

A HAZAI FÉLVEZETŐFIZIKAI ALAPKUTATÁSOK*

SZIGETI GYÖRGY

AKADÉMIKUS

A szilárdtestek fizikája az utolsó évtizedekben olyan eredményeket ért el, amelyek az ipar számos területén alapvető változásokra vezettek. Ezen a területen hazánkban is intenzív kutatás folyik; ma ennek egy kiragadott részével kívánok csak foglalkozni. Így nem beszélek a szilárdtestek kötésére vonatkozó alapvető eredményekről, amelyeket GOMBÁS PÁL most megjelent „Pseudopotentiale” című könyvében foglalt össze; ugyancsak nem térek ki a fém-fizika, kohászat, mágneses anyagok, az alkáli-halogenidek vonatkozásában elért eredményekre, amelyek egy része ezen ülészak során más előadásokban kerül ismertetésre. Ugyancsak nem foglalkozik előadásom sok más érdekes téma mellett a *Szegedi József Atila Tudományegyetemen* félvezető anyagokkal kapcsolatban folyó kutatásokkal sem, amelyek eredményeinek kibontakozása későbbre várható.

Félvezető anyagok alkalmazása az elektronikában egyáltalán nem tekinthető újnak, hiszen már kb. fél évszázaddal ezelőtt, a rádiózás hőskorában használták a mai félvezető diódák legegyszerűbb változatát, a kristálydetektorokat; már 1924—28 között foglalkozott és leírta LOSZEV a SiC kristályokon észlelt elektrolumineszkáló fényjelenséget, az ezzel egyidejűleg mutakozó negatív feszültség—áram karakterisztikát és a tűkontaktusú kristályokon fellépő oszcillációkat — a mai Gunn-diódák ősfarmáját.

Időközben az elektroncsövekkel elért óriási sikerek egy időre teljesen háttérbe szorították a félvezetők használatát és az idevágó kutatómunkát. Talán csak a rézoxidul és szelén egyenirányítók és fényelemek voltak azok a félvezető eszközök, amelyek mutatták, hogy ezen a területen még óriási lehetőségek állnak nyitva.

A tranzisztornak BARDEEN, BRATTAIN és SHOCKLEY által 1948-ban történt felfedezése azonban újra lángra lobbantotta e kutatást, és utat nyitott egészen új félvezető eszközök kifejlesztésére. Ma már nemcsak az elektronikában játszanak döntő szerepet a félvezető eszközök, hanem a félvezető áram-

* Elhangzott a Magyar Tudományos Akadémia 1967. évi közgyűlése alkalmából a Műszaki Tudományok Osztálya, valamint a Matematikai és Fizikai Tudományok Osztálya közös rendezésében tartott „Szilárd testek kutatása” tudományos ülészakon, 1967. május 4-én.

irányító nélkülözhetetlen eszköze az erősáramú technikának is, és forradalmasította pl. a villamos és Diesel-villamos mozdonyok konstrukcióját.

Visszatérve az elektronika területére, érdemes megemlíteni, hogy az Amerikai Egyesült Államok 1966. évi elektronikai célokat szolgáló félvezető eszköz fejlesztése az egyedi diódák és tranzisztorok irányából (eltekintve a mikrohullámú területen alapvetően fontos, de viszonylag kis darabszámban szükségelt varaktor diódáktól és az oszcillátorként használt Gunn-diódáktól) mindinkább az ún. integrált áramkörök felé tolódik el. (Ezek exportja az Amerikai Egyesült Államokból 1965-ről 1966-ra 5,5-szeresére nőtt, míg a teljes félvezető eszköz export növekedése csak kb. 1,6-szeres.) Az alkalmazott technika lényege ma már a legkorszerűbb planáris tranzisztoroknál és integrált áramköröknél egyaránt az, hogy a kívánt elektródelrendezés vagy áramkör rajzát nagyméretű ábráról kicsinyítve, fényképszeti úton viszik fel a simára csiszolt és megfelelő fényérzékeny réteggel bevont félvezető egykristály-lapka felületére, és a keletkező ábra szerint maratják vagy oxidálják a félvezető felületet. Hasonló eljárással egy vékony lemez felületére fényképezik azt az ábrát, amelynek megfelelően a lemez maratásakor keletkezett nyílásokon át újabb félvezető-, fém- vagy oxidréteget lehet az eredeti félvezető lapkára párologtatni. A félvezető felületre párologtatott megfelelő fémréteget lehet azután hőkezeléssel a félvezetővel ötvözni, vagy esetleg abba a kellő mélységig diffundáltatni.

Ezzel a technikával lehet a tranzisztorokon és diódákon kívül ugyanazon a pár mm² felületű, kb. 1/10 mm, vagy ennél is vékonyabb lapkán az áramkör passzív elemeit: a kondenzátorokat és ellenállásokat és az ezeket összekötő vezetékeket is előállítani. Ez a technika — mely jelenleg a legkorszerűbb irányt jelenti — van hazánkban is kifejlesztés alatt az *Egyesült Izzólámpa és Villamossági Rt*-nél. Az eszközök kidolgozására igen komoly ipari kutatás folyik az említett vállalatnál és a vele együttműködő *Híradástechnikai Ipari Kutatóintézetben*. Ez az eszközfejlesztő kutatás azonban nem támaszkodhat kizárólag az irodalomból merített alapkutatási eredményekre, szükség van arra is, hogy egyes kritikus kérdésekben saját alapkutatást is folytassunk egyrészt az ipar és ipari kutatás intézményein belül, másrészt a „főfoglalkozásszerűleg” alapkutatással foglalkozó, de az iparral és ipari kutatással legszorosabb együttműködésben dolgozó intézményekben.

Igen alapos megfontolásra volt szükség, hogy kitűzzük azokat az alapkutatási szempontokat, amelyek az ipar számára, figyelembe véve a jelenlegi helyzetet és a várható perspektivikus fejlődést, a legfontosabbak, és amelyek irányában a rendelkezésre álló erők és eszközök kellő koncentrációjával eredmény kilátásával kutatnunk kell. Világos, hogy erőnk korlátozott volta miatt nem vállalhattuk, hogy minden témában hazai intézményekben fogunk kutatást kezdeni, hanem a KGST-ben tömörült országok kutatóintézményeinek eredményére is kell számítanunk. Itthon azokat a témákat műveljük,

amelyek terén a hazai iparral való legközvetlenebb együttműködés kívánatosnak, lehetségesnek és a legeredményesebbnek látszik.

Mindezek figyelembevételével tette az Akadémia *Műszaki Fizikai Kutató Intézete* alapkutatási programjának súlyponti kérdésévé a félvezetők felületi jelenségeinek kutatását, továbbá a félvezető kristályok hibáinak és ezeknek a fizikai tulajdonságokra gyakorolt hatásainak vizsgálatát.

A felületek vizsgálata és az itt lejátszódó jelenségek kutatása ad betekintést a fentiekben vázolt technológia alapjelenségeibe, de — mint az könnyen belátható — a kész eszközök felületén lejátszódó jelenségeknek van döntő szerepe az eszközök időbeli stabilitása és élettartama szempontjából is.

A félvezető egykristályokban fellépő hibák viszont a gyártás egyenletességét, a reprodukálhatóságot és a selejt alakulását befolyásolják döntően. Különösen fontos annak ismerete, hogyan keletkeznek az egyes hibafajták, továbbá az alapkristály különféle hibáinak mi a szerepe az eszköz működése szempontjából (pl. a hőkezelésnél egyes szennyező- vagy adalékanyagok a kristályban levő diszlokációk mentén sokkal gyorsabban mozognak, mint a hibátlan kristályrácson keresztül; a kristályon áthaladó töltéshordozók a hibahelyeken szóródnak, felületi hibákon visszaverődnek, de az eredetitől eltérően át is hatolhatnak).

A következőkben a fenti szempontokat, mint kiindulási alapot tekintve, szeretnék a hazai félvezetőfizikai alapkutatás néhány eddig elért eredményéről és ezek további kilátásáról szólni, anélkül, hogy teljességre törekvő beszámolót kívánnék az idevágó munkákról adni.

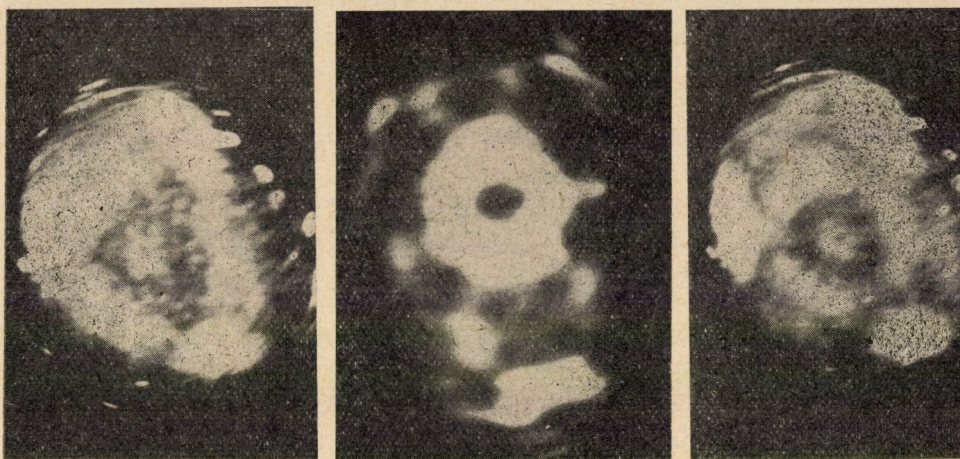
A felületi jelenségek vizsgálatánál célul tűztük ki elsősorban lehetőség szerint tiszta félvezető felületek előállítását és ezek vizsgálatát ugyancsak a lehetőség szerint jó vákuumban. Második célkitűzésünk volt a felület és környezetének kölcsönhatását tanulmányozni, vizsgálni különféle atmoszférák hatását a felületre, és tanulmányozni az egyes kémiai és fizikai kezelések (maratás, hőkezelés) hatásait.

A Híradástechnikai Ipari Kutatóintézetben ERNST LAJOS ultravákuumban térdeszorpció segítségével germániumcsúcsokat tisztított le a F. G. ALLEN által leírt módszer szerint, és a Müller-féle téremissziós mikroszkóppal figyelte meg a germániumcsúcs felületéről kapott képet. Az állandó téremissziós áram létrehozásához szükséges térerősség változásának regisztrálásával kvantitativ követni tudta az adszorbeált oxidréteg térdeszorpcióját [1]. Ezt a módszert továbbfejlesztve elsőnek sikerült neki 10^{-6} – 10^{-8} Torr nyomástartományban az atomosan tiszta germániumfelület oxigénadszorpcióját kvantitativ követni és az adszorpciónak az egyes kristálytengelyek szerinti különbségét kvantitativ meghatározni. Ugyancsak kvantitativ tudta követni ezzel a módszerrel a magasabb hőfokon bekövetkező felületi atomvándorlást is (1. ábra) [2].

Ezen vizsgálatok azt is világosan mutatják, hogy „atomosan tiszta” germániumfelület még az eddig előállítható legjobb vákuumok esetén is csak percekig létezhet (10^{-8} Torr nyomáson másodpercekig).

E kísérleti eredmények és más szerzők, más módszerekkel végzett vizsgálatai is egyértelműen azt bizonyítják, hogy a gyakorlatban feldolgozásra kerülő germániumfelületek kb. 10–30 Å vastagságú oxidréteggel vannak borítva.

Különféle eredetű kész félvezető eszközöket vizsgálva BODÓ ZALÁN vezetésével PATAKI GYÖRGY és LŐRINCZY ANDRÁS arra a következtetésre jutottak, hogy a visszáramnak átvezetés jellegű, időben változó komponensének hőmérséklettel való változása rendkívül hasonló a jég vezetőképességének hőfokfüggéséhez [3, 4]. Ezen felismerések alapján a *Műszaki Fizikai Kutató Intézet* és a *Híradástechnikai Kutató Intézet* kutatói összehangolt, szisztematikus munkába kezdtek, és megállapították, hogy a félvezető felületek állapotát illetve annak változásait a rajta levő oxidréteg és adszorbeált vízréteg kölcsönhatása határozza meg.



a)

b)

c)

1. ábra

Az így nyert ismeretanyag birtokában a kutatásokba bekapcsolódó és együttműködő Egyesült Izzónak félvezetőfejlesztési csoportja a pár évvel ezelőtt elég instabilnak mutató tranzisztorainak megbízhatóságát a világszínvonalra tudta emelni. Az *Egyesült Izzólámpa és Villamossági Rt.* saját laboratóriumában tovább folytatja kutatásait a Ge- és Si-felületek adszorpciós tulajdonságainak vizsgálatára, a lassú és gyors állapotok kémiai modelljének és a félvezető határfelületeken lejátszódó elektrokémiai jelenségeknek tisztázása céljából. Erről részletesebben majd GIBER JÁNOS fog beszámolni.

A *Műszaki Fizikai Kutató Intézetben* NÉMETH TIBORNÉ, LŐRINCZY ANDRÁS és FARKASNÉ JAHNKE MÁRIA megállapították, hogy az az oxidréteg, amely az általánosan használatos félvezető technológiai felületkezelési eljárások során keletkezik, hexagonális struktúrájú. (Ilyen eljárások a szokásos lúgos perhidrolis kezelés, szuperoxolos kezelés, termikus oxidálás stb.)

A 2. ábrán ilyen felületkezelés utáni minta elektrondiffrakciós képe látható, amely tiszta hexagonális struktúrát mutat.

Miután megállapítást nyert az, hogy a hexagonális struktúrájú oxidból kiinduló párologtatott réteg csak időlegesen amorf struktúrájú, de az idő során visszaalakul hexagonálissá, kísérletet végeztek el tokozatlan félvezető eszközök vastag párologtatott oxidréteggel való megvédésére.

Azt az eredményt kapták, hogy kis relatív nedvességtartalmú környezetben a paraméterek időben állandóak voltak. Komolyabb környezeti behatás esetén azonban (huzamosabb idejű vízgőzbehatás) ez az oxidréteg nem nyújt védelmet.

A por alakú, hexagonális módosulatú germániumdioxid — méréseink szerint — mintegy 2% vizet tartalmaz adszorbeálva, illetve kemoszorbeálva normál körülmények között (szoba-hőmérséklet, 70% relatív páratartalom).



2. ábra

Mindezek alapján azt a következtetést vonhatták le, hogy a hexagonális germániumdioxid a germánium felületét illetően nem stabil, oldható, vizet adszorbeálva a felületen ionos vezetést, „channel” mechanizmus felléptét segítheti elő.

A félvezető eszközök készítésénél korábban valóban jelentkezett a tokozásnál bezárt nedvesség káros hatása. E jelenség elleni védekezés gyakorlata több módszert ismer, amelyek közül a töltőanyagok (szilikon zsír), valamint vízkötő anyagok alkalmazása (szilikagél) közismert.

Kevésbé ismeretesek azok a módszerek, amelyek a víz inaktíválására különféle kémiai reakciókat használnak.

E munkahipotézis alapján végezték el a kísérletsorozatot a kinon—hidrokinon hatásmechanizmusának tisztázására.

A kísérleteket tranzistorokon végezték, a kvantitatív eredmények egykristálylapokon végzett mérésekből adódtak. E vizsgálatokkal a felületek stabilitásában legfontosabb szerepet játszó paraméterekre (rekombinációs

sebesség, visszáram, felületi potenciál stb.) kaptunk felvilágosítást. Megállapítást nyert, hogy a felületre jutó kinon kedvezően befolyásolja a felületi rekombinációs sebesség értékét. Az eredmények a kinon—hidrokinon redox rendszer kémiai egyensúlyának kialakításával, valamint a hidrogénhidak képződésével immobilizált víz ionvezetőképességének csökkenésével értelmezhetők [5].

A mechanikailag kialakított félvezető felületek kémiai előkészítése több feltételt kell hogy kielégítsen. Ilyenek: meghatározott vastagság, alak elérése, a felületi érdesség minimális értéken tartása, előzetesen kialakított diffúziós réteg védelme stb. E feladatok elérésére a Műszaki Fizikai Kutató Intézet kémiai eljárásokat dolgozott ki [6—8].

Véleményünk szerint a legtökéletesebb megoldás az, ha a germánium vagy az abból készült eszközök felületén olyan, közel szigetelő védőréteget alakítunk ki — a germánium tetragonális szerkezetének homogén folytatásával — amely újabb felületi állapotokat, hibákat nem hoz létre és a környezeti behatásokra nézve extrém körülmények esetén is inaktív marad. Ilyen tulajdonságú a tetragonális módosulatú germániumdioxid.

Tapasztalataink szerint a tetragonális germániumdioxid vízben nem oldódik, vizet nem adszorbeál, még a drasztikus kémiai behatásnak, mint pl. hidrogénfluorides kezelésnek is ellenáll, sőt magas hőmérsékletű és nagy nyomású vízgőzzel szemben is nagyfokú stabilitást mutat, szemben a hexagonális módosulattal.

Ezek a tények, valamint az ebben az irányban folyó széleskörű nemzetközi kutatás arra mutatnak, hogy a tetragonális dioxid kialakítása jelenti a felület stabilizálásának megoldását.

Vizsgálatok folynak a Műszaki Fizikai Kutató Intézetben és tanulmányozzák azokat a kísérleti körülményeket, amelyek között a hexagonális germániumdioxid módosulattól annak tetragonális formája állítható elő.

Az átalakítás körülményeinek tanulmányozása során csak érintőlegesen foglalkoztak a mineralizátorok és ionkatalizátorok hatására bekövetkező módosulátváltásokkal, minthogy ezek az oxid ionos szennyezőtartalmát, ezen keresztül ezek vezetőképességét nagymértékben megnövelik.

Ezzel szemben ismeretes, hogy a hexagonális módosulat kvantitatíve áttranszformálható tetragonális módosulattá, vízzel katalizált folyamatban.

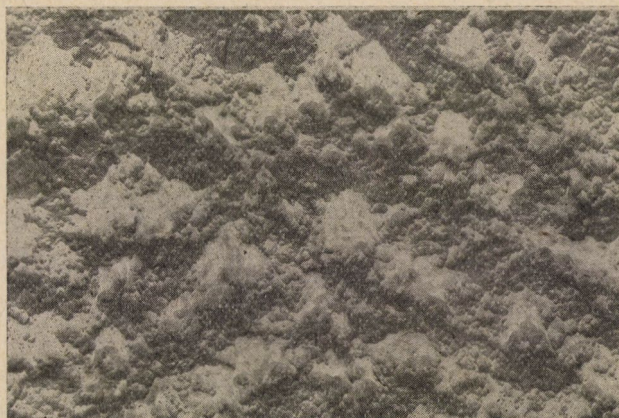
A vizsgálatok során megállapították, hogy a vízkatalízis extrém körülményei mérsékelhetők, pl. más nem ionos komponens alkalmazásával.

Annak ellenére, hogy az átalakulás mechanizmusa teljes egészében még nem tisztázott, reményteljesnek látszik annak megoldása, hogy a technológiai gyakorlatban alkalmazható körülmények között a tetragonális oxid kialakítható.

A kísérletek végcélja természetesen nem az átalakulás mechanizmusának tisztázása csupán, hanem ennek felhasználása tetragonális stabilizáló felületi rétegek kialakítására.

Éppen ezért megvizsgálták azokat a körülményeket, amelyek között a germánium felületén oxidréteg alakítható ki. Megállapították, hogy a termikus és elektrokémiai oxidációval kialakított felületi filmszerkezet nagymértékben a germánium inhomogenitásainak függvénye, és így előnytelen.

Különleges kémiai maratások esetén, az eddigi kísérletek szerint lehetőség van tetragonális módosulat előállítására is, azonban csak nagymennyiségű amorfmódosulattal együtt.



3. ábra

A 3. ábra ilyen felület 70 000-szeres elektronmikroszkópos képét mutatja, míg ugyanennek a felületnek elektrondiffrakciós képét a 4. ábra szemlélteti.

A tetragonális oxid módosulat legmegbízhatóbb előállításának a hidrotérális módszer mutatkozik. Ezzel a módszerrel tiszta formában sikerült a tetragonális oxidot előállítani a germánium felületén.

Az átalakítási körülmények jelenleg olyanok, hogy azok közvetlenül félvezető eszközöknél, illetve üzemi technológiánál nem alkalmazhatók.

A Műszaki Fizikai Kutató Intézet vizsgálatai olyan irányban is haladnak, hogy csökkentsék az előállítási hőmérsékletet. Az eddigi vizsgálatok nem zárják ki, hogy a módszer alkalmazhatósága félvezető eszközökre is kiterjeszhető lesz.

Az eddigiekben azokról a kísérletekről volt szó, amelyek segítségével bizonyos mértékig sikerült stabilizálni a germánium kristályfelületét. Az irodalomból ismert, hogy hasonló problémák merülnek fel szilíciumegykristályoknál, illetve szilícium alapanyagú félvezető eszközöknél is. Itt amerikai folyóiratok [9] szerint a legutóbbi időben sikerült eredményt elérni oly módon, hogy a kész szilícium félvezető eszköz felületét SiN réteggel vonták be. Az ily módon védett tranzisztorok vagy integrált áramkörök állítólag tartósan bírják az atmoszferikus behatásokat, és stabil eszközök készíthetők tokozás nélkül, csak műanyagba való beágyazás mellett.

A felületek, a felületeken adszorbeált rétegek vizsgálata igen sok gondot okoz a kutatóknak.

Igen tiszta felületek vizsgálatára például alkalmas módszer a fentiekben már említett téremisszós leképezése a felületnek. Végeztek vizsgálatokat a felület kilépési munkájának meghatározására kontakt-potenciál mérése segítségével. Sok publikáció jelent meg tiszta félvezető felületeken adszorbeált vékony rétegeknek a kisenergiájú elektrondiffrakcióval történő vizsgálatáról.

A Műszaki Fizikai Kutató Intézetben a fotoáram mérése, illetve a fotoáram megindulásához szükséges határhullámhossz mérése útján próbálják a félvezetőfelület kilépési munkáját és így a felület minőségét kvantitatíve meghatározni.

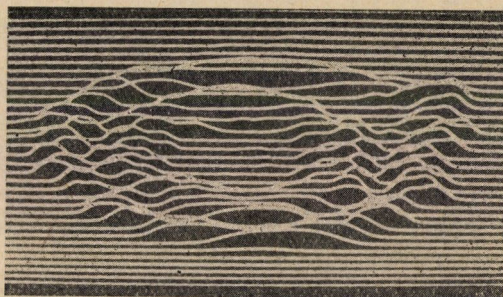


4. ábra

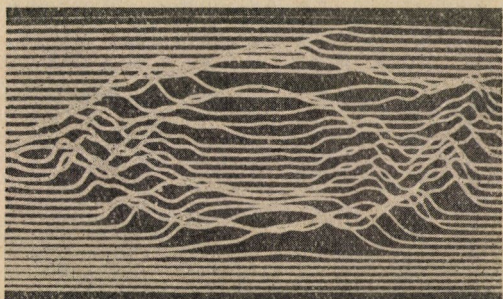
A Híradástechnikai Ipari Kutató Intézetben TIHANYI JENŐ és PÁSZTOR GYULA [10] dolgoztak ki egy rendkívül szemléletes és hasznos módszert.

Módszerük lényege abban áll, hogy mikroszkópon át egy Nipkov-tárcsa segítségével fénysugárral végigtapogatják a vizsgált félvezető felületet, és a keletkező fotofeszültséget egy képernyőre viszik. Ily módon rétegvonalszerűen megkapják a felület jellegzetes képét. Vizsgálataikból a HIKI-ben készült Si planáris tranzisztorok stabilitására, az atmoszferikus hatások okozta változásokra, továbbá a bediffundáltatott adalékanyagok eloszlására vontak le fontos következtetéseket. Felvételeik közül néhányat az 5. és 6. ábrák mutatnak. Ez a vizsgálati mód, mint látható, a gyártás rendszeres ellenőrzésére is alkalmas lehet.

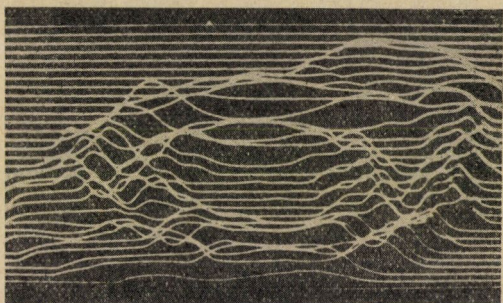
A kutatások másik vonala a felületek továbbépítését vizsgálja, félvezető vagy más felületeken képződő vékony kristályos rétegek keletkezési és növekedési mechanizmusának feltárását célozza. Az ez irányú kutatások hivatottak előmozdítani az ún. epitaxiális kristálynövekedés megismerését, amelyre jellemző, hogy az alapkristályéval azonos orientációjú kristály nő egy kristályfelületen. A növekmény lehet a hordozó kristállyal azonos anyag, de attól különböző is. Ez utóbbi esetben heteroepitaxiáról beszélhetünk. A heteroepi-



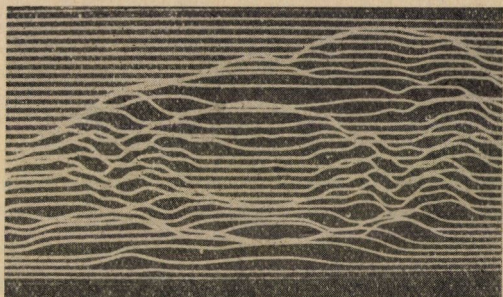
a)



b)



c)

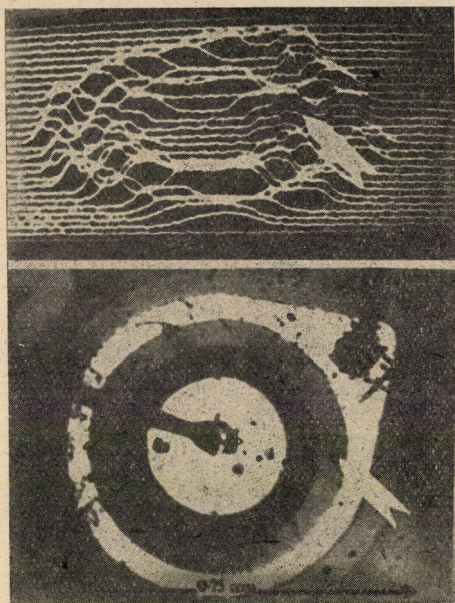


d)

5. ábra

taxia és különösen a hetero-átmenetek vizsgálatától még érdekes eredményeket várunk.

A félvezető egykristály epitaxiális növesztésére a leggyakrabban általában az ún. transzport reakciókat használják, amelynek lényege, hogy a hordozó vagy alapkristály felületén egy kémiai reakció megy végbe, és a reakciótermék, az elemi félvezető vagy a kívánt intermetallikus félvezető vegyület a hordozó kristály felületén visszamarad, a hordozó egykristályt továbbépíti. A felületen



6. ábra

lezajló folyamat a félvezető elemet tartalmazó vegyület hőbomlása vagy redukciós bomlása. (A gyakorlatban a félvezető halogenidek hidrogénes redukciója a legelterjedtebb.)

Ennél a folyamatnál a reakció körülményeitől függően a transzport iránya meg is fordulhat, mikor is a reakció a felületet a különböző szennyezőktől és az adszorbeált oxidrétegtől megtisztítja, és ilyen módon a hordozó kristály struktúrájának megfelelő réteg akadálytalanul képződik.

Más a helyzet abban az elvileg sokkal egyszerűbbnek látszó esetben, amikor az epitaxiális növesztést vákuumban próbáljuk meg. Még igen jó vákuumban is nagyon nehéz feladat a felület megtisztítása az adszorbeált szennyezőktől és az oxidrétegtől. De ha a tisztítás meg is történt, akkor is rövid a tiszta felület élettartama. Viszont a kristályfelületekről ez az eljárás igen sok új információ megszerzését teszi kilátásossá. Éppen ezért a Műszaki

Fizikai Kutató Intézet a transzportreakcióval történő epitaxiális növesztés mellett a vákuumpárolgatatási módszert is programjába iktatta.

Ezt a munkát 1962—63-ban kezdte meg az intézet. Az első megválaszolható kérdés akkor az volt, hogy alkalmas-e a vákuumpárolgatatás epitaxiális növesztésre. Ez a kérdés, hogy ha alkalmas, hogyan, ha nem, miért nem, világszerte foglalkoztatta a kutatókat, tekintettel arra, hogy vákuumpárolgatatásnál segédanyag, hordozógáz, egyéb idegen reakciópartner nem szükséges, valamint a hordozó kristály és a növekmény különböző anyag is lehet. A PFEIFER JUDIT által megkezdett elektronbombázással kombinált Ge-növesztési kísérlet [11] újszerű módon és egyértelműen igazolta, hogy a vákuum-epitaxia lehetséges, de ugyanakkor felhívta a figyelmet a radikális felülettisztítási eljárás és a ráépült réteg jellegzetes morfológiai hibái közötti összefüggésre.

A Műszaki Fizikai Kutató Intézet jelenleg a vákuum-epitaxiával kapcsolatos kérdéscsoportból az alábbiakkal foglalkozik: A reális — tehát oxidréteggel borított — felületeken végbemenő kristálynövekedés sajátosságai, mechanizmusa. Itt különbséget kell tennünk az egyes atomok vagy atomi rétegek beépülési mechanizmusa és a makroszkópos réteg felépülése között. A rétegnövekedés időben végbemenő folyamat, és a felületre ütköző első atomok általában teljesen más helyzetben vannak, mint a későbbiek. A réteg kialakulásának, felépülésének ideje alatt a réteg kristályos és elektromos tulajdonságait befolyásoló körülmények mind kedvező, mind kedvezőtlen irányban eltolódhatnak, éppen a réteggel és egymással való kölcsönhatásaik eredményeképpen. Ha pl. a maradék gáz sok oxigént tartalmaz, és a párolgatatás lassú, a félvezető kristály oxidos felülete folytonosan regenerálódik. Ha a párolgatatást ultravákuumban az előbbi példával azonos sebességgel végezzük, az első valamilyen módon kialakult összefüggő kristályréteg felülete már tiszta, a további ráépülés tiszta felületre történik, de természetesen lehet már a kiindulási felület is tiszta. Maga a párolgatatási sebesség, a növekedési sebesség, mint a kristálytulajdonságokat befolyásoló tényező viszont olyan értelemben is hat, hogy a lassabban növekvő réteg atomjai feltehetően nagyobb valószínűséggel épülnek be az optimális helyre.

E példákban ismertetett és egyéb paramétereknek a változtatásával különböző módon végrehajtott növesztések és az eredményezett rétegek sajátosságainak vizsgálatával, egybevetésével kell majd következtetnünk arra, hogy mi is történik valójában a tisztítatlan felületen levő oxidréteggel.

A reális felületen végbemenő növekedés sajátosságai, az eredményezett kristályos réteg hibái szoros összefüggésben vannak a második problémakörrel, amellyel az intézet ezen téma keretében foglalkozik. Ez az epitaxiális rétegekben fellelhető jellegzetes kristályhibák vizsgálata. Itt elsősorban az elektromos- és hővezetőképesség, illetőleg különböző adalékanyagok diffúzió-állandójának az epitaxiálisan nőtt rétegben mért értékeit és a réteg szerkezetét, kristályhibáit vetjük egybe. A transzportjelenségeknek a rétegekben való vizsgálata

természetesen nemcsak a rétegek szerkezetének, hanem maguknak a transzportjelenségeknek a jobb megismerését is eredményezi.

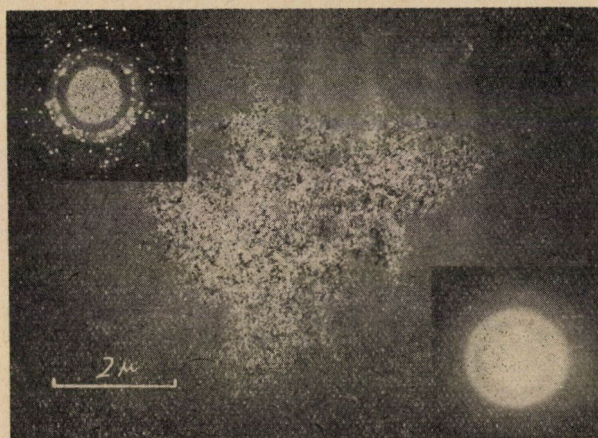
A harmadik problémakör az epitaxiális rétegnövesztésnek kizárólag a vákuum módszerével, mégpedig az ultravákuum körülmények között párologtatott félvezető rétegek felületével kapcsolatos. A reális félvezető felületek nagy gyakorlati jelentőséggel bíró kutatásánál mindig szükség van mint összehasonlításra, kiindulásra, ultratiszta felületre is. Az ultratiszta felület előállítása történhet az oxidos tartomány ultravákuumban történő eltávolításával vagy pedig olyan új egykristály réteg felvitelével, amely még nem tartalmaz oxidot. Az ilyen módon előállított ultratiszta felületen azután végrehajtjuk a kívánt méréseket, kísérleteket, mint például elektronkilépési munka mérését, adszorpciót stb.

Igen érdekes eredményeket adott a kristálynövekedés mechanizmusának közvetlenül elektronmikroszkóppal való folyamatos megfigyelése. Bármily egyszerűnek is látszott a vizsgálatok elvégzése a Műszaki Fizikai Kutató Intézet birtokában levő kitűnő japán elektronmikroszkóppal (*JEM 6A*), az eredményes kutatómunkához számos problémát kellett megoldani. Pl.: a mikroszkóp belsejében kellett elhelyezni a filmfelvevőt, hogy a kellő feloldóképesség mellett a szükséges rövid expozíciós időket biztosíthassuk, gondoskodni kellett a felvevő teljesen rázkódásmentes működéséről. (A tárgy rezgésének amplitúdója nem haladhatja meg a néhány ångströmöt.) Gondoskodni kellett arról, hogy a vizsgált objektum környezetében a kellő jó vákuumot fenn lehessen tartani. Mint az előzőekben már említettem, a kristály felületét már 10^{-8} Torr nyomású gázatmoszféra elszennyezi, míg a mikroszkóp terében legjobb esetben csak 10^{-6} Torr uralkodott. Ezért a céltárgy környezetét külön utólag beépített kifagyasztóval kellett az olajgőzöktől védeni, és a kellő vákuumot az objektumtérben a céltárgyra dolgozó miniatűr titánion-getterszivattyúval kellett biztosítani. Mindezen feladatokat PÓCZA JENŐ, BARNA B. PÉTER és BARNA ÁRPÁD oldották meg, és ők végezték az eszközzel a vizsgálatokat [12].

A Román Tudományos Akadémia Bukaresti Fizikai Intézetével, GRIGOROVICI professzor és csoportjával közös kutatási terv keretében végzett vizsgálatok a párologtatott Ge-rétegek viselkedésének néhány alapvető kérdésére irányultak. Tisztázták azokat a szerkezetátalakulási, átkristályosodási folyamatokat, amelyek az amorf és polikristályos Ge-rétegek hőkezelésénél lépnek fel. Ezek szerint az amorf rétegek átkristályosodása a réteg teljes vastagságában keletkező göcökön indul meg, és sugárirányban terjed tovább (7. ábra) [12–15].

A réteg a teljes átkristályosodás alatt különböző méretű krisztallitokból épül fel. Az átkristályosodás közben igen jelentős anyagtranszport léphet fel.

Az elektronmikroszkópban párologtatott Ge-rétegek megfigyelése azt igazolta, hogy a Ge-rétegek kialakulására a fémrétegek növekedésénél leírt alapfolyamatok jellemzőek. Ezek szerint az amorf szénhártyára történő kon-



7. ábra

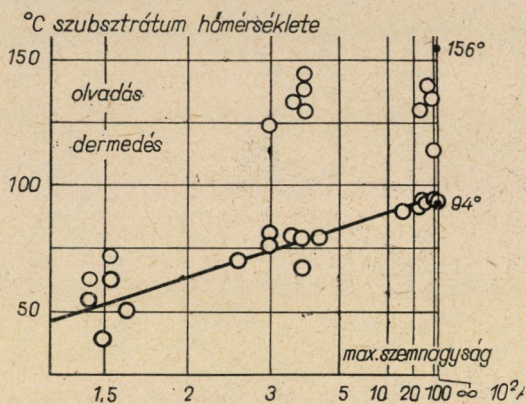
denzáció $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ hordozóhőmérséklet felett 10^{-5} Torr-nál kisebb nyomáson, $30\text{ }\text{Å}/\text{sec}$ párologtatási sebesség esetén magképződéssel megy végbe, s a szemcsék összenövésére a folyadékszerű viselkedés, forma és mozgékonyság (8. ábra) jellemző. Ez azt jelenti, hogy a párologtatott fémrétegek kialakulására ma már meglehetősen kiterjedt ismeretanyag adaptálható lesz a félvezető rétegek kialakulására is, s így remélhetjük, hogy egységes kép alapján tudjuk majd magyarázni a hibahelyek beépülésének mechanizmusát.

A fémek közül modellanyagként választott indiumrétegek vizsgálata több, irodalomban is új eredményt adott [16].

Az elektronmikroszkópban 10^{-8} Torr nyomástartományban „in situ” végzett kísérletek kvantitatív összefüggést adtak a szubmikroszkópos méretű szemcsék termodinamikai sajátságaira, a tömegtől függő kritikus olvadáspontra és kristályosodási hőmérsékletre (9. ábra) [17].



8. ábra



9. ábra

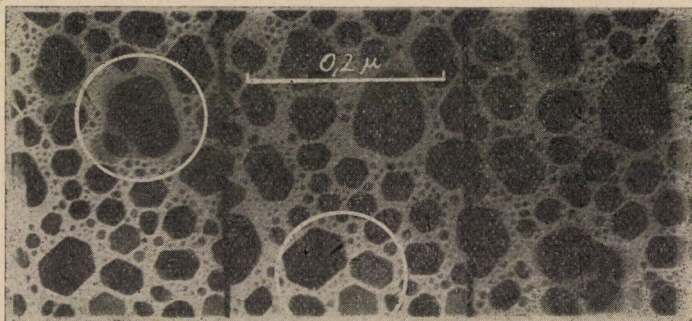
A 10^{-6} Torr nyomású oxigénatmoszférában párologtatott indiumrétegek kialakulásának megfigyelése alapján tisztázható volt a maradék gázból beépülő szennyezés elhelyezkedése. Eszerint az oxid vagy az olajgőzből az elektronok hatására krakkolt szennyezés a szemcsék növekedése folyamán folyamatosan kilökődik azok felületére, s így a párologtatás és a szennyezés beépülésének sebességétől függő kritikus szemcseméretnél a növekedést teljes egészében megakadályozó fedőréteg alakul ki azok felületén (10. ábra).

A réteg továbbnövése e lezárt szemcsék felületén meginduló új magképződéssel, majd a szemcsék összenövésével folytatódik. A szennyezést jelentő maradékgáz atmoszférában kis párologtatási sebességgel kialakult rétegek tehát egymásra nőtt kristallitok dezorientált halmazának tekinthetők, ahol az egyes szemcséket a beépült szennyezőréteg választja el egymástól. A rétegek kialakulása alatt fázisátalakulások részletes elemzése szerint feltételezhetjük, hogy a szemcsék folyadékszerűnek megfigyelt, igen gyors összenövése egy bizonyos szemcseméret alatt valódi folyadékállapoton keresztül történhet, az olvadáspontnak a kis cseppek felületi feszültsége folytán történő lényeges csökkenése miatt (11. ábra).



10. ábra

Igen lényegesek a jövő fejlődés szempontjából azok a munkák, melyek azt célozzák, hogy egy adott kristályfelületre idegen anyag kristályát növezzék, és a határfelületen egy ún. heteroátmenetet képezzenek ki. Ezen átmenetekre jellemző, hogy a két különböző félvezető kristály rácsa úgy folytatja egymást, hogy a kémiai kötések nem szakadnak el, vagyis a két félvezető atomos közelségbe kerül, és az egyik félvezető tulajdonságai néhány rácsállandó távolságon belül átmennek a másik félvezető tulajdonságaiba. Fentiekből következik, hogy heteroátmenet legkönnyebben olyan két félvezető anyag között jö-



11. ábra

het létre, melyek kristálytani szerkezete azonos vagy hasonló és rácsállandóik közel állnak egymáshoz.

Hazánkban először 1964-től kezdve a *Villamosipari Kutatóintézetben* foglalkoztak heteroátmenetek létesítésével. LUKÁCS JÓZSEFnek [18] sikerült egykristályos Si-lemezek felületén leválasztott SiC-réteggel heteroátmenetet előállítani. Itt azonban a nagy kristályrácsállandóbeli különbség miatt a ránőtt réteg nem volt egykristály. Ennek ellenére a polikristályos SiC-hez képest lényegesen jobb egyenirányítóhatás mutatkozott.

Mivel az $A^{II}B^{VI}$ és $A^{III}B^V$ típusú vegyületek önmagukban is értékes félvezető tulajdonságokkal rendelkeznek, a közöttük létesíthető heteroátmenetek is érdeklődésre tarthatnak számot.

A *Műszaki Fizikai Kutató Intézet* már több éve foglalkozik ZnS kristályok előállításával és tulajdonságainak vizsgálatával. Az utóbbi időben BERTÓTI IMRE és HÁRSY MIKLÓS megkezdték a GaP előállítását is. Nekik sikerült először ezen két anyag különböző összetételű elegyfázisainak széles skáláját előállítani. A ZnS és GaP kristályszerkezeteinek azonossága és rácsállandói közelsége lehetővé tette ZnS—GaP heteroátmenetek előállítását is.

Heteroátmenetet ZnS—GaP rendszerben zárt rendszerű transzportreakciók módszerével BERTÓTI IMRE és NÉMETH TIBOR valósítottak meg, egyaránt sikerült ZnS-réteget GaP egykristályokra és GaP-réteget ZnS egykristályokra növeszteni. Mindkét esetben jódot vagy sósavat használtak transzportáló

anyagként. Az anyagot 900 C°-on tartott zónából a 850 C°-os zónában elhelyezkedő szubsztrátumra vitték át.

Irodalmi adatok az említett rendszerre nem állnak rendelkezésünkre. Az első megfigyelések arra mutatnak, hogy a GaP szubsztrátumon növekedett ZnS-rétegek általában tökéletesebb szerkezetűek, mint a ZnS kristályokon növesztett GaP-rétegek. Igen valószínű, hogy az említett eltérés részben a két szubsztrátum diszlokációsűrűségének különbözőségére vezethető vissza, ugyanis a Ga olvadékból növesztett GaP kristályok kevesebb rácshibát tartal-



12. ábra

maznak, mint a gőzfázisból növesztett ZnS kristályok. A ránövekedés folyamatában a diszlokációk fontos szerepére mutatnak a következő tények:

a) A magképződés és a növekedés a szubsztrátum kitüntetett helyein indul meg (12. ábra).

b) A GaP szubsztrátumon növekedő ZnS-rétegekben a más módon előállított ZnS kristályokhoz képest feltűnően nagy gyakorisággal fordulnak elő csavardiszlokációk (13. ábra).

A szubsztrátum és a ránövekedett réteg kristálytani orientációját struktúra-érzékeny kémiai marással és röntgendiffrakciós módszerrel vizsgálták. Mindkét módszer eredményei arra mutattak, hogy a ránövekedett réteg pontosan követi a szubsztrátum kristálytani orientációját.

E heteroátmenetek fizikai vizsgálatai is megindultak. Az elektromos mérések céljaira a mintáinkat feldarabolás után ötvözött indiumkontaktusokkal és aranykivezetésekkel láttuk el. Az így kapott struktúrák egyenirányító karakterisztikát mutattak, részletesebb vizsgálatok folyamatban vannak (14. ábra).

A hazánkban folyó félvezető-fizikai alap kutatásoknak további igen lényeges területe a kristályhibák keletkezésének, terjedésének és elektromos hatásainak vizsgálata.

Igen kiterjedt irodalma van a főleg nagy energiájú besugárzás hatására keletkező ún. ponthibákra vonatkozó vizsgálatoknak. Félvezetőknél leginkább a neutronbombázás hatására keletkező, ionos kristályoknál az ultraibolya és röntgenbesugárzás hatására keletkező hibahelyeket vizsgálták.

A félvezető eszközök gyártásának alapanyagául szolgáló egykristályoknál viszont igen fontos a kristályokban mutatkozó diszlokációk tanulmányozása. A diszlokációk sok esetben a kristályosításnál kiindulásul használt magból vagy epitaxiás növesztésnél a szubsztrátumból terjednek át a növekvő kristályokra (erről már a heteroátmenetek tárgyalásakor szó volt), vagy más esetekben az egyenlőtlen lehűtéskor keletkező mechanikai feszültségek folytán létesülhetnek.



13. ábra

A Műszaki Fizikai Kutató Intézetben a mérések céljára reprodukálható diszlokációk keltésére vagy úgy jártak el, hogy az egykristályt megfelelő hőfokon alkalmas szerszámmal adott görbületi sugárra meghajlították, vagy úgy, hogy lemez alakú kristályokba a Vickers-féle keménységméréshez hasonló módon egy gúla alakú szerszámot adott erővel, adott ideig, a megfelelő hőfokon belenyomtak.

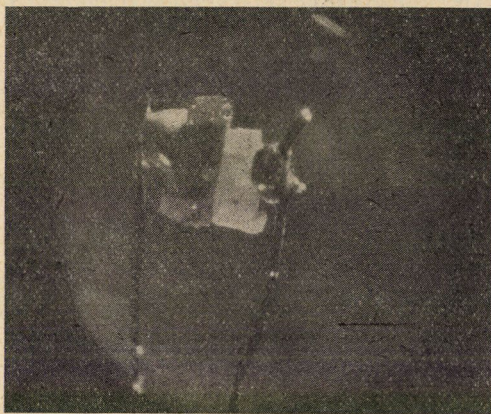
RÖSDNER BÉLA vizsgálta a diszlokációk mozgékonyosságát a makroszkopikus plaszticitás határtemperaturája alatti hőmérsékleteken [19]. Azt találta, hogy az eddigi irodalmi adatokkal ellentétben a diszlokációk mozgási sebessége 400 C° alatt nagyságrendben a hőmérséklettől független. (Az irodalomban közölt formulák szerint $400\text{ C}^\circ - 100\text{ C}^\circ$ -ig kb. 7 nagyságrenddel kellene csökkennie.)

PÖDÖR BÁLINT viszont az elektronok mozgékonyságának változását vizsgálta plasztikusan deformált germánium egykristályokban [20].

Azt találta, hogy a grafit szerszámmal meghajlított Ge kristályban keletkező diszlokációs vonal negatív töltést vesz fel, és ezáltal megnöveli az

elektronok szóródását. Az így kapott formulát Hall-effektus mérésekkel ellenőrizve, jó egyezést kapott az általa felállított elmélettel. Ezt a munkáját tovább folytatva, a *Budapesti Műszaki Egyetem Villamosmérnöki Karához* 1966-ban benyújtott doktori disszertációjában adatokat közöl a diszlokációk által előidézett akceptornívók energiájára, valamint a vezetőképességnek a diszlokációk irányában és az arra merőleges irányban történő változására.

Hasonló vizsgálatokat végzett LENDVAY ÖDÖN és KOVÁCS PÁL [21] lumineszkáló ZnS egykristályokon, és megállapították, hogy az aktivátorként a kristályban egyenletes eloszlásban jelen volt réz a diszlokációk mentén



14. ábra

koncentrálódik, és a diszlokációkat körülvevő tér rézben elszegényedik, ami a lumineszkálás színének megváltozásában kimutatható.

Az a tény, hogy a tiszta egykristályba utólag bediffundáló adalékanyagok a diszlokációk mentén gyorsabban diffundálnak, rég ismert volt, fenti adatok a diszlokációk által okozott selejtképződésre és annak mibenlétére adnak hasznos tájékoztatást.

A kristályhibák egy másik csoportjának, az ún. rétegződési hibáknak (stacking fault) szerepével foglalkozik RÖSNER BÉLA, EGYED LÁSZLÓ, NÉMETH TIBOR és BODÓ ZALÁN [22].

Az általuk Ge-on végzett vizsgálatok SHOCKLEY és HUBNER vizsgálataihoz csatlakoznak, és kvantitatív adatokat szolgáltatnak a töltéshordozók és fononok, valamint a fononok és hibahelyek kölcsönhatásának megismeréséhez. Úgy látszik, a két anyag viselkedése eléggé hasonló.

A felsorolt kutatások eredményei közül az adszorbeált víz szerepére, az igen sima felületek előállítására és a kinonos marásra vonatkozók már ipari alkalmazásra kerültek, másrészt viszont a kristályképződés mechanizmusának tisztázására, az epitaxiális kristálynövesztésre és a heteroátmenetekre vonatkozó munkák távlatilag látszanak lényegesnek.

Szeretném, ha az elmondottak alapján kidomborodnék, hogy az utolsó év során a hazánkban folyó félvezetőfizikai alapkutatótást egyrészt az alapkutatótással foglalkozó intézetek terveinek egymás közötti, másrészt az ipar kívánságainak megfelelő egyeztetése, a baráti akadémiákkal való együttműködés és nem utolsó sorban a Szilárdtestfizikai Komplex Bizottság koordináló tevékenysége folytán az erőknél fontos témákra való fokozott koncentrálása, másrészt pedig az ipar és termelés fejlesztési igényeinek figyelembevétele jellemzi.

IRODALOM

1. ERNST, L.: *Phys. Stat. Solidi* 7 (1964), K 61.
2. ERNST, L.: *Phys. Stat. Solidi* 19 (1967), 89.
3. LŐRINCZY—PATAKI: Reverse Characteristics of Germanium Junction Diodes. *Acta Phys. Hung.* 13 (1961), 67.
4. LŐRINCZY—PATAKI: On the Reverse Characteristics of Silicon Diodes. *Acta Phys. Hung.* 15 (1962), 57.
5. LŐRINCZY, A.—NÉMETH, M.—SALLAY—SZÉP, I. G.—TIHANYI, I.: Kinon-hidrokinon hatása germánium félvezető eszközök és felületek sajátosságaira. *Physica Status Solidi* (közlés alatt).
6. 150 791 „Eljárás egykristályszeletek vékonyítására” NÉMETH TIBORNÉ; *a szabadalom elfogadásának időpontja*: 1964. augusztus 25.
7. 151 775 „Eljárás 0,05 μ -nál kisebb felületi érdességet biztosító félvezető kristályfelület előállítására” NÉMETH TIBORNÉ; *a szabadalom elfogadásának időpontja*: 1966. február 9.
8. 21g 1—16 „Eljárás félvezető p-n átmenetek elektrokémiai felületi kezelésére”. NÉMETH TIBORNÉ, BINNER TIHAMÉR és GERCELY ISTVÁN; *a szabadalom elfogadásának időpontja*: 1966. szeptember 19.
9. *Chemistry* 40 (1967), 30.
10. TIHANYI, I.—PÁSZTOR, G.: Observation of Surface Phenomena on Semiconductor Devices by a Light Spot Scanning Method. *Solid State Electronics* 10 (1967), 235.
11. PFEIFER, I.: Epitaxial Growth of Germanium on Germanium Substrates Cleaned and Rented by Electron Bombardement. *Phys. Stat. Solidi* 17 (1966), K 17.
12. BARNA, A.—BARNA, P. B.—PÓCZA, J. F.: Design of a New Specimen Holder in the Electron Hidroscope for Vacuum Deposition at about 10^{-6} Torr. *Vacuum* (sajtó alatt).
13. PÓCZA, E. P.—BARNA, A.—BARNA, P.: Nucleation and Growth-Processes in Vacuum-Deposited Germanium Films. Göttingen 1966.
14. BARNA, A.—BARNA, P.—PÓCZA, J.—CROITORU, N.—DÉVÉNYI, A.—GRIGOROVICI, R.: Vákuumban párologtatott germániumrétegek szerkezeti sajátosságai. *Finommechanika* 4.
15. GRIGOROVICI, R.—CROITORU, N.—DÉVÉNYI, A.—VOSCAN, N.—BARNA, P.: Electrical Properties of Evaporated Si and Ge Layers. *Revue Roumaine de Physique* (1965).
16. PÓCZA, E. F.—BARNA, A.—BARNA, B. P.: Processes of l'Liquidlike Behaviour' of Crystallites in Vacuum-Deposited Thin Films. Seventh International Congress and Symposium on Crystal Growth, Moszkva 1966.
17. BARNA, P.: Párologtatott vékonyrétegek kialakulásának elektronmikroszkóppal követhető folyamatai. Kandidátusi disszertáció, 1966.
18. LUKÁCS, I.: Si-SiC p-n heteroátmenetek. *MTA VI. Osztály Közleményei* 37 (1966), 207.
19. RÖSNER, B.: On the Mobility of Dislocations in Ge at a Temperature Range Below the Temperature Limit of Macroscopical Plasticity. *Acta Phys. Hung.* 20 (1966), 289.
20. PÖDÖR, B.: Electron Mobility in Plastically Deformed Germanium. *Phys. Stat. Solidi* 16 (1966).
21. Proceedings of the International Conference on Luminescence, Budapest 1966 (sajtó alatt).
22. RÖSNER, B.—EGYED, L. C.—NÉMETH, T.—BODÓ, Z.: Influence of a Twin Boundary on the Transmitted Phonon Drag Effect in Ge. *Phys. Stat. Solidi* 15 (1966), E 127.

HOZZÁSZÓLÁSOK

SZABÓ ELEK

A KÉMIAI TUDOMÁNYOK KANDIDÁTUSA

Ismeretesek azok a szigorú követelmények, amelyeket a jó minőségű félvezető diódák és tranzisztorok alapanyagaival szemben támasztanak. Egyes elemekből már a mikrogramm ezredrésze tönkre tudja tenni a kész terméket. Hosszú időn keresztül nélkülöztük azokat a módszereket, amelyekkel ilyen meghatározások elvégezhetők lehettek volna. Erre a célra a legalkalmasabbnak az aktivációs analitikai és tömegspektroszkópiai módszerek bizonyulnak. Számunkra az aktivációs módszerek bevezetésére voltak kedvezők a feltételek. A *Központi Fizikai Kutató Intézetben* levő berendezések (atomreaktor, neutron-generátor, van de Graaf gyorsító), mintatovábbító berendezések, az izotópok szétválasztására alkalmas radiokémiai tapasztalatok, a nukleáris mérőberendezések széles skálája lehetővé tették, hogy az elmúlt két-három évben új analitikai módszereket dolgozzunk ki. Az Egyesült Izzólámpa és Villamossági Rt. és különböző kutatóintézetek (Távközlési Kutató Intézet, Híradástechnikai Kutató Intézet, Műszaki Fizikai Kutató Intézet) igényeit figyelembe véve, szorosan együttműködve ezen intézmények munkatársaival, nagy érzékenységű sorozatelemzésre is alkalmas módszereket dolgoztunk ki.

Különösen eredményes volt a félvezető szilíciumban levő szennyezők meghatározására szolgáló módszerek rendszeres alkalmazása. Az utóbbi másfél évben mintegy 300 szilíciumminta elemzését végeztük el. Rendszeresen meghatároztuk a minták réz-, arzén- arany- és nátriumtartalmát, esetenként pedig foszfor-, antimon- és volfrámmeghatározásokat végeztünk. A vizsgálatok eredményeképpen az anyaghibából adódó selejt teljesen kiküszöbölhető volt.

Eredménnyel jártak a Műszaki Egyetem, a Fémipari Kutató Intézet, valamint a Távközlési Kutató Intézetből és a Műszaki Fizikai Kutató Intézetből a Központi Fizikai Kutató Intézet Kémiai Főosztályán dolgozó munkatársak fáradozásai, amelyek az egyéb félvezető anyagok (germánium, gallium-arzenid) gyártásánál használt vegyszerek (savak, oldószer, desztillált víz) szennyezőinek (arany, ezüst, kadmium, cink, kobalt, indium stb.) meghatározására irányultak. A vizsgálatok többségénél kémiai elválasztások is szükségesek, ami jelentősen idő- és munkaigényes feladat. A meghatározások jól elvégezhetők, megfelelő tapasztalattal, a vizsgálatokhoz szükséges berendezésekkel rendelkezünk, így e munkák is rendszeresen folytathatók.

Az aktivációs analitika területén bekövetkezett fordulat — csendes forradalom — talán elő fogja segíteni a félvezetők elektromos és fizikai paramétereit, valamint a monokristályok kémiai összetétele, azaz a szennyezők minősége és mennyisége közötti összefüggések tisztázását. Sajnos jelenleg még igen kevés adattal rendelkezünk e téren. Csak az ismeretes, hogy a szilícium, ger-

mánium és szilícium-karbid esetében a harmadik (B, Al, Ga, In, Tl) és az ötödik csoport (N, P, As, Sb, Bi) elemei; a gallium-arzenid, indium-antimonid és az egyéb $A^{III} B^V$ típusú intermetallikus vegyületek esetében pedig a második (Zn, Cd, Hg) és negyedik (C, Si, Ge, Sn, Pb) csoport elemei befolyásolják a félvezetők tulajdonságait. Általánosan veszélyes szennyezőként a mély energetikai nívóval rendelkező réz, arany és vas fordulhat elő. Más nyomelemek befolyását alig tanulmányozták.

A rendelkezésre álló módszerek nemcsak a végtermékek analízisére, hanem a kiindulási anyagok szintézisére ($SiCl_4$, $SiHCl_3$, GaAs), a doppeláshoz használt anyagok (pl. indium, foszfor) és a reagensek tisztaságának ellenőrzésére is lehetőséget adnak.

Az előadásban többször szó volt a félvezetők felületi jelenségeinek vizsgálatáról. Az aktivációs analitikai módszerek bizonyos esetekben itt is igen hasznosak lehetnek. A protonokkal és deutronokkal végzett vizsgálatok lehetővé teszik a felületi rétegek tanulmányozását. A töltött részecskék energiájának változásával lehetőség van különböző rétegek összetételének vizsgálatára is.

A szilíciumminták széntartalmának és bórtartalmának meghatározása neutronaktivációs analízissel nem lehetséges, erre a célra a töltött részecskékkel való vizsgálatok alkalmasak.

A Központi Fizikai Kutató Intézetben levő van de Graaf generátor segítségével 2 MeV feletti energiájú deutronokkal a $^{12}C(d,n)^{13}N$ magreakció alapján szén meghatározása volt lehetséges. A nitrogén-13 felezési idejét figyelembe véve a besugárzás ideje 10 perc. Kb. 10^{-3} % mennyiségben jelenlevő szén határozható meg e módszerrel, 30%-os hibával.

A félvezetők esetében igen lényeges szerepet játszó bór meghatározása is csak töltött részecskékkel történhet. Sajnos a Központi Fizikai Kutató Intézetben levő berendezés nem alkalmas erre a célra, mivel a vizsgálatokat nagy energiával rendelkező protonokkal kell elvégezni. A Német Demokratikus Köztársaság rossendorfi *Magkutató Intézetével* kooperációban végeztünk el ilyen meghatározásokat; az ottani ciklotron 4 MeV-nél nagyobb energiával rendelkező protonokat termelt, és a $^{11}B(p,n)^{11}C$ magreakció segítségével a ^{11}C -et határozzák meg 10^{-7} %-os érzékenységgel.

E példák is mutatják, hogy a nem neutronokkal történő aktiváció terén is sok lehetőség kínálkozik, különösen a felületi rétegek tanulmányozására.

Végezetül még egy kérdést szeretnék megemlíteni. Az utóbbi évben a félvezetők analitikája területén dolgozók között jó munkakapcsolat és munkamegosztás alakult ki, melyet elősegített az *Izotópalkalmazási Szakbizottság Aktivációs Analitikai Munkabizottságának* és a *Magyar Kémikusok Egyesülete Radiokémiai Analitikai Szakcsoportjának* tevékenysége. Közelebb kerültek egymáshoz ezen intézményekben hasonló témán dolgozók, javult a tapasztalatcsere lehetősége is a külföldi országok kutatóival. Az analitikai munkák koordinálása során tapasztaltuk azonban, hogy a félvezető anyagok előállítása területén, pl. a gallium-arzenid esetében távolról sem mondható kielégítőnek a helyzet. Lényegesen meggyorsítható lenne az előrehaladás e téren is megfelelő összefogással.

E kérdésekre kívántam a figyelmet felhívni. Az analitikusok ügyelni fognak arra, hogy a fizikai kutatások és a gyártás során felmerülő — sokszor megoldhatatlannak látszó — elemzéseket elvégezzék, és így ezen kutatások eredményességét elősegítsék.

LUKÁCS JÓZSEF

A MŰSZAKI TUDOMÁNYOK KANDIDÁTUSA

SZIGETI GYÖRGY akadémikusnak a félvezető fizikai alap kutatásokra vonatkozó beszámolója a szakterület lényeges vonásait ismertette. Így részemre csak néhány probléma további aláhúzása maradt feladatul, főleg az erősáramú ipar szempontjainak figyelembevételével. Mindenekelőtt hangsúlyoznom kell, hogy a félvezető fizikai alap kutatást és annak mélységi lehetőségeit, mint ipari kutató intézetben dolgozó személy igen nagyra értékelem, és az ipari kutatás bázisának tekintem, amelyre okvetlenül támaszkodni kívánunk.

Általános megjegyzéseink között első helyen szeretném szerepeltetni azt, hogy véleményem szerint a távlati kutatások legfőbb célja szellemi tőke képzése. Az így létrehozott, ill. létrehozandó szellemi potenciált két módon hasznosíthatjuk. Létrehozhatunk ennek alapján olyan félvezető elemeket, amelyek eddig meg nem valósított funkciót végző jellegük folytán újak számítnak. Ilyen jellegű eszközök európai szinten is piacra számíthatnak, sőt rövidebb-hosszabb ideig velük a piacot monopolizálni van módunkban. A létrehozott szellemi potenciál alkalmas arra is, hogy a már létrehozott gyártások meg nem értett részeit megvilágítsuk, a felbukkanó hibákat gyors ütemben kiküszöböljük, és így megtakarításra, ill. gazdasági előnyökre tegyünk szert.

A távlati kutató intézetekben létrehozott ilyen szellemi előny csak akkor hatékony, ha az az ország ipari kutatóinak is rendelkezésére áll. Ennek érdekében a szokásos közlemények megjelentetésén túlmenően, más formáit is meg kell találni a tájékoztatásnak, talán a távlati és ipari kutató intézetek megfelelő személyei által megvalósított kötetlen, nem hivatalos eszmecserék formájában is. Az ilyen eszmecserék, melyek az önös érdekek kizárásával, pontosabban szólva, józan egyeztetése mellett folyhatnak, sok ipari és az ország gazdasági termelését befolyásoló gondolat felvetéséhez vezetnek.

Véleményem szerint számos olyan probléma van az országban, melyet a távlati, ill. ipari kutatást végzők külön-külön megoldani nem tudnak, azonban egy összefogás keretében alátszólagos nehézségekkel könnyen megbirkóznak.

Ezek után egy-két részletes megjegyzést kívánok tenni, főként az erősáramú félvezetőipar szemszögéből.

A magyar erősáramú ipar pillanatnyilag három vonalon veszi igénybe a félvezetőtechnika nyújtotta lehetőségeket. 3 kV-tól 220 kV-os típusokig túlfeszültségvezetőket készít és exportál, amelyekbe p-vezetési típusú szilíciumkarbidból készült nemlineáris ellenállásokat épít be. Az ezzel kapcsolatos kutatás általában az ellenállások nemlinearitásának növelésére és a termikus szilárdság fokozására vonatkozik. A termelési érték ezen a vonalon kb. 10–15 millió forint/év.

Az erősáramú félvezető ipar felhasználása pillanatnyilag legnagyobb mértékű a szilícium diódák és a közeljövőben valószínűleg a szilícium tirisztorok területén. Az ezzel kapcsolatos alkalmazott kutatások felölelik az ötvözesi, diffúziós és epitaxiális problémákat, valamint a diódák, tirisztorok minősítésével kapcsolatos fejlesztő és minősítő méréseket. Ezek a gyártások elem-vonalon kb. 25–30 millió Ft, félvezető készülék-vonalon kb. 80 millió Ft-ot érintenek. Ezek közül csak a villamos mozdony hajtásokat, traktációs állomások tápegységeit, különböző ívhegesztő gépeket és elektrolizőr berendezéseket említtem meg.

Végül, mint kezdeti stádiumban levő gyártást kell megemlítenünk a bizmut-tellurid alapanyagú termovillamos elemek gyártását, amelyek jelenleg 20–25 literes hűtőterekig versenyképesek az abszorpciós rendszerekkel.

Az egész röviden vázolt ipari bázison a távlati kutatásokkal kapcsolatban az alábbi igények fognak előreláthatóan felmerülni.

Az erősáramú félvezető berendezésekkel kapcsolatban diódák, tirisztorok, de ezen túlmenően a termovillamos elemekkel kapcsolatban is szükséges lesz vizsgálni a félvezető anyagok hővezetési és termikus tulajdonságait, különösen a fonon-részt, és az ezt befolyásoló tényezők hatását. A töltéshordozó sűrűség, valamint kompenzációfok-meghatározások már jelenleg is nagy mértékben igénylik a galvano-mágneses, más energetikai kutatások pedig a termomágneses jelenségek alaposabb vizsgálatát. Ennek során erősen számítunk a Műszaki Fizikai Kutató Intézet héliumseppfolyósítójára. Az energetikai kérdések mindenképpen rá fogják irányítani a figyelmet a szilárdtestben létrehozható plazmák, valamint ezek oszcillációinak, mozgatásának vizsgálatára.

Ismét csak erősáramú problémák kereteiben maradva, szeretném felhívni a figyelmet olyan elvi kutatások megindítására, amely a jelenlegi p-n réteg képzési módokon túlmenően nagy felületű, definiált profillal rendelkező, más vezetési típusú kristályrétegek előállítását teszi lehetővé. Ezzel kapcsolatban csak a külföldön is kutatni kezdett „ion implantation”-t említem meg.

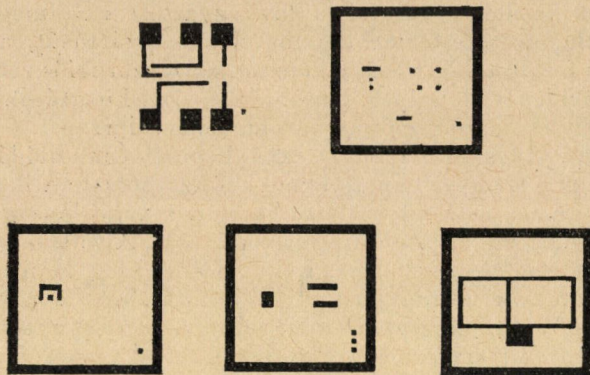
Végül egy összefoglaló gondolatról szeretnék szólni. Meg vagyok arról győződve, hogy mind a távlati, mind az ipari kutatást végző gárda teljes szívvel és lélekkel küzd a feladatok megoldásáért, és azok mielőbbi megvalósításaért. Hogy a már kifejlesztett, és az adott körülmények között jól működő kutatási fegyvert merre fordítsuk, erejét merre koncentráljuk, nos, ez a helyes vezetésnek, a helyes irányításnak a kérdése. Ezen a téren lehet lényeges és több ezer munkaórát is tönkretevő vagy megtakarító döntéseket hozni. A félvezetőfizikai kutatás irányításával kapcsolatban szeretném a figyelmet felhívni az igen alapos és körültekintő döntési szisztémákra, és bizonyos tekintetben, ha szabad ezt mondanom, az ipari jövőbelátó képességek fejlesztésére.

SZÉP IVÁN

A MŰSZAKI TUDOMÁNYOK KANDIDÁTUSA

SZIGETI akadémikus a hazai félvezető-alapkutatás közelmúltban elért főbb eredményeit ismertette, elsősorban a korszerű elektronikához fűződő kapcsolatok szempontjából. Ismertetésében számos olyan munka szerepelt, amely a gyakorlat által felvetett probléma megoldására, gyakorlati célok megvalósítására irányult. Ez nyomatékkal arra figyelmeztet, hogy a természettudományok és különösen a műszaki tudományok területén a kötetlen, előzmények nélküli, nem látható célokért folyó kutatás egyre ritkább és helyette egyre inkább a gyakorlati feladatok által inspirált, tudatos célok elérésére irányuló kutatás jelentkezik.

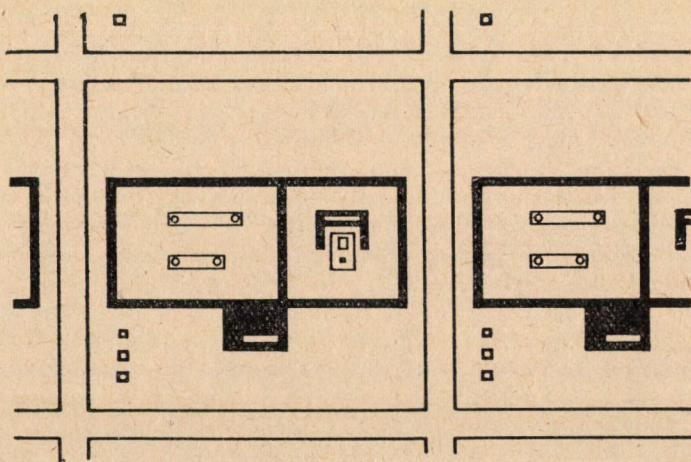
Az ismertetett munkák további jellemzője, hogy nagy részük az anyag valamilyen tulajdonságának létrehozására vagy módosítására irányul, tehát *technológiai* jellegű. Az ilyen kutatások eredményessége sok esetben attól függ, hogy ismeretesek-e megfelelő eljárások, megvannak-e a szükséges kísérleti eszközök, és nem utolsósorban, vannak-e megfelelő ellenőrző, vizsgálati módszerek. Gyakran éppen ezek kidolgozása, megkeresése képezi a műszaki alapkutatás tárgyát.



1. ábra

Tekintettel a félvezető-kutatás rendkívül szétágazó problematikájára, az egyes kutatási feladatok, így az alapkutatás jellegűek is, különböző helyeken jelentkezhetnek. Ezért igen fontosnak tartom SZIGETI akadémikusnak azt a megállapítását, hogy az akadémiai intézményeken kívül az ipar és az ipari kutatás intézményeiben is szükség van egyes kérdések alapkutatás mélységű vizsgálatára. Lényegesen meggyorsíthatja egy-egy probléma megoldását, ha vizsgálata ott történik, ahol a probléma felmerül. Legyen szabad ezt egy példával illusztrálnom.

A Híradástechnikai Ipari Kutató Intézet Félvezető Laboratóriumában integrált félvezető áramkörök technológiájának kutatásával foglalkozunk. A technológia egyik sarkalatos lépése szilíciumdioxid-réteg ránövesztése a szilícium-lemezre, majd fotosablonok, fényérzékeny lakkbevonat, valamint kémiai marás alkalmazásával az oxid-réteg eltávolítása a szükséges helyeken. Ez a művelet többször ismétlődik, miközben diffúziós és oxidációs hőkezelések is történnek.



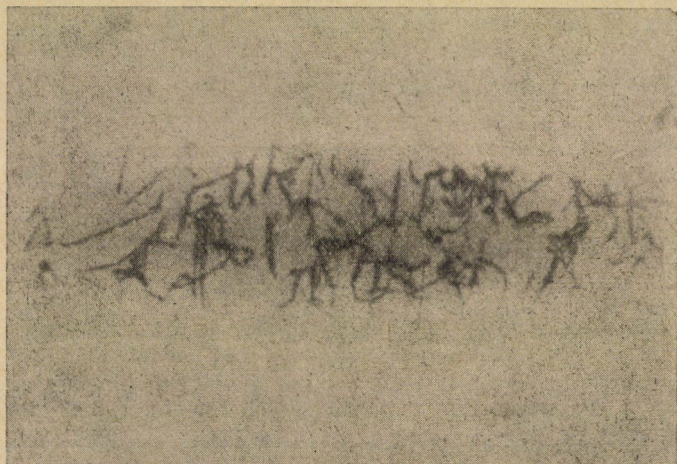
2. ábra



3. ábra

Az 1. ábrán látható a fotosablonok sorozata, amelyeken keresztül a szilíciumdioxidot fedő fényérzékeny bevonat megvilágítása történik. A négyzet alakú keret mérete a valóságban 1×1 mm, a legkisebb négyzeté 20×20 mikron. A 2. ábrán látható két integrált áramköri elem képe, négy fotosablon és kémiai marások alkalmazása után, összekötő fémcsíkok nélkül; az egyik mezőben egy tranzisztor, a másikban két ellenállás van kialakítva.

Az a műveletsor, amellyel az ábrán látható alakzatig eljutottunk, olyan, fogalmilag ismert lépésekből tevődik össze, mint az oxidáció, diffúzió, kémiai oldás, fotopolimerizáció stb. És mégis, a rendszer annyira specifikus, hogy csak a félvezető-technológia szakismeretei alapján értelmezhetők kielégítően a megfigyelt jelenségek. Egy a sok közül: szilícium-lemezek alakváltozásából arra következtettek, hogy az oxid és a szilícium határfelületén mechanikai feszültségek lépnek fel, amelyek deformálják a lemezt, esetleg diszlokációk



4. ábra

képződéséhez vezetnek. A diszlokációk és a feszültségi terek vizsgálatának igénye nem kis mértékben játszott szerepet abban, hogy rövid idő alatt ki-fejldött az ún. röntgendiffrakciós topográfia, amely pontos helyrajzát adja a félvezető kristályt behálózó, korábban láthatatlan diszlokációknak. Tekintve, hogy ezek a kristályhibák zavarólag hatnak az adalék-diffúzió egyenletességére, láthatóvátételük és eredetük nyomozása számunkra igen fontos volt. Intézetünk Anyagvizsgálati Osztályának röntgensoportjában STEFÁNIAI VILMOS és GADÓ PÁL alig fél év alatt kidolgozták ezt a korszerű vizsgálati módszert, amellyel megbízhatóan tudjuk ellenőrizni a kristályhiba-vizonyokat kutatásaink folyamán. Ilyen vizsgálatok derítették ki, hogy ha a szilíciumdioxidot helyileg eltávolítjuk a szilícium felületéről, a lemart hely körül azonnal megjelennek a mechanikai feszültségek kontúrvonalai. A 3. ábrán látható az oxid részleges eltávolítása után az oxidhatár körül fellépő feszültségtér; a 4. ábra közepes diszlokáció-sűrűségű szilícium-szeletről készült topográfiai felvétel; a szürke háttérben megjelenő sötét vonalak az anyagban levő diszlokációk vetületi képei.

Az elmondott példa ellenére azonban azt is hangsúlyozni kell, hogy az ipari kutatóhelyek alapkutatási tevékenysége más irányú feladataiknál fogva csak korlátozottabb jellegű lehet, és a munka zömét, véleményem szerint, továbbra is az akadémiai intézményeknek kell elvégezniük.

A *Műszaki Fizikai Kutató Intézetben* folyó munkák, a félvezetők felületi jelenségeinek kutatása, valamint a kristályhibák és ezeknek a fizikai tulajdonságokra gyakorolt hatásának vizsgálata korszerű és tartalmas kutatási irányt képvisel, azonban a szilíciumnak mint vizsgálandó anyagnak, akár tervmódosítás árán, a tématervbbe való besorolása országos igény és aligha túr halasztást.

SZIGETI GYÖRGY akadémikus előadásából megállapítható, hogy az elmúlt két év alatt a hazai félvezető alapkutatás jelentős fejlődésen ment keresztül, melynek eredményei az ipar területén is éreztették hatásukat. A kutatóhelyek munkájának bizonyos mértékű koordinálása növelte a munkák hatásfokát, és a fejlett ipari országokhoz képest fennálló hátrányunkból sikerült valamelyest ledolgoznunk. Az elektronika és benne a félvezetőknek a korszerű iparban és gazdaságban betöltött szerepére és egyre fokozódó jelentőségére való tekintettel remélhető, hogy ezek a kutatások hazánkban a jövőben is kellő támogatásban fognak részesülni.

GIBER JÁNOS

A KÉMIAI TUDOMÁNYOK KANDIDÁTUSA

A félvezetőeszközök gyakorlati technológiája szempontjából a tisztán fizikai aspektusok mellett jelentős szerepük van a *félvezető felületi kutatások fizikai-kémiai* aspektusának is.

A vizsgálatok modelljéül germánium egykristály — a gyakorlat szempontjából fontos — kémiai kezeléseknek (CP4, CPJ, lúgos perhidrol, anódos oxidáció) alávetett felületeit választottuk.

A munka során mindenekelőtt tisztázni igyekeztünk az ily módon létrehozott felületek szerkezetét. E munka során elektronmikroszkópos felvételekkel a marás kezdeti stádiumában sikerült igazolni a létrehozott oxid hexagonális, illetve tetragonális struktúráját; ellipszometeres módszerrel vizsgáltuk a lét-

rehozott oxid vastagságát, optikai tulajdonságait, majd infravörös transzmisszióval és reflexióval a létrehozott oxid különböző kötésmódjait. Tríciumos indikációval megállapítottuk a marás során beépült ún. strukturális víz mennyiségét. Megállapítottuk, hogy az általunk létrehozott felületeken a gáz- és víz-, valamint ionadszorpciós vizsgálatok, az elektrokémiai folyamatok reprodukálhatók.

Vizsgálatok folytak és folynak oxigén és vízgőz, valamint oxigén—víz elegy adszorpciójának és deszorpciójának vizsgálatára BET módszerrel és tríciumos indikációval széles hőfok és parciális-nyomás intervallumban. E vizsgálatok során többek között megállapítottuk, hogy a vízgőz néhány Torr parciális nyomás mellett jelentősen növeli az oxigénadszorpció mértékét. Következtetéseket vontunk le a trícium-adszorpció izotóp effektusának nagyságára nézve.

Tanulmányoztuk modellünkön az ionadszorpció sajátosságait. Megállapítottuk, hogy az irodalomban közölt értékek nem az adszorpcióra, hanem az öblítés módjára jellemzőek. SCHAY GÉZA általános adszorpciós elméletére támaszkodva korszerű definíciót dolgoztunk ki az ionadszorpcióra vonatkozóan, és megvizsgáltuk a valódi ionadszorpció mérési kritériumait és a reprodukálhatóságot befolyásoló tényezőket. Az ionadszorpció közvetlenül a felületen történő mérésére kidolgoztuk az ún. „hidrodinamikusan öblítés” módszerét, és korelációt kerestünk az így elérhető adherált és az adszorpciós réteg között. Megállapítottuk, hogy az ionadszorpció szempontjából a legfontosabb befolyásoló tényezők a felületek aktivitása (mely többek között arányos a felület elérhető maratási sebességével), a felület potenciálja és az oldat pH értéke. A vizsgált K izotóp adszorpcióját CPJ-s felületen $1 \cdot 10^{14}$ atom/cm² nagyságrendűek, a vizsgált J izotóp adszorpcióját $3,6 \cdot 10^{14}$ atom/cm²-nek találtuk.

Több vonatkozásban részletesen tanulmányoztuk a germánium elektrolit határfelület tulajdonságait. E munka során kimértük a kémiailag kezelt germániumfelület elektródpotenciáljának pH függését. E vizsgálatokból megállapítható, hogy a germániumfelületek tökéletes oxidelektrodként viselkednek — mégpedig az oldat-fázis összetételétől jó közelítésben függetlenül. Az anódos és katódos polarizációs görbéket felvéve sikerült reprodukálhatóan meghatározni a görbékre jellemző Tafel-féle egyenleteket. A mérés pontosságát ± 5 mV-ra fokoztuk. Megszagattott galvanosztatikus módszerrel a germánium Pourbaix-diagramját tanulmányozva sikerült azonosítanunk a különböző oxidszerkezet esetén elméletileg várható pH függést a kísérletileg kapottal, és így megállapítanunk a felületen az adott pH mellett uralkodó oxidszerkezetet. Elméletet dolgoztunk ki a záróáramok időbeli instabilitásának elektrokémiai értelmezésére, és azt kísérletileg is sikerült igazolnunk.

Téreffektus, felületi potenciál mérésekkel alátámasztva fentebb említett kísérleteink eredményei alapján a lassú és gyors állapotok kémiai modelljének kidolgozása területén is munkák folynak. A vizsgálatok során a különböző kémiai kötések befolyását vizsgáljuk a töltésvándorlásra. Megállapítottuk, hogy a lassú relaxációk egy része nem függ össze közvetlenül az oxid-töltésréteg közötti töltésvándorlással, hanem kizárólag elektrosztatikus jellegű.

E vizsgálatoknak kifejezetten alapkutatói jellegük mellett már eddig is hatásuk volt a hazai germánium alapú félvezetők stabilitásának és megbízhatóságának növelésében. Ezekre, valamint a Műszaki Fizikai Kutató Intézetnek és a Híradástechnikai Kutató Intézetnek SZIGETI akadémikus

előadásában említett kutatásaira támaszkodva elértük, hogy az Egyesült Izzólámpa és Villamossági Rt. ipari félvezetői elérik a világszínvonalat. Munkatársaink az 1967-es berlini szimpóziumon ennek eredményeképpen beszámolhatnak arról, hogy az Egyesült Izzólámpa és Villamossági Rt. germánium félvezető eszközök terén 20 000 órás tartós égetési eredményekkel rendelkezik, amelyek során 0,11%/1000 óra p faktor értéket tudunk szavatolni.

Az előadás röviden ismertette a szerző irányítása alatt az Egyesült Izzólámpa és Villamossági Rt.-nél, valamint kooperációban a Budapesti Műszaki Egyetem Fizikai Kémiai Tanszékén, a József Attila Tudományegyetem Kísérleti Fizikai Tanszékén, az MTA Központi Kémiai Kutató Intézetében és a Távközlési Kutató Intézet II. laboratóriumában e területen folyó munkákat.