

Vékony felületi roncsolt rétegek jellemzése ellipszometrérel

ETO 539.211:669.782:681.785.35

Az egykristályrács sík, vagy térbeli torzulásai általában diszlokációs vonalak és hálók kialakulásával indokolhatók, amelyek a félvezető anyagok fizikai (pl. elektromos, optikai) jellemzőinek megváltozásán kívül kihatnak a technológiai folyamatok reprodukálhatósági és kihozatali mutatóinak alakulására is. A korszerű, nagy bonyolultságú (LSI) áramkörök létrejöttével megnöttek a félvezető anyagokkal szemben támasztott követelmények, s bár napjainkban a felhasznált alapanyag gyakorlatilag diszlokációmentes, a technológiai folyamatok többsége elkerülhetetlenül az egykristály kisebb-nagyobb mérvű deformációjához vezet.

Tekintve, hogy a félvezető eszközök jellemzői — pl. a megbízhatóság, stabilitás — függenek a beépült kristályhibák mennyiségétől és minőségétől, szükség van olyan egyszerű, roncsolásmentes vizsgálati módszerre, amely alkalmas a kristályhibák jellemzésére. Ilyen lehetőséget kínál az optikai úton való minősítés, amely roncsolásmentes, és elektromos kontaktálást vagy különleges kémiai kezelést nem igényel.

A félvezető technológiában elterjedten alkalmazzák az ellipszometriát, amely alkalmas a félvezetők optikai állandóinak meghatározására, továbbá a kristály felületén levő vékony dielektrikum rétegek (pl. oxid) minősítésére. Felmerül a kérdés, hogy a diszlokációk okoznak-e olyan mérvű változásokat a félvezető optikai állandóiban, amelyek ellipszometriás méréssel kimutathatók.

A kísérletsorozat célja a diszlokáció-sűrűség és az ellipszometriás paraméterek közötti kapcsolat keresése volt. A vizsgálat eredménye pozitívnak mondható, mert a mérések összefüggést mutattak a diszlokáció-sűrűség és az ellipszometriás paraméterek között.

Ellipszometria

Az ellipszometér működési elve

Az ellipszometria a vizsgált felületre bocsátott fény visszaverődés után szenvedett polarizációs állapotváltozásának mérésén alapul.

Ha két közeg határára síkban polarizált fény esik, akkor a visszavert és megtört sugárnak nemcsak a terjedési, hanem a rezgési iránya is függ a beesés szögétől. A beesési és törési szög, valamint a beeső, visszavert és megtört sugár fényvektorának komponen-

sei között az összefüggést a Fresnel-egyenletek adják meg [1, 2].

A természetes fény igen sok egymástól független, különböző rezgési iránnyal rendelkező, síkpoláros fény eredője. Ha ilyen fénynyalábot ejtünk egy bizonyos P szög alatt az üveglapra, akkor az csak a beesési síkra merőleges összetevőt veri vissza, így az üveglemezzel természetes fényből síkpolárosat állíthatunk elő. Éppen ezért P -t a polarizáció szögének nevezük, a hozzátartozó beesési síkot pedig polarizációs síknak. A létrejövő síkpoláros fény rezgési síkja tehát nem esik egybe a polarizáció síkjával, hanem arra merőleges.

A polarizáció szögének ismeretében könnyen meghatározható az üveg n törésmutatója. A Snellius—Descartes-törvényből a polarizáció szögére a következőket kapjuk:

$$\frac{\sin P}{\sin(90^\circ - P)} = \operatorname{tg} P = n.$$

Erősen abszorbeáló anyagok, így pl. a félvezetők esetén az általános Fresnel-formulák érvényesek.

Az elliptikusan poláros fény leírasi módjára alkalmas a Poincare-reprezentáció [3]. Abszorbeáló felületről való reflexió esetén a visszavert fényhullám a beesési síkra merőleges és azzal párhuzamos két összetevőre bontható. A visszaverődés Δ fáziskülönbséget okoz ezen két komponens között, és az amplitúdóviszonyaikat $\operatorname{tg} \psi$ faktorial megváltoztatja.

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\varrho^p}{\varrho^s},$$

ahol:

$$\varrho^p = \frac{I_{rp}}{I_{ip}}; \quad \varrho^s = \frac{I_{rs}}{I_{is}}$$

$I_{ip,s}$ a beesés előtti párhuzamos, ill. merőleges amplitúdó.

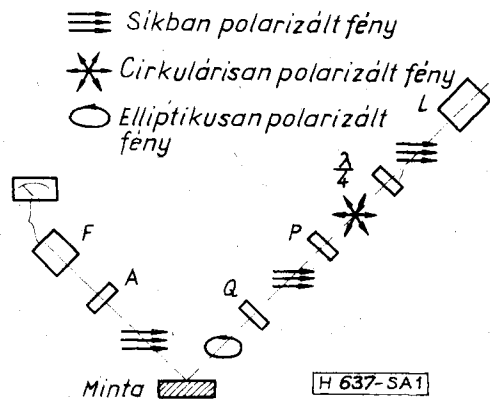
$I_{rp,s}$ a visszaverődés utáni párhuzamos, ill. merőleges amplitúdókat jelenti.

A Δ és ψ paraméterek szögekként értelmezhetők, és az ellipticitás paramétereinek nevezzük őket. A paraméterek egyértelműen függenek a vizsgált visszaverő felület optikai állandóitól, a rajta levő dielektrikum-réteg (ha van ilyen) törésmutatójától és a vastagságától, a fénysugár beesési szögétől és hullámhosszától.

Ha a beeső fény elliptikusan poláros, a visszaverődés során az ellipticitás — a felület tulajdonságaitól függően — megváltozik, sőt meghatározott feltételek mellett a visszavert fény síkban polarizálttá válik. Ez akkor jön létre, ha a minta által okozott ellipticitásváltozás megfelel a beeső fény elliptikusságának. A visszavert fénysugarat polárszűrőn keresztül

Beérkezett: 1978. XII. 12.

Jelen publikáció a HTE 1978. évi szakdolgozat-pályázatán I. helyezést ért el dolgozat rövidített változata. A szakdolgozat a Kandó Kálmán Villamosipari Műszaki Főiskolán készült.



1. ábra. LEM-2 típusú ellipszométer optikai vázlata

vezetve megfelelő beállítással elérhető, hogy a kilépő fény intenzitása gyakorlatilag nulla legyen. A fényerősség fotodetektor segítségével mérhető.

Az ellipszométer leírása és használata

A kísérleteket LEM-2 típusú ellipszométer segítségével végeztük [4]. Az ellipszométer optikai vázlata az 1. ábrán látható. Monokromatikus fényforrásként az L He-Ne optikai kvantumgenerátor (lézer) szolgál. A $\frac{\lambda}{4}$ negyedhullámú lemez a lézer síkpoláros fényét cirkulárisan polarizált fényvé alakítja át. A P polarizátor a negyedhullámú lemezből kilépő fényt megfelelő szögben beállítható síkpoláros fényvé alakítja át. A negyedhullámú lemez azért szükséges, hogy a lézer (polarizátorral együtt) forgatása kiküszöbölhető legyen. Az így előállított síkpoláros fény áthalad a Q kompenzátoron, ami elliptikusan polarizálttá teszi. A létrejött elliptikusan polarizált fény megfelelő lencserendszeren áthaladva és a vizsgált felületről visszaverődve, egy másik lencserendszeren át az A analizátorba jut. Az analizátor lényegében polárszűrő, innen a fény az F fotodetektorra jut. A fotodetektor felerősített kimenő jelét az I indikátoron figyelhetjük meg.

A mérés során a polarizátort és az analizátort felváltva forgatva elérhető olyan helyzet, amelynél az analizátorból kilépő fény intenzitása minimális lesz. Ebben az esetben a fény polarizátor, ill. kompenzátor által létrehozott ellipticitása megfelel a vizsgált felület által okozott ellipticitásnak, s az arról visszaverődött fény síkban polarizálttá válik.

A visszavert síkpoláros fényt a fény síkjában álló analizátor kioltja. Kioltási helyzetben az analizátor és polarizátor elfordulási szöge kapcsolatban áll a Δ és ψ paraméterekkel.

A felületet borító dielektrikum-réteg vastagságát d és törésmutatóját n általában grafikon segítségével határozzák meg. A grafikonok az ellipszometria egyenleteinek numerikus megoldásait tartalmazzák, amelyek a $\psi = f_1(d, n)$ és $\Delta = f_2(d, n)$ implicit függvények formájában adottak. A számításokban fix paraméterként szerepel a felhasznált monokromatikus fény hullámhossza (He-Ne lézer esetén $\lambda = 6328 \text{ \AA}$), a fényhullám φ beesési szöge és a hordozó (félvezető) komplex törésmutatója ($N = n - ik$) [5].

Roncsolt rétegek fizikai és optikai tulajdonságai

Kristályhibák

A kristályos anyagokat alkotó atomok rendezett formában, kristályrácsban helyezkednek el. A rács szerkezetében fellépő rendellenességeket kristályhibának nevezzük. Ezek a hibák a szilárd testek számos fizikai tulajdonságát megváltoztatják. Különösen lényeges ez a félvezető kristályok esetében, amelyek fizikai és elsősorban elektromos tulajdonságai rendkívül érzékenyen függenek az anyagban levő, igen kis mennyiségű szennyező vagy adalék atomoktól, valamint az ideális kristályrácsból való eltérésektől. A kristályhibákat a következőképpen csoportosíthatjuk:

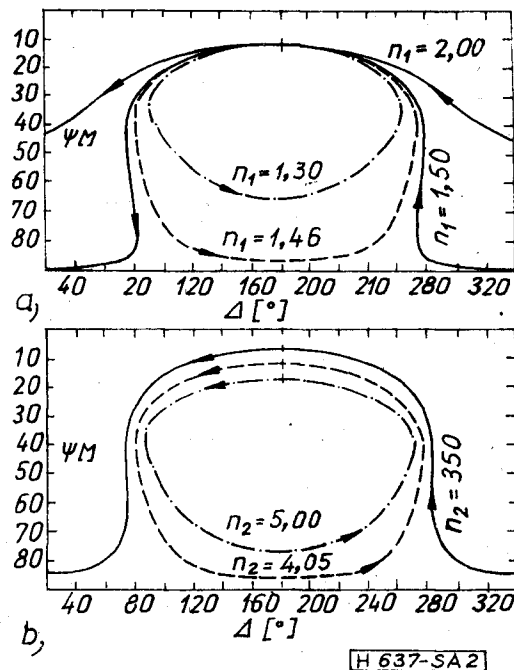
- elemi ponthibák, azaz vakanciák, szubsztitúciós (rácspontban épült idegen atom) és intersticiális (a rácspontok közé épült idegen atom) hibák;
- lineáris (vonal-) hibák, például diszlokációk;
- felületi hibák, azaz kis szögű szemcsehatárok, ikerhatárok, rétegződési hibák;
- különböző összetett hibák, mint pl. divakanciák, vakancia-intersticiális párok stb.

Roncsolt felületek optikai jellemzői

Fénytani szempontból a félvezető anyag optikai állandóit a komplex törésmutató tartalmazza:

$$N = n - ik,$$

ahol n a törésmutató és k az extinkciós (gyengítési) tényező. Az optikai állandók a vizsgált anyag szerkezetétől függenek. A diszlokációk hatása az optikai abszorbecióban mutatkozik meg. A kristály fényelnyelését a gyengítési tényező és a törésmutató há-



2. ábra. Δ és ψ értéke a rétegvastagság függvényében. a) az oxidréteg törésmutatójával paraméterezve, $n_2 = 4,050 - i0,028$; $\varphi = 70^\circ$. b) a Si törésmutatójával paraméterezve $k_2 = 0,028$; $n_1 = 1,460$; $\varphi_1 = 70^\circ$

nyadosa, a $K = \frac{k}{n}$ abszorpció tényező határozza meg [1]. Az anyag szerkezeti megváltozása (kristályhibák, deformációk) maga után vonja az optikai állandók, és ezáltal az ellipszometriás paraméterek: Δ és ψ megváltozását is.

K. Vedam [8] megvizsgálta Δ és ψ függését Si—SiO₂ rendszerben az oxid n_1 és a szilícium $N = n_2 - ik_2$ törésmutatójától. Ezeket az eredményeket mutatja a 2. ábra, ahol Δ és ψ elméleti értékei szerepelnek a rétegvastagság függvényében különböző n_2 (Si) esetén, ahol az oxid n_1 törésmutatója és a Si k_2 extinkciós tényezője állandó. A jelzések a görbéken $\Delta \cong 180^\circ$ -nál vannak, ahol a felület oxidmentes, a nyílak az oxidvastagság növekedésének irányát mutatják. A görbékől látható, hogy az oxidvastagság növekedésével a Δ csökken, míg ψ lényegében állandó marad kb. 50 Å-ig. Ez azért lényeges, mert szabad levegőn kb. 15...20 Å vastagságú oxid keletkezik, tehát védőatmoszféra nélkül, egyszerű körülmények között is mérhető a hordozó optikai állandói [9].

Igen lényeges tehát, hogy az említett oxidrétegtartományban ψ nem függ n_1 -től (2a ábra), ellenben függ n_2 nagyságától (2b ábra). Ennélfogva ψ megváltozása csakis a szilíciumkristály törésmutatójának megváltozásából eredhet.

Kísérletek és eredmények

A szeletek előkészítése

A kísérletek elvégzéséhez különböző diszlokációs-sűrűségű szilíciumszeletekre volt szükség. A diszlokált tartományok előállítása nagy koncentrációjú ($3 \cdot 10^{20}$ atom/cm³) bórdiffúzió segítségével történt [10].

15 db 1,5''-os* n-típusú 2...6 Ωcm-es Si-szelettel indult a kísérlet. Számozás és előkészítés után a szeletekre 7700 Å vastagságú oxidot növesztettünk. Félbeexponálás és az oxidnak a szelet egyik feléről történő eltávolítása után rendre 500 Å, 1000 Å, 1500 Å stb. rétegvastagságú oxidot növesztettünk. A különböző vastagságú oxid miatt a bőrleválasztás során bekerült bőr mennyisége — és így a diszlokációs-sűrűség — más és más lett. A behajtás és oxidmaratás után került sor az ellipszometriás vizsgálatokra.

Az ellipszometriás mérés leírása

A mérések során a fény beesési szöge: $\varphi = 70^\circ$ és hullámhossza: $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ (He—Ne lézer) állandó volt. Mértük a kioltásnak megfelelő analízátor és polarizátor szögelfordulásokat és az elméleti összefüggések alapján ezekből meghatároztuk Δ és ψ értékeit. A mérések során bebizonyosodott, hogy Δ a mérési hibahatáron belül nem változott. Ellenben ψ értéke 9° -tól (legroncsoltabb felület) $10^\circ 30'$ -ig (diszlokációmentes felület) változott. Referenciafelületnek a 7700 Å vastag oxidréteggel borított területet használtuk. Az eredményeket a 3. ábra szemlélteti.

A diszlokációs-sűrűség meghatározása

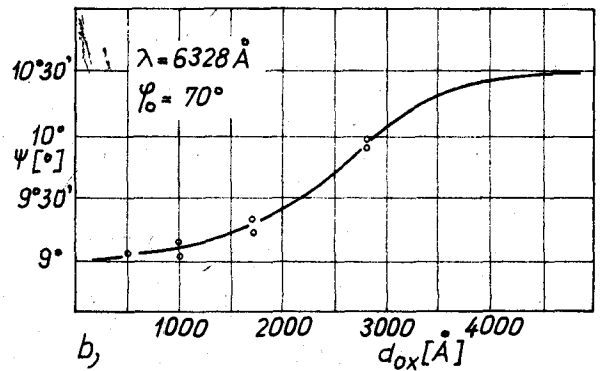
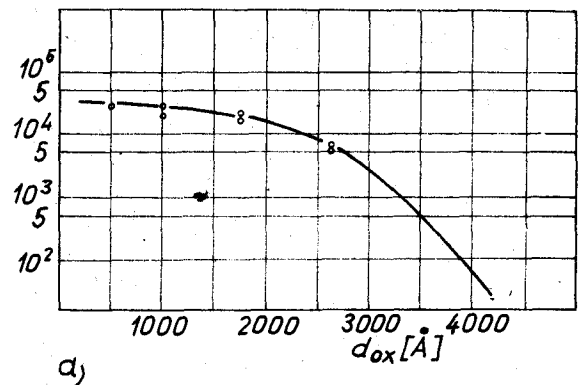
Az ellipszométerrel leírt szeleteket diszlokációra előhívtuk (Sirtl maró, 5 perc), és mikroszkópon keresztül lefényképeztük. A legjellegzetesebb hat szelet fényképét a 4. ábra mutatja be. A mikroszkóp nagyítása ismeretében ($\times 250$) a készült fényképek alapján a diszlokációs-sűrűség meghatározható volt.

Az eredmények értékelése

Vizsgálataink végső eredményét: az egyes szeletekhez tartozó diszlokációs-sűrűség függvényében mért ψ ellipszometriás paraméterértékeket az 5. ábra tartalmazza. A vizsgálatok egyértelműen bizonyítják, hogy a diszlokációs-sűrűség és a ψ paraméter között szoros összefüggés van. 0-tól $35\,000 \text{ mm}^{-2}$ -ig változó diszlokációs-sűrűség esetén ψ értéke $10^\circ 30'$ és 9° között változott.

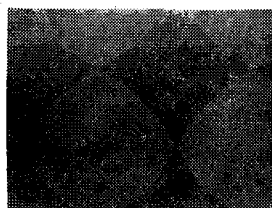
A szakirodalom áttekintése alapján az látható, hogy igen kevés szerző foglalkozott a diszlokációk ellipszometriás vizsgálatával, és a közölt publikációk sem adnak egyértelmű összefüggést. Figyelemre méltó azonban K. Vedam közleménye [8], aki különböző polírozási eljárással (mechanikai, kémiai) előkészített Si-szeleteket vizsgált.

A mérések értékelve elmondhatjuk, hogy az ellipszometriás mérés alkalmas a Si-szeletek diszlokációs-sűrűségének jellemzésére. Az ellipszométerrel való mérés gyorsasága és egyszerűsége, valamint az a körülmény, hogy a vizsgálat roncsolásmentes, a módszert ipari alkalmazásra lehetővé teszi.

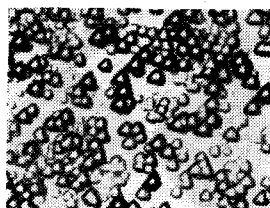


3. ábra. a) a diszlokációs-sűrűség az oxidvastagság függvényében, b) a ψ ellipszometriás paraméter az oxidvastagság függvényében

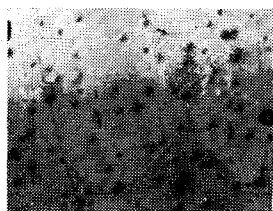
* P'' (coll) = 25,4 mm



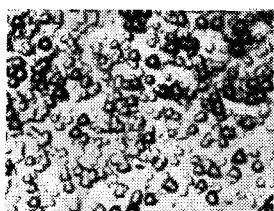
a, Tiszta felület
 $\psi = 10^\circ 30'$



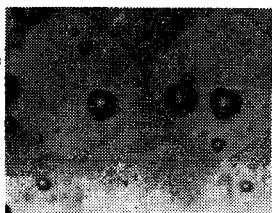
d, $N_D = 6400 \text{ mm}^{-2}$
 $\psi = 9^\circ 52'$



b, $N_D = 100 \text{ mm}^{-2}$
 $\psi = 10^\circ 28'$



e, $N_D = 17000 \text{ mm}^{-2}$
 $\psi = 9^\circ 27'$



c, $N_D = 700 \text{ mm}^{-2}$
 $\psi = 10^\circ 20'$

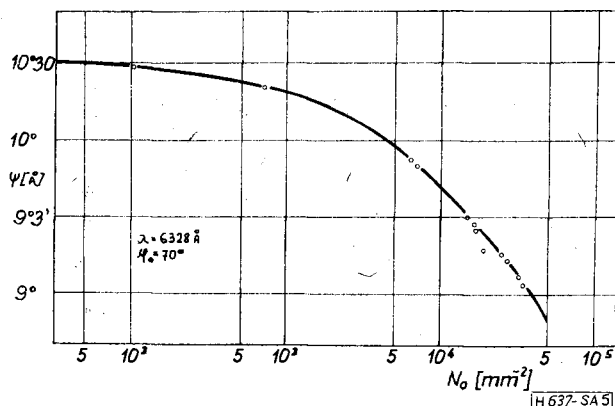


f, $N_D = 34000 \text{ mm}^{-2}$
 $\psi = 9^\circ 4'$

H 637-SA4

4. ábra. A diszlokációsűrűség (N_D) meghatározásához készült fényképek. A nagyítás 250-szeres. a) Tiszta felület, $\psi = 10^\circ 30'$; b) $N_D = 100 \text{ mm}^{-2}$ $\psi = 10^\circ 28'$; c) $N_D = 700 \text{ mm}^{-2}$, $\psi = 10^\circ 20'$; d) $N_D = 6400 \text{ mm}^{-2}$ $\psi = 9^\circ 52'$; e) $N_D = 17000 \text{ mm}^{-2}$ $\psi = 9^\circ 27'$; f) $N_D = 34000 \text{ mm}^{-2}$ $\psi = 9^\circ 4'$.

Szerző köszönetét fejezi ki Szentiday Klára főiskolai adjunktusnak és Kiss Tibornak, a Híradástechnikai Ipari Kutató Intézet tudományos munkatársának munkája során nyújtott értékes segítségükért.



5. ábra. Az ellipszometriás ψ paraméter változása a diszlokációsűrűség (N_D) függvényében

IRODALOM

- [1] T. S. Moss: Optical properties of semiconductor. Butterworths Scientific Publications. London, 1959.
- [2] M. Born, E. Wolf: Principles of optics Pergamon Press. London, 1965.
- [3] Ellipsometry in the Measurement of Surfaces and Thin Films. Symposium Proceedings Washington 1963.
- [4] Mikroszkop lázernűj ellipszometriceszki LEM—2. Tehnyiceszkoje opiszanyije i insztrukcija po ekszpluatacaji. (Az ellipszométer gépkönyve)
- [5] Ellipsometry. Proceedings of the Third International Conference on Ellipsometry. Univ. of Nebraska, Lincoln, Nebraska 23—25 Sept. 1975. Ed. N. M. Baschra and R. M. A. Azzam = Surface Science, 56. (1976)
- [6] Pődör Bálint: Diszlokációk és elektromos tulajdonságaik félvezetőkben. A szilárdtestkutatás újabb eredményei. Akadémiai Kiadó, Bp. 1965.
- [7] Kovács I., Zsoldos L.: Diszlokációk és képlékeny alakváltozások. Műszaki Könyvkiadó, Bp. 1976.
- [8] K. Vedam: Characterization of Defects in Real Surfaces by Ellipsometry. Surface Science 56, 221, 1976.
- [9] Mc. Craefin, R. L. Calson: Fortran program for analysis of ellipsometer measurements and calculations of reflection coefficient from thin films. NBS Technical Note 242. U. S. Govt. Print. Off., Washington, 1964.
- [10] Fogt Ákos: Hidrogéninjekciós bőrforrásréteg leválasztásának vizsgálata. (Főiskolai szakdolgozat) F—5/1977.

Lapunk példányonként megvásárolható:

az V., Váci utca 10.

az V., Bajcsy-Zsilinszky út 76. szám alatti

hírlapboltokban