電子材料の将来

——半導体エレクトロニクスの問題——

通産省工業技術院電気試験所 菊 池 誠

半導体エレクトロニクスを中心にして、材料面から現在と将来とを考える。将来は過去と現在とから単純に外挿すべきものではなく、むしろ現在の動向を明確にし、そのうえで何がさらに求められており、何で困っているかについて真剣に取り組むことによって主体的につかむべきである。そのような実例を結晶学的な問題と、機能素子とについて示した。

1. ま え が き

戦後 20 年を過ぎ、日本のエレクトロニクスは、いろいろな問題をかかえながら、とにかく驚くほどの進歩をみせた。昨年、モスクワで半導体国際会議が開かれたがそのとき討論したソ連の研究者が「日本はいまや世界第二の半導体国だ」という表現を使った。それも一人や二人ではなかった。工業としても技術開発のポテンシャルとしても、これはあながち外交辞令ではないと思ってよいだろう。

もちろん上にも書いたように、われわれのこれまでのやり方がこれからも通用するかどうか、といったような真面目な問題も横たわっている。簡単にいえば、これまでの日本の半導体の研究には、冒険と失敗とが極端に少なかった。その意味では、パイオニアとして先行する米国の成果の後姿をみながら、ひたすらにそれを追うという形にほとんど終始してきた。残念ながらこのことも事実である。

そのため、工学と理学との間を、問題がメデシンボールのように受け渡され、やりとりされて進歩するという形が日本には育てこなかった。

ところが、このことは、裏からみると、日本の驚異的な進歩の原動力でもあったわけである。W. Shockley が 1935 年に心の中にもった“固体による増幅装置”という執念が、J. Bardeen, W. Brattain との協力によって、1948 年にトランジスタの誕生という形で実るまでの 13 年間に費した“必要な失敗”のための労働と費用とは日

本では省略されたわけである。考えてみれば、米国にとつて、日本の工業は実にいまいまいに違いない。常にロスを省略して追いつがってきたのだから……。

ただ、この“ロスの省略”は必然的に先進国としての資格と相容れない。ロス先進国の宿命である。これが私のいうひとつの真面目な問題なのである。

そういう、日本という環境以外に、いま、固体エレクトロニクス、特に半導体エレクトロニクスにはもう少し広い視野での問題も起こっている。

この限られた紙数の中で、そのうちの二、三を、少し考えてみようと思う。それも、比較的半導体材料に関係の深い話について述べてみることにする。

ひとつだけ、最初にふれておきたいのは、当然ここで、われわれは将来について考えねばならない。しかし、最近の流行のある種の未来論のように、現在のエクストラポレーションによってバラ色の未来を描いてみせようというのは、まったく、私の本意ではないということである。

例をあげてみよう。かつてエレクトロルミネッセンスが、そういう未来論的に語られた時代があった。ZnS(硫化亜鉛)の粉末を使って光る壁を作る。すると面が光るから、照明としては人類の使う最も進歩した面光源となる。電源の周波数を変えれば、発光の色も変わるであろう。部屋のふんい気がつまみひとつで変わる、といった話であった。これは、いまの段階でいえばややナンセンスに近い。それというのも、話がリアリスティックな段階から遠い間は、技術者がそういう夢を語る自由をもっているのだけれども、データが出て、評価が現実的になればなるほど、マスコミの先走りをおさえる義務を技術者は感じなければならないのである。

“Problems of the Semiconductor Electronics” by Makoto Kikuchi (Electrotechnical Laboratory, Agency of Industrial Science & Technology, Ministry of International Trade & Industry, Tokyo) テレビ学会全国大会特別講演 (昭 43.10)

もともと、未来について真剣に考えるには、まず“近い未来”について一番多くの人達が注意を集中せねばならない。しかも、その最良の方法は、『現在困っているのは何か?』『もっとどのようになったら好ましいのか?』という判断を少しでも正確に実行することだと考える。

そういう立場で、“問題”を探って、その関連する学問や技術のポイントを考えてみることにしよう。

2. 4 つの方向

半導体に関していうなら、半導体を使った電子装置はこの 10 年ほどの間に刻々に山を登りつめ、どうも進歩に頭うちが来たようである。トランジスタは、使いうる周波数の上限が、1952 年頃には 1 MHz 程度だったのが、1955 年頃にはたちまち数百 MHz に上り、1960 年には 1000 MHz に上った。ところが、いまの原理に立脚する限り、そろそろ頭うちになってきた。Philips の研究所長 Casimir が書いたように、トランジスタの原理発見に相当するような大きな事件は、その後生れていないといつてよいのである。それだけに、今日までのほなやかな発展は、ほとんどその原理の周辺に咲きほこった花々であったわけであり、それが咲き乱れて一段落した後は、やや淋しい空隙が訪れた感がある。このことは 1962 年、英国の Exeter での半導体国際会議に集った物理学者達の間でもささやかれた。“半導体のお葬式”という表現を使った人がいたほどであった。

誤解のないようにつけ加えておくけれども、これは半導体工業の衰微を意味するのでは決してない。研究開発がドラスチックな新しいアイデアを生むと、それは新しい“可能性”を生み出すのであって、あるアイデアで生れたものが工業として育てゆくのは、また別の次元で進行する。ただ、新しい大きなアイデアが生れない限り、工業にも新局面とか飛躍がおとずれにくいということである。

さて、皮肉なことに——そして技術者達にとっては、はなはだ愉快なことに——世界の頭脳が集って半導体のお葬式の話をした翌年、1963 年 6 月に、ミシガン大学で開かれた Solid State Device Research Conference で、米国の IBM に英国から移った J. B. Gunn が、GaAs という化合物半導体の結晶に、向い合った 2 つのオーム性電極をつけるだけで、そこから非常に振動数の高い電流振動が出ること初めて報告した。これが、今日有名な“ガン効果”になろうとは、当時出席していた連中も気づかなかった。座長をしていた N. Holonyak という男さえ、

“電極がうまくついていないので、その辺で何か起

こっているのではないだろうか?”

という批評を与えたほどである。

しかし、実はこれが、葬式どころか、半導体の“若がえり”になったのである。Bell Telephone Laboratories の J. Morton は、これまでエレクトロニクスは何度か若がえりをやっている。それは常に物理学との接触による若がえりであった。相手の物理学が新しいとか古いとかは問題でない。要するに、工学が一度基礎的な問題と触れ合うことによって若がえるのだ、といっているが、Gunn の場合も同様で、もともとは高周波用のダイオードの研究から出発し、その特性を改良しようと苦労しているうち、ダイオードの面積を変えても、逆方向の電流がそれに比例して変わらないという現象にひっかり、それから、非常に大きい電場の中で電子が流れる場合の現象を調べ始めた。

極端に強い電場の中での電子のふるまいを、物理学でホットエレクトロン（熱い電子）とよんでいる。Gunn は GaAs という半導体について、ホットエレクトロンの研究をしようとした。その途中で、“偶然”みつけたのが、この高周波の振動であった。

この Gunn 効果は、やがて技術者達の興味を集めて輝きはじめた。何故なら、半導体という材料は、トランジスタによって真空管の体系を置きかえてきたけれどもしかもなお手に余って、真空管に一步をゆづっている領域があった。それはマイクロ波領域であった。マグネトロン、クライストロンを押しつけることだけは、半導体一族にもむずかしいことだったのである。

ガン効果が最大のトピックとして 1963 年後半から注目を集めたのは、ついにマイクロ波領域に半導体が実用という感覚で切り込めるかも知れないという期待を抱かせたからである。実際、1963 年の 11 月にワシントンで開かれた Conference には、もうこのガン効果を使って導波管の中にマイクロ波を立たせたこと、それから InP という半導体を使っても、この効果が認められるということ、Gunn 自身が報告した。ガン効果を中心にした“マイクロ波への応用”，これが最近の半導体エレクトロニクスの進歩のひとつの方向である。

第二の方向は、“光”の技術に関する領域である。それもただの光ではなくて、coherent な光の領域である。つまり、互いに干渉し合うことのできる光、すなわち、位相関係がそろっている波束が関与するものである。

普通の電球や蛍光灯から出る光は、光の波束が、波長、位相などかなり大きな“ランダム”な関係をもっている。これは電波でいえば雑音のようなもので、そのまま通信に使うわけにいかない。しかし、もし特定の振動数で発振をする回路から電波が放射されれば、今日広く行

なわれている通信ができる。つまりそれに情報を乗せることができる。雑音電波でも断続によって情報を乗せることはできるが、情報量が少なくで問題にならない。電波による通信はその点で非常に大きな情報が扱える。

この考え方を光に適用すれば、通信に使える光とは、とりもなおさず coherent な光でなければならないことになる。光による通信、情報処理、そういう関心がこの数年来非常に強まってきている。それは、そのための手段が手に入ってきたからである。これがレーザーであり、半導体でレーザーができたのは 1962 年からである。これも葬式の論議の最中であった。

しかしこれも、もともとレーザーを作ろうという意図が初めからあったわけではない。たとえばマサチューセッツ工科大学のリンカン研究では、1960年頃から GaAs 半導体を使って、高周波用のダイオードを作る研究をしていた。図 1 のような pn 接合を作ると、なかなか高周波の特性が良い。これはある程度期待されていたことでもともと高周波でのふるまいの「良さ」は、結晶の中を走るマイナスの電荷をもった電子の移動度 μ_e と、プラスの電荷をもった正孔の移動度 μ_h との積、($\mu_e \times \mu_h$) に依存するので、化合物半導体の中では GaAs が良からうという予測がされたわけである。

ところが、そのようなダイオードの電流-電圧特性をとってみると、図 2 のように $\log i \sim V$ の関係は、理論から推論されるよりも寝てしまうのである。だいたい pn 接合の電流 i と電圧 V との関係は、

$$i = i_0(e^{eV/kT} - 1) \quad (1)$$

となるはずである。ここで k はボルツマン定数、 e は電荷量、 T は絶対温度。 i_0 は比例定数である。さて、順方向では $V > 0$ で、しかも $e/kT \approx 39$ だから、

$$i = i_0 e^{eV/kT} \quad (2)$$

の形ににすぐ近づき、 V の値が 0.1 V を越せば、

$$\log i = \log i_0 + \left(\frac{e}{kT} V \right) \quad (3)$$

となり、 $\partial(\log i)/\partial V$ すなわち図 2 の傾きは (e/kT) 、すなわち室温で 39 ぐらいになるはずである。ところがリンカン研究所の R. Rediker は、実験結果が、この傾きとして 39 よりはるかに低い値、5~10 といった小さな値を示すので、頭を悩ましていた。そこで、いろいろ考えた末に、これは p 形の領域から n 形に流れ込む正孔と、 n 形から p 形に流れ込む電子とが、互いに結合し合って消える、そのメカニズムに関係があるに違いないという結論をおいてみた。つまり、正孔と電子とが、そのあたりで激しく結合して電流のロスを引き起こしているのだらうと考えたのである。そこで、もしそうなら、 pn 接合から光が出てくるだろう。そして、その光の波長を調べれば、恐らくそのメカニズムを解明する手がかりを得られるだろう、ということになった。この実験をやったのが Calawa という男である。

Calawa は、 pn 接合の前に、光に感じる装置をセットし、 pn 接合に順方向に電流を流してみた。すると、何としたことか、光検出装置のメーターが振り切ったのである。はじめ、彼は、実験の誤りだろうと考えたそうだ。そのくらい強い光が出てくる。こうして、GaAs という結晶で作った pn 接合では、これまでシリコン(Si)やゲルマニウム(Ge)で認められたとは段違いに強い光が出てくる、すなわちその効率が非常に高いのだということが、偶然、発見されたのである。この事実がわかると、もしやレーザーが可能ではあるまいか、という議論が急に現実味を帯びてくる。実際ここから、ばたばたと事が運んで、IBM、GE、そしてこのリンカン研究所の 3 カ所でときを同じくして、半導体レーザーを発表するに至るのである。

光を coherent な光として使おうとする、これが第二の発展の方向である。

さて、第三は、よく知られている集積回路である。今日では IC (アイシー) で通用するようになった。IC とか、IC 技術は、これも歴史的にはいくつかの技術思想に連っている。たとえば、オートメーションにもかかわりがある。人手が介入するのを防ぐために、すべての部分を四角い箱形にしておこうとした、いわゆるティンカートイという時期があった。また、すべての部品を、

図 1 GaAs ダイオード

図 2 GaAs ダイオードの順方向電流-電圧特性

四角いセラミックスの板につけて、トランプのように必要な板をまとめて、適宜のハンダづけをするというのが RCA のマイクロモジュール方式で、これも、小形化ばかりでなく、規格化、オートメーション化と関連している。

一方、ひとつの装置が内蔵する部品数は年とともに指数関数的に増大してきた。このことは必然的に、小さく、軽くするとともに、“信頼度を増す”という要求をつきつける結果となった。単一部品が 10^6 時間の寿命をもって、ひとつのシステムが 10^6 個の部品で成り立つとすれば、そのシステムは 1 時間に 1 回の割合いでトラブルを起こすことになる。システムの複雑化が、信頼度の向上を要求したのである。

このようないろいろの要求が合流してきたところへ、トランジスタのひとつとしてプレーナートランジスタが生れた。これはシリコン結晶上に成長する酸化膜の安定性を巧みに利用するものであり、また、これに精度の高い加工を施す技術を生んだ。こうして、これらがからみ合って一本の“より糸”として IC にこぎつけたのである。

集積回路というのは、固定的なひとつの“形”ではなくて、集積化するという考え方を可能にする技術の体系なのである。だれでも、集積化する必要を感じる者が、その要求に応じて利用すればよい。そういう割り切り方が、日本ではまだ少ないようである。何か、全コースをマスターしなければ集積回路にならないような気持をもつ人が多いし、マスコミでも、すぐ大げさにとりあげる。これはむだな考え方である。

しかし、IC が第三の方向であることに間違いはない。

もうひとつ、第四の方向は、機能素子 (functional device) という考え方である。これは、まだ固った考え方ではない。しかし、大きくのびるひとつの方向のように思われる。それで、これを第四の方向といっておこうと思う。やや立入った例については、後でふれることにする。

3. 材 料 の 問 題

「エレクトロニクス of 材料は将来どんな方向に進むのだろうか？」という質問にぶつかることが非常に多い。つまり初めゲルマニウムトランジスタが売られ、やがて、シリコントランジスタの時代になった。さて、その次はどんな材料の時代だろうということである。

こういう考え方は、実はあまり実情に即していないのである。つまり、人類が銅を使った、鉄を使った、といったように歴史を分類するような具合にはいかない。

もともと、歴史的にみれば、ガレナとかパイライトな

どという面倒な構造の結晶を、われわれは検波器の材料として使ってきた。鉱石の標本箱に入っているようなシリコン結晶を使った時代もある。セレンとか亜酸化銅の整流器工業は、ほとんど経験と再現性に頼って成り立ったものであった。1940年頃から、結晶検波器の特性を著しく向上させないと、マイクロ波工学の進歩をささえられないという要求があって、初めてシリコン結晶に“手を加える”ことを試み出した。つまり神様が地上に与えた元素としてでなく、現実の結晶を焼いたり、融かしたりして、その特性をわれわれの手を通じて改良する技術が芽をふき始めた。こうなって、ゲルマニウムが登場し、たとえばベル電話研究所などでは、順序を入れかえ、まずゲルマニウムをマスターしようという哲学をもったのである。W. Shockley は、「ゲルマニウムとシリコンとは近い親戚である。一方がわかれば他方もかなりわかる。ゲルマニウムは融点が低いし、化学的活性も小さい。そこでまずゲルマニウムを、物理学と処理技術とから充分攻略する。そこで次にシリコンに行く。この2種類は“元素”だから、理解しやすいだろう。そこで次の攻略目標を、化合物の半導体に選ぼう」という方針を堅持した。そしてほとんどこのとおり実行されたのである。

実際、トランジスタ用の材料としては、ゲルマニウムシリコンという元素半導体はうってつけの材料であったといってよい。理解しやすく、操作、処理しやすい。その意味では、他の半導体材料が次に登場しなければ困るという要素はほとんどない。

半導体材料というものは、むしろその特色に存在価値がある。たとえば光に感じる、という点では硫化カドミウム (CdS)、磁場に感じるという点でインジウムアンチモナイド (InSb) といったように、それぞれがオーケストラのパートのように独得の音色を出す。そこに妙味もあり面白さがあるわけである。

ガン効果や、レーザーという機能で GaAs という半導体がクローズアップされたのも、結局は GaAs 自身の独得の持ち味によるものなのである。だから反対に、ガン効果やレーザーの動作で、ゲルマニウムやシリコンが呼び出されても、こればかりはまったくどうしようもない。基本的な特性に著しい違いがあるのだから、もともと守備範囲を異にしているわけである。

半導体の電子現象を理解するために、物理学者達は図3のような図をかく。電子が結晶の中でどんなエネルギーをもち、どのようにエネルギー的に分布しているかをわかりやすくするためにかく図であって、横軸は結晶の運動量、縦軸はエネルギーをあらわしている。要するにこのような抽象的な思考段階は、学問がいつでも使う

図 3 運動量 (k) ~ エネルギー (E) 表示

てであって、何も特別な、難解なものではない。さて、GaAs ではA図のように、伝導に寄与する電子はIのへこみのところに集まっている。そういう状態が、いわば普通のすがたである。いまこのような結晶に電場をかけその電場をだんだん大きくしていったとする。そうすると、電場から電子はエネルギーをもらって、平均的にエネルギーが大きくなるので、Iのへこみの中に分布していた電子は、その分布が平均的に上にのびてくる。そうすると、Iよりも少し高いところにIIというもうひとつのへこみがあるので、かなりの数の電子はIIのへこみに移ってくる。

さて、電子1個について考えてみると、それがIのへこみの中にいる状態では、かなり動きやすい（すなわちその移動度が大きい）が、それがIIのへこみの中にいる状態では、ずっと動きにくい（すなわち、移動度が小さい）。そうすると、すぐわかることだが、たとえば100個の電子が全部Iのへこみに入っているときは、電気伝導度 σ は、

$$\sigma = 100(e)\mu_I \quad (4)$$

であるけれど、その100個のうち70個がIIのへこみに移ってしまったとき、伝導度 σ' は

$$\sigma' = 30(e)\mu_I + 70(e)\mu_{II} \quad (5)$$

となる。ここで e は電荷量、 μ_I 、 μ_{II} はそれぞれのへこみの中にいる状態に対する移動度である。

いま、もし $\mu_{II} \ll \mu_I$ とすれば、明らかに、

$$\sigma' \ll \sigma \quad (6)$$

で、つまり電場が大きくなったために、伝導度は著しく減少することになる。

こういった考察から、GaAs では電流と電場との間に図4のような関係があることが理論的に考察され、もしこのような負の抵抗があるなら、ガン効果のような電流

図 4 GaAs の結晶内部での電場～電流の関係

振動現象が認められるのもっともだという理解が得られるようになった。これは、当時 RCA の研究所にいた Kroemer の大きな寄与によっている。

当然、こんな抽象的な理論が果して真実だろうかという問題が実験者達につきつけられた。ある連中は GaAs の結晶に磷 (P) を少しずつまぜていった。GaAs に P をまぜると、 $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ という、やはり半導体になる。P を増していくと（つまり x の値を1から0に近づけていくと）結晶は GaP になっていく。GaP ももちろん半導体結晶である。ところが GaP という結晶の中の電子は、図3Bのような配列をしていて、GaAs とは違ってIIのへこみの方がIよりも低いことがわかっている。つまり GaAs にまぜる P の量を増していけば、Aの状態から出発してIIのへこみはIに対してだんだん下ってくる（実際には、IもIIも上に上るのだが、その上り方がIのほうが早い）。そこで、GaAs はガン効果を示すが、P を増していけば途中でガン効果は出なくなるだろう。これが、そのグループの研究者達の想像であった。そして実験の結果は、まさにそのとおりということが証拠立てられたのである。

もうひとつのグループでは同様なことを別のやり方で実証した。つまり、結晶に大きい圧力を等方的にかけ、結晶の原子間距離をおしちぢめると、図3のAのような状態から、Bのような状態に変化するから、同様にしてガン効果は起こらなくなるだろうというわけである。そしてこれも予測どおりになった。

ガン効果ばかりではない。先に述べた半導体レーザーにしても同じような推移をたどった。GaAs で、いったい何故それほど強い発光が起こるのだろうか？ この答えも、実はエネルギー図によってはっきりと与えられることがわかってきた。つまり、GaAs の pn 接合のところで、電子と正孔の一对が、互いに結びついて消失すると同時に光を放出する。その場合、この結合はまったく直接に能率よく行なわれる。これに対して、ゲルマニウムやシリコンでは、電子と正孔との結合の主な部分は、結晶のもつ運動量が関与するという面倒なプロセスを媒介とするために、それが光を放出する能率はずっと低い

のである。

このように、近年の半導体エレクトロニクスの大きなトピックスというのは、それぞれの半導体材料のもつきわだった特色に依存しているということがわかる。そのうへ、もうひとつ大切なことは、そのような材料の特色が、決して単純なものでなく、非常に学問的に深いところまで掘り下げたうえで明らかにされるような、いわば物質の基本的な性質を媒介にしているという点である。Morton のいう“物理学との接触”である。実際、図3にかかげたようなエネルギー的な図式というものは、本来、人間の抽象的な思惟の段階の産物であり、学問はこのような段階を経て発展してきたものである。そういう根源的な点に一度立ち帰ったところから、電子材料の新しい息吹きがよみがえってきたのである。

4. 答えを求める問題

ここで特にふれておきたいのは、それならば、半導体材料の基本的性質を刻明に調べたら、それで何かが生れてくるだろうかという問題である。トランジスタも、トンネルダイオードも、ガン効果も、半導体レーザーも、直接の動機は、現実的な要求とか、実用面からの刺激とかがみな働きかけており、その上に“偶然”が支配している。つまり、後からつけた物理学的な説明は、決して“導きの糸”となっていないのである。

MIT リンカン研究所の Rediker は、「理論屋には、こうやったら、どんなことが起こるでしょう？ ときいても駄目だ。こうやったらこうなった、何故でしょう？ ときけば良いんだ」と冗談まじりにいったことがある。これは理論や理論家の未熟を指摘するのではなく、むしろ問題へのアプローチの問題にふれているわけである。われわれが探索的な仕事、すなわち research をする場合、最もよいのは自然に対して問いかけることである。未知の要素が多いほど、われわれは失敗やむだを覚悟で取り組まねばならないのである。

そこで、それならどんな攻め方があるだろうか、ということである。何しろ、中に何が入っているかわからない箱の中味を推論するようなことをやるのだから、何をしてもよい。ということは、逆にいえば、どういう手順で、何を目安に攻めたらいいのか、ということが問題なのである。

電子材料の将来について考えるとき、近年の進歩が典型的にわれわれに教えてくれることは、

“今、最も困っているのは何か？”

“何をやったら、もっと良くなるだろうか？”

ということから出発することである。莫然と未来を想像したり、過去から未来を外挿して(extrapolation)考えた

り、という発想は、戦略として効率が悪いようである。

トランジスタの劣化の問題に取り組んだとき、ベル電話研究所では、これを“半導体表面の物理学”に引きもどした。そこでは、酸化膜の生成の際に、表面にふれる酸素原子が、酸化膜の中の酸素と入れかわりを演じるといような、つきつめた物理学のテーマさえ取りあげられたものである。これが結局は、後にプレーナートランジスタや、今日の集積回路の技術にまで発展したのである。トンネルダイオードの実用化の仕事の中で、その劣化現象が見つかった。1960年後半の出来事だった。そこから、今日のトンネルスペクトロスコピーという物理学の新領域が生れ出た。

Shockley が以前から主張しているように“失敗の物理学”こそ、未来にのびる芽の温床なのである。

電子材料の将来について考えるためには、そういう“答を求める問題”についてふれておくことが大切である。くり返すけれども、いまにトランジスタはこうなるだろう、集積回路はこんなに大きい集積度に発展するだろう、GaAs の次に、このような材料が活躍するだろうなどと、バラ色の未来の想像図を描くことよりも、現在うまくいっているようであり、専門家達はこんな悩みをかかえている、ということのほうが、本当に実りを期待できる話なのである。そういう例をいくつかあげてみることにしよう。

4.1 結晶は均一な性質をもっているか？

半導体結晶は、純度といい、結晶内の原子の並び方といい、これまで技術者が扱ってきた材料の中で、信じられないほどの良さをもっている。そのことはたしかである。ところが、電子現象の利用が進んでくると、要求はまた日増しにぜいたくになってきた。たとえば、先に述べたガン効果の研究でも、また、その実用化でも、その進歩をおさえているひとつの要素は、充分によい結晶ができないという点にあった。英国や日本に、むしろ米国よりもよい GaAs の結晶が育ったために、この方面の研究のレベルが、日本などのほうがある時期非常に上ったということさえいわれている。

だいたい、半導体結晶の中に不純物原子を混ぜたとしても、そう、われわれの思うように均質に分布してはくれない。写真1は、シリコンの中に銅の原子を混ぜておいて、この結晶を赤外線でのぞいてみた写真である。シリコンは赤外線では透明なので、銅原子がより集まったところは黒い影になってあらわれる。しかも、写真のように、この金属原子の沈澱は、ループ形のパターンを示している。このループは、X線で調べると、その正体を描き出すことができる。写真2には異なる反射面によるX線のトポグラフを示してある。これからわかるよう

写真1 シリコン結晶の中に銅原子を入れ、赤外顕微鏡でのごくと、このようなループが見える (直径約 10μ)³⁾

写真2 銅原子を入れたシリコン結晶のX線トポグラフ写真
X線の反射面をかえると、丸いループパターンが黒く出る場合と出ない場合がある (この写真は同じ結晶部分についての結果)²⁾

に、X線でみると、ループの内側が黒い影になる場合と、白く抜ける場合とがある。このことは、ループが結晶格子の面状の不整を抱え込んでいる状態を意味している。いいかえると、結晶の内部にはこのような結晶の不整があるし、それと関連して不純物原子も局在するのだということである。

このような不整がある結晶に、集積回路を作れば、大きい電力を扱ったりした場合に当然トラブルが発生することが予想されるし、また、結晶のもつ不均一さがある程度のゆらぎを示すとすれば、そのゆらぎよりも小さい部分の加工によって集積回路を作ったら、集積回路の特性は均一にならないことが当然予想される。結晶の内部を調べていると、よく現在の集積回路が可能だ、とむしろ感心することがある。これは、電子現象のひろがり、結晶の不均一さをならしてくれるという恩恵によっているのだろう。だから、将来のためには、いったいどこまで均一な結晶を作れるものか、充分きわめておく必要がある。

写真3 Teを高い濃度で含むGaAsのX線トポグラフ写真³⁾

結晶のこまかい乱れが沢山見られるのはTeが寄り集まったスペックが散在しているためである。糸のように散らばっている黒い影は転位(dislocation)、その転位の周辺の白い部分は、完全に近い結晶性をもつ領域である。

写真4 Teを沢山含んだGaAsの表面を薬品でエッチすると、このような欠陥が見える (大きさはだいたい 200μ)⁴⁾

先に述べた半導体レーザーは、テルル (Te) を高い濃度に混ぜたGaAsを材料として出発し、これでpn接合を作る。そのTe入りGaAsをX線トポグラフにしてみたのが写真3である。これですぐわかるように、やはりTeは小さいスペックをなして結晶内部に局在している。

特にこのような結晶の表面を念入りに金属顕微鏡で調べると、写真4のようなものが見つかることがある。これはGaAsの表面にたまたま顔を出したTeの“寄り”である。この三角形の内側にもうひとつ見える三角形の一边は、約 150μ ぐらいの大きさである。

このようなスペックが、本当にTeの寄りであるかどうか。そのことをたしかめるために、X線マイクロアナライザーという道具を使ってみる。これは試料の表面を電子線で叩いて、そこから出てくるX線を調べるのである。こうすると、電子線で叩いている部分の元素が何であるか、それから、その濃度をも知ることができる。このマイクロアナライザーの電子線で、写真4の中央部分を横に走査した結果が写真5である。明らかにスペック

写真5 X線マイクロアナライザーで写真4の中央部分を横に走査した結果⁴⁾

中央の黒い三角形の部分ではGa, Asが減り、その代りにTeが非常に沢山寄り集まっているのが認められる。

の中心部にTeが寄り集まり、その部分にはGaもAsも減少が認められる。

こうして、Te入りのGaAs結晶の中にはTeは決して均質に分布せず、小さいスペック状に寄り集まっていることが明らかである。こういう状態は、半導体レーザーを作るのに不都合である。それは発光の能率を下げるに違いない。何故なら、Teのスペックは発光やレーザー動作の“ロス”として作用するはずだからである。

もう一度、写真3を見ていただきたい。大局的に見てすぐ気づくことは、Teのスペックが寄り集まっているところと、むしろそれらが希薄で白く見えるところとがあるという点である。これは結晶の中にある転位(dislocation)の周辺部分に、結晶がより完全に近い領域があることを示している。転位というのは、結晶格子がずれを示す、いわば小さい喰い違のならばであるが、そういう転位の周囲に、これを取りまいて、完全に近い結晶部分が存在するというのはいかにも皮肉である。これはいったいどういうことなのか？ 周辺のひずみが、転位に吸収されるのだとすれば、やはりある程度以上大きな部分をひずみのない完全な結晶とするのはむずかしいことなのだろうか？ これも現在残っている問題のひとつである。

4.2 結晶の示す“向き”

結晶には表裏がある。このことはGaAsのように2種の原子で成り立つ結晶について考えれば、すぐわかることである。表にGaの並んだ面が出ていたとすれば、その裏の面にはAsが並んでいるわけである。これをA面、B面と、われわれはよびならわしている。

ところが、表裏だけでなく、結晶には“向き”もある。しかも、その“向き”は容易に示すことができる。

写真6 シリコン結晶の表面を $[2\bar{1}1]$ の向きに引っかいたときと、 $[211]$ （つまり反対方向）の向きに引っかいたときとは、その後に残るひずみの程度に明らかな違いが見られる(X線トポグラフ写真)⁵⁾

シリコンの結晶を、ダイヤモンドの刃（たとえばガラス切りの頭）で引っかいてみる。実際には、このダイヤモンドの刃にかかる力を一定に保つ工夫をし、結晶を動かすにはネジでような動きをするようにセットを組んである。このようにして引っかいたキズ跡をX線でみたのが写真6である。明らかに右向きに引いたときのキズと、左向きに引いたキズとに違いがある。たしかに一方のほうが跡が大きい。この結果は再現性をもっている。

このような現象も、先に述べた例と同じく、やってしまえばもっともなことで理解がつく。結晶の構成、つまり原子の並び方や、原子をつなぎ合わせるボンドの並び方を考えれば説明できる。

しかし、こういうことが案外最近まではっきりと確かめられていなかった。実際、結晶の薄片を切ったりすることは生産工程で以前から行なわれてきているが、これだけはっきりしているなら、切る向きを考えて工程を管理したほうがよいわけである。将来、小形化がいっそう進めば、こんな基礎実験の結果も生きてくるだろう。

このように、ダイヤモンドの刃で引っかいた後を、このダイヤモンドの引っかかり線に沿って結晶を割ると写真7の写真に示されているように、その周辺のひずみは消失する。これはまことに都合のよい話であって、半導体工業ではしばしばこのようにダイヤモンドの刃で筋をつけ

写真7 ダイヤモンドの刃で引っかいてから(a)、その中央の縦のキズ跡で割ると、結晶の中のひずみが消え去ってしまう(X線トポグラフ写真)⁵⁾

その筋から薄い結晶を割るという作業をする。幸いなことに、初め入った結晶内部のひずみは、割ったときに消失してくれるから、その災いを、後に残さないわけである。しかし、一般に、現在半導体技術で用いられているような結晶処理は、物理学的にみるとかなり荒い操作を結晶に与えるものであることが、いろいろの研究からわかってきている。だから、集積回路がもっと進歩しようとしたときに、その辺に問題が待ちうけている可能性があり、そこを解決しようとする、また何か新しいものが生れるきっかけも、そのあたりから浮び出るかも知れない。

4.3 機能素子 (functional device) というもの

この頃、しきりに機能素子という言葉が使われる。その割合に、いったいその言葉で何を意味しようとするのかがあまり鮮明でない。機能という言葉は、日本の技術者にはそれほどなれ親しまれていないけれども、米国の技術者の間には非常にゆきわたった概念のように思われる。機能 (function) と実体とを、ある時期に明確に切り離して考えることは非常に有効である。そのよい例が1935年以来、Shockley が固体の増幅装置を作ろうとした考え方である。彼は“真空管”という実体をはなれてそもそも増幅装置の本質は何であろうかと考えた。そして負の抵抗と、方向性というものに着目した。そうなるともはや真空とか真空管という“もの”にこだわる理由は消失した。固体を使っても増幅装置はできるはずだ、という考え方が成り立つわけである。

さて、機能素子あるいは機能装置 (functional device) という言葉は、Morton が、Philips 社の Casimir 研究所長に対する反論として書いた論文あたりからしばしば見られるようになった。私は、その一番大切な点は、何

図 5

らかの物理現象のからみ合いによって、ある装置の中でプロセッシングが起こるようなものと考えている。

たとえば、図 5 のように A という入力と B という出力しか見えない暗箱があったとする。もしも A という入力に 10V の電圧を与えたとき、B の出力にパルスが次々に出てくるようなものがあったとしたら、これもひとつの機能素子である。まして、これがもっと複雑微妙の対応関係をもっていればなお良い。また、電気信号だけと限らず、光、磁気、温度、そういったどんな種類の刺激であってもよい。だから、人間の神経系のモデルのような電子装置が単一の結晶でできれば、典型的な機能素子である。

半導体という材料は先に述べたように、さまざまな特色をもった働きをする。光に感じたり、超音波を作ったり、マイクロ波を出したり、微弱な磁場に感じたり、まことに千紫万紅である。それらの“からくり”をうまく結合させれば、入力と出力との間に興味ある、しかも有用な関係を成立させることが可能ではないか。いくつもの回路素子をハンダでつなぎ合わせないでも、小さな結晶片でその機能を作り出せるかも知れない。これが機能素子への期待である。

ここに、そのような試みの一例を示そう。ベル電話研究所の Hakki は、図 6 のようなものを作った。すなわち薄い、細長い硫化カドミウム (CdS) の結晶の上に、いくつもの pn 接合を並べて表面上に作りつける。CdS に pn 接合を作るのは非常にむずかしいので、実際は銅イオンで Cd を置きかえて Cu_2S を表面に作る。 Cu_2S は p 形になるので、こうして pn 接合の列が形成される。

図 6 Hakki が試みた機能素子⁶⁾

さて、この試料の両端に、こちらがマイナス、向う端がプラスになるようにパルス電圧をかけると、CdS は圧電的性質が強いので、両端で、超音波の波束が励起される。この試料の中の自由な電子は、マイナス極からプラス極に向かって走っているが、その速度が、音波の速度

図 7 Hakki の装置による観測結果⁶⁾

と等しくなると、電子の系のエネルギーは音波の方へ受け渡されて、その結果、マイナス極からプラス極へ向かって走る音波の波束はだんだん強められる結果になる。音波がこのように局在したところをドメイン (domain) とよぶが、このドメインは強く分極した電気的二重層を形成するので、結局強い電場をもつドメインが音波の速度で走ることになる。

そこで、このようなドメインが、表面に作ってある *pn* 接合の下を通過するたびに、その *pn* 接合に大きなバイアス電圧がかかることになり、そのとき発光現象が引き起こされる。だから、この結晶を図 6 の右の方から眺めていると、パルス電圧を印加すると、マイナス極からプラス極に向かって、光る点がパッパッパッと移動して行くことになる。このような光点の移動はくり返し観測される。その測定例が図 7 の下に出ている曲線で、感光装置をこの結晶にむけておくと、発光が $0.1\mu\text{s}$ ごとにみとめられる。上の曲線は同時に観測した電流波形で、ドメインが *pn* 接合部分を通過するたびに電流に小さい脈動が認められるから、この発光が、たしかにそれぞれの *pn* 接合をドメインが通るときに出ているものであることがわかる。

これは、パルス電圧をかけると、光の“パルスの列”が出てくるといふ形の functional device である。もちろん、まだ研究の段階を出ないが、このようにして、いろいろの可能性が探索されているのである。

このように、超音波というような、これまではあまり表面に出てこなかった現象が半導体の中でとらえられるようになったのは、この数年来のことである。CdS などに限らず、InSb とか、先に述べた GaAs でも、ある条件のもとでは、電子の流れによる、超音波の増幅が起こる。恐らく、このようなからくりは、将来かなり利用されるようになるだろう。

写真 8 GaAs 結晶で超音波の増幅を繰返していると、プラス電極から損傷がのびてくる (赤外線顕微鏡写真)⁷⁾

といって、それは簡単なことだともいえない。たとえば写真 8 を見ていただきたい。これは GaAs の棒の両端に電極をつけ、パルス電圧をかけて超音波のドメインを作り、その増幅現象を観測した実験結果である。室温でも、パルスの繰返し周波数を 10 Hz 以下におさえればきれいに超音波増幅の現象を観測することができる。ところが、何度も実験を繰返していると、やがて電流波形に変化があらわれてくるのに気がついた。何か、永久的な変化が結晶に生じたらしいのである。

そこで、結晶を赤外線顕微鏡でのぞいてみた。GaAs もシリコン同様、赤外線に対しては透明だから、薄い試料では結晶の中を見とることができる。その結果得られた結果が写真 8 で、そこに示されるように、結晶のマイナス極側には何の変化もないのに、プラス極側からは黒い樹枝状のものが延びてきている。つまり、超音波の形成するドメインが充分成長して到達する側の電極から、結晶に損傷が生じて成長してくる。さらによくみると、パルス電圧がかかるたびに、この樹枝状の損傷は少しずつ延びてくる。そのうえ、X線マイクロアナライザーにかけてみると、樹枝状にみえる部分には電極に使っている錫 (Sn) の原子がより集って入っていることもわかった。当然この樹枝状の部分は電気的によい導通を示すのである。

つまり、あまり大きな超音波の増幅を伴う現象を使うと、このような宿命的な損傷を生むおそれがある。これは重要な課題である。どうすれば、この劣化を防ぐことができるだろうか？ トランジスタやトンネルダイオードも劣化の問題からいろいろの副産物が生れた。あるいはここにも何かの可能性がひそんでいるかも知れない。

5. これからの問題

電子材料の将来を見通すことはなおむずかしい。というより、ただ想像をもとにして未来図を描いてみたところで、意味が少ないように私は考える。むしろ、ここで二、三試みたように、現在困っている問題は何か、もっとどのようになることが“望ましいか”？ という発想から出発するほうが実りがありそうである。それで、電子

材料の将来という標題をかかげながら、InSb, InAs, InP, CdSe, HgTe といったさまざまな材料を並べたてて論じようとしなかったのである。

私は、現在の日本の技術者の大きな課題のひとつは、現在が転換期だという認識だと考えている。そのよい例が、基礎的な研究の評価と戦略だと思う。1960年頃から一時期あった研究所ブームの時代には、基礎研究にすべてを賭ける、というムードがあった。

ところが、むしろ米国の方で、“現実的な問題の中にある物理学に対する課題”ということがしきりにいわれるようになった。Shockley が“失敗の物理学のコンファレンス”(Conference on the Physics of Failure)を提唱したのもその頃である。現実的な、たとえば装置の劣化とか、あるいは技術的な失敗といったことの中に、物理学の対象として価値のある問題がひそんでいる場合が多いし、そういうきっかけでつかまえた問題が、飛躍的なアイデアや偶然の発見を生むことがあるものだということを、この人は痛いほど経験してきたのである。

そして、日本も、経済の自由化という大波の前で、同様な点についてははっきり開眼するべき転機にあるといえるだろう。

“一人一人では、日本の技術者は米国の技術者にひけをとらない”

とよくいわれたものであり、また、われわれが自他ともにもゆるす点でもあると主張する人もいる。

しかし、ときにはそれを逆に反論してみることも必要である。つまり、一人一人が強いのに、何故全体としてもっと力が出ないのか？ ということである。

RCA で先頃、液晶 (liquid crystal) による影像造りの装置を考え出した。昨年コロラド大学での Conference のとき、Sommers が朝飯のお盆をもって私の机にやってきた。四方山話にはもったいないから、早速私は彼らがどうやって liquid crystal を割り出したのか、インサ

イドストーリーをきかせてくれと尋ねた。彼はきびしい表情にもどってそのいきさつを話してくれたが、私にとって教訓的だったのは、“薄い画面の影像づくり”という課題のもとに、行きつまった ZnS などのエレクトロルミネッセンスをどう回避し、新局面をひらこうかというパネルディスカッションをやった、ということである。そのメンバーの主力は化学屋であったそうである。

これからの電子材料の進歩には、大なり小なり、このような戦略が関与せねばなるまい。つまり意志が動かねばならないはずである。自由化という要因はそれを強いるのである。そうになると、もっともっと実質的なチームワークが必要になろう。そしてまた、繰返し物理学との接触を求められよう。化学屋、物理屋も、聞きにこい、教えてやるというような協力ではこの要請に答えられないのである。

電子材料の将来に、未知の楽しみと期待とを抱く点で当事者の一員でありながら、私も素人と少しも変わらないのである。

この稿は、テレビジョン学会での講演をもとに、かなり加筆したものである。いろいろな事情のために、私の旧友武井幸夫君と約束しながら書きあげるのが非常におくれてしまって申し訳なく、ここに一言おわびする次第である。

また、本稿の中の実験結果で、特に断っていないものは私の研究グループの飯塚隆君、岡田安正君、福井常勝君の仕事である。

(昭和44年4月19日受付)

〔参考文献〕

- 1) T. Iizuka, et al.: Jap. J. Appl. Phys., **2** (1963) 194, 443
- 2) T. Iizuka, et al.: Jap. J. Appl. Phys., **5** (1966) 1018
- 3) T. Iizuka: Jap. J. Appl. Phys., **7** (1968) 490
- 4) T. Iizuka: Jap. J. Appl. Phys., **7** (1968) 485
- 5) T. Iizuka, et al.: Jap. J. Appl. Phys., **4** (1965) 237
- 6) B.W. Hakki: Appl. Phys. Letters, **11** (1967) 153
- 7) 福井常勝ほか: 日本物理学会 (1969-4)