

## 光と化合物半導体

中井 順吉\*

現代科学の大きな担い手の1つ 電子工学 われわれ日常生活の周辺を見ても、電話やテレビジョン、電子計算機などは電子工学の応用そのもの、家を出れば電子装置でもって運行制御された電車に乗る。新幹線列車はもとより、ジャンボゼット機にしても電子工学応用装置の寄与する割合が非常に大きくなった、もちろん関連分野の発展が歩調を合せたらばこそ今日の進歩をまねいたのであるが、昔の真空管を用いていた時代からの歴史をふりかえると、材料研究の成果が電子工学の進歩にいかほど大きく寄与したかがわかる。すなわち、新しい材料とその処理技術の開発により、新しい電子素子が生み出され、それに人智を加えて電子装置や応用機器が作られた。新しい材料の開発がなければいかに人智があろうとも電子工学の今日の発展は無かったことになる。

われわれの研究室では、かつては電子放出体材料、ついで固体集積回路を旨とする薄膜の研究を行っていたが、今から6年前に大きく方向転換を行った。当時の予想として、これから電子工学の分野で光が大きくとり入れられるのではなからうか、たとえば、発光ダイオードなどの固体発光素子、テレビジョンなどの画像表示装置の固体パネル化、1つの結晶面上で発光させて光ビームを作り、それを変向変調して現在の集積回路と同じようなことをする光集積回路、それに光による通信、光エネルギーの電気エネルギーへの変換などが考えられた。これら光電相互変換に都合のよい材料として取り上げられるのが化合物半導体である。これらの研究を行うにしてもいろいろの角度からの方法がある。発光素子や受光素子を作るのも1つの方法である。しかし、この方向はわれわれの研究室のよ

うな貧乏世帯で、しかも1からはじめるところでは到底なしえない。それで残された道、光を用いて化合物半導体の物性をさぐるのではないかと、ということでスタートした。幸いスタッフ一同の寝食を忘れ、汗みどろの努力がつづき、かつ大学院学生等の協力があって、現在は下記のような研究を行っている。ここにスタッフとは、浜口智尋、白川二、森谷明弘、山田正良の諸氏である。

### 1. 変調分光法による半導体物性の研究

結晶の光学的な特性は一般に屈折率と吸収係数とでもって表わされる。しかし、結晶に外からその平衡状態を乱すような作用を加えると光学定数に変化がおこる。たとえば、 $10^3$  V/cm程度以上の強い電界を加えると、わずかではあるが光学定数が変化し、光の反射率 $R$ に $\Delta R$ なる変化の起る現象が認められる。印加電界、分光波長、 $\Delta R/R$ のあいだの関係を測定し、その結晶の電子帯構造や物性定数を調べる方法があって、これを electro-reflectance 電界変調分光とよんでいる。このほか、結晶の温度を変調して行う温度変調分光、圧力をかけて行う圧力変調分光、ピエゾ効果を利用するピエゾ変調分光、磁界をかけて行う磁界変調分光その他がある。われわれの研究室においてはこれら方法を用いて化合物半導体の物性研究を実施している。ただし、 $\Delta R/R$ は $10^{-3}$ あるいはこれ以下の値であるため、反射光の強さをあらかず直流成分中にかくされている微弱な変調成分を検出しなければならない。このため測定系には特別の考慮を払わなければならない。われわれの研究室では図1に示すような測定系を開発して用いている。これは電解液法といわれる場合の例であるが、半導体結晶を電解液中に浸し、電解液に対して半導体に直流バイアス電圧と周波数 $f_1$ の変調電圧をかけると、半導体の表面電界

\* 中井順吉 (Junkichi NAKAI), 大阪大学, 工学部, 電子工学科教授, 工学博士, 固体電子工学

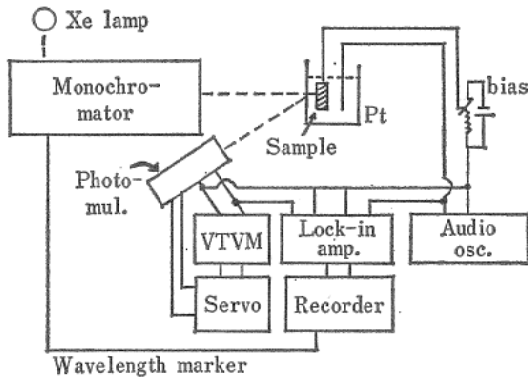


図1 エレクトロレフレクタンス測定系 (電解液法)

はこれに応じて変化する。この表面に周波数  $f_2$  でチョップした分光した一定波長の光をあて、反射光を光電子増倍管でうける。光を周波数  $f_2$  でチョップするのは光の強さ測定を容易にするために、交流増巾を行うためである。光電子増倍管の出力を電子管式電圧計 (VTVM) で測定し、この出力がある一定値になるように帰還回路を介して光電子増倍管の陽極電圧を制御する。このとき、半導体表面電界が周波数  $f_1$  でもって変調されているので、反射光の中に周波数  $f_1$  または  $2f_1$  の変調成分が含まれる。変調成分周波数が  $2f_1$  になるのは表面電界が零の両側正負にわたって振られる場合、 $f_1$  になるのは直流バイアス電圧が大きくて変調電圧を加えても、つねに表面電界が正または負のいずれかの領域にある場合である。この変調成分出力をロックイン増巾器に入れ、周波数  $f_1$  または  $2f_1$  を参照周波数として、このような周波数成分の出力を測定すると、直流出力は一定とされているからロックイン増巾器の出力は  $\Delta R/R$  に比例したものとなる。

たとえば GaAs の電界変調分光の結果を引用すると図2のごとくである。分光した光の光子エネルギーと  $\Delta R/R$  との関係を示したもので、光学遷移の強くおこるところ、俗に吸収係数に変化が認められる光波長のところにおいて  $\Delta R/R$  はピークをもっている。図中の  $E_0$  は基礎吸収端に相当し、 $E_1$  その他は光子エネルギーが大きいときにおける帯端というものを示している。 $\Delta$  はスピン軌道分裂を示すものである。このようにして帯端のエネルギーが精密に測定されるばかりでなく、波型から帯端の

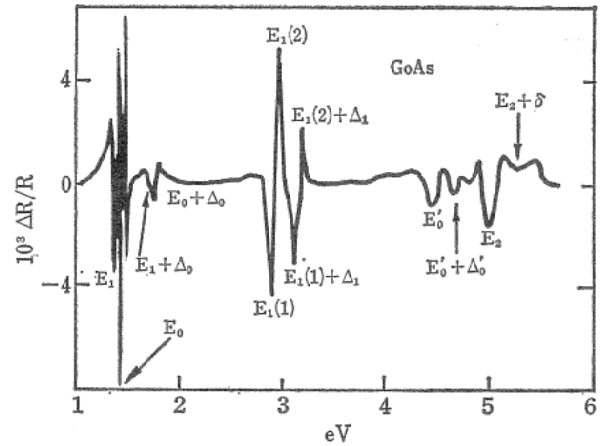


図2 GaAs のエレクトロレフレクタンス測定結果の例

型も判定される。われわれの研究室においては、遠赤外光検知用材料として知られている。Cd<sub>x</sub>Hg<sub>(1-x)</sub>Te の混晶比  $x$  に対し、帯端エネルギーがどのように変化するかの研究を行った。この研究を行うため種々の  $x$  の値をもった結晶の育成も実施した。CdTe は禁止帯巾が約 1.5 eV の半導体、HgTe は禁止帯巾が負の金属性導電をもった材料である。 $x$  の異なった結晶を作ることにより、禁止帯巾が両極端の場合の中間の値をもったものを得ることができる。とくに、炭酸ガス レーザの光波長に対して最大感度をもつ混晶が目ざされている材料である。

また、層状半導体 GaSe についても電界変調分光 光導電などをしらべて物性研究を実施した。通常半導体としては、Ge, Si のほか、Ⅲ-V 族 Ⅱ-VI 族化合物半導体が知られているが、この GaSe はⅢ-VI 族化合物半導体で、層状構造をしていて、雲母のように薄く剥がされる。これは Se 層—Ga 層—Ga 層—Se 層の四層構造のものが 1 つの基本層を作り、これがさらに積重なって大きな結晶を形成している。基本層内はイオン性結合力があって原子間は結ばれているが、基本層相互間はファンデアワールス結合であるため、容易にここで剥がすことが出来、劈開面は雲母を劈開した場合におけるような平坦な広面積のものがえられる。このような構造上の問題のほか、電気特性 光学特性が基本層の面に沿う方向と垂直な方向とで異なり、二次元的結晶の性質も含まれる物理的にも興味

のある材料である。

## 2. 光学的手段による MIS 界面の研究

現在一般に市販されているトランジスタは1つの Ge または Se の単結晶の中に P 型と N 型の部分を作り、荷電粒子としての正の電荷をもった正孔と負の電荷をもった電子の振舞いを利用したもので、両極性型といわれている。これに対し、いずれか一方の荷電粒子の流れを電界により制御する電界効果型の素子の開発が行われた。これにもいろいろの方法があるが、代表的なのは MOS トランジスタである。図3の

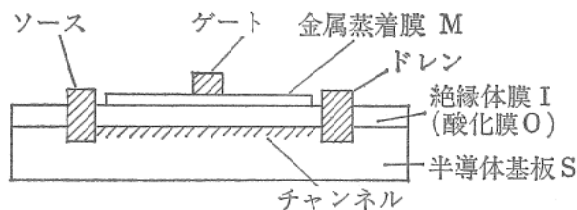


図3 MIS (MOS) トランジスタの構造

ように半導体 S の表面に適当な方法で絶縁体膜 I をつけ、その上に金属電極 M を蒸着した構造をもつ。これは MIS 型であるが、とくに I として酸化膜 O を用いた場合は MOS 型といわれる。図3のような電極 ソース ドレン ゲートをつけ、適当な電圧をかけると、S と I との界面に S とは異なった型の電流を通す通路チャンネルを生じて電流がソースとドレン間に流れる。この電流の値をゲート電極電圧で制御するものである。この場合における本質的な物理現象は、ゲート電圧により半導体 S と絶縁体 I との界面の電気特性がどのようになるかであり、従来は電気特性の導電度 静電容量の測定などによる研究が主として行なわれてきたが、われわれの研究室においては、光を用いた手段による研究を実施している。

ゲート電極に電圧をかけると S I 界面の面に垂直な方向の電界が変化する。ここに電界変調分光法を適用し、界面電子帯構造の解明を実施している。また、光をあてると表面光起電力が発生し、その大きさと分光波長特性は界面電子帯構造 ゲート電圧による電界の影響により定まるので、表面光起電力の分光波長特性の測定を通じて、界面物性に関する情報を得てい

る。これら方法による測定結果は、半導体中に含まれる不純物の種類および濃度による影響をうけるので、光を細く収束し、半導体結晶表面を走査して測定を行えば、不純物の表面分布を知ることができる。1つの応用例として開発中である。

発光の光源を固体素子化し、発光ダイオードによる情報等の表示、テレビ受像管をパネル化した固体装置で実現すること等が研究テーマとして取り上げられているが、これらに用いる化合物半導体素子はその表面状況により寿命が大きく左右されるので、保護膜により表面を覆う必要がある。しかし、その結果として電気特性や光学特性を損うようではならない。上記の一連の研究もこの点に関する情報をうるためのものである。

## 3. 赤外光検知用半導体材料の物性

光による通信 暗夜における視界認識 物体の温度分布の測定 人体の体温分布の測定からガン部位の発見など、赤外光の応用はひろがりつつある。これら応用面の開発にあたってのキポイントは赤外光検知の方法である。それには価電子帯と伝導帯間のギャップのせまい微小バンドギャップ半導体が用いられる。これら材料の物性をしらべることがわれわれ研究室の目的の1つである。その手段の1つとして磁気フォノン共鳴に関する研究も行っている。

半導体に電界を加えたとき流れる電流の大きさは何によって定まるか。電気伝導が電子により行なわれるとすると、電子の密度と電子の流れを阻害する作用により定まる。この後者を支配する因子はかずかずあるが、その1つは格子点にある原子の振動である。この振動を多くの単純な波の合成されたものと考え、光の波の場合と同様に、各々の波について量子を対応させ、それを音響量子 フォノンという。一方、半導体を強磁界中におくと電子は磁界の影響を受け、電子のとりうるエネルギー準位は分裂し、磁界の強さ等で定まる一定エネルギー間隔をもったランダウ準位にわかれる。2つのランダウ準位間のエネルギー差が、縦型の格子振動で光量子エネルギーに相等する程度のエネルギーをもった音響量子、いわゆる LO フォノン

(縦型光学フォノン)のエネルギーに等しくなったところで、電子はLOフォノンの吸収放出を伴う共鳴非弾性散乱を受ける。これを磁気フォノン共鳴と称し、固体中の電子や正孔の輸送現象を特徴づけるパラメータ、たとえば磁気抵抗やホール電圧等が磁界の強さの逆数に比例した周期で振動的に変化する現象として観測される。これらは伝導電子の有効質量、電子帯構造の異状、ポーロン効果、ホットエレクトロン効果に関する研究に応用される。

われわれの研究室においては微小バンドギャップ半導体の1つのInSbについて横磁気抵抗、すなわち印加磁界に垂直な方向における抵抗率変化の磁界依存性をしらべ、磁界の強さの逆数に対する周期的な変化を観測した。しかし抵抗率変化の割合は微小であるため、通常の方法では測定結果に明確さを欠く。それで次の方法を開発した。半導体の導電率はわずかではあるが電界依存性を持ち、その変化分は電界の2乗に比例する。この比例係数をウォーム・エレクトロン係数 $\beta$ という。ウォームとは電界により電子のエネルギーが増加し、あたかも温度が上がったかのようなことから称せられている。この $\beta$ についても磁気フォノン共鳴効果の影響がある。この場合においても磁界に対しての $\beta$ の関係を測定したのでは単調な変化が認められるだけであって、小さな周期的変化はマスクされてほとんど認め難い。そこで図4の回路を考案

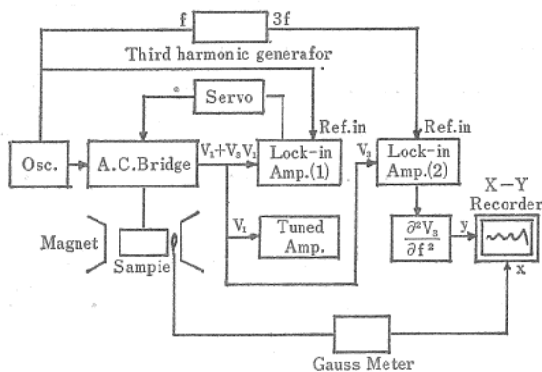


図4 ウォーム・エレクトロン係数 $\beta$ の磁界依存性を測定するための測定系

した。試料に正弦波電流を流すと、試料が非線形導電率をもつため、試料両端には高調波成分をもった電圧が発生する。第3高調波は $\beta$ を反

映するものとなるので、 $\beta$ の磁界依存性をしらべようとするものである。この場合でも単に直接測定したのでは、周期的変化分は全体の信号の中に埋まり、その様子を知ることは困難である。それで周期的変化分のみを明瞭に表わすため、2階微分を行なわせる。ブリッジ出力端子電圧の基本波成分についてはロックイン増巾器(1)で検出し、それをブリッジに帰還して出力が常に0になるように、すなわち基本波成分については常にブリッジが平衡であるようにする。そして第3高調波成分についてはロックイン増巾器(2)でもって検出増巾し、演算増巾器を利用して磁界Bに対する2階微分を行い、 $\partial^2\beta/\partial B^2$ を求め、その結果をレコーダにプロットさせたのが図5である。

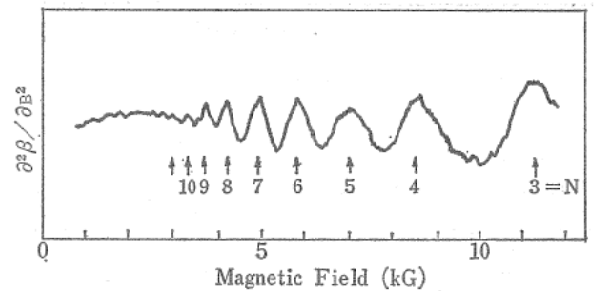


図5 ウォーム・エレクトロン係数 $\beta$ の磁界Bに対する2階微分の磁界Bに対する関係 (InSb: 電子密度  $1.0 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ , 移動度  $5.7 \times 10^5 \text{cm}^2/\text{Vs}$ , 温度77K)

これはInSbについて77Kにおいて測定した例である。現在所有している超電導マグネットを用いれば50KGの磁界まで測定できるが、この例の場合は電磁石を用いて行ったので、12KGまでしか測定していない。Nの数字は最近接ランダウ準位間のエネルギー差の何倍のエネルギー差をもった2つのランダウ準位間の遷移が関係しているかを示したものである。

このような物性研究のほか、 $\text{Pb}_x\text{Sn}_{(1-x)}\text{Te}$ の結晶の育成も行っている。PbTeの禁止帯巾は常温において約0.3eV、SnTeと混晶を作ればこの値以下の小さな禁止帯巾をもったものがえられ、また、誘電率が異常に大きいこと、強誘電的相転移を起す可能性があることなどに興味がある。

4. アクースト オプト エレクトロニクス  
(音響光電子工学)

常温の空気中における音波の伝播速度は 300 m/s, 固体中ではこれよりも速く, (1.5~12)  $\times 10^3$  m/s になる. しかし, これでも電磁波の伝播速度  $3 \times 10^8$  m/s に比べれば  $10^5$  倍おそい. すなわち, 同じ周波数においては波長は音波の方が 15<sup>5</sup> 分の 1 に短縮されるということである. この音波と電子・音波と光の相互作用を研究し, エレクトロニクスに役立てようとするものである.

CdS, GaAs, ZnO などの圧電半導体に高電界を加えると, 結晶内に超音波を生じ, 波は陰極側から陽極側へ向って走る. この高密度音響ドメインのところに光をあてると, フォノン(音響量子)と光子(光量子)の相互作用のため光は散乱される. フォノンには格子の振動形態によって音響フォノンと光学フォノンがあるが, エネルギーの小さい方の振動数の小さいフォノン, いわゆる音響フォノンによる散乱がブリルアン散乱である.

われわれの研究室における仕事の 1 例を示すと, 図 6 のように, CdS 結晶にパルス電圧を加

えて高密度音響ドメインを走らせ, He-Ne レーザー光をあて, 散乱光を光電子増倍管にうけて散乱光の角度分布を測定し, 理論解析を行って, 散乱光の波長変化や散乱に関与したフォノンのエネルギーなどの解析等を行っている. 散乱光の波長変化についてはファブリー-ペロー干渉計を用いても測定している. このほか, 結晶に印加するパルス電圧に同期してクセノンランプを発光させ, 分光器を通して単色光としたものを結晶にあて, 光をあてる位置や同期時間のずれ等より音響光学に関する定数も求めている.

このブリルアン散乱は結晶の基礎吸収端近傍の波長の光に対して異常を示す. これを共鳴ブリルアン散乱というが, 入射光の吸収による正孔または電子の励起・音響フォノンによる Deformation Potential 散乱・再結合による発光のプロセスを考え, とくに結晶の価電子帯構造を反映する音響フォノンによる Deformation Potential に注目して研究を進めている. これらの研究は CdS のような圧電活性な半導体について可能であるが, われわれは圧電不活性な半導体についても音響ドメインを打込み, 同様の測定から音響物性を求めることなども行っている.

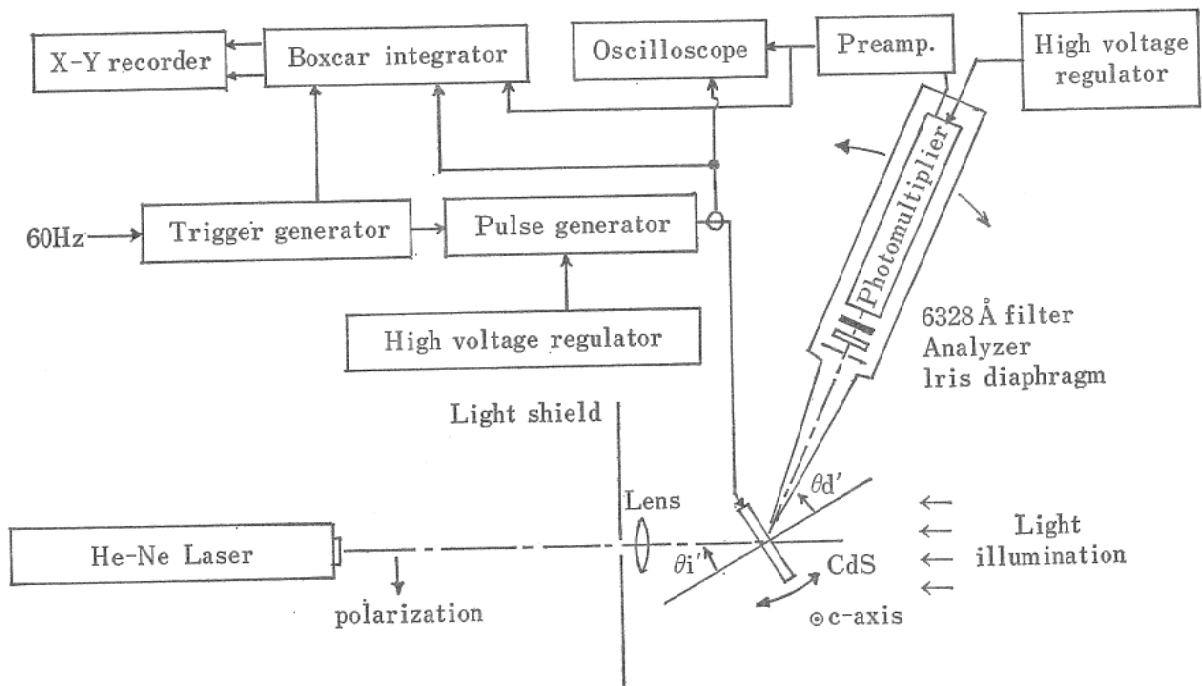


図 6 音響ドメインによるブリルアン散乱の測定系

以上のことは結晶内部における音響光学的問題であるが、光の変向変調の点よりすれば弾性表面波に興味もたれる。2つの楕をかみ合せたような形状の電極を圧電活性な結晶表面に蒸着し、電極間に高電圧を加えると弾性波が表面を伝播する。このタイプであると、結晶表面に適当に電極を配列して弾性波の発生と検出を可能とし、また結晶表面を処理することにより弾性波に指向性を与え、変向させることも可能で、導波管 方向性結合器 フィルタなどマイクロ波技術に対応するものが作られる。この結晶表面に沿って光ビームを通し、弾性波と光との相互作用を用いて光の変向や変調ができ、光集積回路への応用が取り上げられている。とくに物理現象としても興味のあるのはコンポルー

ション たたき込み積分である。われわれの研究室においても研究を行っている。結晶表面に相向き合って表面波発生用の電極をつけて同じ周波数の表面波を発生させると、中間領域で相互干渉を起す。このとき媒質の非線型特性のため、周波数が2倍の振動が発生する。両側の電極の間にこの2倍の周波数をもった信号をとり出す電極をつけて出力信号をみると、それは両側から来た波の相乗積を電極にそって積分した形の信号となる。このコンポレーションは光をあてることにより増巾され、とくに基礎吸収端 励起子吸収のあるところにおいて増巾度が大きい。この現象は共鳴ブリルアン散乱と関連あるのかどうか、また表面物性 界面物性等との関係について研究を進めている。