

Szigetelő rétegek félvezetőkön

DR. MIZSEI JÁNOS—DR. ZÓLÓMY IMRE

BME, Elektronikus Eszközök Tanszék

ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk a félvezető-szigetelőréteg szerkezetek kutatásának legújabb eredményeit ismerteti a Leuvenben (Belgium) 1987-ben megrendezett „Insulating Films on Semiconductors” c. konferencia tükrében [1]. A konferencia elméleti jellegű volt, de szorosan kapcsolódott a félvezető eszközök fejlesztésében felmerülő kérdésekhez. A félvezető eszközök méretcsökkentése az eddig megszokott eredmények felülvizsgálatára, ellenőrzésére és pontosítására kényszerít, még az olyan, látszólag már teljesen feltárt területeken is, mint a SiO₂-Si rendszer. Ugyanakkor megnő a jelentősége az olyan jelenségek vizsgálatának, amelyek eddig még elhanyagolhatók voltak az eszköz-működés szempontjából.

Bevezetés

A szigetelő-félvezető rendszerek tulajdonságai az integrált áramkörök számos pontján meghatározó jelentőségűek, de szinte minden félvezető-eszköz működése fő-, vagy mellékhatás jelleggel kapcsolatban van az ilyen rendszerekkel. Az eszközök tökéletesítése, a méretcsökkentés és a működés megértésének egyre növekvő fontossága indokolja a szigetelő-félvezető rendszerek kutatásába fektetett energiát.

A tématerület legátfogóbb konferenciája az IN-FOS (Insulating Films on Semiconductors), melyet 1987-ben ötödik alkalommal rendeztek meg. Ezúttal a Leuveni Katolikus Egyetem és az IMEC (Interuniversity Microelectronic Center) adott otthont a rendezvénynek.

A következőkben a konferencián szerzett tapasztalatainkat összegezzük, nem törekedve tel-

Szilícium oxidációja(6)	██████████
Vegyület-félvezető/szigetelő rendszer(9)	██████████
Szigetelő/félvezető határfelület(8)	██████████
Többrétegű dielektrikum rendszerek (4)	██████████
Nitrid,oxlnitrid (8)	██████████
Adalékok a SiO ₂ -ben (3)	██████████
Vezetés szigetelőkben (3)	██████████
Szigetelők tönkremenése (7)	██████████
Polikristályos szilícium (2)	██████████
Félvezető szigetelők (4)	██████████
	H489-1

1. ábra. A konferencia témáinak számszerű megoszlása

Beérkezett: 1988. IX. 7. (H)

jességre, de kiemelve az általános érdeklődésre igényt tartó eredményeket. Ezek a neves nemzetközi kutatógárda által bemutatott új, vagy újra rendszerezett eredmények már a kilencvenes évek eszközfelállításának megalapozását adják, mind elméleti, mind gyakorlati oldalról.

A konferencia témáit, a témák számszerű megoszlását a 1. ábra foglalja össze.

1. A Si-SiO₂ rendszer

1.1 Oxidnövekedés szilíciumon

E.A. Irene felkért előadásában áttekintette az oxidnövekedés vizsgálatának legújabb eredményeit, és ezekkel új elképzelést ismertetett az oxidáció mechanizmusára.

Az oxidnövekedés ismert jellegzetessége az ún. lineáris-parabolikus szabály, ami szerint a vékonyabb oxidrétegek növekedése arányos az idővel, míg vastagabb oxidrétegek esetén a vastagsága növekedési idő négyzetgyökével arányos. Az átmenet a két tartomány között függ a hőmérséklettől. Ezen utóbbi esetben a növekedést az oxigénnek a SiO₂ rétegen való átdiffundálása korlátozza, így értéke az

$$F_1 = D \frac{dC}{dx} \quad (1)$$

képlettel adható meg. Az előző esetben a folyamatot korlátozó tényező nem diffúzió, hanem az oxigén reakciósebessége a szilíciummal a Si-SiO₂ határfelületen, mivel a vékony oxid miatt nagy a diffúziós áramlás. Ekkor a növekedést az

$$F_2 = kC_2C_{Si} \quad (2)$$

képlet írja le, ahol k egy állandó és C_2 ill C_{Si} az oxid-félvezető határfelületen az oxigén és a szilícium koncentráció. Ha az oxigén koncentrációja a SiO₂ külső felületén C_1 továbbá állandósult áramlás esetén $F = F_1 = F_2$, akkor a fenti két egyenlet alapján írható, hogy

$$D \frac{C_1 - C_2}{d_{ox}} = kC_2C_{Si} \quad (3)$$

Ezen egyenletből C_2 -t kifejezve és visszaírva F_1 vagy F_2 kifejezésre adódik az eredő oxigénfluxus:

$$F = \frac{k C_{Si} C_1 D}{D + k C_{Si} d_{ox}} \quad (4)$$

Az oxigónfluxussal arányos az oxid növekedési sebessége, azaz

$$F = C' \frac{d}{dt} d_{ox} \quad (5)$$

így egy differenciálegyenlet adódik, aminek megoldása

$$d_{ox} + \frac{k \cdot C_{Si}}{2 \cdot D} \cdot d_{ox}^2 = \frac{k \cdot C_{Si} \cdot C_1}{C'} \cdot t \quad (6)$$

Ha

$$d_{ox} < \frac{2D}{k \cdot C_{Si}} \cdot t \quad (7)$$

akkor a bal oldal első tagja dominál és az oxidnövekedés az idővel arányos, ha d_{ox} nagyobb ezen határértéknél, akkor a második tag dominál és

$$d_{ox} \sim \sqrt{t} \quad (8)$$

D és C_1 értékére az irodalomban található adatok. A lineáris tartományban a növekedési sebesség függ a fenti képlet alapján a szilícium atomok felületi koncentrációjától, így a felület kristálytani irányától is. Összehasonlítva az (110), (111) és (100) irányokat, a sűrűségekre a $C_{Si}(110) > C_{Si}(111) > C_{Si}(100)$ adódik. Atmoszférikus nyomáson, vízgőzös oxigénben az R növekedési arány valóban ezt a sorrendet mutatta, ugyanakkor nagy nyomású nedves oxidációra a sorrend $R(111) > R(110) > R(100)$ volt. Száraz oxidáció és néhány tíz nm-nél vékonyabb oxidok esetén az R -ek aránya megint egyezett a szilícium atomok sűrűségének arányával. Ugyanakkor vastagabb oxidokra megint $R(111) > R(110)$ adódott. Ez az ún. keresztvezési effektus. Ennek létrejöttét először az oxidban keletkező mechanikai feszültséggel magyarázták. Mivel a keletkező oxid térfogata több mint kétszerese az eredeti szilícium térfogatának, az oxidban és szilíciumban mechanikai feszültség keletkezik, ami az oxidban nyomó-, a szilíciumban a húzófeszültség: $\sigma = E \cdot \epsilon$ ahol σ a feszültség, ϵ a fajlagos megnyúlás/összenyomás és E a Young-féle rugalmassági modulus. Ennek nagysága az egyes irányok szerint $E(111) > E(110) > E(100)$, tehát az (111) irányú felület esetén keletkezik a legnagyobb feszültség. Az utóbbi időben sikerült azonban megmérni a SiO_2 -ben keletkező feszültséget, ami meglepő módon éppen az (111) irányú szilícium esetén adódott a legkisebbnek. De talán éppen ezen kis feszültség miatt na-

gyobb az oxigén D diffúziós állandója az oxidban, s ez magyarázza (vastagabb oxidok esetében) a nagyobb oxidációs sebességet (111) orientációjú felületen. A kísérleti eredmények már arra mutatnak, hogy tovább kell fejleszteni az oxidáció folyamatáról alkotott elképzeléseinket. Erős fényvel megvilágítva a szeletet, az oxidációs ráta jelentősen megnőtt, ha a foton energiája 3 eV-nál nagyobb volt. Ha ezt egybevetjük az oxid-félvezető sávdiaagrammjával, azt kapjuk, hogy ez közel azonos érték az oxid-félvezető határon található 3.15 eV-os potenciálgáttal. Ha a foton energiája meghaladja az 5 eV-ot, akkor újabb növekedés tapasztalható az oxidációs rátában. Ez az energia megfelel az O_2 molekula disszociációs energiájának. Szilicideken végzett oxidációs kísérletek azt mutatták, hogy az oxidációs sebesség és az elektronkoncentráció, illetve az optikai abszorpció együttható, ami az elektronkoncentrációval van kapcsolatban, azonos irányban változnak. Mindezek alapján az elektronok alapvető szerepe várható az oxidáció folyamatában. Ez a folyamat öt részből áll:

- elektronok termikus injekciója a SiO_2 -be,
- az oxidban lévő elektronok reagálnak az odadiffundált oxigénmolekulákkal O_2^- töltött molekulákat alkotva,
- a töltött O_2^- molekulák szétesnek egy semleges és egy töltött oxigén atomra, $O_2^- \rightarrow O + O^-$,
- ezek az oxigénatomok reagálnak a töltött szilícium atomokkal, $Si^+ + O + O^- \rightarrow SiO_2$.

A fenti folyamatok közül a legkisebb sebességű az elektronok injekciója, így ez határozza meg az oxidáció sebességét. A Richardson-Dushman egyenletből és az oxidációs sebességekből ki lehet számítani a potenciálgát magasságát. A számítás különböző oxidvastagságok esetén az alábbi értékeket adta:

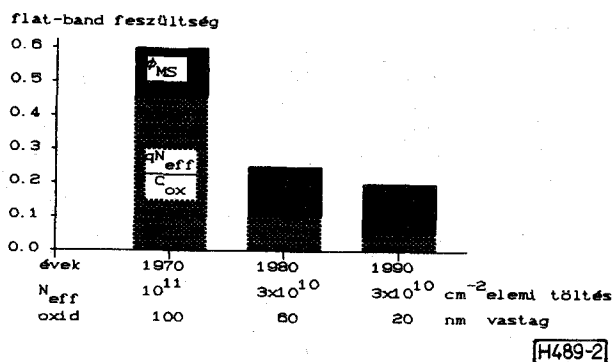
d_{ox} [nm]	2	2,5	7
x_0 [eV]	2,87	2,92	3,35

Ezek aránylag jó egyezésben vannak az egyéb úton mért potenciálmagassággal. Vékonyabb oxidok esetén a gát magasságának csökkenése a tüköröröknek tudható be. A fenti modellel nem egészen összeegyeztethetők a Delarios által közölt kísérleti eredmények. Itt azt vizsgálták, hogy az oxidnövekedés előtti kémiai kezelés hogyan befolyásolja az oxidnövekedés sebességét. A szeleteket szabvány RCA tisztításnak vetették alá, ahol az utolsó lépés HF-ben végrehajtott maratás volt, ami elméletileg oxidmentes felületet ad. A szeletek egy részét ezután még NH_4OH -ban is kezelték. A HF-es marás után 0,5–0,9 nm natív oxid maradt, az NH_4OH után pedig 1–1,5 nm-es oxidréteg. Ezután a szeleteket azonos kályhába helyezték, majd mérték az oxidréteg vastagságát az idő függvényében.

Azt tapasztalták, hogy az ammonium-hidroxiddal kezelt szeleteken kb. 10%-kal vékonyabb oxid nőtt, mint a csak HF-el kezezteken, és ez a különbség megmaradt még 300—400 nm-es oxidvastagságok esetén is! Azaz a felületelőkészítési eljárás nem csak az oxidáció kezdeti fázisára van hatással, hanem egész menetére is. A vékony oxidokkal kapcsolatos további nehézségekre mutat rá Hofmann (IBM) előadása. A Si-SiO₂ határfelületen SiO alakul ki, a Si és a SiO₂ reakciójaként. Magas hőmérsékleten a SiO elpárologhat. Ez a folyamat különösen vákuumos kezelés esetén jelentős, 1000°C környékén. Ha csak SiO alakul ki, de még nem párolog el, akkor csökken a szigetelőréteg átütési szilárdsága, ha el is párolog, akkor a felületen oxidmentes foltok keletkeznek. Az oxidot 900—1000°C-on növesztették száraz oxigénben, vastagsága 50 nm volt. Kimutatták, hogy ezek az oxidmentes helyek egybeesnek a felületi diszlokációkkal. A diszlokációk keltésére implantációt használtak.

1.2. MOS rendszerek, SiO₂ elektromos jellemzői

Ami az oxidációs technológia fejlődésének közvetlen hatását illeti a MOS rendszerek alapvető jellemzőire, ezen a téren is töretlen a fejlődés. A kezdeti próbálkozások a MOS technológiában akkor jártak eredménnyel, amikor már sikerült olyan alacsony határfelületi töltést elérni a Si-SiO₂ átmeneten, hogy a rendszer flat-band feszültsége, ezzel együtt a nyitófeszültség is kisebb lett, mint az oxid átütési feszültsége. A kis tápfeszültségen is használható áramkörök iránti igény már a 70-es évek elején 1 volt alá szorította a flat-band feszültséget, de a meghatározó tag még mindig a határfelületi állapotsűrűség meglehetősen nagy és nehezen reprodukálható értéke maradt. A technológia fejlődése részint az állapotsűrűség csökkenését, részint az oxid vékonyítása miatt a felületegységre eső kapacitás növekedését eredményezte. Ezek következménye,



2. ábra. A kilépési munka és a felületi töltés, mint a flat-band feszültség összetevői

hogy a 90-es évekre a felületi állapotok sűrűsége egyre inkább elhanyagolhatóvá válik a flat-band feszültséget megadó összefüggésben, megnövekszik viszont a kilépési munkák különbségének jelentősége. A flat-band feszültség különböző összetevőinek egymáshoz viszonyított arányát mutatja a 2. ábra. A tapasztalatok szerint a kilépési munkák különbségére az általánosan ismert tényezőkön kívül (hordozó adalékolás, fémezés anyaga, technológiája) hatással van az oxidnövesztési technológia, a hordozó orientációja és az oxid vastagsága is.

Az előbbieket nem jelentik azt, hogy csökkenően lenne a SiO₂-Si határfelületi állapotaira irányuló kutatások intenzitása. A hagyományos C-V módszereken túl új módszerek bevezetése is folyik erre a területre (DLTS, állandó hőmósokletű tranzien spektrózkópia, elektron-spin rezonancia, zajmérések, megvilágítás hatására bekövetkező fizikai változások vizsgálata.).

A SiO₂ réteg tulajdonságainak javítására különböző technológiák útján nitrogént visznek be a rétegbe. Ennek hatására nő a réteg átütési szilárdsága, sugárzással szembeni ellenállóképessége, jobban maszkolja az adalékok és a szennyezések diffúzióját, míg a kitűnő minőségű SiO₂-Si határfelület rendszerint érintetlen marad. Jobban oda kell figyelni viszont az ilyen oxidok alkalmazásakor a különböző vezetési mechanizmusokra, mert a nitrogénezett SiO₂ lényegében MNOS rendszer, amelyben a töltéstranszport és töltéstárolás szerepe nagyobb. A nitrogénezett SiO₂-ben nagyobb vezetési áramot tapasztaltak mind a Fowler-Nordheim, mind pedig a Pool-Frenkel emisszió következtében. Ez arra utal, hogy a nitrogén a felületi viszonyok módosításán kívül a SiO₂ térfogati csapdasűrűséget is megnöveli.

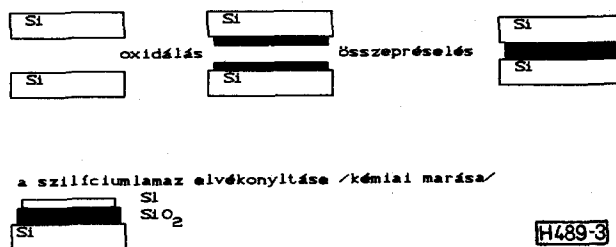
2. A szilícium-dioxid szerepe a technológiában

A planár technológia alapvető jellemzője a szilícium-dioxid, mint maszkoló réteg, felhasználása a diffúziós és implantációs műveletekhez. A technológiai lépések számának növekedése és a számítógépes technológiai modellezés fejlődése, valamint az egyre gyakrabban alkalmazott III-V félvezető-SiO₂ rendszerek jobb megismerésének igénye szükségessé tette az adalékok (III. és V. csoport elemei) SiO₂-ben való diffúziójának beható vizsgálat. A diffúziót jellemző számszerű adatok mellett sikerült tisztázni a diffúziós mechanizmusokat, az egyes elemek és a szilícium-dioxid közötti kötések szerepét, de számos egyéb jelenség (például a több elem együttes diffúziója, diffúzió nagyon kis koncentrációk esetén) még nincs kellő mértékben felderítve.

Jelentős szerepet kap a szilícium-dioxid az egyes áramkört elemek elszigetelésében. A tökéletes szigetelés érdekében meg kellett oldani az eltemetett oxidréteg létrehozását, annak érdekében, hogy az oxid teljesen körülvehesse az elszigetelni kívánt elemeket. A szigetelőre epitaxiálisan leválasztott egykristályos szilíciumréteg, nagy oxigén dózis implantálása Si hordozó mélyebb rétegeibe, valamint oxidált egykristályos szilícium lemezek közvetlen összetapasztása jelenti a feladat megoldását.

Az implantált oxigént tartalmazó szilícium hordozókban megfelelő hőkezelés után kellően éles határfelületeket és 10^5 cm^{-2} -nél kisebb diszlokáció sűrűséget lehetett elérni. Az alacsony diszlokáció sűrűség titka a SiO_2 -Si határfelület közelében kialakuló, rendezett precipitátum-hálózat, amely megakadályozza a hőkezelés során bekövetkező diszlokáció kinövéseket abban, hogy a technológia szempontjából fontos felületi tartományokat elérjük.

Az oxidált szilícium lemezek összetapasztása (SDB: silicon direct bonding technológia) meglehetősen új, éppen ezért még nem egészen kidolgozott eljárás. Olcsósága, hajlékonysága, a rétegek jó minősége várhatóan ipari alkalmazásra is megfelelővé fogja tenni. A mozgékony és a kisebbségi töltéshordozók élettartama egyaránt megközelíti a tömbi viszonyokra jellemző értékeket. A technológia folyamatát a 3. ábra mutatja vázlatosan. Kidolgozták a szilícium hordozó és kvarclemezek közvetlen összekötésére alkalmas eljárást is, a hőtágu-



3. ábra. SDB technikai egykristályos Si-SiO₂-Si rétegszerkezet létrehozásához

lasi együtthatók különbözősége azonban komoly nehézséget jelent a technológiai alkalmazás során.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetet mondanak a Budapesti Műszaki Egyetem, a Híradástechnikai Tudományos Egyesület és a konferencia szervezők által nyújtott támogatásért, amellyel lehetővé tették a konferencián való részvételüket.

IRODALOM

[1] INFOS 87, Proceedings of the Fifth International Conference on Insulating Films on Semiconductors, Ed.: G. Declerck and R. de Keersmaecker, Leuven, Belgium, 13—15. ápril, 1987. (Konferencia kiadvány, illetve rövid kivonatok).