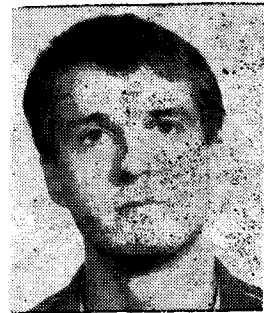


# A szilícium termikus oxidációja és a belső getterezés

MÁNYOKI ZOLTÁN  
Mikroelektronikai Vállalat



## ÖSSZEFOGLALÁS

A bonyolult IC-technológiákban egyre inkább elterjed a belső getterezés alkalmazása. Ennek az eljárásnak a többi technológiai lépéssel való kölcsönhatása még tisztázásra szorul. A szerző kísérletet végzett a termikus oxidáció és a belső getterezés kapcsolatának feltárására. Megállapította, hogy hosszú időtartamú második getterezési hőkezelésre van szükség, és, hogy a kristály szőntartalma fokozza az oxigén precipitálódását. Korrelációt állított föl a kisebbségi töltéshordozók élettartama és a precipitálódás mértéke között.

## A belső getterezés és a szilícium-szelettechnológia

Napjainkban, ahogy közeledünk a VLSI, ULSI bonyolultságú integrált áramkörök korszaka felé, úgy lesz egyre fontosabb az alapanyagul szolgáló szilícium egykristály hibamentessége. Ugyanakkor az eddig elhanyagolhatóan kicsinek és kis koncentrációjának tekintett rácshibák a mind kisebbekké váló eszközökben katasztrófális meghibásodásokhoz, vagy jobb esetben helytelen működéshez, a paraméterek romlásához vezethetnek. Még ha az alapanyagban lévő kristályhibák mérete elhanyagolható is, a belőlük a technológiai folyamatok során kialakuló ún. folyamatindukált kristályhibák már komoly problémákat okozhatnak. Például a kiindulási alapanyagul szolgáló szilíciumkristályban már előfordulhatnak mikroprecipitátumok (két-, vagy háromdimenziós rácshibák), a termikus oxidáció alatt ezek az ún. oxidáció indukálta illeszkedési hibák magjaiul szolgálhatnak, és ezáltal az eszközparaméterek (mint pl. szivárgási áram, letörési feszültség stb.) degradálódását idézhetik elő. Az elkerülhetetlenül a kristályba jutó fémszennyezők (leginkább az átmeneti fémek) gyakran földúsulnak a rácshibákon („dekorálják” azokat), és így sokszorosára növelik azok elektromos aktivitását.

Szükségesnek látszik tehát olyan technológiai műveletek kidolgozása, amelyek révén az elkerülhetetlen kristályhibák mennyisége csökkenthető, illetőleg azok a szelet felületközelebi, aktív rétegeiből kivonhatók és a hátoldal közelében vagy a tömbanyagban megköthetők. Ezt az utóbbi műveletet hívják getterezésnek, mely, aszerint, hogy a hibák, szennyezők megkötése hol történik, vagy hátoldali, vagy belső getterezés. A getterezési eljárások közös alapelve az, hogy szándékosan hoznak létre diszlokációkat (esetleg szemcsehatárokat) a kristályban azért, hogy azok a szennyezőket a feszültségi terükbe vonják és megkössék.

Beérkezett: 1986. VIII. 18 (†)

MÁNYOKI ZOLTÁN  
1985-ben végzett a BME  
Villamosmérnöki Kar  
Műszaki fizikai ágazatán.  
Jelenleg a Mikroelektronikai Vállalat dolgozójaként ugyanott nap-

pali szakmérnökhallgató.  
Munkájának témája a folyamatindukált kristályhibák fizikai módszerekkel történő vizsgálata.

A hátoldali getterezés esetén ezeket a diszlokációkat a hátoldal durva megmunkálásával hozzák létre (pl. lézersugárral, implantációval, mechanikus földurvitással stb.).

A belső getterezésnél azt használják ki, hogy az IC-technológiákban szinte kizárólagosan alkalmazott, Czochralsky-módszerrel húzott egykristály szükségképpen tartalmaz oldott oxigént. Ez az oxigén azután különböző hőkezelések hatására szilíciumoxid precipitátumokat alkot, amelyek viszont misfit feszültséget keltenek a rácspan. Ez a feszültség, bizonyos értéket elérve, diszlokációban oldódik föl. Ezek a diszlokációk használhatók föl getterezésre. A vázolt mechanizmusból nyilvánvaló, hogy a precipitátum növekedésével folyton új és új diszlokációk keletkeznek, amelyek így viszonylag sok szennyezőt képesek getterezni. Természetesen, ha ezek a precipitátumok a felülethez közel alakulnak ki, akkor semmi hasznunk nincs belőlük, hiszen ugyanúgy rontják az eszközparamétereket, mint más hibák. Viszont, ha csak a tömbanyagban jönnek létre, akkor az aktív réteget megtisztítják a technológia során állandóan bejutó szennyezőktől, ezáltal jobb felületközelebi kristályszerkezetet kapunk. A belső getterezés konkrét megvalósítását Szelőczei és társai részletebben is leírták már ebben a folyóiratban [1]. Itt csak annyit érdemes megemlíteni, hogy három különböző hőmérsékletű lépést szokás alkalmazni: egy magas (1200 °C körüli), egy „alacsony” (750 °C körüli) és ismét egy magas (1100 °C körüli) hőmérsékletűt. Természetesen nem közömbös a hőkezelések időtartama és atmoszférája sem, igaz, hogy az első és a harmadik lépés lehet viszonylag rövid (tíz óránál rövidebb), de a második, amely alatt a precipitátummagok kialakulnak, jellegzetesen több tíz óráig szokott tartani [2].

A getterezés hatékonysága alapvetően két módon értékelhető:

— *Elektromosan*: kész eszközöket hozunk létre, és ezeken vizsgáljuk a paramétereket (szivárgási áram, kisebbségi töltéshordozók élettartama, letörési feszültség stb.). Ez a megoldás azonban adott eszközstruktúrát, így adott eszköztechnológiát is igényel.

— *Fizikai, kémiai módszerekkel*: csak egyes technológiai lépéseket hajtunk végre és azok után végzünk vizsgálatokat (pl. elektronmikroszkóppal, röntgentopográfiával, infraszpektroszkópiával, preferenciális marással, struktúra kialakítását nem igénylő egyéb getterezésekkel). Ez lehetővé teszi, hogy a belső getterezés és az egyes technológiai lépések közötti kölcsönhatásokat föl tárjuk és ezáltal ne csak a getterezési lépést optimalizálhassuk, hanem, például, találjunk egy optimális termikus oxidációt. Ez tulajdonképpen nem más, mint a belső getterezés *szerves* beépítése a technológiai sorba.

A getterezés optimalizálása két részből áll. Meg kell találni azt az alapanyagot, amelyen optimális hatást érhetünk el, és meg kell találni azokat a paramétereket, amelyekkel ez elérhető (pl. hőmérséklet, időtartam, atmoszféra). A már említett, két irányból történő technológia-optimalizáláshoz az szükséges, hogy ismerjük az esetleges kölcsönhatást a getterezés és a szokásos eszköz-technológiai lépések között.

Tekintettel arra, hogy az IC-technológia egyik kritikus lépése a termikus oxidáció, az elvégzett kísérletekben ezen technológiai lépés és a belső getterezés kölcsönhatásának vizsgálata volt a cél, valamint az, hogy megállapítsuk, milyen szerepe van a kristályban jelen lévő szénatomoknak az oxigén precipitációjában. Ez utóbbi kérdésben ugyanis megoszlanak a vélemények [3].

#### A kísérleti vizsgálatok és a fölhasznált minták jellemzői

A kísérlethez 5—5 getterezett ill. nem getterezett szeletet használtunk föl. A getterezési hőciklus a minimális szeletgörbültre volt optimalizálva. Paraméterei a következők voltak [4].

- 1100 °C, 6 óra,  $N_2$  atmoszférában,
- 800 °C, 6 óra,  $N_2$  atmoszférában,
- 1100 °C, 6 óra,  $N_2$  atmoszférában.

Ezen szeleteknek az összehasonlító vizsgálatokhoz szükséges párjauil azonos kiindulási oxigén- ill. széntartalmú, egyéb paramétereikben is velük megegyező szeleteket választottunk. A minták különböző szennyezőkre vonatkozó adatait az alábbi táblázat közli:

Hőkezelt szeletek: Azonosító	$[O_i] \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$		$[C_s] \cdot 10^{16} \text{cm}^{-3}$
	Hőkezelés előtt	után	
A1	10,4	9,0	a kimutatási határ
B1	5,4	5,3	alatt
C1	5,9	5,3	2
D1	8,3	6,0	2
E1	6,2	5,7	2
Hőkezeletlen szeletek:			
A2	10,8	—	a kimutatási határ
B2	5,3	—	alatt
C2	6,3	—	2
D2	8,4	—	2
E2	6,7	—	2

Valamennyi szelet kiindulási állapotában diszlokációmentes volt. Al-, Fe-, Ou-tartalmuk nem haladta meg a  $10^{-9}$  g/g szintet.

A minták párosítása a következő volt: A1—A2, B1—B2, C1—C2, D1—D2, E1—E2. Az 1-gyel jelölt minták kapták a getterező hőkezelést. A 2-vel jelöltek a referenciaszeletek.

Az egy adott pár tagjaira vonatkozó vizsgálati eredmények összevetéséből a hőkezelés, a különböző párokra vonatkozó eredményekből pedig az alapanyagparaméterek hatását lehetett minősíteni. A termikus oxidációt az ASTM-szabvány OXI-TEST vizsgálatával modelleztük. Ez valamivel hosszabb, mint a szokásos technológiákban használatos termikus oxidációk, de az oxidáció indukálta kristályhibák vizsgálatához kiválóan megfelelő, mivel az általa okozott hibák a hosszú időtartam miatt nagyobbak és ezáltal könnyebben értékelhetők. Az oxidáció paraméterei a következők voltak:

- felfűtés: 25 °C-ról 1150 °C-ra 35 perc
- hőntartás: 1150 °C-on 120 percig,
- lehűlés: 1150 °C-ról 600 °C alá 90 perc

A művelet vízgőz tartalmú oxigén atmoszférában történt. A gázáram 100 liter volt óránként. A szeletek felületén egy mikrométer vastag oxidréteg képződött. Az oxidált mintákon időrendben a következő vizsgálatokat végeztük el:

— az oxidréteg eltávolítása után a kristályok intersticiális oxigén- és szubsztitúciós széntartalmának meghatározását a TKI Perkin—Elmer MODEL 580 típusú infraszpektrométerével,

— a mintákban lévő tömbbéli kristályhibák meghatározását röntgentopográfiás módszerrel az MTA MFKI-ban,

— a kisebbségi töltéshordozók tömbbéli rekombinációs élettartamának mérését mikrohullámú abszorpciós módszerrel az MTA MFKI M. SETEK-gyártmányú, LTA—130A típusú berendezésével,

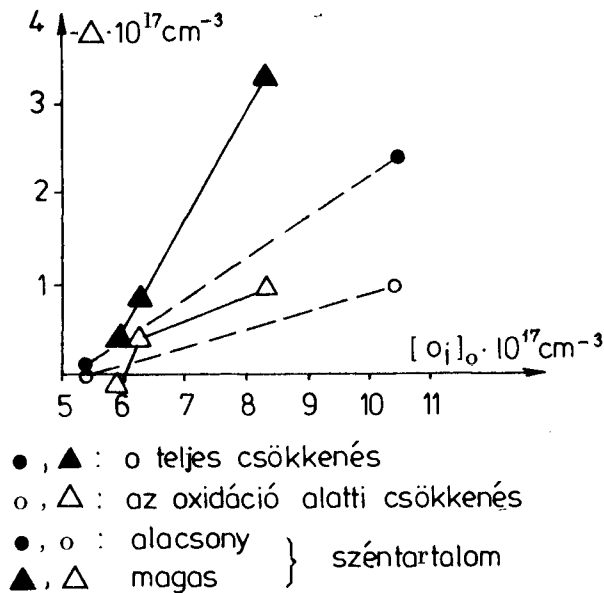
— a felületi kristályhibák előhívását Wright—Jenkins-féle preferenciális maróval.

Ezekről a módszerekről részletesebb áttekintést ad az [5] irodalom.

#### Az eredmények és értékelésük

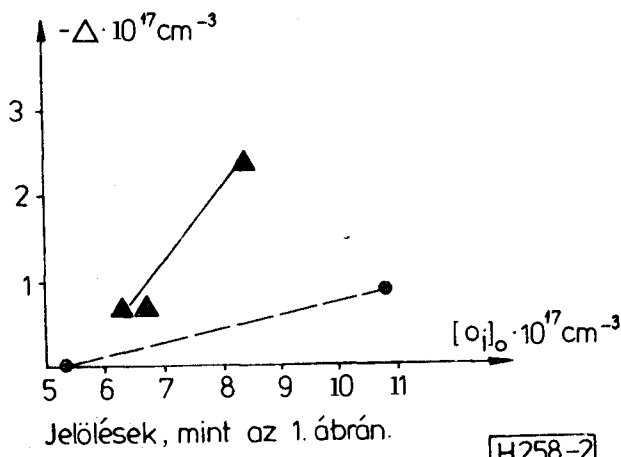
Az infraszpektroszkópiával a kristályban intersticiálisan oldott oxigén mennyisége mérhető. Tehát ennek csökkenéséből az oxigén precipitációjára lehet következtetni [6]. Igaz, hogy a hőkezelések során az oldott oxigén egy része a szeletből kidiffundál, de ennek mértéke csekély az intersticiális oxigén mennyiségének tapasztalt csökkenéséhez képest. Ez könnyen belátható, mivel, ha az oxigén kidiffúziója során a teljes *denuded* (azaz az oxigénban elszegényedett) zóna kiürül, az ennek megfelelő koncentrációcsökkenés úgy aránylik az eredeti koncentrációhoz, mint a *denuded* zóna kétszeres mélysége a szelet vastagságához. Ez pedig éppen a mérési pontosság nagyságrendjébe esik [4].

Az oxidáció után mért koncentrációértékeket és a kiindulási koncentrációkhoz viszonyított csökkenést, amelyet —A jelöl, az alábbi táblázat tartalmazza:



H258-1

1. ábra. A precipitáció mértéke a kiindulási oxigénkoncentrációk függvényében a hőkezelt minták esetén



H258-2

2. ábra. A precipitáció mértéke a kiindulási oxigénkoncentrációk függvényében a hőkezeletlen minták esetén

Azonosító	$[O_i]_o \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$ az oxidáció után	$-\Delta \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$
A1	8,0	2,4
B1	5,3	0,1
C1	5,5	0,4
D1	5,0	3,3
E1	5,3	0,9
A2	9,9	0,9
B2	5,5	0,0
C2	5,6	0,7
D2	6,0	2,4
E2	6,0	0,7

A hőkezelt minták esetén a koncentrációcsökkenés részben a getterező hőkezelés, részben az oxidáció alatti precipitáció következménye. A hőkezeletlen szeletek esetén viszont csak az oxidáció idézhette elő a precipitálódást. Az 1., 2. ábrák a precipitáció mértékét mutatják a kiindulási oxigénkoncentrációk függvényében.

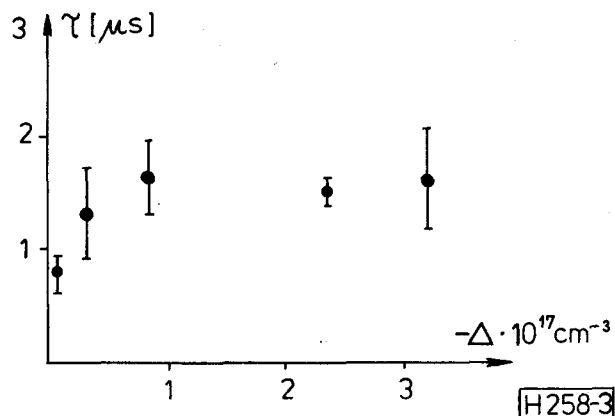
Külön szimbólum jelöli a szén tartalmazó és a szén „nem tartalmazó” kristályokhoz tartozó értékeket. A szénkoncentráció ismerete azért fontos, mert egyes szerzők szerint a szénatomok nukleációs centrumokat alkotnak az oxigén precipitációja számára, és így meggyorsítják a folyamatot. Más szerzők szerint viszont a szén semmiféle szerepet nem játszik a precipitációban, azt tisztán az oxigénatomok, a vakanciák és az intersticiális szilíciumatomok határozzák meg. Ismét más szerzők szerint pedig a szén lassítja a precipitátumok magképződését, így a precipitációt. Ezekről a véleményekről jó áttekintést ad a [3] irodalom. Nyilvánvaló, hogy ez a kérdés még tisztázásra szorul. A mért értékekből látható, hogy a precipitáció annál jelentősebb, minél több oxigént tartalmazott a szelet a kiinduláskor. Érvényes ez akkor is, ha kevés, akkor is, ha több szén volt a szilíciumban, de az utóbbi esetben ez a függés meredekebb. Megállapíthatjuk tehát, hogy a szén elősegíti az oxigén precipitációját, ezért hatékony belső getterezéshez legalább  $2 \cdot 10^{16} \text{cm}^{-3}$  kiindulási széntartalmú szeleteket érdemes fölhasználni.

Az 1. ábra külön föltünteteti még azt is, hogy a getterezett mintákban milyen mértékű volt az oxidáció alatti precipitálódás. Ebből az látható, hogy a getterezési hőkezelés csak a nagy oxigén- és széntartalmú mintában (D1) csökkentette lényegesen az oxidáció alatti precipitálódást, aminek következménye a preferenciális marási vizsgálat eredményében is megfigyelhető volt. A getterezési hőkezelésnek a többi mintánál tapasztalt, viszonylag jelentéktelen hatása valószínűleg a második hőkezelés rövidségének tudható be. Hiszen, mint már említettük, az előzetes hőciklust a minimális szeletgörbültre optimalizálták. Mivel a getterezés csak mérsékelt mennyisége változást okozott, nyilvánvaló, hogy a nukleációs (a második) lépés során a kristálynövesztés kor keletkező, ún. „as-grown” precipitátummagokhoz képest kevés új mag jött létre, és ez a nukleációs szakasz rövidségére utal. Látható továbbá, hogy, amikor az oxigénkoncentráció eléri az  $5 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$  tartományt, akkor a további precipitáció lelassul, vagy meg is áll. Ez annak köszönhető, hogy alkalmazott hőmérsékleteken az intersticiális oxigén egyensúlyi koncentrációja az említett érték körül van, így ezt elérve megszűnik a túltelítettség, vagyis a precipitáció hajtóereje.

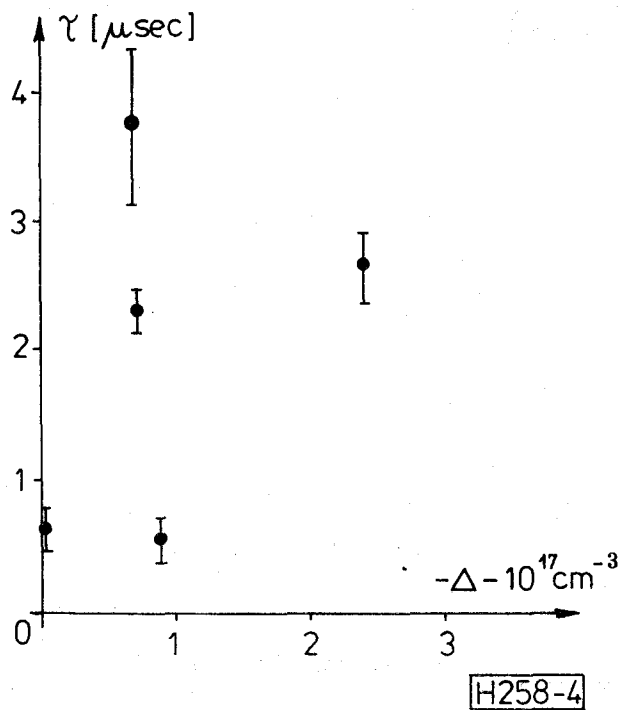
A kristályhibák kimutatására két különböző módszert kellett alkalmazni. Röntgentopográfiával a tömbanyagban lévő hibákat, preferenciális kémiai maratással pedig a felületeket lehetett kimutatni. A tapasztalat szerint mind a hőkezelt, mind a hőkezeletlen mintákban kialakultak illeszkedési hibák a tömbben és a felületen egyaránt. A röntgentopográfia kimutatott még nagyméretű (20–30  $\mu\text{m}$  közötti) precipitátumokat is, de ezeket már csak a hőkezelt szeletek belsejében. Ezeknek a sűrűsége viszonylag kicsi volt. Természetesen precipitátumok mindegyik mintában kialakultak, hiszen ezt mutatták az infraszpektroszkópiás vizsgálat eredményei, csak nyilván azok mérete sokkal

kiseb volt, mint az említett nagy precipitátumoké, és így röntgentopográfiával nem voltak kimutathatóak. A különbség a hőkezelt és a hőkezeletlen szeletek között nem a hibasűrűségben és -mértetben volt, hanem a hibák eloszlásában. Kivétel képez a D1 minta, melynek felületén alig volt illeszkedési hiba. Mint már említettük, ebben a kristályban egyaránt magas volt a kiindulási oxigén- és szénkoncentráció. Tehát az infraszpektroszkópiás eredményekkel meggyező eredményre jutottunk. A hőkezelt szeletek felületi hibaeloszlása egyenletes, míg a hőkezeletleneké egyenetlen, foltos volt.

Az eddig taglalt tényezőknek — az oxigénprecipitációnak, a kristályhibáknak — az ismerete akkor kap értelmet, ha a végtermék, az IC szempontjából is értékelhető elektromos mennyiséggel hozzuk összefüggésbe őket. Ennek az elektromos jellemzőnek viszont olyannak kell lennie, hogy eszközstruktúra kialakítása nélkül is mérhető legyen, hiszen az esetleges struktúra kialakításához szükséges technológiai lépések elfednék a vizsgálni kívánt jelenséget, összefüggést. Ilyen jellemző elektromos paraméter a kisebbségi töltéshordozók tömbbeli rekombinációs élettartama, mivel ez sok esetben meghatározó fontosságú, továbbá ennek mérésére ismeretes egy struktúrát nem igénylő módszer, amely a mikrohullámú abszorpció mérésén alapul. Azáltal mérhető tömbbeli rekombinációs élettartamot a tömbbeli rekombinációs centrumok, kristályhibák és azok sűrűsége, határozzák meg. A mért élettartamokat a 3. és 4. ábra ábrázolja a precipitáció mértékének függvényében. Látható, hogy a hőkezeletlen szeletekben ez az élettartam nem mutat korrelációt a precipitációval, továbbá, hogy az ezekben a mintákban mért értékek általában nagyobbak a hőkezeltékben mértéknél. Ez érthető, hiszen a hőkezelés ott hozott létre hibákat, ahol az élettartammérés történt. A hőkezeletlen szeleteknél tapasztalt korrelálatlanság a minták különböző származásával, előéletével magyarázható, hiszen emiatt a beépített, már említett „as-grown” hibák mennyisége és fajtája is különbözik. A hármas hőkezelés első lépése egyfajta homogenizálást jelent, így a különböző származás jelentősége csökken.



3. ábra. A kisebbségi töltéshordozók élettartama a precipitáció mértékének függvényében a hőkezelt szeletek esetén



4. ábra. A kisebbségi töltéshordozók élettartama a precipitáció mértékének függvényében a hőkezeletlen szeletek esetén

Természetesen nem csak az illeszkedési hibák és az oxigénprecipitátumok okozhatnak rekombinációt, hanem az alkalmazott módszerekkel ki nem mutatható mikrohibák is.

Bár a vizsgálatok még nem tekinthetők lezártaknak, az eddigi eredmények azt igazolják, hogy a belső getterezés hatékonysága érdekében magas kiindulási oxigén- és széntartalmú kristályokat érdemes alkalmazni. A vizsgált esetben a nukleációt elősegítő hőkezelési lépés rövidnek bizonyult. A folyamatok elektromos minősítő paramétereként jól lehetett használni a kisebbségi töltéshordozók tömbi rekombinációs élettartamát. Ez az élettartam korrelációt mutat az oxigénprecipitáció mértékével.

#### Köszönetnyilvánítás

A szerző köszönetét fejezi ki dr. Kormány Teréznek hasznos tanácsaiért, valamint dr. Hild Erzsébetnek az infraszpektroszkópiás mérésekben, Pál Editnek a röntgentopográfiás vizsgálatokban, dr. Aszódi Gábornak az élettartammérésben nyújtott segítségével.

#### I R O D A L O M

- [1] *Szelőcsei és tsai.*: Belső getterezés a Si-szelettechnológiában. Híradástechnika, megjelenés alatt.
- [2] Proceedings of the 1st International Autumn School on Gettering and Defect Engineering in the Semiconductor Technology — Garzau, 1985.
- [3] Defects in Semiconductors, ed.: J. Narayan and T. Tan, North-Holland, New York, 1981.
- [4] *Réti Sándor*: Diplomaterv, BMB Vili. Kar, 1984.
- [5] *Mányoki Zoltán*: Diplomaterv, BME Vili. Kar, 1985.
- [6] P. Gaworzewski et al.: Infrared Spectroscopical and TEM Investigations of Oxygen Precipitation in Silicon Crystals with Medium and High Oxygen Concentrations, phys. stat. sol. (a) 85 133 (1984)