



結晶成長技術の過去・現在・未来

随 筆

武 居 文 彦*

Past, Present and Future of Crystal Growth Technology

Key Words : Crystal Growth, Technology, History, Electronics

1. は じ め に

電子立国という言葉はNHKの相田洋氏の造語でそうであるが、意味するところは読んで字のごとく、エレクトロニクス技術の国の現在・将来を支える、ということのようである。ハイテク・ジャパンなどの言葉と同じように、少し言い過ぎのような感じもあるが、気持はよく表している。このエレクトロニクス技術の根幹を支えるものとして結晶成長技術がある。

よく知られているように、多くの重要な電子デバイスは単結晶を処理・加工したものからできており、もともになる結晶が製品の品質および歩留まりを大きく左右する、いわゆる決め手となっているといっても過言ではない。しかしまことに残念なことながら、世間一般では結晶の重要性に対してはそれほどの評価はしていないようである。その原因として、素材というあまり目立たない存在であること、エレクトロニクス用結晶の育成技術が大局的には完成された状態に近く、高品質の結晶材料がいつでも容易に入手できるという安易さがあること、などが考えられる。もちろん、のちに述べる大形化、完全化といった結晶製造上の重要な課題は残され、

開発は継続されて行くが、それらはあくまで現状の改良に過ぎない。これから全く新しい結晶育成法の出現、それによる製造技術の革命などという事態はちょっと考えにくいのである。

現在日本が大量に生産している結晶は、引き上げ法による半導体のシリコン(Si)、高圧引き上げ法によるガリウム砒素(GaAs)、ガリウム燐(GaP)など、水熱法による水晶(SiO_2)、引き上げ法によるニオブ酸リチウム(LiNbO_3)、タンタル酸リチウム(LiTaO_3)などの誘電体結晶、ブリジマン法によるフェライト(MFe_2O_4)などの磁性体結晶で、これらは内外マーケットで日本製が大きなシェアを占めている。日本が劣勢な結晶材料は軍事用で開発されたレーザー用ロッドなど、2, 3の特殊なものにすぎない。この分野も新興技術国の韓国、台湾の進出が始まっているが、今のところわが国の優勢は続くものと思われる。

2. EURO-CRYST 研究機構

欧州では統合の象徴の一つとして、EURO-CRYSTという結晶総合研究機構により、欧州統合の結晶成長研究所を21世紀までにオーストリアに作る計画がある。その計画書を読んで驚いたことには、計画のターゲットを日本に置いている、ということである。すなわち、日本の今日の隆盛は半導体工業にあり、その原因が結晶技術、とくに結晶成長技術の成功にある、という。典型的な例として、III-V族化合物半導体のGaAs結晶があげられている。GaAs結晶は半導体レーザーやマイクロ波素子などにい

* Humihiko TAKEI

1936年5月26日生

東京都立大学大学院理学研究科修士課程化学専攻修了

現在、大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻、教授、理学博士、結晶化学、結晶成長

TEL 06-850-5795

FAX 06-850-5817



ま大量に使用されているが、そのかなりの部分は日本製である。しかし、GaAs結晶を作る主要な技術は欧州で研究・開発されたものである。にもかかわらず完全に日本に圧倒されてしまった理由は何か。かれらの計画書によると、欧州では研究・開発した成果を生産に結びつける力が弱いからであり、製品として成果が発揮されない。EURO-CRYSTではその弱点をおぎなうて、エレクトロニクスの競争力を取り戻さなければならぬ、という。

そのような解釈がはたして妥当なものかどうか、充分検討してみる価値がある。

3. わが国における結晶成長技術の発達

系統的な結晶成長の研究が欧米で始まったのは二十世紀に入ってからであるが、当時の日本においても金属結晶や雪の結晶の研究などが少数の研究者によってなされていた。しかしこれらはまったく基礎的な興味から行われたもので、技術的な観点から結晶成長を研究した例は第二次世界大戦終了までほとんど見られなかった。

戦後、結晶製造が本格化したのは、大手電機メーカーを中心にゲルマニウム半導体製造技術の導入が行われた1950年代中頃と思われる。その主なものは技術指導書(インストラクション)とノウハウ込みで日本に持ち込まれ、半導体単結晶が製造された。そこでは温度調節器から電気炉まで、全て米社の指定した米国製装置が用いられた。1960年代始めに私が電機メーカーに就職したとき、すでに古くなった第一世代の米国製各種結晶製造装置がすみの方に迫いやられ、日本製の代替機が主力になっていた。このやりかたは、明治時代に軍艦や蒸気機関車などで行った手法と全く同じだな、と思ったものである。ただしその代替機には日本人の得意とする工夫と改良がなされており、単なるコピーではなかった。そのような部分的な工夫はあるにせよ、基本的な技術は丸抱え状態といってよい時代であった。

1960年頃から半導体はシリコンが次第に主流を占めるようになり、ゲルマニウムより高融点で酸化しやすいこの物質の結晶化技術は、ゲ

ルマニウムの応用として発展していった。またICの開発に伴って、気相からの結晶析出によるエピタキシャル成長技術も導入された。一方、レーザーが発明され、1940年代における半導体発明以来の大型未来技術として注目を集めた。そのための光学結晶の開発が米国ベル研究所を中心に精力的に進められ、日本も追従する形でさまざまな結晶育成が行われた。私は半導体製造装置のお古を使って、レーザー結晶の開発研究に携わることになった。とはいってもその中身は、学術雑誌に発表された論文や政府機関のPBレポート、特許などを参考に行う、いわゆる追試的な結晶育成実験が主なものであった。このように基本的な技術を卒業していた1960年代には、論文や政府レポート、特許、学会発表などを参考にすれば、インストラクション、ノウハウ抜きで一応対応できるようになっていたのである。

オイルショックをはさんだ1970年代は集積回路のIC、LSI開発の時代と考えられる。そこではシリコン結晶の大形化、完全性、歩留まりなどが追求され、さまざまな改良、開発が行われた。年代後半には産官共同の超LSI研究組合がこの傾向に拍車をかけた。この頃さまざまなエピタキシー技術が開発され、その実用化が検討された。また生産競争も激しくなり、主として経済的理由により半導体メーカーが自分で結晶から素子まですべてワンセットで製造するという体制が崩れ始め、結晶は結晶製造の専門材料メーカーより入手するようになっていった。このような状態を可能にしたのは、材料メーカーが力をつけてきたことも大きな理由である。

一方、光エレクトロニクスの開発により、半導体レーザー素子や電子発光素子用のIII-V族半導体GaAs, GaP結晶の量産が行われるようになった。III-V族半導体結晶に関しては、高圧下で結晶引き上げを行う大がかりなものであるが、主に英国で研究開発された装置を導入して用いられた。猛烈な開発競争の結果、わが国は著しい品質の向上と大形化に成功し、その結果次の80年代に世界のマーケットシェアを次第に奪っていくようになるのである。先に2.で述べたEURO-CRYSTの話はこのことを指

している。

LSIの製造をもとに結晶微細加工技術が発展し、これを用いて時計用超小型水晶振動子が開発された。その結果、水晶結晶の需要が爆発的に伸びた。また表面弾性波素子(フィルター)用として、 LiNbO_3 、 LiTaO_3 などの圧電結晶が大量に使用されるようになり、その大型化に成功した。このように1970年代は1950年代、60年代に開発された結晶の多くが実用の段階になっていく年代であった。非常な努力を傾注したにもかかわらず、期待を裏切った結晶もある。たとえばバブルドメイン・メモリー用のGGG結晶がその典型的な例といえよう。

技術史的に見るとつぎの1980年代は70年代の継続、発展であり、90年代にもそれは引き継がれている。結晶の大形化、高品質化に一層の拍車が掛かり、たとえば現在シリコンにおいては、直径12インチの無転移(線欠陥なし)結晶が量産されるようになった。また全くの経済原則から、結晶製造の専業メーカー化が一段と進んだ。わが国の総合半導体産業のワンセット主義の立場からは、結晶と素子の乖離は一種の空洞化現象のようにも見える。しかし半導体の分野においては、単なるメーカーとユーザーの関係を越えた系列化が行われていることも多いので、それほど話は単純ではない。この年代には、シリコン結晶の品質向上ともからんでLSIの集積度が著しく向上した。また、光エレクトロニクス化がゆっくりと進展し、その素子のためのいくつかの新規結晶の需要が着実に伸びた。一方、コンピューターの大形化、高速化、光エレクトロニクス化などの要求から、GaAs結晶に大きな期待がかけられたが、さまざまな技術的困難のため高性能のGaAs-ICはいまだに量産化できない状態にある。

4. 発達史のまとめと考察

ごくかいつまんで、わが国における結晶成長技術発展の歴史的経緯を述べてきた。これらは戦後日本の多くの産業がたどった道であるライセンス生産→技術的改良→国際競争力の確保→市場の独占、といった経路の特徴をよく示している。すなわち：

- 1) わが国の結晶成長技術は戦後、電機産業を中心として米国からの半導体技術導入の形でスタートし発展した。
- 2) その後、新しい結晶応用技術が発表されると、得られた情報を基に企業内で開発研究が行われ、大量生産へと結びついていった。そこでは経済性が重視され、結晶の大形化や高品質化が追求された。
- 3) 時間が経つにつれて素材専業メーカーが次第に技術力をつけ、電子用結晶材料の開発・供給を行うようになっていった。
- 4) これらの結晶開発の動機はエレクトロニクス・デバイスの製造販売にあり、目的に達することができずに開発を断念した結晶も少なくない。

以上のまとめから明瞭なことは、わが国においては、素材も含めた電子産業が結晶成長技術の発展を常にリードし担ってきたことである。そこでは当然のことながら企業の論理、すなわち利潤追求の論理が強く働いており、再現性と量産性が徹底的に進められた。結晶成長技術においてはそれが大形化と無欠陥・高品質化の追求になる。欧米の多くの結晶メーカーはこの段階で日本との競争に敗れることが多かった。結晶成長技術は手仕事の職人芸が基礎になっている場合が多く、これらは各企業のノウハウとして蓄積されている。このノウハウを出発点として機械化、自動化が進められている。

以上からわかるように、結晶成長技術とは生産技術そのものであり、研究者が個人的な興味から研究するようなタイプのものとは全く異質である。前述のEURO-CRYSTのプロジェクトについて考察すると、予算獲得の方便として日本をターゲットにしようというのならばまだ理解できるが、本気で生産研究をするとするならば極めて危険な試みといわざるを得ない。一方、EURO-CRYSTの計画書を拡大解釈して、日本が成功したのは学問と産業の橋渡しがうまくいったせいである、などとする向きもある。しかしそのような解釈は残念ながら牽強附会もいいところで、大筋において間違っていると思う。もちろん学問の影響も絶無とはいわないがそれはヒント程度であり、日本のこの分野での

成功は、開発や生産現場にいた技術者達の工夫と努力によっている部分が圧倒的に大きいのである。

5. 結晶成長技術の今後

このように発展してきた結晶成長技術は、これからエレクトロニクスを中心にしていくことは間違いない。その一つはLSIの大容量化の流れである。すでにギガビットの開発段階に入っているといわれているが、この傾向がさらに進むとやがては超ミクロの、原子レベルでの素子化技術が必要になる。またそのような試みもすでに始まっている。原子レベルの段階でいまの結晶成長技術は充分対応できるのかどうか。量産ということを基準にして考えると、開発にはかなりの困難が予測される。

もう一つの柱になるものとして、光エレクトロニクス技術の今後の発展がある。この分野は当初言われていたようなテンポではないかもしれないが、今日まで着実に進展してきた。今後さまざまな開発、改良が加えられ更に発展して行くであろう。その場合、新規の結晶材料が大きな役割を果たすことも充分考えられる。しかしシリコン結晶のように、巨大なマーケットを支配するようなことは起こり得ないようにも思われる。

以上、結晶成長の技術史をまとめてみた。狭い視野からしか概観できなかったため、かなりの独断と偏見に満ちているものと思われる。読者諸氏の忌憚のないご指摘をいただければ幸いである。

