

MAGYAR—SZOVJET EGYÜTTMŰKÖDÉS A FÉLVEZETŐK KUTATÁSA TERÜLETÉN*

BODÓ ZALÁN***

A FIZIKAI TUDOMÁNYOK DOKTORA

és

SZIGETI GYÖRGY**

AZ MTA RENDES TAGJA

Az együttműködésnek három szakasza volt. Az első kb. 1955-ig tartott. Ekkor csak egymás tudományos eredményeinek irodalmi tanulmányozása folyt. Ennek alapján eredményátvételek, továbbfejlesztések történtek és új ötletek születtek. A kapcsolat kétoldalú volt. A második kb. 1970-ig tartó időszakban a MTA MFI fiatal kutatói közül sokan, pl. PFEIFER Judit, RÖSNER Béla, a NÉMETH házaspár és így tovább, már hosszabb tanulmányutakat tettek a Szovjetunióban, míg mások ebben az időszakban egyetemi tanulmányaikat végezték ott. Ezek az utazások és tanulmányok igen nagy mértékben segítettek a Műszaki Fizikai Kutató Intézetnek a félvezető kutatások megindulásainál. Kétoldali együttműködési szerződések jönnek létre a két ország tudományos intézetei között. Szoros a tapasztalat- és kutató csere. Számos közös kutatási eredmény születik.

I. Bevezetés

A félvezető anyagok kutatása területén az egyre fokozódó magyar-szovjet együttműködésnek három szakaszát különböztethetjük meg.

A II. világháború előtti évek és kb. a háború utáni első évtized alkotják az *első* korszakot. Ekkor az együttműködés még csak az egymás eredményeinek irodalmi tanulmányozására korlátozódott. Már ekkor is merítettek azonban saját munkáikhoz mind a két ország kutatói ötleteket, új kutatási lehetőségeket a másik ország kutatási eredményeinek megismeréséből, közleményeiknek olvasásából.

Az együttműködés *második* szakasza az 50-es évek második felében kezdődött. 1956-ban volt alkalmunk először megtekinteni a szovjet félvezető kutató és kísérleti gyártó intézeteket. Így Leningrádban az A. F. JOFFE akadémikus vezetésével működő félvezető kutató intézetet, a D. N. NASZLEDOV vezette Fizikai-Technikai Intézetet, a moszkvai Bajkov-intézetet (D. A. PETROV), a Szovjetunió Tudományos Akadémiájának Fizikai Intézetét (FIAN, Moszkva), ennek kiváló vezető munkatársait: VUL, LEVSHIN és SZKANAVI professzorokat, továbbá a moszkvai Elektrolampovij Zavodban a lumineszcens lámpákkal kapcsolatos munkákat és a leningrádi Sztvetlana gyárban folyó félvezető kísérleti gyártást. Ezen korszak további időszakára az jellemző, hogy

* Előadta az MTA tudományok ülészsaka keretében 1974. szept. 19-én Bodó Zalán.

** Szigeti György. 1325 Budapest, Pf 76.

*** Bodó Zalán. 1325 Budapest, Pf 76.

számos magyar kutató, elsősorban kezdő, fiatal munkatárs tett hosszabb-rövidebb tanulmányutat a Szovjetunióban. A különböző szovjet kutatóintézetekben megismerkedtek az ottani témákkal, tudományos munkákkal, kutatási módszerekkel és eszközökkel. Átvették az ottani tapasztalatokat, és ezeket a hazai kutatásaik megindításakor hasznosították, de ugyanekkor átadták saját tapasztalataikat is — főleg a lumineszcencia kutatás területéről. Számos tehetséges fiatal kapott ösztöndíjat és végezte tanulmányait a Szovjetunió egyetemén. Ez tehát már az előbbi korszaknál lényegesen szorosabb kapcsolatot jelentett.

Az együttműködés további fokozódását leginkább a 70-es évekkel kezdődő *harmadik* korszak mutatja. Ekkor már a Magyar Tudományos Akadémia intézetei a kutatások koordinálására a Szovjetunió különböző intézeteivel kétoldalú együttműködési szerződéseket kötöttek. Így a félvezető kutatások hatásosságának fokozására szoros, kölcsönös kétoldalú együttműködés alakult ki, állandósult a tapasztalat- és kutatócsere.

A következők — nem törekedve teljességre — röviden e három korszak *legjelentősebb* eredményeit foglalják össze.

2. Az első korszak

Ennek a korszaknak legérdekesebb eredménye az volt, hogy egy szovjet kutató, O. W. LOSSEV még 1923-ban szilíciumkarbidon felfedezett egy új fizikai jelenséget, melyet „detektorvilágításnak” nevezett el. Ez volt az első megfigyelt elektronlumineszcens jelenség. Ezeknek a kutatásoknak ismeretében kezdte SZIGETI György egyes kristályok elektronlumineszkálását vizsgálni. Megállapította, hogy e jelenség nem, az akkori irodalomban elfogadott nézetek szerinti, optikai fékezési sugárzás, hanem a kristályok felületén vagy belsőjében kialakult zárórétgen felgyorsult elektronok által keltett *lumineszcencia*. Megállapította, hogy a fényerjesztés határfoka a kristályok tisztaságának növelésével lényegesen javítható. Ennek alapján kapta meg BAY Zoltánnal együtt szabadalmát, amely a nagymértékben tiszta kristályon átfolyó elektromos áram által történő fényerjesztést védi. Ezt a jelenséget használják fel ma is az ún. világító diódákban (LED). Ők szerezték meg tehát a világon az első szabadalmat, még a háború előtt, az elektronlumineszcencia jelenségét hasznosító fényforrásokra.

A háború után is SZIGETI és a vele együttműködő csoport kutatásainak fő területe a lumineszcencia volt. A kutatócsoport tagjai NAGY Elemér, BODÓ Zalán, MAKAI Endre, GERGELY György és SZABÓ János lettek. E kutatógárdának munkája még a háború előtti nyugati tanulmányutak tapasztalatainak felhasználásával kezdődött. Sikeres kutatásaik nyomán indulhatott meg PINTÉR Jenő, GÁCS István és SZÁSZ Tibor vezetésével a magyar fénycsőgyártás, de a közvetlen ipari felhasználáson túlmenően, a kutatásaik eredménye-

képpen számos értékes új tudományos alapfelismerés és mérési módszer is született. Itt most ezek közül csak azt a néhányat említjük meg, ami közvetlen szovjet kapcsolatot is jelentett.

1951-ben a szovjet M. N. ALENCEV módszert dolgozott ki lumineszkáló folyadék kvantumhatásfokának mérésére. Az ő kalorimetrikus módszerét vette át, fejlesztette tovább BODÓ Zalán és sikeresen alkalmazta fényporok kvantumhatásfokának meghatározására. N. A. TOLSZTOJ és P. P. FEOFILOV publikációi nyomán VALKÓ Iván Péter és GERGELY György olyan mérési módszert dolgozott ki, melynek segítségével a több komponensű foszforeszkálás fényének gyors lecsengését elektronikusan lehetett analizálni. Fordított irányban is történt ilyen kapcsolat. 1951-ben BODÓ Zalán a porok diffúz optikai tulajdonságainak értelmezésére új elméletet dolgozott ki és ezt sikeresen alkalmazta a fényporok abszorpciós együtthatóinak kísérleti meghatározására. Ezekre a munkáira számos szovjet kutató figyelt fel, többek között IVANOV, GIRIN, STEPANOV, majd V. V. ANTONOV-ROMANOVSZKI, akik átvették a magyar eredményeket és azokat továbbfejlesztették. A közös munkák eredménye alapján a diffúzóoptikának új fejezetét alkották meg.

Megkezdődött a gyakorlati együttműködés is a magyar kutatók, gyártó üzemek (Egyesült Izzó) és a szovjet gyárak, főleg a moszkvai Elektrolampovij Zavod között. Ebben igen hathatósan működött együtt szovjet részről elsősorban E. MERZLOUHOVA és B. M. GUGEL és a magyar partner SZABÓ János.

3. A második korszak

Rátérve erre a korszakra, először meg kell említenünk, hogy a következőkben magyar részről a félvezető kutatásokban főleg az MTA Műszaki Fizikai Intézete (MFI) vette ki részét; fiatal kutatói közül SOMOGYI Károly és BERTÓTI Imre ebben az időben egyetemi tanulmányaikat már a Szovjetunióban végezték, míg mások RÓNAINÉ, PFEIFER Judit, RÖSNER Béla, NÉMETH Tibor és NÉMETH Tiborné ekkor hosszabb tanulmányutakat tettek, és a Szovjetunióban készültek fel későbbi kutatási munkáikra. Az együttműködő szovjet intézetek között elsősorban a moszkvai Krisztallográfiai Intézetet, a leningrádi Joffe-Intézetet és Novoszibirszkben a Félvezető Fizikai Intézetet, valamint a Szervetlen Kémiai Intézetet kell megemlítenünk. Ebben a korszakban több témában már jelentős tudományos együttműködés is alakult ki.

Ez egyes esetekben már a téma választásnál, az eredménnyel nem kecsesgató témák azonnali kiszűrésével, illetőleg perspektívikus új témák kijelölésével kezdődött. Ebben az időben igen lényegesek voltak kutatóinknak elsősorban a félvezetők preparatív előállításával kapcsolatban szerzett tapasztalataik, de lehetőségük volt az apparatív megoldások, technológiai folyamatok megismerése mellett, új mérési módszerek közvetlen tanulmányozására is.

A MFI-ben folyó félvezető kutatás bázisát akkor még az elemi félvezetők és az ezekből készíthető eszközök képezték. Az 1960-as évek elején

egyre erőteljesebb igény lépett fel új tulajdonságokkal rendelkező, más félvezető anyagok iránt. A félvezető vegyületek szovjet kutatási bázisának vezetője ekkor Leningrádban N. A. GORJUNOVA volt. Ebből az iskolából nőttek ki azok a kutatók, akik ma is neves képviselői a bonyolultabb félvezető vegyületek vizsgálatának. Ezért volt a magyar kutatók számára igen jelentős az, hogy tanulási, illetve kutatási lehetőséget kaptak a leningrádi Joffe-Intézetben, GORJUNOVA professzorasszony mellett. Kutatóink nála elsősorban a preparatív munkákba kapcsolódtak be, ennek a hazai kutatómunka szempontjából az előbb említettek szerint igen komoly jelentősége volt. Számos olyan technológiai eljárást (pl. sokkomponensű gázfázisú transzport reakciókat, gázfázisú szintéziseket, atmoszféra feletti nyomástartományokban végzett kristálynövesztéseket: LEC) ismerhettek meg a gyakorlatban, amelyekről addig csak kevés irodalmi ismeretük volt. Megtanulták, a nálunk akkor még nem alkalmazott, As és P vegyületek előállításának módszereit, kezelhetőségük feltételeit. A gáz, olvadék, oldat-olvadék fázisból történő növesztések újszerűsége mellett új tudományos gondolkozási módot is megismerhettek. A gyémántszerű szerkezetekkel analóg félvezető vegyületek számos fizikai tulajdonsága ugyanis ebben az időben már előre tervezhető és változtatható volt. Kutatóink ezekkel is megismerkedtek.

Ugyanebben az időszakban alakultak ki kapcsolataink a moszkvai kutató intézetekkel is. RÓNAINE PFEIFER Judit a Krisztallográfiai Intézetben SEFTAL professzor csoportjában az elemi félvezetők homoepitaxiájának kémiai transzportjával, V. J. NIKITENKO vezetése mellett RÖSNER Béla a germániumbeli diszlikációk mozgásának vizsgálati módszereivel ismerkedett meg. A közös munka során diszlokáció mozgást észleltek a makroszkópikus plaszticitás kritikus hőmérséklete ($\sim 400^\circ\text{C}$) alatti hőmérséklettartományban is. Ezt a mozgást az ismert elméletekkel nem lehetett értelmezni, de a méréseik egyezést mutattak más szerzőknek mikrokeménység mérésekből nyert eredményeivel. Az *Acta Physica*-ban közölt közös munka egyike volt az alacsony hőmérsékletű diszlokáció mozgás természetére vonatkozó kezdeti felismeréseknek, ezért erre a közleményre azóta is számos hivatkozás történik.

RÖSNER Béla 1965-ben V. Sz. VAVILOV és A. A. GIPPIUSZ vezetésével a Lebegyev Intézetben a szilícium A centrumain lejátszódó sugárzási rekombinációk vizsgálataiba is bekapcsolódott. Itt a modern kísérleti technika (a folyékony hélium hőmérsékletén történő mérések, kisszintű jelek detektálása, stb.) terén olyan tapasztalatokra tett szert, amelyek lehetővé tették Intézetünkben az azóta is folyó kísérleti fononkutatások megindulását és az itthoni eredményes Shockley—Hubner effektus vizsgálatokat. 1966-ban RÓNAINE PFEIFER Judit Novoszibirszkben tett féléves tanulmányutat. A szervesetlen kémiai intézetben bekapcsolódott a félvezető halogenidek és félvezető kristályok között végbemenő reakciók tanulmányozásába, V. I. BELIJ-jel a Ge—HBr reakciót vizsgálták. A reakciókinetikai vizsgálatokat a Szovjetunióban

közösen végezték, majd a hazatérés után, a hozott mintákon Intézetünkben végeztünk szerkezet vizsgálatokat. Erről a Szovjetunióban megkezdett és Intézetünkben befejezett munkáról, az eredményekről 1967-ben a Budapesten megrendezésre került *II. Nemzetközi Vékonyréteg Kollokviumon* számoltak be. A bízató eredmények alapján a novoszibirszi Intézet alkalmazza a HBr—Ge reakciót a félvezető reális felületek vizsgálatára.

4. A harmadik korszak

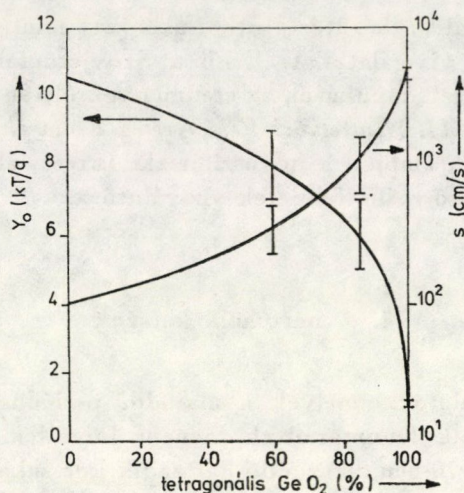
Azok a kapcsolatok, amelyek a második periódusban kialakultak, a későbbiekben nemcsak fennmaradtak, hanem bővültek, gyümölcsöztek és alapját képezik az 1970-ben elkezdődő harmadik korszaknak is.

A félvezető eszközök, különösen az MOS tranzisztorok, integrált áramkörök eddig többnyire szilíciumból készülnek. A Ge azért nem alkalmas ilyen célokra, mert eddig nem létezett olyan dielektrikum, amely a Ge felületi paramétereit stabilizálná. A Ge azonban a Si-mal szemben egy sor olyan előnnyel rendelkezik, amely szükségessé tette azt, hogy megvizsgáljuk Ge felületen a stabil germániumdioxid dielektrikum kialakításának lehetőségeit.

A Ge félvezető eszközökön a gyártás során általában hexagonális módosulatú germániumdioxid réteg alakul ki, amely réteg jelentős mennyiségű vizet tud adszorbeálni. Ennek következtében az eszközök visszaram és szivárgási áram paramétereit változnak, általában leromlanak. Az amorf germániumdioxid kémiai tulajdonságai a hexagonális germániumdioxidéhoz hasonlóak. Létezik viszont, a germániumdioxidnak olyan módosulata is, a tetragonális germániumdioxid, amely kémiailag igen ellenálló. Nemcsak a víz, hanem még a folyóvíz sem támadja meg.

A MTA Műszaki Fizikai Kutató Intézetének igazgatója, és a SzU Tudományos Akadémiája novoszibirszi Félvezető Intézetének igazgatója között 1970. október 23-án történt írásbeli megegyezés alapján a MFI vállalta az itt kidolgozott eljárással három különféle felületkezeléssel preparált germániumegykristály felületen kétoldali tetragonális oxid védőrétegek előállítását. A szovjet intézetben a vizsgálatokat a RZSANOV vezetésével működő csoport, a MFI-nél NÉMETH Tiborné és társai végezték. A szovjet fél mikroellipszometriás és infravörös spektroszkópiai vizsgálatokat végzett, másrészt a MFI vállalta feladatokat közé tartozott a védőréteg előállítás különböző fázisaiban, a felületi rekombinációs sebesség változásának vizsgálata.

Először a hexagonális germániumdioxid por tetragonális oxiddá történő átalakítását dolgozták ki. Ezt a port 200 ÷ 250 atmoszféra nyomáson, 380 °C-on 6 nap alatt teljesen át tudták alakítani. A germánium felületén kialakított hexagonális germániumoxid rétegnek tetragonális módosulattá való átalakí-



1. ábra

tása a por formához hasonló módon történt. Vizsgálták a különböző kémiai felületkezelések hatását a tetragonális germániumdioxiddal fedett felületek kialakulása folyamán. Ezen vizsgálatok célja volt megállapítani, hogy a felületkezelések hogyan befolyásolják a kialakuló germániumoxid réteg tetragonális és hexagonális módosulatainak arányát és ennek a felületi paraméterekre való hatását. Méréseik szerint a felületi rekombinációs sebesség jelentősen megnőtt a hexagonális réteg kialakítása során, míg a tetragonális oxiddá történő átalakítás után az előzetes felületi kezelés hatása nem volt kimutatható, a felületi rekombinációs sebesség csak az oxid rétegben levő: tetragonális-hexagonális oxid módosulatainak arányától függött. Amint az 1. ábra mutatja, ha az oxidrétegben a tetragonális oxid réteg aránya nő, a felületi rekombinációs sebesség is növekszik, a felületi potenciál pedig csökken. Megvizsgálták a környezet hatását a 100%-os tetragonális germániumdioxidot tartalmazó oxidréteggel védett germánium felületi paramétereire. A felületi töltés és a felületi rekombinációs sebesség sem vízgőz, sem vákuum hatására nem változott. E mérések során bebizonyosodott, hogy a tetragonális germániumdioxiddal védett germánium felületének igen jó az elektromos és kémiai stabilitása.

A MFI-ben ezt a tématerületet 1971-ben zárták le, átadva a szovjet félnek a tetragonális germániumdioxid réteg előállítás technológiáját.

Még 1968-ban hazánkban járt a SzUTA Novoszibirszk-i Intézetéből Sz. SZMIRNOV. Intenzíven érdeklődött a nálunk germániumon folyó Shockley—Hubner (átmenő fononszél) effektus kísérletek iránt. Részben ez a látogatás ösztönözte a szovjet kollégákat arra, hogy az átmenő fononszél vizsgálatokat Novoszibirszkben is megindítsák. A galliumarzeniden kapott eredményeikről ebben az esztendőben számoltak be. Ezekhez a vizsgálatokhoz igen nagymér-

tékű segítséget nyújtott novoszibirszki tanulmányútja alatt SEBESTYÉN Tibor, aki ennek a munkának társszerzője. A személyes kapcsolatokat követően, ez évben a SzUTA és az MTA hivatalosan is megállapodtak a további együttműködésről.

1970-ben igen jelentős és intenzív együttműködés kezdődött a Magyar Tudományos Akadémia Műszaki Fizikai Kutató Intézete és az Ukrán Tudományos Akadémia Fizikai Intézete között is. A két intézet kétoldalú együttműködési megállapodást kötött, először az 1972–73-as évekre, majd az 1974–78-as évekre is. Ez az együttműködési megállapodás, amely részben párhuzamos, részben kiegészítő kutatásokat irányoz elő, lényegileg két területre terjed ki. Egyrészt kutatásokat végzünk a félvezető dielektrikum határfelület fizikai tulajdonságainak megismerésére, másrészt MOS struktúrákon a töltéstárolás és továbbítással kapcsolatos fizikai jelenségeket vizsgáljuk.

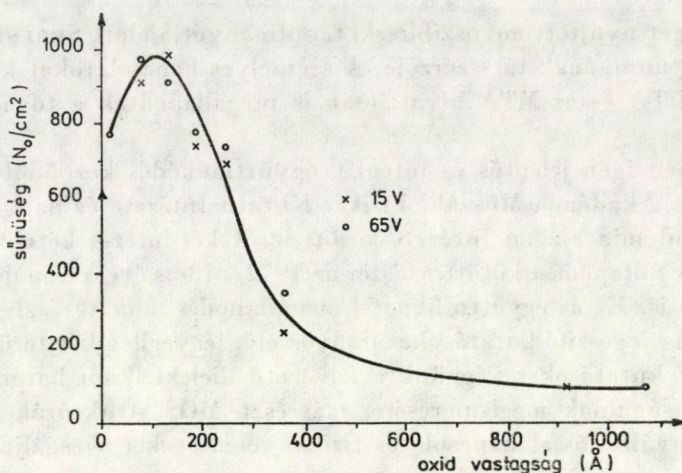
Az együttműködésben lerögzített csere-tanulmányutak során az érdeklő kutatók tájékoztatják egymást az elért eredményekről. Így ismerkedtünk meg pl. a kievi intézet által kidolgozott mikroellipszometria módszerével, mi viszont az általunk kidolgozott tű-lyuk (pin-hole) detektálási módszer konkrét kivitelezését adtuk át.

Az alábbiakban vázlatosan ismertetjük a MFI-ben, a LÖRINCZI András által vezetett kutató csoport (NÉMETH Tiborné, FORGÁCS Gábor, TÜTTŐ Péter) néhány eredményét.

a) Az MIS eszközök működésének egyik fontos problémája a termikus oxidálás során az ún. pin-hole-ok kialakulása. Ezek előfordulása nemcsak az eszközök, de a fizikai vizsgálatokhoz kialakított minták jóságát és így a mérések elvégezhetőségét is kérdésessé teszi. Vizsgálataink során olyan roncsolásmentes új módszert dolgoztak ki, amelyet szabadalmaztatni lehetett. Ennek lényege a következő: A módszer tulajdonképpen elektroforézis. Ha ugyanis MLIS struktúrában (itt az L elektrolit folyadékot jelent) feszültséget kapcsolunk a fém és félvezető fegyverzet közé, akkor a folyadékban levő szilárd töltött részecskék és a hibák tértöltése kölcsönhatásba lép egymással. A gyakorlati kivitelezésnél acetonban oldott transportschutzlack-ot és $1\ \mu\text{m}$ átmérőjű fényport használtunk. A módszert eredményesen alkalmaztuk diszlokációk, tű-lyukak, mikroinhomogenitások és p-n átmenetek detektálására germániumon, galliumarzeniden, InSb-n egyaránt.

A 2. ábrán bemutatjuk e módszerrel végzett egyik vizsgálat eredményét. Ezen a pin-hole-ok számát az oxid vastagság függvényében ábrázoltuk. A görbe alakjából arra lehet következtetni, hogy a kezdeti értékeket a diszlokációs sűrűség határozza meg, a növekedését a hozzáadódó pin-hole-ok száma hozza létre, majd a csökkenés oka is a pin-hole-ok számának az oxid vastagságával történő csökkenése.

b) A következőkben a felületi generációs-rekombinációs tulajdonságok vizsgálatával kapcsolatos eredményeinket ismertetjük. A félvezetők felületi

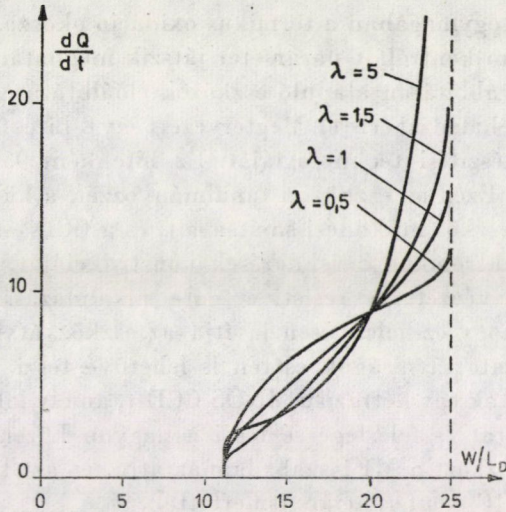


2. ábra

tulajdonságainak vizsgálatánál általánosan használt eljárás az impulzusos C—V mérés. Az ezzel kapott mérési eredmények kiértékelésével kapcsolatban több probléma merült fel.

A ZERBST által ajánlott, és szinte kizárólagosan használt kiértékelés feltételez egy, a kiürült tartomány vastagságának egyensúlyértékétől való eltéréssel arányos térfogati generációs sebességet, és egy időben állandó felületi generációs sebességet. A második feltételezés meglehetősen merész, különösen ha figyelembe vesszük azt, hogy a kapacitás relaxációjának ideje alatt a töltéshordozók száma az inverziós rétegben nagyságrendeket változik. Ez viszont Shockley—Read—Hall-féle generációs centrumok esetén a felületi generációs sebességben hasonló nagyságrendű változást kell hogy eredményezzen. A felületi centrumok paramétereinek ismeretében számított felületi generációs sebesség értékek több nagyságrenddel a Zerbst-féle kiértékeléssel kapható értékek alatt vannak.

Véleményünk szerint nyilvánvalóan a „klasszikusnak” tekinthető mérési módszerek (pl. PME módszer) fogalmainak átvételével van probléma. Ezeknek a módszereknek térbeli felbontása ugyanis a diffúziós hossz nagyságrendjébe esik, ami átlagos mintáknál $10 \div 100 \mu\text{m}$ körül van. Az impulzusos C—V mérésnél a kiürült tartomány vastagsága $1 \div 10 \mu\text{m}$ között mozog, ezen belül az inverziós réteg vastagsága — ami nyilván a felülettel legszorosabb kapcsolatban van — $20 \div 200 \text{Å}$ nagyságrendű. Ezen adatok jellemzik e mérés térbeli felbontó képességét. Láthatóan a felülethez közeli azon centrumok, melyek a PME mérésnél még egyértelműen felületi centrumként szerepelnek, az impulzusos C—V mérésnél viszont már térfogati centrumokat jelentenek. Ha figyelembe vesszük az inverziós réteg igen nagy töltéshordozó sűrűségét,



3. ábra

a számítások olyan kicsi felületi generációs sebességet adnak, hogy nyilvánvalóvá válik az, hogy máshol kell keresnünk a kísérleti görbéből eddig felületi generációs sebességként kapott paraméter fizikai értelmét. Az MFI vizsgálatait azt mutatták, hogy homogén térbeli centrumsűrűség esetén gyakorlatilag az ideális relaxációs görbe adódik, azzal a különbséggel, hogy az eddig felületi generációs sebességként értelmezett paraméter a térfogati centrumok egyszerű függvényével értelmezhető. A vizsgálatokat inhomogén centrumeloszlás esetére kiterjesztve, azt kapták, hogy így már a legegyszerűbb inhomogenitás feltételezésével is, a kísérleti görbék értelmezhetővé válnak.

A számított görbék egy csoportja a 3. ábrán látható. Ezek a kiürült tartomány vastagságának függvényében ábrázolják a kisebbségi töltéshordozócsomag generációs sebességét a felülethez exponenciálisan növekvő ($\exp(\lambda x)$ -szerű) centrumsűrűséget feltételezve, a λ paraméter különböző értékeinél. Ilyen típusú generációs centrum inhomogenitást többek között szennyezőknak az oxid rétegből vagy az oxid rétegen keresztül a félvezetőben való diffúziója, vagy a mechanikai előkészítés hatására a felülethez közel megnövő rácshiba sűrűség, stb. hozhat létre.

c) A kievi intézetben többek között mikroellipszometriás mérésekből arra a következtetésre jutottak, hogy a szilícium termikus oxidációja során az oxid alatt vékony amorf réteg alakul ki. Intézetünk az együttműködés keretében vállalta ennek a jelenségnek alacsonyenergiájú elektron diffrakció (LEED) és nagyenergiájú elektrondiffrakció segítségével történő ellenőrzését. Mindkét módszerrel negatív eredmény adódott, a felvételeken nem jelentek meg, amorf anyagra jellemző ábrák. Ebből arra lehet következtetni, hogy az

amorffá válást nem egymagában a termikus oxidáció okozza, hanem valamely más, ismeretlen, nem kontrolált paraméter játszik meghatározó szerepet.

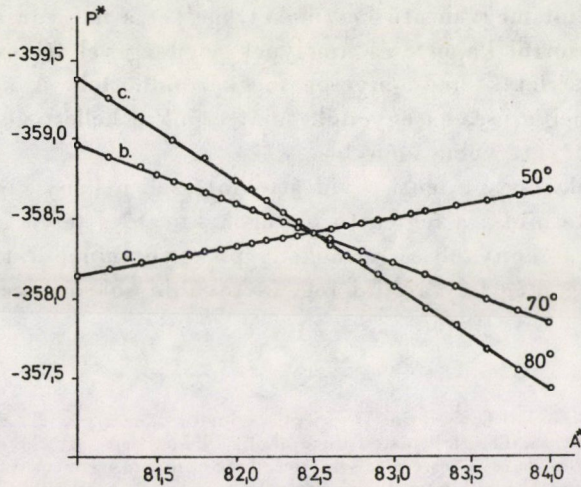
d) A töltéstovábbításon alapuló eszközök előállítására és vizsgálatára terén a MFI az alábbi előrehaladást érte el. Megtervezett egy 8-bites CCD tolotárolót és kidolgozta ennek készítési technológiáját. Ez bitenként 95%-os átviteli határfokkal működik. Ezen az eszközön tanulmányozzák a különböző technológiai kérdéseket, az eszköz működési sajátosságait, és a CCD eszközök meghajtásához szükséges elektronikus berendezések konstrukcióját.

Vizsgálatokat végzett a resistive gate alkalmazására vonatkozólag, és megállapította, hogy ez jelentősen javítja az eszköz átvitelét és a töltéstovábbítást nagy gate távolságok esetén is lehetővé teszi.

Megkonstruálták egy kétfázisú MNOS CCD-t, amely kiküszöböli a kapuk közötti potenciálgátát és feleslegessé teszi a nagyon közeli fémfegyverzetek alkalmazását. Az eszközt a MFI szabadalmaztatta, és azt kutatói az 1972-es müncheni ESSDERC konferencián ismertették.

e) Az együttműködés kapcsán új ellipszométer beállítási módszert dolgoztak ki. Az ellipszométer polarizációs spektrométer, amely elsősorban felületi vékonyrétegek (pl. szilíciumoxid, szilíciumnitrid, germániumoxid, stb.) vastagságának és törésmutatójának meghatározására szolgál. Ennek alapján ma már az ellipszométer a szilícium és germánium felületek, az MOS rendszerek vizsgálatának elengedhetetlen eszköze. Ahhoz, hogy az ellipszométerrel kellő pontosságú méréseket végezhessünk, feltétlen szükséges, hogy a mérések előtt nagy pontossággal határozzuk meg a polarizátor, illetve analízátor skálák 0 helyzetét, azaz azt a helyzetet, amikor ezek polarizációs síkja a fény beesési síkjában fekszik. Az itt előforduló legkisebb hiba is —, különösen, ha tekintetbe vesszük, hogy a polarizátorok a gyakorlatban sohasem tökéletesek és ezért a belőlük kilépő fény mindig kismértékű ellipticitással is rendelkezik, a mérési eredmények nagymértékű pontatlanságát eredményezheti. Ezért a beállítás elvégzésére számos módszert dolgoztak ki, és javasoltak. A MFI új beállítási módszert alakított ki, amely az előzőekkel ellentétben figyelembe veszi a polarizátoron kívül az analízátor hibáját is, és a mérések végzése közben is nagyon egyszerű beállítást tesz lehetővé. Meghatározta a kompenzátor nélküli ellipszométerben a fotodetektorra eső fény intenzitását. Az így nyert összefüggések alapján a beállítást a következő módon kell elvégezni:

Eltávolítjuk az ellipszométerből a kompenzátor, és a minta helyére egy dielektrikumot pl. üvegtükröt helyezünk. Ezután a beesés síkjára megközelítően merőleges síkban rögzített analízátor álláshoz a polarizátor forgatásával meg kell keresnünk a minimális fényintenzitás helyzetét. A mérést több közeli analízátor állásnál megismételve, a skálán leolvasott A^* analízátor és P^* polarizátor azimutoknak megfelelő pontok az $A^* - P^*$ koordináta-rendszerben egy egyenest határoznak meg. A fenti mérést több beesési szög



4. ábra

mellett megismételve (a nagyobb pontosság érdekében a Brewster szög két különböző oldalára eső szögekkel) újabb egyenesek adódnak. Egy ilyen beállításnál kapott mérési eredményeket láthatunk a 4. ábrán. Ezen a megfelelő beesési szög 50° , 70° és 80° voltak. A kapott egyenesek egymást egy pontban metszik, ez a pont felel meg a polarizátor tényleges nulla helyzetének és az analizátor 90° -os azimutjának. Ezt a megfelelő skálaértékekkel egybevéve, a skálák eltolódását azonnal megkapjuk, és így a beállítást elvégzettnek tekinthetjük.

Ebben a harmadik időszakban folytatódott az együttműködés a lenigrádi Joffe Intézettel is. Itt az 1971–72. években SOMOGYI Károly tett tanulmányutat. Az együttműködés keretén belül a p-GaP tömbkristályok galvanomágneses tulajdonságait vizsgálták. Ennek megfelelően mérték a Hall-állandó és a vezetőképesség hőfok-függvényét.

Az együttműködéshez kapcsolódik a GaP izoelektromos analógjának, a ZnGeP_2 -nak vizsgálata is, SOMOGYI számára lehetővé vált, hogy a nagyellenállású p- ZnGeP_2 -on viszonylag széles hőmérsékleti tartományban tudja mérni a Hall-effektust és az elektromos vezetőképességet. Vilniusban ugyanis rendelkezésre bocsátottak egy olyan mérőberendezést, amellyel $10^{12} \div 10^{13}$ ohm cm fajlagos ellenállás esetén is mérhető a Hall feszültség és a vezetőképesség. A vizsgálatok világviszonylatban is egyedülálló eredményekhez vezettek: a Hall feszültség 130 K-ig mérhető volt, és mérhetőek voltak anomális tulajdonságok is. Ezek az eredmények most vannak közlés alatt.

Jelenleg rendkívül fontos formája az együttműködésnek a kísérleti anyagok és minták, mérések céljából való kicserélése, de még ennél is fontosabb egyes kísérleti eszközök használatra való átadása. Itt kell megemlítenünk azt

az ionimplantációt megvalósító készüléket, melyet a magyar KFKI a szovjet Kurcsatov Intézettől kapott, és amelynek segítségével félvezetőkön az ionimplantációs kísérletek eredményesen megkezdődhettek. A készülék elkészítése és üzembehelyezése, ha egyedül, saját erőnkre kellett volna támaszkodnunk, több évet vett volna igénybe.

Azt hisszük, hogy a fenti rövid áttekintéssel, néhány kiragadott példán sikerült érzékeltetnünk, a félvezető anyagok kutatása terén azt az egyre fokozódó, egyre hatékonyabb és termékenyebb együttműködést, amely a jövőben remélhetőleg még folytatódni fog, és további sok, értékes, új eredmény elérését fogja lehetővé tenni.

Hungarian—Soviet Cooperation in Semiconductor Reserach. There were three periods in the cooperation. The first lasted until about 1955, when only the scientific results of the partner were studied; results were taken over, developments were continued and new ideas were born. The contacts were bilateral. The second phase lasted until about 1970; many of the younger research workers of the Technical Physics Institute of the Hung. Ac. of Sci., e.g. Judit PFEIFER, Béla RÖSNER, the NÉMETH couple etc. stayed for longer study trips in the SU, and others were studying at Soviet Universities. These trips and university studies helped the Technical Physics Institute very much in starting semiconductor research. Bilateral research agreements were concluded between the scientific institutions of the two countries, close exchange of experience and of research workers came about, and numerous common results were born.

Ungarisch—Sowietische Zusammenarbeit in der Halbleiterforschung. Die Zusammenarbeit umfaßt drei Perioden. Die erste dauerte bis ungefähr 1955; bloß die Literatur und die beiderseitigen wissenschaftlichen Ergebnisse wurden studiert. Auf dieser Grundlage wurden Ergebnisse übernommen, Weiterentwicklungen fanden statt und neue Ideen wurden geboren. Die Kontakte waren zweiseitig. Die zweite Periode dauerte bis ungefähr 1970; damals waren schon viele der jüngeren Forscher aus dem Technisch Physikalischen Forschungsinstitut der Ung. Ak. d. Wiss. für längere Studienreisen in der Sowjetunion, z. B. Judit PFEIFER, Béla RÖSNER, das Ehepaar NÉMETH usw., während andere in diesen Jahren an den dortigen Universitäten studierten. Diese Reisen und Studien halfen dem Technisch-Physikalischen Forschungsinstitut in großem Maße, die Halbleiterforschung in Gang zu setzen. Im dritten Abschnitt der Beziehungen kommen zwischen den wissenschaftlichen Instituten der beiden Länder zweiseitige Zusammenarbeitsverträge zustande. Der Erfahrungs- und Personenaustausch ist intensiv, und zahlreiche gemeinsame Forschungsergebnisse werden geboren.