

Társaságunk Elnökségének tagja, Tarján Imre professzor 1971. május 3-án tartotta Akadémiai Székfoglaló előadását a Magyar Tudományos Akadémián. Az előadás szövegét az alábbiakban közöljük.

EGYKRISTÁLYOK ELŐÁLLÍTÁSA

I. A francia Verneuil 1891-ben ékszerek és óracsapágyak számára korund, ill. rubin és zafír kristályokat növesztett. Őt szokás említeni elsőként, aki nem elégedve meg a természet nyújtotta lehetőségekkel, tudatosan igyekezett előállítani gyakorlati cél érdekében előírt tulajdonságú kristályokat. – Új periódus vette kezdetét a II. világháború alatt, amikor a Bell Telefon Társaság laboratóriumában kifejlesztették néhány, híradástechnikai célra alkalmas piezoelektromos kristály növesztési eljárását, és ezeket a kristályokat azóta is évi sok tonna mennyiségben gyártják. – A negyvenes évek végén elindult a félvezető anyagok felderítése és kristályainak egyre igényesebb előállítására. Nem sokkal később a magsugárzások mérésére szolgáló egykristályok kifejlesztése jelentett újabb feladatot. – 1960 óta a szilárdtest-laserek, fénymodulátorok, fénydeflektorok, memóriaanyagok stb. előállítása serkenti a kristálynövesztőket. Ugyancsak sokféle igény jelentkezik változatlanul a mikrohullámú technika vonatkozásában is.

I. táblázat

Csapágykövek, ékkövek stb.: korund (rubin, zafír), rutil, berill, spinellek, gránátok

Elektroakusztikai átalakítók: kvarc, tartarátok, ADP, titanátok

Frekvenciastabilizátor: kvarc

Optikai prizmák, lencsék stb.: kvarc, alkali-, ezüst- és tallohalogenidek, alkaliföldfém-fluoridok

Polarizátorok: nátrium-nitrát, magnézium-fluorid

Sugárdeflektorok: nátrium-, cézium, kalcium-jodid, stilben, antracén

Félvezetők: germánium, szilícium, gallium-arszenid és más III–V, valamint II–VI vegyületek

Szilárdtest-laserek: rubin, gránátok, molibdátok, wolframátok, alkaliföldfém-fluoridok, gallium-arszenid és más III–V vegyületek

Nem-lienáris optika: ADP, KDP, KD+P, kvarc

Fénymodulátorok, deflektorok: ADP, KDP, KD+P, niobátok, tantalátok, titanátok, molibdátok, kvarc, II–VI és III–V vegyületek, kupro-klorid, tellúr-dioxid, arzén-triszulfid, jódsvav; Y-Fe-gránát, króm-tribromid

Memóriák: ferritek, gránátok, kettős fluoridok, átmeneti-fémhalogenidek, európium-oxid és szelenid, vas-borát; niobátok, titanátok; alkali-halogenidek, alkaliföldfém-fluoridek és titanátok

Mikrohullámú alkatrészecskék: ferritek, gránátok

Az I. táblázatban feltüntettem néhány gyakorlati jelentőségű területet az egykristályok alkalmazásával kapcsolatban, nem törekedve teljességre a kristályos anyagok felsorolását illetően sem. – A táblázathoz néhány megjegyzést kívánok fűzni:

a) *Félvezető eszközök* készítésére elegykristályok is (pl. Ge-Si) előnyösen használhatók. – Epitaxiális hordozóként a félvezetők esetében főleg korund és spinell kristályokat alkalmaznak.

b) A *nem-lineáris optika* szempontjából azok a kristályok jönnek szóba, amelyek nem rendelkeznek szimmetria centrummal.

c) A *fénymodulátorok és deflektorok* számára a piezoelektromos és a magnetooptikai anyagok érdekesek. (Ezeket a táblázatban pontosvessző választja el egymástól.)

d) A *memória-anyagokat* 3 csoportra osztottuk: mágneses és magnetooptikai, elektrooptikai, fotokromikus vagy szincentrum memóriák. (Ezeket is a táblázatban pontosvessző választja el egymástól.)

Valamennyi alkalmazási területen az elmúlt években többirányú kutatómunka alkult ki: megfelelő kristálynövesztési eljárások kifejlesztése, a kész kristályok megmunkálása, tulajdonságaik ellenőrzése. A legtöbb kutatóhelyen ezekhez a vizsgálatokhoz a kristályos fázis képződése, növekedése, a kristályszerkezet és a kristályhibák tanulmányozása és sok más fundamentális kutatás is kapcsolódott. A különböző területek egymásra utalva, egymást serkentve fejlődtek és ez az egészséges szimbiozis méginkább nélkülözhetetlen lesz a jövőben. A továbbiakban csak az egykristályok előállításának egyes kérdéseivel foglalkozom, de közben utalok néhány alapkutatói problémára is.

II. Amikor az első mesterséges kristályok elkészültek, nagy volt az öröm, hogy sikerült utánozni a természetet, pótolni fukarságát és hiányait. Az idők folyamán azonban az igények nemcsak a mennyiség és a sokféleség, hanem a minőség irányában is nőttek. Egyre több és szigorúbb követelmény lépett fel a *kristályok tisztaságát és tökéletességét* illetően. A tökéletességgel, pontosabban a hibákkal kapcsolatban elsősorban a különböző eredetű és természetű kémiai és fizikai inhomogenitásokra, a nagy koncentrációban jelenlévő pont-, vonal- és felületi hibákra, valamint a sztöchiometriai aránytól való eltérésekre kell gondolnunk.

A tisztaságra és tökéletességre vonatkozó tulajdonságokat *általános vagy primér tulajdonságoknak* nevezik: általánosoknak, mert ezekkel az előállított kristályoknak az alkalmazás területétől és módjától függetlenül rendelkezniük kell; priméréknek, mert ezek határozzák meg a konkrét felhasználás szempontjából fontos *speciális vagy szekunder jellemzőket* (pl. laserek esetében a határfokot, fénymodulátorok esetén a moduláció hatásosságát jellemző mennyiséget).

II. táblázat

EGYKOMPONENSES ELJÁRÁSOK

I. Szilárd fázisból való növesztés (rekrisztallizáció)

- A. Deformálás – hőkezelés
- B. Polimorf fázisátalakulás
- C. Szinterelés

II. Olvadékból való növesztés

- A. Konzervatív módszerek
 - 1. Tégelyes növesztés (Bridgman, Stöber)
 - 2. Húzás (Kyropoulos, Czochralski)
- B. Nem konzervatív módszerek
 - 1. Tégelyes zónás növesztés
 - 2. Tégelymentes növesztés
 - a) Lebegőzónás olvasztás
 - b) Verneuil-módszer

III. Gőzből való növesztés

- A. Szublimáció – kondenzáció

TÖBBKOMPONENSES MÓDSZEREK

I. Szilárd oldatból való növesztés

II. Folyékony oldatból való növesztés

A. Fizikai eljárások

1. Közöséges körülmények között (kb. 100 °C-ig és néhány atm.-ig)

- a) Vizes oldat párologtatás,
b) Nem-vizes oldat hőmérséklet-csökkentés

2. Különleges körülmények között

- a) Magas hőmérsékleten hőmérsékletcsökkentés,
(olvadék oldószerek) olvadákszóna-vándorlás
b) Nagy nyomáson (hidrotermális eljárás)

B. Kémiai eljárások

III. Gőz-, ill. gáz-fázisból való növesztés

A. Egyirányú kémiai reakcióval

B. Megfordítható kémiai reakcióval (transzport)

IV. Gőz-folyadék rendszerből való növesztés

III. Az utolsó években a kristálynövesztési eljárások száma nagy mértékben megnőtt. A II. táblázathoz alapul *R. A. Laudise* felosztása (1) szolgált, amelyet módosítottam és kiegészítettem

A felosztás gyakorlati és kevésbé elvi alapon történt. Ha ui. az adalékanyagot és a szennyezéseket is komponenseknek tekintjük, akkor valamennyi módszer többkomponenses és a különbség a két eljárás csoport között csupán abban áll, hogy az egyik esetben az oldószert, a másikban az oldott anyagot kristályosítjuk. A felosztás különösen bizonytalanná válik olyan esetekben, amikor pl. nagy az adalékanyag koncentrációja, vagy nagy mértékben oldódó anyagnak oldatból való növesztéséről van szó.

Mindkét eljárás-csoporton belül különbséget szokás tenni *konzervatív és nem-konzervatív rendszerek, ill. eljárások* között. Az egykomponenses eljárásoknál ezt a felosztási lehetőséget fel is használtuk. Egy rendszert (eljárást) a kristálynövesztés szempontjából konzervatívnak nevezünk, ha a tápfázis (pl. az olvadék) mennyisége és összetétele *csak* a kristályosodás következtében változik. Azokban az esetekben viszont, amikor a tápfázis mennyisége és összetétele *más* folyamatok révén is változik, nem-konzervatív rendszerről (eljárásról) beszélünk. A nem-konzervatív eljárás tipikus példája a zónás olvasztás, amikor pl. egy rúd alakú mintának csak egy részét olvasztjuk meg és ezt az olvadákszónát végighajtjuk a rúd mentén. Ekkor a kristályosodással egyidőben az olvadékba folyton-folyvást új anyag is bekerül, beolvad. A több-komponenses eljárások közül rendszerint konzervatív, pl. a vizes oldatokból hőmérséklet-csökkentéssel végzett kristályosítás, de ez is lehet nem-konzervatív, ha az ún. cirkulációs eljárást alkalmazzuk, amikor az oldatból kikristályosodott anyagot állandóan pótoljuk.

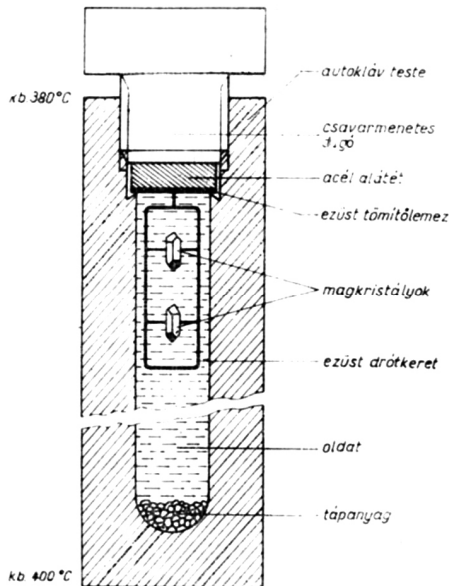
Az eljárások közül egyeseket – kissé visszatekintve a múltba – saját vizsgálatainkon keresztül fogok ismertetni és ezután rátérek a különböző módszerek értékelésére.

IV. Egykristályok előállításával a 40-es évek végétől foglalkozom, előbb kb. 2 éven át *Gyulai Zoltán* munkatársaként, majd ezt követően elsősorban *Turchányi György, Voszka Rudolf, Ujhegyi Sándor* és újabban *Raksányi Kund* munkatársaimmal.

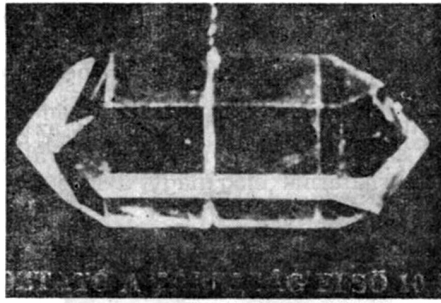
1. 1950-ben a Távközlési Kutatási Intézet megbízásából *Gyulai Zoltánnal, Zimonyi Gyulával és Ujhegyi Sándorral* nemzetközileg is az elsők között, kidolgoztuk *kvarc egykristályok gyakorlatilag is felhasználható hidrotermális növesztését*. A növesztést 30–40 cm hosszú, 2–3 cm belső átmérőjű (egyes esetekben nagyobb méretű) különleges acélból készült autoklávokban végeztük (1. ábra). Tápanyagként kvarckristály-darabkákat, ill. kvarcitot v. homokot használtunk, amelyeket az autokláv alsó melegebb részén helyeztünk el. A magkristályok (különböző orientációjú metszetek) az autokláv felső hidegebb tartományában függtek. Az alkalmazott vizes oldat néhány százalékban nátrium-karbonátot és nátrium-hidroxidot (esetenként nátrium-foszfátot is) tartalmazott. A növesztés számára kedvező feltételek állnak fenn, ha pl. az alsó hőmérséklet kb. 400 °C, a felső kb. 380 °C, az autokláv belsejében uralkodó nyomás pedig 1000–1500 atm., amely 75–85%-os szobahőmérsékletű töltettel érhető el. Ilyen körülmények között kb. 1 mm/nap Z-tengelyirányú maximális növekedési sebesség mellett jó minőségű növekményt értünk el (2. ábra).

A munkát *Nagy János* munkatársammal folytattam, éspedig egyes paraméterek (elsősorban a hőmérséklet és a nyomás) szerepére vonatkozólag végeztünk rendszeres vizsgálatokat. Ezek során magyarázatot adtunk bizonyos anomáliákra, amelyek az előző vizsgálatok során jelentkeztek, és egyben beigazolódtott, hogy az adott konstrukcionális körülmények között a növekedés számára legkedvezőbb feltételek éppen az előzőekben megadott hőmérsékleti és nyomási viszonyok között állnak fenn.

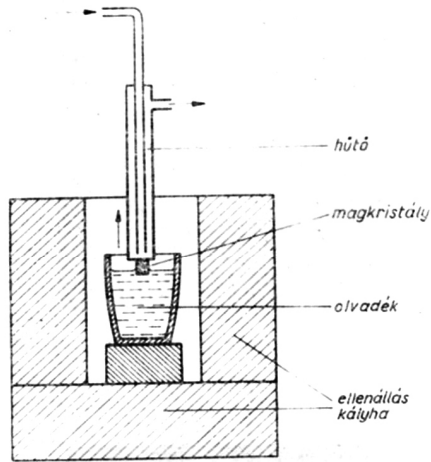
2. Ugyancsak az 50-es évek elején különböző *alkalihalogenid* kristályokat állítottunk elő olvadékból, részben a kristálynövekedés és a kristályhibák (valamint a szincentrumok) vizsgálata céljából, részben pedig az infravörös és az



1. ábra. Vázlat a kvarc-kristályok növesztéséhez



2. ábra. Kvarc-kristály (hossza kb. 2 cm)



3. ábra. Vázlat a Kyropoulos-féle módszerhez

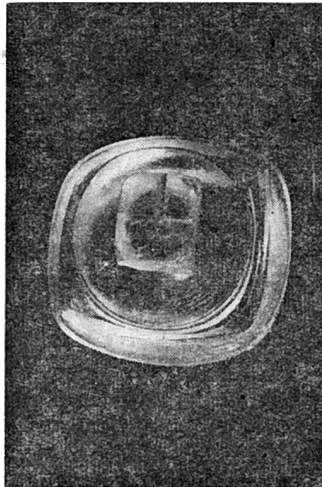
ultraibolya spektroszkópiában használatos optikai eszközök (prizmák, ablakok stb.) számára. Az olvadékból való kristálynövesztésnek már akkor is több változata volt ismeretes. Kísérleteinkben főként a *Kyropoulos-féle húzási eljárást* alkalmaztuk. Lényegét a 3. ábra szemlélteti. Kettősfalú, alul zárt fémcső végére kristálymagot erősítünk és azt az olvadék felületére bocsátjuk. A kettősfalú csövön levegőt, vagy vizet áramoltatunk keresztül és így a magnak állandó, szabályozható hő-elvezetés biztosítható. A kristályt lassan emeljük, miközben egyre több olvadék fagy rá.

A kristályok méretének növelése és minőségének javítása érdekében többféle kályhakonstrukciót, magbefogást, hűtő- és forgatórendszert, továbbá különböző utólagos hőkezelési eljárást tanulmányoztunk, ill. dolgoztunk ki. Az előállított legnagyobb hengeres kristályok átmérője kb. 15 cm, magassága kb. 10 cm volt. Ilyet mutat a 4. ábra. (A hengeres kristály tetején látható nyúlvány magkristályként szolgált.) A kristályok egyenletesen tükröző sík hasadási fe-

lülettel rendelkező, optikailag homogén egykristályok voltak. – Az 5. ábrán olyan kristályok egyikét látjuk, amelyen a hengeres forma váltakozik a mag orientációjának megfelelő poliédres formával. E példányok előállítására sikerült kísérletileg tisztáznunk egy, akkor még vitás növekedési kérdést: milyen körülmények között veszi fel a növekvő kristály az izoterm felületek alakját és milyen esetekben az ún. egyensúlyi formát? A válasz egyszerű: ha a hőmérséklet-gradiens a fázishatárnál elég nagy, a kristály az izoterm felület



4. ábra. NaCl kristály (átmérője kb. 15 cm)



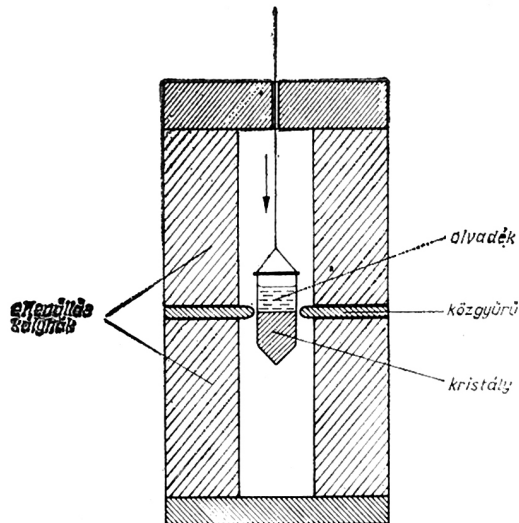
5. ábra. Váltakozva hengeresen és hasábosan növesztett NaCl kristály

alakját (jelen esetben a hengeres formát) veszi fel, ha viszont valamilyen módon, pl. az olvadék megfelelő mozgatásával az izotermák rendjét megzavarjuk és a kristályt közel olvadáspontok lévő olvadék öblögeti körül, a poliédres egyensúlyi forma nő. Az ábrán látható esetben is a hengeres részek nyugalmomban lévő, a hasábosak pedig „hullámzó” olvadékból nőttek.

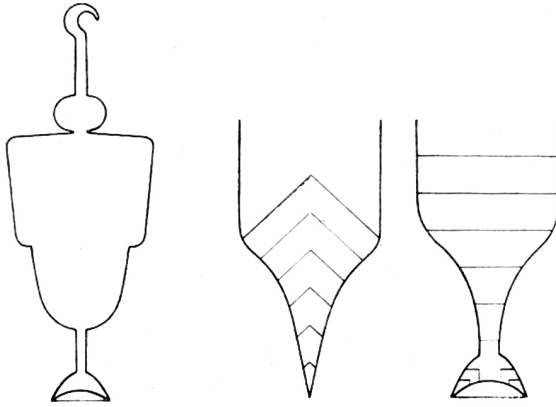
3. Ugyancsak oldalékból növesztettünk néhány tized súly⁰/₁₀-ban *talliumot* tartalmazó *NaI, KI, CsI kristályokat*. Az ilyen kristályok radioaktív sugárzások hatására szcintillálnak és – egy 1948-ban megjelent cikk alapján – főként γ -sugárzás mérésére, ill. γ -spektroszkópiai célokra felhasználhatók. Növesztési eljárásaink részben a Kyropoulos, de főként a *Bridgman elven* alapultak. Az utóbbi lényegét a 6. ábra szemlélteti. A kristályosítandó anyag alul csúcsban (vagy kapillárisban) végződő fedett, vagy teljesen zárt tégelybe kerül, majd az anyagot megolvasztás után az olvadáspontnál alacsonyabb hőmérsékletű térbe eresztjük le. A fagyás a csúcsban indul el és fokozatosan ráterjed az olvadékra, amint a tégely süllyed. A csúcs a monokristályos növekedés kialakulását segíti elő. A kálya felső és alsó tere közötti hőmérsékletgradienst, amelynek a növekmény minőségében lényeges szerepe van, egyrészt a fűtőelemek megfelelő kialakításával, másrészt fémből vagy szigetelőből készült gyűrű közbehelyezésével is formálhatjuk.

Munkáink során számos kísérlettechnikai problémát oldottunk meg. Pl. olyan kerámiatartóra szerelt fűtőelemeket szerkesztettünk, amelyekből különböző méretű és hőmérséklet-elosztású, tehát különböző kísérleti feltételeket kielégítő és más esetekben is jól felhasználható ellenálláskályhák építhetők. A hőmérséklet szabályozására egyszerű és olcsó megoldásokat választottunk, ill. dolgoztunk ki, amelyek segítségével a hőmérsékletváltozásokat a kb. 800 °C hőmérsékletű kristályosító térben is 0,01 fok/óra érték alá csökkenthettük.

A zárt térben való növesztés céljára a 7. ábra baloldalán látható, kvarcból készült tégelytípust dolgoztunk ki, amely más kristályok esetében is felhasználható.



6. ábra. Vázlat a Bridgman-féle módszerhez



7. ábra. Tégelyformák

nálható. Előnye, hogy benne a kész kristály feszülésmentesen hűthető le. A növesztés befejeztekor a kristály a tégely alsó felében helyezkedik el, és hőmérséklete nem sokkal alacsonyabb az olvadáspontnál. A tégely fala okozta feszülések elkerülése céljából az egész kályhát megfordítjuk és a tégelyt alsó végénél fogva felakasztva, hirtelen addig melegítjük, míg a kristály a tégely faláról leolvad és a tégely szélesebb részébe esik, ahol feszülésmentesen hűlhet le. A leolvasztásnál keletkező olvadék sem okoz zavart, mert a gömbalakú toldalékban gyűlik össze. A tégely másik előnye az oltócsúcs sajátos kiképzésével függ össze. A jobboldali ábrákon egymás mellett látható a szokásos és az általunk alkalmazott megoldás. Feltűntettük egyúttal a két esetben leginkább előforduló kristályorientációkat is. A felhasználás szempontjából a szélső jobboldali forma előnyösebb, mert így a kész kristályból szükség esetén nagyobb darab hasítható.

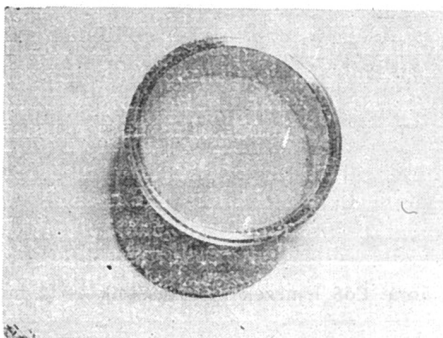
Tapasztalataink szerint a kristályok spektroszkópiai minőségét nem befolyásolja kedvezőtlenül, ha a növesztést szobalevegőn végezzük, ami egyébként jódkiváláshoz és oxigén-tartalmú szennyezések beépüléséhez vezet. (Lehetséges, hogy bizonyos mennyiségű oxigén tartalmú szennyeződés még kedvezően is hat.) Ezért tömeggyártás céljára (mind a növesztéskor, mind pedig a temperáláskor) a zárt kvarctégely helyett zománc mentes porcelánból készült fedett tégelyt használtunk. Ezt az egyszerűbb és olcsóbb eljárást 13 cm kristályátmérőig fejlesztettük ki.

A kristályok γ -spektroszkópiai feloldóképessége alkalmas hőkezeléssel javítható és 10^6 R dózis hatására sem szenved irreverzibilis változást. A növesztésen kívül eljárást dolgoztunk ki a kristályok megmunkálására, montírozására és speciális mérési célokat szolgáló kristályok előállítására is (8. ábra). Kristályaink minőségét a tömeggyártás szempontjából statisztikailag is értékeltük. A közepes méretű (kb. 4 cm átmérőjű, 4 cm hosszú) kristályaink kb. 70%-a kielégíti a viszonylag magas spektroszkópiai igényeket, a többi is felhasználható azonban γ -sugárzás mérésére az egészségügy, vagy az ipar különböző területein.

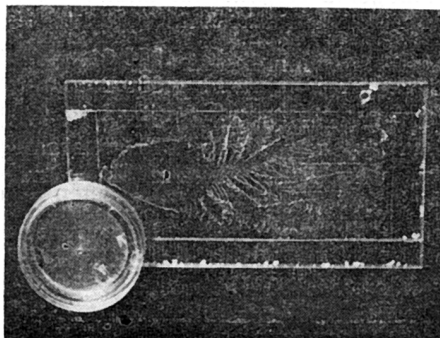
Eredményeinket a Gamma Optikai Művek vette át és az általunk bevezetett módszerrel gyártott kristályai a Prágában 1962-ben tartott nemzetközi minőségi versenyen első helyezést értek el.

4. A szerves szcintillátorok közül főleg γ -sugárzás mérésére szolgáló *nattalin* és *antracén* kristályokat növesztettünk ugyancsak a *Bridgman-eljárás* alapján. Tökéletesítettük az addig közölt tisztítási, növesztési, valamint hűtési módszereket és eljárást dolgoztunk ki a kristályok megmunkálására is. Kristályainkat magfizikai kutatásokban számos helyen felhasználták itthon és külföldön.

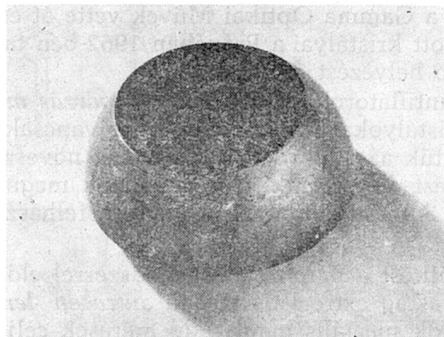
Külön tesztek említést a párologtatási módszerrel előállított 8–12 cm² területű, 0,1–0,2 mm vastag extrém tisztaságú *antracén lemezeinkről*, amelyek előnyösen használhatók speciális magfizikai mérések céljaira (9. ábra). Ezek megmunkálására is eljárást dolgoztunk ki. E munkákban *Krajsovszky József* is részt vett. Tudomásom szerint hasonló méretű és minőségű detektorokat mások nem állítottak elő és valószínűleg ezzel függ össze az, hogy velük kapcsolatban külföldről gyakran keresnek meg bennünket. Az eljárás is a maga idejében új gondolatot valósított meg, éspedig a *gőztázisból való kristályhúzást*.



8. ábra. NaI(Tl) kristály foglalatban (átmérője kb. 8 cm)



9. ábra. Antracénlemezek plexiüveg alatt



10. ábra. KRS kristály (átmérője kb. 5 cm)



11. ábra. CdS lemezek (hosszúságuk 4–12 mm)

Ezáltal sikerült mind a magosodást, mind pedig a növesztési sebességet kedvezően befolyásolni.

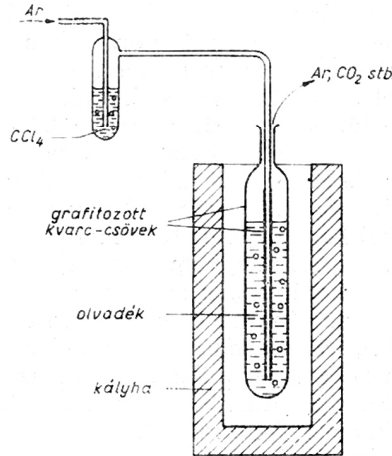
5. Említést teszek még néhány nem közölt eredményről. Előállítottunk (először *Smakula* által növesztett és az irodalomban KRS néven szereplő) kb. 40 u-ig átengedő *tallohalogenid* elegykristályokat (10. ábra). Eljárásunk lehetővé tette, hogy az eutektikus összetételt jól megközelítő, optikailag kiváló minőségű kristályokat nyerjünk.

Fény (látható és UV), valamint röntgensugárzás mérésére fotoellenállásként *CdS kristálylemezkeket* is növesztettünk *Frerichs* módszerével. Ennek lényege, hogy kadmium és kénhidrogén gőzök keverékét állítjuk elő 900–1000 °C-on és a keveréket hidrogéngáz segítségével 700–800 °C hőmérsékletű tartományba áramoltatjuk, ahol kedvező feltételek esetén lemezalakú kristályok képződnek, illetve növekednek.

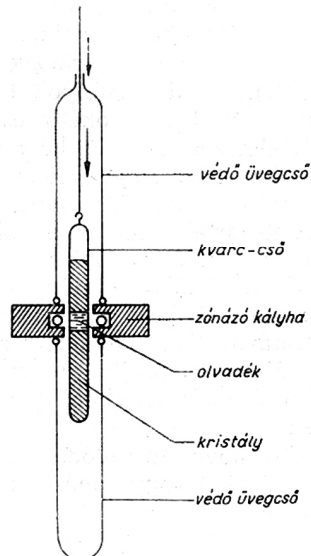
Az előzőekben felsorolt eredményeinket – mint említettem – főként az 50-es években értük el. Az objektív feltételek fokozódó hiányosságai miatt vizsgálataink súlypontját kénytelenek voltunk más, addig kisebb intenzitással művelt, kevésbé hely- és energiaigényes területekre áthelyezni. A kristálynövesztés vonatkozásában csak „válogatott” kérdésekkel foglalkoztunk. Ezek kö-

zül kiemelem a különböző nagytisztaságú alkali-halogenid egykristályok előállítását a szincentrumokkal kapcsolatos vizsgálataink számára.

6. Az alkali-halogenidekről hosszú ideig az volt a vélemény, hogy az olvadékból előállított kristályaik viszonylag tiszták. Hibaszerkezetüknek részünkről is végzett sokoldalú tanulmányozása azonban egyre kétségesebbé tette a vélemény helyességét. Nagytisztaságú alkali-halogenid kristályok előállítása az



12. ábra. Vázlat az alkali-halogenidek tisztításához (széntetrakloridos kezelés)



13. ábra. Alkali-halogenidek zónázása

utóbbi években külföldön is sürgős igényként jelentkezett. A problémát különösen az oxigén tartalmú szubsztitúciósan beépült szennyezések és az ugyancsak szubsztitúciósan beépült kétvegyértékű fémionok képezik.

Tiszta alkalihalogenid kristályok előállítására és a szennyezések koncentrációjának meghatározására, beépülési módjaik, egymással és a gazdarács hibáival való kölcsönhatásaik tanulmányozására számos módszert alkalmaztunk, ill. dolgoztunk ki. A leghatásosabb tisztítási eljárásunk két lépésből áll. Az első lépésben kloridok esetén klór (pontosabban: pl. széntetraklorid), bromidok esetén bróm (pontosabban: bromoform) stb. gőzöket buborékoltatunk a vékony grafitréteggel bevont kvarccsőben lévő olvadékon keresztül (12. ábra). Ezáltal hatásosan csökkenthető az oxigén tartalmú szennyezések koncentrációja és elérhetjük, hogy az olvadék, ill. a megszilárdult anyag nem tapad a kvarcüveghez (a meniszkusz felülről nézve domború), ami kedvező körülményt biztosít a további eljárás számára. – A második lépésben KCl, KBr, RbBr kristályok esetében zónaolvasztásos tisztítást alkalmaztunk (13. ábra), és többszöri zónázás után a kvarcampullába zárt mintát *ugyanott* egykristállyá növesztettük. A kétértékű fémekkel kapcsolatban 10^{-9} mol/mol-nál kisebb szennyezettségig sikerült eljutnunk. A grafitréteg, amely az eljárás első részében a kvarccső belső falát borítja, belekerül ugyan az olvadékba, de végső soron zavart nem okoz, mert zónázáskor a zónázott anyag tetején összegyűlik. A grafitozás jelentősége abban áll, hogy megakadályozza az olvadéknak a kvaccal való érintkezését a tisztítás kezdeti szakaszában, amikor az olvadék még nedvesíti a kvarcot. Később, amikor a grafit már levált a kvarccsőről, a kvarc nem tapadó olvadékkal érintkezik, amely kevéssé vesz fel szennyezést a kvarcból.

A zónázás nem minden esetben bizonyult hatásosnak. Nem tisztítható zónázással pl. a NaCl a kalcium szennyezéstől, minthogy ebben az esetben az eloszlási tényező értéke közel 1. Ebben az esetben a különböző kémiai és fizikai módszerek közül a leghatásosabbnak mutatkozott az ioncsere. Ezután került sor az előbb ismertetett klórozásra. Ezzel a módszerrel NaCl esetén 10^{-7} mol/mol tisztaságot értünk el. Jelenleg az alkalihalogenidek területén nemzetközileg is a legtisztább egykristályokkal rendelkezünk, és több külföldi intézetből (szovjet és amerikai intézetekből is) érkezik hozzánk megkeresés.

A nagytisztaságú alkalihalogenid kristályok tulajdonságai sok tekintetben eltérőek az ún. névleges tiszta kristályokétól és több régi megfigyelés új megvilágításba kerül, új értelmezést kap. A közelmúltban a szincentrumok vonatkozásában néhány érdekes eredményt értünk el, amelyekkel kapcsolatban most csupán egy folyamatban lévő vizsgálatra szeretnék utalni. Úgy látszik, hogy a szincentrumokat tartalmazó kristályok többféle módon is felhasználhatók optikai információátvitelre. Amiről most említést teszek, annak lényege abban áll, hogy adott kristálytartományban egy bizonyos centrumfajta a megfelelő hullámhosszúságú fény hatására átalakul az előbbitől eltérően abszorbeáló centrumfajtvá. Ilyen módon történik az információ „beírása”. „Kiolvadáskor” az új centrumfajta abszorpció sávjában világítjuk meg a kristályt. Célunk, hogy módszerünkkel 10^8 bit/cm² nagyságrendű információsűrűséget érjünk el.

V. Ezek után visszatérek a növesztési módszereket tartalmazó táblázathoz és megkísérlem az egyes eljárásokat nagy vonásokban értékelni.

Az egykomponenses eljárások főbb vonásai:

1. A tápfázisban (amely szilárd, folyékony vagy gőznemű lehet) a növesztendő kristály anyaga dominál, ezért kevesebb a lehetőség idegen anyagok beépülésére.

2. Ugyancsak az egykomponenses jellegből következik, hogy a növekedési határrétegben a diffúzió nem játszik lényeges szerepet, ezért nagyobb növekedési sebességek alkalmazhatók.

3. Kevesebb gondot okoz a felhős, dendrites és más hibás növekedés elkerülése.

4. Nincs szükség előzőleg hosszadalmas és fáradságos tanulmányok elvégzésére, mint amilyen a többkomponenses eljárásoknál, pl. a fázisegyensúlyok, oldhatósági viszonyok megismerése.

5. Gyors eredmények érhetők el; pl. kristályhúzással esetleg néhány óra alatt akkora kristály növeszthető, amelyen már elvégezhető különböző kristallográfiai vizsgálatok. Ez a körülmény igen előnyös akkor, ha új anyagok után kutatunk.

6. Hátrány származhat viszont abból, hogy a növesztés, a rekrisztallizációs eljárástól eltekintve, viszonylag magas hőmérsékleten megy végbe, amely körülmény növeli a kristályosító térben lévő szerkezeti anyagok és az atmoszféra szennyező hatását. Ez a hátrány is elkerülhető azonban a tégelymentes eljárásoknál, amelyek közül különösen elterjedt és magas színvonalra fejlődött az ún. lebegő zónázás. (Ebben az esetben az olvadék-zónát a felületi feszültség tartja a helyén.) Újabban több húzásos eljárást is kidolgoztak, amely a tégelymentessel egyenértékű.

7. A rekrisztallizációs eljárások sajnos gyakorlati szempontból jelenleg még kevésbé kidolgozottak, pedig számos előnyük van: nem igényelnek túl magas hőmérsékleteket és a további szennyeződés is viszonylag egyszerűen elkerülhető. A fő nehézséget jelenleg az okozza, hogy nem tudjuk eléggé kézben tartani a magszámot. Érdemes lenne számba venni azokat az ötleteket és tapasztalatokat, amelyeket más eljárások esetén sikerrrel alkalmazunk. Ilyenek lennének pl. a Bridgman-módszerhez hasonló és nagy hőmérsékletgradiensen alapuló eljárások, vagy a magok kiszűrése és az iktelenítésre vonatkozó módszerek és tapasztalatok.

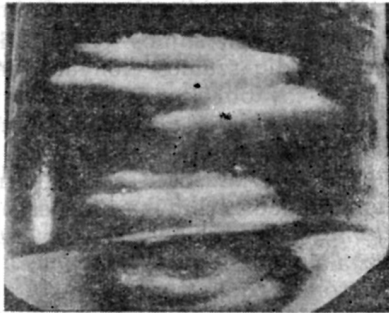
A több-komponenses eljárások legfontosabb előnye, hogy lehetővé teszik a növesztésnek az olvadáspontnál alacsonyabb hőmérsékleten való végrehajtását. Alkalmazásuk tehát főként a következő esetekben indokolt:

- alacsony hőmérsékletű módosulat előállítására;
- ha a növesztendő anyag inkongruensen olvad, vagy olvadáskor bomlik;
- ha a növesztendő anyag gőznyomása magasabb hőmérsékleten kedvezőtlen kísérleti feltételeket teremt;
- ha más módon nem kerülhetők el egyszerűen a vakanciákat, diszlokációkat, kisszögű szemcsehatárokat keltő termikus feszülések;
- ha más módon nem küszöbölhetők ki a magas hőmérséklettel együtt járó fokozott szennyeződés-lehetőségek és kémiai reakciók a kristályosító edénnyel, valamint az atmoszférával;
- ha nem lehetséges magas hőmérsékleten megvalósítani a kívánt adalékanyag eloszlását, pl. azért, mert az adalékanyag nagymértékben illékony.

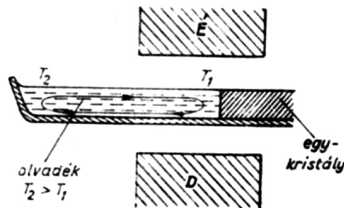
E rövid áttekintésből is következik, hogy a több-komponenses eljárásokat csak szükségéből alkalmazzuk. Jelenleg az a helyzet, hogy az esetek nagy részében a legjobb eredményeket olvadékból való növesztéssel érjük el, és érdemes külön figyelmet fordítani a húzásos eljárásokra. Számos előnyük miatt az utóbbi években a magas olvadáspontú oxidkristályok előállításával kapcsolatban sok gondot fordítottak fejlesztésükre és ennek kapcsán sikerült tisztázni számos növekedési hiba kialakulásának és kiküszöbölésének feltételeit is, l. pl. (2). Az oxidok olvadékból való növesztésénél nyert tapasztalatok természetesen jól felhasználhatók más anyagok és más növesztési módszerek vonatkozásában is.

VI. *Növekedési hibák.* A következőkben az irodalom alapján összefoglalom a fontosabb növekedési hibákat, éspedig az előidéző okok szerint csoportosítva. Csak a „finom” hibákkal foglalkozom, és feltételezem, hogy az előidéző okok között korszerűtlen hőmérséklet-szabályozás, rossz minőségű magkristály, tisztátlan nyersanyag és más durva szennyeződési lehetőség nem szerepel.

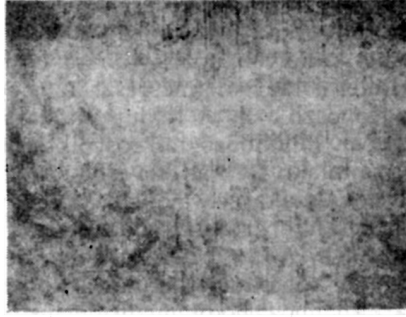
1. *Olvadék áramlása.* Ha húzással való növesztéskor az olvadékba merülő kristályt forgatjuk, a kristály által az olvadékban létrehozott áramlás következtében az adalékanyag és a visszamaradt szennyezés a növekvő kristályban *spirálisok* mentén helyezkedhet el (14. ábra), és az inhomogén eloszlás feszüléseket hozhat létre. E jelenség a forgatási sebesség csökkentésével kevésbé lép fel, de kisebb sebességek esetében is kialakulhat, amint a növekvő kristály megközelíti a tégely falát.



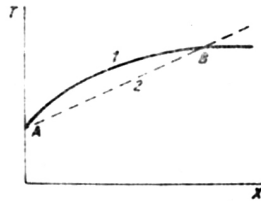
14. ábra. Kyropoulos-módszerrel növesztett és közben forgatott NaCl kristályba spirális mentén beépült szennyezés



15. ábra. Turbulens olvadék-áramlás által előidézett sávos növekedés kiküszöbölése mágneses tér segítségével. A nyilak a konvekciós áramlás irányát jelzik.



16. ábra. Sávós növekedés InSb esetében (150x). Az adalékanyag tellúr. A bal oldali, nem-sávós tartomány mágneses térben nőtt (3)



17. ábra. A konstitúciós túlhűlés

Hasonló jelenséget az olvadékban levő hőmérsékletgradiens által létrehozott *konvekciós áramlás* is előidézhet, ha a túl nagy gradiens következtében az áramlás turbulenssé válik (15. ábra). A turbulencia hőmérsékletingadozásokat okoz az olvadék-kristály határfelületénél, ezek pedig a növekedési sebességben hoznak létre oszcillálásokat. A különböző növekedési sebességek esetében különböző az idegen anyagok beépülési koncentrációja és a növekmény *barázdássá, sávozottá* válik (16. ábra).

Azokban az esetekben, amikor az olvadék töltéshordozókat tartalmaz, a konvekciós áramlás megfelelő irányú konstans mágneses tér alkalmazásával mintegy fékezhető és a turbulencia megszüntethető (15. ábra). Kedvező viszonyokat teremthetünk azáltal is, hogy pl. pótfűtések alkalmazásával az olvadékban a hőmérsékletgradienst csökkentjük anélkül, hogy a gradiens az olvadék-kristály határfelületénél is csökkenne.

2. *Konstitúciós túlhűlés.* Ha az adalékanyagra vagy a szennyezésekre vonatkozólag az eloszlási tényező 1-nél kisebb, az idegen anyagok koncentrációja az olvadékban a fázishatárnál nagyobb lehet, mint a határtól távolabb az olvadékban. Ennek következtében az olvadék egyes tartományaihoz egyre magasabb fagyáspont tartozik, amint a fázishatártól távolodunk az olvadék belseje felé. Ezt szemlélteti a 17. ábrán az 1. görbe. A 2. görbe pedig a fázishatár közelében az olvadékban fennálló hőmérsékleteloszlást mutatja. Nyilvánvaló, hogy az A és B pontoknak megfelelő helyeken az olvadék az olvadásponton, de a közti tartományban túlhűlt állapotban van. Ez az ún. konstitúciós túlhűlés, amely kiküszöbölhető, ha elég lapos az 1 és elég meredek a 2

görbe, ami azt jelenti, hogy kis növekedési sebességet, nagy hőmérséklet-gradienst és fokozott keverést kell alkalmazni. A konstitúciós túlhűlés többféle jelenség forrása lehet, amelyek közös vonása egyrészt az, hogy a sima (lépcsős) növekedési felület feldurvul, másrészt az, hogy az idegen anyag a növekményben inhomogén oszlik el. A feldurvult határfelület a konstitúciós túlhűlés mértékétől függően különböző mikrostruktúrát mutathat. Egy ilyen szemléltet a 18. ábra. A sejtalakú formák kevésbé szabályosak is lehetnek, sőt szélső esetben egyenes vonalszakaszok helyett görbe vonalak alakulnak ki, amelyek a sejtek belseje felé többszörösen elágazódnak és a sejtek közepéből dendrites növekedés indul ki. (A dendritek tengelye nem szükségképpen merőleges a határfelületre.) A konstitúciós túlhűlés következményeinek vizsgálata jelentősen hozzájárult ahhoz, hogy megismerjük azokat a jelenségeket, amelyek átmenetet képeznek a sima (lépcsős) növekedéstől a dendrites növekedésig.

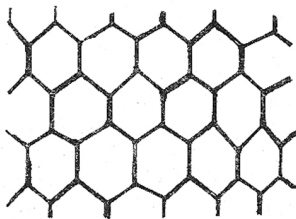
3. *Fazettás növekedés.* A fagyásponthoz tartozó izoterm felület általában nem sík, hanem görbült. Előfordul azonban, hogy a növekmény nem veszi fel pontosan az izoterma alakját, hanem a kristályon különböző szögben hajló sík felületek alakulnak ki. Ekkor beszélünk fazettás növekedésről. Ez azért ártalmas, mert a különböző indexű síkokon a szennyezések, ill. az adalékanyagok különböző koncentrációban helyezkednek el és feszüléseket is létrehozhatnak. Ezt az inhomogenitást elkerülhetjük megfelelő izoterm felületek kialakításával, húzásos növesztéskor a kristály gyors forgatásával (120–150 fordulat/perc) is.

4. *Szennyezések, adalékanyagok és a sztöchiometriai aránytól való eltérések.* Idegen anyagokkal kapcsolatos hibákról az előzőkben már szóltam. Most továbbiakat is említek.

Ilyen pl. a visszaszennyeződés lehetősége zónás kristályosításnál. Ismert jelenség az is, hogy a lebegő zónázásnál a zónázandó rúd felületére került mikroszkópikus szennyezés új kristálygócot képezhet, ill. orientáció-változást okozhat.

Ha az idegen anyag koncentrációja a kristályban meghaladja az oldékonyság határát, az idegen anyag finom eloszlású csapadékot képez, pl. rubin kristályban a Cr^{3+} adalék. A csapadék nemcsak fényszórást okoz, hanem a laserként használt rubin kristály megrepedésére is vezethet, ha intenzív sugárzásnál a kristály túlságosan felmelegszik.

A szennyezések a ferroelektromos anyagokban sokdomenes növekedést okoznak.



18. ábra. Kristály-olvadék határfelületen kialakuló sejtes szerkezet; a sötét vonalak mélyedéseket jelölnek

A több-komponensű oxidokban a sztöchiometriai aránytól való eltérések az előzőkhöz hasonló problémákat okozhatnak. Pontosan kell tehát beállítani a kémiai összetételt, sajnos azonban ezt számos esetben még gátolja a fázisviszonyok ismerete. Gyakran az is ismeretlen, hogy a vegyület egyetlen összetételben létezik-e, vagy a homogén összetételek egész sorát mutatja.

5. *Feszülések.* A kristályban feszülések több ok folytán jöhetnek létre. A kémiai összetétel helyi változásainak szerepéről már tettem említést. A leggyakoribbak a termikus eredetű feszülések. Ilyenek lépnek fel, ha a növekvő kristályra nagy hőmérsékletgradiens esik, vagy a kristályt gyorsan és ennek következtében inhomogénen hűtjük. A termikus feszülések csökkenthetők, ha a hőmérsékletgradienst a növekvő kristály mentén megfelelő pötfűtőelemek alkalmazásával csökkentjük és lassú, egyenletes lehűlést biztosítunk. A termikus feszülések elkerüléséhez ismerni kell természetesen a kristály mechanikai tulajdonságainak a hőmérséklettől függő változását. Egyelőre ismereteink a legtöbb anyaggal kapcsolatban ilyen vonatkozásban igen hiányosak.

Feszülést okoznak a polimorf fázisátalakulások, ikerképződések. Ezek pedig alacsony hőmérsékletű növesztési eljárás alkalmazásával, vagy utólag megfelelő hőmérsékleten létrehozott feszítéssel (ikertelenítés) eliminálhatók, ill. csökkenthetők.

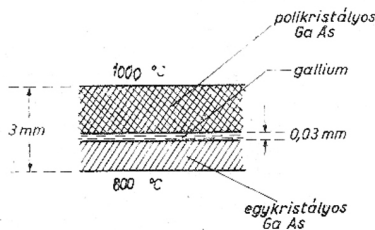
6. *Hőmérséklet.* A hőmérsékletről is volt már szó több vonatkozásban. Most arra a hibaforrásra szeretném felhívni a figyelmet, ami abból származik, hogy a kristály növesztésével megváltozik a növesztő rendszer geometriája és ennek következtében változik a kristály és a környezete közötti sugárzó energiacsere. A hőmérsékleti viszonyokat tehát a növesztés előrehaladtával folyamatosan változtatni kell, vagy a kristály végméretéhez képest is nagy mennyiségű olvadékot kell alkalmazni.

A mondottakból nyilvánvaló, hogy adott esetben egymással ellentétes követelmények közepette kell kikísérletezni a legmegfelelőbb növesztési eljárást. A növekedés mechanizmusa sem ismeretes még kellő részletességgel.

Ilyen körülmények között érthető, hogy még nem is nagyon régen a kristálynövesztők azon tréfálkoztak, hogy a kristálynövesztés inkább művészet, mint tudomány. A *J. J. Gilman* szerkesztésében 1963-ban megjelent könyvnek is a címe: *A kristálynövesztés művészete és tudománya.*

VII. *Néhány érdekes és újabb módszer.*

1. A több-komponensű eljárások egyik előnyös változata a *hőmérsékletgradienses zónavándorlás*, amelyet először félvezető vegyületek oldatból való növesztésére alkalmaztak. Az oldószer a vegyület egyik komponensének ol-

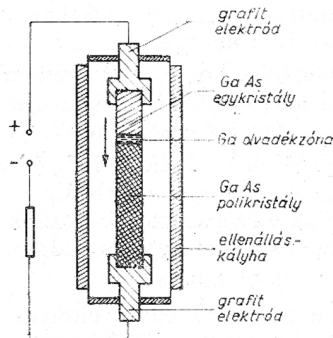


19. ábra. Hőmérsékletgradienses zónavándorlás

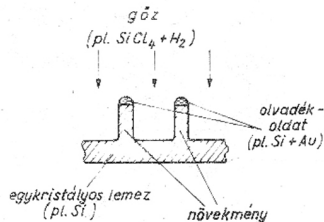
vadéka. Példaként a GaAs növesztését említem (4) (19. ábra). A növesztő rendszer 3 rétegből áll. Alul van a növesztendő egykristály, felül a polikristályos tápanyag, közöttük az olvadékszóna, amely jelen esetben galliumarzenidet oldva tartalmazó gallium-olvadék. A rendszer olyan térben helyezkedik el, amelyben konstans hőmérsékletgradiens áll fenn. Az ábrán vázolt esetben a hőmérséklet fölfelé haladva nő. A vékony zóna felső szélé tehát magasabb hőmérsékleten van, mint az alsó, következésképp az oldott GaAs koncentrációja nagyobb az olvadékszóna tetején, mint az alján. A felső határfelülettől GaAs diffundál a zónán keresztül az alsó határfelülethez. A hidegebb alsó határfelületnél a zóna a galliumarzenidre nézve túltelítetté válik és a főlegesen lévő GaAs az egykristályon kiválik. Ugyanakkor a zónának a galliumarzenidben elszegényedett felső része tovább oldja a polikristályos tápanyagot. A zóna tehát spontán fölfelé vándorol, miközben az alsó egykristály növekszik.

Ha a kísérletet adalékolt galliummal végezzük el, az adalékanyag beépül a növekvő galliumarzenid kristályba és így *n*-, vagy *p*-típusú kristályokat is növeszthetünk.

A 20. ábra a spontán zónázás olyan esetét szemlélteti, amikor a hőmérsékletgradienst Peltier-féle hőhatás felhasználásával hozzuk létre (4). Megfelelő áramirányt alkalmazva, elérhetjük, hogy a zóna felső határa melegebb, az alsó hidegebb lesz és a zóna most is, miként az előbb, fölfelé vándorol.



20. ábra. Peltier-féle hatáson alakuló zónavándorlás



21. ábra. Szilícium tűk növesztése VLS-módszerrel

Az említett eljárásnak nemcsak az az előnye, hogy sem edényre, sem mechanikus mozgató berendezésre nincs szükség, hanem az is, hogy segítségével különböző tulajdonságú átmenetek már a kristálynövesztés alatt létrehozhatók.

2. Ez ideig még kevéssé alkalmazott több-komponensű eljárás a *gőz-folyadék rendszerből* való kristálynövesztés, amelyet a vapor-liquid-solid szavak kezdőbetűiből röviden VLS-módszernek neveznek. Lényegét szilíciumtűk, ill. vékony rudak növesztésén szemléltetem (5) (21. ábra). A tűket szilícium egykristály-lemezre növesztjük. A lemez felületén azokra a helyekre, ahová tűket kívánunk növesztetni, arany korongocskákat helyezünk. A hőmérsékletet fokozatosan emeljük, míg a szilíciummal ötvözött arany megolvad. Ezután a preparátumhoz SiCl_4 tartalmú hidrogéngázt vezetünk. A gőztérben képződő szilícium megfelelő viszonyok között nem rakódik le a lemezre, de behatol a megolvadt aranyötvözetbe. Az ötvözet szilíciumra nézve túltelítetté válik, és a lemezen szilícium válik ki, amely tovább építi a lemez kristályrácsát. Az olvadákcsepp a növekvő túl hegyén helyezkedik el és közvetíti a szilícium-transzportot a gőztérből a kristályhoz. A módszer eddig még kevéssé kihasznált érdekes lehetőségeket rejt magában.

3. Az utóbbi években magas hőmérséklet előállítására *plazma-fáklyát* is használnak. Indukciós plazma-fáklyát szemléltet a 22. ábra (6). A felhevítendő gáz (pl. tiszta argon) kvarccsőben áramlik keresztül. A plazmát a rádiófrekvenciás (rf) erőterbe tolt és ott felmelegedett grafit-rúd vagy wolfram-hurok segítségével gyújtjuk be. A begyújtás után a rudat, ill. a hurkot a plazmatérből eltávolítjuk. A hőmérséklet a plazma közepén kb. 15 000 °C, a szélén kb. 10 000 °C. – A 23. ábra indukciós plazma-fáklyával működő Verneuil-féle kristálynövesztő berendezést mutat. Az ábra alsó részén látható a magkristály. A por alakú tápanyag a középső kvarccsőben, majd a plazmán áthaladva, és itt megolvadva hullik a magkristály fejére.

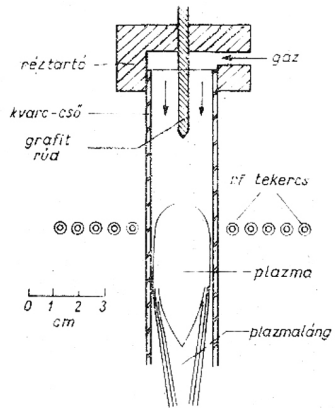
Az indukciós plazma-fáklyának nagy előnye, hogy inert, redukáló és oxidáló gázokban egyaránt működtethető. A gázt természetesen mindenkor a növesztendő kristálynak megfelelően választjuk meg.

4. A fókuszált fénynyaláb felhasználható számos szilárd anyag megolvasztására. Xenon-lámpák segítségével minden nehézség nélkül elérhető 3000 °C. A 24. ábra két fényforrással működő *fénykályhát* szemléltet (7). Mindegyik fényforráshoz két egymással szemben álló homorú tükör tartozik. A nyilakkal ellátott vonalak jelzik a fény útját. Gazdaságossági okokból célszerű a fényforrások mögé is tükröt helyezni. – Az ábra lebegő olvadátközona létrehozását szemlélteti rúd alakú minta (pl. rubin) esetében. Az ábra a rúd felső és alsó felének ellentétes irányú forgatását is jelzi, miáltal elősegítjük az olvadékban a szimmetrikus hőmérséklet-eloszlást és az adalékanyag egyenletes eloszlását.

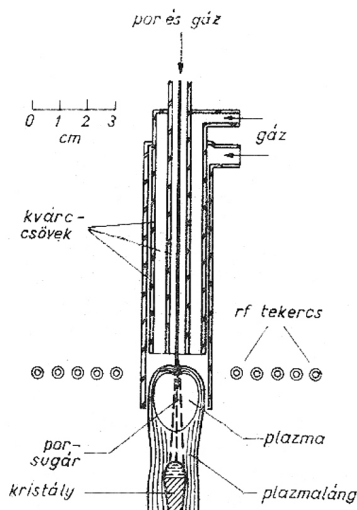
A fényvel való olvasztás előnye, hogy a kristályosító térben nincsenek szennyező fűtélelemek, sem elektromos, sem mágneses tér. Előnye az is, hogy pl. néhány cm átmérőjű kvarccső segítségével viszonylag egyszerűen kialakíthatunk zárt kristályosító teret, amelybe megfelelő gázokat vihetünk, és azok nyomását széles intervallumban változtathatjuk.

Ugyanez nehezebben valósítható meg, ha az olvasztást fény helyett fókuszált elektron-nyalábbal végezzük.

5. A 25. ábrán Chochralski-módszerrel való növesztést szemléltetünk. A tégelyben levő polikristályos anyagot fókuszált fényvel olvasztjuk meg.



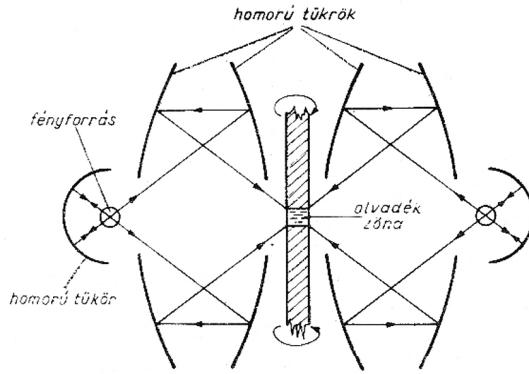
22. ábra. Indukciós plazma-fáklya



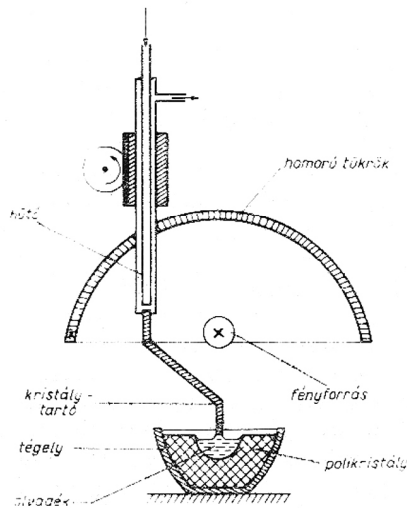
23. ábra. Verneuil-féle eljárás indukciós plazmafáklyával

Az ábrán vázolt eljárás azonban más szempontból is érdekes (8). A tégelyben levő tápanyagnak ui. csak egy részét olvasztjuk meg, és így az *olvadékok ugyanazon anyagból való szilárd kéreg veszi körül*. Ez az eljárás ugyanolyan előnyökkel jár a tisztaság szempontjából, mint a tégelymentes növesztések.

A tégelyprobléma egyébként más módon is megoldható. Tégelyként alakíthatjuk ki pl. a vörösréz-ből készült vízűtéses rádiófrekvenciás tekercset. Ilyen esetben négyszög-keresztmetszetű meneteket használunk és azokat szorosán egymás mellé illesztjük. A tégelybe helyezett por alakú tápanyagnak csak a középső része olvad meg a nagyfrekvenciás térben, a vízűtés az olvadék körül szilárd kérget biztosít.



24. ábra. Zónázás fénykályhával



25. ábra. Fénykályha és saját anyaggal bélelt tégely

VIII. A kristálynövesztéssel kapcsolatos *időszerű gyakorlati feladatokkal* a közelmúltban részletesen foglalkozott *K. Hoeslitz* (9), most csak néhány gondolatot szeretnék kiemelni.

Az elmúlt években a *félvezető anyagok* területén különösen nagy gondot fordítottak világszerte a jól bevált és széles körben felhasználásra kerülő Ge, Si és GaAs tömb- és réteg-kristályainak előállítására. A közvetlen feladat jelenleg minél több olyan módszer kifejlesztése, amely segítségével a kristályok a felhasználáshoz szükséges alakban és méretben állíthatók elő és a továbbiakban már kevés megmunkálást és szerelést igényelnek. Ezzel fokozható a gazdaságosság és a minőség. A különböző kezelések, megmunkálások (vágás, csiszolás, polírozás stb.) ui. hibákat hoznak létre a kristályban és rontják an-

nak minőségét. Kevésbé jó a helyzet más félvezető anyagokkal kapcsolatban és további kutatást, ill. fejlesztést kíván pl. a II–VI. típusú félvezető anyagok, továbbá az ólom-, ön-kalkogenidek (szulfidok, szelenidek, tellúridok) és általában a három- vagy többkomponensű félvezető anyagok kristályainak előállítására. Egészen újszerű feladatok előtt állunk a szerves és az amorf félvezető anyagok vonatkozásában.

Nőnek a követelmények a *szilárdtest-laserekkel, a nem-lineáris optika, az információ-továbbítás, tárolás és feldolgozás* területén felhasználásra kerülő anyagokkal kapcsolatban is. Ez utóbbi területeken megfelelő méretű és minőségű kristályok előállítása messze kevésbé megoldott probléma, mint a félvezetők területén. A megfelelő anyagok felkutatása sem zárult le.

Fémek és ötvözetek tulajdonságaival kapcsolatban fontos volna egyes intersticiális ötvözetek és intermetallikus vegyületek egykristályainak előállítása és tanulmányozása. Ezekhez csatlakoznak a karbidok is, amelyek a magas hőmérsékletet tűrő acélok szerkezetében ugyancsak fontos szerepet játszanak. Nagy gyakorlati jelentőségük van továbbá azoknak az ötvözeteknek, amelyekben a kristallitok megfelelő rendben helyezkednek el. Pl. a magas hőmérsékletű acélok mechanikai tulajdonságai befolyásolhatók a kristályos elemek rendezettségével. Ugyanez vonatkozik a permanens mágneses vagy a vas-szilícium szalagok tulajdonságaira is.

Fémekkel és nem fémes anyagokkal kapcsolatban egyaránt új alkalmazási lehetőségeket rejtenek magukban a tükristályok, amelyek vonatkozásában – egyelőre főként az alkali-halogenideket illetően – értékes hazai tapasztalatok vannak.

A hazai problémáktól jelenleg kissé távol áll, de említést teszek azokról az anyagokról, amelyek kristályainak mechanikai, elektromos és termikus tulajdonságai nagymértékű anizotrópiát mutatnak és ezért érdekes alkalmazási lehetőségeket rejtenek magukban. Ilyen anyag pl. a grafit, amelynek néme-lyik tulajdonsága 10^4 – 10^5 faktorban különbözik a szélsőséges értékeket képviselő irányokban mérve. Réteges szerkezetű anyagok a molibdénszulfid, bizmuttelltúrid, óndiszulfid stb. kristályai is.

Az organikus anyagok (különösen a polimerek) egykristályainak tudományos és gyakorlati fontossága nehezen megjósolható, de biztosan nőni fog.

Végezetül még egy megjegyzés. Mindentudó módszer nem létezik, sőt egyazon anyag esetében is többféle növesztési eljárással kell kísérletezni, míg eljutunk egy jobbhöz, megfelelőbbhöz. Nem elégedhetünk meg adott esetben egyetlen speciális eljárással, amelyhez a készülék éppen rendelkezésre áll, vagy amelyet valamilyen, gyakran szubjektív ok folytán favorizálunk. Fel kell tehát készülni lenni valamennyi ismert módszer alkalmazására adott esetben. Ez nélkülözhetetlen feltétel akkor is, ha valamilyen területen megjelenik egy új, érdekes anyag, és azt gyorsan kívánjuk előállítani, és még inkább akkor, ha új anyagok felderítésével is foglalkozni akarunk. Úgy vélem, hogy ezt a körülményt különösen hangsúlyozni kell mindenütt, és ez a helyzet hazánkban is, ahol súlyt helyezünk a szilárdtestek kutatására.

TARJÁN IMRE,
a MBT elnökségének tagja

IRODALOM

1. R. A. Laudise, in: *Crystal Growth* Ed. H. S. Peiser (Pergamon, London, 1967) p. 3-15.
2. B. Cockayne, *Journal of Crystal Growth*, 3, 4, (1968) 60-70.
3. H. P. Utech and M. C. Flemings, *Journal of Applied Physics*, 37, (1966) 2021-2024.
4. A. I. Mlavsky and M. Weinstein, *Journal of Applied Physics*, 34 (1963) 2885-2892.
5. R. S. Wagner and C. Y. Doherty, *Journal of the Electrochemical Soc.* 113, (1966) 1300-1305.
6. T. B. Reed, *Journal of Applied Physics*, 32 (1961) 2534-2536.
7. W. G. Field and R. W. Wagner, *Journal of Crystal Growth*, 3, 4, (1968) 799-803.
8. R. Nitsche, *Journal of Applied Physics*, 36 (1965) 2358-2360.
9. K. Hoselitz, *Journal of Crystal Growth*, 3, 4, (1968) 5-12.