



Title	水銀カルコゲナイトとCdx Hg <sub>1-x</sub> Teの光学的性質とエネルギー帯構造に関する研究
Author(s)	森谷, 明弘
Citation	大阪大学, 1972, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/246">https://hdl.handle.net/11094/246</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

水銀カルコゲナイトと  $Cd_xHg_{1-x}Te$  の  
光学的性質とエネルギー帯構造に関する研究

昭和 47 年 3 月

森谷 明弘

# 内 容 梗 概

## 第 1 章 序 論

水銀カルコゲナイトは水銀元素と周期律表のVIb族元素との化合物  $HgTe$  ,  $HgSe$  ,  $HgS$  を総称したものである。このうち  $HgS$  についてはその結晶性に問題がありあまり研究されていない。本論文でも  $HgS$  は除外し、以下  $HgTe$  と  $HgSe$  を水銀カルコゲナイトと呼び、これらを研究の対象として取扱う。本章では、この水銀カルコゲナイトおよび  $HgTe$  と  $CdTe$  の混晶である  $Cd_xHg_{1-x}Te$  に関する研究と応用の現状を述べるとともに、本論文がこの分野において占める位置を明らかにしている。また本論文で主要な位置を占めるエレクトロ・レフレクタンスの研究状況についても述べ、それがエネルギー帯構造の解明に、いかに寄与してきたかを明らかにしている。最後に本研究を始めた動機を明らかにして、その具体的な目的を述べている。

## 第 2 章 水銀カルコゲナイトと $Cd_xHg_{1-x}Te$ の結晶製作

本章では以下の各章で述べる実験の試料として使用した  $HgTe$  ,  $HgSe$  ,  $CdTe$  および  $Cd_xHg_{1-x}Te$  の結晶製作について述べている。製作方法はいずれも縦型ブリッヂマン法を用いた。これらの結晶製作で問題になるのは融点近傍における未反応な水銀の蒸気圧が非常に高く、とくに  $Cd_xHg_{1-x}Te$  の  $x$  の大きい領域では封入石英管の耐圧以上になってしまふことである。(図・1) この点

に留意して対策を講じ、二重封入法などを用いて結晶製作を行った。(図・2)

### 第 3 章 HgTe と HgSe の光学定数

著者の知る限りでは HgTe と HgSe の光学定数についての報告は 静誘電率  $\epsilon_0$  に関するものを除いてはこれまでなされていない。これを フォトンエネルギーの関数として 偏光解析法を用いて求めることが本章の目的である。

HgTe については、1.7 eV ~ 3.5 eV の フォトンエネルギー領域で測定し、消衰係数  $k$  のスペクトルに  $E_1 (A_{4,5} - A_6)$  と  $E_1 + A_1 (A_6 - A_5)$  の構造に対応するピークを 2.18 eV と 2.80 eV に認めた。また反射率を測定して、偏光解析より得られた光学定数を用いて計算した反射スペクトルと比較を行い、良い一致を得た。HgSe についても HgTe と同様の実験・検討を行い、2.0 eV ~ 3.5 eV の フォトン・エネルギー領域で光学定数を求めた。HgSe においてはスピノー軌道分裂  $A_1$  の値が小さいので  $E_1 + A_1$  の値が分解されにくいが、本実験においては、 $E_1 = 2.90$  eV,  $E_1 + A_1 = 3.15$  eV に二つのピークが認められ、この値は、反射測定やエレクトロレフレクタンスより得られた結果とほぼ一致した。また HgTe と HgSe の表面に水銀酸化物が存在すると仮定して、酸化膜補正を行い、表面酸化膜の影響を検討した。

### 第 4 章 HgTe と HgSe のエレクトロレフレクタンス

本章ではエレクトロレフレクタンスに関する理論の概略を述べ、帯間遷移と誘電率および電場による誘電率の変化とエレクトロレフレクタンスの関係などを明らかにした。また HgTe と HgSe のエレクトロレフレクタンスを電解液法で測定し、バンド・パラメータ  $E_1$ ,  $E_1 + A_1$ ,  $E'_6$ ,  $E_2$ ,  $E_2 + \delta$  の値を求めるとともに、 $E_1 (A_{4,5} - A_6)$  帯端近傍で Kramers-Kroning 変換を行い、その帯端の

型などについて論じた。またコンデンサ法を用いて、低温でエレクトロレフレクタンスの実験を行い、より微細な構造を得、低温における  $E_1$  と  $E_1 + A_1$  の値を求めた。

## 第 5 章 $Cd_xHg_{1-x}Te$ のエレクトロレフレクタンス

本章では  $Cd_xHg_{1-x}Te$  の  $0.45 \sim 6$  eV の範囲におけるエレクトロレフレクタンスを電解液法で測定し、バンドパラメータ  $E_0 + A_0$ ,  $E_1$ ,  $E_1 + A_1$ ,  $E'_0$ ,  $E_2$ ,  $E_2 + \delta$  の混晶比依存性を求めた。そして、まだ実験的に求められていない  $HgTe$  のスピン軌道分裂  $A_0$  の信号を観測し、混晶比依存性および  $\Gamma_6$ ,  $\Gamma_8$  のバンドの反転より、この信号が  $A_0$  に起因するものであることを確認した。また混晶比依存性から  $CdTe$  の  $E_2$  および  $E_2 + \delta$  の値を見積った。これらバンド・パラメータの混晶比依存性について dielectric two band method を用いた計算結果と実験値を比較し、周期律表の第 5 列の covalent bond radius が第 4 列のそれより 8 % 大きく見積るべきであるとの提案を行った。

最後に工学的応用として、得られた混晶比と  $E_1$  との関係より非破壊的に  $Cd_xHg_{1-x}Te$  の混晶比  $x$  を決定する方法について簡単に述べた。

## 第 6 章 結論

第 2 章から第 5 章までの研究結果を総括して、本研究の結論を述べている。

# 目 次

第 1 章 序 論 .....	1
1・1 水銀カルコゲナイトと $Cd_xHg_{1-x}Te$ に関する研究と応用の現状 .....	1
1・2 エレクトロフレクタンスとエネルギー帯構造 .....	3
1・3 本論文の目的 .....	4
第 2 章 水銀カルコゲナイトと $Cd_xHg_{1-x}Te$ の結晶製作 .....	9
2・1 緒言 .....	9
2・2 $HgTe$ , $HgSe$ , $CdTe$ の結晶製作 .....	9
2・3 $Cd_xHg_{1-x}Te$ の結晶製作 .....	14
2・4 結言 .....	16
参 考 文 献 .....	17
第 3 章 $HgTe$ と $HgSe$ の光学定数 .....	19
3・1 緒言 .....	19
3・2 偏光解析法 .....	20
3・2・1 吸収体表面での反射 .....	20
3・2・2 偏光解析法の原理 .....	22
3・3 実験装置および方法 .....	25
3・3・1 実験装置 .....	25
3・3・2 測定方法 .....	26
3・4 実験結果と検討 .....	29
3・4・1 光学定数 $n$ , $k$ .....	29
3・4・2 Kramers-Kronig 変換 .....	31

3・4・3 反射率および誘電率 .....	33
3・5 表面酸化膜が存在する場合の補正 .....	33
3・5・1 表面酸化膜が存在する場合の理論 .....	36
3・5・2 基板の光学定数の計算方法と結果 .....	38
3・6 結言 .....	40
参考文献 .....	41
<b>第4章 HgTeとHgSeのエレクトロフレクタンス .....</b>	<b>43</b>
4・1 緒言 .....	43
4・2 エレクトロフレクタンスに関する理論の概略 .....	43
4・2・1 誘電率とエネルギー帯間遷移 .....	45
4・2・2 電場による誘電率の変化と $\Delta R/R$ .....	47
4・3 実験装置および方法 .....	50
4・4 実験結果と検討 .....	53
4・4・1 HgTeのエレクトロフレクタンス .....	53
4・4・2 HgSeのエレクトロフレクタンス .....	59
4・5 結言 .....	62
参考文献 .....	63
<b>第5章 Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Teのエレクトロフレクタンス .....</b>	<b>65</b>
5・1 緒言 .....	65
5・2 実験装置および方法 .....	66
5・3 実験結果 .....	67
5・3・1 エレクトロフレクタンス・スペクトル .....	67
5・3・2 E <sub>0</sub> +Δ <sub>0</sub> および Δ <sub>0</sub> .....	73
5・3・3 E <sub>1</sub> および E <sub>1</sub> +Δ <sub>1</sub> .....	75
5・3・4 E <sub>0</sub> ' および E <sub>2</sub> +Δ .....	75

5・4 検討	80
5・4・1 エネルギーギャップの混晶比依存性	80
5・4・2 $\Gamma_7 - \Gamma_8$ ( $A_0$ ) 近傍のエレクトロレクタンス・スペクトル	85
5・5 結 言	86
参考文献	88
第6章 結論	90
謝 辞	93

## 第 1 章 序 論

### 1・1 水銀カルコゲナイトと $Cd_xHg_{1-x}Te$ に関する研究と応用の現状

水銀カルコゲナイトは水銀元素と周期律表のVI<sub>b</sub>族元素との化合物であるHgTe HgSe HgS を総称したものである。このうち HgSについては、その結晶性に問題があり、ほとんど研究がなされていない。本論文でも HgSは除外し、以下 HgTeと HgSeを水銀カルコゲナイトと呼び、これらを研究の対象として取扱う。

水銀カルコゲナイトが固体物性の研究対象として現われたのは、1950年代の終りからで、その研究の流れをみると、光物性と電気的（磁気的）性質の研究に大別できる。電気的には、その半金属的性質のために、Ge や Si, III-V 族半導体、CdSやZnTeなどの禁止帯巾の広いII-VI族化合物半導体などとは、しばしば区別されてきた。1960年代の初期には Lawson 達<sup>(1)</sup>やGiriat<sup>(2)</sup>によって水銀カルコゲナイト結晶が製作され、その電気的性質が明らかにされ始めたが、なかでも Harman 達<sup>(3)~(6)</sup>の実験は Groves と Paul<sup>(7)</sup>が提唱した  $\alpha$ -Sn のモデルにもとづいた水銀カルコゲナイトのエネルギー帯構造を実験的に確かめたという点で画期的なものであった。これが今日の  $Cd_xHg_{1-x}Te$  の研究を隆盛に導いたといつても過言ではない。すなわち、この実験より、水銀カルコゲナイトは負の禁止帯巾を持ち、しかも伝導帯の底よりも価電子帯の頂上の方が上にある半金属であることが立証された。この事実は、たとえば、HgTe と正の禁止帯巾をもち、格子定数のあまり違わない、同じII-VI族の半導体である CdTeとの混晶を作ることにより零禁止帯巾をもつ物質を実現できるという非常に興味ある問題を提起した。1967年9月のII-VI族半導体国際会議には理論的実験的にこの問題が多く採り上げられたし、最近では1970年3月に

極小禁止帯巾をもつ半導体に関する会議が催され多くの議論を呼んでいる。

一方光学的には、水銀カルコゲナイトはII-VI族半導体であり、GaAs, InSbなどのIII-V族半導体や禁止帯巾の広いZnTeやCdTeなどのII-VI族化合物と同じ結晶構造すなわち閃亜鉛鉱型結晶構造をしており、これらの半導体と同じように取扱われてきた。Cardona達<sup>(8)~(10)</sup>の一連の実験やScoulerとWright<sup>(11)</sup>の反射測定などは、 $k-p$ 法<sup>(12)(13)</sup>、Pseudopotential法<sup>(14)(15)</sup>などを使った理論計算と相まって、エネルギー帯構造の解明に大きな進歩をもたらしてきた。

上述のような観点にたって、本研究を位置づけるならば、それはこの光学的分野での研究の延長として、後述の光電場効果の実験を行うことによってより精密な電子帯構造の決定に寄与するとともに、光学的測定の中で、電気的な分野より求められたエネルギー帯構造の特異性（バンドの反転）の影響を追究していると言える。

ところで応用面から見ると、現在のところでは、水銀カルコゲナイトについては、ホール素子やEttinghausen効果を利用した冷凍器などが試作されているが、まだ基礎的な物性の域を出ないのでに対して、 $Cd_xHg_{1-x}Te$ は赤外検知器として市販されるまでになっている。上述のごとく $Cd_xHg_{1-x}Te$ は混晶比（モル比） $x$ を0から1に増加させるにしたがって、禁止帯巾を0から1.5eV（室温）まで変化させることができるために、任意の所望波長に最大応答感度を有する赤外検知器として使用可能で、とくに炭酸ガスレーザ用検知器<sup>(18)(19)</sup>としての有用性と性能が期待される。また従来の半導体検知器は不純物準位を利用していているため高温では使用できず、応答速度も遅いという欠点があるのに対して $Cd_xHg_{1-x}Te$ では価電子帯から伝導帯への直接遷移を利用しているために、これらの欠点が克服できるという大きな特長を持っている。また混晶比 $x$ が連

続的に変化している一つの結晶を作ることにより太陽光エネルギーを効率良く  
変換する太陽電池として応用されている<sup>(20)</sup>

## 1・2 エレクトロレフレクタンスとエネルギー帯構造

1945年のトランジスタ誕生以来、ほとんどすべての半導体素子の研究開発が、本質的に、固体のエネルギー帯構造に関する研究から出発していることを考えても、エネルギー帯構造の研究がいかに重要であるかが分る。

この固体のエネルギー帯構造を調べる実験手段として吸収係数や反射率の測定など、いろいろなものが用いられてきたが、優れた測定器の開発のもとに、飛躍的に精度を向上させる実験手段として現われたのが、微分変調法<sup>(21)</sup>である。<sup>(10)(22)～(24)</sup>微分変調法には、従来の吸収係数や反射率などを電場と変調する光電場効果<sup>(エレクトロアブソーピション、エレクトロレフレクタンス)</sup>、圧力を用いるピエゾ・オプティカル効果<sup>(25)(26)</sup>、<sup>(27)(28)</sup>温度を変調するサーモ・オプティカル効果、<sup>(29)</sup>磁場で変調するマグネトオプティカル効果、<sup>(30)</sup>さらに、直接試料に照射する光の波長を変調する波長変調効果<sup>(31)</sup>またこれらのパラメータを組合せたマグネト・エレクトロ・オプティカル効果、<sup>(32)</sup>ピエゾ・エレクトロオプティカル効果などがある。

本論文では、このうち基礎吸収端以上の高エネルギー領域でのエネルギー帯構造を調べる手段として、最も感度がよく、高分解能スペクトルが得られるエレクトロ・レフレクタンスを水銀カルコゲナイトおよび $Cd_xHg_{1-x}Te$ の電子帯構造の研究に適用している。

光電場効果の研究は、1958年Franz<sup>(33)</sup>とKeildysh<sup>(34)</sup>がそれぞれ独自に、電界によって基礎吸収端がみかけ上、低エネルギー側へ移動することを理論的に取扱って以来、今まで理論的にも実験的にも大きな進展をみせてきた。

実験的には, Seraphin<sup>(22)</sup> をはじめとして, Cardona<sup>(10)</sup>, Handler<sup>(23)</sup>, 浜川達<sup>(24)(35)</sup> が試料への電界印加を種々の方法で行い, 微分吸収係数  $d\alpha$  や反射率の変化分  $dR/R$  を測定して精度の高いエネルギー帯構造のパラメータに関するデータを得ている。一方理論的には Tharmalingam<sup>(36)</sup>, Callaway<sup>(37)</sup>, Aspnes<sup>(38)(39)</sup> により基礎吸収端およびそれより高エネルギー側にある帯端近傍における吸収係数の電場による変化が計算され,  $M_0$  型～ $M_3$  型のすべての帯端に拡張された。また光電場効果の実験データを用いて種々の半導体のエネルギー帯構造のより精密な計算がなされている。またエキシトンや不純物準位に関する光電場効果について多くの報告がされている<sup>(40)(41)(42)</sup>。このように光電場効果はエネルギー帯構造の解明に, ひいては固体物理学の進展に大きく寄与しつつある。

### 1・3 本論文の目的

1・1節, 1・2節でも述べたように, 本論文の目的とするところは, 水銀カルコゲナイトおよび  $Cd_xHg_{1-x}Te$  を II-VI 族半導体の延長としてとらえ, それらのエレクトロフレクタンスを測定し, より精密なエネルギー帯構造の決定に寄与することである。とくに  $Cd_xHg_{1-x}Te$  においては, 負のバンドギャップから正のバンドギャップへの変化にともなうエネルギー帯構造の変化に注目しつつ, 実験やその結果の検討を進めた。また応用面ではエレクトロフレクタンスにより非破壊的に混晶比  $x$  を決定する方法について言及する。

第2章では結晶製作について述べる。

第3章では水銀カルコゲナイトの光学定数を偏光解析法により求める。

エレクトロフレクタンスばかりでなく光学的電磁気的解析に必要な水銀カルコゲナイトの光学定数あるいは複素誘電率はこれまで求められていない。これ

を光エネルギーの関数として求め、若干の検討を加える。

第4章では光電場効果の理論の概略を述べる。またHgTeとHgSeのエレクトロレフレクタンスを、とくに低温で測定した結果について述べる。

第5章では $Cd_xHg_{1-x}Te$ のエレクトロレフレクタンスを測定し、 $x$ の変化とともに各帯端のエネルギー値の変化の様子を求め検討を加える。

## 第 1 章 参 考 文 献

- (1) W.D.Lawson, S.Nielson, E.H.Putley and A.S.Young, 9 (1959)  
325
- (2) W.Giriat, Brit.J.APPL.Phys., 15 (1964) 151
- (3) T.C.Harman, Phys.Rev., 118 (1960) 1541
- (4) T.C.Harman, J.APPL.Phys., 32 (1961) 1800
- (5) T.C.Harman, J.Phys.Chem.Solids, 25 (1964) 931
- (6) T.C.Harman, W.H.Kleiner, A.J.Strauss, G.B.Wright, J.G.  
Mavroides and D.H.Dickey, 2 (1964) 305
- (7) S.Groves and W.Paul, Phys., Rev.Letters 11 (1963) 194
- (8) M.Cardona and D.L.Greenaway, Phys.Rev., 131 (1963) 98
- (9) M.Cardona and G.Harbeke, J.APPL.Phys., 34 (1963) 813
- (10) M.Cardone, K.L.Shaklee and F.H.Pollak, Phys.Rev., 154  
(1967) 696
- (11) W.J.Scouler and G.B.Wright, Phys.Rev., 133 (1964) 736
- (12) F.H.Pollak and M.Cardona, J.Phys.Chem.Solids, 27 (1966)  
423
- (13) F.H.Pollak and M.Cardona, Phys.Rev., 142 (1966) 530
- (14) D.Brust, Phys.Rev., 134 (1964) A1337
- (15) S.Bloom and T.K.Bergstresser, Phys.Status Solidi 42  
(1970) 191
- (16) D.A.Wright, Brit.J.APPL.Phys., 16 (1965) 939
- (17) B.Ray, "II-VI Compounds" (1969) P.252

- (18) P.W.Kruse , *Applied Optics* **5** (1966) 1514
- (19) D.Long and J.L.Schmidt , *Semiconductors and Semimetals* **5** (1970) 175
- (20) G.S.Almasi and A.C.Smith , *J.APPL.Phys.* **39** (1968) 233
- (21) M.Cardona, "Solid State Physics Suppl.11" edited by F.Seitz. D.Turnbull and H.Ehrenreich (1969) Academic Press , New York and London
- (22) B.O.Seraphin and N.Bottka , *Phys.Rev.* **145** (1966) 628
- (23) A.Frova , P.Handler , F.A.Germano and D.E.AsPnes , *Rhys. Rev.* **145** (1966) 575
- (24) Y.Hamakawa , P.Handler and F.A.Germano , *Phys.Rev.* **167** (1967) 709
- (25) W.E.Engeler , H.Fritsche , M.Garfinkel and J.J.Tiemann. *Phys.Rev.Letters* **14** (1968) 1069
- (26) G.W.Gobeli and E.O.Kane , *Phys.Rev.Letters* **15** (1965) 142
- (27) B.Batz , *Solid State Commun.* **5** (1967) 985
- (28) E.Matatagui , A.G.Thompson and M.Cardona , *Phys.Rev.* **176** (1968) 950
- (29) B.Lax , "Physics of Solids in Intense Magnetic Field" edited by E.D.Haidemenakis, Plenum Press , New York (1969)
- (30) K.L.Shaklee , J.E.Rowe and M.Cardona , *Phys.Rev.* **174** (1968) 828
- (31) C.R.Pidgeon and S.H.Groves , "II-VI Semiconducting Compounds" edited by D.G.Thomas , 1967 Intern.Conf.Providence ,

W.A.Benjamin Inc., New York. p1080

- (32) F.H.Pollak, M.Cardona and K.L.Shaklee, Phys.Rev.Letters  
16 (1966) 942
- (33) W.Frang, Z.Naturforsch 130 (1958) 484
- (34) L.V.Keldysh, Zh.Eksperim.Theor.Fiz.34 (1958) 1138
- (35) T.Nishino and Y.Hamakawa, J.Phys.Soc.Japan 26 (1969) 403
- (36) K.Tharmalingam, Phys., Rev. 130 (1963) 2204
- (37) J.Callaway, Phys.Rev. 130 (1963) 549
- (38) D.E.Aspnes, Phys.Rev. 147 (1966) 554
- (39) D.E.Aspnes, Phys.Rev. 153 (1967) 972
- (40) E.Gutsche and H.Lange, Phys.Status Solidi 22 (1967) 229
- (41) R.A.Forman and M.Cardona, "II-VI Semiconducting Compounds"  
edited by D.G.Thomas, 1967 Intern.Conf.Providence. (1967)  
100
- (42) E.W.Williams and V.Rehn, Phys.Rev. 172 (1968) 798

## 第2章 水銀カルコゲナイトおよび $Cd_xHg_{1-x}Te$ の結晶製作

### 2・1 緒言

HgTe と HgSe の結晶製作は、1951年 Regel 達<sup>(1)</sup>の粉末を圧縮、シンターリングして製作したことから始まる。その後 Harman 達<sup>(2)(3)</sup>はブリッヂマン法を用いて HgTe と HgSe の単結晶を得ている。また  $Cd_xHg_{1-x}Te$  混晶については Woolley と Ray<sup>(4)</sup>が HgTe と CdTe 混合物から、Blair と Newnham<sup>(5)</sup>は Cd, Hg, Te から、それぞれ混晶の融点まで温度を上げ、のち、除冷して、混晶を製作している。またこれらの結晶製作に、気相成長法、真空蒸着法など、他のいろいろな製作技術が用いられている。<sup>(6)(7)</sup> 溶液からの成長においては、いずれの場合にも、問題となるのは、結晶の融点近くにおける未反応な水銀の蒸気圧が非常に高いことである。また混晶においては、その均一性である。

この章では、後章の光学的測定に用いる HgTe, HgSe, CdTe,  $Cd_xHg_{1-x}Te$  の結晶製作過程において問題となる水銀蒸気による高圧対策について述べる。なお、基礎吸収端より高エネルギー側の帶間遷移においては、結晶中の電子の濃度や移動度は、遷移エネルギーにほとんど影響しないと考えられるので、他から提供をうけた試料<sup>(8)</sup>を除いては、試料の電気的な性質についてはくわしく調べていない。

### 2・2 HgTe, HgSe, CdTe の結晶製作

いずれの場合にも縦型ブリッヂマン法を用いて結晶製作を行った。原料の Cd, Te, Se は 99.999% の純度のものをまた Hg は 99.9% のものを真空蒸留したものを使用した。

#### (1) HgTe

Hg と Te を等モル比にして、内径 1.0 ~ 1.5 mm の溶融石英管に真空封入する。この管を電気炉に入れ 550°C ~ 600°C において 12 時間以上保つ。この操作は、HgTe の融点 (690°C) 近傍における水銀の蒸気圧が石英管の耐圧限界に近くなり管が爆発する危険性があるので、Hg と Te を充分反応させて、HgTe にすることにより封入管内の圧力を下げるためである。その後炉の温度を HgTe の融点より 50°C 高くあげ、3 ~ 5 時間保ったのち 3 ~ 6 mm/時の速度で封入管を降下させる。

図 2-1, 図 2-2, に Hg-Te 系の状態図を示す。<sup>(9)(10)</sup>

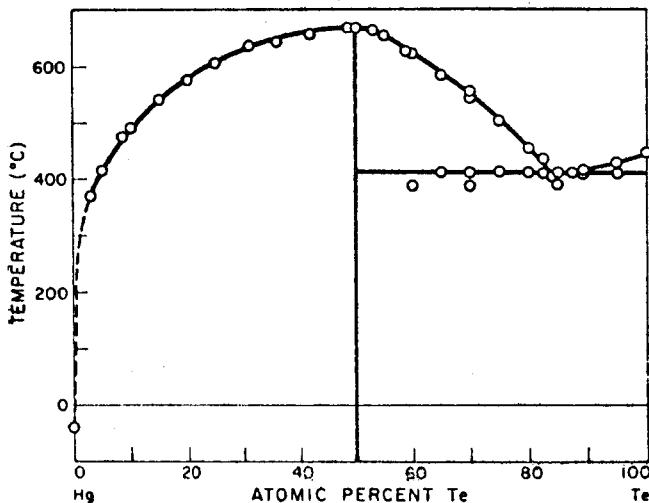


図 2-1 Hg-Te 系状態図 <sup>(9)</sup>

水銀は室温において  $10^{-5}$  mm Hg の蒸気圧をもっており、真空封入の際かなりの水銀が失なわれるので多くの場合 Hg を若干多い目に入れて封入した。

このようにして製作した HgTe からは、大きな劈開面が得られ、これを反射面として使用した光学的測定から、生成結晶が HgTe であると認められた。<sup>(11)</sup>

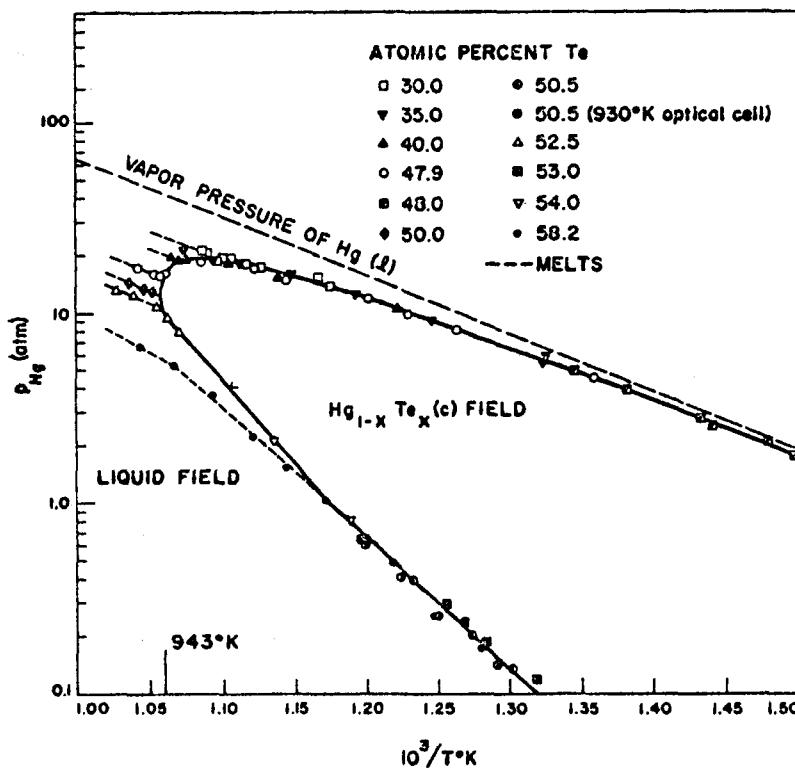


図 2・2 Hg-Te 系液相, 固相, 平衡状態における Hg の分圧 <sup>(10)</sup>

また HgTe と HgSe の場合このような製作方法で得られた結晶で HgTe と HgSe 以外の生成物質が得られたという報告はない。Te を過剰に入れると温度降下速度がかなり遅い場合でも HgTe 結晶内に Te の“まきこみ”が起る。<sup>(12)</sup> そして極端な場合には、結晶の一部または全部が非晶質になる場合がある。

ドープしていない as-grown HgTe は多くの場合 p-型であるが、時として多く補償されて n 型になるようである。ホットプローブ法で測定すると、P 型であってもほとんど n 型に対応する指示が得られるので注意を要する。図 2・3 に as-grown HgTe のホール係数と比抵抗の温度特性を示す。破線は Giriat のもので as-grown HgTe は、図中の破線で囲まれた範囲内に入り、試料によ<sup>(13)</sup>

りかなり差ができる。これは Hg の空孔のためで、水銀蒸気中で熱処理を施すと Hg 空孔が埋められ、再現性の良い特性が得られている。

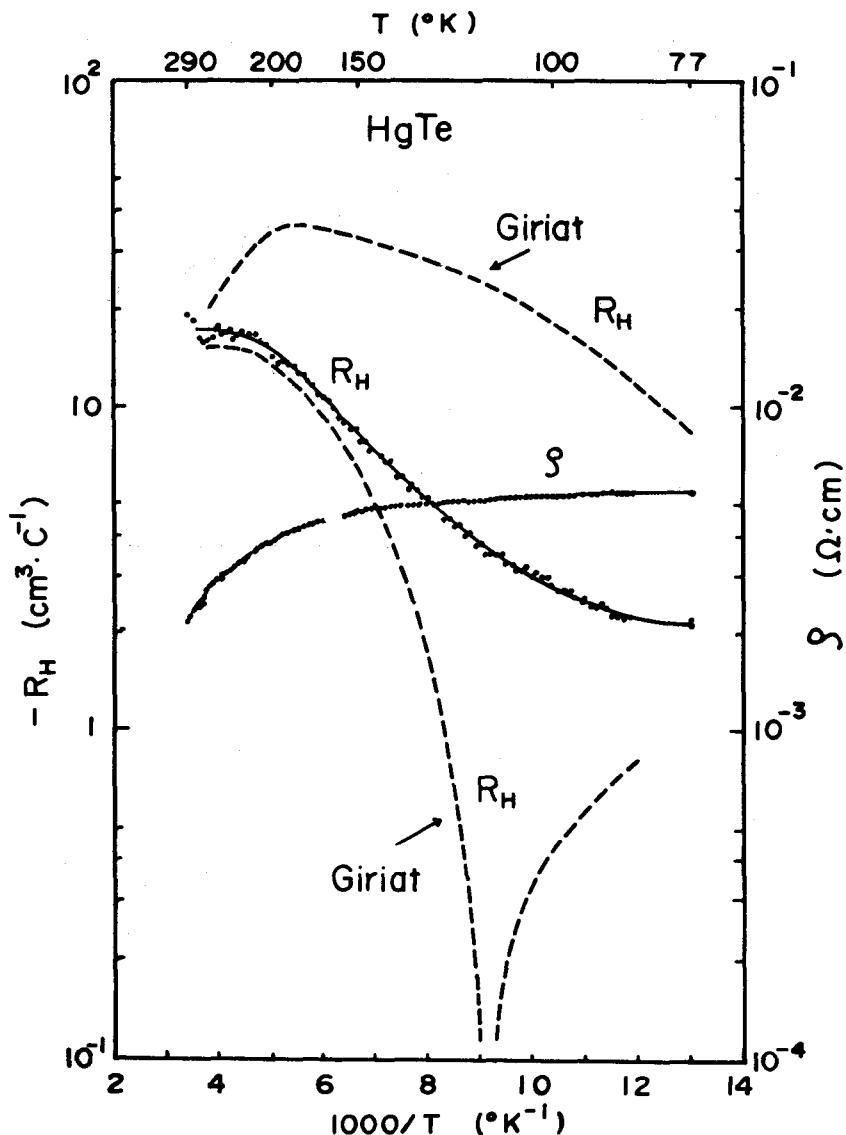


図 2・3 as-grown HgTe のホール係数と比抵抗の温度特性

## (2) HgSe

HgSe は最高温度を  $830^{\circ}\text{C}$  に保ったこと以外は HgTe と全く同じ過程を へて生成された。HgSe は他の多くの II-VI 族半導体と同じように、電荷の自己補償作用<sup>(14)</sup>のために一方の伝導型しかもたず常に n 型である。

## (3) CdTe

CdTe の結晶製作の場合には、水銀カルコゲナイドより蒸気圧は低いが、CdTe の融点 ( $1093^{\circ}\text{C}$ ) が高いため、高温で封入管内の残留酸素と Cd が反応し、Cd の酸化物ができる。これが石英管と反応して石英管が軟化する場合がある。またこれが石英管と反応して附着すると、CdTe の結晶性に影響を与える。これらを防ぐために、石英管を二重にして、内側の管には、メチルアルコールまたはアセトンを熱分解することによりカーボン被膜を施した。このような対策を講じて作った CdTe は非常に大きな劈開面をもち、かなり補償されていて、高比抵抗を示す。そのため CdTe を電解液法によるエレクトロレフレクタンスの実験試料として使用する場合は、In を  $800^{\circ}\text{C}$  で約 20 時間拡散したもの用いた。

図 2・4 に HgTe, HgSe, CdTe の結晶製作中の処理温度の時間的変化の過程の例を示す。

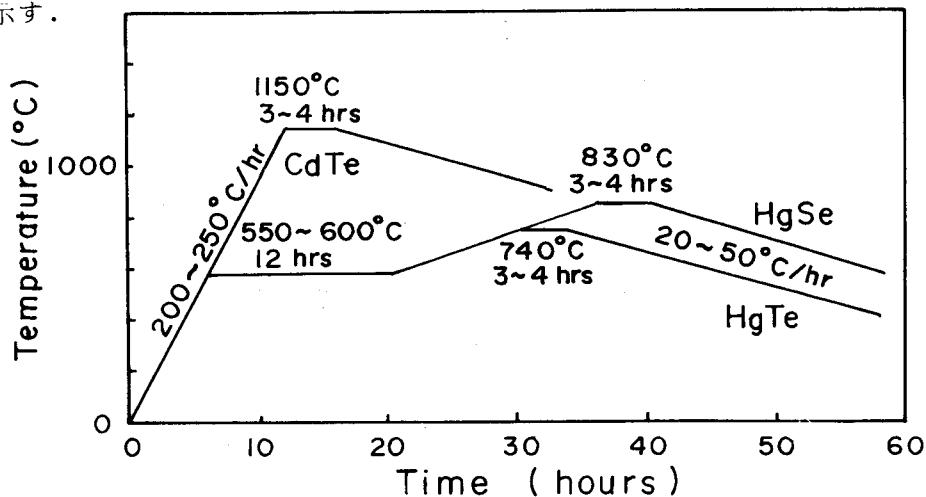


図 2・4 HgTe, HgSe, CdTe の結晶製作時における温度の時間的変化の様子

## 2・3 $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ 混晶の製作

$\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  の製作に関して問題になるのは、未反応水銀の高蒸気圧と、凝固した混晶の不均一性である。製作方法は次のようにある。まずカーボン被膜を施した石英管に  $\text{CdTe}$  と  $\text{HgTe}$  を所望の混晶比（モル比）にまぜて入れ、真空封入した後炉に入れ、炉の温度を  $700\text{ }^\circ\text{C} \sim 750\text{ }^\circ\text{C}$  に約 12 時間保ったのち、徐々に液相線より  $50\text{ }^\circ\text{C}$  高い温度にまであげて 3~4 時間保ち、その後、封入管を  $3\text{ mm/h}$  の速度で降下させた。図 2・5 に Schmit と Speerschneider<sup>(15)</sup> の  $\text{HgTe}-\text{CdTe}$  系の温度対  $x$  の状態図を示す。図の斜線部は液相線と固相線の未確定な範囲を示しているが、本実験では上側の液相線を採用した。

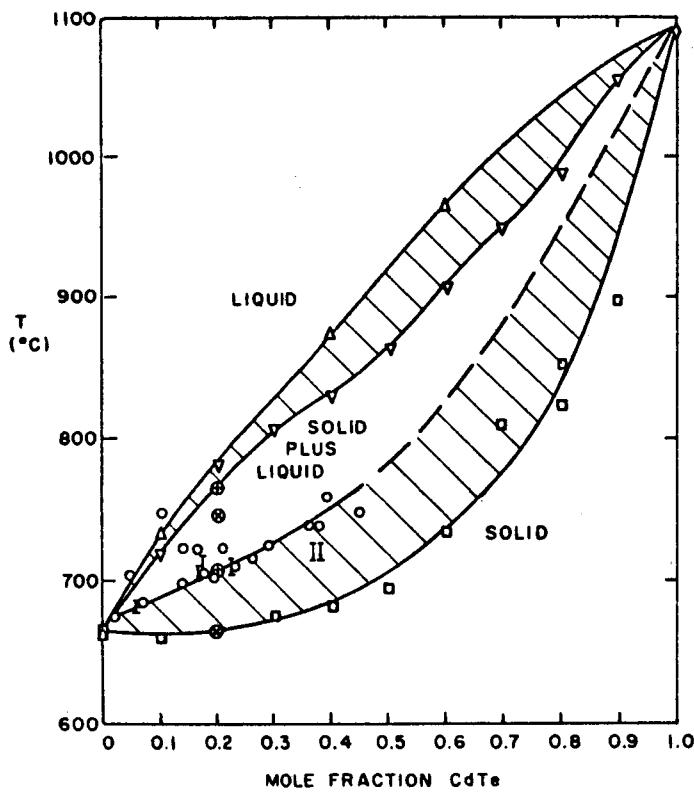


図 2・5  $\text{HgTe}-\text{CdTe}$  系状態図 (15)

$x$  の大きい領域 ( $x = 0.4 \sim 0.8$ ) では、未反応の水銀と  $\text{HgTe}$  の解離圧が

非常に大きくなりしばしば封入管の爆発が起きる。このため封入に用いる溶融石英管として、2～3mmの厚肉管を用いた。

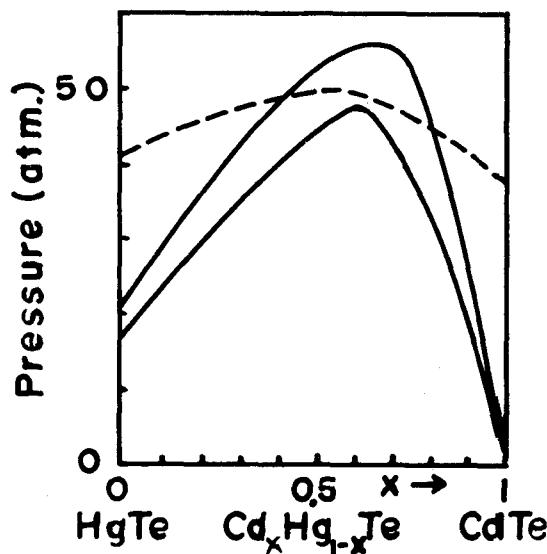
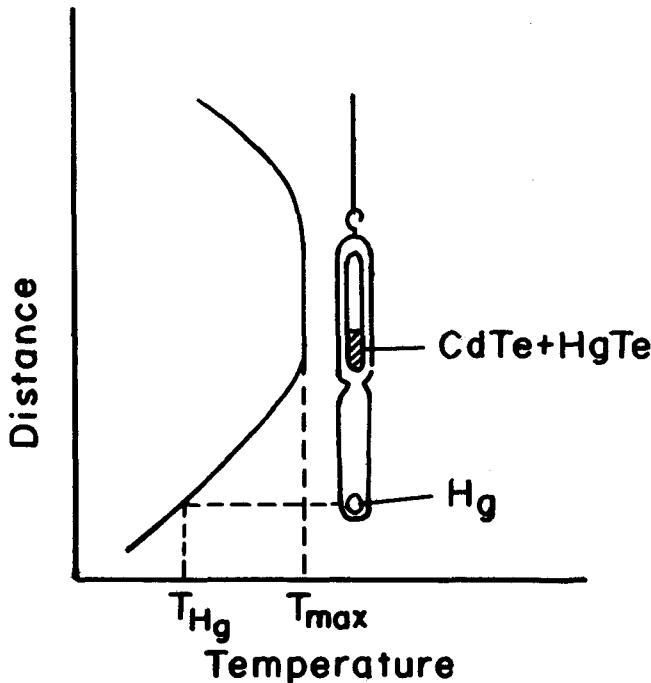


図2・6 封入管内の圧力と石英管の耐圧曲線。上側の実線は液相線より50℃高い温度における圧力、下側の実線は液相線における圧力、破線は石英管の耐圧を表わしている。

力は（外管内部の水銀圧力－大気圧）となり、水銀圧を適当に選べば、内、外管内の圧力を十分耐圧限界以下にすることができる。蒸気圧の問題に関しては上記のように克服でき、ほとんどすべてのxの領域にわたる混晶が得られた。一方混晶の不均一性に関しては、他から提供を受けたもの以外については確認していない。しかしXの小さい領域では、多くの試料および提供を受けた試料の実験値の再現性から考えて、反射面内の不均一性はエレクトロレフレクタン

図2・6に封入管内の圧力と石英管の耐圧とを比較した結果を示す。図からわかるように、 $x \approx 0.7$  近傍で管内の圧力は最高になる。このため、 $x \approx 0.7$  の混晶を作るときには石英管で二重に封入し、外側の石英管と内側の石英管との間に水銀を入れ図2・7に示すごとく炉の低温部まで外管を長く延し、下の水銀溜りの温度  $T_{Hg}$  を適当に定めて水銀の蒸気圧を制御し、内管に圧力を加えて爆発を防いだ。結果的には内管に加る圧力は（内管内部の圧力－外管内部の水銀圧力）、また外管に加る圧



スの信号から  
エネルギー値  
を決定するの  
には無視し得  
る範囲内にあ  
るものと思わ  
れる。しかし  
Xの大きい領  
域では、混晶  
は多結晶で、  
反射表面内で

図2・7 二重封入法による結晶製作。 $T_{Hg}$ を制御することにより内、外封入管に加わる圧力を耐圧限界以内に抑えた。かなり不均一になっている

かもしれない。いずれの場合にも混晶のx値は、反射面を一つの側面とする薄板を切り出し、それを溶かし、混晶に含まれるカドミウム量を測る、いわゆる原子吸光分析法で決定した。不均一(性)が存在する場合には、xの値はその反射面内の平均値を示していることになる。

## 2・4 結言

本章では以下の各章で述べる実験の試料として使用したHgTe, HgSeおよび $Cd_xHg_{1-x}Te$ の結晶製作について述べた。製作方法はいずれも縦型ブリッヂマン法を用い、とくに未反応水銀の高蒸気圧が高いために起る問題を解決するため、二重封入法などを用いて、結晶製作を行なった。

## 第2章 参考文献

- (1) A.I. Blum and A.G. Regel *Zh. Tekhn. Fiz.* **21** (1951) 316
- (2) T.C. Harman, M.J. Logan and H.L. Goering, *J. Phys. Chem. Solids* **7** (1958) 228
- (3) T.C. Harman, *J. Electrochem. Soc.* **106** (1959) 205C
- (4) J.C. Woolley and B. Ray, *J. Phys. Chem. Solids* **13** (1960) 151
- (5) J. Blair and R. Newnham, "Metallurgy of Elemental and Compound Semiconductors" **12** (1961) 393. Wiley Interscience, New York
- (6) O.N. Tufte and E.L. Steizer, *J. Appl. Phys.* **40** (1969) 4559
- (7) N.A. Foss, *J. Appl. Phys.* **39** (1968) 6029
- (8) 富士通研究所.電子デバイス部
- (9) M. Hansen, "Constitution of Binary Alloys" (McGraw-Hill, New York) (1958) 840
- (10) R.F. Brebrick and A.J. Strauss, "II-VI Compounds." North Holland Publ. Co. Amsterdam (1967) 776
- (11) A. Moritani, T. Takahashi, C. Hamaguchi and J. Nakai, *Tech. Reports. of the Osaka Univ.* **20** (1970) 427
- (12) B.E. Bartlett and J. Deans, *J. of Materials Science* **4** (1969) 266
- (13) W. Giri, *Brit. J. Appl. Phys.* **15** (1964) 151
- (14) G. Mandel, *Phys. Rev.* **134** (1964) 1073
- (15) J.L. Schmit and C.J. Speerschneider, *Infrared Phys.* **8** (1968) 247

## 第 3 章 HgTe と HgSe の光学定数

### 3・1 緒言

HgTe と HgSe の光学定数についての報告は静誘電率  $\epsilon_{\infty}$  に関するもの除去しては、これまでなされていない。<sup>(1)(2)</sup> これをフォトン・エネルギーの関数として偏光解析法を用いて求めた。ここで光学定数とは複素屈折率  $N$  の実数部（屈折率） $n$  と虚数部（消衰係数） $k$ 、あるいは複素誘電率  $\epsilon$  の実数部  $\epsilon_1$  と虚数部  $\epsilon_2$  を指している。光学定数は反射係数や吸収係数と同じように、固体のエネルギー帯構造ばかりでなく、格子振動や自由電子の振舞をも反映しており、光学的測定にもとづく物性研究には不可欠なものである。また光学定数はエレクトロレフレクタンスやピエゾレフレクタンスなどの微分変調法で得られたスペクトルの解析などには是非とも必要な量となっている。

光学定数の求め方については古くから色々な方法が考案され、その値はいろいろな実験手段で求められ吟味されてきた。その方法には、例えば、吸収係数と反射係数の両方を求める方法、反射係数を広範囲の波長領域にわたって求め、これを Kramers-Kronig の関係式を用いて求めるもの、あるいは、入射光の角度を変えて反射係数を測定するもの、偏光を利用する偏光解析などがある。一般に金属などの吸収体の吸収係数の測定や、反射係数の絶対値の測定は容易でない。とくに反射率を Kramers-Kroning 変換（K-K 変換）して求める方法は広い波長範囲が必要であり、また反射率のわずかな誤差に対しても  $n$  と  $k$  の値に影響を及ぼすので精度は良くない。これに対して偏光解析法では反射率の相対値を測定すればよく、この方法は多くの人達<sup>(3)~(6)</sup> によって、精度の点でも十分に満足のいく結果が得られている。また精度が良いところから、この方法を用いて水銀の輝線や、レーザーなどの特定波長における薄膜（金属薄

膜)や酸化膜などの光学定数を求めて、その膜厚や性質などが調べられている。<sup>(7)(8)</sup>

偏光解析で問題になるのは、反射表面に酸化膜などの表面被膜が存在する場合、これが光学定数の測定値に少なからぬ影響を及ぼすことである。<sup>(3)(9)~(11)</sup>

この表面酸化膜による効果についても検討を加え、HgTeとHgSeの測定値に及ぼす影響を吟味する。

### 3・2 偏光解析法<sup>(12)</sup>

一般に固体表面で直線偏光が斜の入射角で反射されるとき、偏光の状態が変化する。固体が金属のような吸収体のとき、あるいは透明な固体でも表面層が存在するとき、反射光は惰円偏光となる。この惰円偏光を光学的に解析して固体の光学定数または表面層の厚さと屈折率を求めるることは、かなり古く、すでにDrude<sup>(13)</sup>らがこれを行っている。

偏光解析法が非常に高い精度を持つ理由は、要するに光路を同じくする二つの振動成分を使う干渉計であり、異なる光路の光波を使う通常の干渉計に比べて光路の乱れがないために精密な測定が可能であるからである。

#### 3・2・1 吸収体表面での反射

今図3・1のように屈折率 $n_0$ の媒質から屈折率 $n$ の吸収体に単色直線偏光が $\phi_1$ の入射角で入ると考える。吸収体表面で反射された光はそのx, y成分(x成分……平行成分, y成分……垂直成分)に $\Delta$ なる相対的な位相のずれを生じ、それらの振幅にも変化を生じる。この振幅の比を $\tan\psi$ とする。 $\Delta$ と $\psi$ の値は、入射角と吸収体の光学定数だけに依存する。(ただし、表面膜が存在しない場合)すなわちx, y両成分の反射係数の比は

$$\frac{\tilde{R}_x}{\tilde{R}_y} = \tan\psi \cdot \exp j\Delta \quad (3 \cdot 1)$$

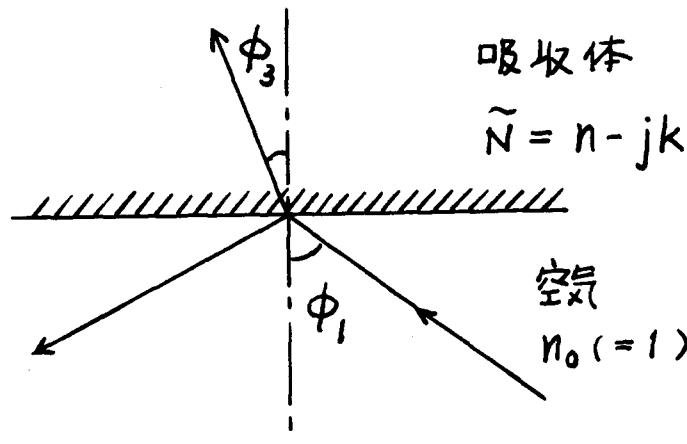


図 3・1 吸収体への光の入射と反射および屈折

で表わされる。反射面に表面膜がないときの  $\psi$ ,  $\Delta$ ,  $n$ ,  $k$  の間の関係は, Ditchburn によって与えられている。

$$\frac{1 - \tan \psi \cdot e^{j\Delta}}{1 + \tan \psi \cdot e^{j\Delta}} = \frac{(n^2 - k^2 - n_0^2 \sin^2 \phi_1 - j 2 n k)^{\frac{1}{2}}}{n_0 \tan \psi \cdot \sin \phi_1} \quad (3 \cdot 2)$$

となる。 (3・2) 式より

$$n - jk = n_0 \tan \phi_1 \left\{ \frac{1 - 4 \sin^2 \phi_1 \cdot \tan \psi \cdot e^{j\Delta}}{(1 + \tan \psi \cdot e^{j\Delta})^2} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3 \cdot 3)$$

式 (3・3) を実数部と虚数部に分離すると

$$n^2 - k^2 = n_0^2 \sin^2 \phi_1 \left[ 1 + \frac{\tan^2 \phi_1 \cdot (\cos^2 2\psi - \sin^2 \Delta \cdot \sin^2 2\psi)}{(1 + \cos \Delta \cdot \sin 2\psi)^2} \right] \quad (3 \cdot 4)$$

$$2 n k = \frac{n_0^2 \sin^2 \phi_1 \cdot \tan^2 \phi_1 \cdot \sin 4\psi \sin \Delta}{(1 + \cos \Delta \sin 2\psi)^2} \quad (3 \cdot 5)$$

したがって偏光解析法によって  $\Delta$  と  $\psi$  を測定すれば, (3・4), (3・5) より光学定数  $n$  と  $k$  が求まる。

### 3・2・2 偏光解析法の原理

図3・2のようにコリメータを出た平行光線は偏光器、補整器をとおり、ある斜の入射角で試片に入射し、そこで反射して検光器をとおって検知器に入る。ここで光路の途中の任意の切断面で入射面に平行にx軸、垂直にy軸をとりz軸を光線の進む方向にとる。そして偏光器、検光器の方位角を透過する偏光の振動方向がx軸となす角を光線の進む方向からみて、逆時計回りに計ったものと定義する。

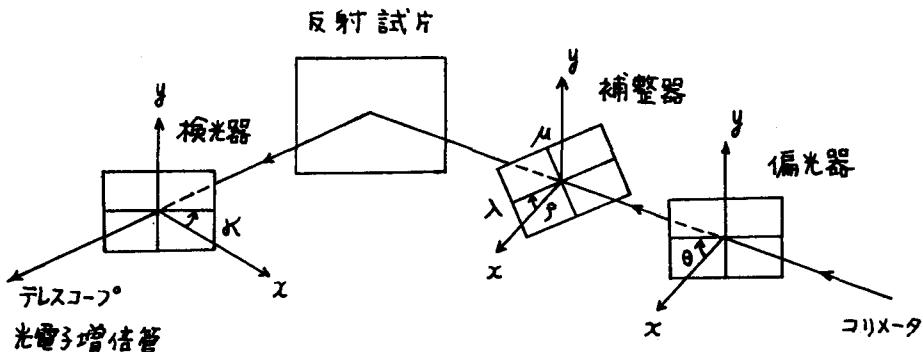


図3・2 偏光解析用光学系統図

ここで補整器は、二つの光の成分に位相差 $\sigma$ を生じさせるもので、これによって偏光を測定に便利な直線偏光に直すことができ、偏光解析を精度高く行へて $R_x$ ,  $R_y$ ,  $\Delta$ に関する情報を得ることができる。 $\sigma$ は、

$$\sigma = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d \cdot (n_o - n_e) \quad (3 \cdot 6)$$

より求めることができる。ここで $\lambda$ は測定光の波長、dは補整器を構成するマイカ板または水晶板の厚さ、 $n_o$ ,  $n_e$ は正常波、異常波に対する屈折率である。

$\sigma = \pi/2$ になる結晶板をとくに $\frac{1}{4}$ 波長板といっている。

方位角 $\theta$ の偏光器から出る偏光のx, y成分 $E_x$ ,  $E_y$ は

$$E_x^p = A \cos \theta \cdot \cos \{ \omega (t - z/c) + \Delta_0 \} \quad (3 \cdot 7)$$

$$E_y^p = A \sin \theta \cdot \cos \{ \omega (t - z/c) + \Delta_0 \} \quad (3 \cdot 8)$$

である。この場合、一つの波面の  $x$ ,  $y$  成分相互の位相差のみを問題とし、絶対値は問題としないから  $\omega z/c$ ,  $\Delta_0$  は省略できる。また以下、 $A = 1$  とする。

補整器を一般化して、主軸の方位角を  $\rho$ 、与える位相差を  $\sigma$  とする。

(3・7), (3・8) より

$$E_x^p = \cos \theta \cdot e^{j\omega t} \quad (3 \cdot 9)$$

$$E_y^p = \sin \theta \cdot e^{j\omega t} \quad (3 \cdot 10)$$

補整器の二つの主軸に平行な座標系  $\lambda$ ,  $\mu$  をとり (3・9), (3・10) を  $\lambda$ ,  $\mu$  の成分  $E_\lambda^i$ ,  $E_\mu^i$  に変換する

$$E_\lambda^i = E_x^p \cos \rho + E_y^p \sin \rho$$

$$E_\mu^i = -E_x^p \sin \rho + E_y^p \cos \rho$$

補整器は  $\lambda$  方向の振動を  $\sigma$  だけ進相させるから、透過後の成分は、その振幅が、

$$E_\lambda^o = E_\lambda^i e^{j\sigma}$$

$$E_\mu^o = E_\mu^i$$

であるので、ふたたび、 $x$   $y$  系に変換して、

$$E_x^c = E_\lambda^o \cos \rho - E_\mu^o \sin \rho \quad (3 \cdot 11)$$

$$E_y^c = E_\lambda^o \sin \rho - E_\mu^o \cos \rho \quad (3 \cdot 12)$$

となる。この光が試片で反射されると、その両成分はそれぞれ、 $R_x e^{j\Delta_x}$ ,  $R_y e^{j\Delta_y}$  の係数がかかる、

$$E_x^t = R_x E_x^c e^{j\Delta_x} \quad (3 \cdot 13)$$

$$E_y^t = R_y E_y^c e^{j\Delta_y} \quad (3 \cdot 14)$$

となる。最後に  $x$   $y$  系に関して方位角  $\kappa$  の検光器を透過する振動  $E_x^a$  は

$$E_x^a = E_x^t \cos \kappa + E_y^t \sin \kappa \quad (3 \cdot 15)$$

である。以上の式より計算を行なうと、検光器を透過後の振動は、結局

$$E^a = \{ R_x |\cos \theta| \cos \kappa \cdot e^{j(\Sigma_x + \Delta_x)} \cdot e^{j\omega t} + R_y |\sin \theta| \sin \kappa \cdot e^{(\Sigma_y + \Delta_y)} e^{j\omega t} \} \quad (3 \cdot 16)$$

となる。振幅の平方は透過光量を表わすから透過率は、

$$R_x^2 \cos^2 \theta \cos^2 k + R_y^2 \sin^2 \theta \sin^2 k + 2 R_x R_y |\cos \theta \sin \theta| \cos \kappa \sin \kappa \cos (\Sigma_x - \Sigma_y + \Delta_x - \Delta_y) \quad (3 \cdot 17)$$

となる。ただし、

$$\cos 2\theta = \cos 2(\theta - \rho) \cos 2\rho - \sin 2(\theta - \rho) \sin 2\rho \cos \sigma \quad (3 \cdot 18)$$

$$\sin (\Sigma_x - \Sigma_y) = \frac{\sin 2(\theta - \rho) \sin \sigma}{|\sin 2\theta|} \quad (3 \cdot 19)$$

$$\cos (\Sigma_x - \Sigma_y) = \frac{\cos 2(\theta - \rho) \sin 2\rho + \sin 2(\theta - \rho) \cos 2\rho \cos \sigma}{|\sin 2\theta|} \quad (3 \cdot 19)'$$

とおいた。

したがって、偏光器、補整器、検光器を調節することによって、検光器に入ってくる偏光を直線偏光にして検光器を通過する光量を零にするときの条件から、  
 $R_x$ ,  $R_y$ ,  $\Delta$ の値が求まる。これを消光法という。

検光器透過後の光量(3・17)を零にするには、次の位相条件と振幅条件の二つが同時に満足されねばならない。

$$\text{位相条件: } \Sigma_x - \Sigma_y + \Delta_x - \Delta_y = 0 \text{ 又は } \pi \quad (3 \cdot 20)$$

$$\text{振幅条件: } R_x / R_y \pm \tan \kappa \cdot \tan \theta = 0 \quad (3 \cdot 21)$$

ただし、正号は位相条件の0に、負号は $\pi$ に対応する。

(3・20), (3・21)式から反射係数比 $R_x / R_y$ と位相差 $\Delta = \Delta_x - \Delta_y$ を定めるのが消光法による偏光解析の原理である。

### 3・3 実験装置及び方法

#### 3・3・1 実験装置

図3・3に偏光解析用の光学系統図を示す。本実験の場合には、波長を3000~7000 Åまで変化させて行ったが、このような場合には $\frac{1}{4}$ 波長板は使用できなくなる。なぜなら、(3・6)式からわかるように $\frac{1}{4}$ 波長板は波長が変ると位相が $\frac{\pi}{2}$ でなくなるため波長を変えるたびに、その波長に対応して $\frac{1}{4}$ 波長板を必要とするからである。そこで、 $\frac{1}{4}$ 波長板のかわりに、バビネソレーユ補整器を使用して、測定波長でバビネソレーユ補整器が常に $\frac{1}{4}$ 波長板の働きをするようにした。<sup>(14)</sup>

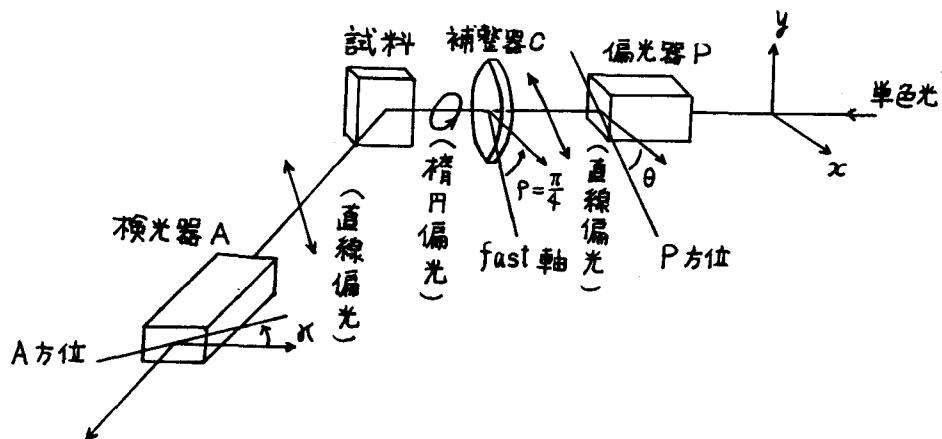


図3・3 偏光解析用光学系統図

図3・3において、右側よりモノクロメータから出た単色光はコリメータレンズによって平行光線となり、方解石グラントムソン・プリズム P (偏光器) を通って直線偏光となり、バビネソレーユ補整器 C を通って橙円偏光となる。試料で反射された光は、入射光として適当な橙円偏光を選べば、直線偏光となる。この反射光は方解石グラントムソンプリズム A (検光器) を通り、その直交状

態を光電子増倍管で読むようになっている。本実験で用いた島津製作所の偏光解析装置の性能を示すと、

1) 分光計角度最小読取	30秒
2) 偏光子, 検光子, 補整器回転角度最小読取	30秒
3) 試料台大きさ	直径 120 mm
4) 最大使用光束	直径 10 mm

使用したモノクロメータは、

島津—Bausch and Lomb Incorp.

回折格子型強力モノクロメータ, 光源, Wランプ

使用した出口スリット 0.75 mm 半値巾 4.8 m $\mu$ ,

であった。

また HgTe と HgSe 試料の反射面として、いずれも劈開面を用いた。

### 3・3・2 測定方法

まず測定を行う前に偏光器, 検光器および補整器の零方位角を決定しておく。それぞれの零方位角が決定されれば、試片をとりつけ、入射角を定める。入射角としては  $60^\circ$  前後が適当である。次にバビネソレーユ補整器の位相差を  $\sigma = \frac{\pi}{2}$ 、方位角を  $\rho = \frac{\pi}{4}$  に固定する。つづいて、偏光器と検光器の方位角  $\alpha$  と  $\kappa$  を調節して光電子増倍管に発生する光電流を最小にするよう  $\alpha$  と  $\kappa$  を求める。偏光器方位角には  $90^\circ$  度相違した二種類の読み、 $\alpha_1$  と  $\alpha_2$  があり、この  $\alpha_1$  と  $\alpha_2$  に対して検光器の読みも  $\kappa_1$  と  $\kappa_2$  が得られる。なお、 $0 < \alpha_1 < 90^\circ$ ,  $90^\circ < \alpha_2 < 180^\circ$ ,  $-90^\circ < \kappa_1, \kappa_2 < 90^\circ$  である。

更に、補整器の方位角  $\rho$  を  $\rho = -\frac{\pi}{4}$  にして、同様の測定を行う。そして  $\theta_3$  と  $\theta_4$  に対する  $\kappa_3$  と  $\kappa_4$  を得る。ここで  $\theta_3, \theta_4, \kappa_3, \kappa_4$  は、 $-90^\circ < \theta_3 < 0$ ,

$-180^\circ < \theta_4 < -90^\circ$ ,  $-90^\circ < \kappa_3, \kappa_4 < 90^\circ$ である。

このようにして得られた4種の読みを、平均することによって、諸種の誤差を消殺することができる。

測定値 ( $\theta_1, \kappa_1$ ) の組に対して  $\theta_2 = \theta_1 + \frac{\pi}{2}$  も位相条件 (3・20) を満足する。すなわち (3・18) 式に  $\theta_1$  と  $\theta_2$  の関係を入れると

$$\cos 2\theta_1 = -\cos 2\theta_2 \quad (3 \cdot 22)$$

$$\text{ゆえに } |\sin 2\theta_1| = |\sin 2\theta_2|$$

となり、(3・19) と (3・19)' から  $(\Sigma_x - \Sigma_y)_1 = (\Sigma_x - \Sigma_y)_2$  となる。

したがって  $\theta_1$  が位相条件を満せば、 $\theta_2$  も別の位相条件を満し、それに対応する  $\kappa_1$  と  $\kappa_2$  は (3・21) の互いに符号を異にする振幅条件を満すから  $\tan \kappa_1$  と  $\tan \kappa_2$  の符号は異なっている。(3・22) と (3・21) より

$$\tan \kappa_1 \cdot \tan \kappa_2 = -\left(\frac{R_x}{R_y}\right)^2 \quad (3 \cdot 23)$$

$$\frac{\tan \kappa_2}{\tan \kappa_1} = -\tan^2 \theta_1 \quad (3 \cdot 24)$$

(3・24) 式は検光器の方位角  $\kappa_1$  と  $\kappa_2$  から他のパラメータに無関係に反射係数比を求める式である。

次に位相差  $\Delta = \Delta_x - \Delta_y$  の計算は、補整器の位相差  $\lambda$  が  $\pi/2$  に近く、方位角  $\rho$  が  $\pi/4$  (又は  $-\pi/4$ ) に固定されている時に簡単になる。

(3・18) 式に  $\rho = \pi/4$  とおくと、

$$\cos 2\theta = \cos 2\theta \cos \sigma \quad (3 \cdot 25)$$

$$\text{ゆえに } |\sin 2\theta| = \left(1 - \cos^2 2\theta \cdot \cos^2 \sigma\right)^{1/2} \quad (3 \cdot 26)$$

また (3・19) と (3・26) より

$$\sin(\Sigma_x - \Sigma_y) = -\frac{\cos 2\theta \cdot (1 - \cos^2 \sigma)^{1/2}}{(1 - \cos^2 2\theta \cdot \cos^2 \sigma)^{1/2}}$$

$\sigma$  は  $\frac{\pi}{2}$  に近いから,  $\cos \sigma$  につき展開し,  $\cos \sigma$  の 4 乗以後を無視すると,

$$\sin(\Sigma_x - \Sigma_y) = -\cos(2\theta + \frac{1}{2}\cos^2\sigma \sin 2\theta \cos 2\theta) \quad (3 \cdot 27)$$

同様にして (3・19)<sup>1</sup> は

$$\cos(\Sigma_x - \Sigma_y) = \sin(2\theta + \frac{1}{2}\cos^2\sigma \sin 2\theta \cos 2\theta) \quad (3 \cdot 28)$$

(3・27), (3・28) を解くと,

$$\Sigma_x - \Sigma_y = \frac{3\pi}{2} + (2\theta + \frac{1}{2}\cos^2\sigma \sin 2\theta \cos 2\theta)$$

これと位相条件 (3・20) を組み合せると  $\Delta$  が求まる.

すなわち  $\tan \kappa > 0$  のとき

$$\Delta = -\frac{\pi}{2} - (2\theta + \frac{1}{2}\cos^2\sigma \sin 2\theta \cos 2\theta) \quad (3 \cdot 29)$$

$\tan \kappa < 0$  のとき

$$\Delta = \frac{\pi}{2} - (2\theta + \frac{1}{2}\cos^2\sigma \sin 2\theta \cos 2\theta) \quad (3 \cdot 30)$$

この式中の  $\cos \sigma$  は  $\kappa_1$  と  $\kappa_2$  より計算できる.

以上で  $(\theta_1, \kappa_1)$ ,  $(\theta_2, \kappa_2)$  より  $R_x / R_y$ ,  $\Delta$  を導くことができる. さらに  $\rho$  を  $-\frac{\pi}{4}$  としたときの測定値  $(\theta_3, \kappa_3)$ ,  $(\theta_4, \kappa_4)$  を組合せることによって偏光器, 補整器及び検光器の方位角の原点の誤差を消殺することができる. 結局次のような式で位相差  $\Delta$ , 反射係数比  $R_x / R_y$  を計算できる.

$$2\theta_0 = \frac{\theta_1 + \theta_2 - 90^\circ}{2} - \frac{\theta_3 + \theta_4 + 90^\circ}{2} \quad (3 \cdot 31)$$

$$\left( \frac{R_x}{R_y} \right)^2 = \left| \tan \frac{\kappa_3 - \kappa_1}{2} \cdot \tan \frac{\kappa_2 - \kappa_4}{2} \right| \quad (3 \cdot 32)$$

$\tan \kappa_1 < 0$  のとき

$$\Delta = \frac{\pi}{2} - 2\theta_0 - \frac{\cos^2\sigma}{2} \cdot \sin 2\theta_0 \cdot \cos 2\theta_0 \quad (3 \cdot 33)$$

$\tan \kappa_2 > 0$  のとき

$$\Delta = -\frac{\pi}{2} - 2\theta_0 - \frac{\cos^2 \sigma}{2} \cdot \sin 2\theta_0 \cdot \cos 2\theta_0 \quad (3 \cdot 34)$$

ただし

$$\cos \sigma = \frac{1}{2 \cos 2\theta_0} \left( 1 - \left| \frac{\tan \frac{\kappa_2 - \kappa_4}{2}}{\tan \frac{\kappa_3 - \kappa_1}{2}} \right| \right) \quad (3 \cdot 35)$$

したがって、光学定数  $n$  と  $k$  を求めるには、 $(\theta_1, \kappa_1), (\theta_2, \kappa_2), (\theta_3, \kappa_3), (\theta_4, \kappa_4)$  から  $(3 \cdot 31) \sim (3 \cdot 35)$  を用いて  $R_x/R_y$  と  $\Delta$  を計算し、 $(3 \cdot 4)$  と  $(3 \cdot 5)$  を使って、計算すれば良いことになる。

### 3・4 実験結果と検討

#### 3・4・1 光学定数 $n, k$

偏光解析より求めた  $HgTe$  と  $HgSe$  の  $n$  と  $k$  をそれぞれ、図3・4と図3・5に示す(○)。 $HgTe$  の光学定数の測定は、フットンエネルギー  $1.7 \sim 3.5$  eV の範囲で行った。その消衰係数  $k$  のスペクトルには、 $2 \cdot 18$  eV と  $2 \cdot 80$  eV に二つのピークが認められる。これらのピークはそれぞれ、 $E_1 (A_{4,5} - A_6)$  と  $E_1 + A_1 (A_6 - A_6)$  に対応する遷移によるものであると考えられる。これらの値は反射測定や後章のエレクトロ・レフレクタンスから得られた値とほぼ一致している。また  $HgSe$  についても  $2.94$  eV と  $3.12$  eV にピークが見られ、それぞれは  $E_1$  と  $E_1 + A_1$  に対応している。(図4・2のエネルギー帯構造を参照)

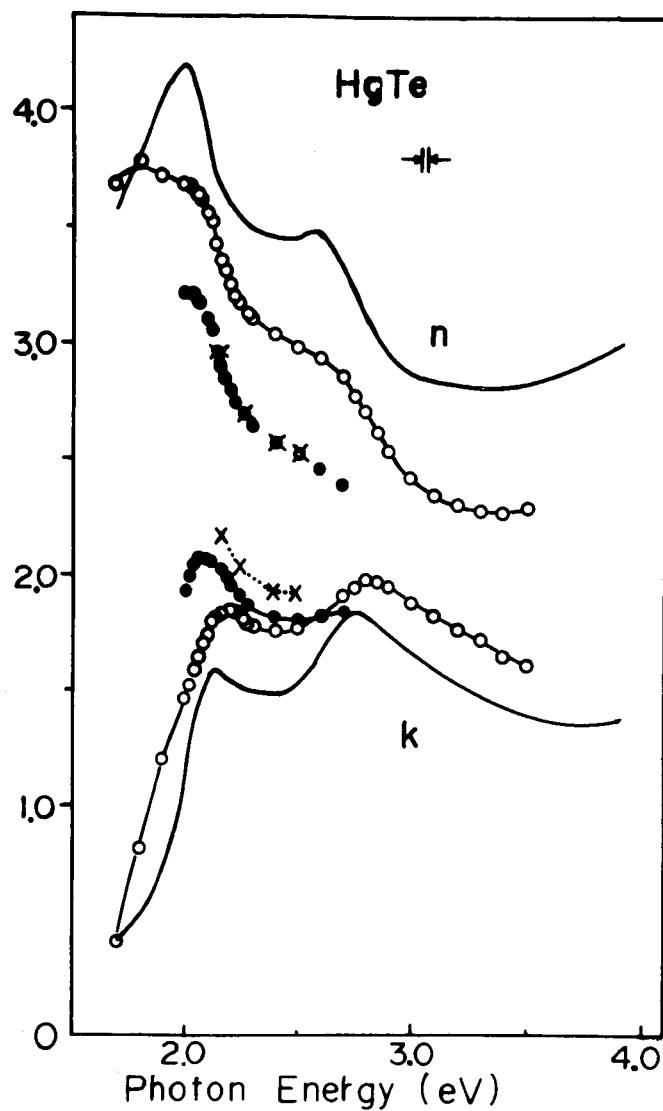


図3・4 HgTe の光学定数  $n$  と  $k$ 。○：偏光解析法による結果，—：反射  
射率<sup>(17)</sup>を Kramers-Kronig 変換した結果，●：表面に水銀酸化  
化膜  $\tilde{N}_2 = 1.5 - j 0.01$  が存在すると仮定して補正した結果

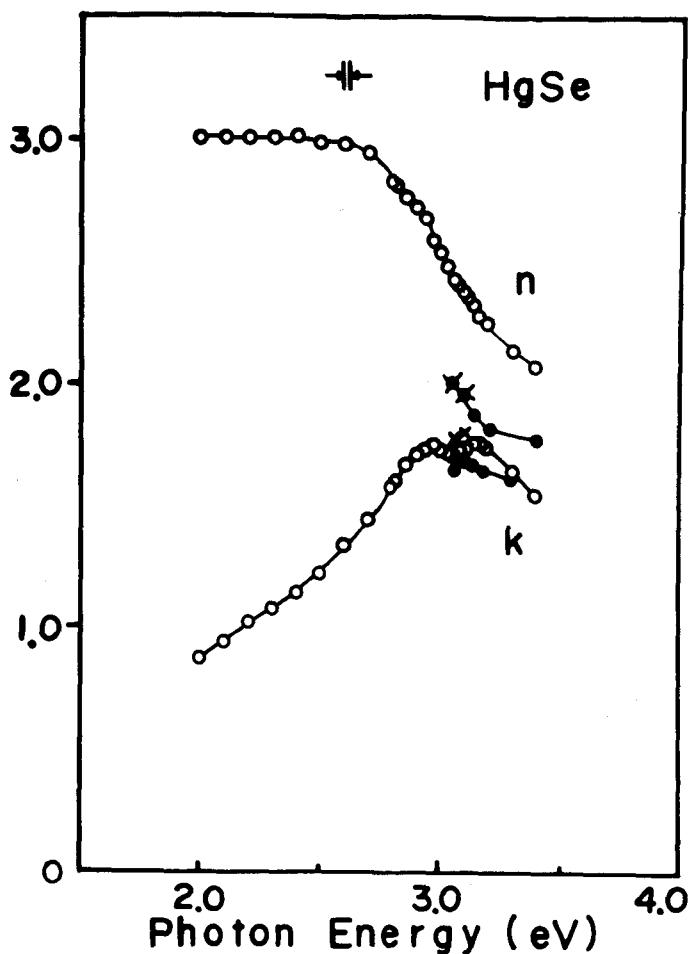


図 3・5 HgSe の光学定数  $n$  と  $k$ 。○：偏光解析法による結果, ●：表面に水銀酸化膜  $N_2 = 1.5 - j 0.01$  が存在すると仮定して補正した結果

### 3・4・2 Kramers-Kronig 変換

物質の光学定数は垂直入射の反射スペクトルからも得ることができる。この場合には反射スペクトルは広範囲のフォトン・エネルギーにわたって測定したものを必要とする。この方法を使って Philipp and Taft,<sup>(15)</sup> Cardona 等<sup>(16)</sup> は光学定数を計算している。この方法は以下のようである。

垂直入射に対する反射率の Fresnel の式は

$$\tilde{R} = \frac{n - jk - 1}{n - jk + 1} = R^{\frac{1}{2}} \cdot e^{j\theta} \quad (3 \cdot 36)$$

$\theta$  はフォトンエネルギー  $E$  に依存し, Kramers-Kronig の関係式を用いて求められる。

$$\begin{aligned} \theta(E_0) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \frac{d \ln R(E)}{dE} \left| \ln \frac{E + E_0}{E - E_0} \right| dE \\ &= \frac{E_0}{\pi} \int_0^\infty \frac{\ln R(E_0) - \ln R(E)}{E_0^2 - E^2} dE \quad (3 \cdot 37) \end{aligned}$$

図 3・4 に (3・36) と (3・37) を用いて HgTe の  $n$  と  $k$  を電子計算機で計算した結果を実線で示してある。反射スペクトルのデータとしては, Cardona<sup>(17)</sup> の文献に報告されている値を用いた。(3・37) の計算に際しては, 積分の上限を  $h\nu = 20 \text{ eV}$  までとり, 20 eV 以上の範囲に対しては,

$$R(E) \approx C E^{-4}$$

と仮定して計算した。このとき (3・37) の積分は次のようになる。

$$\begin{aligned} \theta(E_0) &= \frac{E_0}{\pi} \int_0^{20} \frac{\ln R(E_0) - \ln R(E)}{E_0^2 - E^2} dE \\ &+ \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{1}{2} [\ln C - \ln R(E_0)] \ln \frac{20 + E_0}{20 - E_0} \right. \\ &\left. - 4 \sum_{r=0}^{\infty} \left( \frac{E_0}{20} \right)^{2r+1} [1 + (2r+1) \ln 20] \right\} \quad (3 \cdot 38) \end{aligned}$$

積分は  $R(E)$  を 0.1 eV 間隔に分割してシンプソン法により, 放物線近似をして求めた。

図 3・4 からもわかるように, 偏光解析と K-K 変換より得られた結果は,

2.0 eV 以下のフォトン・エネルギーにおける  $n$  を除いては、その傾向において、ほぼ一致している。しかし絶対値については、わずかに違いがみられる。これは  $K - K$  変換においては、反射スペクトルが測定できない範囲では、その形を仮定しなければならないし、積分計算の誤差も入ってくるので正確な絶対値を求めるることは困難であるためと思われる。

### 3・4・3 反射率および誘電率

光学定数  $n$  と  $k$  から反射率を求める式は (3.36) を変形して、

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n-1)^2 + k^2} \quad (3.39)$$

となる。 (3.39) を使って、偏光解析より求めた  $n$  と  $k$  より  $R$  を計算した結果 (●) および Al の鏡を使用して測定した反射率 (○) を図 3・6 (HgTe) と図 3・7 (HgSe) に示す。HgTe については比較のために、Cardona 達のデータ (----) も示してある。これらのスペクトルはともに良く類似していると言える。

図 3・8 に、偏光解析より得られた  $n$  と  $k$  から誘電率  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  を計算した結果を示す。 $\epsilon_2$  のスペクトルに、やはり  $E_1$  と  $E_1 + A_1$  に対応するピークがみられる。

### 3・5 表面酸化膜が存在する場合の補正

偏光解析に用いる試料の表面に、酸化膜、ひずみ、微粒子などが存在する場合には、光学定数の測定値に補正を加える必要がある。ここでは HgTe と HgSe の表面に酸化膜が存在するとして解析を行う。<sup>(14)</sup>

表面酸化膜の問題は、Archer をはじめとして多くの研究者によって考察されてきた。Archer<sup>(3)</sup> は Ge の表面酸化膜の膜厚と屈折率を仮定することにより補正を行い、Burge と Bennett<sup>(9)</sup> は酸化膜厚を変化させて Si とその酸化膜

の光学定数を求めていいる。また最近 Shewchun と Rowe<sup>(11)</sup>は試料への入射角度を変化させて基板とその表面膜の光学定数および膜厚を求める新しい方法を報告している。いずれにしても、表面膜が存在する場合には、表面膜の光学定数と膜厚および基板の光学定数が複雑に絡みあっているし、一般には表面膜の光学定数や膜厚が未知であるから、基板の正確な光学定数を求ることはかなり困難な問題であるといえる。以上のような点から、これまでの報告では酸化膜に対する補正は特定波長だけに限られており、フォトンエネルギーの関数として補正が行われている例はほとんどない。

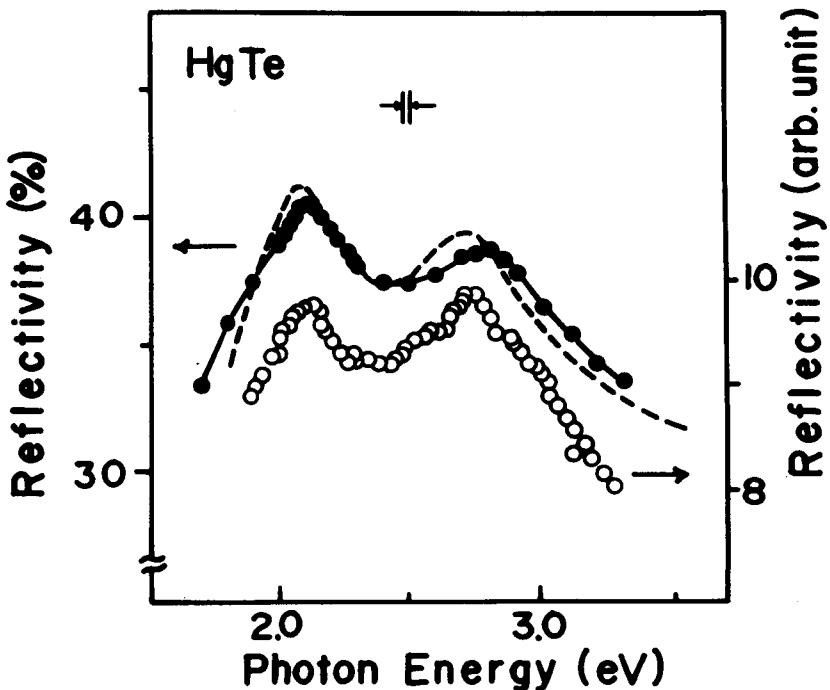


図 3・6 HgTe の反射率、●：偏光解析法より求めた  $n$  と  $k$  から計算した値、○：測定値、アルミニウム標準鏡を用いて測定したもの。---: Cardona 達の測定値<sup>(17)</sup>

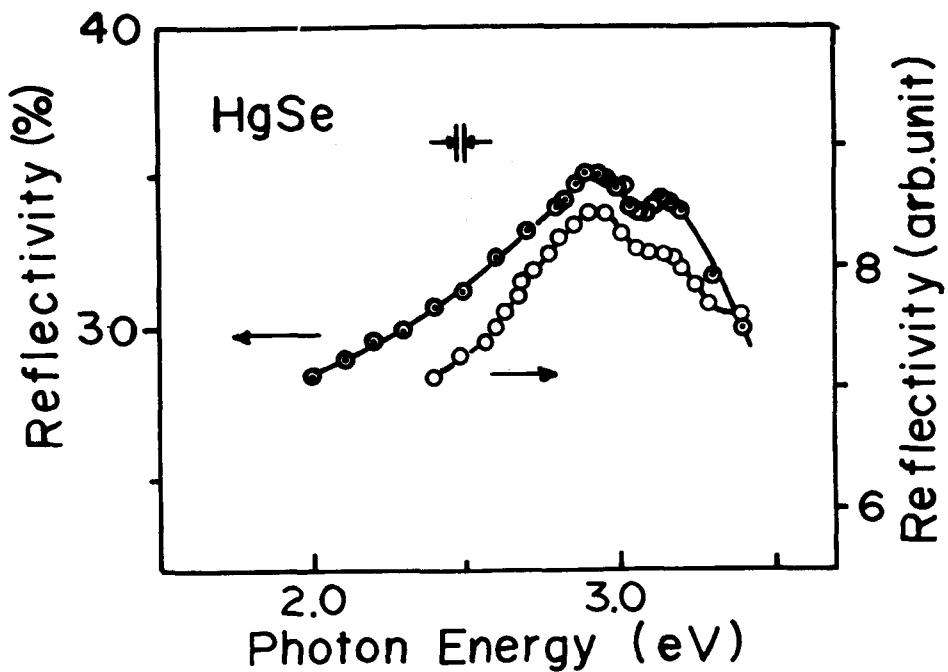


図 3・7 HgSe の反射率. ○: 測定値, ●: 偏光解析法より求めた  $n$  と  $k$  から計算した値

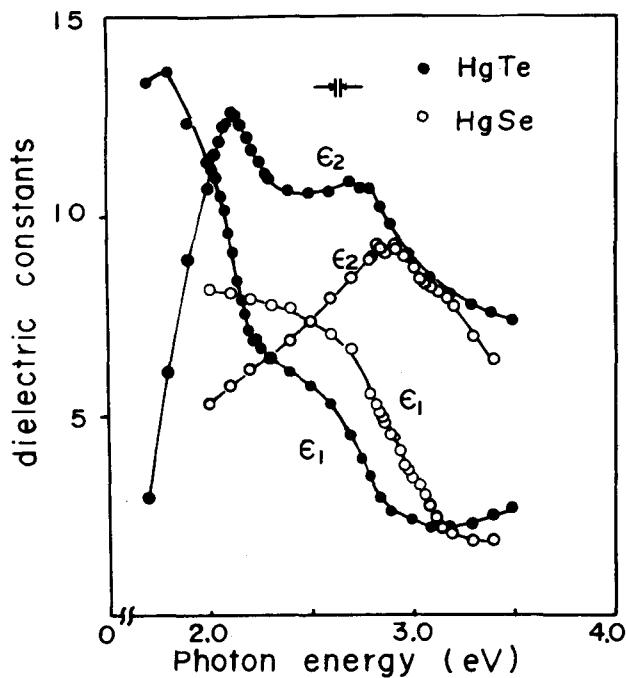


図 3・8 HgTe と HgSe の複素誘電率.  $\epsilon_1$ : 実数部  $\epsilon_2$ : 虚数部

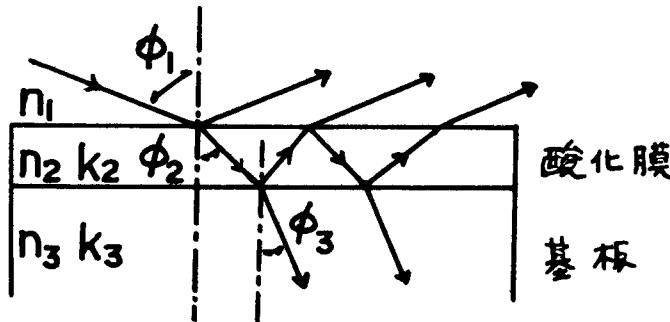


図 3・9 酸化膜が存在する場合の多重反射モデル

### 3・5・1 表面酸化膜が存在する場合の理論

図3・9のようなモデルを考える。反射係数の反射面に平行な成分( x )と垂直な成分( y )の比は

$$\frac{R_{123}^x}{R_{123}^y} = \tan \Psi e^{j\Delta} \quad (3 \cdot 4 \cdot 0)$$

ここで  $R_{123}^x$ ,  $R_{123}^y$  は、空気( $n_1 = 1$ ,  $k_1 = 0$ ), 酸化膜( $n_2$ ,  $k_2$ ), 基板( $n_3$ ,  $k_3$ )を含めたときの反射係数である。LeberknightとLustmann<sup>(17)</sup>は  $R_{123}^x$ , と  $R_{123}^y$  として次のような式を得ている。

$$R_{123}^x = R_{13}^x [(1 + aP) / (1 + bP)] \quad (3 \cdot 4 \cdot 1)$$

$$R_{123}^y = R_{13}^y [(1 + cP) / (1 + eP)] \quad (3 \cdot 4 \cdot 2)$$

ここで

$$P = (e^{j\delta} - 1) / (e^{j\delta} + 1) = \tan h \frac{j\delta}{2} \quad (3 \cdot 4 \cdot 3)$$

$$\delta = (4\pi/\lambda) (n_2 - jk_2) \cos^* \phi_2 d \quad (3 \cdot 4 \cdot 4)$$

$$a = \frac{n_1 \cos \phi_1}{(n_3 - jk_3) \cos \phi_1 - n_1 \cos^* \phi_3} \left( \frac{(n_2 - jk_2) \cos^* \phi_3}{n_1 \cos^* \phi_2} \right) \\ - \frac{(n_3 - jk_3) \cos^* \phi_2}{(n_2 - jk_2) \cos \phi}$$

$$b = \frac{n_1 \cos \phi_1}{(n_3 - j k_3) \cos \phi_1 + n_1 \cos^* \phi_3} \left( \frac{(n_2 - j k_2) \cos^* \phi_3}{n_1 \cos^* \phi_2} \right.$$

$$\left. + \frac{(n_3 - j k_3) \cos^* \phi_2}{(n_2 - j k_2) \cos \phi_1} \right)$$

$$c = \frac{n_1 \cos \phi_1}{n_1 \cos \phi_1 - (n_3 - j k_3) \cos^* \phi_3} \left( \frac{(n_3 - j k_3) \cos^* \phi_3}{(n_2 - j k_2) \cos^* \phi_2} \right.$$

$$\left. - \frac{(n_2 - j k_2) \cos^* \phi_2}{n_1 \cos \phi_1} \right)$$

$$e = \frac{n_1 \cos \phi_1}{n_1 \cos \phi_1 + (n_3 - j k_3) \cos^* \phi_3} \left( \frac{(n_3 - j k_3) \cos^* \phi_3}{(n_2 - j k_2) \cos^* \phi_2} \right.$$

$$\left. + \frac{(n_2 - j k_2) \cos^* \phi_2}{n_1 \cos \phi_1} \right)$$

$$R_{13}^x = \frac{[(n_3 - j k_3) \cos \phi_1 - n_1 \cos^* \phi_3]}{[(n_3 - j k_3) \cos \phi_1 + n_1 \cos^* \phi_3]}$$

$$R_{13}^y = \frac{[n_1 \cos \phi_1 - (n_3 - j k_3) \cos^* \phi_3]}{[n_1 \cos \phi_1 + (n_3 - j k_3) \cos^* \phi_3]}$$

ここで  $\lambda$  は測定波長,  $d$  は膜厚,  $R_{13}^x$ ,  $R_{13}^y$  は基板の反射係数で, これが, 3・2・1節の  $R_x$ ,  $R_y$  に相当する.  $\phi_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) は伝播角で, Snellの法則より

$$n_1 \sin \phi_1 = (n_2 - j k_2) \sin^* \phi_2 = (n_3 - j k_3) \sin^* \phi_3 \quad (3 \cdot 45)$$

の関係がある. (3・41)(3・42)(3・43)より

$$\tan \gamma e^{j \Delta} = \frac{R_{13}^x}{R_{13}^y} \left( \frac{(1 + aP)}{(1 + bP)} \frac{(1 + eP)}{(1 + cP)} \right) \quad (3 \cdot 46)$$

が得られる。表面膜が存在しない場合には  $P = 0$  となり、(3・1) と一致する。そしてこのときの  $\Psi$  と  $A$  を  $\bar{\Psi}$  と  $\bar{A}$  とする。(3・4) と (3・5) を再記して

$$n_3^2 - k_3^2 = n_1^2 + \sin^2 \phi_1 \cdot [1 + \tan^2 \phi_1 \left( \frac{\cos^2 2\bar{\Psi} - \sin^2 2\bar{\Psi} \sin^2 \bar{A}}{(1 + \sin 2\bar{\Psi} \cos \bar{A})^2} \right)] \quad (3 \cdot 4)'$$

$$2 n_3 k_3 = n_1^2 \sin^2 \phi_1 + \tan^2 \phi_1 \cdot \left( \frac{\sin 4\bar{\Psi} \sin \bar{A}}{1 + \sin 2\bar{\Psi} \cos \bar{A}} \right)^2 \quad (3 \cdot 5)'$$

また (3・46) より

$$z = \left( \frac{\tan \Psi}{\tan \bar{\Psi}} \right) e \times p j (A - \bar{A}) = \left( \frac{(1 + aP)(1 + eP)}{(1 + bP)(1 + cP)} \right) \quad (3 \cdot 47)$$

これを  $P$  について解くと

$$P = \frac{-[(a + e) - (b + c)z] \pm \{[(a + e) - (b + c)z]^2 + 4(z - 1)[ae - bcz]\}^{1/2}}{2[ae - (bc)z]} \quad (3 \cdot 48)$$

となる。

### 3・5・2 基板の光学定数の計算方法と結果

基板 (HgTe, HgSe) の光学定数を求めるのに以下の手順を用いた。

- (1)  $(n_3, k_3)$  のとりうる値の範囲を決める
- (2)  $(n_3, k_3)$  の組に対して (3・4)' と (3・5)' より  $\bar{A}$  と  $\bar{\Psi}$  を逆算して求める。
- (3)  $\bar{A}$ ,  $\bar{\Psi}$  と測定値  $A$ ,  $\Psi$ , を使って (3・47) より  $z$  を計算する。
- (4) 酸化膜の光学定数  $\tilde{N}_2 = n_2 - jk_2$  の値を仮定する。
- (5) (3・45) より  $\cos \phi_1$  を計算する。
- (6) 係数  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $e$  を計算する。
- (7) (3・48) より  $P$  を計算する。

(8) (3・43)より  $\delta$  を求める。

(9) (3・44)より  $d$  を求める。

HgTe の場合には入射角を  $60^\circ$  と  $70^\circ$  で測定し ( $\Delta_{60^\circ}, \Psi_{60^\circ}$ ), ( $\Delta_{70^\circ}, \Psi_{70^\circ}$ ) を求めている。この値を用いて(1)~(9)の計算を行い、膜厚  $d_{60^\circ}$  と  $d_{70^\circ}$  を求める。酸化膜厚は入射角にはよらないから、 $| (d_{60^\circ} - d_{70^\circ}) / (d_{60^\circ} + d_{70^\circ}) |$  が最小となるときの ( $n_3, k_3$ ) の組が求める基板の正しい光学定数に最も近いものとなるはずである。HgSe の場合は入射角を  $50^\circ$  と  $60^\circ$  で測定した値を用い、HgTe と同じようにして求めた。以上の操作を波長を変えて求めてゆく。

ここで問題になるのは、HgTe と HgSe の表面にできる酸化膜の光学定数である。これらの表面にできる酸化膜についての報告は皆無で、また自然放置の場合の膜厚も明らかでない。そこで著者らは、これらの表面に水銀の酸化物が存在すると仮定し、この光学定数の値として Smith と Stromberg<sup>(18)</sup> が見積った  $\tilde{N}_2 = n_2 - j k_2 = 1.50 - j 0.01$  の値を採用した。図 3・10 にこの計算に使用したフローチャートを示す。

HgTe と HgSe について得られた補正の結果をそれぞれ図 3・4 と図 3・5 に示す (●)。図から明らかなように屈折率  $n$  は減少し、消衰係数  $k$  は増加している。また HgTe については  $E_1$  ピークが低エネルギー側に移動している。

上の方法で得られた結果は酸化膜の光学定数を仮定しているという点で問題があるように思われる。

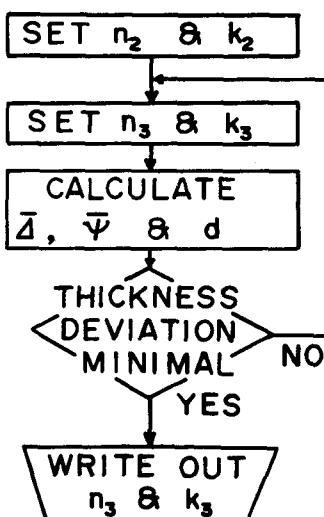


図 3・10 酸化膜に対する補正の計算に用いたフローチャート

より徹底した酸化膜補正を行うには、熱酸化等で十分厚い酸化膜を作り、その組成、膜厚、光学的特性などを測定して偏光解析を行うか、または、例えば、真空中で結晶（蒸着膜）の製作や測定を行うなどして、酸化膜が無視できる状態について測定することなどが考えられる。

### 3・6 結言

HgTe と HgSe の劈開面を使用して、偏光解析法により、室温におけるこれらの光学定数を求めた。HgTe については 1.7 eV ~ 3.5 eV のフォトン・エネルギー領域で測定し、消衰係数  $k$  のスペクトルに  $E_1 (A_{4,5} - A_6)$ 、と  $E_1 + A_1 (A_6 - A_1)$  の構造に対応するピークを 2.18 eV と 2.80 eV のフォトン・エネルギー値に認めた。また反射率を測定して、偏光解析より得られた光学定数を用いて計算した反射スペクトルと比較を行い、良い一致を得た。

HgSe についても HgTe と同様の実験、検討を行い、2.0 eV ~ 3.5 eV のフォトン・エネルギー領域で光学定数を求めた。HgSe においてはスピン-軌道分裂  $A_1$  の値が小さいので  $E_1 + A_1$  の値が分解されにくいが、本実験においては、 $E_1 = 2.90$  eV  $E_1 + A_1 = 3.15$  eV に二つのピークが認められ、この値は、反射測定やエレクトロレフレクタンスより得られた結果とほぼ一致した。

また HgTe と HgSe の表面に水銀酸化物が存在すると仮定して、酸化膜補正を行い、表面酸化膜の影響を検討した。

### 第 3 章 參 考 文 献

- (1) D.H.Dickey and J.G.Mavroides, Solid State Commun. 2(1964) 213
- (2) M.Cardona, J.APPL.Phys. 36(1965) 2181
- (3) R.J.Archer, Phys.Rev. 110(1958) 354
- (4) A.N.Saxena, APPL.Phys.Letters 7(1965) 113
- (5) D.T.F.Marple and H.Ehrenreich, Phys.Rev.Letters. 8(1962) 87
- (6) S.Roberts, Phys.Rev. 114(1959) 104
- (7) R.J.Archer, J.Opt.Soc.Am. 37(1962) 970
- (8) 土井, 應用物理 25(1956) 85
- (9) D.K.Burge and H.E.Bennett, J.Opt.Soc.Am. 54(1964) 1428
- (10) K.Vedam, W.Knausenberger and F.Lukes, J.Opt.Soc.Am. 59(1969) 64
- (11) J.Shewchun and E.C.Rowe, J.APPL.Phys. 41(1970) 4128
- (12) 土井, 機械試験所報告, 第 27 号 (1958)
- (13) P.Drude, Ann.Physik 1(1900) 566
- (14) A.Moritani, H.Sekiya, K.Taniguchi, R.Makabe, C.Hamaguchi and J.Nakai, Japan.J.APPL.Phys. 10(1971) 1410
- (15) H.R.Phillipp and E.A.Taft, Phys.Rev. 113(1959) 1002
- (16) M.Cardona and D.L.Greenaway, Phys.Rev. 133(1964) A1685
- (17) C.E.Leberknight and B.Lustman, J.Opt.Soc.Am. 29(1939) 59
- (18) L.E.Smith and R.R.Stromberg, J.Opt.Soc.Am. 56(1966) 1539

## 第4章 HgTe と HgSe のエレクトロレフレクタンス

### 4・1 緒言

(1)~(3)  
HgTe と HgSe の光学的性質に関する研究はあまり多くない。Cardona達は HgTe と HgSe の吸収係数、反射率および電解液法によるエレクトロレフレクタンスの実験を行い、エネルギー・バンド・パラメータを求めている。  
また Scouler と Wright<sup>(4)</sup> は室温および低温における優れた反射率の測定を行い、その結果は多くの文献に引用され、エネルギー帯構造の理論計算にも頻繁に用いられている。

この章では、電解液法とコンデンサ法で HgTe と HgSe のエレクトロレフレクタンスを測定し、第3章で得られた光学定数を用いて、その解析を行い、より精細なエネルギー帯構造のパラメータを求めた結果について述べる。とくにコンデンサ法では低温における実験を行う。<sup>(5)</sup> 低温においてはフォノンとの相互作用によるエネルギー準位の“ぼやけ”(thermal broadening)の効果が減じ、室温に比べて、より鋭い信号が得られるのは吸収係数や反射率の場合と同様である。

### 4・2 エレクトロレフレクタンスに関する理論の概略

エレクトロレフレクタンスとは電場による反射係数の変化の割合  $\Delta R/R$  を測定し、その結果を結晶のエネルギー帯構造を追究するのに用いる方法である。この  $\Delta R/R$  の測定より求められる種々のパラメータ間の関係を図式的にまとめると図4・1のようになる。

この図からも判るように  $\Delta R/R$  を解析するには結局電場による誘電率の虚数部  $\epsilon_2$  の変化あるいは、吸収係数の変化を明らかにすればよいことになる。この

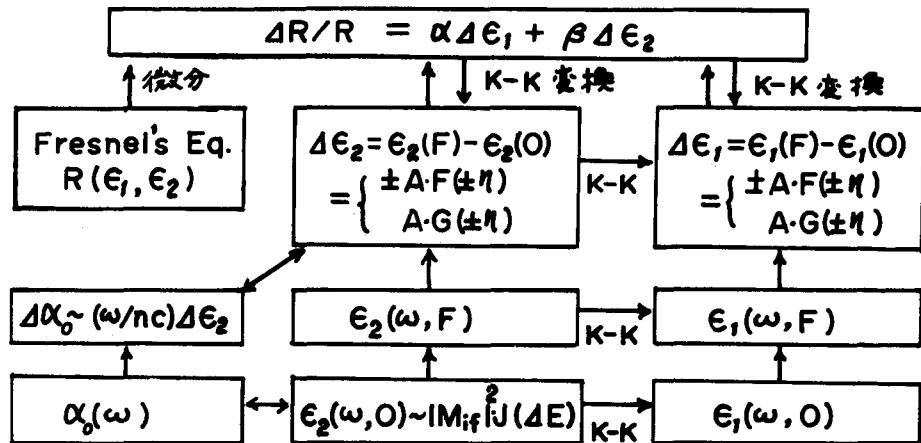


図 4・1 エレクトロフレクタンス信号  $\Delta R/R$  と誘電率の電場

による変化分との関係。ここに  $\alpha_0$  : 吸収係数,  $F(\eta)$

$G(\eta)$  は Airy 関数を含んだ第 1 種および第 2 種エレクトロ・オプティカル関数<sup>(10)</sup>  $c$  : 光速  $n$  : 屈折率,

$F$  : 電界強度

誘電率あるいは吸収係数の電場効果は, Franz, Keldysh をはじめとして数多くの論文が発表してきた。この計算の一つの方法は均一電界が存在するときの伝導帯と価電子帯の固有関数をまず計算し, これを用いて誘電率の虚数部  $\epsilon_2$  に含まれる遷移マトリックス要素の計算を行うやり方である。<sup>(6)(7)</sup> また別の計算方法として, Thermalingam<sup>(8)</sup> や Aspnes<sup>(9)(10)</sup> が用いた方法で, Van Hove の臨界点近傍でエネルギー・バンドが放物面をなしていると仮定するとともに, 有効質量近似を用いて, 計算する方法がある。以下簡単に図 4・1 によって説明してゆく。

#### 4・2・1 誘電率とエネルギー帯間遷移

複素誘電率の虚数部  $\varepsilon_2$  は、

$$\varepsilon_2(\omega) \sim \int_{BZ} \frac{2}{(2\pi)^3} \left| \tilde{e} \cdot M_{if} \right|^2 \delta(E_f - E_i - \hbar\omega) d^3k \quad (4 \cdot 1)$$

と表わされる。ここで  $\tilde{e}$  は光の伝播方向を表わす単位ベクトル,  $M_{if}$  は遷移マトリックス要素,  $E_i$ ,  $E_f$  は遷移の対称となるエネルギー準位を表わしている。いま  $M_{if}$  が波数ベクトル  $k$  に対してなめらかに変化すると仮定すると

$$\varepsilon_2(\omega) \sim \left| \tilde{e} \cdot M_{if} \right|^2 \cdot J(\Delta E) \quad (4 \cdot 2)$$

と書ける。ここに,  $\Delta E = E_f - E_i = \frac{\hbar}{m}\omega$  で  $J(\Delta E)$  は

$$J(\Delta E) = \int_{BZ} \frac{2}{(2\pi)^3} \delta(\Delta E - \hbar\omega) = \frac{2}{(2\pi)^3} \int_{\Delta E = \text{Const}} \frac{dS}{\nabla_k(\Delta E)} \quad (4 \cdot 3)$$

と表わされ、帯間遷移に寄与する二つのエネルギー帯に関する状態密度 (joint density of states) と呼ばれる。 $(4 \cdot 3)$  の最後の式は  $\Delta E =$  一定の等エネルギー面での表面積分で表わされている。 $(4 \cdot 3)$  より  $\nabla_k(\Delta E) = 0$  を満足する  $k$  点が  $J(\Delta E)$  すなわち  $\varepsilon_2(\omega)$  に大きく寄与することが分る、このような  $k$  点は帯端または, Van Hove の臨界点 (critical point) と呼ばれている。ところで  $\nabla_k(\Delta E) = 0$  となる  $k$  点上では,  $E_f$  と  $E_i$  が平行になる場合 ( $\nabla_k E_f = \nabla_k E_i \neq 0$ ) と  $E_f$  と  $E_i$  の傾きがともに 0 になる場合 ( $\nabla_k E_i = \nabla_k E_f = 0$ ) がある。前者はブリルアンゾーン内のどこにでも存在しうる。例えば  $<111>$  方向における  $A_3 - A_1(E_1)$  帯端がそれである。また後者は対称性からいって、ゾーンの中央 ( $\Gamma$  点) や端に起る。図 4・2 に水銀カルコゲナイドのエネルギー帯構造を示し、本実験に現われる各帯端の位置と帯間遷移を表わすパラメータを図示している。

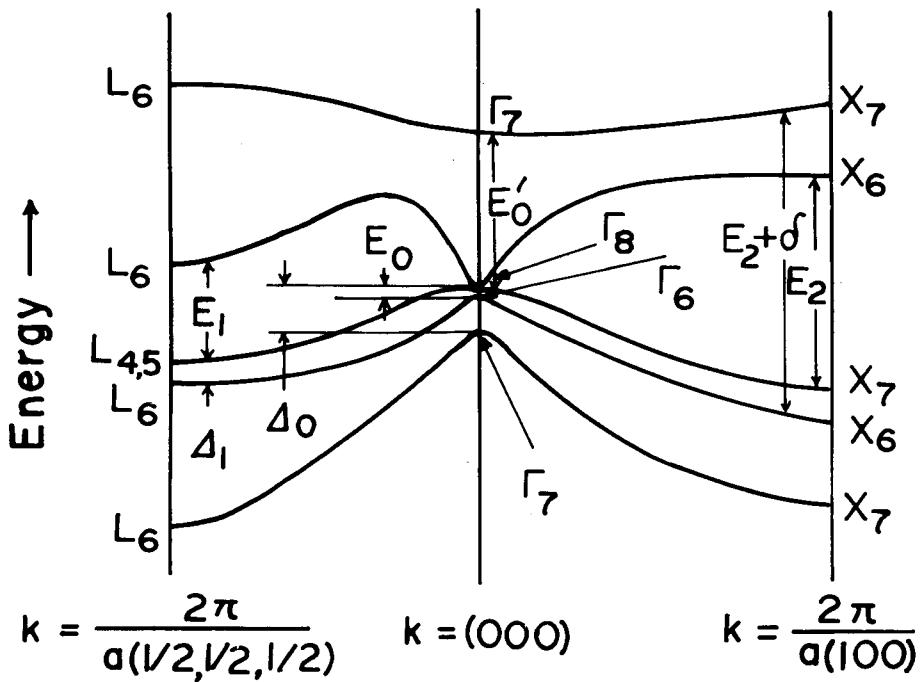


図 4・2 水銀カルコゲナイドのバンド構造<sup>(15)</sup> 本研究に  
現われる帯端におけるエネルギー帯構造のバラ  
メータを示してある

$J(\Delta E)$  の帶端近傍における様子を調べるために,  $k = k_0$  で  $\Delta E = E_f - E_i$  を展開すると

$$\Delta E = E_0 + \sum_{\alpha=1}^3 a_\alpha (k_\alpha - k_0)^2 \quad (4+4)$$

となる。ここで  $E_0 = \Delta E(k_0)$  である。(4・4)より  $a_\alpha$  の符号により 4 種類の帶端が存在することが分る。すなわち、 $\Delta E$  の極小点に対応する  $M_0$  型帶端 ( $a_1, a_2, a_3 > 0$ )、極大点に対応する  $M_3$  型帶端 ( $a_1, a_2, a_3 < 0$ )、鞍点 (Saddle point) に対応する  $M_1$  型帶端 ( $a_1, a_2 > 0, a_3 < 0$ )、および、

$M_2$  型帶端 ( $a_1 > 0$ ,  $a_2, a_3 < 0$ ) である。

#### 4・2・2 電場による誘電率の変化と $\Delta R/R$

Aspnes <sup>(10)</sup> は電場  $F$  が印加された場合の複素誘電率の虚数部  $\epsilon_2$  を次のように Airy 関数を含む形で表わした。

$$\epsilon_2(\omega, F) \sim \int_{BZ} \frac{2}{(2\pi)^3} d^3 k \left| \tilde{\epsilon}_{Mif} \right|^2 \cdot \left\{ \left| \hbar\Omega \right|^{-1} \cdot \text{Ai} \left[ \frac{\Delta E - \hbar\omega}{\hbar\Omega} \right] \right\}$$

(4・5)

ここに

$$\hbar\Omega(k) = \left[ \frac{e^2 F^2 \hbar^2}{2\mu_{\parallel}(k)} \right]^{\frac{1}{3}}; \quad \frac{1}{\mu_{\parallel}} = \frac{1}{\hbar^2} \frac{\partial^2}{\partial k^2} \Delta E \quad (4 \cdot 6)$$

(4・5) 式は (4・1) の  $\delta$  関数  $\delta(\Delta E - \hbar\omega)$  のかわりに Airy 関数を置いた形になっている。すなわち電場の存在しなかった時には、フォトンエネルギー  $\hbar\omega$  と等しい  $E_i$  と  $E_f$  のエネルギー準位間だけが吸収に関与していたのに対して、電場が加わることによって、このエネルギー準位間が Airy 関数の形で変調されたことになる。 $M_0$  帯端におけるこの様子を図 4・3 に示す。

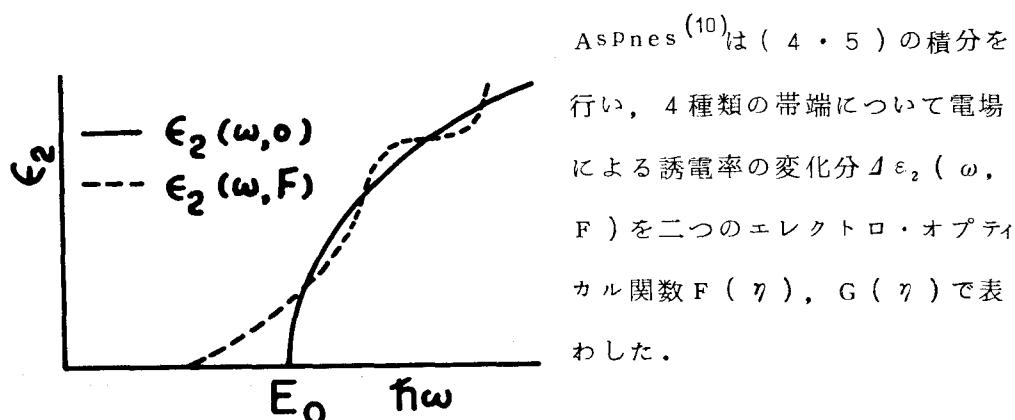


図 4・3  $M_0$  帯端近傍でみられる  $\epsilon_2(\omega, 0)$  と  $\epsilon_2(\omega, F)$  の概形

すなわち

$$\Delta \varepsilon_2 (\omega, F) = \left\{ \frac{\pm A F (\pm \eta)}{A G (\pm \eta)} \right\} \quad (4 \cdot 7)$$

ここに,  $A = B \Omega^{1/2} / \omega$ ,  $B = (2 e^2 / m^2 \hbar^4) \cdot i \tilde{e} M_{if}^{1/2} \cdot (8 \mu_x \mu_y \mu_z)^{1/2}$   
 $\eta = (AE - \hbar \omega) / \hbar \Omega$  である. また各帯端における複素誘電率の実数部の  
 変化分  $\Delta \varepsilon_1$  は  $\Delta \varepsilon_2$  を Kramers-Kronig 変換することにより求められ, やは  
 り  $F(\eta)$ ,  $G(\eta)$  により表わされる. ところで  $M_1$  および  $M_2$  の鞍点 (Sa-  
 ddle point) 型の帯端に対しては, 電場の方向と鞍型の主軸方向 (たとえば  
 $M_1$  型においては負の還元質量の方向, すなわち (4・4) の  $\alpha = 3$  の方向) と  
 が平行に近いか ( $M_{1//}, M_{2//}$ ), 垂直に近いか ( $M_{1\perp}, M_{2\perp}$ ) で  $\Delta \varepsilon_2 (\omega, F)$   
 の型が違ってくる. 以上の様子を図 4・4 の破線で示してある.

実際には励起された電子の寿命がフォノンとの衝突などにより有限であるた  
 めに, エネルギー準位の“ぼやけ” (Lifetime broadening) が起り  
 $\varepsilon(\omega, F)$  は

$$\varepsilon_2 (\omega, F)_{LB} = \int_0^\infty \frac{\Gamma \cdot \varepsilon_2 (\omega', F)}{(\omega - \omega')^2 + \Gamma^2} d\omega' \quad (4 \cdot 8)$$

となる. これは Lorentz 型の Broadening である. この  $\Gamma$  が 0.5 のときの  
 $\Delta \varepsilon_1, \Delta \varepsilon_2$  が図 4・4 の実線で示されている.

次にエレクトロフレクタンス  $\Delta R / R$  と誘電率の変化分との関係を以下に  
 述べる.

Fresnel の式より垂直に入射したときの反射率  $R$  と反射物質の誘電率  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  との関係は,

$$R = \frac{(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2)^{1/2} - \sqrt{2} \varepsilon_s^{1/2} [\varepsilon_1 + (\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2)^{1/2}]^{1/2} + \varepsilon_s}{(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2)^{1/2} + \sqrt{2} \varepsilon_s^{1/2} [\varepsilon_1 + (\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2)^{1/2}]^{1/2} + \varepsilon_s} \quad (4 \cdot 9)$$

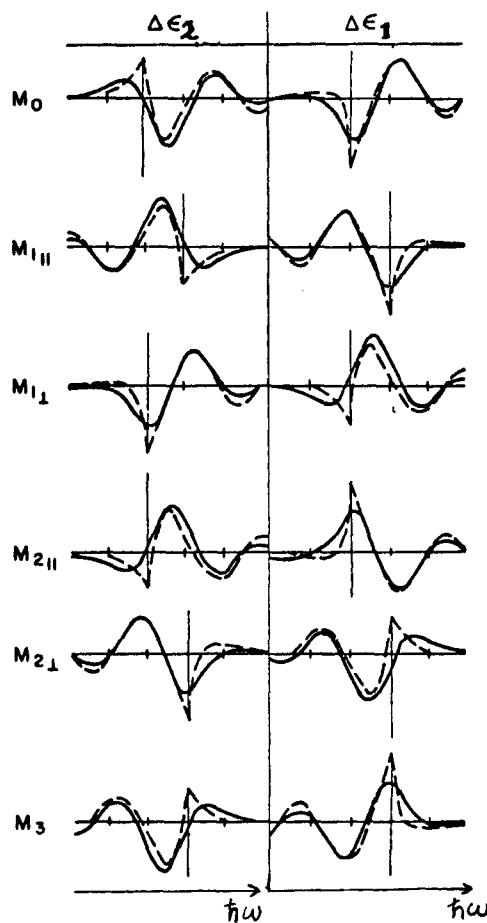


図 4・4 各種帶端でみられる電場による複素誘電率の変

化分  $\Delta\epsilon_1(\omega, F)$  と  $\Delta\epsilon_2(\omega, F)$  の計算

結果 (11) -----: Broadening 効果を考慮しな

い場合, ——: Broadening 効果を考慮した

場合 ( $\Gamma = 0.5$ )

となる。ただし  $\epsilon_s$  は測定物質を取巻く媒質の誘電率の実数部である。(4・9) の全微分をとり  $R$  で割ると,

$$\Delta R / R = \alpha(\omega) \Delta\epsilon_1 + \beta(\omega) \Delta\epsilon_2 \quad (4 \cdot 10)$$

となる。ここに

$$\alpha(\omega) = \frac{\sqrt{2} \varepsilon_s^{\frac{1}{2}} [(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2)^{\frac{1}{2}} + \varepsilon_1]^{\frac{1}{2}} [2\varepsilon_1 - (\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2)^{\frac{1}{2}} - \varepsilon_s]}{[(\varepsilon_1 - \varepsilon_s)^2 + \varepsilon_2^2] (\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (4 \cdot 11)$$

$$\beta(\omega) = \frac{\sqrt{2} \varepsilon_s^{\frac{1}{2}} \cdot \varepsilon_2 [2\varepsilon_1 - (\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2)^{\frac{1}{2}} - \varepsilon_s]}{[(\varepsilon_1 - \varepsilon_s)^2 + \varepsilon_2^2] (\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2)^{\frac{1}{2}} [(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2)^{\frac{1}{2}} + \varepsilon_1]^{\frac{1}{2}}} \quad (4 \cdot 12)$$

の関係が得られる。

またエレクトロフレクタンスの信号  $\Delta R/R$  を次のような Kramers-Kronig 変換を用いることにより  $\Delta \varepsilon_1(\omega, F)$ ,  $\Delta \varepsilon_2(\omega, F)$  のそれぞれの成分に分割することができる。<sup>(3)</sup>

$$\Delta \varepsilon_1 = \frac{n}{2n_s} (n^2 - n_s^2 - 3k^2) \frac{\Delta R}{R} + \frac{k}{n_s} (3n^2 - n_s^2 - k^2) \Delta \Theta \quad (4 \cdot 13)$$

$$\Delta \varepsilon_2 = \frac{k}{2n_s} (3n^2 - n_s^2 - k^2) \frac{\Delta R}{R} + \frac{n}{n_s} (3k^2 + n_s^2 - n^2) \Delta \Theta \quad (4 \cdot 14)$$

$$\Delta \Theta(E_0) = \frac{E_0}{\pi} \int_0^\infty \frac{\left( \frac{\Delta R}{R} - \frac{\Delta R_0}{R} \right)}{E^2 - E_0^2} dE \quad (4 \cdot 15)$$

ここで  $n$ ,  $k$  は測定物質の屈折率と消衰係数,  $n_s$  はこれをとりまく媒質の屈折率である。

通常 Kramers-Kronig 変換では積分領域は、すべてのエネルギー領域を取らねばならないが、(4・15) では問題にしている帯端の近傍のみで行えばよい。

#### 4・3 実験方法および装置

図 4・5 に 2.0 ~ 6 eV のフォトンエネルギー範囲のエレクトロフレクタン

スの実験に用いた測定系を示す。エレクトロレフレクタンスの測定には反射光の強さと電場によって変調を受けた変化分との比  $\Delta R / R$  を測定する必要がある。この  $\Delta R / R$  を測定する方法はいろいろあるが、ここでは反射光による光電子増倍管の出力が常に一定になるように、サーボ機構で光電子増倍管に加わる高電圧を制御しながら、電場による変化分  $\Delta R$  を増幅する方法をとった。すなわち、変調信号を含んだ反射光 ( $R + \Delta R$ )  $I_0$  による光電子増倍管の出力のうち直流分 ( $R I_0$ ) を真空管電圧計 (PM18C-東亜電波) で増幅して、サーボ増幅器 (日本サーボ) に入れる。 $(I_0$  は試料への入射光強度)。この出力で光電子増倍管の電源電圧を分割しているヘリボット ( $1 M\Omega$ ,  $1 W$ , パーンズ社) を駆動させて、光電子増倍管の直流出力を一定 ( $= 200 \text{ mV}$ ) に保つ。一方周波数  $f$  ( $100 \sim 1 \text{ kHz}$ ) の交流電界で変調された交流分  $I_0 \Delta R$  はロックイン増幅器で増幅される。この出力は波長マーカー信号が同時に記録されている記録計に記録される。 $I_0 R$  が一定になっているため記録計には  $\Delta R / R$  に比例した値が直接示されていることになる。

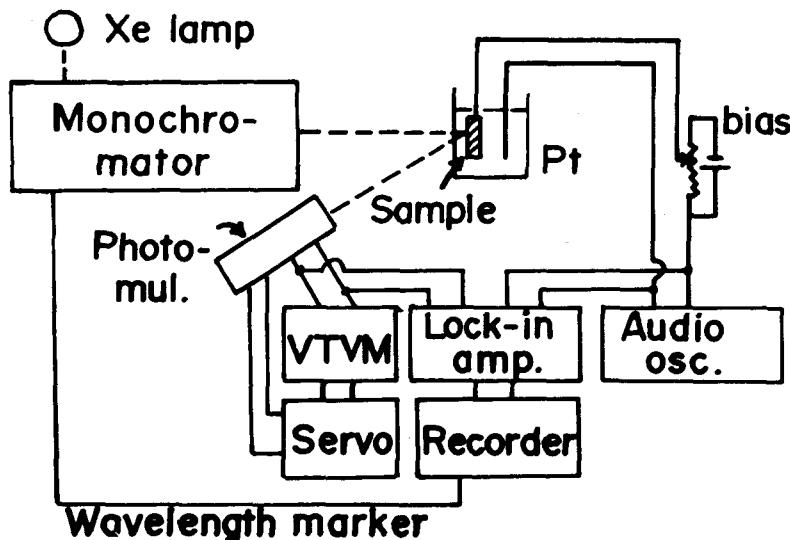


図 4・5  $1.8 \sim 6 \text{ eV}$  のフォトンエネルギー領域におけるエレクトロレフレクタンスの測定に用いた測定系

その他、光源としては、UXL 500 D Xe ランプ(500W, ウシオ電機)を用いた。光電子増倍管は、R272 (S-19, 浜松テレビ)を用いた。分光器はSS-50回析格子分光器(日本分光)を使用した。この分解能は5461 Åで2~3 Åあり、エレクトロレフレクタンスの測定には充分である。また回析格子としては測定波長領域に応じて、300, 600, 1200本/mmのものを用いた。また、ロックイン增幅器として、PAR (Princeton Applied Research)社のモデルHR-8とNF回路ブロック社のモデルLI-572Aを使用した。

電解液法においては、試料は劈開面を用いたが、劈開面の得られないものについては、カーボランダム、アルミナ(0.3 μ)で研磨した後、CH<sub>3</sub>OH+Br<sub>2</sub>でエッチした。電解液としては0.1規定のNH<sub>4</sub>Cl溶液を用いた。また対向電極として白金線を用いた。

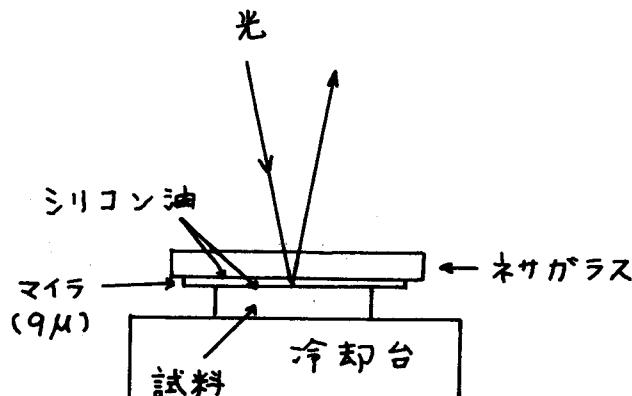


図4・6 コンデンサー法における試料構成

コンデンサー法では図4・6のように試料とネサガラスの間にシリコン油を塗ったマイラ(~9 μ)を挿入し電界を加えた。この方法ではマイラによる電圧降下のために変調用交流電圧が1000 V<sub>p-p</sub>程度必要であるし、クーロン力による機械的振動により-<sup>1/2</sup>効果が起るので不便であるが、低温で測定できる

利点がある。

#### 4・4 実験結果と検討

##### 4・4・1 HgTe のエレクトロレフレクタンス

図 4・7 に HgTe の電解液法によるエレクトロレフレクタンスのレコーダ・トレイスを示す。このスペクトルはすでに Cardona 達<sup>(3)</sup> が行った実験結果と良く一致している。Ge や GaAs などのエレクトロレフレクタンスの結果から類推して、図中、矢印で示したピーク位置が、図 4・2 に示したそれぞれの帯端における帯間遷移エネルギーに対応しているといえる。これより得られた各帯端のエネルギー値を反射測定や吸収の測定より得られた結果と比較して表 5・2 に示した。図 4・7 で明らかなように  $A_{4,5} - A_6 (E_1)$  帯端における遷移に対応する信号が他よりも、大きく、sharp であり、高エネルギー側に行くほど励起された電子の寿命が短くなり、Lifetime broadening によるエネルギー準位の“ばやけ”が大になるために信号が broad になっている。とくに  $E_2 (X_7 - X_6)$  の信号は小さく帯間遷移エネルギー（エネルギーギャップ）の決定にかなりの誤差が見込まれる。

HgTe のスペクトルをフォトンエネルギーになおして、第 3 章で求めた光学定数を使って、(4・13)～(4・15) の Kramers-Kronig 変換を行い  $\Delta \epsilon_1, \Delta \epsilon_2$  を求めた。ただし電解液の屈折率として、 $n_s = 1.33$  を用いた。この結果を図 4・8 に示す。いま周波数  $f$  Hz で変化している HgTe の表面電界が最小のときの  $\Delta R / R$  の信号が最大のときのそれに対して無視できるとして、（この条件は次のコンデンサ法による実験結果から満足されていると考えられる）図 4・8 のスペクトルと図 4・4 とを比較する。一般にある電界方向に対して、結晶構造が立方晶形である物質の  $E_1$  帯端 ( $<111>$  方向) に

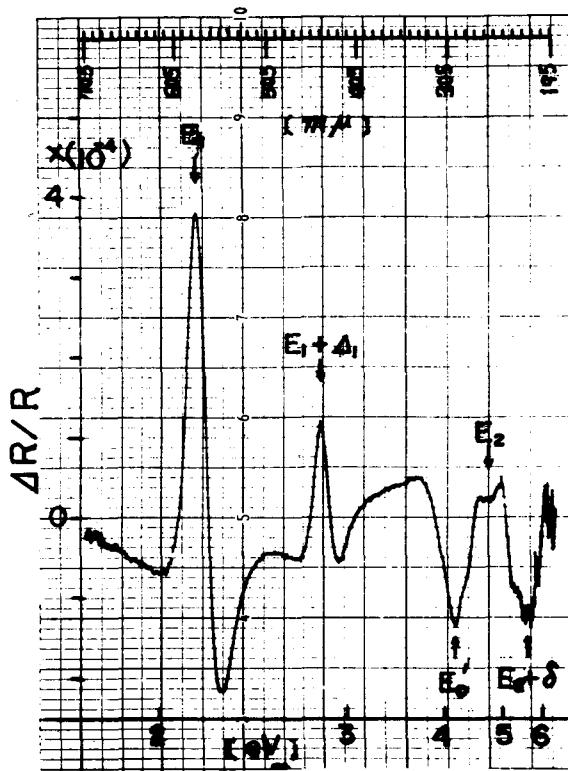


図 4・7 HgTe のエレクトロレフレクタンス信号のレコーダ・トレイス

しては、 $M_{1\perp}$ 型帶端が存在する場合、 $M_{1\parallel}$ 型帶端も同時に存在するが、横方向の有効質量より縦方向 ( $<1\ 1\ 1>$  方向) の有効質量の方がかなり大きいので、<sup>(11)</sup> (CdTe では約 10 倍) 縦方向からの寄与 ( $M_{1\parallel}$ ) は少なく、 $M_{1\perp}$  の寄与が大部分を占めることが予想される。ところが、図 4・8 においては、 $\Delta\varepsilon_1$  に対しては  $M_{1\perp}$  型、 $\Delta\varepsilon_2$  に対しては  $M_{1\parallel}$  型がよく対応する。しかし  $M_{1\perp}$  型からバンドギャップを決めるとき妥当な値になるのに対して、 $M_{1\parallel}$  型からこれを決めるとき若干大きな値になってしまふ。以上のように  $M_{1\perp}$  型だけで説明できない原因として  $M_{1\parallel}$  型の影響以外に thermal broadening と表面電界の不均一性が考えられる。後者の方はとくに HgTe (と HgSe) が

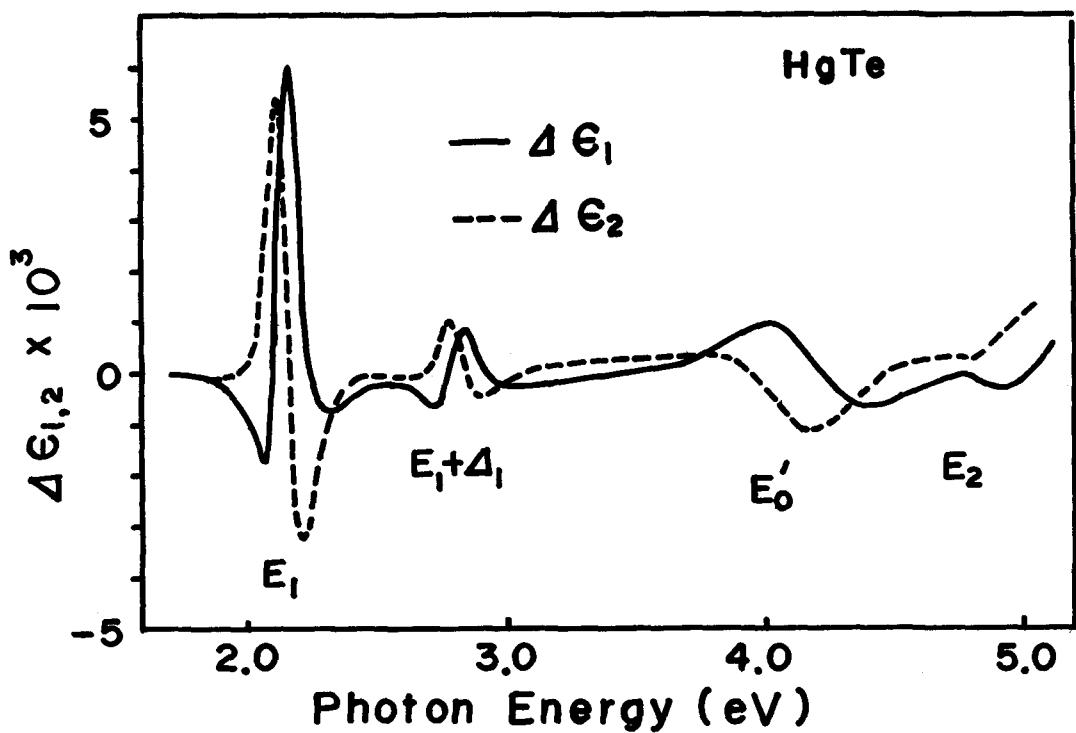


図 4・8 エレクトロフレクタンス信号を Kramers-Kronig  
変換して得た HgTe の  $\Delta\epsilon_1$  および  $\Delta\epsilon_2$

半金属であるために大きく影響すると思われる。コンデンサ法の場合にもそうであるが、これらの表面における電界はスクリーニング効果のために結晶内部にほとんど及んでいないと考えられるので、入射光はそれが結晶内を浸透する距離内で、著しく電界の変化した部分を透過することになる。Aspnes <sup>(12)(13)</sup> はこの電界の不均一性によって  $\Delta\epsilon_1$  と  $\Delta\epsilon_2$  の混合が起ることを報告している。

また HgTe と HgSe のエレクトロフレクタンスの信号が他の半導体に比べて比較的 broad であるのもこの電界の不均一性が、大きな原因になっているものと思われる。 $E_1 + \Delta_1$  帯端についても  $E_1$  とほぼ同じことが言える。 $E_0'$  については  $\Delta\epsilon_2$  のスペクトルが  $M_{1\perp}$  型によく合うが、信号が broad なので何と

も言えない。HgTe の電解液法によるエレクトロレフレクタンスの結果については第5章でも述べる。

ところで電解液法では高いフォトンエネルギー領域(～6 eV)まで測定可能であるし、反射率を数Vの交流電圧で変調できるという利点があるが、一方低温にできないという欠点がある。低温での実験を行うために、4・3節で述べたコンデンサ法でエレクトロレフレクタンスを測定した。この方法ではネガガラスを用いるためフォトンエネルギーが約3.7 eV以下の領域でしか測定ができない。

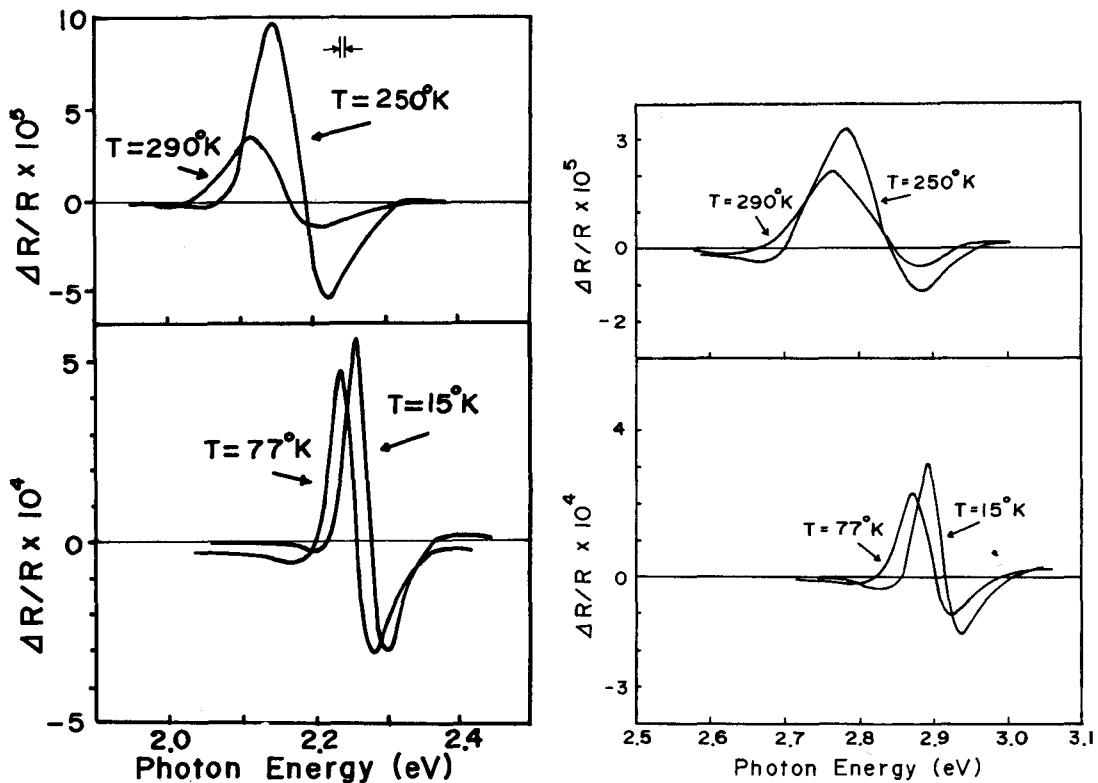


図4・9 HgTeの $E_1$ 帯端近傍(a)および $E_1 + A_1$ 帯端近傍(b)

におけるエレクトロレフレクタンス信号の温度依存性

図 4・9 ( a ) と ( b ) に  $E_1$  および  $E_1 + \Delta_1$  近傍のエレクトロフレクタンス・スペクトルを示す。図から明らかなように、 $T = 290^{\circ}\text{K}$  から  $77^{\circ}\text{K}$  に至るまでは、温度による broadening 効果が著しくきき、 $\Delta R / R$  のピーク値は約 12 倍にまでなっている。しかし  $77^{\circ}\text{K}$  と  $15^{\circ}\text{K}$  とではあまり変化がなく、この温度領域では、むしろ電界の不均一による broadening などによって信号が影響をうけていると考えられる。

図 4・10 にこれらの実験から得られた  $E_1$  および  $E_1 + \Delta_1$  帯端の温度依存性を示す。 $T = 15^{\circ}\text{K} \sim 250^{\circ}\text{K}$  の範囲では  $E_1$  および  $E_1 + \Delta_1$  はほとんど同じ温度依存性を示していて、スピン軌道分裂  $\Delta_1$  の温度依存性はほとんどないが、室温近くになると  $\Delta_1$  の値が大きくなる。この傾向は Cardona 達<sup>(1)</sup> の反射の実験においても報告されており興味深い。

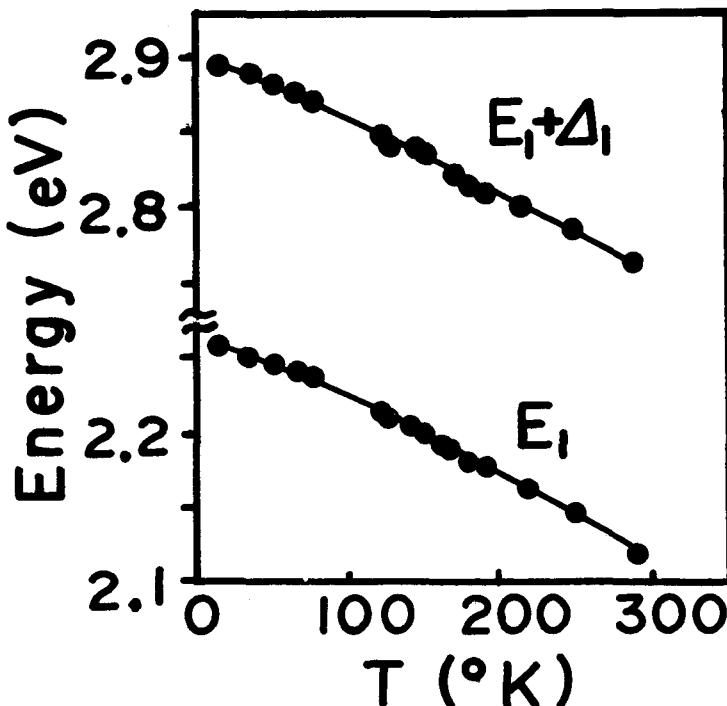


図 4・10 エレクトロフレクタンスの測定より求めた HgTe の  $E_1$  および  $E_1 + \Delta_1$  の温度依存性

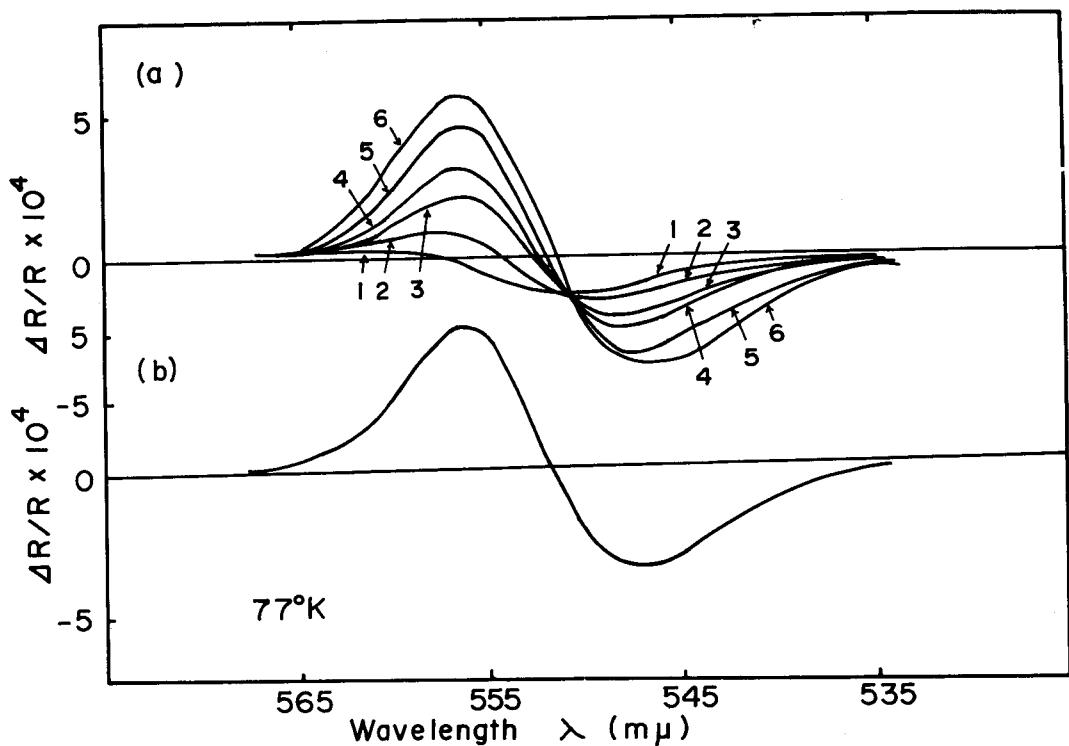


図 4・11  $E_1$  帯端近傍におけるエレクトロフレクタンス信号の直流バイアス電圧依存性。(a)  $V_{AC} = 1100 \text{ V}_{P-P}$ ,  $V_{DC}$ ,  
 $1: 1480 \text{ V}$ ,  $2: 1000 \text{ V}$ ,  $3: 600 \text{ V}$ ,  $4: 400 \text{ V}$ ,  $5: 0 \text{ V}$ ,  $6: -600 \text{ V}$ ,  
(b)  $V_{AC} = 2100 \text{ V}_{P-P}$ ,  $V_{DC} = 0 \text{ V}$

図 4・11 に  $\text{HgTe}$  の表面状態を調べるために直流バイアスを変化させて  $\Delta R/R$  を測定した結果を示す。図より電解液の場合と同じようにコンデンサ型においても外部より電場を印加しなくとも表面準位などの存在による表面電場が存在することが知れる。 $\text{HgTe}$  に正の電圧  $V_{DC}$  を加えてゆくとこの表面電場が小さくなり  $\Delta R/R$  の信号が小さくなる。 $V_{DC} \approx +1000 \text{ V}$  で  $\Delta R/R$  の正のピークと負のピークの大きさが入れかわる。したがってこのバイアス近傍で表面電場が無視できる状態になっていると考えられる。そこで試料表面の電

場が零から最大電場まで変化するように、直流バイアス電圧と交流電圧を印加して変調を行うと図4・11(b)のような形になり  $\Delta R/R$  の正のピークと負のピークの大きさの比は約1.5倍となった。この関係は図4・8の場合にもほぼ当はまっている。また図4・11(a)から高電場側では、正のピークに対応するエネルギー値にはほとんど変化がみられず、正のピークが帯端に対応すると考えるのが妥当であることが分る。表4・1にこの実験で得られた  $E_1$  および  $E_1 + \Delta_1$  の値を示す。

	HgTe		HgSe	
	$E_1$	$E_1 + \Delta_1$	$E_1$	$E_1 + \Delta_1$
室温	2.12	2.78	2.85	3.17
77°K	2.24	2.86	2.94 <sub>6</sub>	3.22 <sub>3</sub>
15°K	2.25 <sub>7</sub>	2.89 <sub>4</sub>		

表4・1 エレクトロフレクタンスの測定より求めた HgTe と HgSe の室温, 77°K, 15°K における  $E_1$  および  $E_1 + \Delta_1$  の値 (eV)

#### 4・4・2 HgSe のエレクトロフレクタンス

HgSe の電解液法による結果を図4・12に示す。  $E_1$  と  $E_1 + \Delta_1$  に関しては図中矢印で示したピークが吸収測定と反射測定による結果とほぼ一致する。 $E_0^l$  については Cardona 達<sup>(3)</sup> が求めた値よりも大きく  $E_0^l = 5.44$  eV の値が得られた。また図4・12において、4 eV 近傍に小さな信号が認められ、これは直流バイアス電圧によっても若干変化する。しかし HgSe においては、このフォトン・エネルギー近傍には帯端における直接帶間遷移がなく、また不純物やエキシトンに起因する遷移によるものとも考え難いので、現時点ではよく分っていない。

HgSe においても電解液法による結果を  $E_1$  帯端近傍で Kramers-Kronig 変換を行い、 $\Delta \epsilon_1$ ,  $\Delta \epsilon_2$  のスペクトルを得た。それを図4・13に示す。この

場合も HgTe の  $E_1$  帯端とほぼ同じように  $\Delta \epsilon_1$  では  $M_{1\perp}$  型が  $\Delta \epsilon_2$  では  $M_{1//}$  型がよく対応し,  $M_{1//}$  型をとれば帶端のエネルギー・ギャップが大きくなるという結果が得られた。

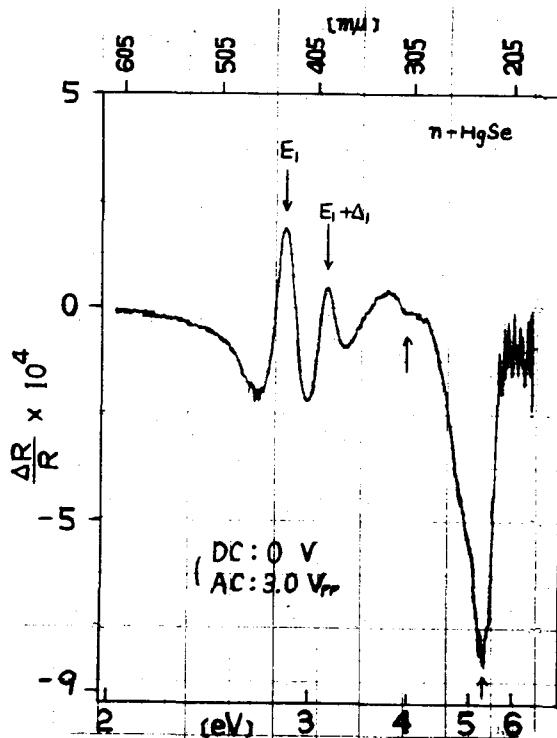


図 4・12 HgSe のエレクトロレフレクタンス信号のレコーダ・トレース

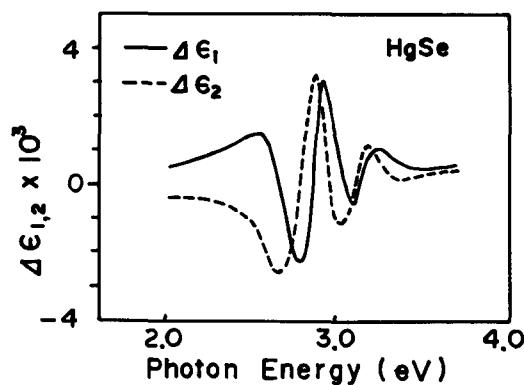


図 4・13 エレクトロレフレクタンス信号を Kramers-Kronig 変換して得た HgSe の  $\Delta \epsilon_1$  および  $\Delta \epsilon_2$

HgSe の場合には HgTe に比べてスピン軌道分裂  $A_1$  の値が小さく、室温では  $E_1$  と  $E_1 + A_1$  の信号が重なっている可能性がある。これを調べるためにコンデンサ法を用いて液体窒素温度で測定した。<sup>(5)</sup> 結果を図 4・14 に示す。また、図 4・15 (a)(b) に 4 つのピークのバイアス電圧依存性を示す。図 4・14 では  $E_1$  と  $E_1 + A_1$  がよく分解されており、また図 4・15 から (2)(4) の負のピークは表面電場が増加するにともない高エネルギー側に移動しているのに対し、二つの正のピークはほとんど変化していないところから、室温において  $E_1 + A_1$  に対応するとした正のピークが  $E_1$  構造に付随したピーク (Satellite peak) ではなくスピン軌道分裂帯端 ( $E_1 + A_1$ ) に対応することが明らかである。ただし HgSe に負の直流バイアスを加えると表面電場が増加するということは

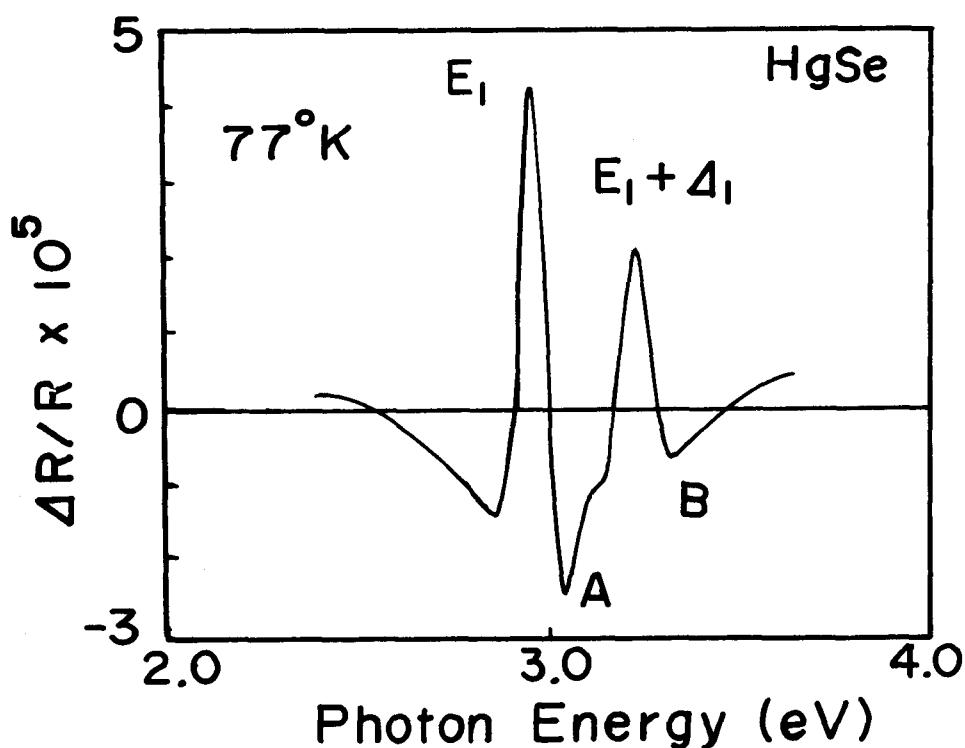


図 4・14 77°Kにおける HgSe の  $E_1$  帯端近傍のエレクトロレフレクタンス信号

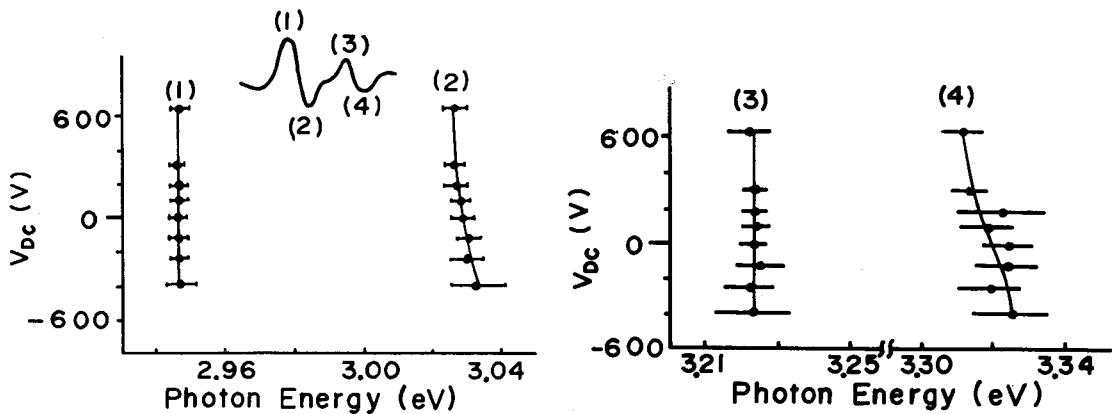


図 4・15 HgSe の 77 K におけるエレクトロレフレク

タンス信号の各ピークの直

流バイアス電圧依存性

$\Delta R/R$  のバイアス電圧依存性と  $\Delta R_f$  とその第 2 高調波  $\Delta R_{2f}$  を測定して  $\Delta R_f/\Delta R_{2f}$  の比を求めた結果より確認した。<sup>(14)</sup>

表 4・1 にこの実験で得られた  $E_1$  および  $E_1 + \Delta_1$  の値を示す。

#### 4・5 結言

本章ではエレクトロレフレクタンスに関する理論の概略を述べ帶間遷移と誘電率および電場による誘電率の変化とエレクトロレフレクタンスの関係などを明らかにした。

また HgTe と HgSe のエレクトロレフレクタンスを電解液法で測定し, バンド・パラメータ  $E_1$ ,  $E_1 + \Delta_1$ ,  $E_0'$ ,  $E_2$ ,  $E_2 + \delta$  の値を求めるとともに,  $E_1$  ( $\Delta_{4,5} - \Delta_6$ ) 帯端近傍で Kramers-Kronig 変換を行いその帯端の型などについて論じた。またコンデンサ法を用いて低温でエレクトロレフレクタンスの実験を行い, 低温における  $E_1$  と  $E_1 + \Delta_1$  の値を求めた。

## 第 4 章 参 考 文 献

- (1) M.Cardona and D.L.Greenaway, Phys.Rev. **131**(1963)98
- (2) M.Cardona and G.Harbeke. J.APP1.Phys. **34**(1963)813
- (3) M.Cardone, K.L.Shaklee and F.H.Pollak, Phys.Rev. **154**(1967)  
696
- (4) W.J.Scouler and G.B.Wright. Phys.Rev. **133**(1964)736
- (5) A.Moritani, C.Hamaguchi and J.Nakai, J.Phys.Soc.Japan. 投稿中
- (6) J.Callaway, Phys.Rev. **130**(1963)549
- (7) J.Callaway, Phys.Rev. **134**(1964)A998
- (8) K.Tharmalingam, Phys.Rev. **130**(1963)2204
- (9) D.E.Aspnes, Phys.Rev. **147**(1966)554
- (10) D.E.Aspnes, Phys.Rev. **153**(1967)972
- (11) M.Cardona, "Solid State Physics.SUPPL.11" edited by F. Seitz. D.Turnbull and H.Ehrenreich(1969). Academic Press, New York and London.
- (12) D.E.Aspnes and A.Frova, Solid State Commun. **7**(1969)155
- (13) A.Frova and D.E.Aspnes, Phys.Rev. **182**(1969)795
- (14) Y.Hamakawa, F.A.Germano and P.Handler, Phys.Rev. **167**(1968)  
709
- (15) T.C.Harman, "II-VI Compounds" North Holland Publ.Co. Amsterdam (1967)767

## 第 5 章 $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ のエレクトロレフレクタンス

### 5・1 緒言

最近  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  は物理学的にも応用的にも非常に注目を浴びてきた。応用面では高速度応答遠赤外検知器として炭酸ガスレーザ用に開発されつつある。<sup>(1)</sup> また混晶比  $x$  を変えることにより  $1.3 \mu$  以上の任意の波長領域に最大感度を有する検知器を製作することもできる。一方物理的には、 $x \approx 0.1$  で  $\Gamma_6$  と  $\Gamma_8$  状態に対応するバンドが入換るという興味深い問題がある。<sup>(2)</sup> ところで  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  の基礎吸収端におけるエネルギー・ギャップの混晶比依存性について吸収測定、光伝導特性、magneto-reflectivity などの実験により、多くの研究者<sup>(3)～(5)</sup>によって、報告がなされているが、吸収端以上の帶間遷移の混晶比依存性については、ほとんど報告されていない。<sup>(6)(7)</sup> これらのエネルギー・ギャップの混晶比依存性を求ることにより、 $\Gamma$  点における  $\Gamma_6$  と  $\Gamma_8$  の反転が基礎吸収端に影響するかどうかを調べるのも興味深い。

$\text{HgTe}$  と  $\text{CdTe}$  は共に、閃亜鉛鉱型の結晶構造であり、格子定数<sup>(2)</sup> あまり違わず、またどのような混晶比においても合金が存在する<sup>(8)</sup>、いわゆる全率固溶体である点などを考慮すると、混晶の結晶ボテンシャルを混晶比にしたがって平均化してしまう virtual-crystal 近似<sup>(9)</sup> からは、各バンド・ギャップは混晶比とともに、なめらかな変化をたどることが予想される。甲木と国宗<sup>(10)</sup> は  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  のバンド構造を Pseudopotential 法で 計算して、各バンド・ギャップが混晶比  $x$  とともに直線的に変化するという結果を報告している。一方 Thompson と Woolley<sup>(11)</sup> は、III-V 族半導体混晶の基礎吸収端の混晶比依存性を調べ、エネルギー・ギャップと混晶比間の経験式を得ている。彼らは、非周期的な結晶ボテンシャルに起因する項が、 $x(1+x)$  の二次形式で与え

られると考え、 $E_0 = a + b x + c x^2$  の関係式を得ている。ここで  $c$  は non linear-  
ar 又は bowing parameter と呼ばれ、 $x = 0.5$  における直線からのズレの  
4 倍に等しい値である。最近 Van Vechten と Bergstresser<sup>(12)</sup> は dielectric-  
tic two band model にもとづく計算より非周期的な結晶ボテンシャルを除  
いた virtual-crystal 近似においてもバンドギャップの非直線的な混晶比依存  
性が存在し得ることを示し、bowing parameter  $c$  が非周期的ボテンシャル  
に起因する extrinsic bowing parameter  $c_e$  と virtual-crystal 近  
似のみに起因する intrinsic bowing parameter  $c_i$  の和となることを報告  
告している。

本章では主としてエネルギー・ギャップの混晶比依存性に注目して、HgTe,  
CdTe および  $Cd_x Hg_{1-x} Te$  のエレクトロレフレクタンスを電解液法で測定し  
た結果について述べ、上述の dielectric two band method を用いた若干  
の検討を行う。またこれまで実験的に求められていない HgTe のスピン軌道分  
裂  $\Delta$  の測定結果についても、混晶比依存性などから、検討を加える。<sup>(13)(14)</sup>

## 5・2 実験装置および方法

1.8 ~ 6 eV のフォトン・エネルギー領域の実験には第 4・5 図の装置を使  
用したが、0.45 ~ 1.8 eV の領域では検知器として PbS を用いるため、第  
4・5 図のような帰還ループは PbS の追随性に問題があって、使用できない。  
そこで図 5・1 のように反射光の直流成分に比例する量として光源に含まれる  
120 Hz のリップル分を一方のロックイン増幅器で測定し、これが一定になる  
ようにサーボ機構を通して分光器のスリットを制御する方法を用いた。従って  
変調分  $\Delta R$  を増幅するに使用されている他方のロックイン増幅器の出力がその  
まま  $\Delta R / R$  に比例する量となり、これが記録計に記録される。

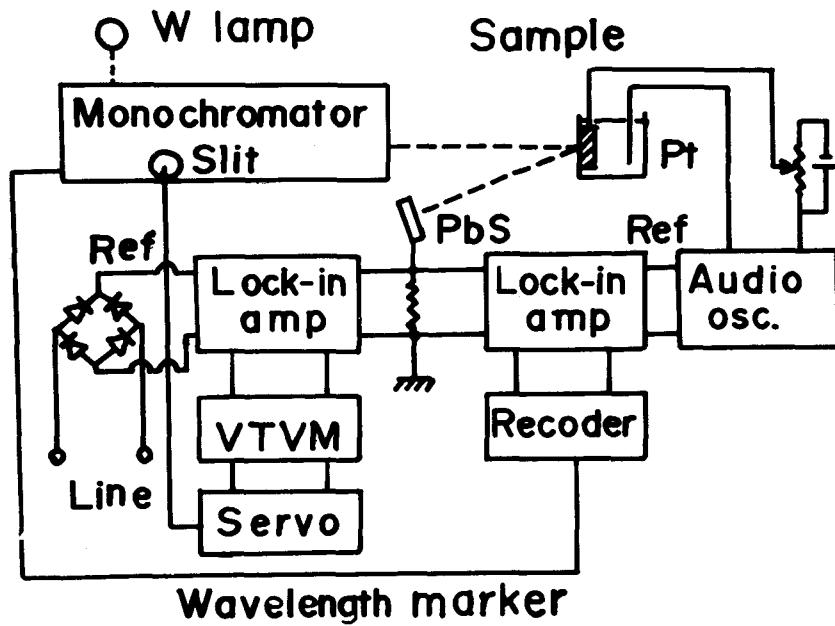


図 5・1 0.45 ~ 1.8 eV のフォトンエネルギー領域における  
エレクトロレフレクタンスの測定に用いた測定系

電解液は波長が  $1\text{ }\mu$  近傍から O H 基による吸収が始まるのでそれ以上の波長  
領域では通常使用されないが、比較的その吸収係数が小さいため、光路長を短  
くすれば、電解液による影響は無視でき、長波長領域でも使用可能である。<sup>(15)(16)</sup>  
ここでは、電解液セルの石英窓と試料の間に  $12\text{ }\mu$  のマイラをスペイサーとし  
て挿入することによって光路中における電解液の部分を短くした。

### 5・3 実験結果

#### 5・3・1 エレクトロレフレクタンス・スペクトル

図 5・2 の (a) ~ (d) に  $1.8 \sim 6\text{ eV}$  のフォトンエネルギー領域における  
 $\text{HgTe}$ ,  $\text{Cd}_{0.20}\text{Hg}_{0.80}\text{Te}$ ,  $\text{Cd}_{0.30}\text{Hg}_{0.70}\text{Te}$ ,  $\text{Cd}_{0.35}\text{Hg}_{0.65}\text{Te}$ ,  $\text{Cd}_{0.45}$

$Hg_{0.55}Te$ ,  $Cd_{0.7}Hg_{0.3}Te$ ,  $Cd_{0.97}Hg_{0.03}Te$ ,  $CdTe$  のエレクトロレフレクタンス・スペクトルを示してある。  $HgTe$  と  $CdTe$  のスペクトルは  $CdTe$  における 5.8 eV 近傍のピークを除いては以前 Cardona 達<sup>(17)</sup> が報告した結果と良く一致している。図 5・2 より  $x = 0.97$  を除いた混晶 ( $0 < x \leq 0.7$ ) のスペクトルは  $CdTe$  よりもむしろ,  $HgTe$  のスペクトルに類似していることが分る。

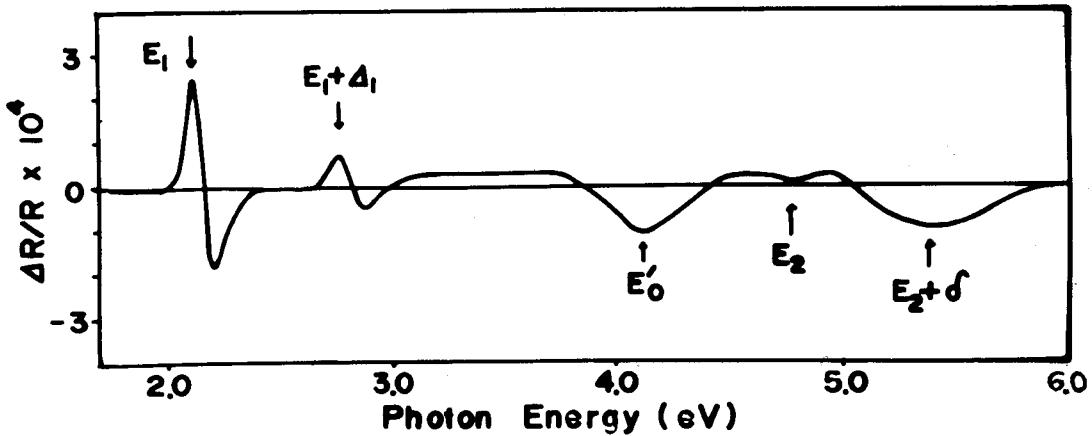


図 5・2 1.8 ~ 6 eV のフォトンエネルギー領域におけるエレクトロフレクタンス信号 (a)  $HgTe$ ,

図 5・3 の (a)~(c) に  $0.4 \sim 2$  eV のフォトン・エネルギー領域における  $HgTe$ ,  $Cd_{0.12}Hg_{0.88}Te$ ,  $Cd_{0.20}Hg_{0.80}Te$ ,  $Cd_{0.29}Hg_{0.71}Te$ ,  $Cd_{0.50}Hg_{0.50}Te$ ,  $Cd_{0.67}Hg_{0.33}Te$  のエレクトロレフレクタンス・スペクトルを示してある。図から明らかなように、この範囲には二つのピークが見られ、その符号は  $HgTe$  や混晶の  $E_1$  帯端における正のピークと一致している。一般に混晶 (とくに  $x$  が大きい範囲の混晶) を使用した場合には  $HgTe$  や  $CdTe$  に比べて、雑音が大きく、信号が小さいので、高いフォトンエネルギー領域にある  $E_2$  および  $E_2 + \delta$  の信号はしばしば観測できなかった。また信号の形もしばしば再現性の乏しい結果が得られた。これは電解液と試料が印加電界のもとで化学反

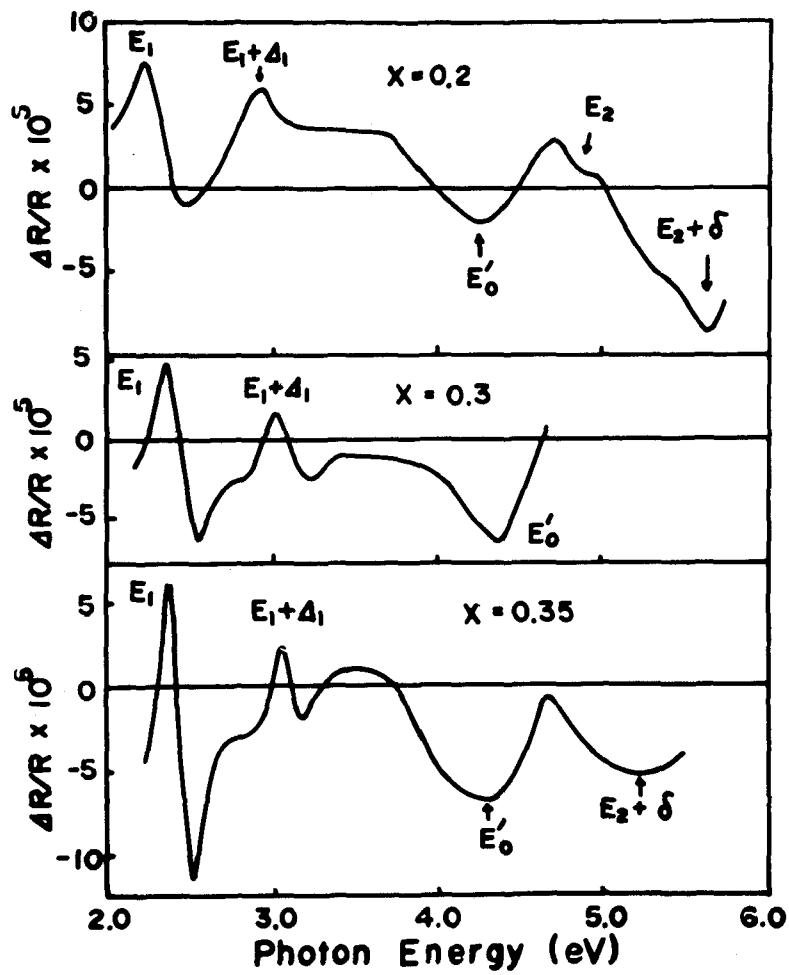


図 5・2 (b)  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$

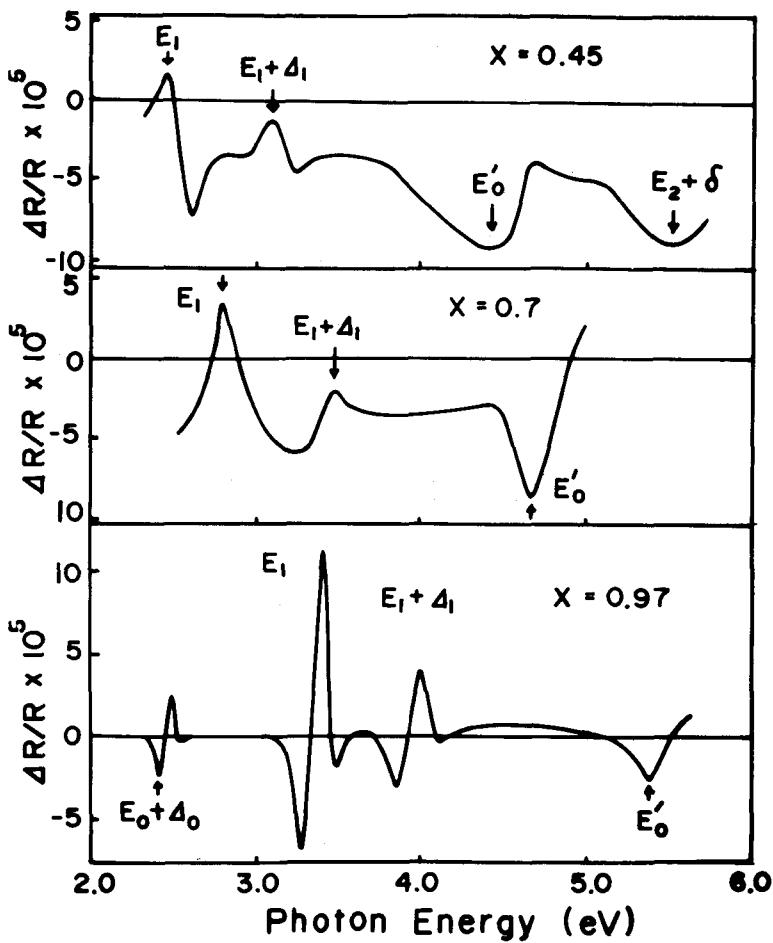


図 5・2 (c)  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$

応を起して、表面の反射率が下がるために外部から大きい交流電圧や直流バイアス電圧を加えれば加えるほどこの表面損傷は著しくなる。このため混晶にはなるべく小さい変調用交流電圧を用い、多くの場合直流バイアスは加えなかつた。また混晶においては4章で述べた熱による broadening や表面電界の不均一による broadening 以外に混晶の不均一性や混晶生成時の“ひずみ”などによる broadening 効果によって信号が両端の物質 ( $\text{HgTe}$ ,  $\text{CdTe}$ ) より小さ

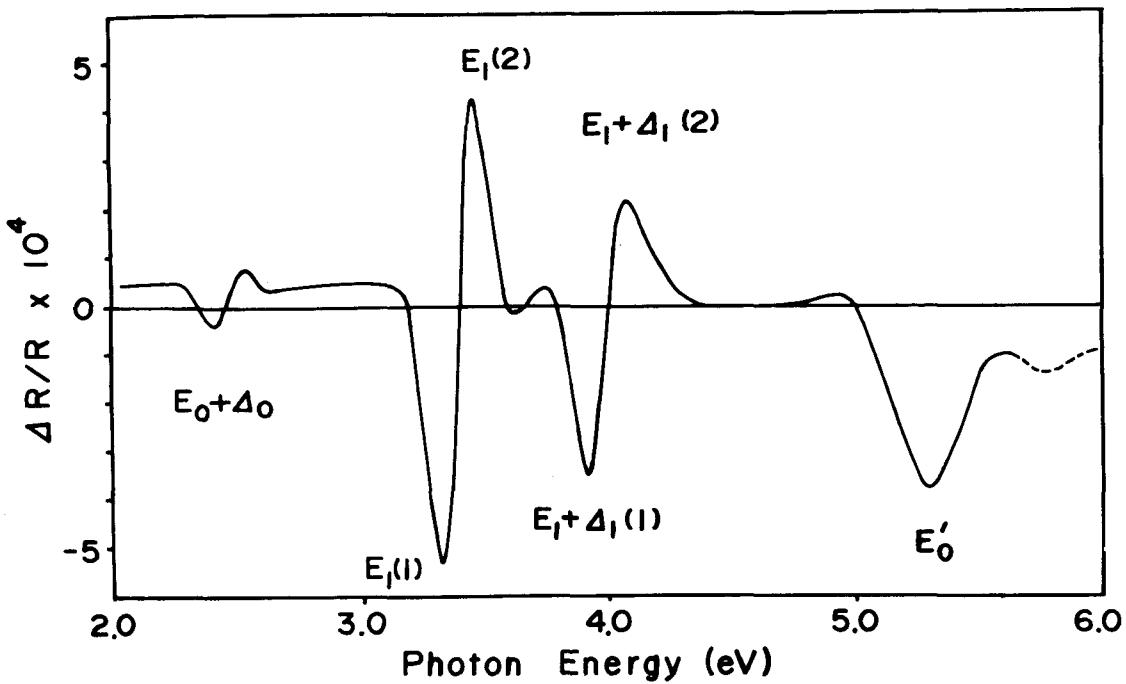


図 5・2 (d) CdTe

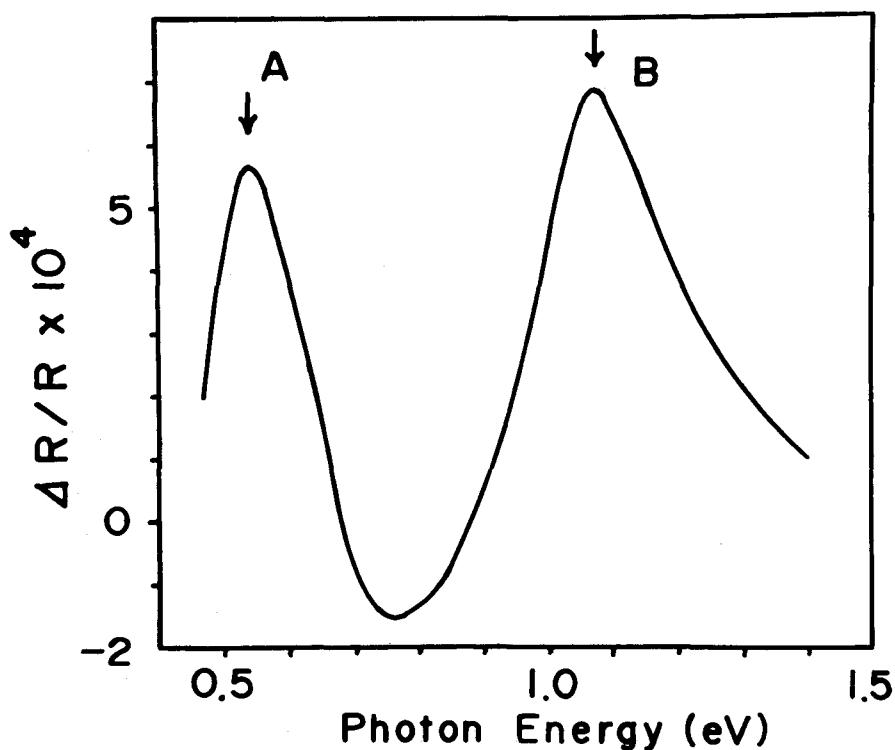


図 5・3 0.45~1.8 eV のフォトンエネルギー領域におけるエレクトロ  
レフレクタンス信号 (a) HgTe

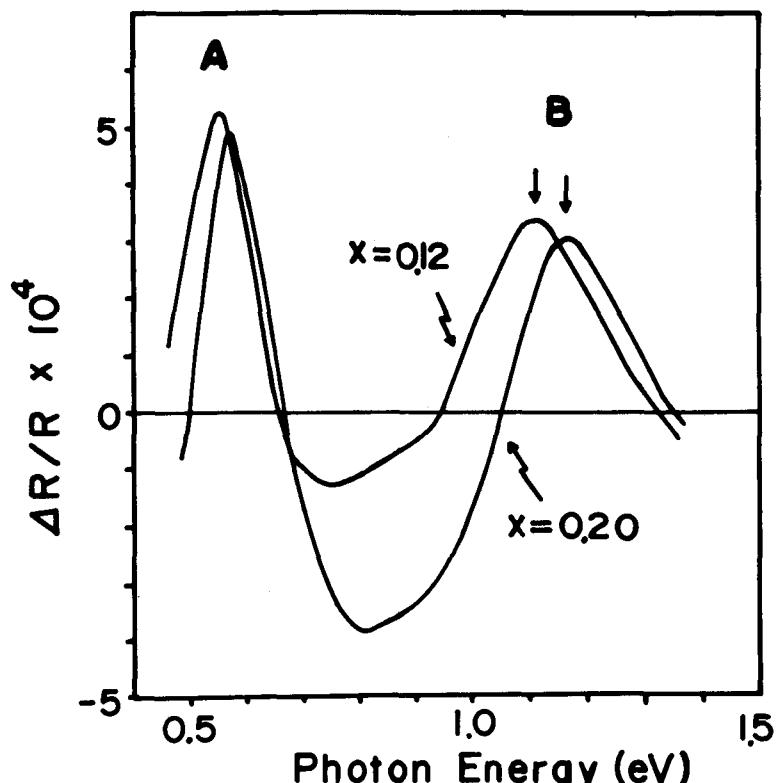


図 5・3 (b)  $Cd_xHg_{1-x}Te$

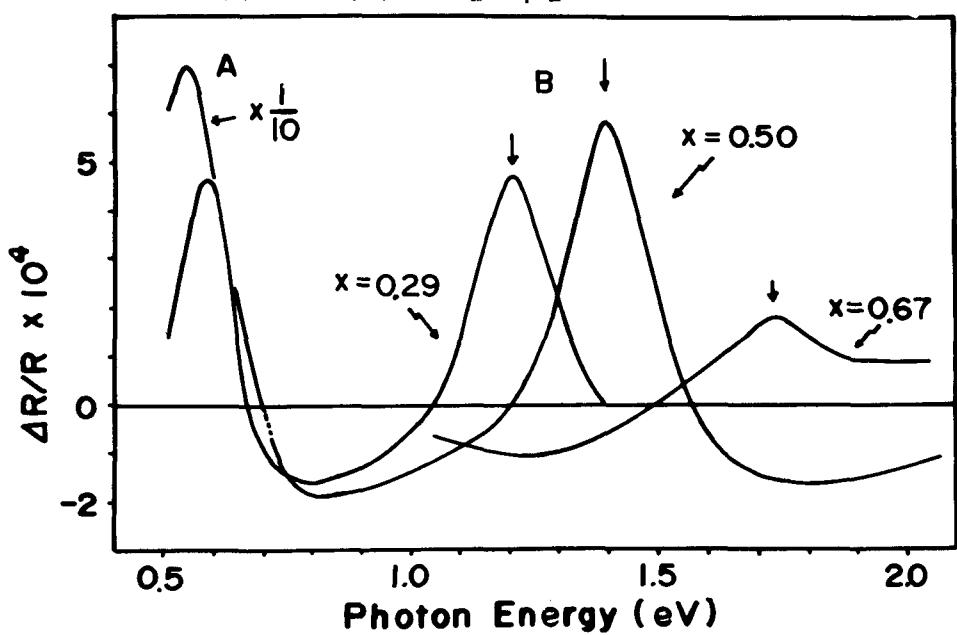


図 5・3 (c)  $Cd_xHg_{1-x}Te$

くなることが考えられる。

### 5・3・2 $E_0 + A_0$ および $A_0$

図5・3(a)のHgTeのスペクトルにおける二つのピークA, Bに対応するフォトン・エネルギー値は0.56 eVと1.08 eVである。これら二つのピークは図5・3(b), (c)にも見られる。この二つのピークA, Bに対応するエネルギー値の混晶比に対する変化の様子を図5・4に示す(●)。図5・4より明らかなように、混晶比xを0(HgTe)から1(CdTe)へと増加してゆくにつれて、ピークBの方は、ほぼ放物線的に変化して  $Cd_{0.97}Hg_{0.03}Te$  や CdTe の  $E_0 + A_0$  の値につながる。のに対してピークAの方はほとんど変化していない。Williams<sup>(18)</sup>も  $Ga_xIn_{1-x}As$  のエレクトロレフレクタンスの測定で  $E_0 + A_0$  に対応する信号として、図5・3と同じような、broadで構造のない、単なる一つのピークだけからなるスペクトルを得ている。これらA, Bの信号が真に帯間遷移によるものか、あるいは電解液や光学系の影響かどうかを調べるために低温でコンデンサ法を用いて実験を行ったが、やはり同じような結果が得られた。以上の事実よりピークBを  $x > 0.1$  の範囲では  $\Gamma_7 - \Gamma_6$  間の遷移 ( $E_0 + A_0$ ) に起因する信号とみなすことができる。ところが  $x < 0.1$  では、 $\Gamma_6$  と  $\Gamma_8$  が反転しているので、この信号は  $\Gamma_7 - \Gamma_8$  間の遷移 ( $A_0$ ) によるものと考えるのが妥当である。というのは選択側からは  $\Gamma_7 - \Gamma_8$  は許容遷移であるし、<sup>(19)</sup> 反転した後は、フェルミレベルの位置を考えると、xが0.1から0まで減少するにつれて、 $\Gamma_6$  レベルは電子で満され、 $\Gamma_7 - \Gamma_8$  間の遷移確率は  $\Gamma_7 - \Gamma_8$  間に比べて著しく減少すると考えられるからである。従ってピークBに対応するエネルギーが  $x < 0.1$  の範囲ではそのままスピン軌道分裂  $A_0$  の値を表わしていることになる。(図5・5参照)ただしフェルミレベルが  $\Gamma_8$  の伝導帯の底より上にあれば、このエネルギー値は  $\Gamma_7$  からフェルミ面までの遷移に

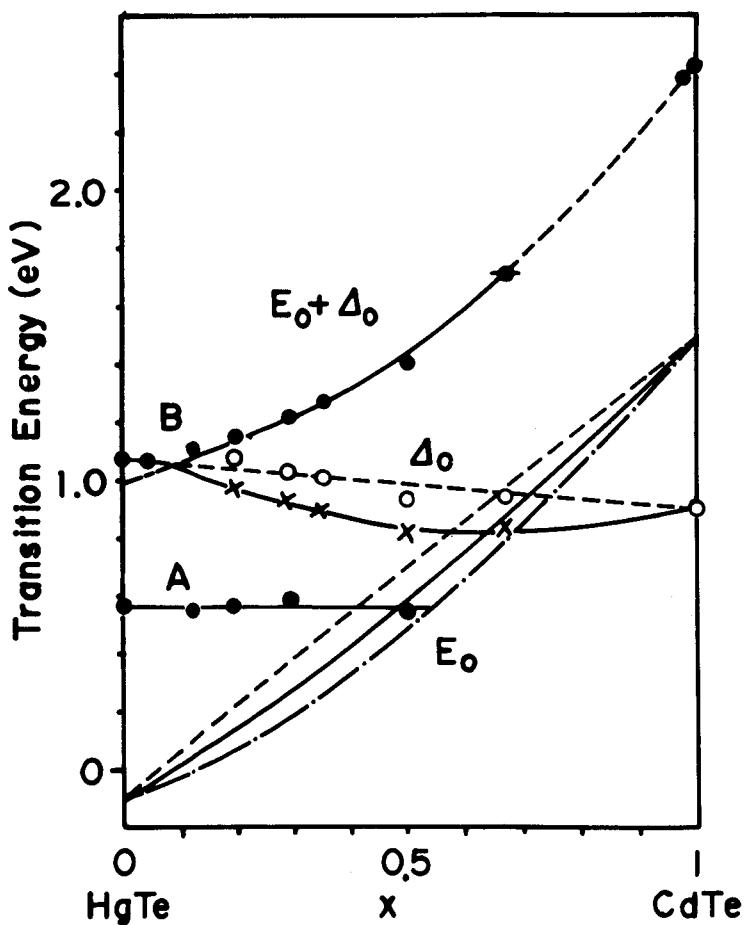


図 5・4  $\text{Cd}_x \text{Hg}_{1-x} \text{Te}$  の  $E_0$ ,  $E_0 + \Delta_0$  および  $\Delta_0$  の混晶比依存性

● : エレクトロフレクタンスより得られた  $\Delta_0$  ( $0 \leq x < 0.1$ )  
 および  $E_0 + \Delta_0$  ( $0.1 < x \leq 1$ ) の混晶比依存性. ---- : 直線的  
 変化の場合, — および × :  $r_v = 1.04 r_{IV}$  と仮定して得られ  
 た  $E_0$  の計算結果およびこれと  $E_0 + \Delta_0$  の実験値より得られた  
 $\Delta_0$  の値, - - - および ○ :  $r_v = 1.08 r_{IV}$  と仮定して得られ  
 た  $E_0$  の計算結果およびこれと  $E_0 + \Delta_0$  の実験値より得られた  $\Delta_0$   
 の値.

対応することになるが、P型のHgTeにおいては、フェルミレベルは $\Gamma_8$ 近傍の価電子帯の頂上より上には存在しないと考えられる。伝導帯の底から、この価電子帯の頂上までは約0.02 eVあり、この値は実験誤差限界と一致している。

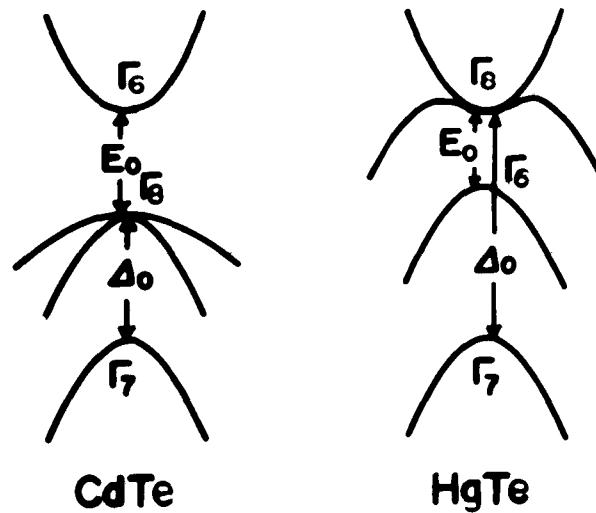


図5・5 CdTe(a)とHgTe(b)の $\Gamma$ 点近傍におけるエネルギー帯構造

HgTeのスピン軌道分裂 $\Delta_0$ の理論計算値は幾人かの研究者<sup>(10)(20)～(22)</sup>によって報告されている。これらの値を実験値とともに表5・1に示す。これら両者の値はほぼ一致しており、このことからもピークBを $\Delta_0$ に対応する信号であるとするのが妥当であることが分る。一方ピークAに関してはそれが、 $\Gamma_6$ ～ $\Gamma_8$ 間の直接遷移によるものか他の原因（自由電子による吸収、電解液の影響など）によるものか、現在のところ何ともいえない。図5・4には $E_0$ と $\Delta_0$ の混晶依存性も示してあるが、これについては5・4節で述べる。

### 5・3・3 $E_1$ および $E_1 + \Delta_1$

図5・2から分るように、混晶( $0 < x \leq 0.7$ )の $E_1$ 帯端近傍におけるスペクトルはHgTeのそれに類似している。そして第4章で述べたようにHgTe

Sobolev <sup>(21)</sup>	1.20 (Ions) 0.98 (Atoms)
Cardona <sup>(20)</sup>	1.21
Verie <sup>(22)</sup>	1.10
Katsukii <sup>(10)</sup>	0.89 (77K)
Present Work	1.08 ± 0.02

表5・1 スピン軌道分裂  $A_0$  の理論値と実験値 ( eV )

の  $E_1$  帯端においては最初の正のピークがバンド・ギャップによく対応している。しかし CdTe ( 図 5・2 (d) ) では最初の負のピークが反射測定の結果とよく一致し、次の正のピークが吸収測定の結果とよく対応する。従って CdTe ではバンド・ギャップとして負のピークに対応するエネルギー値  $E_1(1)$  と正のピークに対応するエネルギー値  $E_1(2)$  の二つの可能性があり、従って  $0.7 < x < 0.97$  の範囲では  $E_1(1)$  のピークが育ってきて、混晶比依存性が二通りに別れると考えられる。これにともなって  $E_1 + A_1$  にも二通りの混晶比依存性が考えられる。この様な状況は  $Ga_x In_{1-x} As$ <sup>(23)</sup>においても報告されている。図 5・6 に  $E_1$  および  $E_1 + A_1$  帯端におけるエネルギー・ギャップの混晶比依存性を示す ( ● )。ただし図には  $E_1(1)$ ,  $E_1 + A_1(1)$  の場合だけを示してある。図には Galazka と Kisiel<sup>(6)</sup> の反射測定の結果 ( × ) と Ludeke と Paul<sup>(7)</sup> の吸収測定の結果 ( ○ ) も示してある。この図にみられるように本実験では Ludeke らの直線的変化とは異なり  $E_1$  と  $E_1 + A_1$  はほぼ放物線型の変化を示しており、また、Galazka らが見出した  $0 < x < 0.1$  領域の異常な変化はみられなかった。そして  $x \approx 0.1$  前後でなめらかな変化を示しているところから  $\Gamma$  点におけるバンドの反転の影響は受けていないと考えられる。L 点近傍のバンドの変化の様子を図 5・7 に示す。 $\Gamma$  点と L 点の compatibility relation は  $\Gamma_8 \leftrightarrow L_4, L_5, L_6, \Gamma_6 \leftrightarrow L_6$  なので  $x$  が 0 から増加していくと反転を起すと  $\Gamma_6$

は価電子帯側の  $L_u$  状態から伝導帯側の  $L_u$  状態につながってゆき,  $L$  点 ( $A$  点) には何ら変化は起らないことになる。

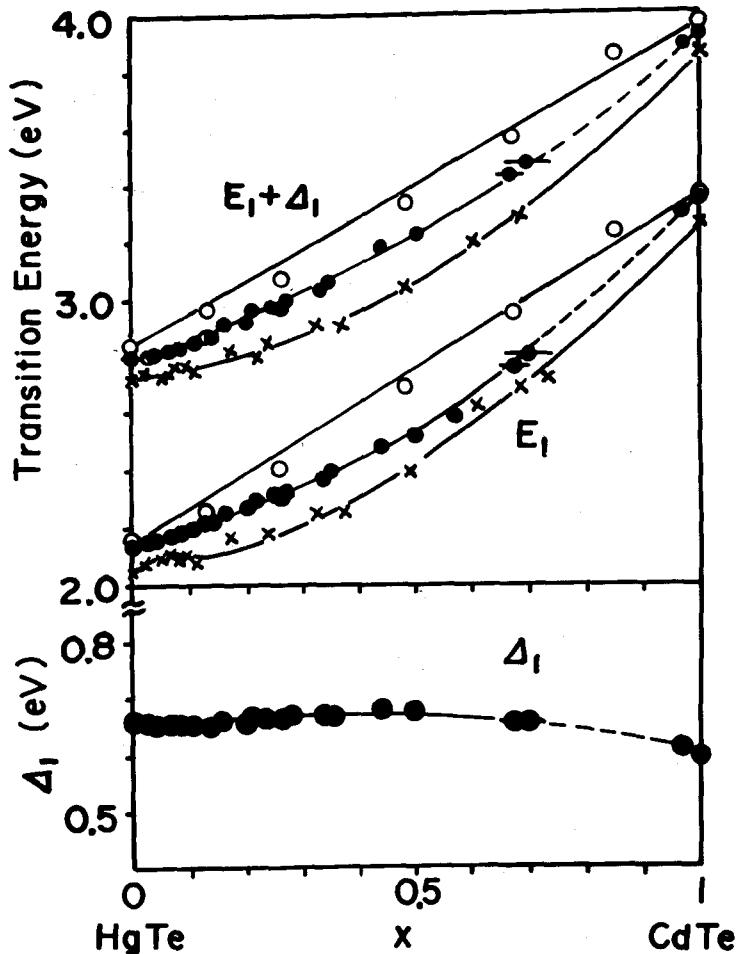


図 5 · 6  $E_1$ ,  $E_1 + \Delta_1$  および  $\Delta_1$  の混晶比依存性, ●: エレクトロフレクタンスより得られた値, ○: 吸収測定より得られた値<sup>(7)</sup>, ×: 反射測定より得られた値<sup>(6)</sup>

このようにして得られた  $E_1$  と  $E_1 + \Delta_1$  の混晶比依存性を用いることにより逆に混晶比が未知の結晶についてエレクトロフレクタンスを測定することにより簡単にかつ非破壊的に混晶比が求められることになる。とくに  $E_1$  近傍の

信号は他に比べて sharp であり、使用波長もほぼ可視領域にあり測定しやすい。また試料面に当る入射光ビームを小さくしてやれば、その混晶の試料表面の不均一性に関する情報をも得ることができるとと思われる。

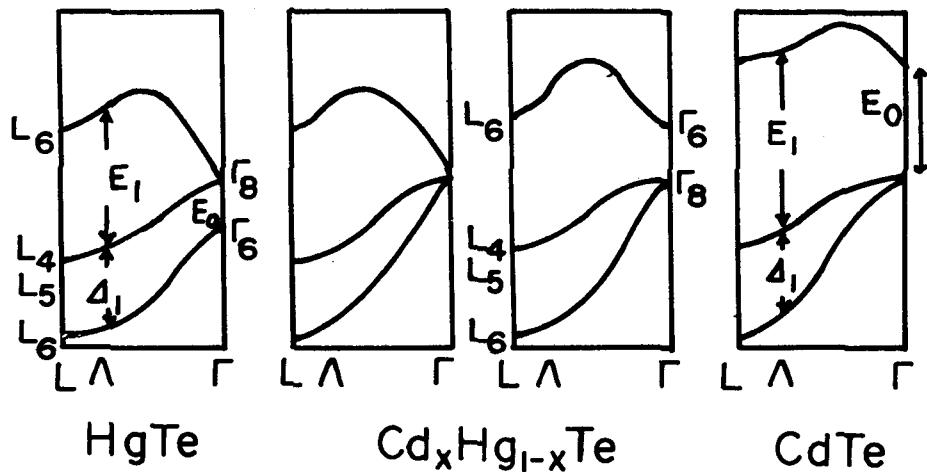


図 5・7  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  の L 点近傍のエネルギー帯構造の変化の様子

図 5・6 には  $A_1$  の混晶比依存性も示してある。 $A_1$  は  $0 \leq x \leq 0.7$  の範囲ではほとんど変化せず一定であるとみなせる。この理由として  $x$  の増加とともに  $A$  線上 ( $<111>$  方向) の帯端の位置が移動してゆくことが考えられる。<sup>(24)</sup>

5・3・4  $E'_0$ ,  $E_2$  および  $E_2 + \delta$

$E'_0$ ,  $E_2$ ,  $E_2 + \delta$  の混晶比依存性を図 5・8 に示す。図には比較のために Ludeke と Paul の吸収測定の結果も示してある (×)。CdTe については彼らの  $E_2$  に対応するエネルギー値は本実験における  $E'_0$  とほとんど一致している。しかしながら図 5・8 は CdTe のエレクトロレフレクタンスから得られる 5・3・4 eV の信号は  $E'_0$  とみなすべきであることを示している。 $E'_0$  との混晶比依存性において  $0 < x < 0.3$  の範囲で若干の放物線的変化からのズレがみられる。これについては説明が困難であるように思われるが、 $E'_0$  の遷移が起る場所が  $\Gamma$  点近

傍であり、かなり広い  $k$  ベクトルの範囲にあることを考慮すると、図 5・5 の HgTe のバンド構造に示されているように、 $\Gamma_8$  近傍の価電子帯 (higher-lying valence band) の形が  $x$  の増加とともに変るため遷移する場所が移動することも考えられる。

$E_2$  は  $0 \leq x < 0.4$  の範囲では混晶比  $x$  とともにほぼ直線的に変化している。これを延長すると CdTe では  $E_2 \approx 5.6$  eV の値が得られる。

$E_2 + \delta$  もほぼ  $x$  とともに直線的に変化している。これを CdTe まで延長すると  $E_2 + \delta$  の値として約 5.8 eV が得られるが、この値は CdTe のエレクトロフレクタンスより得られた 5.77 eV における信号のピークとほぼ一致している。

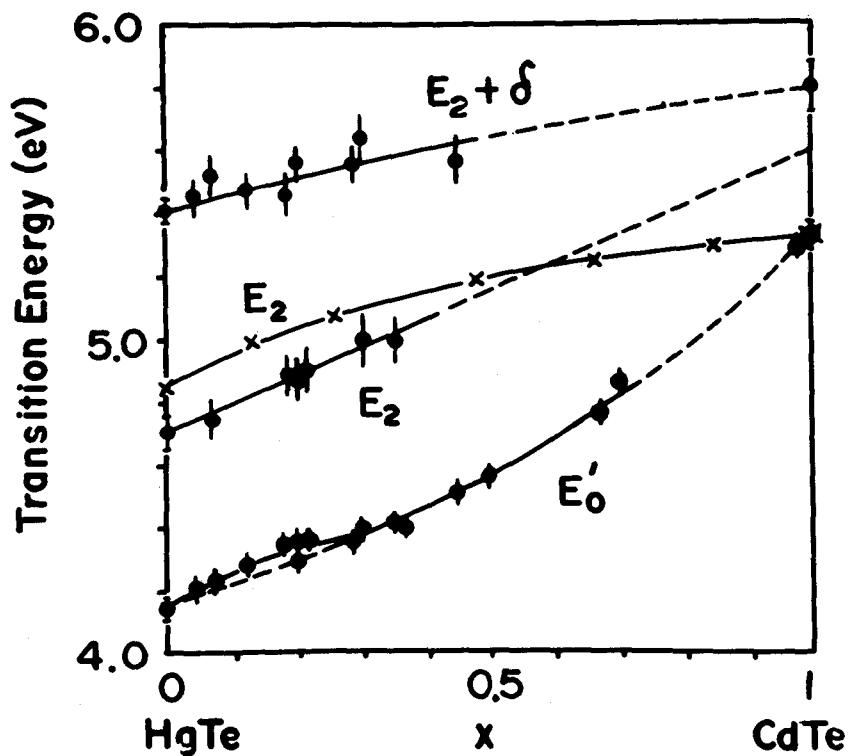


図 5・8 エレクトロフレクタンスより得られた  $E'_0$ 、 $E_2$  および  $E_2 + \delta$  の混晶比依存性。 (×) は吸収測定より得られた結果 (7)

Hengehold と Fraimé<sup>(25)</sup> は  $\text{CdS}_{1-x}\text{Se}_x$  の反射測定より、フォトン、エネルギーの小さい遷移においては、バンド・ギャップは  $x$  とともに下に凸の放物線型の変化を示すが、高エネルギーの場合の遷移では直線かまたは上に凸の放物線型の変化になることを報告している。 $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  についても、このことが言えるようである。これらの結果については dielectric two band method を用いて、5・4 節で検討する。

比較のために吸収測定反射測定およびエレクトロフレクタンスより得られた  $\text{HgTe}$  と  $\text{CdTe}$  の各バンド ギャップの値を表 5・2 に示す。

	CdTe					HgTe				
	$E_1$	$E_1 + \Delta$	$E'_0$	$E_2$		$E_1$	$E_1 + \Delta$	$E'_0$	$E_2$	$E_2 + \delta$
Cardona <sup>(29)</sup>	3.32	3.88	5.16	5.40	—	2.09	2.71	4.03	4.84	—
Ludeke <sup>(7)</sup>	3.39	3.99	—	5.32	—	2.15	2.85	—	4.84	—
Cardona <sup>(17)</sup>	3.28	3.87	5.30	—	—	2.12	2.78	4.14	4.79	5.24
Galazka <sup>(6)</sup>	3.28	3.86	—	—	—	2.06	2.73	—	—	—
Present work	3.31	3.91	5.34	~5.56	~5.77	2.12	2.78	4.14	4.70	5.40

表 5・2 おもなエネルギー・ギャップの実験値 ( eV )

## 5・4 検討

### 5・4・1 エネルギー・ギャップの混晶比依存性

5・1 節でも述べたように最近 Van Vechten<sup>(26)</sup> は  $\text{A}_N\text{B}_{8-N}$  ( $N = 1 \sim 4$ ) 形式の半導体のバンド構造を計算する方法として dielectric two band method を確立し、これを Van Vechten と Bergstresser<sup>(12)</sup> は半導体混晶に適用し、各帯端におけるエネルギー・ギャップの混晶比依存性を計算して、エ

## ネルギーギャップと混晶比間の経験式

$$E_i = a + b x + c x^2 \quad (5 \cdot 1)$$

に理論的な説明を与えている。ここに  $a$ ,  $b$  は両端 (0, 1) の  $E_i$  の値から決められる。彼らは直線的な変化からのズレを表わす **bowing parameter**  $c$  が **intrinsic parameter**  $c_i$  と **extrinsic parameter**  $c_e$  の和で表わされるとした。前者は結晶ポテンシャルを混晶比に従って平均化する **virtual-crystal** 近似から得られる。後者については混晶の置換原子、たとえば、 $Cd_xHg_{1-x}Te$  では、 $Cd$  と  $Hg$  が完全に不規則的に配列していると考え、実際のポテンシャルには **virtual-crystal** 近似におけるポテンシャルに加えて、これらの置換原子によるポテンシャルの“ゆらぎ”があり、この“ゆらぎ”が電子を散乱することにより非直線性が生じるとしている。このポテンシャルの“ゆらぎ”的大きさは  $MF_{1-x}G_x$  の混晶においては、

$$C_{FG} = b e^2 Z \left| \frac{1}{r_F} - \frac{1}{r_G} \right| e^{-kR} \quad (5 \cdot 2)$$

と表わされる。そして電子の散乱確率から考えて、**extrinsic bowing parameter**  $c_e$  は

$$c_e = C_{FG}^2 / A \quad (5 \cdot 3)$$

で表わされる。ここに

$b$ ,  $A$  : 定数

$Z$  : 値電子数

$r_F$ ,  $r_G$  : 原子  $F$ ,  $G$ , が位置する周期律表の“列”の第Ⅳ族原子の共有結合半径

$k$  : 値電子の Fermi-Thomas 半径

$R$  :  $r_F$  と  $r_G$  の平均値

またバンドギャップ  $E_i$  は

$$E_i = E_{ih} [1 + (C/E_{ih})^2]^{1/2} \quad \text{又は} \quad (5 \cdot 4)$$

$$E_i = [E_{ih} - (D_{av} - 1) \Delta E_i] [1 + (C/E_{ih})^2]^{1/2} \quad (5 \cdot 5)$$

と表わされる。ここに  $(D_{av} - 1) \Delta E_i$  は d バンドの影響を考慮したもので (5・5) 式は、d バンドの影響をうける  $E_0$  および  $E_1$  に関して用いられる。

また、 $E_{ih}$  : ホモボーラ・エネルギーギャップ

$C$  : ヘテロボーラ・エネルギーギャップ

$E_{ih}$ ,  $C$ ,  $D_{av}$ ,  $\Delta E_i$  の各値は Van Vechten と Phillips<sup>(27)</sup> により与えられておりこれより計算することができる。Intrinsic bowing parameter  $c_i$  は (5・4) 又は (5・5) 式から求まり、例えば (5・4) を用いると、

$$\frac{1}{4} c_i = \frac{1}{2} [E_{ih}^{CdTe} \{1 + (C^{CdTe}/E_{ih}^{CdTe})^2\}^{1/2} + E_{ih}^{HgTe} \{1 + (C^{HgTe}/E_{ih}^{HgTe})^2\}^{1/2}] - \frac{1}{2} (E_{ih}^{CdTe} + E_{ih}^{HgTe}) [1 + \{(C^{CdTe} + C^{HgTe})/(E_{ih}^{CdTe} + E_{ih}^{HgTe})\}^2]^{1/2} \quad (5 \cdot 6)$$

より求めることができる。virtual-crystal のボテンシャルは結晶全体で、対称性を持っているのに対して、不規則に配列しているためにおこるボテンシャルは非対称的で周期的ではなく、short-range の効果を及ぼす。したがって、 $c_e$  の値は帯端の位置によらず一定であると考えられる。

Phillips と Van Vechten<sup>(27)</sup> は水銀化合物の格子定数の異常を指摘し、これらの結晶は圧縮を受けているため、みかけの格子定数より大きく見積った値を計算に使用すべきであると報告している。そして  $r_v$  として周期律表の第 4 列の第 IV 族元素 (Sn) の共有結合半径  $r_{IV}$  より 4 % 大きい値を仮定している。ここでもこの条件のもとで  $Cd_x Hg_{1-x} Te$  の  $E_0$ ,  $E_1$ , および  $E'_0$  について計算を行った。結果を図 5・9 に実線で示す。図 5・9 には Schmit と Steizer<sup>(5)</sup> が求めた基礎吸収端  $E_0$  のデータも示してある (×)。図より明らかなように計

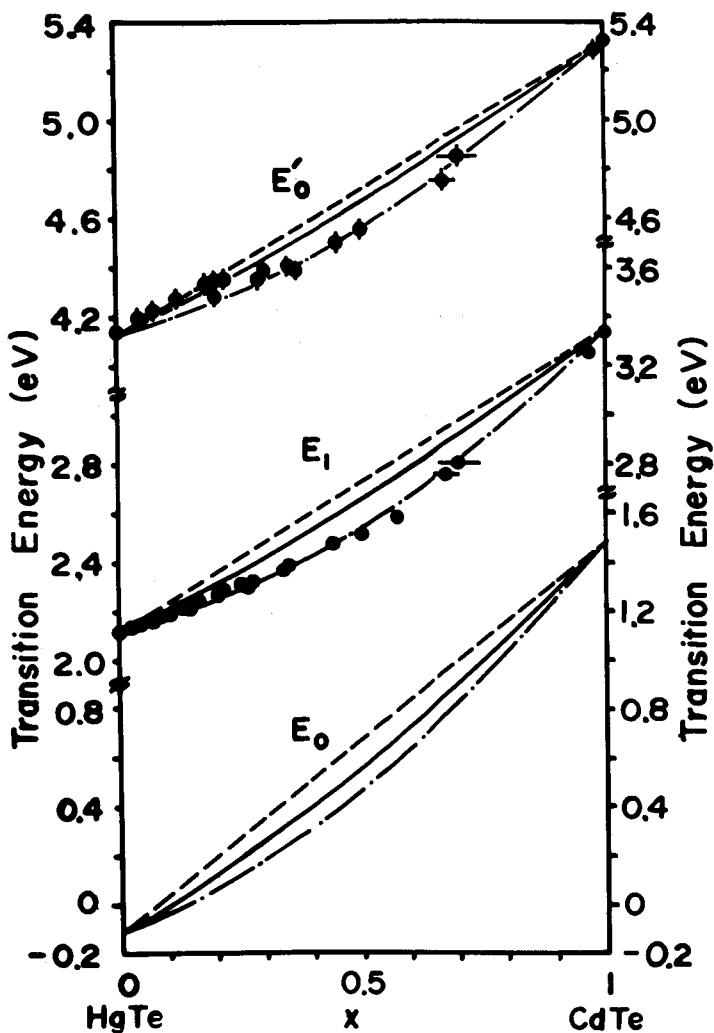


図 5・9  $E_0$ ,  $E_1$  および  $E'_0$  の混晶比依存性. ---: 直線的変化,  
 —:  $r_v = 1.04 r_N$  と仮定して得られた計算結果,  
 -.-.:  $r_v = 1.08 r_N$  と仮定して得られた計算結果,  
 $\times$ : Schmit と Stelzer<sup>(5)</sup> のデータ  
 ●: エレクトロレフレクタンスより得られた値

算結果は  $E_0$  については Schmit らの結果とよく合っているが、  $E_1$  と  $E'_0$  については本実験結果と相当の開きがある。この  $E_0$  に対する計算値を用いて、 図 5・4 の  $E_0 + A_0$  の実験値から  $A_0$  の混晶比依存性を求めるとき、 図 5・4 の (×) のようになり、  $x = 0.5$  における  $A_0$  の値は HgTe と CdTe のそれよりも小さくなっている。下に凸にわん曲した形となり他の混晶について測定された結果と比較すれば異常な結果を示している。 $E_0$  の混晶比依存性として直線的変化を採ると、この傾向は増大することになる。そこで  $E_1$  と  $E'_0$  における理論値と実験値を一致させるために、仮定された値を再検討する必要がある。 $b$  の値は NaCl 型閃亜鉛鉱型、ウルツ型を通じて、1.5 の値から上下、10% 以内の変動に収まっている。<sup>(26)</sup>  $A$  の値は ZnS - Te 系の混晶から決定されたもので  $A \approx 0.98$  eV の値をもっている。この値も若干不確定な値といえる。しかし (5・2)、(5・3) 式より共有結合半径  $r_F$ 、 $r_G$  が  $C_{FG}$  ひいては、 $c_e$  に最も敏感な量であることが分る。そこで第 5 列の共有結合半径  $r_v$  を第 4 列のそれより 8% 大きくとって計算すると、図 5・9 の一点鎖線のようになり実験値と良い一致を示す。またこの仮定を用いて計算した  $E_0$  の混晶比依存性と図 5・4 の  $E_0 + A_0$  の実験値から  $A_0$  の混晶比依存性を求めるとき図 5・4 の (○) になり、 $A_0$  がほぼ直線的に変化していることが分る。

実験と計算から得られた  $E_0$ 、 $E_1$ 、 $E'_0$  に対する bowing parameter を表 5・3 に示す。この表から明らかなように、共有結合半径の変化はヘテロポーラエネルギーギャップにはほとんど影響を与える、従って intrinsic parameter  $c_i$  の変化は無視できる。また表より  $Cd_x Hg_{1-x} Te$  においては、バンドギャップの直線性からのズレは大部分非周期的ポテンシャルに起因しており、 virtual crystal ポテンシャルからの寄与は小さいことが分る。甲木たちの Pseudopotential 法による計算結果は前者を考慮していないので、int-

*trinsic bowing* に関しては、この計算結果と、あまり大きな差異は無いといえる。

	c <sub>i</sub>		c <sub>e</sub>		c <sub>calc</sub>		c <sub>exp</sub>
r <sub>V</sub>	1.04 r <sub>IV</sub>	1.08 r <sub>IV</sub>	1.04 r <sub>IV</sub>	1.08 r <sub>IV</sub>	1.04 r <sub>IV</sub>	1.08 r <sub>IV</sub>	
E <sub>0</sub>	0.22	0.22	0.22	0.67	0.44	0.89	—
E <sub>1</sub>	0.16	0.16	0.22	0.67	0.38	0.83	0.84
E <sub>0</sub> <sup>1</sup>	0.02	0.02	0.22	0.67	0.24	0.69	0.70

表 5・3 bowing parameters の理論値と実験値 ( eV )

5・4・2  $\Gamma_7 - \Gamma_8$  ( $A_0$ ) 帯端近傍のエレクトロフレクタンス・スペクトル  
本実験より HgTe のスピン軌道分裂  $A_0$  の値として  $1.08 \pm 0.02$  eV の値が得られたが、この値は、これまで実験的には求められていないので、最初に測定された実験値といえる。この値の実験誤差は信号のピークの巾と、ピークに對応するエネルギー値のバラツキから決められた。誤差範囲が比較的大きいのは、主に信号が broad であることによる。

さて、ここで (4・11) (4・12) で表わされる HgTe と CdTe の  $\alpha(\omega)$   $\beta(\omega)$  をフォトン・エネルギーの関数として、第3章で得られた光学定数<sup>(28)</sup>を用いて計算した結果を図 5・10 に示す。破線が HgTe で実線が CdTe である。この図より  $\alpha$  と  $\beta$  は  $h\nu = E_1$  近傍で交わっており、 $h\nu < E_1$  では  $\alpha > \beta$ 、 $h\nu > E_1$  では  $\alpha < \beta$  であり、従って  $E_0 + A_0$  帯端近傍では  $\Delta R/R$  の信号はほぼ  $\Delta E$  だけで表わされるとしてよいことが分る。このことは 5・1 節に述べたことから、混晶にも当てはまると考えられる。図 5・2 の  $Cd_{0.97}Hg_{0.03}Te$  および CdTe における  $E_0 + A_0$  に對応する  $\Delta R/R$  の形と図 4・4 の  $\Delta E_1$  と比較してみると、 $E_0 + A_0$  帯端は  $M_0$  型とみなせる。これは GaAs などにおける結果

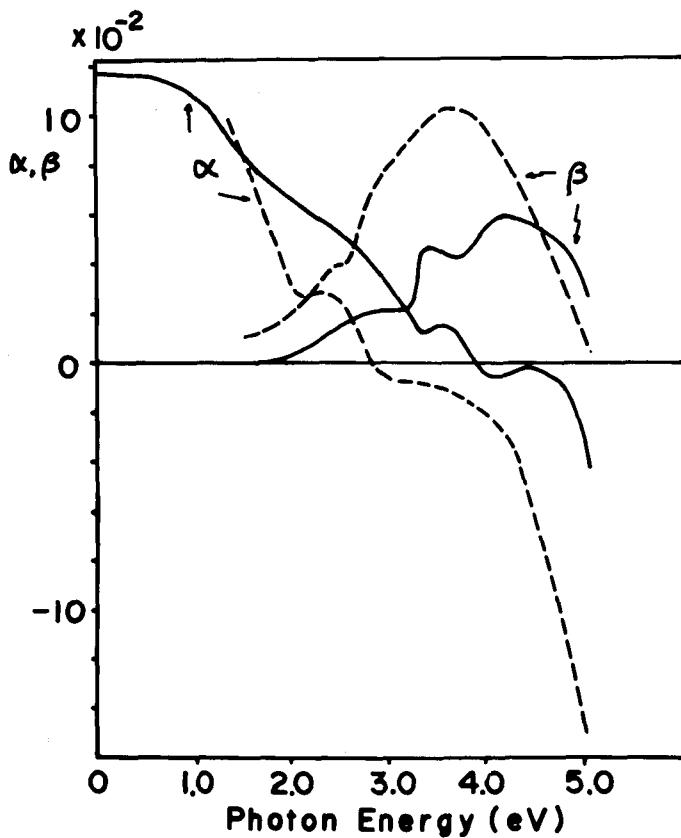


図 5・10 電解液 ( $n_s = 1.33$ ) 中に浸した場合の HgTe (---)  
および CdTe (—) の  $\alpha(\omega)$  と  $\beta(\omega)$

と一致する。しかし、HgTe をはじめとして多くの混晶では、 $E_0 + A_0$  の信号は broad で構造のない単なる一つのピークからなるスペクトルとなっている。この原因としては第 4 章で述べた、種々の broadening 効果が考えられるが、HgTe や  $x$  の小さい混晶については、 $\Gamma_7$  レベルに励起された自由正孔の寿命は自由電子の数が多いために再結合の確率が大きくかなり短いことが考えられ、lifetime broadening 効果が大きく寄与していると思われる。

## 5・5 結言

HgTe と CdTe および  $Cd_xHg_{1-x}Te$  のエレクトロレフレクタンスをフットン

エネルギー  $0.5 \sim 6$  eV の範囲にわたって電解液法で測定した。HgTe と CdTe の結果については表 5・2 にまとめてある。また主要なバンドギャップ ( $E_0 + A_0$ ,  $E_1$ ,  $E_1 + A_1$ ,  $E'_0$ ,  $E_2$ ,  $E_2 + \delta$ ) の混晶比依存性を求め,  $E_0 + A_0$ ,  $E_1$ ,  $E_1 + A_1$ ,  $E'_0$  はほぼ放物線的な変化を示し,  $E_2$ ,  $E_2 + \delta$  は  $0 < x < 0.5$  の範囲でほとんど直線的な変化を示すことが明らかになった。そして混晶比依存性から CdTe の  $E_2$  および  $E_2 + \delta$  の値を見積ることができた。またこれまで実験的に求められていない HgTe のスピン軌道分裂  $A_0$  の信号を観測し, 混晶比依存性および  $\Gamma_6$ ,  $\Gamma_8$  のバンドの反転よりこの信号が  $A_0$  に起因するものであることを確認した。

これらバンド・パラメータの混晶比依存性について dielectric two band method で計算を行い, bowing parameter を求め, 実験値と比較した。これより周期律表の第 5 列の共有結合半径が第 4 列のそれより 8 % 大きく見積るべきであるとの提案を行った。また直線性からのズレのはほとんどは混晶の全く不規則的に置換している原子の非周期的ポテンシャルの寄与によるものであることが分った。これらの bowing parameter は表 5・3 にまとめてある。

## 第 5 章 参 考 文 献

- (1) D.Long and J.L.Schmidt, *Semiconductors and Semimetals* **5** (1970) 175
- (2) T.C.Harman, "II-VI Compounds" North Holl and Publ. Co. Amsterdam(1967) 767
- (3) C.Verie, "II-VI Semiconducting Compounds" Intern. Conf., Providence W.A.Benjamin Inc., New York(1967) 1124
- (4) T.C.Harman, "II-VI Semiconducting Compounds" Intern. Conf., Providence W.A.Benjamin Inc., New York(1967) 982
- (5) J.L.Schmit and E.L.Steizer, *J. Appl. Phys.* **40**(1969) 4865
- (6) R.R.Galagka and A.Kisiel, *Phys. Status Solidi* **34**(1969) 63
- (7) R.Ludeke and W.Paul, *J. Appl. Phys.* **37**(1966) 3499
- (8) J.B.Blaire and R.Newham, "Metallurgy of Elemental and Compound Semiconductors" **12**(1961) 393
- (9) R.H.Parmenter, *Phys. Rev.* **97**(1955) 587
- (10) S.Katsuki and M.Kunimune, *J. Phys. Soc. Japan* **31**(1971) 415
- (11) A.G.Thompson and J.C.Woolley, *Can. J. Phys.* **45**(1967) 255
- (12) J.A.Van Vechten and T.K.Bergstresser, *Phys. Rev.* **1**(1970) 33351
- (13) A.Moritani, K.Taniguchi, C.Hamaguchi, J.Nakai, R.Ueda, O.Ohtsuki and Y.Ueda, *J. Phys. Soc. Japan* **31**(1971) 945
- (14) A.Moritani, K.Taniguchi, C.Hamaguchi and J.Nakai, *J. Phys. Soc. Japan.* 投稿中

- (15) F.Lukes and E.Schmidt, Phys.Letters **23**(1966)413
- (16) D.E.Aspnes and M.Cardona, Phys.Rev. **173**(1968)714
- (17) M.Cardona, K.L.Shaklee and F.H.Pollak, Phys.Rev. **154**(1967)696
- (18) E.W.Williams, Phys.Rev. **172**(1968)998
- (19) J.C.Birman, J.Electrochem. Soc. **107**(1960)409
- (20) M.Cardona, Solid State Phys. Suppl. **11**(1969)70
- (21) V.V.Sobolev, Optics and Spectroscopy **18**(1965)456
- (22) C.Verie, Advances in Solid State Phys. edited by O.Mader-Iung, (1970)1
- (23) A.G.Thompson and J.C.Woolley, Can.J.Phys. **45**(1967)2597
- (24) M.Cardona, Solid State Phys. Suppl. **11**(1969)283
- (25) R.L.Hengehold and C.R.Fraime, Phys.Rev. **174**(1968)808
- (26) J.A.Van.Vechten, Phys Rev. **187**(1969)1007
- (27) J.C.Phillips and J.A.Van Vechten, Phys.Rev. **2**(1970)2147
- (28) A.Moritani, H.Sekiya, K.Taniguchi, J.Nakai, C.Hamaguchi and R.Makabe, Japan.J.APPL.Phys. **10**(1971)1410
- (29) M.Cardona and D.L.Greenaway Phys.Rev. **131**(1963)98

## 第 6 章 結 論

水銀カルコゲナイトと  $Cd_xHg_{1-x}Te$  の光学的性質に関する実験を行い、これらのエネルギー帯構造のパラメータ等について第2章から第5章まで述べてきたが得られた結論を総括すると次のようになる。

- (1)  $HgTe$ ,  $HgSe$ ,  $CdTe$  の結晶を縦型ブリッヂマン法で製作した。 $HgTe$ においては、 $Hg$ を若干過剰に配分した方が良い結果が得られ、 $Te$ を過剰にすると、 $Te$ の巻き込みなどが起り、しばしば非晶質の状態になった。また  $HgTe$  と  $CdTe$  を混合することにより縦型ブリッヂマン法で、ほとんど全ての混晶比にわたる  $Cd_xHg_{1-x}Te$  混晶を製作することができた。 $Cd_xHg_{1-x}Te$  のうち、 $x$  の大きい混晶についてはとくに蒸気圧が高いことに対する対策を講じ、二重封入法などを用いて、製作することに成功した。
- (2) これまで測定されていなかった  $HgTe$  と  $HgSe$  の光学定数  $n$  と  $k$  を偏光解析法によりフーリエエネルギー  $1.8 \sim 3.5$  eV の領域でフーリエエネルギーの関数として求めた。消衰係数  $k$  のスペクトルには  $HgTe$  および  $HgSe$ において  $E_1 (A_{4,5} - A_6)$ ,  $E_1 + A_1 (A_6 - A_6)$  に対応するピークが認められ、それぞれ、 $E_1 = 2.18$  eV,  $E_1 + A_1 = 2.80$  eV および  $E_1 = 2.92$  eV,  $E_1 + A_1 = 3.12$  eV の値を得た。これらは反射率の測定やエレクトロレフレクタンスの結果とほぼ一致している。また  $HgTe$  においては、Cardona達の反射率のデータを Kramers-Kronig 変換することによって  $n$  と  $k$  を求め偏光解析より得られた結果と比較し、よく類似した傾向を得ることができた。また得られた  $n$  と  $k$  より反射率を計算し実測した反射率との比較を行いよく類似した傾向を得た。また  $HgTe$  と  $HgSe$  の表面に、水銀酸化物が存在すると仮定して酸化膜による影響を吟味し、酸化膜が存在しない場

合より  $n$  は小さく,  $k$  は大きくなることを見出した.

- (3) HgTe と HgSe のエレクトロレフレクタンスを電解液法により測定し, 室温における  $E_1$   $E_1 + \Delta_1$ ,  $E'_0$ ,  $E_2$ ,  $E_2 + \delta$  の各バンド・パラメータの値を求めた. HgTe では  $E_1 = 2.12$  eV  $E_1 + \Delta_1 = 2.78$  eV  $E'_0 = 4.14$  eV  $E_2 = 4.70$  eV  $E_2 + \delta = 5.40$  eV, HgSe では  $E_1 = 2.85$  eV,  $E_1 + \Delta_1 = 3.17$  eV  $E'_0 = 5.44$  eV が得られた. また, これらを Kramers-Kronig 変換し,  $\Delta\epsilon_1$ ,  $\Delta\epsilon_2$  を求め,  $\Delta\epsilon_1$  は  $M_{1\perp}$  型に  $\Delta\epsilon_2$  は  $M_{1//}$  型によく合う結果が得られ, かつ電界の不均一による影響を論じた.
- (4) HgTe と HgSe についてコンデンサ法を用いて低温におけるエレクトロレフレクタンスの実験を行い, 77° K の  $E_1$  と  $E_1 + \Delta_1$  の値として, それぞれ  $E_1 = 2.24$  eV  $E_1 + \Delta_1 = 2.86$  eV および  $E_1 = 2.946$  eV  $E_1 + \Delta_1 = 3.223$  eV を得た. また信号の温度依存性から thermal broadening と電界の不均一による broadening が  $\Delta R/R$  の大きさを制限していることがわかった.
- (5)  $Cd_xHg_{1-x}Te$  のエレクトロレフレクタンスを電解液法により測定して, おもなエネルギーギャップの混晶比依存性を求めた.  $E_0 + \Delta_0$ ,  $E_1$ ,  $E_1 + \Delta_1$   $E'_0$  は混晶比とともにほぼ放物線的に,  $E_2$ ,  $E_2 + \delta$  はほぼ直線的に変化することを見出した.
- (6)  $E_2$ ,  $E_2 + \delta$  の混晶比依存性から CdTe の  $E_2$  および  $E_2 + \delta$  の値を  $E_2 \approx 5.56$  eV,  $E_2 + \delta \approx 5.77$  eV と見積った.
- (7)  $E_1$ ,  $E'_0$  などの混晶比依存性を dielectric two band method による計算結果と比較し, 周期律表の第 5 列の共有結合半径が第 4 列のそれより 8 % 大きく見積れば良いことが分った. また  $E_1$ ,  $E'_0$  における混晶比依存性の直線性からのズレは大部分, 混晶の非周期的なボテンシャルの寄

与に依っており, `virtual crystal` ボテンシャルからの寄与は小さいことが分った。

- (8)  $\Gamma$  点における  $\Gamma_6$  と  $\Gamma_8$  のバンドの反転はブリルアンズーンの他の帯端には影響を与えないことが分った。
- (9) HgTe のスピン軌道分裂  $A_0$  の値を実験的に求め, 室温における値を  $A_0 = 1.08 \pm 0.02$  eV と決定した。
- (10)  $E_1$  の混晶比依存性より逆に  $Cd_xHg_{1-x}Te$  混晶の混晶比  $x$  をエレクトロフレクタンスを測定することにより簡単にかつ非破壊的に決定できることからエレクトロフレクタンスが赤外検知器製作等に有用な手段となることを明らかにした。

## 謝　　辞

本研究を開始して以来まとめるまで、終始懇切な御指導と御鞭撻を賜わった大阪大学工学部中井順吉教授に深甚の謝意を表します。

また論文作成にあたって、御懇篤なる御討論と御指導を頂くとともに種々の御高配を賜わった大阪大学工学部犬石嘉雄教授、川辺和夫教授、三石明善教授に深甚の謝意を表します。

本研究の全過程を通じて懇切かつ適切な御指導と御助言を頂いた大阪大学工学部浜口智尋助教授に心から感謝致します。

さらに本研究に関して、御指導、御教示を賜わった大阪大学工学部、菅田栄治名誉教授、尾崎弘教授、喜田村善一教授、故寺田正純教授、同電子ビーム研究施設裏克己教授、塙輝雄教授、大阪大学産業科学研究所、中村勝吾教授、松尾幸人教授に心から感謝いたします。

また本研究の各過程で示唆に富む御討論をいただいた大阪大学基礎工学部浜川圭弘助教授、大阪大学工学部六田嘉明氏に深く感謝致します。

なお本研究を行うにあたって種々の御援助を頂いた白川二助手、福地真一助手をはじめ、大阪大学工学部電子工学教室中井研究室の諸兄、とくに直接実験ならびに計算に協力を得た、高橋常夫、谷口研二、関家秀樹、笹谷幸裕、近藤和夫の諸君に心より感謝致します。

また本研究を行うにあたり種々の御援助を頂いた株式会社富士通研究所電子デバイス部の植田陽一氏、大槻修氏、植田隆一氏ならびに大阪工業技術試験所の真壁遼治氏に深く感謝致します。