

A diszlokációk hatása a germánium és szilícium elektromos tulajdonságaira

ETO 537.311.33:546.28:548.4

A félvezető egykristályok elektromos és fizikai tulajdonságait jelentős mértékben befolyásolják a szennyezőatomok és a különböző kristályhibák. A kristályhibák (vakanciák, intersticiális atomok, diszlokációk, rétegeződési hibák, ikerhatárok, kisszögű szemcsehatárok) a szennyezőkhöz hasonlóan energiaszinteket hoznak létre a félvezetők tiltott sávjában, rekombinációs centrumként vagy töltéshordozó csapdaként viselkednek, befolyásolják a töltéshordozók koncentrációját és mozgékonyosságát stb. A kristályhibák közül fontos szerepet játszanak a diszlokációk, mivel a félvezető eszközök gyártásának alapjául szolgáló félvezető egykristályok több-kevesebb diszlokációt tartalmaznak, s a nagytisztaságú, közel intrinsic kristályok esetében a diszlokációkkal kapcsolatos elektromosan aktív centrumok térfogati sűrűsége összemérhető a kristályban található elektromosan aktív szennyezőatomok sűrűségével.

A jelen cikkben elsősorban saját kísérleti eredményeinkre támaszkodva, részben pedig az irodalmi adatok alapján ismertetjük és elemezzük a diszlokációknak a félvezető egykristályok elektromos tulajdonságaira való hatását. Gyakorlati fontosságukra való tekintettel kizárólag a germániummal és szilíciummal foglalkozunk.

A témát részletesen tárgyalják az [1–3] monográfiák, az utóbbi az 1967–68-ig publikált irodalmi adatok alapján. Az idézett munkák részletesen foglalkoznak a diszlokációk szerkezetével és a gyémántrácsú félvezető kristályok plasztikus deformációjával is. Egy későbbi dolgozatban pedig a diszlokációknak a $p-n$ átmenetre valamint a kész félvezető eszközök tulajdonságaira kifejtett hatásával foglalkozunk majd.

1. A diszlokációk modellje félvezető egykristályokban

A diszlokációknak a félvezetőkben megfigyelt hatásmechanizmusa a diszlokációban levő töltéssel és a töltések által létrehozott potenciálgáttal kapcsolatos. E modell alapjait W. T. Read dolgozta ki [4], (ld. még [1]).

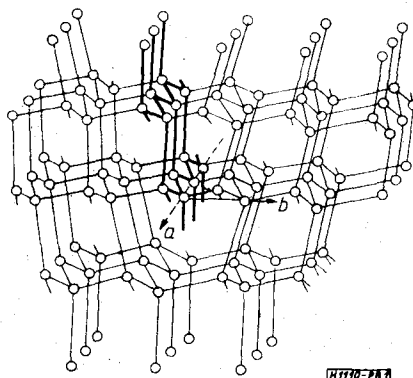
A gyémántrácsban a leggyakoribb diszlokációtípus az ún. 60° -os diszlokáció, ennek szerkezetét mutatja be az 1. ábra. A gyémántrácsú kristályokban normális körülmények között minden atom négy másikhoz kapcsolódik, irányított, kovalens kötések segítségével. A diszlokáció vonala mentén az 1. ábrán látható módon a kötések egyrésze eltorzul, illetve fel is szakad. A diszlokáció vonala mentén helyet foglaló

atomok körül keringő négy vegyértékelektron közül három párral rendelkezik és kötést alkot, a negyedik páratlan marad. A felszakadt kötések sűrűsége annál nagyobb, minél közelebb van a diszlokáció orientációja az éldiszlokációéhoz.

A felszakadt kötések elektronokat foghatnak be a vezetési sávból, így kialakulhatnak a diszlokáció vonala mentén elhelyezkedő atomok körül az energetikailag kedvező zárt elektronhíjak. Ha a diszlokációba befogott elektronok energiaszintje egy eredetileg n -típusú félvezetőben a Fermi energiaszint alatt van, akkor a diszlokáció vonala mentén levő atomok akceptorcentrumként viselkednek, elektronokat fognak be a vezetési sávból.

Bizonyos esetekben előfordulhat, hogy a felszakadt kötésben levő páratlan elektron, mely lazábban kötődik az atomtörzshöz, mint a többi vegyérték elektron, felszabadulhat. Ekkor a diszlokációk donor típusú centrumokat hoznak létre, melyek hatása p -típusú félvezetőkristályokban megfigyelhető.

A diszlokációs akceptorcentrumok abban különböznek a kémiai szennyezők, vagy más kristályhibák által létrehozott akceptorcentrumoktól, hogy a diszlokáció vonala mentén sűrűn helyezkednek el, jóval kisebb távolságra egymástól (kb. 4×10^{-8} cm), mint a diszlokációk egymástól mért távolsága, mely (kb. $10^{-2} - 10^{-3}$ cm). Ekkora a diszlokációs centrumokba befogott elektronok kölcsönhatásba kerülnek egymással, mely kölcsönhatás energiája erősen befolyásolja a diszlokációkkal kapcsolatos centrumok betöltődését. Ahogy az akceptorcentrumok elektronokat fognak be, a diszlokáció vonala negatív töltésre tesz szert, melyet leárnnyékolandó, körülötte ellentétes előjelű pozitív tértöltésfelhő alakul ki. A diszlokációk betöltöttsége, a diszlokációs energiaszint értékétől, a diszlokáción befogott elektronok kölcsönhatási energiájától, a szennyezőkoncentrációtól, valamint a hőmérséklettől függ.

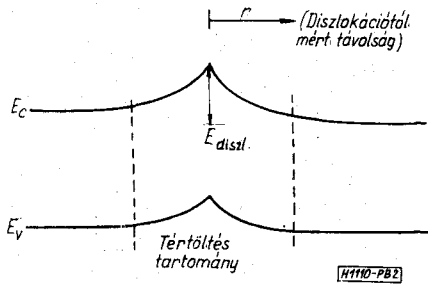


1. ábra. $\langle 110 \rangle$ tengelyű, 60° -os diszlokáció a gyémántrácsban

A töltött diszlokáció körüli potenciál változását a 2. ábra szemlélteti. A diszlokáción levő töltés és az árnyékoló töltések sűrűségének figyelembevételével a potenciál a Poisson-egyenlet megoldásából meghatározható. Ha a szabad töltéshordozók árnyékoló hatását vesszük figyelembe, mely feltevés Ge és Si esetében nem túl alacsony hőmérsékleteken érvényes, a potenciálra a következő összefüggés adódik:

$$U(r) = -\frac{ef}{2\pi\epsilon a} K_0\left(\frac{r}{\lambda_D}\right) \quad \lambda_D = \frac{\epsilon kT}{e^2 n},$$

ahol $K_0(x)$ a másodfajú módosított Bessel-függvény, λ_D a Debye-féle árnyékolási sugár, f a diszlokációs állapotok betöltési tényezője, a a diszlokációs állapotok (felhasadt kötések) egymástól mért távolsága, r a diszlokációtól mért távolság. A fenti képlet a diszlokáció körüli pár rácsállandó sugarú tartományon kívül érvényes.



2. ábra. A diszlokáció körüli potenciálgát n-típusú anyagban

A diszlokáción levő felhasadt kötésekkel kapcsolatos elektronállapotok létét megkísérelték közvetlenül, elektron spin rezonanciás módszerrel kimutatni. H. Alexander és munkatársai [5] (ld. még [3]), nagy diszlokációsűrűségű szilíciumban ESR jelet figyeltek meg, melynek intenzitása arányos volt a diszlokációsűrűséggel.

Ha az ESR jel ténylegesen a szabad kötések egymástól független elektronjaitól származna, intenzitása változna a felhasadt kötések sűrűségének függvényében. Ha ezek közt túl kicsi a távolság, a szomszédos elektronok hullámfüggvényei annyira átlapolódnának, hogy egydimenziós diszlokációs energiasáv alakulna ki a diszkrét energiaszintek helyett. A diszlokációs sávban levő kvázi-szabad elektronok szintén szolgáltatnának ESR jelet. Az ESR mérésekből még nem lehetett eldönteni, melyik modell a megfelelő [3], de ugyanez vonatkozik a később ismertetendő más típusú mérésekre is.

A diszlokáción elhelyezkedő vonaltöltés és az árnyékoló töltés potenciálján végbemenő töltéshordozószóródás nagy diszlokációsűrűség esetén csökkenti a töltéshordozók mozgékonyágát. Ezen túlmenően a diszlokációs centrumok és a potenciálgát erős hatást gyakorolnak a töltéshordozók rekombinációs mechanizmusára, a kisebbségi töltéshordozók élettartamára, mint rekombinációs és csapda centrumok.

2. A diszlokációk elektromos hatásainak kísérleti vizsgálata

A félvezetők legfontosabb paraméterei a fajlagos ellenállás, töltéshordozó-koncentráció és mozgékony-

ság, valamint a kisebbségi töltéshordozók élettartama. Ezen paramétereknek a diszlokációsűrűségtől való függését számos szerző vizsgálta. A legtöbb és legeredményesebb vizsgálatot n-típusú germániumon végezték, a p-típusú germániumban ez ideig részben jóval kevesebb kísérletet végeztek, s az eredmények még nem egyértelműek, a szilíciumon való vizsgálatok pedig egészen újkeletűek. Azért, hogy a diszlokációk hatása jobban elválasztható legyen a szennyezők és egyéb kristályhibák hatásától, a vizsgálatokat mesterségesen megnövelt diszlokációsűrűségű (10^4 – 10^7 cm⁻²) kristályokban végezték. Ezen magas diszlokációsűrűségek részben plasztikus deformációval, legtöbbször magas hőmérsékleten végzett hajlítással (10^6 – 10^7 cm⁻²) vagy kompresszióval (10^7 – 10^8 cm⁻²), részben nagy diszlokációsűrűségű magkristályra való kristálynövesztéssel (10^5 – 10^6 cm⁻²), részben pedig a kristályhúzás termikus körülményeinek megfelelő befolyásolásával (10^4 – 10^6 cm⁻²) állíthatók elő.

A zónás olvasztással vagy az olvadékokból való kristályhúzással készült germánium és szilícium egykristályokban a diszlokációk száma és eloszlása a kristálynövesztés körülményeitől függ. A növesztett kristály rácsának tökéletességét nemcsak a magkristály, a növesztési sebesség, a készülék mechanikus stabilitása stb. határozza meg, hanem döntő szerepük van a növesztés és a lehűtés közben kialakuló hőmérsékleti gradienseknek. Ismeretes, hogy a kezdeti diszlokációforrásokból kiinduló diszlokációsokszorozódást azon termikus feszültségek okozzák, melyek a kristálynövesztés során a plaszticitás hőmérsékleti tartományában, elsősorban az olvadáspont környékén keletkeznek, a lehűtés folyamán [2]. Különböző mechanikai vizsgálatok eredményeképpen megállapítható volt, hogy a szobahőmérséklet környékén rideg anyagként viselkedő gyémántrácsú félvezető egykristályok magasabb hőmérsékleten képlékennyé válnak. A plasztikus viselkedés általában $T_{pi} \gtrsim 0,6 T_{olv}$ hőmérséklet felett jelentkezik, ahol T_{olv} az olvadáspont hőmérséklete K°-ban kifejezve [1].

A különböző technikával növesztett germánium és szilícium egykristályokban a leggyakrabban az <110> tengelyű 60°-os diszlokáció és az <112> tengelyű éldiszlokáció fordul elő [6].

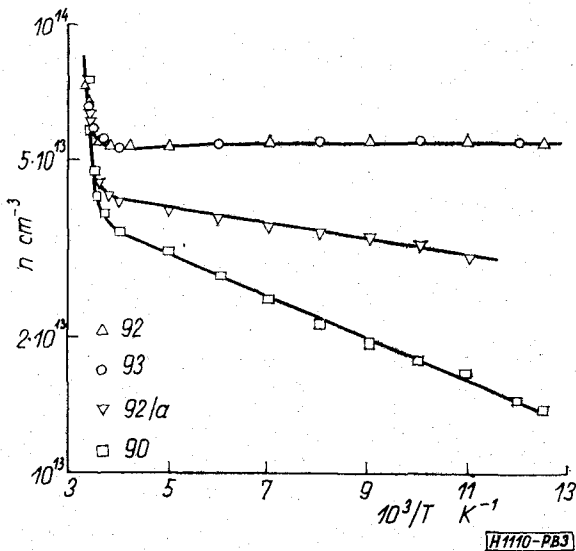
Azonban diszlokációk nemcsak a kristálynövesztés során keletkezhetnek, hanem a félvezető eszközgyártás során alkalmazott magas hőmérsékleten végbemenő technológiai folyamatok során is, ha nem járnak el elég körültekintően [7].

A magas hőmérsékleteken végrehajtott hajlítás során végbemenő plasztikus deformáció hatására, ha megfelelően választjuk meg a minták orientációját, valamint a deformációt kísérő hőkezelést, párhuzamos éldiszlokációk rendszere állítható elő, melyek sűrűsége a hajlítási sugárból vagy a marási gödrök leszámításából megállapítható. Éppen ezért a hajlított mintákon végrehajtott mérések alapvető információkat nyújtottak a diszlokációknak a félvezető egykristályok elektromos paramétereire való hatásáról.

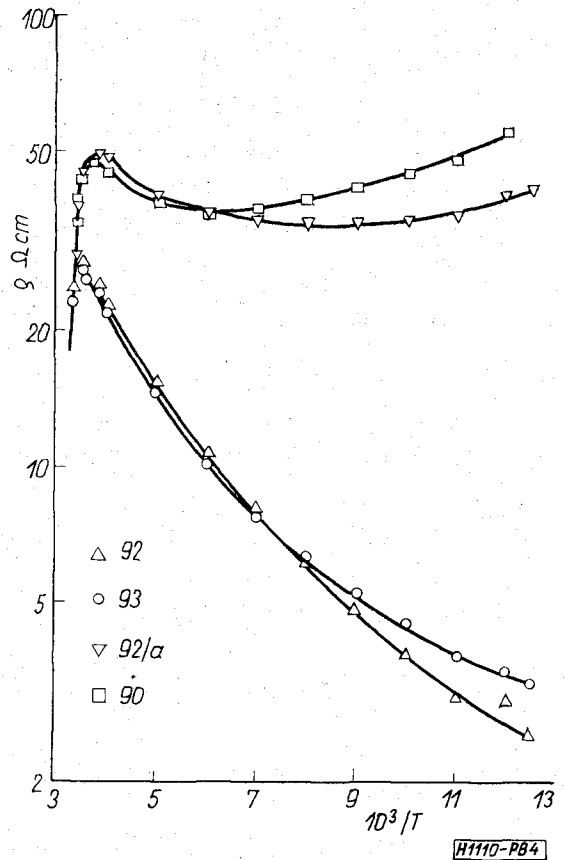
3. Hall-effektus és vezetőképesség mérések plasztikusan deformált félvezető kristályokon

A fajlagos ellenállás, a töltéshordozó koncentráció és a mozgékonyág diszlokációk okozta változásaira vonatkozó kísérleti adatok ismertetésénél elsősorban saját mérési eredményeinkre támaszkodunk. Ezen méréseket nagyrészt n-típusú germániumon végeztük [8–12], de végeztünk méréseket p-típusú germániumon is [13, 14].

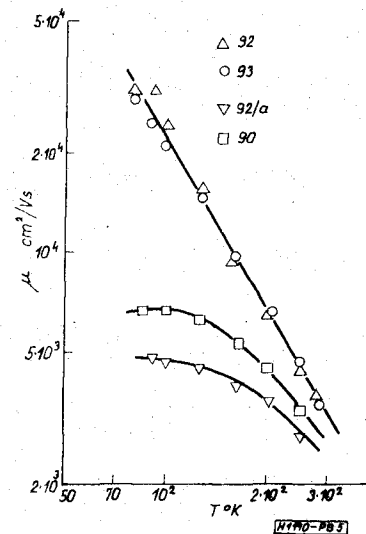
n-típusú germánium esetén megvizsgáltuk, hogy a diszlokációk nagy sűrűség esetén hogyan befolyásolják a nagy tisztaságú kristályokban a fajlagos ellenállást, a töltéshordozó-koncentrációt és az elektronmozgékonyágot. 25–30 ohm cm fajlagos ellenállású antimonnal szennyezett germánium egykristály szeletekben a <112>, ill. <110> tengely körül 730 C° hőmérsékleten végzett plasztikus hajlítással 10^6 – 10^7 cm⁻² sűrűségű éldiszlokáció-rendszert állítottunk elő. A deformációt kísérő hőkezelés ún. termikus akceptorokat hozhat létre. Ezt a zavaró jelenséget kiküszöbölendő, a mintákat deformáció előtt önbevonattal láttuk el. A deformációt és a hőkezeléseket tiszta hidrogén atmoszférában végeztük. A kiindulási, a hőkezelt és különbözőképpen deformált mintákon fajlagos ellenállás és Halli-effektus méréseket végeztünk a 77–300 K° hőmérsékleti tartományban. Az elektron koncentráció, a fajlagos ellenállás és az elektron-mozgékonyág hőmérsékletfüggésére nyert tipikus görbéket a 3., 4., és 5. ábrákon mutatjuk be. Az ábrákon látható, hogy a deformációval együttjáró hőkezelés nem okozott lényeges változást ezen paraméterek nagyságában és hőmérsékletfüggésében, vagyis az önbevonatok megakadályozták a minták szennyeződését a magas hőmérsékleti kezelés során. A deformált mintákban az elektronkoncentráció csökkent a kiindulási mintákon mért értékekhez képest, mégpedig annál nagyobb mértékben, minél nagyobb volt a hajlítással előállított diszlokációk sűrűsége. A deformált mintákon ezen túlmenően az elektronkoncentráció



3. ábra. Elektronkoncentráció hőmérsékletfüggése plasztikusan deformált n-típusú germániumban, 93 — hőkezelés előtt, 92 — hőkezelés után, 92a és 90 — plasztikus deformáció után, $N_D = 5 \times 10^6$ – 10^7 cm⁻²



4. ábra. Fajlagos ellenállás hőmérsékletfüggése plasztikusan deformált n-típusú germániumban. 93 — hőkezelés előtt, 92 — hőkezelés után, 92a és 90 — plasztikus deformáció után, $N_D = 5 \times 10^6$ – 10^7 cm⁻²



5. ábra. Elektron mozgékonyág hőmérsékletfüggése plasztikusan deformált n-típusú germániumban. 93 — hőkezelés előtt, 92 — hőkezelés után, 92a és 90 — plasztikus deformáció után, $N_D = 5 \times 10^6$ – 10^7 cm⁻²

változik a hőmérséklettel 300 K° és 77 K° között. Az elektronkoncentráció változásai a hőmérséklettel és a diszlokációsűrűséggel, azzal a feltevéssel értelmezhetők, hogy a plasztikus deformáció során akceptorcentrumok keletkeztek a kristályban, melyek koncentrációja a diszlokációsűrűség növelésével nő. Ezen akceptorcentrumok elektronokat fognak

be, így csökkentik a vezetési sávban levő elektronok számát. A diszlokációs akceptorok betöltési valószínűsége erősen függ a hőmérséklettől. A 3. ábrán látható töltéshordozó-koncentráció görbékből meghatároztuk a diszlokációs akceptorszint energiáját [9, 10]. W. T. Read megmutatta [4], hogy a diszlokációs állapotok betöltési statisztikája a Fermi–Dirac elosztási függvénnyel írható le közelítőleg, ha a diszlokációs akceptorszint energiája mellett az elektrosztatikus kölcsönhatási energiát figyelembe vesszük, azaz $E_{\text{diszl.}} = E_0 + E_e(f, n, N_D)$, ahol E_0 a zérus betöltöttséghez tartozó alapenergiaszint, E_e az elektrosztatikus kölcsönhatási energia, mely az f betöltési hányad, n szabad elektronkoncentráció és N_D donorkoncentráció függvénye. Az elektromos semlegeség egyenletéből adódik, hogy

$$n + \frac{N_{\text{diszl.}} - N_D}{a} = \frac{N_c}{2} \exp \frac{E_a}{kT}$$

és

$$f = \frac{(N_D - n)a}{N_{\text{diszl.}}}$$

ahol $N_{\text{diszl.}}/a$ a diszlokációs állapotok (akceptorcentrumok) sűrűsége, N_c a vezetési sávbeli állapotsűrűség. A görbületi sugárból meghatározott $N_{\text{diszl.}}$ ismeretében a 3. ábrán látható $n(T)$ görbék analizéséből meghatároztuk $E_{\text{diszl.}} = E_0 + E_e(f)$ -t az f betöltési tényező függvényében. Zérus betöltésre extrapolálva kiadódott E_0 , a diszlokációs akceptorszint energiája, melyre 0,33 eV-os értéket nyertünk, a vezetési sáv aljától számítva [9, 10]. Tehát a diszlokációs akceptorszint kb. a germánium tiltott sávjának közepén helyezkedik el. A diszlokációs energiaszintek különböző szerzők által germániumban és szilíciumban mért értékeit egyébként az 1. táblázat foglalja össze.

A régebbi irodalomban (ld. pl. [1, 2, 4, 20]) különböző szerzők egymással erősen ellentmondó értéket közöltek a diszlokációs akceptorszint energiájára vonatkozóan, germániumban. A legutóbbi években végzett vizsgálatok [15, 17] azonban megerősítették korábbi munkánkban a diszlokációs akceptorszintre vonatkozó eredményünket.

A 4. ábrán látható, hogy az elektronkoncentráció csökkenése mellett a diszlokációk hatására az n -típusú germánium egykristályokban a fajlagos ellenállás is megnőtt, elsősorban alacsonyabb hőmérsékleteken. A fajlagos ellenállás növekedése nagyobb mértékű, mint az elektronkoncentráció csökkenése, így csak részben magyarázható azzal, hogy a diszlokációs akceptorok elektronok befogásával csökkentik a vezetési elektronok koncentrációját. Az 5. ábra bemutatja, hogy a diszlokációk erősen csökkentik a rájuk merőleges irányban mérhető elektronmozgékonytságot is. A töltéshordozó-mozgékonytság csökkenését mások is megfigyelték [4, 19, 20]. A mozgékonytság csökkenése magyarázható azzal, hogy a diszlokációk körüli tértöltéshenger potenciálja (ld. 2. ábra) szórja az elektronokat. Ez a hatás nem jelentkezik akkor, ha az áram a diszlokációkkal párhuzamos irányban folyik. Kísérleteink során meggyőződünk arról, hogy a diszlokációkkal párhuzamos irányban a mozgékonytság közelítőleg megegyezik a diszlokációmentes kristályokban mérhető mozgékonytsággal. Már idézett munkáinkban [8, 9] megmutattuk, hogy a tértöltéshengereken való töltéshordozó szóródás figyelembevételével a mozgékonytság redukciója kvantitativ is értelmezhető.

p -típusú germániumra vonatkozóan sokkal kevesebb adat áll rendelkezésünkre. Nagy tisztaságú, 20–25 ohm cm fajlagos ellenállású p -típusú germánium kristályokon, melyekben hajlítással kb. 10^7 cm^{-2} sűrűségben hoztunk létre diszlokációkat, Hall-effektus és vezetőképesség méréseket végeztünk az n -típusú kristályokon végzett mérésekhez hasonlóan. Méréseink szerint a töltéshordozó-koncentráció (lyukkonzentráció) és a mozgékonytság megegyezett a deformálatlan, alacsony diszlokációsűrűségű mintákban mért értékekkel [13, 14]. Megállapítható volt, hogy olyan diszlokációsűrűségek esetén, mikor a diszlokációs centrumok sűrűsége összemérhető volt a kémiai akceptorok sűrűségével, a diszlokációk alig, vagy egyáltalán nem befolyásolták a többségi töltéshordozókkal (lyukak) kapcsolatos elektromos jelenségeket, ellentétben az n -típusú germániumon tapasztaltakkal.

A diszlokációkkal kapcsolatos mély (donor) szintek energiájára vonatkozóan töltéshordozó koncentráció

1. táblázat

Diszlokációs energiaszintek germániumban és szilíciumban

Mérési módszer	n -Ge $E_c - E_{\text{diszl.}}$ eV	p -Ge $E_{\text{diszl.}} - E_v$ eV	n -Si $E_c - E_{\text{diszl.}}$ eV	p -Si $E_{\text{diszl.}} - E_v$ eV
Töltéshordozó-koncentráció hőmérséklet függése	0,33 [9, 10] 0,35 [15]* 0,3 [16, 17] 0,28 [18]** 0,2 [4] 0,5 [20]	0,09 [22] 0,12 [23] $\approx 0,22$ [21] $\approx 0,25$ [13, 14]	$\frac{1}{2} E_{\text{tiltott}}$ [25]	$\frac{1}{2} E_{\text{tiltott}}$ [25] 0,3 [27, 28]
Rekombináció, csapdamélység	0,46 [35] 0,44 [36]	0,30 [35] 0,28 [37] 0,15–0,20 [13, 11]	0,52 [38] 0,6***	0,38–0,50 [38] 0,6***

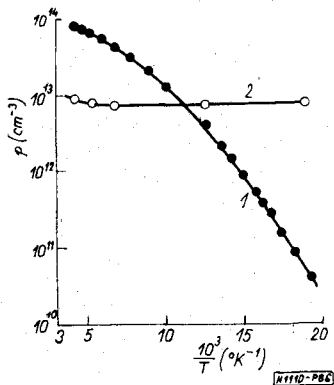
* A mérések kiértékelése W. T. Read modellje alapján [4] történt.

** R. L. Logan és munkatársai [19] mérései alapján.

*** T. Figielski szóbeli közlés.

méréseink analiziséből csupán alsó korlát adódott, azaz a diszlokációs donorszint *p*-típusú germániumban mélyebben helyezkedik el, mint 0,25 eV a valenciasáv tetejétől mérve. Eredményünk jól egyezik J. Krylow [21] hasonló méréseinek eredményeivel, valamint a később ismertetendő kisebbségi töltéshordozó élettartam hőmérsékletfüggéséből nyerhető energiaértékekkel (ld. 1. táblázat).

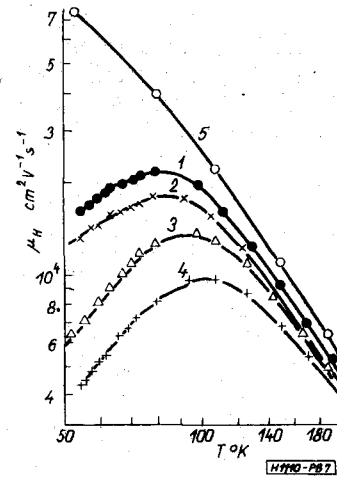
Ugyanakkor W. Schröter [22] arról számol be, hogy nagy tisztaságú *p*-típusú germániumban $10^7 - 10^8 \text{ cm}^{-2}$ diszlokációsűrűség esetén sikerült megfigyelni a töltéshordozó-koncentráció változásait. Ezt a nagy diszlokációsűrűséget magas hőmérsékleten végrehajtott kompresszióval állították elő. A lyukkonzentráció általa megfigyelt változásait a 6. ábra mutatja be. Igen érdekes, hogy a deformáció előtt és után mért lyukkonzentrációgörbék egymást metszik, és kb. 100 K° felett a nagy diszlokációsűrűségű mintákban a lyukkonzentráció magasabb, mint a kiindulási kristályban. Ezt azzal a feltevéssel magyarázza, hogy a diszlokációk *p*-típusú germániumban magasabb hőmérsékleteken akceptoroként, alacsonyabb hőmérsékleteken donorként viselkednek. A diszlokációs donorok ionizációs energiája 0,09 eV a valenciasáv felett (ld. 1. táblázat). Hasonló eredményeket közöl W. Haist is [23], aki hajlítással állított elő kb. 10^7 cm^{-2} sűrűségű éldiszlokáció-rendszert *p*-típusú germániumban. Az 1. táblázatból látható, hogy nagy eltérés van egyrészt W. Schröter és W. Haist, másrészt a saját és J. Krylow méréseiből adódó diszlokációs donorszint energiája között. Ezen eltérés okait további kísérleti vizsgálatok deríthetik fel.



6. ábra. Lyuk koncentráció a hőmérséklet függvényében plasztikusan deformált (kompresszió) *p*-típusú germániumban. 1 — deformáció után, $N_D = 4,6 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$, 2 — deformáció előtt [22]

A diszlokációk okozta mozgékonyagsváltozást *p*-típusú germániumban ugyancsak W. Schröter vizsgálta részletesen [24]. Ezen mérések tipikus eredményei láthatók a 7. ábrán. A mozgékonyágnak a diszlokációk okozta változása hasonló az *n*-típusú germániumban megfigyelt effektushoz, ha annál gyengébb is. A mozgékonyág redukciója szintén eredményesen értelmezhető a régebbi munkáinkban [8, 9] leírt modell alapján [24], csak *p*-típusú germánium esetén a diszlokáció pozitívan töltődik fel, és körülötte negatív tértöltéshenger alakul ki.

Szilíciumon nagyon kevés hasonló vizsgálatot végeztek. R. H. Glaenger és A. G. Jordan vizsgálták



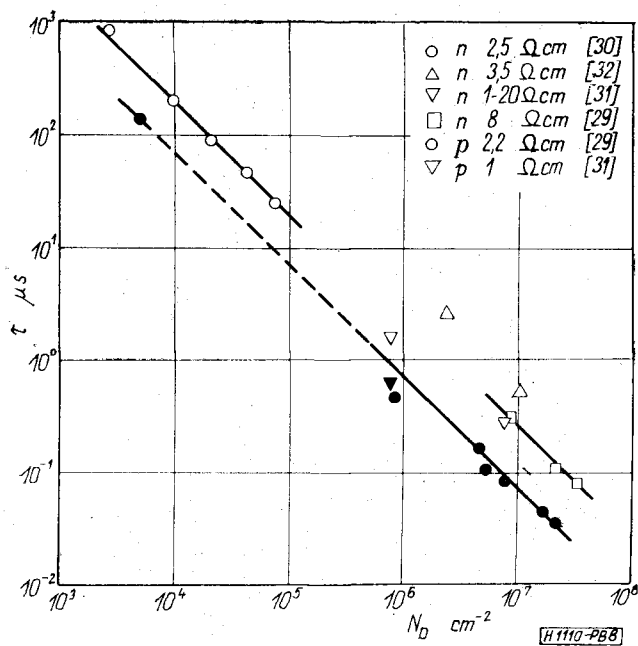
7. ábra. Lyuk mozgékonyág a hőmérséklet függvényében plasztikusan deformált (kompresszió) *p*-típusú germániumban. 1—4 deformáció után, $1-N_D = 4,6 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$, $2 - N_D = 6,4 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$, $3 - N_D = 1,1 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$, $4 - N_D = 4,6 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$, 5 — deformáció előtt [24]

a plasztikus hajlítással létrehozott éldiszlokációk hatását *n*- és *p*-típusú szilíciumkristályok fajlagos ellenállására [25]; méréseik a tiltott sáv közepén elhelyezkedő diszlokációs donor-, illetve akceptor-szintek feltételezésével értelmezhetők.

W. Leskoschek [26] szintén donorhatást figyelt meg a diszlokációkkal kapcsolatban *p*-típusú szilíciumban. H. Weber, P. Haasen és W. Schröter [27, 28] a *p*-típusú germániumhoz hasonló jellegű lyukkonzentráció-görbékét figyelték meg a hőmérséklet függvényében plasztikusan deformált *p*-típusú szilíciumban. A diszlokációs donorszintre *p*-típusú Sziban 0,3 eV energia adódott a valenciasáv tetejétől mérve.

4. A kisebbségi töltéshordozók élettartamának változása a diszlokációsűrűség függvényében

A diszlokációknak a kisebbségi töltéshordozók élettartamára való hatását szintén számos munka tanulmányozta [1, 2]. Itt is elsősorban germánium kristályokon végeztek méréseket. Annak ellenére, hogy az eredmények értelmezését megnehezítik az egyéb rekombinációs centrumok (pl. szennyezők, vakanciák) nehezen ellenőrizhető hatásai, s így a különböző szerzők által nyert eredmények közt nagyok az eltérések, mégis sikerült határozott kapcsolatot találni a mért kisebbségi töltéshordozó élettartama, valamint a diszlokációk sűrűsége között. Közvetlenül a kristálynövesztés után vagy plasztikus deformáció után végrehajtott kisebbségi töltéshordozó élettartam mérések megmutatták, hogy az élettartam fordítva arányos a diszlokáció sűrűségével, mégpedig minél tökéletesebb a kristályszerkezet, annál nagyobb az élettartam. Az irodalmi adatok és saját tapasztalataink szerint a germániumon végrehajtott plasztikus deformáció több nagyságrenddel lecsökkenti az élettartamot [2]. Pl. 30 ohm cm fajlagos ellenállású, eredetileg 300 μs kisebbségi töltéshordozó-élettartamú *p*-típusú germániumban plasztikus deformáció után pár μs-ra csökkent a kisebbségi töl-



8. ábra. Kisebbségi töltéshordozók élettartamának függése a diszlokációsűrűségtől n- és p-típusú germániumban

téshordozók élettartama, kb. $2-5 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ diszlokációsűrűség mellett. Hasonló arányú élettartamcsökkenést tapasztaltunk p-típusú germániumban is. Nagyobb diszlokációsűrűségek esetén $1 \mu\text{s}$ alá csökken a kisebbségi töltéshordozók élettartama. Ilyen kis élettartamok a fotomagneto-elektromos effektus [13, 14] vagy az elektronsugár impulzusos töltéshordozó-gerjesztéssel [29] mérhetőek, mely módszerekkel $10^{-2} \mu\text{s}$ -os élettartam észlelhető.

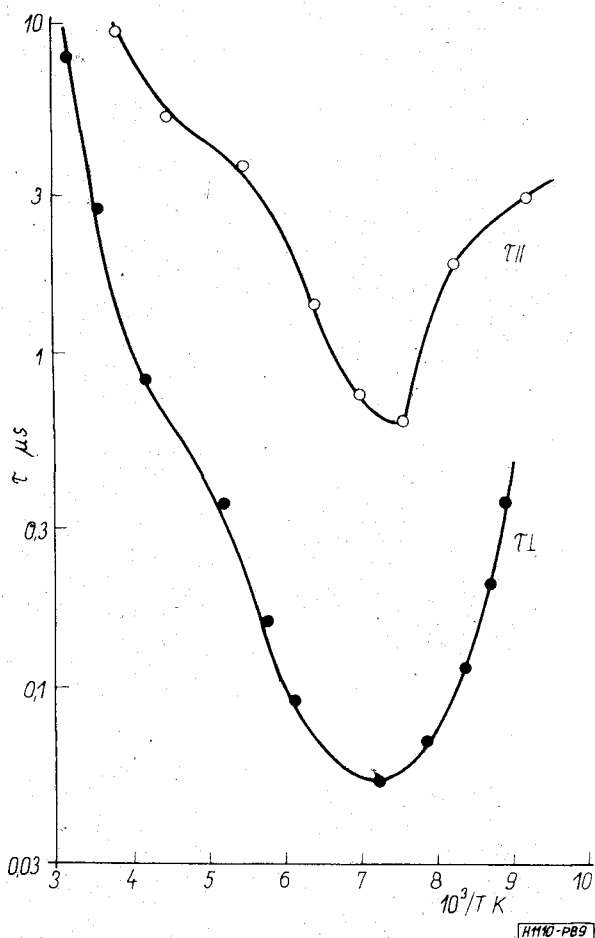
A 8. ábrán bemutatjuk a különböző szerzők által n- és p-típusú germániumon szobahőmérsékleteken mért kisebbségi töltéshordozó élettartamokat különböző diszlokációsűrűségeknél. A legkiterjedtebb mérések egyike G. K. Wertheim és G. L. Pearson [29] nevéhez fűződik, akik $2,2 \text{ ohm cm}$ fajlagos ellenállású p-típusú és 8 ohm cm fajlagos ellenállású n-típusú germániumon végeztek méréseket, a kristályokban plazmatikus deformációval állítva elő $10^6-5 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ sűrűséggel diszlokációkat. Méréseik szerint az élettartam fordítva arányos a diszlokációsűrűséggel, a mért pontokat jól közelítő görbe egyenlete n- és p-típusú anyagban $\tau = 2,5/N_D$, illetve $\tau = 0,7/N_D$, ahol τ s-ban és $N_D \text{ cm}^{-2}$ egységekhez mérendő. Erre a görbére esett a p-típusú deformálatlan kristályban $5 \times 10^3 \text{ cm}^{-2}$ diszlokációsűrűségnél észlelt kb. $150 \mu\text{s}$ élettartam is.

J. Okada [30] $2,5 \text{ ohm cm}$ fajlagos ellenállású, n-típusú $5 \times 10^3-10^5 \text{ cm}^{-2}$ természetes diszlokációsűrűségű germániumon mért kisebbségi töltéshordozó élettartamot. Eredményei, mint azt a 8. ábra mutatja, jó összhangban vannak G. K. Wertheim [29] mérési eredményeinek extrapolációjával. J. Okada egyébként kisszögű szemcsehatárokon elhelyezkedő éldiszlokációkon végbement rekombinációt is vizsgált, itt n-típusú germániumban a diszlokációkon való rekombináció hatás keresztmetszetéből $2,3 \times 10^{-8} \text{ cm}$ befogási átmérő adódott lyukakra, míg a benőtt diszlokációkon való előbb említett élettartam mérései $2,9 \times 10^{-8} \text{ cm}$ befogási átmérőt ered-

ményeznek [30], mely egyezés elég jó. L. I. Kolesznyi [31] foto-magneto-elektromos (PME) effektus segítségével mért élettartamot $10^6-10^7 \text{ cm}^{-2}$ diszlokációsűrűségű germániumon, eredményeit a 8. ábra tartalmazza. A T. Figielski [32] által mért élettartamok magasabban fekszenek, mint az eddig említett értékek (ld. 8. ábrát). Ugyanez vonatkozik az általunk mért néhány adatra is.

A kísérleti adatok analizéséből megállapíthatjuk, hogy germániumban pár ezer cm^{-2} diszlokációsűrűség felett a diszlokációk játsszák a döntő szerepet a rekombinációs folyamatokban és meghatározzák a kisebbségi töltéshordozók élettartamát, mely fordítva arányos a diszlokációsűrűséggel és kb. 1 ohm cm -nél nagyobb fajlagos ellenállás esetén független, vagy gyengén függ a többségi töltéshordozók koncentrációjától. Kb. 10^3 cm^{-2} -nél kisebb diszlokációsűrűségek esetén már más rekombinációs centrumok, elsősorban a réz szennyezőatomok határozzák meg a kisebbségi töltéshordozók élettartamát, a diszlokációk legfeljebb közvetve, pl. a diszlokációk és a rézatomok kölcsönhatása révén befolyásolhatják az élettartamot [2].

Szilíciumban is a germániumhoz hasonló módon változik a kisebbségi töltéshordozók élettartama, mely fordítva arányos a diszlokációsűrűséggel [33].



9. ábra. PME-effektussal mért kisebbségi töltéshordozó élettartam $25 \Omega\text{cm}$ -es p-típusú germániumban, $N_D = 5 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$. 1 — a diszlokációkra merőleges irányban mérve, 2 — a diszlokációkkal párhuzamos irányban mérve

Párhuzamos diszlokációk rendszere anizotróppá teheti a rekombinációs jelenségeket. J. B. Arthur és munkatársai [34] kisebbségi töltéshordozók élettartamát és diffúziós állandóját mérték plasztikusan deformált germániumban, szobahőmérsékleten. Megfigyeléseik szerint n -típusú germániumban a kisebbségi töltéshordozók diffúziós állandója anizotróp, a diszlokációkkal párhuzamosan nagyobb, mint azokra merőleges irányban. Ugyanakkor p -típusú germániumban a kisebbségi töltéshordozók (elektronok) diffúziós állandója izotróp és az élettartama anizotróp, a diszlokációkkal párhuzamos irányban mérve nagyobb, mint azokra merőleges irányban mérve.

Hasonló anizotrópiát figyeltünk meg plasztikusan deformált p -germániumban a PME-effektus segítségével mért élettartamban az ún. „ratio lifetime”-ban [13, 14]. A 9. ábrán egy kb. 5×10^6 cm⁻² diszlokációsűrűségű p -típusú germániumon a PME-effektussal mért élettartam hőmérséklet görbék láthatóak. 100 és 300 K° közötti hőmérséklet-tartományban egy nagyságrenddel is különböznek a diszlokációkkal párhuzamos, ill. azokra merőleges irányban mért élettartamok, az utóbbiak lévén a kisebbek, J. B. Arthur és munkatársai [34] szobahőmérsékleten nyert eredményeivel egyezésben. J. B. Arthur [34] szerint a diszlokációk körüli tartomány p -típusú anyagban továbbra is p -típusú marad, mivel a diszlokáción felhalmozódott negatív töltés még mindig nagyobb, mint az anyagban levő akzeptorkoncentráció. Így a diszlokáció körüli potenciálgát akadályozza a kisebbségi töltéshordozók (elektronok) befogását. Ez a mechanizmus hozhatja létre az élettartam anizotrópiáját.

A kísérleti tapasztalat szerint minden rekombinációs centrum egyben, bizonyos körülmények között, csapdacentrumként is működhet. A diszlokációkkal kapcsolatos csapdacentrumokat mind szilíciumban, mind germániumban megfigyelték. Szilíciumban ez a hatás már szobahőmérsékleten, germániumban pedig alacsonyabb hőmérsékleteken jelentkezik. A diszlokációs csapdacentrumok hatásosságát döntő mértékben a diszlokáció körüli tértöltés létrehozta potenciálgát határozza meg. Így ebben a tartományban a töltéshordozók élettartamának, vagy a stacionárius fotovezetésnek a hőmérsékletfüggéséből a diszlokációk körüli potenciálgát magassága és így a diszlokációs akceptor, illetve donorszintek energiája meghatározható. Germániumon L. I. Kolesznyik és Ju. A. Koncevoj [35], illetve M. Jastrzebska és T. Figielski [36, 37] végzett ilyen jellegű méréseket. Az akzeptorszint energiájára n -típusú germániumban 0,46 eV [35], illetve 0,44 eV [36] értékeket kapták, a vezetési sáv élétől számítva, míg p -típusú germániumban a diszlokációs donorszint energiája 0,30 eV [35], ill. 0,28 eV [37] a valencisáv teteje felett. A saját méréseink kiértékeléséből az adódik, hogy p -germániumban a diszlokációs donorszint mélyebben helyezkedik el, mint 0,15–0,20 eV a valencisáv tetejétől számítva [13, 14].

Szilíciumban R. H. Glaenger és A. G. Jordan [38] a hőmérséklet függvényében végzett töltéshordozó-élettartam mérései szerint a diszlokációs akzeptorszint energiája 0,52 eV a vezetési sáv alatt, míg a donorszint 0,38–0,50 eV-ra van a valencisáv teteje

felett. Ezen értékekkel jól egyeznek a T. Figielski* által a stacionárius fotovezetésből nyert energiaszintek (kb. 0,60 eV-os akzeptorszint a vezetési sáv alatt és ugyancsak 0,60 eV-os donorszint a valencisáv felett).

5. Összefoglalás

A jelen dolgozatban ismertetett kísérleti eredmények alapján a következő képet alakíthatjuk ki a diszlokációknak (elsősorban éldiszlokációknak) a germánium és szilícium tulajdonságaira való hatásával kapcsolatban.

A diszlokációk mély akceptor-, illetve mély donorszinteket hoznak létre n -, illetve p -típusú anyagban.

A diszlokációs energiaszintek a diszlokáció vonala mentén elhelyezkedő felhasadt kötésekkel hozhatók kapcsolatba. A különböző típusú mérésekből nyert energiaszint-értékeket összefoglalóan az 1. táblázat tartalmazza.

Mégállapítható, hogy a különböző szerzők által mért adatok többé-kevésbé eltérnek egymástól. A rekombinációs jelenségek vizsgálatából nyert energiaszint értékek p -típusú Si-tól eltekintve egymással összhangban vannak, azonban eltérés mutatkozik a rekombinációs jelenségek vizsgálatából, ill. a Halli-effektus méréseiből nyert energiaszintek között. Ezen eltérések okainak felderítése további kísérleti vizsgálatokat igényel.

Nagy diszlokációsűrűségek esetén a diszlokációk igen erősen befolyásolják a töltéshordozók koncentrációját, mozgékonyágát és élettartamát. Ezek a jelenségek a diszlokációs akceptor-, illetve donorcentrumok létre, ill. a diszlokáció vonal feltöltődésére és a körülötte kialakuló tértöltési tartomány potenciáljának hatására vezethetők vissza.

A diszlokációk hatása nagy sűrűségek esetén így túlközödhethet a félvezető eszközgyártás legfontosabb alapanyagainak, a germániumnak és szilíciumnak elektromos paramétereiben, elsősorban a kisebbségi töltéshordozók élettartamában, másodsorban a kristályok fajlagos ellenállásában.

Köszönetemet fejezem ki Dr. Bodó Zalán tudományos főmunkatársnak az értékes diszkusszióért, Németh Tibor tudományos munkatársnak a kísérleti munka során felmerült kémiai-technológiai problémák megoldásában nyújtott segítségével és Dr. T. Figielskinek (LTA Fizikai Intézete, Varsó) az értékes diszkusszióért, valamint a diszlokációkkal kapcsolatos, a szilíciumban létrejövő energiaszintekre vonatkozó kísérleti eredményeinek publikáció előtti ismertetéséért.

I R O D A L O M

- [1] G. L. Pearson, F. L. Vogel: Plastic Deformation in Semiconductors, Progress in Semiconductors, 6, 1 old., 1962. London.
- [2] R. G. Rhodes: Imperfections and Active Centres in Semiconductors. Pergamon Press, Oxford, 1964.
- [3] H. Alexander, P. Haasen: Dislocations and Plastic Flow in the Diamond Structure, Solid State Physics, 22, 1968. New York and London.
- [4] W. T. Read: Phil. Mag. 45, 775, 1954.

* Szóbeli közlés.

- [5] H. Alexander, R. Labusch, W. Sander: Solid State Communications, 3, 357, 1965.
- [6] S. Dallmann, D. Hahn: Z. f. angew. Phys., 20, 452, 1966.
- [7] G. H. Schwuttker: Félvezető Eszközök Vizsgálási Módszerei Szimpózium, Budapest, 1967. preprint.
- [8] B. Pődör: Phys. Stat. Sol. 16, K167, 1966.
- [9] B. Pődör: Acta Physica Hungarica, 23, 393, 1967.
- [10] B. Pődör: Félvezető Eszközök Vizsgálási Módszerei Szimpózium, Budapest, 1967, preprint.
- [11] B. Pődör: Физика и Техника полупроводников 2, 884, 1968.
- [12] J. Balázs, B. Pődör: Phys. Stat. Sol. 37, 119, 1970.
- [13] I. Cseh, B. Pődör: Diszlokációk hatása félvezetők elektromos és optikai hatásaira szimpózium, Zakopane, 1970, június, előadás.
- [14] I. Cseh, B. Pődör: Acta Physica Hungarica, Közlés alatt.
- [15] J. H. P. van Weeren, G. Koopmans, J. Blok: Phys. Stat. Sol. 27, 219, 1968.
- [16] J. Krylow, J. Auleytner: Phys. Stat. Sol. 32, 581, 1969.
- [17] J. Krylow: disszertáció, LTA Fizikai Intézete, Varsó, 1968.
- [18] Ю. В. Гуляев: Физика твердого тела 3, 1094, 1961.
- [19] R. L. Logan, G. L. Pearson, D. A. Kleinman: J. Appl. Phys., 30, 885, 1959.
- [20] R. M. Broudy: Adv. Phys. 12, 135, 1963.
- [21] J. Krylow: Phys. Stat. Sol. 32, 589, 1969.
- [22] W. Schröter: Phys. Stat. Sol. 21, 211, 1967.
- [23] W. Haist: disszertáció, Technische Hochschule, Stuttgart, 1967.
- [24] W. Schröter: Phys. Stat. Sol. 31., 177, 1969.
- [25] R. H. Glaenger, A. G. Jordan: Solid State Electronics, 12, 259, 1969.
- [26] W. Leskoschek: Acta Physica Austriaca, 26, 357, 1967.
- [27] H. Weber, W. Schröter, P. Haasen: Helvetica Physica Acta, 41, 1255, 1968.
- [28] P. Haasen, W. Schröter: Conf. Fundamental Aspects of Dislocation Theory, Gaithersburg, Md., USA, 21—25 Apr. 1969. (Physics Abstracts 73, No. 891, Abstr. No. 37160, 1970.)
- [29] G. K. Wertheim, G. L. Pearson: Phys. Rev. 107, 694, 1957.
- [30] J. Okada: J. Phys. Soc. Jap. 10, 1110, 1955.
- [31] Л. И. Колесник: Физика твердого тела, 4, 1449, 1962.
- [32] Т. Р. Фигиельски: Физика твердого тела 6, 2146, 1964.
- [33] H. Lemke: Phys. Stat. Sol. 12, 125, 1965.
- [34] J. B. Arthur, A. F. Gibson, J. W. Granville E. G. S. Paige: Phil. Mag. 3, 940, 1958.
- [35] Л. И. Колесник: Физика твердого тела 6, 1964, 1964.
- [36] M. Jastrzebska, T. Figielski: Phys. Stat. Sol. 14, 381, 1966.
- [37] M. Jastrzebska, T. Figielski: Phys. Stat. Sol. 32, 791, 1969.
- [38] R. H. Glaenger, A. G. Jordan: Solid-State Electronics, 12, 247, 1969.