

# ANYAGKÖLCSÖNHATÁSOK A FÉM-SZILÍCIUMDIOXID-SZILÍCIUM (MOS) SZERKEZETŰ ELEKTRONIKAI ESZKÖZÖKBEN

SZÉP IVÁN\*

A MŰSZAKI TUDOMÁNYOK DOKTORA

[Beérkezett: 1980. március 3-án]

A tanulmány áttekinti azokat a leglényegesebb anyagi kölcsönhatásokat, amelyek a szilícium alapú mikroelektronikai eszközök egyik fontos reprezentánsának, a fém-oxid-szilícium (MOS) szerkezetű alkatrészeknek előállítására, tárolására, valamint üzemeltetése során felléphetnek és az egyszerű fizikai modellétől eltérő tulajdonságokat okozhatnak. A szerző több mint másfél évtizedes vizsgálatai alapján kimutatja, hogy a nagyszámú kölcsönhatás közül döntő az oxid kialakításának módja, a technológiai műveletek alatt a MOS-rendszert ért hőhatások és azok körülményei, továbbá a fém felvitelének módja, minősége. E hatásokat kiváltó folyamatok mibenlétére, azok befolyásolásának módjára a szerző kísérletileg alátámasztott értelmezést ad. A tanulmány következtetéseiben a szerző kiemeli az érintett tudományágak interdiszciplináris kapcsolatának erősítését, amely feltétele a vizsgált rendszerben lejátszódó anyagkölcsonhatások további felderítésének és irányíthatóságának.

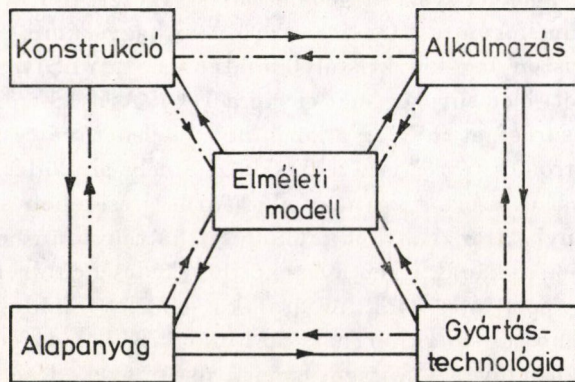
A félvezető eszközök korszerű választékában kiemelkedő szerepet töltenek be a fém-szilíciumdioxid-szilícium (MOS) rétegszerkezetek tulajdonságain alapuló diszkrét és integrált eszközök. A számítástechnikai berendezésekben használatos különböző memória áramkörök, a vezérlési és automatizálási feladatok megoldásában nélkülözhetetlen mikroprocesszorok legfejlettebb változatai MOS-szerkezetűek. A MOS-áramkörök rohamos elterjedésüket annak köszönhetik, hogy gyakorlatilag egyetlen építőelemből, a MOS-tranzisztorból konstruálhatók, amely egyszerű geometriai szerkezete miatt igen kis helyet vesz igénybe, ennél fogva a MOS-áramkörökben nagyszámú tranzisztor integrálható össze viszonylag kis kristályfelületen (LSI, VLSI). Napjainkban az  $1 \text{ cm}^2$ -re számított elemsűrűség már elérte a  $10^6$ -t. A MOS-tranzisztor felépítésén kívül ezt a sűrűséget még az a körülmény is lehetővé teszi, hogy a MOS-tranzisztor elektromos térrel vezérelt eszköz, amely működés közben igen kis energiát disszipál és ezért még nagy elemsűrűség esetében sem szabadul fel annyi hő, amennyi a tranzisztorok működését hátrányosan befolyásolná.

Az integráció fokának ilyen mértékű növekedésében azonban más tényezők is fontos szerepet játszottak. Az áramkör-elmélet fejlődése funkcionálisan egyre összetettebb, ugyanakkor a korábnál kisebb helyigényű áramkörök tervezését tette lehetővé. A fajlagos elemsűrűség növekedése viszont olyan új technológiai eljárásokat követelt, amelyekkel a korábnál kisebb méreteket is megbízhatóan elő lehetett állítani. A fotolitográfiai műveletekhez például

érzékenyebb fotoreziszt anyagokra, nagyobb fényerejű, kisebb torzítású lencse-rendszerekre, nagyobb mechanikai pontosságú illesztő-léptető berendezésekre volt szükség. A poliszilícium-rétegeket alkalmazó technológiákban az ún. önillesztéses konstrukciók bevezetésével a kémiai marási technika okozta pontatlanságokat sikerült csökkenteni. A korábbi technológiai eljárásokban az egyes műveletekben keletkező különböző magasságú oxid-lépcsők az összekötő fémzésben szakadásokat okoztak, amit a lépcsők lankás kialakításával ki lehetett ugyan küszöbölni, de csak a hasznos felület kárára. Ezen a helyzeten a szilícium domborzatos előmarásával lehetett javítani, amelyben gyakorlatilag lépcsőmentes, egysíkban fekvő oxidfelületek alakíthatók ki („planox”, „isoplanar” eljárások).

Mindezek és más, itt fel nem sorolt új technológiai eljárások bevezetése tette lehetővé újfajta áramkörök létrehozását, az áramköri konstrukciók fejlődését. A MOS-rendszerek fizikai és kémiai vizsgálata ugyanakkor adatokat szolgáltatott e rendszerek tulajdonságait befolyásoló sok olyan tényezőről, amelyekkel a MOS-tranzisztor fizikai alapmodellje nem számolt, és így az alapmodell alapján levezetett elmélet és a MOS-rendszerek gyakorlatban mutatkozó tulajdonságai között tapasztalható eltérések nagy része ezek alapján értelmezhető volt.

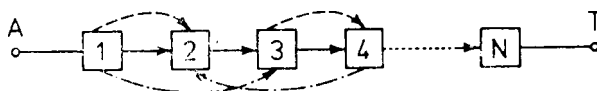
Szerző évekkkel ezelőtt [1] felhívta a figyelmet arra a hibás szemléletre, amely a félvezető eszközöket a félvezető fizika alapegyenleteivel leírható, egyszerűen modellezhető rendszereknek tekinti, holott ezek előállítási technológiájuk bonyolultságától függő mértékben összetett fizikai-kémiai anyag-rendszert alkotnak, amelynek viselkedését az alapanyag előállításától kezdve a technológiai készítés lépéseinek kölcsönhatásán keresztül a végtermék használatának módjáig, számos tényező befolyásolja, meghatározva ezáltal az eszköz használati tulajdonságait és az alapul vett elmélet érvényességi határait.



I. ábra. A félvezető eszközök tulajdonságait meghatározó kölcsönhatások rendszere.  
→ közvetlen ráhatás iránya; - - - -> visszahatás iránya

A félvezető eszközök tulajdonságait ténylegesen meghatározó kölcsönhatások kapcsolatát, azok eredetét az 1. ábra szemlélteti. Egy meghatározott célra alkalmazni kívánt félvezető eszköz létrehozásához célszerűen egy *elméleti modellből* indulunk ki. A modell megválasztásakor figyelembe kell vennünk az *alkalmazás feltételeit* (elektromos, termikus paraméterek, határértékek), amelyek alapján megtervezhető az eszköz *konstrukciója*. Ennek korlátait az *alapanyag tulajdonságai* és a *gyártástechnológia lehetőségei* szabják meg. Utóbbiak döntően meghatározzák, hogy az alkalmazás célja által kitűzött követelmények mennyire teljesíthetők. Gondoljunk pl. a fotolitográfia mindenkori méretkorlátai és a létrehozható elemsűrűség közötti összefüggésre. Ez a körülmény ismét visszahat a konstrukcióra, amelyet a lehetőségeknek megfelelően módosítani kell. A vázolt kölcsönhatások végeredményben a kiindulási modell finomítását teszik szükségessé, olyan új elemekkel bővítve azt, amelyek a fizikai alapelvekből többnyire nem következnek.

A kölcsönhatások önálló láncolatát jelentik azok a gyártási műveletek közben vagy a használat során fellépő fizikai-kémiai jellegű anyagkölcsönhatások, amelyek a végtermék vagy a közbelső termékek tulajdonságait jó és rossz irányban egyaránt befolyásolhatják (2. ábra). Ezek a kölcsönhatások



2. ábra. Gyártási műveletlánc. *A* – alapanyag, *T* – termék – - - - -> mellékhatások, - - - - -> determináló kölcsönhatás, + - - - -> visszaható kölcsönhatás

sokkal nehezebben ismerhetők fel nemcsak a technológiai műveletek nagy száma miatt, hanem gyakran azért, mert csak több lépés után jelentkeznek, és így nehezen állapítható meg közvetlen okuk. Pl. a kémiai tisztításhoz használt vegyszerekből már a gyártási folyamat kezdetén kicsapódhatnak a tisztítandó félvezető felületre a nehéz fémek, de hatásossá csak a hőkezelések után válnak, maga a hatás (pl. nagy visszáram) azonban csak a készterméken állapítható meg.

A használat vagy tárolás módja is oka lehet olyan fizikai-kémiai változásoknak, amelyek a késztermék minőségét károsítják. A megengedettnél nagyobb áramok, feszültségek, túl magas vagy alacsony üzemhőmérséklet, nedves környezet elindíthatnak olyan folyamatokat, amelyek idővel az eszköz tönkremenéséhez vezetnek.

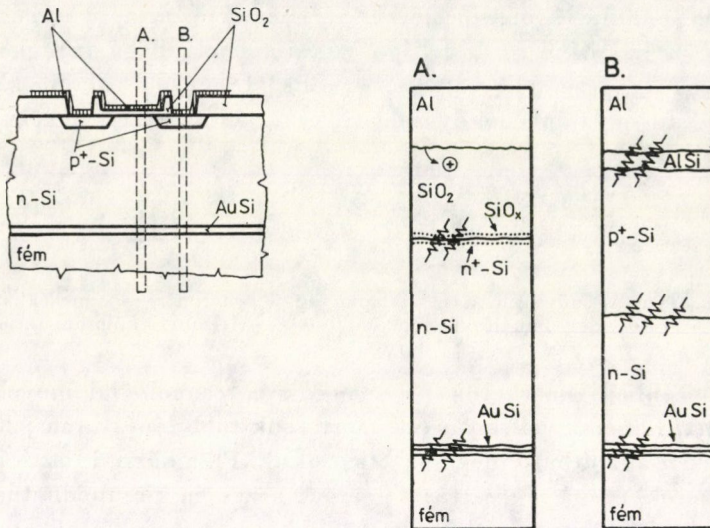
A kölcsönhatások egy közvetett példája a szilárdtestek kémiájában, az anyagtudományban és főleg a vizsgálati és diagnosztikai módszerekben bekövetkezett az a nagyarányú fejlődés, amelyet éppen a fent említett anyagkölcsönhatások és folyamatok felderítésére irányuló törekvések ösztönöztek. A félvezető eszközökben lejátszódó átalakulások kutatása lendítette fel a

kristályhibák vizsgálati metodikáját, a különböző elektron- és röntgen diffrakciós módszereket, az oxidáció, a diffúzió kinetikájára vonatkozó vizsgálatokat. A félvezető technológia igényeinek kielégítésére dolgoztak ki új fényérzékeny lakkokat, fotolemezeket, extrém tisztaságú vegyszereket, nagy felbontóképességű optikai berendezéseket, elektron-, ionsugaras, plazmás technológiai módszereket.

A továbbiakban a MOS-rendszerekben fellépő legfontosabb anyagköcsönhatásokról lesz szó.

### Modell és valóság

Egy MOS-tranzisztor fizikai alapmodellje és a reális tranzisztorban néhány köcsönhatás következtében kialakult valóságos szerkezet a 3. ábrán látható. Az ábra bal oldalán látható metszet alapján az eszköz működése



3. ábra. Néhány köcsönhatás MOS-rendszerben

egyszerűnek tűnik. Ha az  $N$  típusú szilícium kristályban kialakított két  $P$  típusú tartományt feszültségforrással kötjük össze, nem folyhat áram (eltekintve egy minimális visszarámtól), mert az egyik  $PN$ -átmenet mindig záróirányú előfeszültséget kap. Ha azonban a két  $P$ -szakasz között a vékony szigetelő oxidrétegen keresztül egy fémelektrod segítségével a szilíciumkristályban negatív előjelű elektromos teret létesítünk, a felület közeléből az elektronok eltávoznak, egy meghatározott térerősségnél a termikusan generált pozitív lyukak kerülnek túlsúlyba, a két  $P$ -rész között vékony vezető, ún. inverziós csatorna jön létre, amelyen át megindul az áram. A MOS-tranzisztor fizikai alapmodellje szerint a tranzisztor áram-feszültség karakterisztikái a szilícium

mint félvezető, a szilíciumdioxid mint szigetelő és az elektródfém néhány anyagi paraméterével kifejezhetők. Ez az elmélet nem tételez fel semmilyen anyagkölcsonhatást az egyes alkotórészek között.

$$I_D = \frac{C_0 \mu_n W}{L} \left[ V_{DS}(V_{GS} - V_X) - \frac{V_{DS}^2}{2} \right],$$

ahol

$$V_X = \varphi_{MS} + 2\varphi_F$$

$I_D$  — draináram,  $C_0$  — oxidkapacitás,  $\mu_n$  — elektronmobilitás az inverziós csatornában,  $W$  — csatorna szélessége,  $L$  — csatorna hossza,  $V_{DS}$ ,  $V_{GS}$  — drain-source, ill. gate-source feszültség,  $\varphi_{MS}$  — fém-félvezető kontaktpotenciál különbség,  $\varphi_F$  — szilícium felületi potenciálja.

A valóságban, mint ez a 3. ábrán kinagyított  $A$  és  $B$  jelű szelvényeken látható, a technológiai műveletek alatt olyan kölcsönhatások mehetnek végbe, amelyek az elemi elmélettől eltérő tulajdonságokat hoznak létre a rendszerben. Az  $A$  szelvényben vázlatosan jelzett kölcsönhatások közül az egyik az alumínium fémelektrod és a  $\text{SiO}_2$  réteg között végbemenő kémiai folyamat, amely alumíniumból és oxigénből álló pozitív ionok és elektronok képződésével jár, amelyek töltésükkel az oxid szigetelő tulajdonságait módosítják. A  $\text{SiO}_2$  és a Si határán jelentkező kölcsönhatás az oxidáció során nem-sztöchiometrikus határreteget hoz létre, amely a  $\text{SiO}_2$ -ben helyhez kötött pozitív töltések létrejöttét okozza. A határretegben a szilícium eredeti adalékanyag-eloszlása is megváltozik az oxidáció, ill. a  $\text{SiO}_2$  és a Si eltérő affinitása miatt. A foszfor pl. a térfogati koncentrációjához képest a szilícium felületnél feldúsul, a bór elszegényedik. A  $\text{SiO}_2$  és a Si közötti rácsparaméter különbség miatt a szilícium felületénél diszlokált, mechanikai feszültség alatt álló kristályszerkezet alakul ki, hasonlóképpen a kristály felforrasztott oldalán, ahol a forraszfém (többnyire arany-szilícium eutektikum) okoz rácsdeformációt.

Hasonló rácsdeformációk keletkeznek a  $B$  szelvényben is, ahol a  $P$ -rétegen alumíniumból kialakított kontaktus Al—Si eutektikum képződésével jár, melynek mechanikai tulajdonságai mind a szilíciumétól, mind az alumíniumétól eltérnek. A  $P$  és  $N$  rétegek határán az adalékatomok jelentős koncentrációkülönbsége miatt rácstorzulás lép fel, amely diszlokációháló képződésével és a tranzisztor elektromos tulajdonságainak romlásával jár.

A MOS-rendszer előállításánál során fellépő kölcsönhatások nagyságrendje, befolyása különböző mértékű lehet; felismerésük után hatásukat sok esetben a technológia megfelelő módosításával részben kompenzálni tudják. Nem hagyható persze figyelmen kívül, hogy az ilyen módosítások új tényezők megjelenésével járnak, amelyek új kölcsönhatások láncolatát indíthatják el. Mindezekről függetlenül azonban a MOS-rendszerekben a technológiai műveletek *elsődleges*, egy kitűzött cél elérésére irányuló, és *másodlagos*, az előbbivel párhuzamosan jelentkező hatásuk szempontjából szelektálhatók. A rendelkezésre

álló hatalmas tapasztalati és irodalmi anyag alapján megállapítható, hogy a MOS-rendszerek tulajdonságait alapvetően három technológiai műveletcsoport minősége és jellege határozza meg:

- a) a szigetelőréteg kialakításának módja;
- b) mindazok a hőbehatást igénylő műveletek, amelyek a szigetelővel bevont szilíciumlemezt érik;
- c) a fémréteg ( $M$ ) felvitelének módja, minősége.

A továbbiakban szemelvénytyszerűen foglalkozunk néhány olyan hatással, amelyek a felsorolt csoportokban domináló jellegűek.

### A szigetelőréteg kialakítása

A MOS-rendszerek szigetelőrétegének kialakítására számos módszerrel kísérleteztek. Az 1. táblázatban a szilíciumdioxid réteg létrehozására leggyakrabban alkalmazott eljárásokat tüntettük fel, a folyamatokra jellemző anyag-

1. táblázat

*Szigetelő rétegek létrehozása szilíciumalapú MOS rendszerekben*

Módszer	Anyagkölcsonhatás	Alkalmasság
1. Termikus oxidáció (800 ÷ 1200 °C) vízgőzben v. száraz oxigénben	Si → SiO <sub>2</sub> átalakulás felületi reakcióban. Határfelületen nem-sztóhiometrikus átmenet, mech. feszültség és rácshibák	temperálás után igen jó
2. Oxidáció folyadékfázisban a) oxidálószerrel b) elektrokémiai anódizálással	Si → SiO <sub>2</sub> átalakulás a) felületi reakcióban b) Si <sup>4+</sup> + 4OH <sup>-</sup> ionreakcióval	korlátozott nem jó
3. Oxidlecsapatás pirolyizissel (TEOS; SiH <sub>4</sub> )	egyenetlen tapadás; sok töltés	korlátozott, első-sorban védőbevonat
4. Porlasztás (SiO <sub>2</sub> )	egyenetlen tapadás, csökkent átütési szilárdság	korlátozott, első-sorban védőbevonat

kölcsonhatásokkal, valamint a MOS-rendszer céljára való alkalmasságuk megjelölésével. A MOS-rendszer dielektrikumának céljára mindmáig a klasszikus, termikus úton előállított SiO<sub>2</sub> a legalkalmasabb [2]. Az oxidációs folyamatot gázfázisban vízgőz vagy oxigén áramban, esetleg klórtartalmú adalék jelenlétében végzik 800 ÷ 1200 °C-on. Ezen a módon 30 nm ÷ 1,5 μm vastag rétegek megbízhatóan előállíthatók.

Az egyes konstrukciókhoz szükséges vastagságú szilíciumdioxid réteg gázfázisú oxidációval történő előállítása magas hőmérsékletet és viszonylag

hosszú időt (1 ÷ 2 óra) igényel. Mint alább még látni fogjuk, ez jelentős változásokat okoz a szilícium szerkezeti tulajdonságaiban, és nehezen kielemezhető befolyást gyakorol a  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  struktúra elektromos jellemzőire. Ezért számosan próbálkoztak a  $\text{SiO}_2$  réteg más módszerrel történő létrehozásával. Kézenfekvőnek tűnt a folyadékfázisban végrehajtott oxidáció (pl. salétromsavval, hidrogénperoxiddal) [3]. Ilyen módon azonban csak 5 nm-nél vékonyabb rétegeket sikerült elfogadható időtartam alatt előállítani, azonkívül tulajdonságaik stabilizálásához ezeket a rétegeket magasabb hőfokon hőkezelní is kellett. Ilyen feltételek mellett sem voltak egyenértékűek a termikusan előállított  $\text{SiO}_2$  rétegekkel.

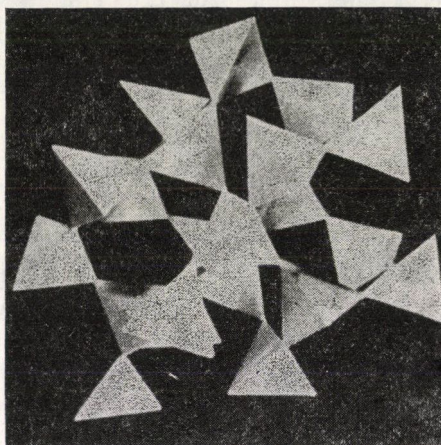
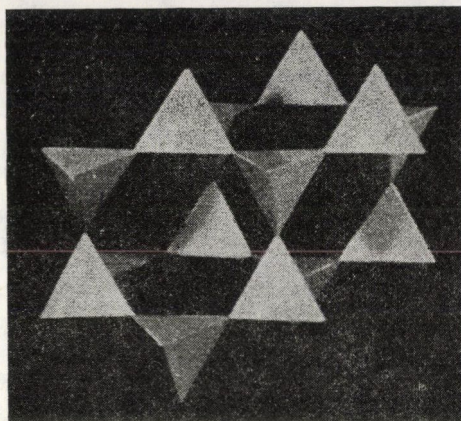
Nem bizonyultak egyenértékűnek az elektrokémiai anódizálással előállított  $\text{SiO}_2$  rétegek sem. A vizsgálatok szerint [4] ezen folyamat során a szilíciumatomoknak ion alakban a képződő oxidrétegen át kell diffundálni, és ez lényegesen rosszabb szigetelőképességű oxidot eredményez, mint a termikus oxidáció esetében, ahol ionizált oxigénatomok diffundálnak a szilíciumfelülethez.

Ezek a módszerek a hordozó szilíciumlemez anyagából hozzák létre az oxidréteget. Sok olyan módszer is ismeretes, ahol az oxidot valamilyen más szilícium forrásból állítják elő, és egyidejűleg vagy külön műveletben viszik rá a szilíciumfelületre. Ilyenek pl. a pirolitikus eljárások [5], ahol valamilyen gáz alakú vagy illékony szilíciumvegyületet oxigén jelenlétében elbontanak és a keletkező  $\text{SiO}_2$  a szilíciumfelületre rácsapódik. A tapadóképeség a reakciófolyamat és a szubsztrát hőmérséklet érzékeny függvénye.  $\text{SiO}_2$  bevonatok szerves szilíciumvegyületeknek és lakkoknak oldatából is előállíthatók, az oldatnak a szilícium lemez felületére történő rárétegzése, beszárítása és ráégetése útján. További módszer tömör  $\text{SiO}_2$ -tárcsa (pl. kvarc) katódporlasztása rádiófrekvenciás elektromos térben [6].

Ezek az eljárások alkalmasak ugyan oxidréteg előállítására, azonban az így készített oxidok gyengébb elektromos tulajdonságaik miatt nem felelnek meg a korszerű MOS-rendszerek szigetelőrétegének céljaira. A megengedhetőnél nagyobb kötött elektromos töltés, a vizes oxidációs módszereknél az oxid nagy hidroxil-tartalma, más esetekben a szerkezeti inhomogenitás a fő kifogás ezek ellen az oxidok ellen. Ugyanakkor pirolitikus oxidok előnyösen használhatók a MOS-rendszerek technológiájában védőbevonat céljára, többréteges fémezésnél elválasztó szigetelőréteggént, a vékony, kémiai úton készített oxid pedig alagúthatással átjárható az elektronok számára, amit pl. a szilíciumnitrid-szilíciumoxid kettős szigetelőjű MNOS típusú memória-áramkörökben hasznosítanak [7].

Mai ismereteink szerint MOS-rendszerekben a szigetelő szilíciumdioxid réteget legelőnyösebben *termikus oxidációval* lehet előállítani. Ez a  $\text{SiO}_2$  réteg általában nem rendezett szerkezetű, legfeljebb bizonyos rövid távú rendezettség mutatható ki benne [8]. A  $\text{SiO}_2$  kristályos módosulatai általában üreges vázstruktúrákat képeznek (4. ábra). Ezek építőeleme a  $\text{SiO}_4$  csoport, amely

tetraéder elrendezésű, a tetraéder belsejében a Si atom, csúcsain az O atomok foglalnak helyet. A krisztobalit nevű kristályos  $\text{SiO}_2$  módosulatban (amely egyébként alkáli nyomok hatására a rendezetlen  $\text{SiO}_2$ -ből is keletkezik) (4A. ábra) a  $\text{SiO}_4$  tetraéderek a gyémántrácsnak megfelelő elrendezésben találhatók, amelyek csúcsaikon közös O atomokkal kapcsolódnak egymáshoz. A kris-



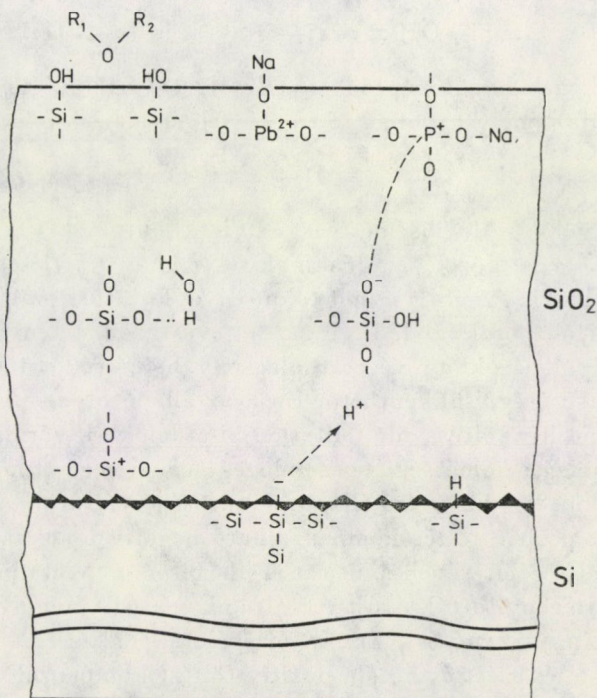
4. ábra. A — krisztobalitrács térbeli modellje; B — kvarcraács térbeli modellje

tályos kvarcban az egymással összekapcsolt  $\text{SiO}_4$  tetraéderek háromszögű elrendezésében bal, ill. jobb menetű csavarpályán helyezkednek el (4B. ábra). A  $\text{SiO}_4$  tetraéderek között kialakult üregek, csatornák idegen ionok, gázatomok, vízmolekulák befogadására képesek; ugyanakkor a térbeli rendezettség sem teljes, pl. megszakadt O-hidak oxigénjéhez könnyen kapcsolódik proton vagy a Si-hoz hidroxil, esetleg proton. Ezáltal  $\equiv\text{SiOH}$ ,  $\equiv\text{SiH}$  véggyökök képződnek, amelyek további kémiai átalakulásokban vehetnek részt, pl. a protont nátriumionra cserélik ki. Az OH és H gyökök könnyen mozognak a  $\text{SiO}_4$  váz



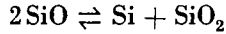
üregében, valószínűleg hidrogénkötés közvetítésével. Nagy vákuumban magasabb hőmérsékleten a vízmolekulák jelentős része kitudál ezekből az üregekből. Munkatársainkkal kimutattuk [9], hogy proton-akceptor anyagok (mint pl. az alifás éterek, aminok) gőzeinek jelenlétében már szobahőmérsékleten is bekövetkezik a  $\text{SiO}_2$  réteg dehidratálódása. Valószínűleg ez a dehidratáció az oka az ilyen körülmények között tapasztalt rendezési és kristályosodási hajlamnak. Szekunder-ion tömegspektroszkópiai mérések szerint [10] a víz fokozatosan távozik a  $\text{SiO}_2$  rétegből, ami valószínűleg felületi adszorpció, majd hidrogénkötés által megkönnyített felületi deszorpció hatására indul meg. Vízmolekulák jelenlétében a  $\text{SiO}_2$  felszíne nagyszámú szilanol-gyököt tartalmaz (5. ábra), a proton-akceptor molekulák adszorpciója a vízmolekulák lehasadását segíti elő, amelyek deszorbeálódnak. Ezáltal a felület elszegényedik OH-gyökökben, a réteg belsejéből diffúzió indul meg az egyensúly helyreállítására, ennek eredményeképpen a H-tartalom egy nagyságrenddel is csökkenhet.

A termikusan előállított  $\text{SiO}_2$  réteg ismeretesen kb.  $10^{11}/\text{cm}^2$  nagyságrendű kötött pozitív töltést tartalmaz. Ennek eredetéről megoszlanak a vélemények [11], de nagyon valószínű, hogy a Si/SiO<sub>2</sub> határfelületnél a reakciómechanizmus miatt fellépő nem-sztochiometrikus Si : O aránnyal függ össze



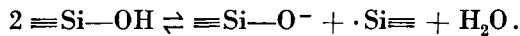
5. ábra. Fizikai-kémiai kölcsönhatások a  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  rendszerben

[12]. Elektromos és radioaktív vizsgálatok egyaránt kimutatták, hogy a kötött töltések a Si felülettől 20 nm-t meg nem haladó távolságban találhatóak. Számuk függ a felület kristálytani orientációjától, az oxidáció hőmérsékletétől, ami nyilvánvalóvá teszi a  $\text{Si} \rightarrow \text{SiO}_4$  folyamattal való kapcsolatot. A  $\text{SiO}_{x < 2}$  összetételű rétegben a le nem semlegesített Si atomok eredményezhetnek pozitív töltést. A

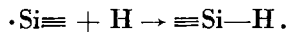


folyamat semleges gázban végzett hőkezelés hatására mehet végbe. Ez megmagyarázná a pozitív töltés csökkentésére alkalmazott hőkezelések hatásmechanizmusát. Az atomos Si kiválása nem jár töltésképződéssel, mivel szilárd oldatban van jelen.

A termikus oxidáció sebességére jelentős hatást gyakorol a vízgőz jelenléte. Az ún. nedves oxidáció sebessége egy nagyságrenddel nagyobb, mint a száraz oxigénben végzett folyamaté [13]. Ez arra mutat, hogy az oxidációt víz, esetleg protonok katalizálják, melynek során a proton  $-\text{OH}$ -gyököt képezve beleépül a  $\text{SiOSi}$  láncokba. Infravörös abszorpciós mérésekkel kimutatták, hogy a  $\text{SiO}_2$  rétegben az OH csoportok száma a  $10^{19}/\text{cm}^3$ -t is meghaladja. Révész szerint [14] a  $-\text{SiOH}$  csoportok felelősek a pozitív kötött töltésért az alábbi folyamat eredményeképpen:



A diszproporcionálódással képződött „háromvegyértékű” Si-gyök a pozitív töltés hordozója, amely azonban hidrogén felvételével semlegesíthető:



Az infravörös reflexiós mérések azt is kimutatták [9], hogy a  $\equiv \text{SiH}$  csoportok a Si felület közelében dúsulnak fel, míg a  $\equiv \text{SiOH}$ -gyökök 20 nm-en belül alig találhatóak. A  $\equiv \text{SiH}$  csoportokat egyes kutatók összefüggésbe hozzák az ún. felületi állapotokkal [15]. Ez a feltevés azon a tényen alapul, hogy hidrogéntartalmú gázokban végzett alacsony hőmérsékletű temperálással a felületi állapotsűrűség csökkenthető. Ezek az állapotok azonban valószínűleg nem a kötött pozitív töltést adó telítetlen Si-atomoktól származnak. A kötött töltés ugyanis magas hőmérsékleten semleges gázban végzett hőkezeléssel csökkenthető anélkül, hogy a gyors állapotok sűrűsége változna.

A kötött pozitív töltés kompenzálható negatív ionoknak a  $\text{SiO}_4$  tetraéderek közé való beépítésével, mint ezt szerzőnek SOLT Katalinnal együtt végzett kísérletei bizonyították [16]. Az általuk vizsgált anion a  $(\text{PbO}_3)^{4-}$  ion volt, amely NÁRAY-SZABÓ és KÁLMÁN vizsgálatai [17] szerint az ólomüvegekben is jelen van, és ezért érthető a pozitív töltést kompenzáló hatás. Hasonló mechanizmussal magyarázható a MOS technológiában stabilizálásra használt foszforpentoxidos hőkezelés hatása [18], amelynél  $(\text{PO}_4)$  tetraéderek épülnek be

a  $\text{SiO}_4$  vázba. Az ötvegyértékű P-atom azonban polarizáló hatást gyakorol a környező  $\text{SiO}_4$  csoportokra, ami deformálja a közeli O-hidakat, ahol ezáltal befogódhatnak és immobilizálódnak az instabilitást okozó Na-ionok (5. ábra). Ugyancsak ionos kölcsönhatás immobilizálja a Na-ionokat a klór jelenlétében végzett oxidációknál, valószínűleg kompenzáló negatív tértöltés formájában.

**A hőhatások szerepe**

A MOS-rendszerekben anyagkölcönhatások elsősorban azoknál a technológiai műveleteknél jönnek létre, amelyek magasabb hőmérsékleten történnek. E műveletek elsődleges hatását — termikus oxidréteg létrehozása, adalékok diffúziója, temperálási műveletek — másodlagos effektusok kísérik, amelyek nagysága a hőmérséklet függvénye. Minthogy a technológiai folyamatban egyes műveletek ismétlődhetnek, a hőhatások összegződése miatt nehezen áttekinthető viszonyok alakulnak ki. A technológiai kulcsműveletek során jelentkező kumulatív hatásokat a 2. táblázatban foglaljuk össze. Mint

2. táblázat

*Hőkezeléssel járó műveletek kumulatív hatása MOS-rendszerekben*

Művelet	Elsődleges hatás	Másodlagos hatás
1. Termikus oxidáció aktív gázokban (vízgőz, $\text{O}_2$ , + HCl + $\text{Cl}_2$ ) ( $T = 800 \div 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ )	Felületi $\text{SiO}_2$ réteg kialakítása; $Q_{\text{ox}}$ , $N_{\text{ss}}$ minimalizálása; felületi hibák csökkentése	Nem-sztöhiometrikus ( $\text{SiO}_{x < 2}$ ) határ-réteg. Si-ben felületi hibák, $\text{SiO}_2$ -ben $\text{H}_2\text{O}$ , $\text{Cl}^-$ , $\text{OH}^-$ -gyök beépülése. Határ-rétegben adalékszegregáció.
2. Adalékok (B, P, As) diffúziója	Adalékolt (n, p) rétegek létrehozása	Si-rács kontrakciója; borid, foszfid képződés. Diszlokációk, illeszkedési és ponthibák. Reakciók $\text{SiO}_2$ -vel; morfológiai átalakulások (krisztobalit)
3. Temperálás: ( $500 \div 1100 \text{ }^\circ\text{C}$ )	Szerkezeti rendezetlenség csökkentése	$\text{SiO}_x$ diszproporcionálódása. —SiOH, —SiH-gyökök, rácshibák részleges kiküszöbölése. Si-ben szennyezők (C, $\text{SiO}_x$ , Cu, Fe) szegregációja
a) iners gázban ( $\text{N}_2$ , Ar, He)	$Q_{\text{ox}}$ , $N_{\text{ss}}$ csökkentése	
b) stabilizáló anyaggal (PSG)	Mozgó ionok ( $\text{Na}^+$ , $\text{K}^+$ ) lekötése	Vízgőzérzékenység, hajlam töltéspolarizációra

látható, a *termikus oxidáció* elsődleges célja felületi  $\text{SiO}_2$  réteg kialakítása. A különböző technológiai változatok *elsődleges hatása* a kötött pozitív töltés és a határfelületi állapotok minimalizálása, az oxid letörési feszültségét és a szilícium felületközeli rétegében a kisebbségi töltéshordozók élettartamát le- rontó felületi rácshibák csökkentése. A *másodlagos hatások* közé tartozik az oxidációnál keletkező, már említett nem-sztöhiometrikus összetételű ( $\text{SiO}_{x < 2}$ )

határréteg keletkezése, a deformációs feszültségek hatására a szilícium felületén megjelenő illeszkedési rácshibák, a különböző idegen gyökök beépülése a  $\text{SiO}_2$  rétegbe, az eltérő oldékonyosság okozta adalékszegregáció a  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  határfelület két oldalán. A termikus oxidáció különböző kivitelezési módszerei a rácshibák és az idegen atomok hatását bizonyos mértékben csökkenteni tudják. A többi hatás tartós velejárója a folyamatnak.

A *P* és *N* típusú rétegek létrehozására alkalmazott *adalékdifúzió* szintén magas hőmérsékleteket igényel. A leggyakrabban használt adalékanyagok atomjai (B, P, As) méreteikben, elektromos töltésükben eltérnek a szilíciumatomoktól, így beépülésük a szilíciumrácsba jelentős rácstorzulással jár. Ennek következtében az adalékolt és a nem adalékolt térrészek között mechanikai feszültségek lépnek fel, amelyek a difúzió hőmérsékletén összetett diszlokáció hálózatok kialakulásához vezetnek. Ezek hátrányosan befolyásolják pl. a PN-átmenetek visszaramát, a kisebbségi töltéshordozók élettartamát. Nagyobb adalékkoncentrációk hatására a szilícium felületén vegyületképződés — borid, foszfid, arzenid — indul meg, ami technológiai bonyodalmakat okoz. A difúzióhoz használt adalékanyagok általában oxid alakjában vannak jelen, ezek az oxidok viszont a difúziót gátló lokális szilíciumoxiddal reagálni tudnak; különféle üvegek (foszforüveg, bórüveg) képződnek, amelyek technológiai tulajdonságai különböznek a megszokott  $\text{SiO}_2$  tulajdonságaitól. Bizonyos esetekben pl. a bóroxid morfológiai átalakulásokat indukál, az amorf szilíciumdioxidban helyi átkristályosodás indul meg, ami pl. kristobalitszemcsék keletkezéséhez vezet [19].

Tapasztalati felismerések nyomán a MOS-rendszerek technológiájában egyes műveletek után különböző *temperálási* (hőkezelési) lépéseket alkalmaznak. Ezek célja az előző műveletben létrejött kedvezőtlen vagy előnytelen tulajdonság mérséklése vagy kiküszöbölése. Korábban már említettük a kötött pozitív töltés csökkentését célzó hőkezelést, amelyet iners gázban  $1100^\circ\text{C}$  körüli hőmérsékleten hajtanak végre. Ennél a folyamatnál mind a szubsztóhiometrikus szilíciumoxid diszproporcionálódása, mind a szilanol és a szilíciumhidroxid-gyökök bomlása, átrendeződése a kívánt eredménnyel végbemehet. A hőkezelés hőmérsékletén magában a szilíciumban is gyógyulási folyamatok játszódhatnak le, amelyek az eredeti vagy a művelet létrehozott rácshibák részleges kiküszöbölését eredményezik. A hőkezelésnek lehet azonban negatív hatása is. Ilyen pl. az intersticiálisan oldott, eddig ártalmatlan szennyezések (Cu, C, Fe) összecsomósodása és kicsapódása. Magasabb hőmérsékleten igen élénknek válik a szilíciumegykristály készítésekor oldott oxigén atomok difúziója, amely fokozatosan a  $\text{SiO}_2$ -nek mikroszemcsék alakjában történő kiválásához vezet. Ez nagy mértékben lerontja a szilícium alapanyag elektromos paramétereit. Érdekes módon a szilárd szilícium oxigéngázban történő oxidációja nem jár az oxigénatomoknak a szilícium belsejébe történő bediffundálásával, mint ezt szerző BÁRSONY Istvánnal együtt infravörös abszorpció mérés

segítségével kimutatta [10]. Ennek alapján úgy tűnik, mintha a Si/SiO<sub>2</sub> határfelület oxigénatomokra nézve impermeábilis lenne. Ez érthető, ha figyelembe vesszük, hogy 1000 °C körüli hőmérsékleteken a szilícium elektronkoncentrációját tekintve már fémként viselkedik, a szilíciumdioxid pedig a szerkezeti (intrinsic) félvezetőkre jellemző sajátosságokat mutat, kb. 10<sup>9</sup> ÷ 10<sup>10</sup>/cm<sup>3</sup> rendű elektron és lyuk koncentrációval. Emiatt a mindenkor Si/SiO<sub>2</sub> határfelületen tértöltésréteg alakul ki, melynek SiO<sub>2</sub> felőli oldalát a nagyobb mozgékonyaságú elektronok képezik. Az oxidrétegen átdiffundáló oxigénmolekulák a határfelületnél ionizálódnak és a kettősréteg terén áthaladva reagálnak a valenciasáv szilíciumatomjaival: SiO, majd SiO<sub>2</sub> képződik, az elektronok pedig rekombinálódnak a lyukakkal.

A felületi állapotok számának csökkentésére alkalmazott alacsony hőmérsékletű, hidrogéntartalmú gázokban végzett hőkezeléseknél feltehetően a szilíciumfelületnél elhelyezkedő, lekötetlen elektront tartalmazó szilíciumatomok semlegesítése megy végbe protonbefogással [21]. Ez a kötés azonban nem túl erős, amit a felületi állapotsűrűségnek viszonylag enyhe termikus behatásoktól, alacsony energiájú sugárzásoktól való érzékeny függése is bizonyít.

Említettük, hogy a MOS-eszközök karakterisztikáinak „csúszását” okozó alkáli-ionok lekötésére az oxidréteget foszforpentoxid bevonattal ellátva hőkezelik. Ennél a műveletnél rendkívül kritikus a foszforpentoxid mennyisége; 4 ÷ 5 mólszázalék felett a foszforatom nagyobb vegyértéke miatt töltéspolarizáció léphet fel, ami a SiO<sub>2</sub> rétegben kötött töltéstöbbletet jelent. Még nagyobb foszfortartalom esetében a mindenhol jelenlevő vízgőz reagál a foszforoxiddal foszforsav keletkezése mellett, ez pedig elbontja az alkáli-szilanol kötést, alkáli kationok és foszfát anionok válnak szabaddá, ionos instabilitást eredményezve.

### A fémezéssel kapcsolatos kölcsönhatások

A MOS-rendszerek fémezésének minősége az elemi elmélet szerint csak a fém és a félvezető közötti kontaktpotenciált befolyásolja, amely a fém és a szilícium kilépési munkáinak különbségével egyenlő. Előbbi a fémmre jellemző anyagi állandó, utóbbi a szilícium vezetési típusának és töltéshordozó koncentrációjának függvénye. Ebből kifolyólag a fém-félvezető kontaktpotenciál ( $\varphi_{MS}$ ) pozitív és negatív előjelű is lehet, ami pl. egy MOS-tranzisztor küszöb-  
feszültségének befolyásolására is módot nyújt. Ez a küszöb-  
feszültség ( $V_T$ ) függ még a szilíciumfelület Fermi-potenciáljától ( $\varphi_F$ ), amely függvénye a helyi adalékkoncentrációnak, továbbá a szilíciumban kialakuló kiürített réteg ionizált adalékkoncentrációjától ( $Q_B$ ), valamint a szilíciumdioxid kötött és mozgó töltésétől ( $Q_{ox}$ ).

$$V_T = \varphi_{MS} + \varphi_F - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} - \frac{Q_B}{C_{ox}}$$

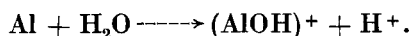
A MOS-rendszerek technológiájában a felületi összeköttetést szolgáló fém kiválasztása elsősorban műszaki és gazdasági mutatók szerint történt. A műszaki mutatók különböző technológiai előnyökkel kapcsolatosak, mint az alacsony párolgási hőmérséklet, duktilitás, jó elektromos vezetőképesség, a fő gazdasági mutatók pedig a beszerezhetőség, az ár és a minőség. Így esett a választás az alumíniumra. Meg kell mondani, hogy ez a választás jelentős gondok forrása lett, elsősorban a lehetséges kölesönhatások nem ismerése vagy figyelmen kívül hagyása miatt.

A korai MOS-rendszerekben jelentkező elektromos karakterisztika instabilitás eredetét sikerült részben visszavezetni az alumínium fémezés előállítási körülményeire. Kiderült, hogy a nagyvákuumban izzó volfrámspirálról elpárologtatott alumínium nemcsak sajátmaga alkáliakkal szennyezett, hanem a volfrámból is kioldja az alkálszennyezést és az a bevonat létesítése közben a szilíciumdioxid felületére jutva, ott mozgó töltést létesít. Mivel a fémezés után a MOS-rendszerek hőbehatásnak is ki vannak téve (chip-felforrasztás, huzal kötés), az alkáli-ionok a  $\text{SiO}_2$  réteg belsejébe is be tudnak diffundálni, elektromos tér hatására vándorolnak és ellenőrizhetetlen módon befolyásolják a küszöb feszültség értékét. A hőhatások azonban közvetlen kémiai folyamatokat is indukálhatnak az alumínium és a szilíciumdioxid között. Ismeretes az ipari gyakorlatból, hogy magasabb hőmérsékleten az alumínium redukálni képes a szilíciumdioxidot. A vizsgálatok szerint a MOS technológiában kialakított alumínium rétegek és a  $\text{SiO}_2$  között már  $450^\circ$  körül elindul ez a folyamat [22], amely pozitív ionok képződésével jár, valószínűleg az alábbi reakció szerint:

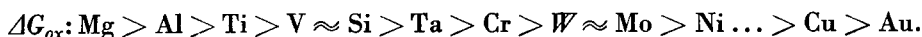


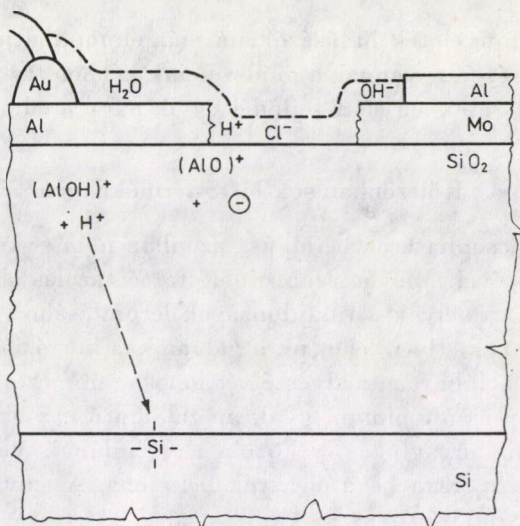
$600^\circ$  körül a reakció már  $\text{Al}_2\text{O}_3$  képződéséhez vezet. Pozitív előfeszítés mellett végzett hőkezeléskor kimutatták a pozitív  $(\text{AlO})^+$  ionnak a szilíciumfelület felé való vándorlását, amit SIMS-vizsgálatok is igazoltak. Fontos megfigyelés, hogy a fémezést megelőzően  $600^\circ\text{C}$  fölött hőkezelt  $\text{SiO}_2$ -felületeken a redukációs folyamat sokkal gyorsabban megy végbe, amit a  $\text{SiO}_2$   $\alpha$ -módosulatának megjelenésével hoznak összefüggésbe [23].

Víz tartalmú gáztérben  $500^\circ\text{C}$ -on végezve a hőkezelést a felületi állapotok számának jelentős csökkenését tapasztalták. Mivel a korábban mondottak értelmében ez a telítetlen Si-gyök és egy proton reakciójának az eredménye, a feltevés [24] szerint az ehhez szükséges hidrogénatomot az alumínium és a víz reakciója szolgáltatja (6. ábra):



Az alumínium fokozott reakcióképessége miatt más fémek alkalmasságát is vizsgálni kezdték. A szóbjövő fémek oxidjaik képződési szabad energiájának nagysága szerint az alábbi sorba rendezhetők:




 6. ábra. Fizikai-kémiai kölcsönhatások fém/SiO<sub>2</sub> rendszerben

Mindegyik fém a sorban utána következő oxidját képes redukálni. Ebből a szempontból tehát a szilícium utáni fémek kedvezőbbek, viszont mechanikai tulajdonságaik az alumíniuménál (az aranyat kivéve) kedvezőtlenebbek. Ezek figyelembevételével szerző a munkatársaival olyan kétrétegű fémzési eljárást dolgozott ki [25], ahol az első réteg molibdénből készült, a második pedig alumíniumból. A molibdén alapréteg nem reagál a szilíciumdioxiddal, védelmet nyújt az alkáli szennyezéssel szemben, míg a rajta kialakított alumínium-összeköttetés biztosítja az alumínium korábbi szereléstehnológiai előnyeit. A többréteges fémzés más megoldásai is ismeretessé váltak azóta, különösen nagyobb hőterhelésnek alávetett MOS-rendszerekben, pl. a Ti—Mo—Au, Ti—Pd—Au fémrendszerek, ahol a titán alapréteg a SiO<sub>2</sub>-hoz a kötést biztosítja, a Mo, ill. a Pd megakadályozzák az Au eutektikus reakcióját a Si-vel esetleges túlyukakon keresztül, az Au pedig jó elektromos és mechanikai tulajdonságai miatt alkalmas fedőfém. A túlyukokon keresztül történő eutektikus reakció az alumínium esetében is létező veszély, amit a szükséges hőkezelések 500 °C-t meg nem haladó hőmérsékletre való korlátozásával lehet kiküszöbölni.

Magának a fémzési műveletnek is lehetnek technológiai kölcsönhatást kiváltó mellékhatásai. Már említettük a volfrámszállból kipárolgó alkáliszennyezés hatását. Ezt a tényezőt speciális körülmények között előállított volfrám és nagy tisztaságú alumínium használatával sikerült korlátozni. Ugyanilyen eredményt értek el az elektronsugaras párologtató források bevezetésével. Itt viszont káros sugárhatások — elektronbombázás és lágy röntgensugárzás — éri a SiO<sub>2</sub> felületét, amelyek kikezelése további technológiai műveletet igényel [26].

A fémzési műveletek hatásáról ma már elmondhatjuk, hogy ismerjük a ható tényezőket és meg vannak a módszereink kézben tartásukra. Ez kétségkívül a MOS-rendszerekben elért fejlődés egyik nagy eredménye.

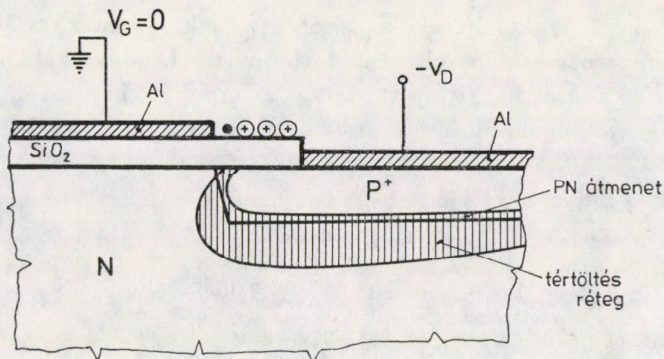
### Kölcsönhatások MOS-termékekben

Az anyagkölsönhatások befolyása azonban nem ér véget a technológiai folyamat befejezésével. Már hosszabb ideig tartó tárolás alatt is felléphetnek olyan folyamatok, amelyek a tulajdonságok leromlásához, az eszköz tönkremeneteléhez vezetnek. Ilyen lehet pl. a galvanikus korrózió, amely két különböző elektródpotenciálú fém, nedvesség és ionos szennyezés jelenlétében megy végbe [22]. Arany és alumínium gyakran található együtt a MOS-eszközökben (6. ábra), a műanyagtokos eszközökön a fémlábak mentén pedig a nedvesség viszonylag gyorsan behatol a tok belsejébe. A galvanikus korrózió az alumínium szétmaródását okozza.

Elektrolitikus korrózió keletkezik a MOS-eszközök használata közben a pozitív feszültségnek kitett fémrészekben, nedvesség és a felületen található idegen ionok jelenlétében [27]. A felületi vízrétegben ionáram alakul ki feszültségesés hatására. Ha pl. az alumíniumréteg pozitív potenciálon van, oxidációs folyamat indul meg. Ha klorid-ion van jelen, ez depolarizáló hatású, az oxidhártya felszakad és az oxidáció folytatódhatik az alumínium elfogyásáig.  $\text{Na}^+$  ionok jelenlétében a katódos oldalon is létre jön korróziós folyamat a hidroxilionok megnövekedett koncentrációja miatt. Az ilyen korróziós folyamatok ellen a kristályfelület alacsony olvadáspontú üveggel történő bevonásával vagy hermetikus fém-kerámia tokok használatával védekeznek.

A MOS-eszközök tönkremenetelét okozhatják a nem megfelelően megválasztott üzemeltetési körülmények, a maximálisan megengedett áram és feszültség határértékek túllépése. Különösen érzékeny a túlfeszültségre a kapuelektrod alatti szigetelőréteg, amelynek átütési szilárdsága hibamentes oxid esetében a  $7 \cdot 10^6$  V/cm-t is eléri, felületi rácshibákat, ionos szennyezést tartalmazó helyeken azonban  $10^6$  V/cm alá esik. Újabb vizsgálatok [28] szerint az átütési szilárdság maximális értékét a Si—O kötés disszociációs energiája határozza meg ( $\approx 3 \cdot 10^7$  V/cm). Ionos szennyezők jelenlétében a letörés időfüggő lehet. Pozitív kapufeszültség esetében a  $\text{Na}^+$  ionok a szigetelőrétegen keresztül a szilíciumfelülethez vándorolnak, és ott elősegítik elektronok hidegemisszióját a szilíciumból, ami letöréshez vezet. Ionszennyezéstől mentes pl. sósavgázos oxidációval előállított szilíciumdioxid rétegek letörési feszültsége egy nagyságrenddel nagyobb, mint az egyszerű oxidációval előállított oxidrétegeké. Az ionszennyezés nemcsak a kapuszigetelő viselkedését befolyásolja hátrányosan. A drain-kontaktust körülvevő oxidréteg felületén ionok halmozódhatnak fel [25], pl. a negatív előfeszültség által létesített tér hatására pozitív ionok (7. ábra). Ezek elektrosztatikus megosztással a szigetelőrétegen át, ellen-





7. ábra. Felületi letörés MOS-rendszerben  $pn$ -átmenetében (indukált ionhatás)

kező előjelű töltéseket indukálnak a félvezető felületi rétegében. Így a  $PN$ -átmenet  $N$ -oldalán elektron feldúsulás,  $P$ -oldalán lyukelszegényedés következik be, ennek következtében a  $PN$ -átmenet letörési feszültségének csökkenését okozza.

A drain-elektródra adott nagy zárófeszültség olyan térerősséget hozhat létre a kiürített rétegben, hogy a felgyorsult elektronok a félvezetőből ki tudnak lépni a szigetelőbe és rövidzárat képeznek a kapuelektródhoz. Valamennyi felsorolt letörési jelenség hőmérsékletfüggő, azaz növekvő hőmérséklettel intenzívebbé válik, kerülnünk kell tehát a MOS-eszközök mind termikus, mind elektromos túlterhelését.

Túlzottan nagy áramok a fémes vezetők állapotát is hátrányosan befolyásolják, ún. elektromigráció jöhet létre, elektromos áram által kiváltott anyagvándorlás, amely a fémezés megszakadásához vezet [29].

### Következtetések

Az elmondottak meggyőzően bizonyítják az anyagkölcsonhatások szerepét a MOS-rendszerek tulajdonságainak és viselkedésének alakításában. Az, hogy felderítésük nagy tudományos erőfeszítéssel folyt és folyik ma is, minden bizonnyal a MOS-rendszer kiemelkedő fontosságával függ össze. A szerzett tapasztalatokból azonban következik, hogy anyagkölcsonhatásokkal az előállítási technológia bonyolultságától függő mértékben, minden elektronikai alkatrésznél számolnunk kell. Ez a felismerés jelentős szemléleti változást igényel. A mai elektronika magas szintű technológiája csak a legkorszerűbb tudományágakra támaszkodva jöhetett létre és csak így fejlődhet tovább. A megoldandó feladatok gyakran olyanok, hogy a tudományoknak új területeket kell nyitniuk megoldásuk érdekében. Az új ágazatok több tudományág között létesítenek interdiszciplináris kapcsolatokat és ezzel az alaptudományok fejlődéséhez is hozzájárulnak. Ez persze nem teszi egyszerűvé a szakemberek

dolgát, sem az új szakemberek képzését. Az elektronika korszakunkat alapvetően meghatározó szerepe elkerülhetetlenné teszi, hogy ezekkel az igényekkel szembenézzünk és hazai kutató-fejlesztő munkánkban általánossá tegyük a MOS-rendszerek példáján bemutatott szemléletet.

## IRODALOM

1. SZÉP, I.: Die Festkörper-Schaltung als ein physikalisch-chemisches System. XI. Internat. Tagung der Elektrotechniker, Berlin 1965
2. BALK, P.: *J. of Electronic Mat.* 4 (1975), 51—82
3. OAKLEY, D. E., GODBER, G. A.: *Thin Solid Films* 9 (1972), 287—291
4. COLLINS, F. C.—NAKAYAMA, T.: *J. Electrochem. Soc.* 114 (1967), 167—173
5. MUKHERJEE, S. P.—EVANS, P. E.: *Thin Solid Films* 14 (1972), 105—118
6. PLISKIN, W. A.—DAVIDSE, P. D. et al.: *IBM J. Res. Dev.* 11 (1967), 461—467
7. WALLMARK, J. T.—SCOTT, J. H.: *RCA Review* 30 (1969), 235—250
8. BARNA Á. közlése (MTA Műszaki Fizikai Kutató Intézete)
9. HOFFMANN, G.—LŐRINCZY, A.—NÉMETH-SALLAY, M.—SZÉP, I. C.: *Thin Solid Films* 59 (1979), 319—325
10. BARNA, Á.—NÉMETH-SALLAY, M.—SZÉP, I. C.—ROMANOVA, G. F. et al.: *Thin Solid Films* 55 (1978), 355—360
11. DEAL, B. E.: *J. Electrochem. Soc.* 121 (1974), 198—205
12. SIGMON, W. T.: *Appl. Phys. Lett.* 24 (1974), 105—107
13. LIGENZA, J. R.—SPITZER, W. G.: *J. Phys. Chem. Solids* 14 (1969), 131—136
14. RÉVÉSZ, A. G.—ZAININGER, K. H.: *RCA Review* 29 (1968), 22—76; RÉVÉSZ, A. G.: *Thin Solid Films* 41 (1977), 43—47
15. SVENSSON, CH. M.: Proc. Int., Conf. „The Physics of SiO<sub>2</sub> and its Interfaces” ed. S. T. Pantelides, Pergamon Press 1978, 328—332
16. SZÉP I.—SOLT Katalin: Int. Conf. Phys. Chem. Semiconductor Heterojunctions, Budapest Akadémiai Kiadó; Vol. V., 205—209
17. NÁRAY-SZABÓ, I.—KÁLMÁN, A.: *Szilicatechnik* 12 (1961), 316—318
18. BALK, P.—ELDRIDGE, J. M.: *Proc. IEEE* 57 (1969), 1558—1563
19. MEEK, R. L.—BRAUN, R. H.: *J. Electrochem.* 119 (1972), 1538—44
20. BÁRSONY, I.—SZÉP, I. C.: *Acta Physica* 29 (1970), 97—106
21. CASTRO, P. L.—DEAL, B. E.: *J. Electrochem. Soc.* 118 (1971), 280—286
22. SZÉP IVÁN: Korszzerű MIS struktúrák előállításának technológiai problémái. „Szilícium alapú MIS rendszerek” iskola, Mátrafüred, 1977. Eötvös Loránd Fizikai Társulat, 225—239 o.
23. UGAJ, J. A.: *Izv. AN SzSzSzR, Neorganiceszkie Materialü* 9 (1973), 168—171.
24. KOOL, E.: *Philips Res. Rept.* 21 (1966), 477—497
25. SZÉP, I. C.—TIHANYI, J.: Proc. Colloque. Internat. Microélectronique Avancée, Paris, ed. Chiron, 1970. Vol. I, 56—62
26. LEE, H. S.: *IEEE Trans. Electron. Dev.* ED-25 (1978), 795—799
27. KOELMANS, H.: Proc. 12th Ann. Reliability Symp. 1974, 168—174
28. SOLOMON, P.: *J. Vac. Sci. Technol.* 14 (1977), 1122—1130
29. d'HEURLE, F. M.—Ho, P. S. in „Thin Films — Interdiffusion and Reaction”, ed. Poate, J. M., Tu, K. N., Mayer, J. W.; New York, Wiley, 1978, 243—303

**Material Interactions in the Electronic Devices of Metal-Oxide-Silicon (MOS) Structure.** —

In this study the most essential material interactions are reviewed, which can take place during manufacture, storage and operation of metal-oxide-silicon (MOS) devices, representing one very important class in the groups of active microelectronic devices. Such interactions can give rise to properties differing significantly from those foreseen by simple physical models. Based on the results of more than fifteen years of experimental work performed by the author it is shown that the critical interactions occur during the preparation of the oxide, during heat-treatments accompanying different technological operations and depend profoundly on the variety and the way of the deposition of the metal (*M*) layer. The nature of these processes, means how to influence them, are interpreted by the author supported by experimental evidence.

In conclusion, the need for strengthening the interdisciplinary relations between the scientific branches concerned is stressed, this being the condition to elucidate further details and to bring under control material interactions in the MOS system.

**Stoffwechselwirkungen in den Bauelementen der Mikroelektronik von Metall-Silizium-oxyd-Silizium (MOS) Struktur.** — In dieser Studie werden die wichtigsten Stoffwechselwirkungen überblickt, die bei der Herstellung, Lagerung und Anwendung von Halbleiterbauelementen mit Metall-Oxyd-Silizium (MOS) Struktur — einer der wichtigsten Vertreter der Bauelemente in Mikroelektronik — auftreten können und solche Eigenschaften verursachen, die von denen des einfachen physikalischen Modells abweichen. Auf Grund von mehr als fünfzehn jährigen Untersuchungen des Verfassers wird es bewiesen, daß aus der großen Zahl von Wechselwirkungen jene die wichtigsten sind, die bei der Herstellung der Oxydschicht, bei den verschiedenen Wärmebehandlungen des technologischen Arbeitsganges, und bei der Aufbringung der Metallschicht im MOS System stattfinden. Durch Experimente unterstützt werden auch die Elementarprozesse und die Art und Weise ihrer Beeinflussung erörtert. Als Schlußfolgerung wird vom Verfasser betont, daß zur weiteren Klärung und auch Beherrschung der Stoffwechselwirkungen im MOS System eine stärkere Verknüpfung zwischen den betreffenden wissenschaftlichen Disziplinen nötig sei.