

# Ponthibák szerepe és vizsgálata Si egykristályban

VANKÓ PÉTER

BME Elektronikus Eszközök Tanszék



## ÖSSZEFOGLALÁS

A ponthibák vizsgálata központi kérdéssé vált a szilícium szelettechnológiában. A szerző áttekinti a Si legfontosabb szennyezőinek: az oxigénnek, a szénnek, az átmeneti- és nemesfémeknek a szerepét. A vizsgálati módszerek közül kiemeli a DLTS-módszert és ismerteti saját méréseit, melyeket vassal szennyezett n-Si szeleten végzett.

## Ponthibák jelentősége

A szilícium egykristályban lévő ponthibák vizsgálata az elmúlt évtizedben a nagybonyolultságú — LSI, VLSI, ULSI — integrált áramkörök megjelenésével központi fontosságú kérdés lett a félvezető-technológiával foglalkozó kutatók körében. A jelenleg gyártott — nagyobb részben Czochralsky, kisebb részben függőzónás — szilícium egykristály szeletek diszlokációmentesek, radiális ellenállás eloszlásuk és geometriai méreteik jól definiáltak, de tartalmaznak ponthibákat: vakanciákat és önintersticiális atomokat, oxigént, szenet, fémszennyezőket (elsősorban vasat), valamint hibakomplexeket (swirl-hibákat).

Az alapanyagban lévő ponthibák azért jelentenek az áramkör-gyártóknak nagy veszélyt, mert a gyártás nagyszámú technológiai lépése, elsősorban a hőkezelések során folyamat-indukált kristályhibák (termikus donorok, precipitátumok, diszlokációk, illeszkedési hibák) kialakulásához vezetnek, melyek károsan befolyásolják az áramkörök paramétereit, súlyosabb esetben pedig azok katasztrofális tönkremenetelét okozzák. Ezért a nagybonyolultságú IC-technológiáknak mindenképp kell tartalmaznia hibasűrűség csökkentő, folyamat-indukált hibák kialakulását megakadályozó lépéseket (getterezési eljárásokat). A technológia pontos megtervezéséhez, a getterezési folyamatok optimalizálásához a Si-szeletben lévő ponthibák mennyiségének, eloszlásának meghatározása szükséges állapotban és az egyes technológiai lépések után [1].

## A Si legfontosabb szennyezői

### A) Az oxigén és a szén

A félvezető iparban használt Si-szeletek a szokásos adalékkoncentrációkkal hasonló, vagy azt meghaladó mennyiségben tartalmaznak intersticiálisan oldott oxigént. (Czochralsky szeletekben  $10^{17}$  –  $2 \cdot 10^{18}$   $\text{cm}^{-3}$  koncentrációban.) A technológia során jelenlétével, mennyiségével mindenképp

## VANKÓ PÉTER

1984-ben végzett a Budapesti Műszaki Egyetem elektronikai technológia szakán. Diplomamunkája és egyik TDK-dolgozata a Híradástechni-

kai Tudományos Egylet díjában részesült. Jelenleg tudományos ösztöndíjasként a BME Elektronikus Eszközök Tanszéken Si-egykristályban lévő ponthibák vizsgálatával foglalkozik.

számolni kell, ezért nagyobb gyártók a szeletek oxigén (és szón) tartalmát szűk határok közt garantálják.

450 °C-os hőkezelés hatására az eredetileg semleges oxigénből elektromosan aktív termikus donorok keletkeznek, melyek gyengén adalékolt p-Si kristály vezetési típusát is megváltoztathatják.

Magasabb hőmérsékleten az oxigén precipitálódik. A keletkező precipitátumok erős szeletgörbületet, a felület közelében lévők az áramkörök paramétereinek jelentős romlását okozhatják, ugyanakkor, ha megfelelő hőkezelésekkel kialakulásuk a szelet belsejére korlátozódik, hatékony getterező centrumokká válnak (belső getterezés, [2]).

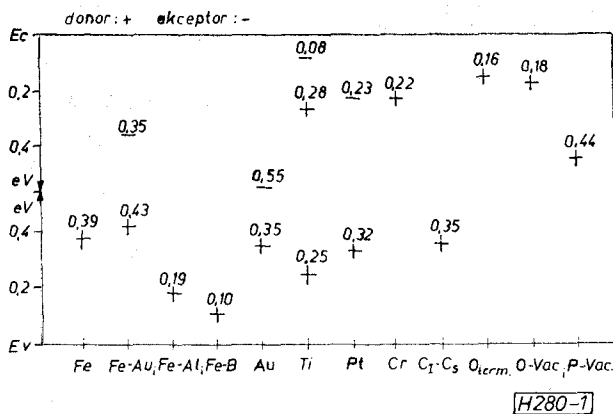
A Si-szeletek szintén nagy ( $5 \cdot 10^{15}$  –  $2 \cdot 10^{17}$   $\text{cm}^{-3}$ ) koncentrációban tartalmaznak szubsztitúciós szenet. A szén szerepéről kevesebbet tudunk, és kimutathatósága is problémásabb, mint az oxigéné. Feltehetően szerepet játszik az 0 precipitátumok kialakulásában. A tapasztalatok szerint  $10^{17}$   $\text{cm}^{-3}$  feletti széntartalom károsan hat az áramkörök kihozatalára.

### B) Fémszennyezők

Mivel a technológiai berendezések jelentős része fémekből, elsősorban acélból készül, a Si-szeletek mindig tartalmaznak átmeneti- és nemesfém szennyezőket, főleg vasat, kisebb mennyiségben aranyat, titánt, molibdént, vanádiumot, kobaltot, rezet, palládiumot, nikkelt. A frissen növesztett egykristályrúdban még nagyon kicsi lehet az átmeneti-fém tartalom, nem kell, hogy meghaladja összesen az  $5 \cdot 10^{12}$   $\text{cm}^{-3}$  koncentrációt. A vágásnál, polírozásnál és a szelettechnológiai folyamatoknál viszont nagy mennyiségű fém jut a szelet felületére, ami, az átmeneti- és nemesfémek nagy diffúziós állandója miatt, az első hőkezeléssel bekerül a kristály belsejébe. Hosszú hőkezelés hatására az eredetileg tiszta szelet vastartalma  $10^{15}$   $\text{cm}^{-3}$  értékig is nőhet.

Gyakorlatilag minden fémszennyező mélynívókat hoz létre a Si tiltott sávjában, és ezzel jelentősen csökkenthetik a kisebbségi töltéshordozók élettartamát. Ráadásul egymással és első

Béérkezett: 1986. VIII. 6. (H)



1. ábra. A legfontosabb szennyezőkhöz tartozó mélynívók a Si tiltott sávjában

sorban a p típusú adalékokkal szobahőmérsékleten is párokat képeznek, ezzel új mélynívókat hoznak létre, és az áramkörök tulajdonságait ellenőrizhetetlenül befolyásolhatják.

Hőkezelések hatására az átmeneti-fémek mind hajlamosak precipitálódásra. A kialakuló precipitátumok az eszközök szivárgási áramát növelik és elősegítik az oxidáció által indukált illeszkedési hibák (OSF) kialakulását.

Az átmeneti- és nemesfémek viselkedésével és kimutatásával jelentőségük miatt nagyszámú publikáció foglalkozik. (Például [3], [4].) A szelettechnológia során lehetőleg el kell kerülni, hogy a Si-ba jussanak, a kristályban már bentlévő fém-szennyezők koncentrációját pedig a szelet aktív felületi tartományában a már említett getterezési eljárásokkal csökkenteni kell.

A szilícium néhány fontosabb szennyezőjéhez tartozó mélynívókat az 1. ábra foglalja össze.

### Ponthibák vizsgálata

Ponthibák vizsgálatára, kimutatására sok módszer ismeretes (szekunder-ion tömegspektroszkópia — SIMS, elektron paramágneses rezonancia-spektroszkópia — ESR, fotolumineszcencia, infravörös abszorpciós spektroszkópia, mély nívók tranzien্স spektroszkópiája — DLTS, röntgen- és elektron-sugaras spektroszkópiák stb.), de egy hibacentrum meghatározása általában csak több kísérleti eljárás együttes alkalmazásával lehetséges [1], [5].

A módszerek közül — kis kimutathatósági határa, roncsolásmentessége, elektromosan aktív hibák detektálása, mélységi szelektivitása miatt — kiemelkedik a DLTS-módszer. (Részletesen: [6].) Az irodalom tanulsága szerint — a III—V. és II—VI. félvezetőkön kívül, ahol a DLTS alapvető fontosságú módszer — a szilícium vizsgálatában is szinte minden területen, más módszerekkel együtt, használják a DLTS-t. A 2. ábrán látható kutatási területek DLTS eredményekre hivatkozó publikációk alapján gyűltek össze.

A vas, mint legnagyobb koncentrációban előforduló, könnyen precipitálódó fém-szennyező, vizsgálata különösen fontos. Az irodalom beszámol az intersticiális vashoz és a vasnak bórral, alumínium-

mal, arannyal, stb. képzett párijaihoz tartozó mélynívók meghatározásáról (Lásd 1. ábra). Sokan vizsgálják a vas-precipitálódás, -párképződés, -getterezés mechanizmusait.

A szerző a vas szennyezés és a technológiai folyamatok kölcsönhatásának megismerésére kezdett kísérletsorozatokat. A technológiai folyamatok közül első lépésként az elterjedten használt termikus vastagoxid növesztés hatását vizsgálta a szeletbe mesterségesen bejuttatott vas szennyezésre.

### Vassal szennyezett n-Si DLTS-vizsgálata

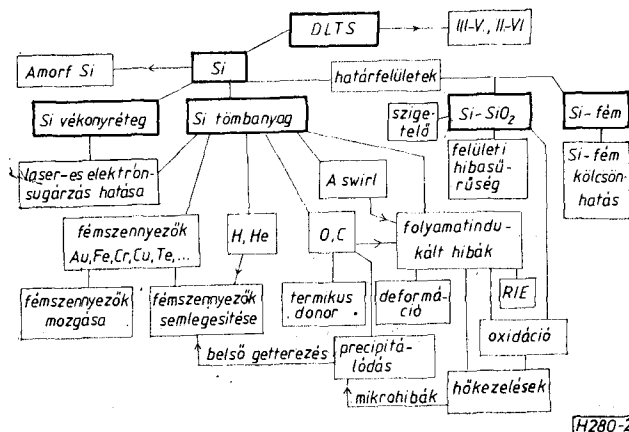
#### A) Mintakészítés

A vas szennyezés vizsgálatára, kimutatására n-típusú, foszforral adalékolt, 1,5  $\Omega$  cm-es, 111 orientációjú CZ-szeleteken készültek minták. A vas szennyezés a szelet hátuljára porlasztott  $\sim 0,1 \mu\text{m}$  vastag rétegből 30 perces 800 °C-os hőkezeléssel ( $\text{N}_2$  atmoszféra) jutott a szelet belsejébe. Összehasonlításként vas nélkül hőkezelt (30 perc, 800 °C,  $\text{N}_2$ ), illetve hőkezeletlen minta készült. Mindhárom eljárásához egyrészt alapállapotban lévő, másrészt a szokásos vastagoxid növesztésnek kitett (70 perc, 1100 °C, száraz ill. nedves  $\text{O}_2$  + oxidmarás) szeletek szolgáltattak kiindulásként (1. táblázat).

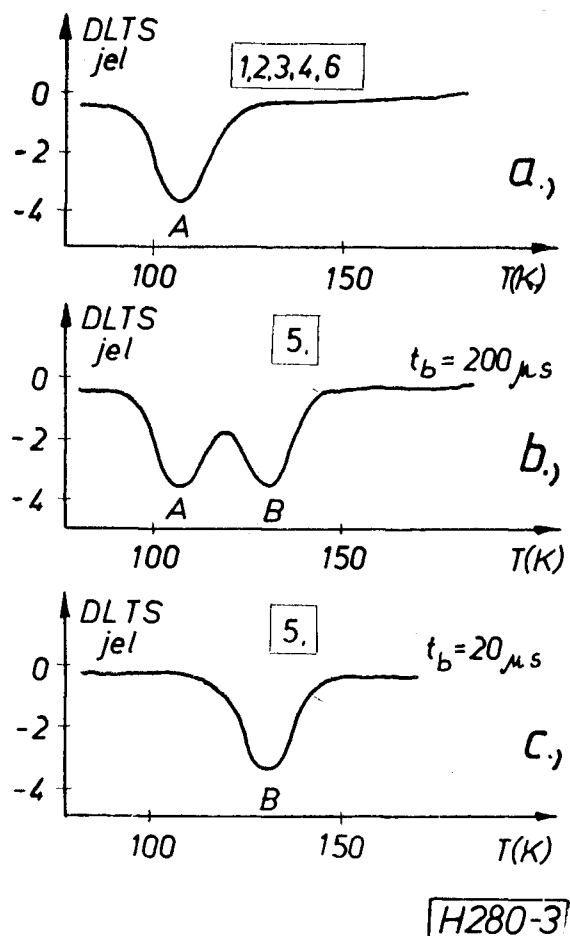
1. táblázat

	Alapállapotú szelet	Vastagoxid + oxidmarás
hőkezelés nélkül	1.	2.
30 perc 800 °C	3.	4.
vasporlasztás + 30 perc 800 °C	5.	6.

A DLTS-méréshez vékumpárologtatással készültek Schottky-diódák. (Alumínium fémezés, 30 perc, 400 °C hőkezelés)



2. ábra. A DLTS-módszer alkalmazása az irodalom alapján



3. ábra DLTS-spektrumok

### B) DLTS-mérés és kiértékelés

A 3. ábrán a minták hőmérséklet-pásztázó üzemmódban felvett DLTS-spektrumai láthatók. A spektrumokon két DLTS-csúcs jelenik meg:

- Az A jelű csúcs az összes mintán azonos intenzitással megjelent. (3. ábra a és b rész)
- A B jelű csúcs viszont kizárólag a vassal szennyezett, alapállapotú szeleten készült 5. mintán jelentkezett. (3. ábra b rész)

Ezen a mintán a betöltő impulzus szélességének csökkentésével a B-csúcs kiértékelését nehezítő A-csúcsot el lehetett tüntetni. (200  $\mu$ s helyett 20  $\mu$ s betöltő impulzus, 3. ábra c rész) A B-csúcsához tartozó centrum  $E_t = E_c - 0,18$  eV energiájú elektron-csapda.

A rendelkezésre álló adatkönyvtár alapján egyik csúcs sem volt azonosítható. A mérések alapján a következőket állapíthatjuk meg:

- Az A-csúcs az összes mintán (közte a hőkezeletlen, alapállapotú szeleten készült 1. mintán is) megjelent, így vagy az alapanyagban lévő, vagy a mintakészítésnél létrejövő hibacentrum lehet.
- A 3. és 5. minta termikus előélete teljesen megegyező (30 perc, 800 °C hőkezelés), közöttük csak az a különbség, hogy az 5. minta vas-

sal szennyezett. A B-csúcs csak az utóbbin jelent meg, így megállapítható, hogy a B-csúcsához tartozó centrum „vassal-kapcsolatos” hiba. Pontosabb meghatározására ez a mérés nem ad lehetőséget.

- Az 5. mintán kívül a 6. is tartalmaz vasat. A 6. minta csak abban különbözik az 5. számútól, hogy a vas bejutása előtt magas hőmérsékletű hőkezelést kapott. A B-csúcs jelenlétének hiányát csak úgy magyarázhatjuk, hogy a hőkezelés hatására létrejövő kristályszerkezet a szeletbe kerülő vas szennyezést inaktiválta, a B-csúcsához tartozó hiba-centrum kialakulását megakadályozta. Egy — kezdetleges — getterező hatásnak lehetünk tanúi.

A centrumok pontosabb meghatározásához a mintákat további módszerekkel (például ESR) is meg kell vizsgálni. A mintakészítés hatásának kiküszöbölésére más mintakészítési eljárásokkal való összehasonlítás ad módot. Érdekes a vastag-oxid-növesztés mellett bonyolultabb, többlépcsős hőkezelések (például belső getterezés) hatását is vizsgálni.

### Összegezés

Áttekintettük a ponthibák — különösen az oxigén, szén, átmeneti- és nemesfém szennyezők — szerepét és jelentőségét a Si-szelettechnológiában. Az irodalom alapján megállapítható, hogy vizsgálatukra kiemelkedő alkalmassága miatt elterjedten használják a DLTS-módszert. Végül egy gyakorlati példát láthattunk ponthibák vizsgálatára és a hibák azonosításának nehézségére.

### Köszönetnyilvánítás

A szerző köszöni Jamrich Klárának a Schottky-diódák készítésében, dr. Ferenczi Györgynek és munkatársainak a DLTS-mérősek megvalósításában nyújtott segítségüket, valamint dr. Kormány Teréz sokrétű tanácsait, biztatását és segítségnyújtását.

### I R O D A L O M

- [1] Proceedings of the 1st International Autumn School on Gettering and Defect Engineering in the Semiconductor Technology — Garzau, 1985
- [2] Szelbcei L.—Réti S.—Kormány T.: Belső getterezés a Si-szelettechnológiában. Híradástechnika, megjelenés alatt.
- [3] K. Graff: Transition Metal Impurities in Silicon 4th „LUND” International Conference on Deep Level Impurities in Semiconductor, Abstracts — Eger, 1983
- [4] K. Gräff—H. Pieper: The Properties of Iron in Silicon J. Electrochem. Soc. vol. 128 no. 3, March 1981, pp. 669—74
- [5] 7th International Summer School on Defects in Crystals and Symposium on Identification of Defects in Semiconductors, Abstracts — Szczyrk, 1985
- [6] Ferenczi Gy.: Félvezető anyagok és struktúrák elektromosan aktív szennyezéseinek vizsgálata. Híradástechnika XXXVI. évf. 10. szám 451—4, 1985. október