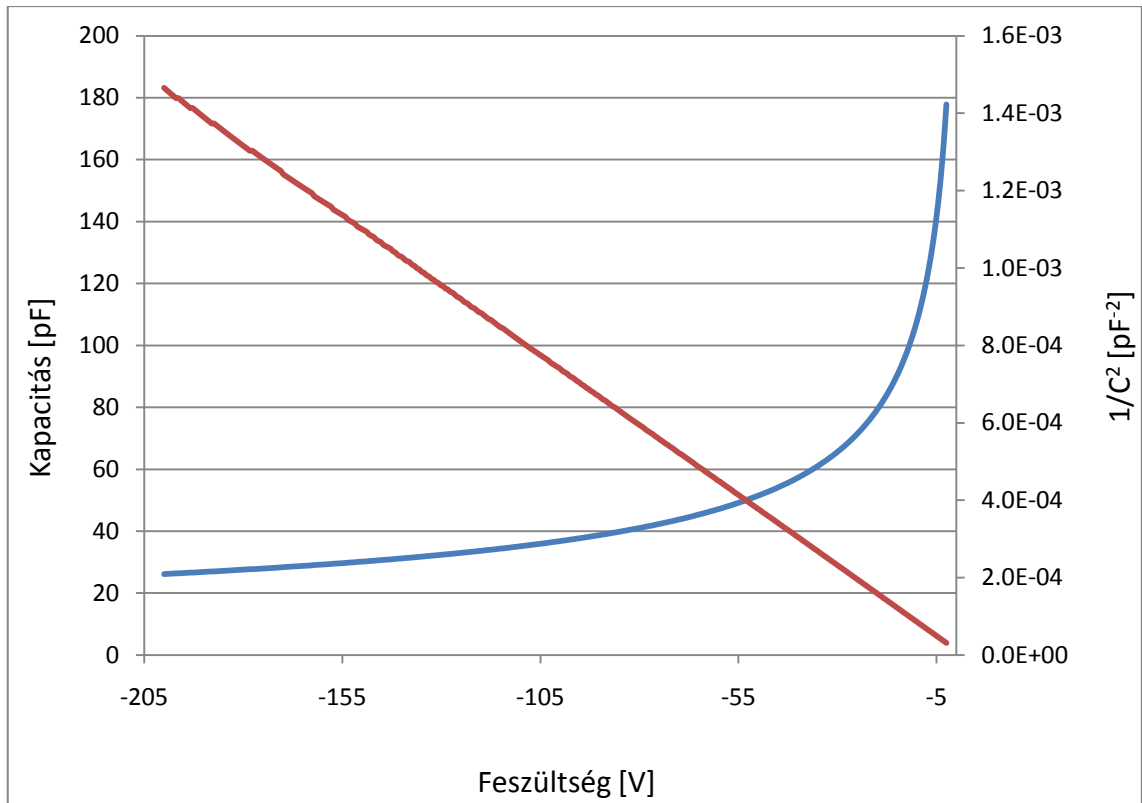
- A görbe eltolódik az ideálshoz képest a feszültség tengely mentén. Az eltolódás mértékét tekintjük a flat-band feszültségnek, amiről az oxidban található töltések mennyiségére lehet következtetni.
- A kiürülési szakasz meredeksége is csökken, vagy akár lokális púpok jelennek meg az ideálshoz képest. Ebből a felületi állapotok sűrűségét (D_{it}) lehet meghatározni. A felületi állapotokról a későbbiekben részletesebben szó lesz.
- Az akkumulációs szakasz, ill. a kisméretűs görbe inverziós szakaszának vízszintestől való eltérésekből következtetni lehet a dielektrikum szivárgására.

3.2.4 Schottky C-V mérés

Schottky mérésből kapott tipikus görbét a 8. ábra mutatja. Itt máris egy szilícium-karbid mintán végzett mérést mutatok be. A korábban említetteknek megfelelően a Schottky mérés segítségével adalékolást (4.3) lehet meghatározni mélység (4.2) függvényében az $1/C^2$ görbe segítségével, ahol C a mért kapacitás értéke. A különböző meredekségű szakaszokból az egyes rétegek adalékolására és azok vastagságára lehet következtetni, ill. a felületi állapotok sűrűségére (D_{it}) [3].

$$C = \frac{K_s \varepsilon_0 A}{w} \rightarrow w = \frac{K_s \varepsilon_0 A}{C} \quad (4.2)$$

$$N_A(w) = - \frac{C^3}{qK_s \varepsilon_0 A^2 \frac{dC}{dV_G}} = \frac{2}{qK_s \varepsilon_0 A^2 \frac{d(1/C^2)}{dV_G}} \quad (4.3)$$



8. ábra – SiC mintákon végzett Schottky mérés eredményeként kapott tipikus C-V (piros) és $1/C^2$ (kék) görbék.

4 C-V és V-Q mérés elméleti háttere

A Poisson-egyenletből (5.1) kiindulva levezethető egyaránt a C-V és V-Q görbe is. Ezek a levezetések teljes részletességben megtalálhatóak a szakirodalomban ([1] 2. és 3. fejezetei). A szilícium, ill. egyéb 1 eV körüli tiltott sávú félvezetők esetén, mint pl. a germánium (Ge) vagy a gallium-arszenid (GaAs) az egyensúlyi állapotokra vonatkozó elmélet jól használható alapul szolgál a mérések kiértékelésére is. A nagy tiltott sávú félvezetők esetén az egyensúlyi állapotokra vonatkozó elméletből kiindulva nem mindig lehet mérés kiértékelési eljárást kidolgozni. Ahogy később majd látni fogjuk, hiába érvényes a szilícium-karbidra is az egyensúlyi inverzióra vonatkozó elmélet, praktikus mérési időn belül az egyensúlyi állapot nem jön létre a nagy relaxációs idők miatt. Ebben a fejezetben egy rövid áttekintést adok ezekről, hogy a későbbiekben ismertetett, szilícium-karbidon mért eredmények kiértékelésekor egyszerűbb legyen megérteni az egyes észrevételeket, elhanyagolásokat. A levezetés során p-típusú anyagból indulok ki.

$$\frac{d^2\phi(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon} \quad (5.1)$$

4.1 A Poisson-egyenlet megoldása

A Poisson-egyenlet a félvezető anyag felülete közelében az (5.2) egyenlet formájában írható fel. Az egyenlet bal oldalán a potenciál felülettől mért mélység szerinti második deriváltja szerepel, jobb oldalán pedig egy adott térrészben található töltéssűrűség, osztva a szilícium dielektromos állandójával. A töltést egy adott térrészben az összes elektron, lyuk, donor és akceptor ion töltése adja.

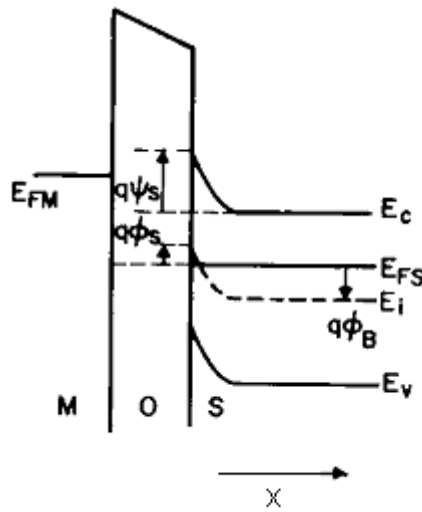
$$\frac{d^2\phi(x)}{dx^2} = \frac{-q(p(x) - n(x) + N_D - N_A)}{\varepsilon_s} \quad (5.2)$$

A sávmélet elfogadott jelöléseivel a többségi (5.3) és kisebbségi töltéshordozók (5.4) eloszlása a mélység függvényében az alábbi módon alakul p-típusú félvezetőben, vagyis $N_D=0$ donor adalékolást feltételezve.

$$p(x) = n_i e^{\frac{-q\phi_{bulk}}{kT}} e^{\frac{-q\psi(x)}{kT}} = N_A e^{\frac{-q\psi(x)}{kT}} \quad (5.3)$$

$$n(x) = n_i e^{\frac{q\phi_{bulk}}{kT}} e^{\frac{q\psi(x)}{kT}} = \frac{n_i^2}{N_A} e^{\frac{q\psi(x)}{kT}} \quad (5.4)$$

A (5.3) és (5.4) egyenletekben megjelenő Φ_{bulk} és $\Psi(x)$ potenciálok a 9. ábrán láthatóak; a Φ_{bulk} az ún. bulk-potenciál, magyarul térfogati potenciál, vagyis az intrinsic Fermi-szint és a tényleges adalékolt szilícium Fermi szintje közötti különbség, a $\Psi(x)$ pedig a sávhajlás a felülettől mért távolság függvényében. Ψ_s pedig a sávhajlás mértékét mutatja a felületnél. $\rho(x)$ és a $\Psi(x)$ a bulkban megfelelő mélységben állandó, minket igazából csak a felület közeli változások érdekelnek.

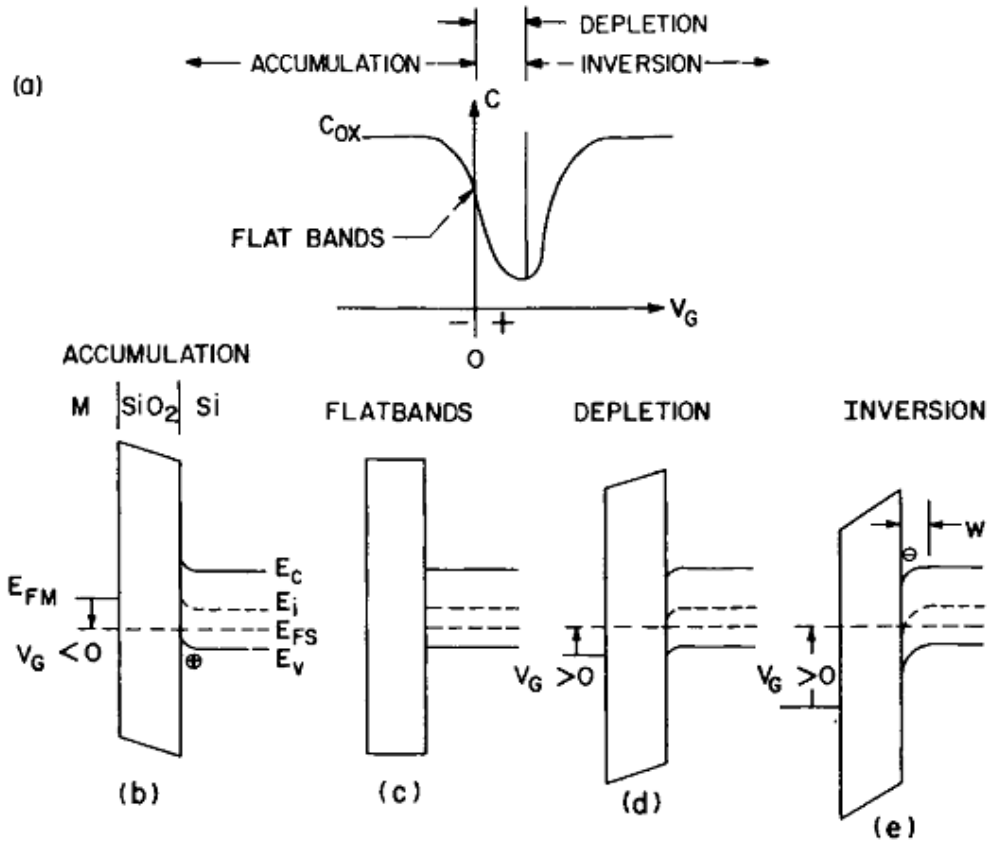


9. ábra - A sávmélet alapvető jelöléseinek bemutatása MOS struktúráján [1].

Az (5.2) számlálójában szerepel az adott térrész összes töltéssűrűsége, melyet a (5.3) és (5.4) felhasználásával az alábbi formában írhatunk fel.

$$\rho(x) = qN_A \left(-1 + e^{\frac{-q\psi(x)}{kT}} - \left(\frac{n_i}{N_A} \right)^2 e^{\frac{q\psi(x)}{kT}} \right) \quad (5.5)$$

A 10. ábra a C-V görbe egyes szakaszain kialakuló akumulációs, kiürítési és inverziós töltésseloszlás állapotokat mutatja. Szemléletesen már említésre kerültek ezek az állapotok a dolgozatom 4.1.3 fejezetében. Az ábrából látszik, hogy a MOS struktúra felületén a potenciál változása a félvezető tömb felülete közelében hoz létre érdembeli változást.



10. ábra - A C-V görbe szakaszai és azokhoz tartozó töltéeloszlások a félvezető felületének közelében [1]

Átrendezések után a Gauss-törvényt alkalmazva levezethető a teljes felületi töltésmennyiség a felületi sávhajlás függvényében ([1] – 2.3.2. fejezet).

$$Q_s = -\varepsilon_s E_s = \pm \frac{\sqrt{2}\varepsilon_s kT}{q\lambda_p} \sqrt{e^{\frac{-q\psi_s}{kT}} + \frac{q\psi_s}{kT} - 1 + \left(\frac{n_i}{N_A}\right)^2 \left(e^{\frac{q\psi_s}{kT}} - \frac{q\psi_s}{kT} - 1\right)} \quad (5.6)$$

λ_p az ún. extrinsic Debye-hosszot jelöli, ami azzal arányos, hogy az elektromos térerősség milyen mélyen hatol be a félvezető anyagba.

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\varepsilon_s kT}{q^2 N_A}} \quad (5.7)$$

A félvezető struktúra teljes statikus kapacitása a felületen lévő összes töltés és a struktúrán eső feszültség hányadosaként értelmezhető (5.8). A kis- és nagyfrekvenciás

C-V mérésnél a feszültségváltozás hatására létrejövő töltésváltozásból meghatározható a struktúra adott frekvencián érvényes differenciális kapacitása. A továbbiakban mindig a kisjelű közelítésnél érvényes differenciális kapacitást jelöli a kapacitás.

$$C_{stat} = \frac{Q_{total}}{V_G} \Leftrightarrow C_{diff} = \frac{dQ_{total}}{dV_G} \quad (5.8)$$

A MIS struktúra félvezető felületi töltéseire felírva a Gauss-törvényt kapjuk a (5.9) egyenletet. A kapacitásban létrejövő térerősség kifejezhető a rajta eső feszültség és a kiürített réteg szélességének hányadosaként.

$$E_s = -\frac{Q_s(t)}{\epsilon_s} = \frac{V_G(t) - \psi_s(t)}{t_{ox}} \quad (5.9)$$

A felületegységre vonatkoztatott oxidkapacitás az alábbi formában írható fel (5.10).

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} \quad (5.10)$$

Az oxidkapacitásra az előzőek ismeretében felírható a (5.11) összefüggés.

$$C_{ox}(V_G(t) - \psi_s(t)) = -Q_s(t) \quad (5.11)$$

A kisjelű közelítésben az elektródpotenciál (5.12) és a sávhajlás (5.13) felírhatók olyan alakban, mint egy konstans és egy változó tag összege. Nagyon kis változásokra belátható, hogy a (5.14) közelítés igaz ([1] – 3.2.1 fejezet).

$$V_G(t) = V_G + \delta V_G(t) \quad (5.12)$$

$$\psi_s(t) = \psi_s + \delta \psi_s(t) \quad (5.13)$$

$$Q_s(t) = Q_s(\psi_s + \delta\psi_s(t)) = Q_s(\psi_s) + \frac{dQ_s}{d\psi_s} \delta\psi_s(t) \quad (5.14)$$

A (5.14) egyenletben szereplő differenciálhányados valójában a félvezető változó kapacitását írja le kisjelű esetben, ezért érdemes bevezetni a C_s jelölést (5.15).

$$\delta Q_s(t) = \frac{dQ_s}{d\psi_s} \delta\psi_s(t) = -C_s(\psi_s) \delta\psi_s(t) \quad (5.15)$$

A (5.16) egyenlet szemléletes jelentése az, hogy a mérőjel változásának hatására az oxidkapacitáson és a sávhajlásból eredő kapacitáson valójában ugyanaz a töltés jelenik meg. Az (5.16) egyenlet átrendezésével kapjuk a (5.17)-et, ami a sávhajlás és a gate feszültség kapcsolatára vonatkozó fontos alapösszefüggés, amit a későbbiekben is felhasználunk.

$$C_{ox}(\delta V_G - \delta\psi_s) = C_s(\psi_s) \delta\psi_s \quad (5.16)$$

$$\delta\psi_s = \frac{C_{ox}}{C_{ox} + C_s(\psi_s)} \delta V_G \Rightarrow \frac{\delta\psi_s}{\delta V_G} = \frac{C_{ox}}{C_{ox} + C_s(\psi_s)} \quad (5.17)$$

A mért összkapacitásra vonatkozik az 5.18 egyenlet, amit az előzőekben kapott teljes felületi töltés elektródpotenciál szerinti deriváltjaként kapunk. A láncszabály alkalmazásával belátható, hogy az oxidkapacitás és a félvezető sávhajlásból eredő kapacitása egymással sorosan van kapcsolva. Az itt ismét megjelenő C_s kapacitás a (5.6) egyenlet sávhajlás szerinti deriválásával kapható, ennek eredményét mutatja a (5.20) egyenlet.

$$C = -\frac{\delta Q_s}{\delta V_G} = -\frac{\delta Q_s}{\delta\psi_s} \frac{\delta\psi_s}{\delta V_G} = C_s(\psi_s) \frac{C_{ox}}{C_{ox} + C_s(\psi_s)} = \frac{C_s C_{ox}}{C_s + C_{ox}} \quad (5.18)$$

A flat-band állapotban mérhető kapacitás a félvezetőben a (5.19) szerint számítható, ahol λ_p az extrinsic Debye-hossz (5.7). Amennyiben a kisebbségi töltéshordozókat leíró tagokat (5.20)-ból elhagyjuk, akkor az (5.21) egyenletet kapjuk, amellyel a mélykiürítéses nagyfrekvenciás kapacitást írjuk le. A steady-state nagyfrekvenciás kapacitás elméleti leírásához a fentiekől eltérő gondolatmenet szükséges, amelyben a kiürítés mélységét ezetjük le és abból számolunk félvezető felületi kapacitást. Mivel a munkám számára ennek nincs gyakorlati jelentősége, ennek ismertetésétől eltekintek.

$$C_{FBs} = \frac{\epsilon_s}{\lambda_p} \quad (5.19)$$

$$C_s = \frac{C_{FBs}}{\sqrt{2}} \frac{1 - e^{-\frac{q\psi_s}{kT}} - \left(\frac{n_i}{N_A}\right)^2 e^{\frac{q\psi(x)}{kT}}}{\sqrt{\left(\frac{q\psi_s}{kT} - 1\right) + e^{-\frac{q\psi_s}{kT}} - \left(\frac{n_i}{N_A}\right)^2 e^{\frac{q\psi_s}{kT}}}} \quad (5.20)$$

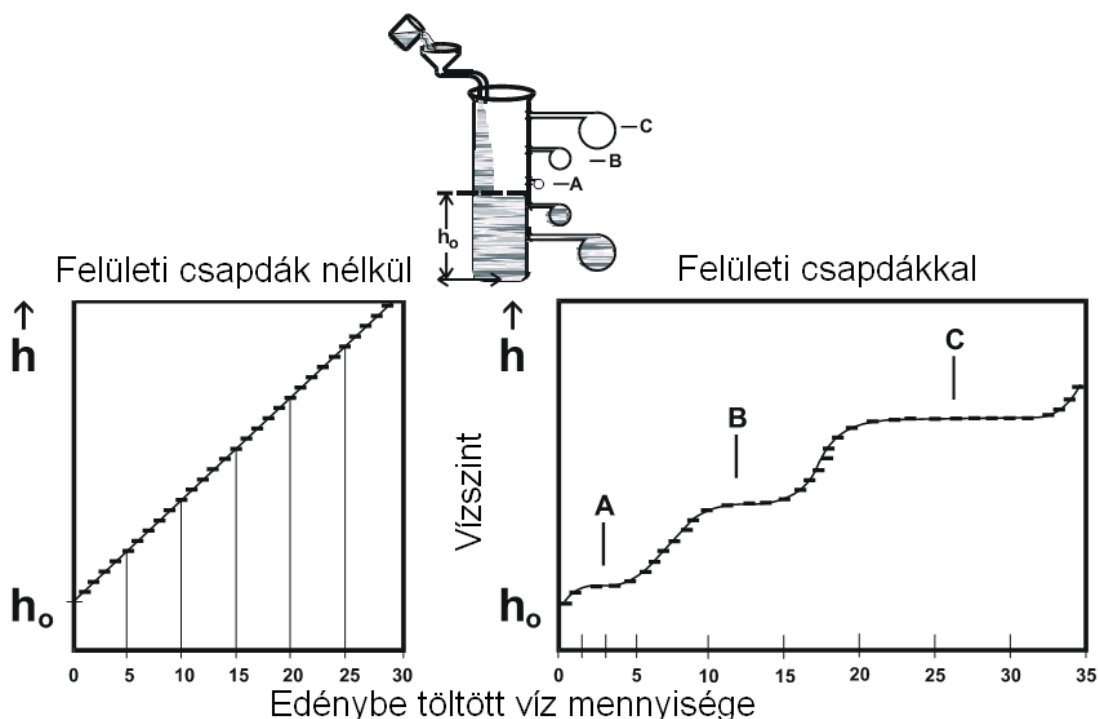
$$C_s = \frac{C_{FBs}}{\sqrt{2}} \frac{1 - e^{-\frac{q\psi_s}{kT}}}{\sqrt{\left(\frac{q\psi_s}{kT} - 1\right) + e^{-\frac{q\psi_s}{kT}}}} \quad (5.21)$$

4.2 Felületi állapotok hatása a V-Q és C-V mérésre

A félvezető-dielektrikum határfelület és közeli környezete lényegesen eltérő viselkedést mutat, mint a félvezető tömb belseje. A szabályos kristály struktúrájú félvezető és a - SiO₂ esetében amorf - dielektrikum határán mindkét szerkezet struktúrája torzul, a kötésekben feszültségek keletkeznek, sőt, bizonyos atomok vegyértékei kötésen kívül maradnak (lógó kötések – dangling bonds). Ezen felül a határfelület jellemzően összegyűjti a különböző szennyeződések is, amelyek tovább rontanak a struktúra rendjén.

A fenti jelenségek felelősek az irodalomban egységesen fix oxidtöltésnek nevezett, az interface közelében felhalmozódott kötött töltések megjelenéséért, amelyek a flat-band feszültség eltolásához járulnak hozzá. Fontos megemlíteni, hogy a dielektrikumban további töltések is jelen vannak, de dolgozatomban nem célja ezekkel foglalkozni. A másik, TDK munkám szempontjából fontos jelenség az úgynevezett felületi állapotok jelensége.

A felületi állapotokban jelenlévő töltés pozitív és negatív töltések előjeles összegeként adódik, viszont a mérések során csak az előjeles összegük mérhető. A torzulás alapvetően a Q_s - Ψ_s függvényben jelenik meg, és ennek hatására változás tapasztalható a V-Q és C-V görbékben. Ezekről a szemléletes hatásokról a korábbi fejezetekben szó esett már (3.1.3 fejezet 3. ábra, 3.2 fejezet 4. ábra).



11. ábra - A felületi állapotok szemléltetésére alkalmas vizespohár analógia.

Egy szemléletes magyarázat a felületi állapotok hatására a vizespohár analógia. A kiindulási feltételezés az, hogy egy függőleges falú pohár feltöltése közben a víz szintje és a betöltött vízmennyiség lineáris kapcsolatban van egymással, hasonlóan a felületi töltés és kapacitás is. Ha a 11. ábra szerinti torzított pohárba kezdünk vizet tölteni, akkor a lineáris függés is megváltozik az adott szakasz keresztmetszet változása miatt.

Ez szemléletesen megfeleltethető a felületi csapdákban lévő töltéseknek C-V és V-Q görbéket kinyújtó hatásának [5].

5 V-Q és C-V mérések szilícium-karbidon

5.1 Változások a szilíciumhoz képest

A szilícium-karbid tulajdonságait tekintve nagyon sok eltérést mutat a szilíciumhoz képest. Az intrinsic töltéshordozó koncentráció értéke szobahőmérsékleten a 4H politípusnál kb. $n_i=6 \times 10^{-9} \text{ 1/cm}^3$ [6]. Emellett az elektronok és lyukak mozgékonyága is meglehetősen nagy eltérést mutat (1. táblázat). Ennek következtében jellemzően az n-típusú szeleteket használják az iparban. Az alacsony intrinsic töltéshordozó koncentráció miatt a kisebbségi töltéshordozók száma csekély. Ez egy fontos szempont a bemutatott mérések kiértékelésénél. Fontos azt is megemlíteni, hogy nincs még szabványosított összefüggés a szilícium-karbid adalékkoncentrációja és ellenállása között. Mivel a C-V és V-Q mérések elméletében alapvetően az adalékolás jelenik meg, munkámban nem beszélek fajlagos ellenállásról.

A kisebbségi töltéshordozók reagálási ideje elsődlegesen a szubsztrát hibáiból adódó generáció-rekombináció viszonyától függ [1]. Ezek segítségével meghatározható a relaxációs idő (6.1).

$$\tau_R = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{N_D}{n_i} \left(1 - \frac{\psi_T}{\psi_B}\right)^{1/2} \frac{\tau_n e^{-\frac{q\psi_T}{k_B T}} - \tau_p e^{\frac{q\psi_T}{k_B T}}}{\ln\left(\frac{c_p}{c_n}\right) - \frac{2q\psi_T}{k_B T}} \quad (6.1)$$

Az előző összefüggés közelíthető az alábbi módon.

$$\tau_R \cong \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{N_D}{n_i} \left(1 - \frac{\psi_T}{\psi_B}\right)^{1/2} \sqrt{\tau_n \tau_p} \quad (6.2)$$

Elhanyagolva a tömbi mélynívók mennyiségét ($\psi_T=0$), ill. behelyettesítve az adalékolás és az intrinsic töltéshordozó koncentráció értékét, nagyságrendileg becsülhető a relaxációs idő (6.3). Könnyen belátható, hogy a jellemzően nano- és mikroszekundumos élettartamokkal jellemezhető SiC esetében a relaxációs idő a mérés idejénél sok nagyságrenddel nagyobb.

$$\tau_R = 9,25 \cdot 10^{24} \sqrt{\tau_n \tau_p} \quad (6.3)$$

5.2 Felhasznált minták

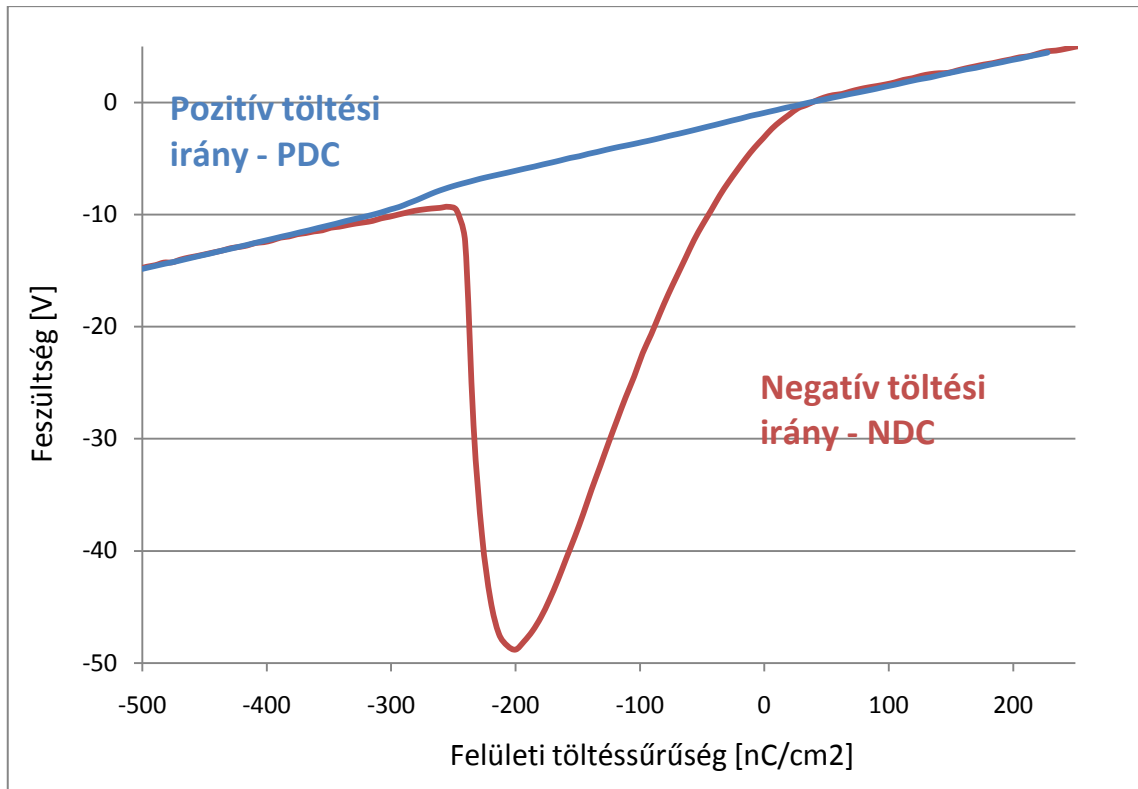
A felhasznált szilícium-karbid szeletek mind 3"-esek. Egy részük szilícium-dioxiddal borított, a többi pedig oxidmentes, epitaxiális réteggel ellátva. A szilícium-karbidon nehéz jó minőségű termikus oxidot növesztetni, a natív oxidja emellett viszont meglehetősen jó minőségű. Az általam mért oxidos minták specialitása, hogy nagyon jó minőségű oxidréteg van rajtuk, a világ egyik vezető alpanyaggyártójától származnak. Hasonló gyártástechnológiák elterjedésével még inkább fontossá válik a szilícium-karbid minősítése.

5.3 V-Q mérések eredményei

A V-Q mérésekhez a Semilab WT-2000-es mérőberendezését használtam, mely alkalmasnak bizonyult szilícium-karbid mérésére. Az elméleti áttekintőben említett sötétben és világosban végzett mérésekre (4.1.4 fejezet) szilícium-karbid esetében nem volt lehetőségünk, mert a berendezés vörös lézere nem megfelelő a vegyértéksávban lévő elektronoknak a kb. 3,2 eV-os tiltott sáv fölé történő gerjesztéséhez. A megfelelő gerjesztéshez UV lézerre lenne szükség (6.4), ami nem állt rendelkezésre, így a továbbiakban bemutatott mérési eredmények mind sötétben készültek.

$$W_g = h \frac{c}{\lambda} \rightarrow \lambda = h \frac{c}{W_g} = 4,135 \cdot 10^{-12} eVs \frac{3 \cdot 10^8 m/s}{3,2 eV} = 387,6 nm \quad (6.4)$$

A 12. ábrán látható görbéket egy oxiddal borított szilícium-karbid mintán mértem. A mérések reprodukálhatósága nagyon jónak bizonyult, minden minta nagyon hasonló viselkedést mutatott. Emiatt csak egy-egy tipikus mérés eredményén mutatom be az eredményeket.



12. ábra –Szilícium-karbidon mért V-Q „cápauszony” görbe negatív irányú töltés esetén (piros görbe). A pozitív irányú töltéssel ettől jellegében is eltérő görbét kapunk (kék görbe).

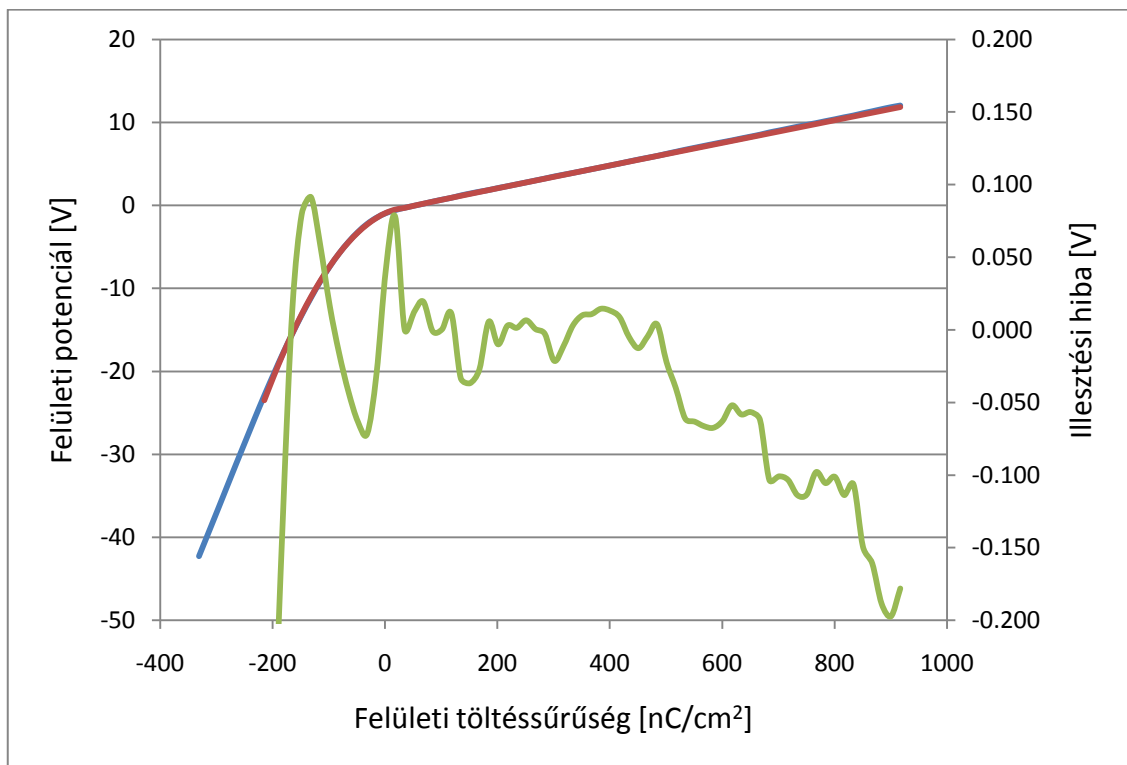
Az első szembevetendő különbség a szilíciumon mért V-Q görbékhez képest, hogy a pozitív irányú (PDC - positive direction charged) és negatív irányú (NDC – negative direction charged) töltés során eltérő jellegű görbékét mértem. Úgy ítélt meg, hogy a kettő közül a cápauszonyhoz hasonló alakot mutató NDC görbe alapján végezzük el a kiértékelést.

A szilícium-karbidban a kisebbségi töltéshordozók száma nagyon kevés, és a mérési időhöz képest nagyon nagy a relaxációs idő, ezért lényegében nem jönnek létre kisebbségi töltések, hanem teljes nem-egyensúlyi mélykiürüléssel állapodik létre. Kézenfekvőnek tűnt tehát a mért NDC görbére egy kiürítéssel közelítést alkalmazni. Ez annyit jelent, hogy az 5. fejezetben levezetett (5.6) V-Q görbe formulából elhagytam a kisebbségi töltéshordozókat jellemző tagokat (5.21):

$$C_s = \frac{C_{FBs}}{\sqrt{2}} \frac{1 - e^{\frac{-q\psi_s}{kT}}}{\sqrt{\left(\frac{q\psi_s}{kT} - 1\right) + e^{\frac{-q\psi_s}{kT}}}} \quad (6.5)$$

Az így kapott görbe meglehetősen jól illeszkedik az NDC „cápauszony” görbe megfelelően kiválasztott szakaszára. Az illesztési paraméterek az adalékolás, az oxidvastagság és a flat-band töltés. Ily módon az illesztés elvégzésével ezen mennyiségeket ki tudjuk fejteni a mérési eredményekből. Nagyon fontos észrevenni, hogy a szilíciumon végzett V-Q mérésekhez képest egy nagy hátrány jeentkezik azzal, hogy az egyensúlyi inverziós szakasz hiánya miatt kevesebb illesztési paraméter van. Ennek következménye, hogy az interfész állapotok hatását nem lehet az adalékolás hatásától szétválasztani a fenti kiértékeléssel. Ennek a hiányosságnak a kezelése további fejlesztéseket kíván meg.

Tovább növelve a felületi töltést, egy nagyon nagy felületi potenciálváltozás tapasztalható. Itt már akkora lehet a villamos térerősség a félvezetőben, hogy beindul a kisebbségi töltéshordozók keletkezése és a relaxációs idők becslésére adott fentebbi (6.1 – 6.3) közelítés nagyságrendileg is érvényét veszti. Feltételezhető, hogy a görbe további szakasza már egyensúlyi inverziós állapotot mutat, mivel a félvezető felülethez legközelebbi tartományában a térerősség továbbra is nagy marad, köszönhetően az inverziós réteg véges vastagságának.



13. ábra - Kiürítéses tartományon illesztett V-Q görbe. A piros a mért, a kék az illesztett görbe. Zölddel az illesztés hibája van jelölve.

A pozitív töltési irányban mért PDC görbére teljesen elfogadott magyarázat nincs. Alapos feltételezés, hogy az alábbi folyamat játszódik le. A görbe érdekessége, hogy a szokványos, például szilíciumon mért V-Q görbéhez hasonló „S” alakot mutatja. Az „S” alak hajlata viszont nem esik egybe az NDC görbe kiürítési szakaszának kezdetével, ahogy ezt jó minőségű oxidos szilícium esetében tapasztaljuk. Ennek az a magyarázata, hogy a felvitt töltéseket fokozatosan semlegesítve, a térerő a félvezetőben valószínűleg egy küszöbértéket átlépve olyan mértékűre csökken, hogy a relaxációs időkre alkalmazott (6.1 – 6.3) közelítés ismét érvényes lesz. Vagyis a relaxációs idő nagyon nagy lesz a görbe jobb oldali szakaszán és kicsi a bal oldalon. Ennek következtében, a küszöb-térerő csökkenő térerő irányban történő átlépésekor még meglevő inverziós réteg konzerválódik, és a további, a korona szállal felvitt pozitív töltéseket az akkumulálódó többségi, vagyis negatív töltések semlegesítik. Ez a magyarázata, hogy ez a görbe szépen belesimul az NDC görbe akkumulációs szakaszába.

A szilícium-karbid viselkedése szobahőmérsékleten nagyon hasonlít az alacsony hőmérsékletre hűtött szilícium viselkedéséhez [7][8]. Magas hőmérsékleteken tehát egyre inkább a szilíciumra kezd hasonlítani a szilícium-karbid viselkedése, ezért is kézenfekvő az alkalmazása.

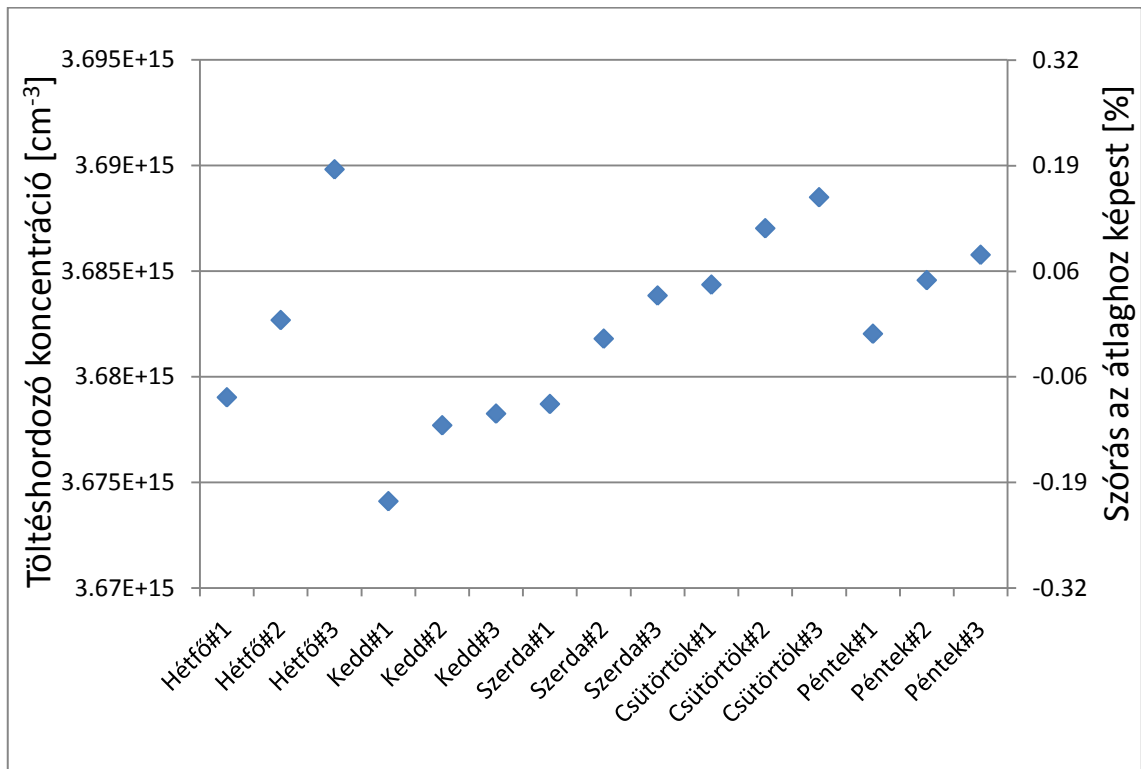
5.4 HgC-V mérések eredményei

A Semilab MCV-530 és MCV-2500 berendezéseivel végzett mérések azt mutatják, hogy a HgC-V alkalmas a különböző szilícium-karbid struktúrák mérésére, még akkor is, ha a felület nem igazán szép sima és egyenletes. Mind a Schottky, mint pedig a MIS méréseknél kimagaslóan jó reprodukálhatóságot tapasztaltam a mérési eredményeken (14. ábra).

5.4.1 Schottky mérések eredménye szilícium-karbid mintákon

Oxidmentes minták esetén (Schottky mérés) azt tapasztaltam, hogy a minták egyszerűen kiürítésbe vihetők. A 7. ábrán fentebb látható egy tipikus mérési eredményem, amin jól látható, hogy az $1/C^2$ görbe a teljes feszültségtartományban egyenes. Ezzel a módszerrel a szilícium-karbid minták adalékprofilja jóval nagyobb mélységig határozható meg, mint szilícium esetében, köszönhetően a kisebbségi töltéshordozók hiányának és a szilíciumnál nagyobb átütési szilárdságnak. Fontos külön kiemelni, hogy a szilícium mintákkal ellentétben a szilícium-karbid natív oxidja nagyon stabil. A mintákon

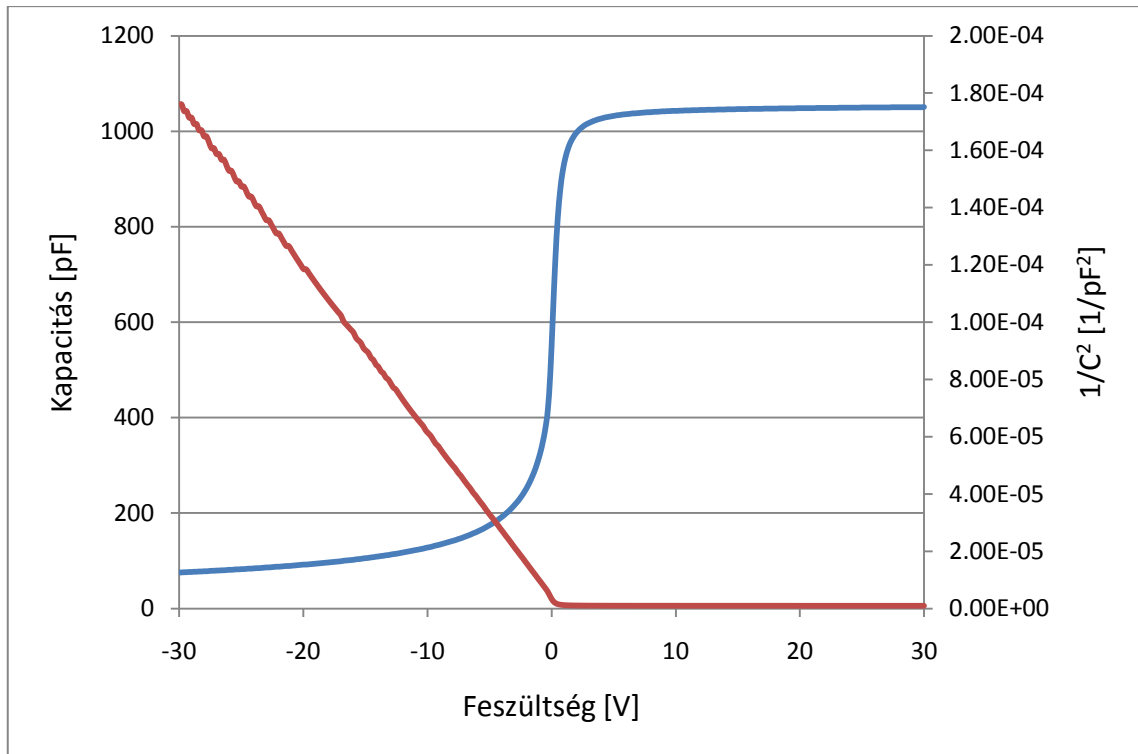
semmilyen felületkezelésre nem volt szükség a passziváláshoz, és a tapasztalat azt mutatja, hogy hosszabb ideig tárolva őket, ugyanolyan jól mérhetőnek bizonyulnak.



14. ábra - Hosszú idejű Schottky reprodukálhatósági mérés eredménye SiC epitaxiális mintán

5.4.2 MOS mérések eredménye szilícium-karbid mintákon

A 15. ábra MOS C-V mérés eredményét mutatja szilícium-karbidon. A görbe szinte tökéletesen egybevág a megfelelő elméleti mélykiürüléssel nagyfrekvenciás C-V görbével. Ezen újfajta technológiával előállított oxidos szilícium-karbid mintáknak nagyon jó a félvezető-oxid interfész határfelülete, és a tökéletes mély kiürülésnek köszönhetően a minta adalékprofilja nagy mélységben és nagy pontossággal megállapítható.



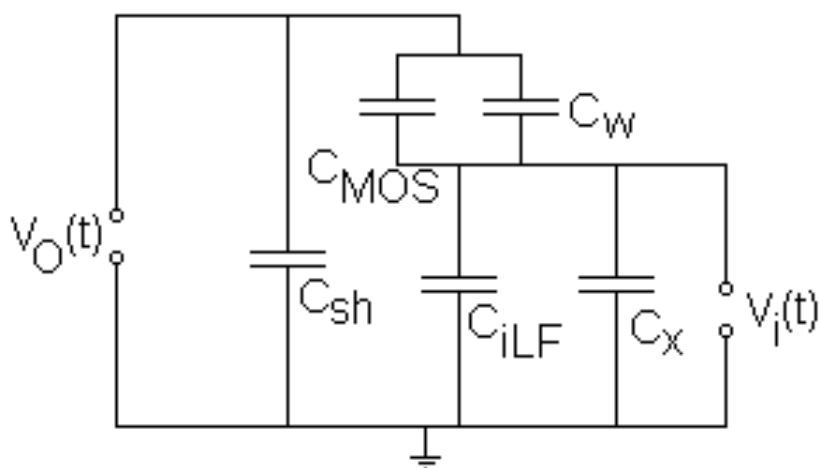
15. ábra – Oxidos SiC mintán mért MOS C-V görbe (kék) és $1/C^2$ görbe (piros).

6 Szilícium-karbid mérések a Q-V módszerrel

6.1 A Q-V mérések elmélete

A módszer lényege, hogy szimultán kis- és nagyfrekvenciás C-V mérés segítségével felületi állapotosság (D_{it}) meghatározása alkalmas. A szakirodalomban Q-C mérés néven is megtalálható [1][4].

A legtöbb kisfrekvenciás kapacitásmérés árammérésen, ill. töltésintegráláson alapul, ami nagyon kis áramok esetén meglehetősen zajos. A továbbiakban bemutatott elrendezésben viszont a MOS struktúrában megjelenő töltés meghatározása feszültségváltozások mérésével történik. Ez egyrészt sokkal pontosabb mérést tesz lehetővé, másrészt a mérés eredményeképp közvetlenül szolgáltatja a Ψ_s - V_G függvényt, amit a D_{it} számításokban közvetlenül használunk fel.



16. ábra – A Q-V módszer mérési összeállítása

A 16. ábra mutatja a mérési összeállítást. A mérendő MOS kapacitás mellett megjelenik a C_w szórt kapacitás. A MOS struktúrával sorbakötve található egy ismert és állandó mérőkapacitás C_{iLF} . Az ezzel párhuzamosan megjelenő szórt kapacitás C_x . C_w és C_x kalibrációval határozható meg.

Csomóponti egyenleteket felírva adódnak az alábbi összefüggések. A C_w - C_{MOS} kapacitásokon eső feszültség V_O és V_I különbségeként számolható.

$$V_G(t) = V_O(t) - V_i(t) \quad (7.1)$$

A kapacitások közötti töltésáramlások alapján felírható a (7.2) egyenlet:

$$\Delta Q_x(t) + \Delta Q_i(t) = \Delta Q_w(t) + \Delta Q_{MOS}(t), \quad (7.2)$$

Ahol az alábbi töltésmennyiségek szerepelnek:

$$\Delta Q_i(t) = -C_{iLF} V_i(t) \quad (7.3)$$

$$\Delta Q_w(t) = -C_w V_G(t) \quad (7.4)$$

$$\Delta Q_x(t) = -C_x V_i(t) \quad (7.5)$$

A (7.2) egyenletet a MOS struktúrán lévő töltésre átrendezve kapjuk az alábbi összefüggést:

$$\Delta Q_{MOS}(t) = -(C_{iLF} + C_x) V_i(t) + C_w V_G(t) \quad (7.6)$$

Ugyanakkor a MOS struktúra oxidjára felírható a Gauss-törvény, ahol az oxidban uralkodó térerő változása az oxidon eső feszültség változásából és az oxidvastagságból számolható:

$$\Delta E_{ox} = \frac{V_G(t) - \psi_s - \psi_{s0}}{t_{ox}} = \frac{\Delta Q_{MOS}(t)}{\epsilon_{ox}} \quad (7.7)$$

V_G a kezdő időpillanatban 0V, a sávhajlás értéke ekkor Ψ_{s0} . A (7.7) összefüggést a MOS töltésre rendezve megjelenik az oxid kapacitása. Ezt beírva a (7.6) egyenletbe kapjuk az alábbi alapvető összefüggést:

$$\psi_s(t) = \psi_{s0} - \frac{C_{iLF} + C_x}{C_{ox}} V_i(t) + \left(1 + \frac{C_w}{C_{ox}}\right) V_G(t) \quad (7.8)$$

A (7.8) összefüggéssel meghatározott függvénnyel már számolható a MOS struktúra teljes kapacitása a MOS elmélet alapvető (7.9) egyenlete alapján. Mivel ehhez a Ψ_s - V_G függvény deriváltját használjuk fel, nincs jelentősége a nulla gate feszültségnél érvényes Ψ_{s0} sávhajlás értékének.

$$C_{MOS} = C_{ox} \left(1 - \frac{d\psi_s}{dV_G}\right) \quad (7.9)$$

A felületi állapotok sűrűsége a kis- és nagyfrekvenciás szimultán mérések alapján a (7.10) összefüggéssel határozható meg [1]:

$$D_{it} = \frac{C_{ox}}{q} \left(\frac{C_{LF}/C_{ox}}{1 - C_{LF}/C_{ox}} - \frac{C_{HF}/C_{ox}}{1 - C_{HF}/C_{ox}} \right) \quad (7.10)$$

A (7.9) egyenletben szereplő kapacitás tehát a kisfrekvenciás kapacitás. A nagyfrekvenciás kapacitást pedig a sávhajlás mérésével szimultán végezi a berendezés. A (7.10), egyenletbe beírva (7.9)-et kapjuk a Q-V mérésnél érvényes összefüggést a D_{it} meghatározására:

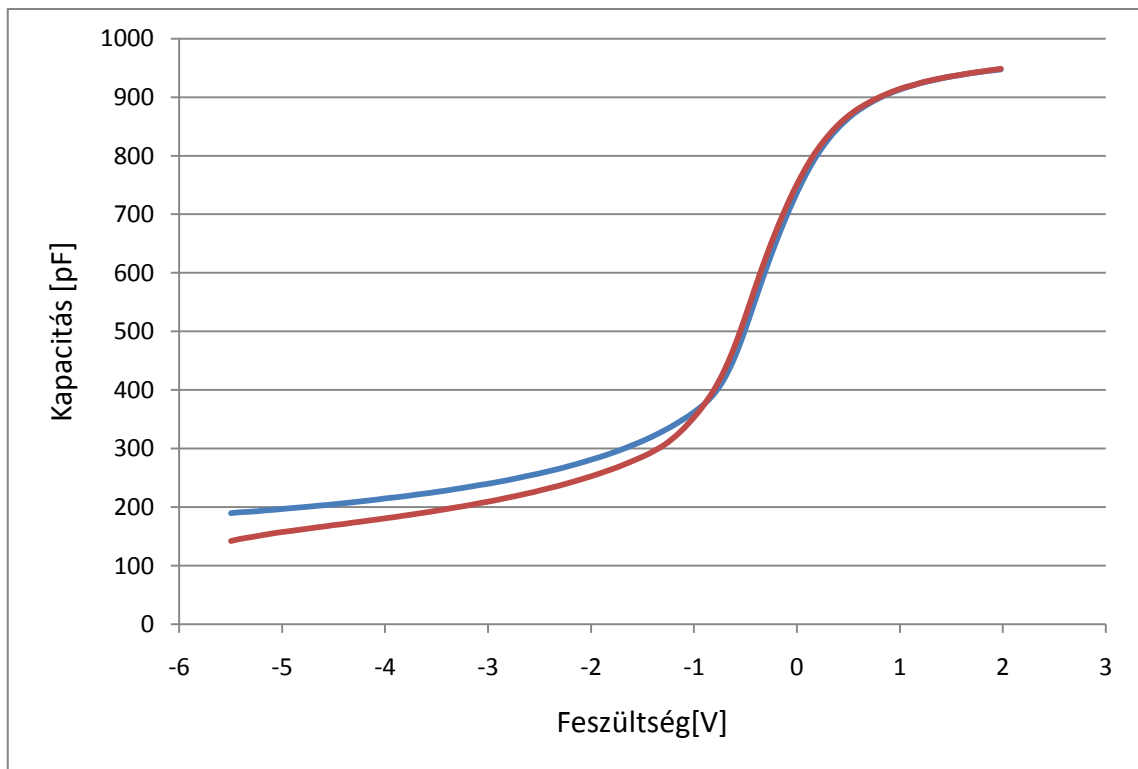
$$D_{it} \approx \frac{C_{ox}}{q} \left(\left(\frac{dV_G}{d\psi_s} - 1 \right) - \frac{C_{HF}/C_{ox}}{1 - C_{HF}/C_{ox}} \right) \quad (7.11)$$

6.2 A Q-V mérések eredményei

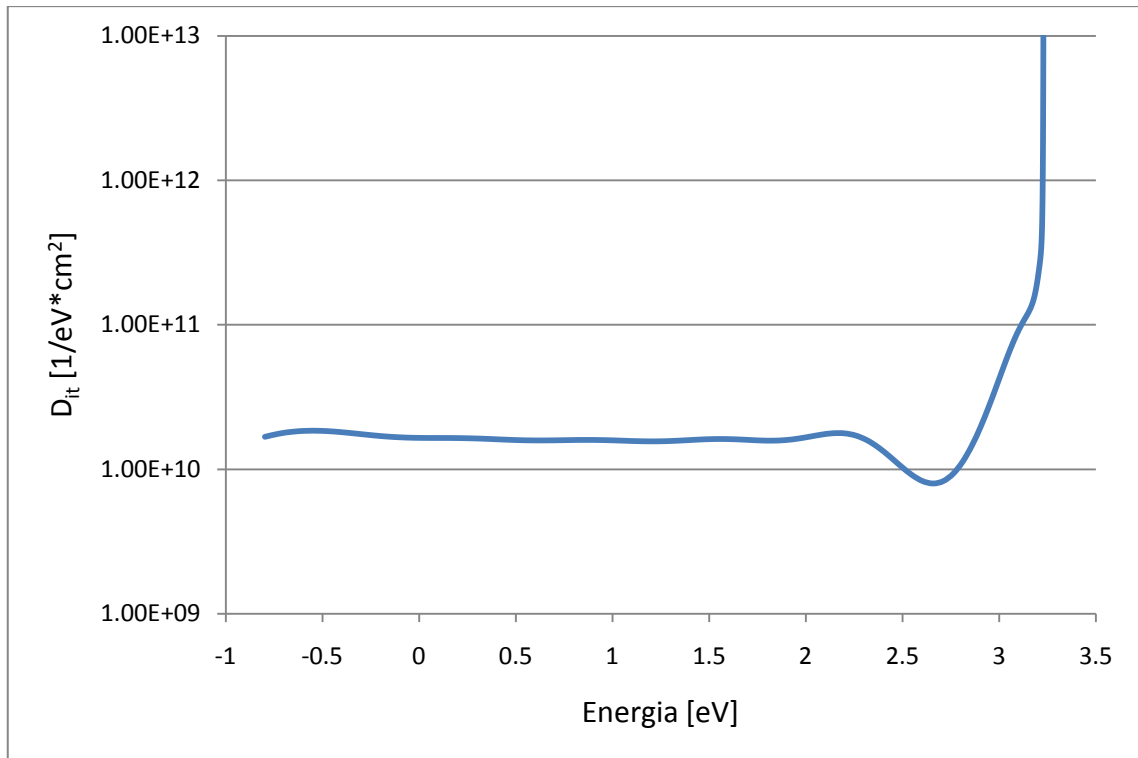
Számos Q-V mérést végeztem jó minőségű oxiddal ellátott szilícium-karbid mintákon. A mérések eredményei nagyon jól reprodukálhatónak bizonyultak. Egyik jellegzetes mérési eredményemet mutatja a 17. ábra, amin a mért kis- és nagyfrekvenciás

kapacitások láthatóak, ill. a 18. ábra, ami az ebből – az előző alfejezetben ismertett elmélet alapján – számolt D_{it} spektrumot mutatja.

A 18. ábra nagyon tanulságos. Szilícium esetében a D_{it} spektrum kis- és nagyfrekvenciás kapacitásméréssel történő meghatározásának a sávhajlás szempontjából két oldalról is szigorú korlátai vannak. Egyrészt ismert, hogy az akkumuláció felé közeledve az interfész állapotok egyre kisebb relaxációs idővel rendelkeznek, vagyis az 1 MHz, vagy annál jóval nagyobb mérési frekvencia sem tekinthető már nagyfrekvenciás mérésnek. Másképp megfogalmazva, ahogy közeledünk az akkumuláció felé, egy idő után érvényét veszíti az a közelítés, hogy a nagyfrekvenciás kapacitás mérésekor nem jelenik meg az interfész állapotok változása a gerjesztés hatására. A szilícium-karbid mérés esetében is így történik, erről tanúskodik az, hogy az ábra jobb oldalán, vagyis pozitív sávhajlásnál a D_{it} értéke „elszáll”.



17. ábra – Q-V módszerrel oxidos SiC mintán mért kisfrekvenciás (kék) és nagyfrekvenciás (piros) görbék



18. ábra – A 17. ábra eredményeiből számolt D_{it} spektrum

Ugyanakkor a D_{it} spektrum hasonlóan „elszáll” szilícium mérésnél a kiürítés irányában a nyitófeszültségen túl is (jelen esetben ez az ábra jobb oldalán lenne). Ekkor ugyanis megjelennek a kisebbségi töltéshordozók. A kisebbségi töltéshordozók ugyanúgy viselkednek, mint az interfész állapotok: a kisméretű gerjesztésre reagálnak, a nagyfrekvenciásra viszont nem. Vagyis ebben a tartományban a D_{it} helyett az interfész állapotok és a felgyűlő kisebbségi töltéshordozók sűrűségeinek összegét mérjük szilícium esetében. A szilícium-karbidon végzett mérés esetében ehhez hasonló „elszállást” nem látunk a nyitófeszültségen túl, vagyis a 18. ábra bal oldalán. Ennek oka egyszerűen az, hogy szilícium-karbid esetében ilyen feszültségeknél óriási a kisebbségi töltéshordozókra érvényes relaxációs idő, vagyis egyszerűen nem jelennek meg kisebbségi töltéshordozók. Így a szilícium-karbid Q-V mérése esetében azt tapasztaltam, hogy a mérés szélesebb tartományban ad értelmezhető eredményt, mint szilícium esetében.

A konkrét mérési eredmények mindezek mellett ismét megmutatták, hogy nagyon jó interfésszel rendelkező oxidos minták kerültek a birtokunkba. A mért D_{it} értéke nagyon alacsony, ebből is látszik, hogy a mért minták nagyon speciálisak. A rajtuk mért értékek

még szilícium minták esetében sem mondhatók mindennaposnak, az átlagos értékeknél legalább egy nagyságrenddel jobbak.

7 További tervek, lehetőségek

A legközelebbi jövőben a szilícium-karbid megfelelő méréséhez és kiértékeléséhez implementálni kell a korábban bemutatott közelítéseket, illetve a megfelelő anyagparamétereket a mérőberendezéseket vezérlő és a kiértékelést végző szoftverekben.

A V-Q berendezés hardveres fejlesztése terén az UV lézeres megvilágítás lehet az egyik nagyon fontos mérföldkő. Ehhez azonban sok járulékos fejlesztés is szükséges, mint pl. megfelelően hangolható UV lézer, UV tartományban átlátszó Kelvin mérőfej, stb.

A V-Q mérések eredményeképpen kapott NDC „cápauszony” görbe, illetve a fordított irányban történő töltéssel kapott PDC görbe magyarázatából sejthető, hogy UV megvilágítással nem érhető el egyensúlyi inverzió amennyiben a térerősség nagysága (vagyis a felvitt töltés nagysága) nem elég nagy a generáció-rekombináció beindításához. A V-Q módszer kiértékelésének fejlesztéséhez fontos lenne pontosan megérteni a PDC görbe elméletét és ez alapján olyan kiértékelést kidolgozni, ahol az adalékolást és az interfész állapot-sűrűséget szét tudjuk választani.

A szilícium-karbid fajlagos ellenállása és adalékolása közötti sztenderdizált összefüggés hiányában fontos lenne a Semilab berendezéseivel a fajlagos ellenállás mérések és az adalékolás mérések eredményei alapján egy kezdetleges összefüggést felállítani.

Munkámat UV lézerrel felszerelt mikrohullámú PCD élettartam mérésekkel is tervezem kiegészíteni.

8 Összefoglalás

A széles körben alkalmazott félvezető minősítő mérőberendezéseket jellemzően szilícium, illetve általában keskenyebb tiltott sávú félvezetők mérésére fejlesztették és optimalizálták. Ahogy a szilícium-karbid egyre hangsúlyosabban jelenik meg az iparban, egyre sürgetőbben merül fel, hogy a szükséges mérés technikák rendelkezésre álljanak szilícium-karbid minősítésére is. Sok szilíciumra optimalizált mérés technika hardverét tekintve alkalmas lehet szilícium-karbid minősítésére is. Természetes módon adódik, hogy első lépésként a mérési paraméterek megfelelő beállításával, illetve a kiértékelés szükséges mértékű átdolgozásával ezeket az eszközöket alkalmassá tegyük széles tiltott sávú félvezetők minősítésére is.

A dolgozat a jelenleg leginkább elterjedt és alapvető C-V és V-Q elektromos minősítő mérések alkalmazhatóságát vizsgálja egészen a mérések elméletétől a kiértékelési algoritmusokig. A kidolgozott eljárások felhasználásával méréseket is végeztem, amelyekkel a módszerek használhatóságát demonstrálom.

A V-Q minősítő eljárás esetében a jó minőségű oxiddal ellátott epitaxiális szilícium-karbid minták jellegre is különlegesen viselkednek, így a félvezetőfizikai elméletből kiindulva új kiértékelési eljárást dolgoztam ki. A szilícium-karbid nagyfrekvenciás C-V mérésével kapcsolatban megmutattam, hogy csak az anyagi paraméterek megfelelő beállításával és a szilíciumra kifejlesztett kiértékelési móddal MOS és Schottky mérések egyaránt elvégezhetőek. A félvezető-oxid határfelület állapotosságának minősítésére használt szimultán nagy- és kisfrekvenciás C-V mérés (Q-V módszer) esetében elméleti úton megmutattam, hogy a jellegében eltérő viselkedés ellenére a szilíciumra kifejlesztett kiértékelési eljárás szilícium-karbiddal is működik. Sőt, mély kiürítésben is, tehát lényegesen szélesebb sávelehajlás tartományban, szolgáltat számszerűleg értelmezhető eredményt.

9 Irodalomjegyzék

- [1] E. H. Nicollian, J. R. Brews, MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics And Technology, *John Wiley & Sons, Inc.* 1982.
- [2] Properties of silicon carbide, ed. Gary Lynn Harris, INSPEC (Information service) – 1995
- [3] D. K. Schroeder, Semiconductor material and device characterization, John Wiley & Sons, Inc. 1998.
- [4] E.H. Nicollian, J. R. Brews, Improved MOS capacitor measurements method using the Q-C method, *Solid State Electronics* Vol 27. No 11. pp 963-975., 1984.
- [5] M. Wilson, J. Lagowski, A. Savtchouk, L. Jastrzebski, J. D'Amico, COCOS (Corona Oxide Characterization Of Semiconductor) Metrology: Physical Principles And Applications, ASTM Conference on Gate Dielectric Oxide Integrity, San Jose, California January 1999
- [6] <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/SiC/>
- [7] M. Sadeghi, A. Jauhiainen, B. Liss, E.O. Sveinbjornsson, O. Engström, High Frequency capacitance measurements on metal-insulator-semiconductor structures in thermal non-equilibrium condition, *Solid-State Electronics* Vol. 42, No. 12, pp. 2233±2238, 1998
- [8] M. Sadeghi, O. Engström, Capacitance measurements on SiC MOS structures for the determination of interface properties, *Microelectronic Engineering* 36 (1997) 183-186
- [9] Zs. Zolnai, Irradiation-induced crystal defects in silicon carbide, Ph.D. Dissertation, 2005

10 Függelék

A. Nyomtatott függelékek

Nem tartozik a dolgozathoz.

B. Digitális függelék

Nem tartozik a dolgozathoz.