

電気試験所（電子技術総合研究所）、及び関連研究所における半導体結晶の研究

飯塚 隆（元電子技術総合研究所）

要旨

電子技術総合研究所や関連する研究所で実施した半導体結晶研究について、筆者が実施した研究を中心に紹介した。まず、電気試験所で行った Ge 結晶の研究について紹介し、電子技術総合研究所および超 LSI 共同研究所における Si 結晶の研究、光応用計測制御システムの研究開発(光大プロ)の一環として光技術共同研究所で実施した化合物半導体結晶の研究などについて述べた。

1. はじめに

電気試験所（電子技術総合研究所）における半導体結晶研究の草創期ともいえる Ge 結晶研究時代について見聞した話、筆者が行った Ge、Bi₂Te₃、GaP、Si 結晶成長、および GaAs、Si 結晶評価研究、さらに共同研究者が行った評価装置の開発、国家プロジェクトでの出向先の超 L S I 共同研究所、光技術共同研究所での結晶研究について述べる。

2. 電気試験所 1950年代のGe結晶研究の草創期とでも云える時代（伝聞を含む）

1948年、アメリカのベル研究所でGeトランジスタが発表されて以来、我が国でも研究が始まったが、当時の我が国では半導体、および周辺材料の技術レベルが低く、官学民揚げてアメリカに追いつこうと必死であった。

電気試験所におけるGe半導体結晶の草創期とでも云える時代の状況を先輩達からよく聞かされていたので、参考までに述べておこう：

当時、Geトランジスタ開発を目指した国内各社は、米国の会社とトランジスタの技術特許契約を結び、Geトランジスタの生産を始めていた。一方、国立研究所では、技術導入する訳にもいかず、鳩山物理部長、菊池主任、垂井氏、伝田氏などが文献を頼りに、独自に開発を進めていた。

私が入所するより前は、Ge多結晶の入手すら困難であったので、Ge原料はアフリカに植民地を持っていたベルギーのHoboken社の酸化ゲルマニウム(GeO₂)をアメリカのEaglepicher社経由で輸入していた。白い粉末状のGeO₂を水素気流中で還元して金属状のGe多結晶塊を得ていた。この状態では不純物が多いので、まずこのGe多結晶を不純物の偏析現象を利用した”帯熔融精製(zone refining)法”で不純物を除く。こうして精製したGe多結晶にドナー、またはアクセプター不純物を添加し”引き上げ法”、又は”ゾーン均一法(zone levelling法)”などで単結晶化するという手の掛かる方法であった。こうして手にしたGe単結晶の比抵抗、ライフタイム、エッチピット密度(転位密度)などを測定・評価してから、種々の実験に使用していた。

なお、これらの帯熔融精製炉やゾーン均一法炉は（”引き上げ法炉”以外は）すべて先輩達の自作品であった。

Ge 結晶を評価するための基本量である比抵抗やライフタイムを測定するための測定器の国産品はなかったので、菊池、垂井主任らが四端子法比抵抗測定器、ライフタイム測定器などを当時医療器具製作メーカーであった高橋精機と共同開発し活用していた。これらの測定器は高橋精機の製品として一般に普及していった。

当時、国内では半導体用の周辺材料は、それまで需要が無かったこともあり、入手が難しく、いろいろ苦勞されたという話を聞かされた。高周波加熱での発熱体、又 Ge 結晶育成用のカーボン坩堝材、ボート材用などの高純度グラファイトに関してはタイミング良く、原子炉用の高純度グラファイトが入手できたが、半導体用の高純度水素ガスについては、高純度とは云えない溶接用のガスが入荷する状況であったという話を聞かされた。又、後の Si 結晶成長に不可欠な高純度石英ルツボは、当初は輸入品（ドイツ ヘレウス社製など）に頼らざるを得ない状況であった。また、高純度弗酸などの試薬類の入手にも苦勞されたという。

半導体はその特性が温度に敏感、かつ周囲の電磁場にも敏感なため、その特性測定には恒温の電磁シールドルームが必要であったが、当時どういう訳か研究室の中に”部屋”（シールドルーム）を作ることは役所では認められていなかった。そこで、”ルーム”ではなく、”箱”をつくるということにしたら承認されたという。さらに、当時はクーラーは未だ一般に普及していなかったので会計検査の折り、研究室内の”箱”内に贅沢品のクーラーがあるのは何事か！と文句を言われ、菊池主任がその必要性を縷々説明され、無事、検査を切り抜けたという-----今では考えられないことであるが、当時はそのようなお役所的な考えが罷り通って、研究者の貴重な時間を奪っていた。

一方、中立の国立研究所と云うこともあって、電気試験所では半導体研究会、または勉強会と云ったような会合が定期的に開かれていて、筆者も末席に連なった記憶がある。各社、大学などから技術者達が集まり、熱気に溢れた活発な議論が繰り広げられていた。新しい画期的な技術が出現した時には、このような組織を越えた勉強会と云う方法は非常に有効であったろうと思われる。

また、当時、横浜の磯子に進駐軍兵士として駐留していた N.Holonyak Jr. 氏（1962 年、初めて赤色 LED を開発）が、電気試験所をしばしば訪れ、鳩山、菊池氏らと半導体についての議論を行ったという話を、菊池氏から良く聞かされた。まだ、日米の研究者の交流が活発でなかった当時、N.Holonyak 氏との交流は少なからざるインパクトを電気試験所の研究者に与えたであろうと想像される。

後年（1995 年）、N.Holonyak 氏は「発光ダイオード及びレーザー等、オプトエレクトロニクスにおける基礎研究並びに実用化に対する顕著な貢献」により日本国際賞を授賞された。この時、推薦委員の 1 人であったのが菊池氏であった。

1958 年、筆者は入所してすぐ、工場実習ということで東芝のトランジスタ工場を希望し、

Ge 結晶やGe トランジスタなる物を初めて目にし、学生実験とのあまりにも大きな差にカルチャーショックを受けた。トランジスタ工場見学、関連論文の勉強、実験などなど色々教えていただいた有用な実習であった。この実習経験がGe 半導体結晶とのつきあいの原点になった。

配属された電気試験所電子部半導体部品研究室では、まだ Ge 半導体の研究が行われていた。私が入所した頃はGe 多結晶は入手可能になっており、以前行われていた酸化Ge の還元をする必要はなくなっていた。

Ge 結晶引き上げ機については、結晶引き上げ、回転機構、雰囲気コントロール、温度制御などの精度が要求されるので、メーカー製のものを使っていた。

Ge 結晶引き上げ機：徳田製作所（国内で最初に油回転ポンプを製作、販売した真空機器メーカー）製を使用。これは、徳田製作所自身が開発したものか、上司の菊池誠主任（当時は小研究室制であったので、研究室の長は主任。後ソニー常務、東海大教授）が、海外の文献の図をもとに設計し、徳田製作所に製作を依頼したものか、今となっては不明。真空機器メーカーが製作したものだけあって、Ge 結晶引き上げは真空チェンバー内で行われた。私が入所した頃は、菊池主任が踏み台の上に立ち、観察窓からGe 結晶の成長具合を観察しながら、制御盤の前に坐ってGe 融液温度、引き上げ速度、回転速度をコントロールを分担している飯島研究員に、「温度を0.1度下げろ」などと大声で指示されていた牧歌的(?) 状況を、今でも鮮明に覚えている。

私自身、Ge 結晶については、帯熔融精製（ゾーンリファイニング）、ゾーン均一法（ゾーンレベリング法）で、精製、結晶成長を行い、基本的な比抵抗測定、ライフタイム測定を行い、成長結晶の評価を行った。また、後年Si 結晶引き上げ炉で、Si 結晶を引き上げていた頃、依頼されてその炉を使ってGe 単結晶を引き上げたこともあった。

3. 電子冷却用 Bi_2Te_3 結晶成長、および電子冷却実験¹⁾

私には Ge 結晶成長と平行して、「 Bi_2Te_3 結晶による電子冷凍の実験」というテーマが与えられた（化合物半導体との出会い）。

原料の Bi と Te を化学量論的に混ぜ、自分自身で実験に必要な化合物半導体結晶を成長させるということに新鮮さを覚え、 Bi_2Te_3 結晶作りに熱中した。回転機構のある冷凍機と異なり、可動部分のない静かな冷凍機ということで、アメリカでは潜水艦用にとということで注目されていたと菊池氏から聞いた記憶がある。すでに、当時のソ連でも研究が行われ、出版されていた A.F. Ioffe 他による”半導体とその応用”が翻訳されていた。この本を手がかりに、研究と云うより、いわゆる追試実験を行った。

Bi と Te を化学量論的に秤量し、それぞれ p、n 型用不純物を加えたものを透明石英管内に真空封じし、加熱熔融させて結晶を作った。出来た結晶は多結晶であったが、熱電冷却実験にはあまり問題は無かった。断面 1 cm 角、長さ 2 cm くらいの P、N 結晶棒のそれぞれの一端に真鍮板を半田付けして、PN 接合構造 (II 型) にし、直流電流 (順方

向)を流すことで、PN接合構造の真鍮板に空気中の水蒸気が、凝結、凍り付くのを観察し、電流と温度の関係をまとめ終了。

逆方向電流では接合部は加熱される。従って、順、逆方向電流を切り替えることによりPN接合部分の温度を一定に保つことが出来る。これは、一般的に知られていたことなので、後年、ある国内メーカーがこの現象を利用して、写真現像用恒温槽を製作、販売していた。

いづれにせよ、BiTeによる、電子冷凍の実験、研究は、当時(1958-9年頃)、東大工学部で行われていたが、国内の他の研究機関ではあまり行われていなかったのでは無いかと思われる。

4. GaP 結晶成長 (Ga と P の直接合成)、赤色発光確認

当時、発光ダイオードのことは学会、学会誌などでもほとんど話題になっていなかったという記憶がある。そのような状況の中で、菊池氏は発光ダイオードに強い関心を示されていた。LED (発光ダイオード) の父と呼ばれているNick Holonyak Jr. が初めてGaAsP 赤色発光ダイオードの発光に成功したのが1962年であったことを考えると、(SiC結晶の発光現象はすでに1920年代に報告されていたので、その延長として)菊池氏が独自に考えておられたのか、或いは、進駐軍として日本に駐留していたHolonyakから、彼が暖めていたLEDのアイデアを聞いていたのか、今となっては知るすべもない。ともあれ1959年頃の国内で、すでにGaP LEDに興味を持たれていたということは、今にして思えばすごい先見性と言えよう。その頃、菊池氏自ら、Gaと赤リンを石英管内に真空封じしてGaP結晶の直接合成に挑戦されていた。筆者はそれを引き継ぎ、爆発しても周囲に破片が飛び散らないように密閉型のマッフル炉を使って、結晶成長を行った。GaP結晶の直接合成にとりかかったものの矢張り、マッフル炉で加熱中の爆発が続いた。赤リンの蒸気圧が高いことに加え、赤リン中の僅かな水分が加熱により膨張したことも爆発の原因の一つであろうと考え、予め赤リンを少し加熱しながら真空ポンプで水蒸気の排気が続けた後、あらためてGaを加え、爆発を防ぐため、ゆっくり昇温させた方がよからうと、長時間(20日間くらいだったか)研究室に籠もり、自動温度調節装置など無かったので、タイマーに従って、電気炉への印加電圧を数時間毎に数ボルトくらいずつ手動で上げるといった原始的な昇温手段で行った。このようにして直接合成を行い、ようやく小さなGaP結晶を手にすることができた³⁾。原料の液体金属の銀白色のGaと赤リンから、原料と似ても似つかぬオレンジ色のGaP結晶ができ、早速、手軽な点接触法で赤色発光を確認した時は感激であった。現在の目でみると、結晶成長と称するにはおそまつなレベルであるが、ともあれ当時、点接触法とは云え、国内で初めて(?)赤色発光を確認したということで少しは意義があったかもしれない。菊池氏はこの小さな結晶を使って、マイクロプラズマの実験を行った²⁾。

5. GeからSiへ — 電子技術総合研究所におけるSi単結晶成長

やがて、半導体の主流はGeからSiへ移って行った。当時の永田町本部の応用部高周波研究室で、高周波誘導加熱の応用と云う観点から、早くからSi単結晶成長炉2種：浮遊帯域溶融（Floating Zone）炉、及びCZ（Czochralski）引き上げ炉を設置し、Si単結晶成長を行っていた。国内で半導体デバイスはGeからSiへ移りつつあった頃であったので、百田部長（後 電気試験所所長）がその結果を、研究会、学会などで発表されていた。その中のCZ引き上げ炉（国際電気（株）製）が田無分室の菊池研に移され、菊池研でのSi研究が始まった。この炉を使って筆者が直径2-3cmくらいのSi単結晶を引き上げ、研究室でのSi表面研究その他の研究用に供給していた。

これと併行して、自分で引き上げたSi結晶の品質評価ということで、Si結晶中の結晶欠陥、不純物の研究を開始した^{4) - 10)}。

- ① Si結晶の各種欠陥の研究（X線トポグラフ法、化学腐食させた表面の光学顕微鏡観察
- ② Si結晶の機械的性質（歪み分布の異方性）
- ③ Si結晶中の酸素、炭素不純物、及びSi結晶中のドナー、アクセプター不純物の検出法の開発など^{11), 12)}。

6. 電子技術総合研究所におけるGaAs、GaP単結晶評価研究

研究室では、新たにGaAs結晶の特徴を生かした電子デバイス、また半導体レーザーの研究に着手していた。当時、GaAs結晶はボート成長法で作られた輸入品を使っていたので、それらの結晶の品質をX線トポグラフ法などで調べてみると転位や不純物の異常分布などの存在が確認され、結晶品質にまだ問題のあることを明らかにした^{13), 14)}

後年、発光ダイオード用のGaPバルク結晶を入手したので、田島氏と新たに光散乱観測装置を組み立て、強いハロゲンランプ光をGaP結晶中に入射させ、結晶内部の転位からの散乱光を始めて観察し、かつ、結晶内転位の三次元像、さらに成長縞像を得ることに成功した^{15), 16), 17)}。

7. 国立研究所（電子技術総合研究所 固体物性研究室）としての研究テーマ検討、探索

昭和50年（1975年）ころから、超LSI技術開発の動向に対処すべく、まず、Si結晶研究に関係するテーマの検討を開始した。我々自身いろいろ考え、かつ企業技術者、研究者の意見、要望を広く聴取、議論した結果、高感度・高精度不純物分析技術開発への要望が非常に強いことが分かってきた。そこで、Si結晶中の添加不純物、および酸素、炭素などの残留不純物の高感度・高精度での評価技術の開発をテーマと定めた。具体的には安定した再現性、短時間での測定を目標に、「非接触法の光学的手法」に的をしぼり、情報収集、調査、検討を開始した。これを基にSi結晶用フォトルミネッセンス法の開発を進め、これらを活用することで大きな成果を上げることができた。また、Si結晶中の酸素、炭素などの残留不純物については7-1で述べているように、フーリエ分光器を導入するこ

とにより、従来型の分散型分光器に比べ、分析精度、分析効率を大幅に向上させることが出来た。

7-1 Si 結晶中の酸素、炭素不純物の検出のため F T I R 導入、改造（電総研田島氏）¹²⁾

CZ Si 結晶中における主要な残留不純物は酸素と炭素であり、とくに酸素は有害性と有用性の二面性を持ち、さらに解明すべき問題を多く含んでいた。当時、Si 結晶中の酸素の検出には分散型の赤外分光器が使われていたが、当時一般に使用されていた 400 μm 前後の薄いシリコンウエーハでは、干渉のため十分な精度の測定を行うことが出来なかった。そのため両面鏡面仕上げの 1-2mm 厚の試料を特別に用意しなければならず、また波長走査に時間が掛かるので、多量の試料を測定するのに長時間を要するという状況であった。

当時、たまたま電総研の放射線研究室の友人から放射線検出器用の高純度半導体についての講演を依頼されていたので、高純度 Ge、Si、CdTe 結晶などについて文献調査を行ったところ、高純度結晶中の不純物分析用に「フーリエ分光器」が使用されていることが分かった。当時聞いたこともなかった分光器名であったので、これについて共同研究者の田島道夫氏（現 宇宙科学研究所名誉教授、明治大学特任教授）に調査を依頼した。その結果、計算機の普及とともに一般化しつつあったフーリエ赤外分光器 (FTIR) では、薄いシリコンウエーハに対しても干渉成分を除去することができ、かつスリットがないためエネルギー損失が少なく S/N 比が大きい、波数分解能が高く、測定時間が短いなど多くの特徴を持つことが分かった。

時期的に、国家プロジェクトの超エル・エス・アイ技術研究組合が発足し、超 LSI 共同研設立期であったので、結晶技術を担当する第四研究室でこれを導入することを提案し、承認を得ることができた。フーリエ分光器というものの存在に気付いたことは、講演といういわゆる頼まれ仕事の中での「発見」という思わぬ拾い物をしたことになった。超 LSI 共同研第四研究室では、これを用いて大量の Si ウエーハの酸素、炭素濃度を測定し、Si 結晶中の微小欠陥の研究、その応用としての intrinsic gettering の研究開発、ウエーハ反りとの関連性等を明らかにした。

Si 結晶中の酸素、炭素不純物分析については、従来型の分散型分光器より優れていることが実証されたことにより、各社で使用されるようになった。

田島氏は製造メーカーと共同して、当時、一般化学分析用であったフーリエ分光器をシリコンウエーハ測定用に改良（特にソフト面）を進めると共に、低温での高感度測定を行うため、国内で初めてヘリウム冷凍機を取り付け、試料ホルダーを改良し、低温測定の基礎技術も確立した。これを駆使して、膨大な量の Si ウエーハ中の酸素、炭素の高感度分析を迅速に行うことが出来た。わが国で、フーリエ分光器をシリコンウエーハに使用したのは、恐らく超 LSI 研が最初ではなかったかと思われる。超 LSI 研ではシリコンメーカーから受け取ったままの状態の生ウエーハ、および種々の条件で熱処理したウエーハ中の酸素、炭素濃度をこの方法で測定することが出来、他の評価手段で得られたデータと組み合

わせて、総合的な挙動解析を行うことが出来た。このような思い切ったことが出来たのは、共同研究所の制度の利点であると思われる。

7-2. Si 結晶中のドナー、アクセプター不純物の超高感度検出のための PL

(Photoluminescence フォトルミネッセンス) 法の開発、実用化 (電総研田島氏)²⁴⁾

添加不純物の分析法としては、非破壊・非接触という観点から種々の光学的手法を検討した結果、田島氏がフォトルミネッセンス(PL)法で挑戦してみようということになった。当時、主として禁制帯幅が可視光領域の化合物半導体結晶について使われていた PL 法を、間接遷移型のシリコン結晶評価に使うことについて、広く意見を聴いたところ、間接遷移型のため発光強度が弱い上、近赤外領域での測定が困難であるので、あまり期待できないであろうというネガティブな意見が多かった。それでも、さらに検討した結果、工夫をこらせば PL 法で道は開けるということで決断した。このようなネガティブな意見があったればこそ、PL 装置開発により一層の工夫をこらしたと言えよう。その結果、一般の予想に反して、十分以上に使いものになることを実証できたことは大きな成果であった。人の意見を聴くなどで収集した情報の取り扱いについてはそれを鵜呑みにせず、独自の考えで検討、判断することが大切であることを実感した。

PL 装置の高性能化、さらに再現性を高めることに努めた結果、従来法の赤外吸収法と比べ、感度、空間分解能ともに格段に向上した。検出感度は原子比で ppb (10^{-9})、ppt (10^{-12}) を通り越し、ppq (10^{-15}) の領域に達した。

このデータを関係機関に見てもらったところ、どこからも驚嘆の声が上がり、「それなら、これではどうか」と、通常は入手できないような貴重なテストサンプルが国内外の複数の機関から次々と送られてくるようになった。

それまでに報告されていた Si の PL は、少数の (おそらくは 2、3 枚の) 限られた試料について詳しく解析したものであったと思う。これに対し田島氏の場合、装置は高性能で、また特に再現性を高めることに留意していたので、各機関より受領した多くの試料からの山のようなデータを比較・検討することができた。その結果、何 10 本もの細線で構成され複雑に見えるスペクトルの中に、極めて単純な法則性があることに気付き、それが定量評価に利用できるという着想を得た。この段階で田島氏が論文にまとめ発表すると、非常に大きい反響があった (1978)¹¹⁾。そして国内外の研究会、学会、国際会議で招待講演の機会を与えられることになった。学振第 145 委員会においても第 3 回研究会 (1978 年) で発表している。

これらの発表で、メーカーの研究者・技術者からは従来法を感度、精度の両面で凌駕する実用的手法として高く評価された。これが弾みとなって、より広い濃度範囲において残留不純物が極めて少ない試料を複数の機関で準備してもらい、定量分析のための検量線が得られるようになった。

結晶メーカーでは、技術の粋を集めた超高純度結晶作製法により、残留不純物濃度を激

減させた試料を準備してくれた。これに対し、田島氏は PL 法によりその極微量不純物を捕らえることに注力した。この良い協力関係が PL 法の高感度・高精度化に大きく貢献したことは言うまでもない。

このように学術的に PL 法の妥当性が議論される一方で、Si メーカーでは本気で導入を取り組むようになっていた。当時（1970 年代後半）の日本の半導体メーカーは、今と比べずいぶん進歩的・挑戦的だったと思う。まだ発明されて二、三年しか経たない PL 法に従来法から切り替えようとし始めた。田島氏のところに 2 シリコンメーカーから研究員が派遣された。それによって、PL 法の技術が非常に効果的に伝承されるとともに、多くの試料の測定が行われ、精度や誤差を議論するに十分な統計的データが得られた。また競合関係にあったその 2 メーカーは、それぞれ異なった計測器メーカーに装置の作製を依頼することになり、計測器メーカーからも研究員が派遣されたり、熱心に技術指導を受けたりすることが積み重なり、田島氏の装置の基本部分をデッドコピーした使い勝手の良い装置 2 機種が独立に販売されることになった。これらにより国内では急速に PL 法が普及した。

これを受け、PL 測定装置を計測器メーカーが製造販売、それを Si メーカーが導入した結果、国内で PL 法が急速に普及するに到った。

7-2-1. PL 法の標準化、国際標準化

PL 法が品質管理工程に使用され始めるや、PL 法の標準化への要望が強まり、1985 年に日本電子工業振興協会（JEIDA）に専門委員会が設置され、標準化の作業が開始された。この手法の精度および信頼性を向上させることを目的とし、標準試料を準備することとなった。標準試料は、2 シリコンメーカーのご協力により 50 セット作製された。これを用い、試料持ち回り測定（ラウンドロビン測定）が実施され、その結果の解析から測定条件、適用限界、誤差などが明確化された。1992 年に、JEIDA-45 規格「フォトルミネッセンスによるシリコン結晶中の不純物濃度測定法」が制定された。基準および貸し出し用として保管するほか、世界中の主要機関に頒布された。これは PL 法の高精度化・高信頼性化に大きく貢献し、各国より極めて高い評価と賞賛を頂いた¹⁸⁾。

PL 法の普及は国内に留まらず、アメリカ、ヨーロッパでも大手シリコンメーカーにおいてルーチン的な品質管理工程に使用されるようになった。そして海外の計測器メーカーからも特色のある装置が販売されるようになった。すると、各社間（各装置間）の測定値のばらつきが課題として登場した。測定結果に差異が生じたとき、それが試料に由来するのか測定法（または測定者）に由来するのを見極めることができなければ支障を来す。

この活動とほぼ同時期に、測定標準機関として世界的に権威のある米国の測定・材料標準協会 (American Society for Testing and Materials: ASTM) が、この手法の標準化を検討し始め、日本側に規格制定作業に参加するよう要請してきた。これを受け、定期的開催されていた JEIDA-ASTM Joint Meeting において規格制定が進められ、1992 年に JEIDA-45 規格を全面的に取り入れた ASTM F1389-92 規格” Standard Test Methods for

Photoluminescence Analysis of Single Crystal Silicon for III-V Impurities”が制定された¹⁹⁾。

続いて、JEIDA-45 規格をより高位の標準である日本工業規格(JIS)として制定するため、JIS 原案作成委員会が設置され、1996 年に JIS H0615 規格として継承された²⁰⁾。その後、米国 ASTM が半導体規格を維持する業務を SEMI に移管したことに対応し、2004 年に ASTM F1389-92 規格は SEMI MF1389-0704 に移行されることとなった²¹⁾。JIS H 0615 および SEMI MF1389-0704 規格は、それぞれ定期的な見直し、内容確認を受け、現在も有力でかけがえのない規格として日本や東アジア、米国やヨーロッパなど世界各国で広く利用されている。

なお最近では、Si 太陽電池基板用として Si 原料の生産が急増しているが、ここにおいても本手法による品質管理は不可欠であり、この手法の重要性があらためて強く再認識されている状況にある。

以上のように、PL 法の標準化には永い年月を要したが、とくに大きな問題が発生することはなかった。その理由の一つとして、この手法の基本的部分の特許が取られていなかったことが挙げられる。田島氏が発明したときには、駆け出しの国研基礎部門の研究者として、まず論文として発表し、新規性・有効性をアピールしたいという意識が強かったので、特許は申請していなかった。これまでに述べてきたように、この手法は我が国で創出され育て上げられた技術で有り、その知的財産を保護できなかったことは残念であるが、国内外の研究者・技術者間でオープンに技術的内容がディスカッションでき、一番良い形で規格が制定されたと思われる。田島氏はその後、JEIDA およびその後の継続機関の電子情報技術産業協会 (JEITA) でいくつかの規格制定に携わった経験があるが、内容の一部が特許化されている場合には規格制定に大きな制限が加わったことを経験している。

PL 法は発表してから規格化されるまでには 14 年かかったが、その後 20 年以上経った現在でも、未だに最先端の技術として世界中で使用され続けている。測定機器は大きく進歩したが、基本的な測定手法はそのままである。これは、この手法が単純な物理現象の法則性を利用していることによると考えられる。

8. 電子協 (電子産業振興協会、JEIDA) での Si 結晶中の酸素による赤外吸収係数と酸素絶対濃度との校正曲線改定作業 (ラウンドロビン方式)²²⁾

この作業には、電総研からは飯塚が委員長として、田島氏が委員として参加した。この赤外吸収実験等のデータの解析、取りまとめについては田島氏の貢献が大きかった。

Si 結晶中の酸素は、Si デバイスにとって有害である一方、有用な面もあるので、重要な不純物である。Si 結晶中の酸素濃度の測定には、一般に赤外線吸収 ($9\ \mu$) が用いられている。中性子線分析により得られた Si 結晶中の酸素濃度と、赤外線吸収 ($9\ \mu$) 係数との間の校正曲線はアメリカで既に発表され広く利用されていた。

しかし、その精度には問題があったので、電子協では Si メーカー5 社から種々の酸素濃

度の多量の試料の提供を受け、各研究機関でこれらの試料の赤外線測定を持ち回りでを行い、取りまとめを行った（ラウンドロビン）。

赤外線測定後、これらの試料中の酸素濃度絶対量は理研の中性子分析法によって測定され、酸素濃度絶対量と赤外線吸収（ $9\ \mu$ ）との間のより正確な較正曲線を得ることができ、結果は Journal of The Electrochemical Society 誌に掲載され、広く使われるようになった。

9. 超エルエスアイ技術研究組合 超 LSI 共同研究所での Si 結晶研究^{23), 24)}

電子技術総合研究所から 結晶関係では、飯塚が外向（第四研究室長）。田島氏は、共同研究員として参加。

当時、国内では、すでにシリコン結晶メーカー 5 社が量産体制を整え、半導体メーカーに供給していたので、超 LSI 共同研究所第四研究室では結晶評価に専念した。すなわち、各種評価測定装置の試作・開発・改造・高性能化を行い、これらを駆使して総合的な研究を行うことが出来た。その結果、実用に繋がる大きな成果を挙げることが出来た。これらの結果をシリコン結晶メーカーにフィードバックすることにより、更なる高品質化に貢献した。

9-1 各種評価測定装置の開発研究

- ① フーリエ赤外分光器 (FTIR) の Si 結晶への国内初応用¹²⁾
Si 結晶中の酸素不純物濃度測定能率向上
- ② ホトルミネッセンス (PL) 装置を開発したことにより、従来解析が行えなかった微量不純物の精密評価が可能になり、B, P 不純物濃度と発光強度比の間の検量線を得ることが出来、その有効性を実証した^{11), 24)}
- ③ X 線回折装置 (X 線トポグラフ) の活用：転位、微細欠陥の全体的観察
- ④ 透過電子顕微鏡の高性能化：微細欠陥の直接観察
- ⑤ イオン・マイクロ・アナライザ (IMA) で微少領域の酸素、炭素不純物分析を行うため、系内の真空の質の向上、および酸素、炭素の同位体分析法を採用することにより Si 結晶中の酸素、炭素の検出能を大幅に向上させることが可能となり、酸素、炭素の原子的挙動解明に貢献²⁵⁾。
- ⑥ 広がり抵抗測定装置の活用：成長縞などの不純物分布測定など
- ⑦ 赤外光弾性法開発：Si ウェーハ内の変形歪み、および Si 結晶中の不純物不均一分布（成長縞）に起因する歪みの観察、解析
- ⑧ Si ウェーハ反り測定器

9-2 熱処理誘起微少欠陥

Si 集積回路作成プロセス中の各種熱処理により、Si ウェーハ中に熱処理誘起微少欠

陥が形成され、デバイス特性への影響が問題になっていた。Siメーカーに多種多様のSi結晶成長を依頼し、これらの結晶を各種測定装置を用い、熱処理誘起微少欠陥の研究を集中的に行い多くの成果を挙げることが出来た^{26), 27), 28)}。さらに、熱処理誘起微少欠陥を逆に利用し、応用技術としてのイントリンシック・ゲッターリング (intrinsic gettering) 技術の基礎を開発し実用化への道を開くことが出来た^{29), 30)}。

9-3 熱処理誘起酸素ドナー、および”新酸素ドナー”の研究

従来知られていた酸素ドナーをPLで更に詳しく解析し、また、新たに”新酸素ドナー”の形成を明らかにした^{31), 32), 33)}。

9-4 Si ウェーハの反り、変形の研究^{34), 35), 36), 37)}

Si ウェーハの大口径化 (125 mm径)、集積化が進むにつれて、Si ウェーハ表面上で微細パターン像を結ばせるため、ウェーハ反りはピンぼけの原因になるので、大きな問題であった。その重要性にも拘わらず、ウェーハの反り、変形について、それまで系統的な研究は行われていなかったと記憶している。

第四研究室では、この大問題を取り上げ、ウェーハ反り、変形の測定装置開発から始め、これを駆使して、本格的研究を行い、重要な基本データを蓄積することが出来き、その結果を公表した意義は大きい。

① 基本的なSi ウェーハの機械的性質の研究

② ウェーハ歪み解析

③ ウェーハ反り測定技術、装置の開発

ウェーハ熱処理時に導入される反り測定装置開発 (熱処理中のウェーハ変形を、レーザービームを用いることで非接触、且つリアルタイムで観測するという画期的な装置開発)。これを活用し、ウェーハ変形の解析など多くの貴重なデータを得ることが出来た。

④ ウェーハ反り形状解析

⑤ ウェーハ切断条件と反りとの関係の解析

⑥ 以上を基に、ウェーハ反りを減らす手段を種々検討し、ある程度のウェーハ反り対策を立てることが出来た。

10. 光技術共同研究所³⁸⁾

光大プロ (光応用計測制御システムの研究開発) の一環として光電子集積回路: OEIC (Optoelectronics Integrated Circuit) 開発のため、バルク、薄膜結晶成長およびデバイス (プロセス) 技術の研究開発を目的として設立された共同研究所。

電子技術総合研究所から、結晶関係では飯塚 (研究企画室長、後 所長) と田島氏 (第6研究室研究員) が出向。

光電子集積回路用 GaAs バルク結晶成長・結晶評価、薄膜結晶成長・評価、プロセス技術、GaAs バルク結晶の改善、ホトルミ法他 GaAs 結晶の高感度不純物検出技術の開発を行った。

10-1. 光電子 IC 用半絶縁性大型の GaAs 単結晶成長と結晶欠陥評価の研究

B₂O₃を用いた”液体封止引き上げ法” (Liquid Encapsulated Czochralski (LEC)) で大型 Ga As のバルク結晶育成および結晶評価を行った。

結晶育成においては、ストイキオメトリ制御、As 圧制御、磁場印加など画期的な試みを集中的に行うことにより、いろいろな角度からの結晶成長を検討し、その結果どのパラメーターがどのように効くか明らかにして、結晶特性の制御に対する見通しを得ることが出来た。このほかにも化合物半導体に適したいくつかの新技术を開拓し、光デバイス、電子デバイスについても大きな指針を与える成果を上げた。

① 結晶成長のコンピュータ自動制御^{39), 40)}

結晶研究を進める上で、結晶成長の再現性が第一歩であるという見地から、まづ結晶形状のコンピュータ制御に挑戦した。直径制御だけでなく、種結晶付け操作をも含め、すべての引き上げプロセスを自動化した。それまでは、ほとんど目視によるマニュアルコントロールであったことに比べて、飛躍的進歩であったので、内外の大きな注目を集めた。

② 成長中の結晶の X 線透視によるその場観察^{41), 42)}

成長中の結晶形状、固液界面形状のその場観察を行うため 炉内に X 線透視装置を設置し、成長中の結晶形状、固液界面形状のその場観察により、再現性良く結晶成長を行うことが出来た。

③ ストイキオメトリ制御^{43), 44)}

III、V 族化合物半導体として当然必要でありながら、あまり手を付けられていなかったストイキオメトリ制御についていくつかの方法を試みた。成長時の III/V 比の正確な計量と結晶特性の比較から始まって、磁場印加、As 注入などが試みられた。仕込み量 (成長時の III/V 比) が結晶の比抵抗を大きく変えることが示され、これは成長した結晶中に、III、V 族原子の過不足により発生する深い準位 (EL2) の量が増えるためと推定された。

さらに、ストイキオメトリ測定方法として格子常数精密測定とクロメトリー法を用いた。これにより、特に、EL2 準位がストイキオメトリにより、どのように変化するかが明らかになった。

重大なことは、格子常数精密測定から、As-rich 結晶では As の格子間原子が、Ga-rich 結晶では Ga の原子空孔が主に生成されていることが示唆されたことである。なぜこのような III 族、V 族に対して非対称な状況が生ずるのか、そしてこれら格子欠陥がどのように結晶の特性に影響するか、GaAs 以外のものではどうなるのか、III-V 族化合物半導体を研究する上で極めて重大な問題が提起された。

さらに、クーロメトリー法によるGaAs結晶中のAs、およびGaの定量分析に挑戦し、本方法がGaAsのストイキオメトリーの変化をより明確に評価することができる可能性のあることを明らかにした。

④ 融液中へのAs注入^{38), 41), 42), 45)}

結晶成長中の融液へのAs注入の試みは、ストイキオメトリー制御について予期しなかった好結果をもたらした。或る程度以上のAs注入は、常に一定した結晶特性を与えることが分かった。すなわち、結晶内の抵抗値やEL2（赤外吸収）の分布は通常のLEC結晶と異なってきわめて均一であり、イオン注入GaAs IC用として優れたものであった。これは大きな発見であり、実用的にも価値の高い新技術である。結晶の構成原子（特に、格子間As）が極めて動きやすいことから、結晶成長中に結晶に接する雰囲気中のAs圧制御は今後必要になるであろう。

⑤ 磁場印加結晶引き上げ^{40), 42), 43), 46)}

シリコンの結晶成長で、不純物分布の均一化（成長縞低減効果）に有効であることは知られていたが、GaAsについてはどのような効果があるのか不明であった。実験の結果、磁場が成長縞を無くしたことは予期通りと受け取られたが、同時に磁場がGaAs結晶中の点欠陥：EL2準位の変化に著しい大きな（数桁にわたる）変化をあたえたことは驚きであった。そのメカニズムについて種々検討した。

⑥ 各種光学的評価装置によるGaAs結晶の点欠陥や高感度不純物検出^{47) - 55)}

i) FTIR

半絶縁性GaAs結晶の残留炭素不純物については、FTIRによる測定上の問題点と注意事項を明らかにし、その評価方法の標準化に貢献した。

ii) 選択ペア蛍光法(selective pair luminescence, SPL)

SPLによる方法は、非常に高感度であるので、通常の方法で測定出来ないような高純度の結晶に対し、アクセプタの種類と同定に有用であることを明らかにし、炭素、亜鉛アクセプタ不純物を高感度で検出することができた。

iii) フォトルミネッセンス励起スペクトル(Photoluminescence excitation spectroscopy PLE)

GaAs集積回路作成には半絶縁性基板結晶が必要である。半絶縁性は、結晶中の残留不純物の形成する浅い準位を、深い準位EL2が補償することによって実現されている。従って、このEL2制御が、高品質基板結晶を得られるかどうかを左右する。それにも関わらず、EL2の正体は完全につかめていなかった。その原因の一つに深い準位を評価する方法自体多くの問題があったことが挙げられる。

従来のPL法においては、深い準位からの発光は一般に強度が弱いので測定が困難であった。そこで、従来のPL装置に比べ、光学系のS/N比が約2桁程度高い高効率赤外領域PLE測定装置を開発し、深い準位EL2の光学遷移を明確に同定し、EL2の成因となる点欠陥はAs_{Ga}であることを明らかにした。

10-2. エピタキシャル結晶成長

エピタキシャル結晶成長技術は、原子層レベルでの結晶成長機構の解明、評価技術の進展とともに、分子線成長法、減圧有機金属気相成長法、ガスソース分子線成長法を用いて原子層オーダーでの成長層厚の制御が可能になってきており、化合物半導体デバイス開発に不可欠な重要技術である。

10-2-1. 分子線エピタキシャル (Molecular Beam Epitaxy: MBE) 結晶成長技術³⁸⁾

MBE 法は、超高真空中で、加熱された単結晶基板に成長させようとする結晶の構成単体元素を加熱して、基板上に飛ばして基板結晶と同じ結晶方位の結晶を成長させる方法である。本質的には、超高真空中での蒸着法である。

基板結晶 GaAs 上に AlGaAs を成長させるには、分子源材料として、高純度 Al、Ga、As の各単体、および、添加不純物の Be や Si の単体を高純度 PBNセルに入れ、加熱して分子線として基板に飛ばす。成長速度は、約 3 Å/sec 程度なので原子層オーダーで結晶が成長していることになる。

原子層オーダーで膜厚制御が可能な分子線成長 AlGaAs 成長層、量子井戸構造などを、PL、DLTS(deep level transient spectroscopy)、ラマン散乱、高エネルギーイオン散乱、PIXE信号、光電流測定法など、種々の測定装置を駆使して集中的に評価し、これらの結果を基に分子線結晶成長技術の改善に努めた。

エピ層の不純物、キャリア濃度、モビリティ、DXセンターなどの電気的特性、発光効率、発光スペクトルなどの光学的特性が、基板温度と V/III 族分子線比 (γ) などの成長条件によってどのように変化するかを組織的な研究を行ったことに特徴がある。特に定量化の難しい発光効率の比較と、それに相関する深い準位の研究を綿密に行った。

AlGaAs 膜のフォトルミネセンススペクトルは、成長条件に敏感に依存するので、基板温度と V/III 族分子線比 (γ) などの成長条件とフォトルミネセンス強度の関係を明らかにした。

10-2-2. 低圧動作の有機金属気相成長法(Organometallic Vapor Phase Epitaxy:OMVPE)³⁸⁾

OMVPE 法は、III族原料に有機金属化合物、例えばトリメチルガリウム (TMG)、トリメチルアルミニウム(TMA)を、V族原料にその水化物、例えばアルシン AsH₃ などを用い、H₂ をキャリアガスとしてこれらを成長室に導き、熱分解反応により化合物半導体を基板結晶上にエピタキシャル成長させる技術である。

光共研では、結晶成長中の圧力を広い範囲に亘って変えることが出来る減圧 OMVPE 装置を開発した。この減圧 OMVPE 法には、超薄膜成長層の精密制御可能、急峻な組成制御が可能、多元混晶材料の多層化が容易、高均一・大面積・多数枚成長 (量産化) が可能という特徴がある。

これを駆使し、GaAs・AlGaAs の高純度成長、シランによる Si ドーピングなどの成長圧力依存性を明らかにし、GaAs 成長中に、四重極質量分析計によりガス分子種を調べ、その解析からガス反応機構を明らかにした。さらに、絶縁層でパターンニングした GaAs 基板を用いて GaAs 上にのみ成長が行える選択成長を見出した。選択成長の結果から成長機構について論ずると共に、選択成長の応用も行った。さらにガス反応機構、高純度 GaAs 成長、AlGaAs の高純度化、ジシラン (Si₂H₆) を用いた Si ドーピング、GaAs 選択成長と成長機構の解明、そして GaAs、AlGaAs 選択埋め込みレーザを試作し、良好なレーザ特性を得ることができた。

10-2-3. ガスソース 分子線エピタキシャル法³⁸⁾

分子線結晶成長法の長所と、有機金属気相成長法の長所とを併せ持つエピタキシャル法の研究をおこなった。

超真空装置である分子線結晶成長装置中に設定した加熱基板上に、成長結晶の成分元素からなる原材料ガス (Ga ソースとしてトリメチルガリウムなどの有機金属化合物、As ソースとしてアルシンやトリエチルヒ素などが用いられる) を分子線として照射して所望の結晶を得ることができた。この方法は、選択成長、さらには光照射効果を取り入れた点に特徴がある。高純度 GaAs の結晶成長、GaAs 成長層への炭素混入機構、シランガスによる Si ドーピング、エキシマレーザー照射による Si ドーピングのエンハンスメント効果について研究を行った。

11. あとがき

電気試験所、電子技術総合研究所 (電総研) での半導体結晶の研究を皮切りに、ベル研究所 (本稿では、電総研関連の研究ではないので省略)、超 LSI 共同研究所、光技術共同研究所---と多くの研究所で半導体結晶の多面的な研究に携わることが出来た。その間、電総研の上司、同僚、他の研究室の研究者との交流に加え、電子技術総合研究所以外の各社、大学の多くの優れた人達と半導体結晶の研究を共にすることにより、多くの貴重な経験を積むことが出来たのは、大きな収穫であった。

(共同研究所体制のメリットについては「応用物理」1986、No.8 巻頭言)

参考文献

- 1) 電気試験所彙報 (第23巻、第9号、1959) 671頁
- 2) M. Kikuchi and T. Iizuka, J. Phys. Soc. Japan, 15(1960) p.935
- 3) 飯塚隆、日本結晶成長学会誌、21(1994) p.
- 4) T. Iizuka and M. Kikuchi, Jpn. J. Appl. Phys., 2 (1963) p.194
- 5) T. Iizuka and M. Kikuchi, Jpn. J. Appl. Phys., 2 (1963) p.196

- 6) T. Iizuka and M. Kikuchi, Jpn. J. Appl. Phys., 5 (1966) p. 309
- 7) T. Iizuka, Jpn. J. Appl. Phys., 5 (1966) p. 1018
- 8) T. Iizuka and M. Kikuchi, LATTICE DEFECTS IN SEMICONDUCTORS
ed. R.R. Hasiguti, University of Tokyo Press and The Pennsylvania State
University Press (1968) p. 500
- 9) T. Iizuka, Y. Okada, M. Kikuchi, Jpn. J. Appl. Phys., 4 (1965) p. 237
- 10) H. Kimura and T. Iizuka, Jpn. J. Appl. Phys., 19 (1980) p. 1611
- 11) M. Tajima, Appl. Phys. Lett., 32(1978) p. 719
- 12) 田島道夫, 応用物理, 51 (1982) p. 1255
- 13) T. Iizuka, Jpn. J. Appl. Phys., 7 (1968) p. 485
- 14) T. Iizuka, Jpn. J. Appl. Phys., 7 (1968) p. 490
- 15) M. Tajima and T. Iizuka, Jpn. J. Appl. Phys., 15 (1976) p. 651
- 16) M. Tajima, T. Iizuka, *Gallium Arsenide and Related Compounds (Edinburgh)*
1976, Proc. of the Sixth International Symposium on Gallium Arsenide,
Edinburgh Conference, 20-22 Sept. 1976 (Inst. Phys. Conf. Ser. No. 33a, The
Inst. of Physics Bristol and London, (1977)p. 123-132
- 17) M. Tajima, T. Iizuka, Y. Okada, Jpn. J. Appl. Phys., 32 (1993) p. 2592
- 18) 日本電子工業振興協会規格 JEIDA-45-1992 (1992).
- 19) 1992 Annual Book of ASTM Standards, Vol. 10.05, F1389-92, p. 682 (1992).
- 20) 日本工業規格 JIS H0615 (1996) .
- 21) Semiconductor Equipment and Materials International, SEMI MF1389-0704(2004).
- 22) T. Iizuka, S. Takasu, M. Tajima, T. Arai, T. Nozaki, N. Inoue and M.
Watanabe: "Determination of Conversion Factor for Infrared Measurement of
Oxygen," J. Electrochem. Soc., 132, No. 7 (1985)p. 1707 - 1713.
- 23) 超LSI技術 垂井康夫編 昭和56年 オーム社
- 24) 技術の伝承「結晶Si製造・加工・評価」
技術の伝承プロジェクト編集委員会編
田島道夫監修 (出版：日本学術振興会第145委員会) 発刊年：2014
第1章 日本の結晶シリコン技術の歴史
1.4.5 飯塚隆 「超LSIプロジェクト」 pp. 47-49
1.4.10 田島道夫「フォトルミネッセンス法の発明から標準化に至るまで」 pp. 67-70
- 25) H. Koyama, J. Appl. Phys. 51 (1980) p3202
- 26) M. Tajima, S. Kishino and T. Iizuka, Japan J. Appl. Phys., 18 (1979) p. 1403
- 27) S. Kishino, M. Kanamori, N. Yoshihiro, M. Tajima and T. Iizuka, J. Appl.
Phys., 50 (1979) p. 90
- 28) M. Tajima, S. Kishino, M. Kanamori and T. Iizuka, J. Appl. Phys., 51 (1980)

- p. 2247
- 29) S. Kishino, K. Nagasawa and T. Iizuka, Japan J. Appl. Phys., 19(1980) p.L466
 - 30) K. Yamamoto, S. Kishino, Y. Matsushita and T. Iizuka, Appl. Phys. Lett., 36 (1980) p.195
 - 31) A. Kanamori and M. Kanamori, J. Appl. Phys. 50 (1979) p.8095
 - 32) M. Tajima, A. Kanamori and T. Iizuka, Japan J. Appl. Phys., 18 (1979) p.1401
 - 33) M. Tajima, A. Kanamori, S. Kishino and T. Iizuka, Japan J. Appl. Phys., 19 (1980) p.L755
 - 34) 高須新一郎 : 応用物理、49 (1980) p. 83
 - 35) 高須新一郎 : 応用電子物性分科会研究報告、382 (1980) p. 1
 - 36) H. Otsuka, N. Yoshihiro, T. Oku, and S. Takasu : ECS Fall Meeting, abstr. 545(1979)
 - 37) N. Yoshihiro, H. Otsuka, T. Oku and Shin. Takasu: J. Electrochem. Soc. 126 (1979) p. 456C
 - 38) 光電子集積回路の基礎技術 光技術共同研究所 編 代表 飯塚隆 1989年 オーム社
 - 39) T. Fukuda ; Jpn. J. Appl. Phys., 22(1982) p.413
 - 40) K. Terashima and T. Fukuda; J. Crystal Growth , 63(1983) p.423
 - 41) 小沢章一, 宮入広雄, 江口実, 中島真人, 福田承生: 日本結晶成長学会誌, 12 (1985) p.109
 - 42) S. Ozawa, H. Miyairi, M. Nakajima and T. Fukuda: Inst.Phys.Conf.Ser., 79 (1985) p.25
 - 43) M. Nakajima, T. Sato, T. Inada, T. Fukuda and K. Ishida ; Appl. Phys. Lett., 49 (1986) p.1251
 - 44) K. Kuramoto, T. Sato and K. Ishida : J. Electrochem. Soc., 134(1987) p. 1286
 - 45) T. Inada, T. Sato, K. Ishida, T. Fukuda and S. Takahashi : Abstracts of 1985 Electronic Materials Conference(1985) p.59
 - 46) K. Terashima, T. Katsumata, F. Orito and T. Fukuda; Japan J. Appl. Phys., 23 (1984) p.L 302
 - 47) M. Tajima, H. Saito, T. Iino and K. Ishida: Jpn. J. Appl. Phys., 27 (1988) p. L101
 - 48) M. Tajima: Defects and Properties of Semiconductors, ed. J. Chikawa, K. Sumino and K. Wada, KTK Scientific Publishers, Tokyo(1987) p.2
 - 49) M. Tajima : Jpn. J. Appl. Phys., 21(1982) p. L227
 - 50) M. Tajima : Appl. Phys.Lett., 46(1985) p. 484
 - 51) M. Tajima, A. Yahata, T. Kikuta, N. Tsukada and K. Ishida: Semi-Insulating III-V

- Materials, Hakone, 1986, Ohmsha, Tokyo(1986) p. 305
- 52) M.Tajima: Jpn. J. Appl. Phys., 24(1985) p. L47
- 53) 田島道夫、清水良祐 ; 応用物理、56 (1987) p.1183
- 54) M.Tajima: Jpn. J. Appl. Phys., 26(1987) p. L885
- 55) M.Tajima, T.Iino and K.Ishida: Jpn. J. Appl. Phys., 26(1987) p. L.1060

略歴 飯塚 隆 (Takashi Iizuka)

- 1958年 電気試験所入所 (電子部半導体部品研究室)
- 1968-1970年 ベル研究所研究員
- 1974年 電子技術総合研究所基礎部固体物性研究室長
- 1976-1980年 超エルエスアイ共同研究所へ出向、第四研究 (結晶技術) 室長
- 1981-1987年 光技術共同研究所へ出向、研究企画室長、所長
- 1987-1992年 住友金属鉱山 (株) 理事
電子材料研究所長、機能性結晶開発事業部長、研究開発本部副本部長
- 1993-2002年 会津大学コンピュータ理工学部ハードウェア学科教授
- 1998年 同 ハードウェア学科長
-
- 1986年 豊橋技術科学大学工学部 非常勤講師
- 1988年 東北大学金属材料研究所 非常勤講師
- 1998, 1999年 福島県立医学大学医学部 非常勤講師
-
- 博士 (理学) 東京大学 会津大学名誉教授

受理日 : 2017年11月6日