

Title	水銀カルコゲナイドとCdx Hg1-xTe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	https://hdl.handle.net/11094/246
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

水銀カルコゲナイドと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

水銀カルコゲナイド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 ドと呼び,これらを研究の対称として取扱う.本章では,この水 銀カルコゲナイドおよび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ドとCdxHg1-xTe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うことである.(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HgS P 光学定数についての報告は静誘電率 C_∞ 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、1.7eV~3.5eV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 E₁ ($A_{4,s}$ - A_{6})と E₁+ A_{1} (A_{6} - A_{6})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、偏光解析よの 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 にいてはスピンー 軌道分裂 A_{1} の値が小さいので E₁+ A_{1} の値が分解されにくいが、本実験において は、E₁=2.9 DeV, E₁+ 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、パンド・バラメータ E_1 、 E_1+A_1 、 E_0 E_2 、 $E_2+\delta$ の値を求めるとと もに、 $E_1(A_{45}-A_6)$ 帯端近傍で Kramers-Kroning変換を行い、その帯端の

2

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 E₁と E₁+ d₁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 $Cd_{x}Hg_{1-x}TeOOL 45 \sim 6 eV$ 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、バンドバラメータ 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 Γ_6 , Γ_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.バ 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-xTe} 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.

3

						目 次	
第	1	章	-		序	論	1
1	•	1		水釒	長カ	ルコゲナイドと Cd _x Hg _{1-x} Te に 関する研究と応用の現状	1
1	•	2		エし	ノク	トロレフレクタンスとエネルギー帯構造	3
1	•	3		本言	俞文	の目的	4
第	2	章	ī		水	龈カルコゲナイドとCd _x Hg _{1−x} Teの結晶製作	9
2	•	1		緒言	lin		9
2	•	2		Ηg	Te,	HgSe, CdTeの結晶製作	9
2	٠	3		Cd	хHg	i─xTeの結晶製作	14
2	•	4		結	= .	·······	16
参		考		文	献		17
第	3	韋			Hβ	TeとHgSeの光学定数	19
3	•	1		緒	言		19
3	•	2		偏之	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2	25
	3	۰	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	51

	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	Ì		40
参		考		文	Ŕ	敏	41
第	4	7	章		ł	HgTe とHgSe のエレクトロレフレクタンス	43
4	•	1		緒	ħ		43
4	•	2		I.	ν	クトロレ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	٠	2	•	2	電場による誘電率の変化とΔR/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のエレクトロレフレクタンス	53
	4	•	4	•	2	HgSeのエレクトロレフレクタンス	59
4	•	5		結	言		62
参	:	考		文	i	献	63
第	5	1	章		($\operatorname{Cd}_{\mathbf{x}}\operatorname{Hg}_{1-\mathbf{x}}\operatorname{Te} \mathcal{O} = \mathcal{V} \mathcal{O} \wedge \mathcal{V} \mathcal{O} \mathcal{O} \mathcal{O} \mathcal{O} \mathcal{O} \mathcal{O} \mathcal{O} O$	65
5	•	1		緒	言		65
5	•	2		実	験	装置および方法	66
5	٠	3		実	験	結果	67
	5	•	3	•	1	エレクトロレフレクタンス・スペクトル	67
	5	•	3	•	2	$E_0 + \Delta_0 \approx J \sigma \Delta_0$	73
	5	•	3	٠	3	E 1 および E 1 + 1	75
	5	•	3	•	4	E'o とE2およびE2+の	

	5•	• Z	-	検	討			• • • • • •		• • • • • •	•••••						•••••		• • • • • • •		• • • • •	• • • • •	••••			• • •		80
	5	š •	4	•	1	2	エネ	il i	ギー	・ギ	4 "	ッフ	プの	混	晶出	比依	存性	£				••••	• • • • •			• • ·	• • • •	80
	5	5 •	4	•	2	4	Γ,-	- Г	, (⊿ ₀))近	傍	のコ	- V	7	<u>ነ</u>	V.	2	レク	タ	v	ス・	7	~~	ŋ	ኑ /	IV	85
	ō•	5	結	i			• • • • •			•••••		••••							•••••						• • • • •	••••		86
141	参	₹	2	文		献				•••••			•••••								•••••		• •		• • • • •	••••		88
第	6		章		糸	吉		論						••••	•••••	•••••	•••••		•••••			•••••	••••			.	•••••	90

謝	辞	93

第1章 序 論

 1・1 水銀カルコゲナイドとCd_xHg_{1-x}Teに関する研究と応用の現状 水銀カルコゲナイドは水銀元素と周期律表のVI_b族元素との化合物であるHgTe HgSeHgS 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ドと呼び、これらを研究の対象として取扱 う・

水銀カルコゲナイド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.II-V 族半導体。 CaS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⁽¹⁾やGiriat⁽²⁾ によって水銀カルコゲナイド結晶が製作され、その電気的性質が明らかにされ $(3) \sim (6)$ (7) てきたが、なかでも Harman 達の実験は Groves と Paul が提唱した Q- Sn のモデルにもとずいた水銀カルコゲナイド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ChyHgh-yTeの 研究を降盛に導いたといっても過言ではない。すなわち、この実験より、水銀 カルコゲナイド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、水銀カルコゲナイドは $\Pi - \nabla I$ 族半導体であり、GaAs, InSb などの $\Pi - \nabla$ 族半導体や禁止帯中の広いZnTe や CdTe などの $\Pi - \nabla I$ 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 ${}^{(8)} - {}^{(10)}$ の一連の実験やScouler とWright ${}^{(11)}$ の反射測定などは、k - p法、 ${}^{(12)(13)}$ Pseudopotential法 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、本研究を位置ずけるならば、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、水銀カルコゲナイドについ 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、まだ基喩的な物性の域を出ないのに対して、 $Cd_xHg_{1-x}Tedt$ 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 $Cd_xHg_{1-x}Tedt$ 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 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 $Cd_xHg_{1+x}Tec$ 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

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⁽²¹⁾である. (10)(22)~(24) 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 (エレクトロアブソープション,エレクトロレフレクタンス),圧力 を用いるピエゾ・オプティカル効果⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾温度を変調するサーモ・オプティカ ル効果,⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾磁場で変調するマグネトオプティカル効果,⁽²⁹⁾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⁽³⁰⁾またこれらのベラメータを組合 せたマグネト・エレクトロ・オフティカル効果,⁽³¹⁾ピエソ・エレクトロオプティ カル効果⁽³²⁾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ドおよび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⁽³³⁾とKeldysh⁽³⁴⁾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、今日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⁽²²⁾をはじめとして、Cardona⁽¹⁰⁾ Handler⁽²³⁾ 浜川 達⁽²⁴⁾⁽³⁵⁾が試料への電界印加を種々の方法で行い、微分吸収係数 $d \propto$ や反射率 の変化分 d R / R を測定して精度の高いエネルギー帯構造のベラメータに関す るデータを得ている。一方理論的には Tharmalingam⁽³⁶⁾Callaway⁽³⁷⁾ As Pnes⁽³⁸⁾⁽³⁹⁾達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、 $M_0 型 \sim M_3 型のすべての$ 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も多くの報告がされている⁽⁴⁰⁾⁽⁴¹⁾⁽⁴²⁾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 カルコゲナイドおよびCd_xHg_{1-x}Teを II - VI族半導体の延長としてとらえ, そ れらのエレクトロレ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 プから正のパ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レフレク 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ドの光学定数を偏光解析法により求める. エレクトロレ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 コゲナイド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

-4---

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の変化にと もなう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

- W.D.Lawson, S.Nielson, E.H.Putley and A.S.Young, 9 (1959)
 325
- (2) W.Giriat, Brit.J.APP1.Phys.15(1964)151
- (3) T.C. Harman, Phys. Rev. 118(1960) 1541
- (4) T.C.Harman, J.APPI.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. APP1. Phys. 34 (1693) 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
- 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.APPI.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.APPI.Phys.39(1968)233
- (2) 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 (1969)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.Latters 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-VISemiconducting 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.Noturforsch 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 水銀カルコゲナイドおよび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⁽¹⁾の粉末を圧縮、シンタ ーして製作したことから始まる.その後 Harman 達⁽²⁾⁽³⁾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⁽⁴⁾が HgTe と CdTe 混合物から、Blair と Newnham⁽⁵⁾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⁽⁶⁾⁽⁷⁾溶液からの成長においては、 いずれの均合にも、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,CdxHg1-xTe 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帯間遷移においては,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⁽⁸⁾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デ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10~15mm Øの溶融石英管に真空封入す る.この管を電気炉に入れ550℃~600℃において12時間以上保つ.こ の操作は、HgTeの融点(690℃)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℃高くあげ、3~5時間保ったのち3~6mm/時の速 度で封入管を降下させる。

(2)(1C) 図 2 - 1,図 2 - 2,にHg-Te系の状態図を示す.



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.(11)



図 2 · 2 Hg-Te 系液相,固相,平衡状態における Hg の分圧⁽¹⁰⁾

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. 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 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℃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⁽¹⁴⁾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℃)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℃で約20時間拡散したもの を用いた。

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 Cd_xHg_{1-x}Te 混晶の製作

 $Cd_x Hg_{i-x} TeO$ 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である。まずカーボン被膜を施した石英管にCdTe と 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℃~750℃に約12時間保ったのち、徐々に液相線より50℃高い温度にまであげて3~4時間保ち、そののち、封入管を3 mm/hの速度で降下させた。図2・5にSchmitとSPeerschnei-der⁽¹⁵⁾のHgTe-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。



Xの大きい領域(X=0.4~0.8)では、未反応の水銀と 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。

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 こ 0.7 近傍で管内の F 力は最 高になる. このため. x ≈ 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

力は(外管内部の水銀圧カー大気圧)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・7 二重封入法による結晶製作・T_{Hg}を制御すること かなり不均一 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・ たなっている 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 粘言

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.製作方法はいす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.Solids7 (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.Stelzer, J.APPI.Phys. 40 (1969)4559
- (7) N.A.Foss, J.APPI.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
- R.F.Brebrick and A.J.Strauss, "II-VI Compounds." North Holland nd Publ.Co.Amsterdam(1967)776
- (11) A.Moritani, T.Takahashi, C.Hamaguchi and J.Nakai, Tech. Repts. of the Osaka Univ. 20 (1970)427
- B.E.Bartlett and J.Deans, J. of Materials Science 4 (1969)
 266
- (13) W.Giriat, Brit.J.APPI.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 ε_{∞} に関するものを除いては、これまでなされていない.⁽¹⁾⁽²⁾ 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 ε の実数部 ε_1 と虚 数部 ε_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、 光学的測定にもとず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ソレフレクタンスなどの微分変調法で得られたス ベ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^{(3)~(6)}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

-19-

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. (7)(8) 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. 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⁽¹²⁾

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ことは,かなり古く,すでにDrude⁽¹³⁾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 no の媒質から屈折率 n の吸収体に単色直線偏光 が Ø₁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 Δ 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 ψ とする.Δ と Ψ 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

$$\frac{\widetilde{R}_{x}}{\widetilde{R}_{y}} = \tan \Psi \cdot e^{x P_{J} \Delta} \qquad (3 \cdot 1)$$



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♥, Δ, n, kの間の関係は, Ditchburn によって与えられている.

$$\frac{1 - \tan \Psi \cdot e^{j\Lambda}}{1 + \tan \Psi \cdot e^{j\Lambda}} = \frac{\left(\frac{n^2 - k^2 - n_0^2 \sin^2 \phi_1 - j 2 n_k}{n_0 \tan \Psi \cdot \sin \phi_1}\right)^{\frac{1}{2}}}{n_0 \tan \Psi \cdot \sin \phi_1}$$
(3.2)

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

式(3・3)を実数部と虚数部に分離すると

$$n^{2} - k^{2} = n_{0}^{2} \sin^{2} \phi_{1} \left[1 + \frac{\tan^{2} \phi_{1} \cdot (\cos^{2} 2 \Psi - \sin^{2} \varDelta \cdot \sin^{2} 2 \Psi)}{(1 + \cos \varDelta \cdot \sin 2 \Psi)^{2}} (3 \cdot 4) \right]$$

$$2 n k = \frac{n_0^2 \sin^2 \phi_1 \cdot \tan^2 \phi_1 \cdot \sin 4 \psi \sin \Delta}{(1 + \cos \Delta \sin 2 \psi)^2}$$
(3.5)

したがって偏光解析法によって4と夏を測定すれば、(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σ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ってR_x R_y, *Δ* に関する情報を得ることができる. σは,

 $\sigma = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \mathbf{d} \cdot (\mathbf{n}_{o} - \mathbf{n}_{e}) \qquad (3 \cdot 6)$

より求めることができる、ここで、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 4波長板といっている、

方位角 & の 偏光器から出る 偏光の x, y 成分 E_x, E_v は

$$E_{x}^{p} = A\cos\theta \cdot \cos\{\omega (t - z/c) + \Delta_{0}\} \qquad (3 \cdot 7)$$

 $E_y^p = A \sin \theta \cdot \cos \{ \omega (t - z/c) + d_o \}$ (3・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wz/c, A_o 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 ρ , 与える位相差を σ とする.

 $(3 \cdot 7), (3 \cdot 8) \downarrow \emptyset$ $E_{X}^{p} = \cos \theta \cdot e^{j \omega t} \qquad (3 \cdot 9)$ $E_{Y}^{p} = \sin \theta \cdot e^{j \omega t} \qquad (3 \cdot 10)$

補整器の二つの主軸に平行な座標系 λ , μ をとり(3・9), (3・10)を λ , μ の成分 E_{λ}^{i} , E_{μ}^{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↓万向の振動をσ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, × y 系に変換して,

 $E_{\mathbf{x}}^{\mathbf{c}} = E_{\lambda}^{\mathbf{o}} \cos \rho - E_{\mu}^{\mathbf{o}} \sin \rho \qquad (3 \cdot 1 1)$ $E_{\mathbf{y}}^{\mathbf{c}} = E_{\lambda}^{\mathbf{o}} \sin \rho - E_{\mu}^{\mathbf{o}} \cos \rho \qquad (3 \cdot 1 2)$

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_xejd_{x、Ry}ejdy の係数がかかって、

$$\mathbf{E}_{\mathbf{X}}^{\mathbf{t}} = \mathbf{R}_{\mathbf{X}} \mathbf{E}_{\mathbf{X}}^{\mathbf{c}} \mathbf{e}^{\mathbf{j} \mathbf{\Delta}_{\mathbf{X}}} \qquad (3 \cdot 1 3)$$

$$\mathbf{E}_{\mathbf{y}}^{\mathbf{t}} = \mathbf{R}_{\mathbf{y}} \mathbf{E}_{\mathbf{y}}^{\mathbf{c}} \mathbf{e}^{\mathbf{j}} \boldsymbol{\Delta}_{\mathbf{y}}$$
(3 • 1 4)

となる.最後にxy系に関して方位角rの検光器を透過する振動 E_x は

 $\mathbf{E}_{\mathbf{X}}^{\mathbf{a}} = \mathbf{E}_{\mathbf{X}}^{\mathbf{t}} \cos \kappa + \mathbf{E}_{\mathbf{Y}}^{\mathbf{t}} \sin \kappa \qquad (3 \cdot 15)$

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

$$E^{a} = \{R_{x} | \cos \Theta | \cos \kappa \cdot e^{j(\Sigma_{x} + \Delta_{x})} \cdot e^{j\omega t} + R_{y} | \sin \Theta | \sin \kappa \cdot e^{j(\Sigma_{y} + \Delta_{y})} e^{j\omega t} \}$$
(3 · 1 6)

となる。振幅の平方は透過光量を表わすから透過率は、

 $R_x^2 \cos^2\Theta \cos^2 k + R_y^2 \sin^2\Theta \sin^2 k$

+ $2 R_x R_y |\cos\Theta \sin\Theta| \cos\kappa \sin\kappa \cos(\Sigma_x - \Sigma_y + \Delta_x - \Delta_y) (3 \cdot 17)$ $zx = 5 \cdot \pi z$

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

$$\sin (\Sigma_{x} - \Sigma_{y}) = \frac{\sin 2(\theta - \rho) \sin \sigma}{|\sin 2\theta|} \qquad (3 \cdot 19)$$

$$\cos (\Sigma_{x} - \Sigma_{y}) = \frac{\cos 2(\theta - \rho) \sin 2\rho + \sin 2(\theta - \rho) \cos 2\rho \cos \sigma}{|\sin 2\theta|}$$

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, *d*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。

位相条件: $\Sigma_{x} - \Sigma_{y} + A_{x} - A_{y} = O 汉 i \pi$ (3・20) 振幅条件: $R_{x} / R_{y} \pm \tan x \cdot \tan \Theta = O$ (3・21)

ただし,正号は位相条件の 0 に, 負号はπ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 ~7000Åまで変化させて行ったが,このような場合には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4波長板を 必要とするからである.そこで,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4波長板の働きをするよ うにした.⁽¹⁴⁾



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を通って楕円偏光となる.試 料で反射された光は,入射光として適当な楕円偏光を選べば,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		3	0	秒
2)	偏光子, 検光子,	補整器回転角度最小読取		3	0 ;	砂
3)	試料台大きさ	直径	1	2	01	mm
4)	最大使用光束	直径		1	0 1	nm

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 0.75mm 半値巾 4.8 m/4.

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零万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° 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 σ $=\frac{\pi}{2}$,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 $\theta \ge \kappa \in \pi$ 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な $\theta \ge \kappa \in \pi$ ある. 偏光器方位角には 90 度相違した二種類の読み, $\theta_1 \ge \theta_2$ があり, この $\theta_1 \ge \theta_2$ に対して検光器の読みも $\kappa_1 \ge \kappa_2$ が得られる.なお, $0 < \theta_1 < 90^\circ$, $90^\circ < \theta_2 < 180^\circ$, $-90^\circ < \kappa_1$, $\kappa_2 < 90^\circ$ である.

更に、補整器の方位角 $\rho \epsilon \rho = -\frac{\pi}{4}$ にして、同様の測定を行う、そして θ_{3} と θ_{4} に対する κ_{3} と κ_{4} を得る、ここで θ_{3} 、 θ_{4} 、 κ_{3} 、 κ_{4} は、-90°< θ_{3} <0、

 $-180^{\circ} < \theta_{4} < -90^{\circ}, -90^{\circ} < \kappa_{3}, \kappa_{4} < 90^{\circ}$ c b 3.

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(θ_1 , κ_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 $\theta_1 \ge \theta_2$ の関係を入れると

$$\cos 2 \Theta_1 = -\cos 2 \Theta_2 \qquad (3 \cdot 22)$$

$$\oplus \tilde{z} \ltimes \left| \sin 2 \Theta_1 \right| = \left| \sin 2 \Theta_2 \right|$$

$$\varepsilon t z \vartheta, (3 \cdot 19) \varepsilon (3 \cdot 19)' \vartheta \varsigma (\Sigma_x - \Sigma_y)_1 = (\Sigma_x - \Sigma_y)_2 \varepsilon$$

$$t z \varsigma.$$

したがって θ_1 が位相条件を満せば、 θ_2 も別の位相条件を満し、それに対応する $\kappa_1 \geq \kappa_2$ は(3・21)の互いに符号を異にする振幅条件を満すから $\tan \kappa_1 \geq \tan \kappa_2$ の符号は異なっている、(3・22)と(3・21)より

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

$$\frac{\tan \kappa_2}{\tan \kappa_1} = -\tan^2 \Theta_1 \qquad (3 \cdot 2 \cdot 4)$$

(3・24)式は検光器の方位角 κ₁と κ₂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 $A = A_x - A_y$ の計算は、補整器の位相差 λ が $\frac{\pi}{2}$ に近く、方位 角 ρ が $\frac{\pi}{4}$ (又は $-\frac{\pi}{4}$)に固定されている時に簡単になる。

(3・18)式に $\rho = \pi / 2$ とおくと、

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

$$| \phi_{\overline{z}} \kappa | \sin 2\theta | = (1 - \cos^2 2\theta \cdot \cos^2 \sigma)^{\frac{1}{2}} \qquad (3 \cdot 26)$$

$$= \pi (3 \cdot 19) \geq (3 \cdot 26) \leq b$$

$$\sin\left(\Sigma_{x}-\Sigma_{y}\right)=-\frac{\cos 2\theta \cdot (1-\cos^{2}\sigma)}{(1-\cos^{2}2\theta \cdot \cos^{2}\sigma)^{\frac{1}{2}}}$$

$$\cos\left(\mathcal{L}_{x}-\mathcal{L}_{y}\right) = \sin\left(2\theta + \frac{1}{2}\cos^{2}\sigma\sin 2\theta\cos 2\theta\right) \qquad (3 \cdot 28)$$

$$(3 \cdot 27), (3 \cdot 28) \notin \mathbb{R} \leq \varepsilon,$$

 $\Sigma_{\rm x} - \Sigma_{\rm y} = \frac{3\pi}{2} + (2\theta + \frac{1}{2}\cos^2\theta \sin 2\theta \cos 2\theta)$

これと位相条件(3・20)を組み合せると4が求まる.

すなわち $tan \kappa > 0$ のとき

$$\Delta = -\frac{\pi}{2} - \left(2\theta + \frac{1}{2}\cos^2 \sigma \sin 2\theta \cos 2\theta\right) \qquad (3 \cdot 29)$$
$$\tan \kappa < 00 \geq 3$$

$$\Delta = \frac{\pi}{2} - \left(2\theta + \frac{1}{2}\cos^2 \sigma \sin 2\theta \cos 2\theta\right) \qquad (3 \cdot 3 \ 0)$$

この式中のcosoは ĸ₁と ĸ₂より計算できる.

以上で(θ_1 , κ_1)(θ_2 , κ_2)より R_x / R_y , Δe 導くことができる。さら に $\rho \in -\frac{\pi}{4}$ としたときの測定値(θ_3 , κ_3), (θ_4 , κ_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る。 結局次のような式で位相差 Δ , 反射係数比 R_x / R_y を計算できる。

$$2 \theta_{0} = \frac{\theta_{1} + \theta_{2} - 9 0^{\circ}}{2} - \frac{\theta_{3} + \theta_{4} + 9 0^{\circ}}{2} \qquad (3 \cdot 3 1)$$

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

 $\tan \kappa_1 < 0$ のとき

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

 $\tan \kappa_2 > 0$ のとき

$$\Delta = -\frac{\pi}{2} - 2\theta_0 - \frac{\cos^2\sigma}{2} \cdot \sin 2\theta_0 \cdot \cos 2\theta_0 \qquad (3 \cdot 3 \cdot 4)$$

ただし

$$\cos \sigma = \frac{1}{2 \cos 2 \theta_0} \left(1 - \left| \frac{\tan \frac{\kappa_2 - \kappa_4}{2}}{\tan \frac{\kappa_3 - \kappa_1}{2}} \right| \right) \qquad (3 \cdot 3 5)$$

したがって、光学定数 n と k を求めるには、(θ , κ_1)($\theta_2 \kappa_2$)($\theta_3 \kappa_3$)($\theta_4 \kappa_4$) から(3・31)~(3・35)を用いて R_x/R_y と A を計算し、(3・4) と(3・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(〇). HgTe の光学定数の測定は、フォトンエネルギー1.7 ~ 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・18 eV と 2・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、 $E_1(A_{4,5} - A_6) \ge E_1 + A_1(A_6 - A_6)$ 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 2.9 4 eV と 3.1 2 eV にピークが見 られ、それぞれは $E_1 \ge E_1 + A_1$ 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. O:偏光解析法による結果, -:反射 射率⁽¹⁷⁾をKramers-Kronig変換した結果, ●:表面に水銀酸化 化膜N₂ = 1.5-j0.01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.O: 偏光解析法による結果,●: 表面に水銀酸化膜N₂=15-j0.01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,⁽¹⁵⁾Cardona等⁽¹⁶⁾ 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

$$\widetilde{R} = \frac{n - j k - 1}{n - j k + 1} = R^{\frac{1}{2}} \cdot e^{j\theta}$$
(3.36)

θ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、

$$\theta$$
 (E_0) = $\frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \frac{d \ln R(E)}{dE} \left| \ln \frac{E+E_0}{E-E_0} \right| dE$

$$= \frac{E_{0}}{\pi} \int_{0}^{\infty} \frac{\ln R(E_{0}) - \ln R(E)}{E_{0}^{2} - E^{2}} dE \qquad (3 \cdot 3 7)$$

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⁽¹⁷⁾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 hv = 20 eV までとり,20 eV 以上の範囲に対しては、

R (E) \cong CE⁻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。

$$\theta (E_{0}) = \frac{E_{0}}{\pi} \int_{0}^{20} \frac{\ln R(E_{0}) - \ln R(E)}{E_{0}^{2} - E^{2}} dE$$

$$+ \frac{1}{\pi} \{ \frac{1}{2} [\ln C - \ln R(E_{0})] \ln \frac{20 + E_{0}}{20 - E_{0}}$$

$$- 4 \sum_{r=0}^{\infty} (\frac{E_{0}}{20})^{2r+1} [1 + (2r+1)\ln 20] \} (3 \cdot 38)$$

積分は R (E) を Q 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К-К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、 $R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n-1)^2 + k^2}$ (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 ε_1 , ε_2 を計算した結果 を示す. ε_2 のスペクトルに, やはり E_1 と E_1 + Δ_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.⁽¹⁴⁾

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⁽³な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 Bennet⁽⁹⁾な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る.また最近 Shewchun と Rowe⁽¹¹⁾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めることはかなり 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⁽¹⁷⁾



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. ε₁:実数部 ε₂: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

$$\frac{R_{123}^{X}}{R_{123}^{Y}} = \tan \Psi e^{\int \Delta}$$
 (3 • 4 0)

ここで R_{123}^{x} , R_{123}^{y} は,空気 $\mathfrak{n}_{1} = 1$, $k_{1} = 0$),酸化膜(\mathfrak{n}_{2} , k_{2}),基板(\mathfrak{n}_{3} , k_{3})を含めたときの反射係数である.LeberknightとLustman⁽¹⁷⁾は R_{123}^{x} , と R_{123}^{y} として次のような式を得ている.

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

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

ててで

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

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

$$a = \frac{n_{1}\cos\phi,}{(n_{3} - jk_{3})\cos\phi_{1} - n_{1}\cos^{*}\phi_{3}} \left(\frac{(n_{2} - jk_{2})\cos^{*}\phi_{3}}{n_{1}\cos^{*}\phi_{2}}\right) - \frac{(n_{3} - jk_{3})\cos^{*}\phi_{2}}{(n_{2} - jk_{2})\cos\phi})$$

$$b = \frac{n_{1}\cos\phi_{1}}{(n_{3} - jk_{3})\cos\phi_{1} + n_{1}\cos^{*}\phi_{3}} \left(\frac{(n_{2} - jk_{2})\cos^{*}\phi_{3}}{n_{1}\cos^{*}\phi_{2}} + \frac{(n_{3} - jk_{3})\cos^{*}\phi_{2}}{(n_{2} - jk_{2})\cos\phi_{1}}\right)$$

$$c = \frac{n_{1}\cos\phi_{1}}{n_{1}\cos\phi_{1} - (n_{3} - jk_{3})\cos^{*}\phi_{3}} \left(\frac{(n_{3} - jk_{3})\cos^{*}\phi_{3}}{(n_{2} - jk_{2})\cos^{*}\phi_{2}} - \frac{(n_{2} - jk_{2})\cos^{*}\phi_{2}}{n_{1}\cos\phi_{1}}\right)$$

$$e = \frac{n_{1}\cos\phi_{1}}{n_{1}\cos\phi_{1} + (n_{3} - jk_{3})\cos^{*}\phi_{3}} \left(\frac{(n_{3} - jk_{3})\cos^{*}\phi_{3}}{(n_{2} - jk_{2})\cos^{*}\phi_{2}} + \frac{(n_{2} - jk_{2})\cos^{*}\phi_{2}}{n_{1}\cos\phi_{1}}\right)$$

$$R_{13}^{X} = \frac{[(n_{3} - jk_{3})\cos\phi_{1} - n_{1}\cos^{*}\phi_{3}]}{[(n_{3} - jk_{3})\cos\phi_{1} + n_{1}\cos^{*}\phi_{3}]}$$

$$R_{13}^{Y} = \frac{[(n_{1}\cos\phi_{1} - (n_{3} - jk_{3})\cos\phi_{1} + n_{1}\cos^{*}\phi_{3}]}{[(n_{1}\cos\phi_{1} + (n_{3} - jk_{3})\cos\phi_{1} + n_{1}\cos^{*}\phi_{3}]}$$

ここでメは測定波長、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、 p_{i} (i=1.2.3.)は伝播角で、Snellの 法則より

$$n_{1}\sin\phi_{1} = (n_{2} - jk_{2})\sin^{*}\phi_{2} = (n_{3} - jk_{3})\sin^{*}\phi_{3}$$

$$(3 \cdot 45)$$
の関係がある. $(3 \cdot 41)(3 \cdot 42)(3 \cdot 43)$ より
$$\tan T e^{jA} = \frac{R_{13}^{x}}{R_{13}^{y}}(\frac{(1 + aP)(1 + eP)}{(1 + bP)(1 + cP)})$$

$$(3 \cdot 46)$$

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 $\Psi \ge 4 \overline{e} \overline{\Psi} \ge \overline{4} \ge \overline{4} \ge \overline{4} \ge \overline{4} \ge \overline{5}$ して

$$n_{3}^{2} - k_{3}^{2} = n_{1}^{2} \cdot \sin^{2}\phi_{1} \cdot \left[1 + \tan^{2}\phi_{1}\left(\frac{\cos^{2}2\overline{\Psi} - \sin^{2}2\overline{\Psi}}{(1 + \sin 2\overline{\Psi}\cos\overline{\Delta})^{2}}\right)\right] \quad (3 \cdot 4)'$$

$$2 n_{3} k_{3} = n_{1}^{2} \sin^{2} \phi_{1} \cdot \tan^{2} \phi_{1} \cdot \left(\frac{\sin 4 \overline{\Psi} \sin \overline{\Delta}}{1 + \sin 2 \overline{\Psi} \cos \overline{\Delta}} \right)^{2}$$
 (3 · 5)¹

また(3・46)より

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

これをPについて解くと

$$P = \frac{-[(a+e)-(b+c)z] \pm \{[(a+e)-(b+c)z]^{2} + 4(z-1)[ae-bcz]\}^{\frac{1}{2}}}{2[ae-(bc)z]}$$
(3.48)

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) (n₃, k₃)のとりうる値の範囲を決める
- (2) (n₃, k₃)の組に対して(3・4)'と(3・5)' より A と W を逆算し て求める。
- (3) *4*, *ψ*と測定値*4*, *ψ*, を使って(3・47)より *z* を計算する
- (4) 酸化膜の光学定数 $N_2 = n_2 jk_2$ の値を仮定する.
- (5) (3・45)より cos* ø, 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 δ 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°と70°で測定し(Δ_{60° , Ψ_{60°),(Δ_{70° , Ψ_{70°) 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° , ed_{70° 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°と60°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 ⁽¹⁸⁾が見積っ た $\widetilde{N_2}$ = $n_2 - jk_2 = 1.50 - j0.01$ 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E₁ 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 $E_1 + A_1$ ($A_6 - A_6$)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 * 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、 $E_1 = 2.90 \text{ eV } E_1 + A_1 = 3.15 \text{ eV}$ 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.

-40-

第3章 参考文献

- (1) D.H.Dickey and J.G.Mavroides, Solid State Commun.2(1964)
 2 1 3
- (2) M.Cardona, J.APPI.Phys.36(1965)2181
- (3) R.J.Archer, Phys.Rev. 110 (1958) 354
- (4) A.N.Saxena, APP1.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, 応用物理 25(1956)85
- (9) D.K.Burge and H.E.Bennett, J.OPt.Soc.Am.54(1964)1428
- K.Vedam, W.Knausenberger and F.Lukes, J.OPt.Soc.Am. 59(1969)
 64
- (11) J.Shewchun and E.C.Rowe, J.APPI. 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. APPI. Phys. 10(1971)1410
- (15) H.R.Philipp and E.A.Taft, Phys.Rev. 113(1959)1002
- (16) M. Candona 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.Am56(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⁽⁴⁾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バ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.⁽⁵⁾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 4 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 4 R/Rの測定より求められる種々のバ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 *A* R/Rを解析するには結局電場による誘電率の虚数 部 ε,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 エレクトロレフレクタンス信号 ΔR/Rと誘電率の電場 による変化分との関係。ここに α。:吸収係数, F(η) G(η)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⁽¹⁰⁾ 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 くの論文が発表されてきた.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 ε_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. 計算方法として、Thermalingam⁽⁸⁾ やAspnes⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾が用いた方法で、Van Hoveの臨界点近傍でエネルギ・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 ε₂は,

$$\varepsilon_{2}(\omega) \sim \int_{\mathcal{B}Z} \frac{2}{(2\pi)^{3}} \left| \widetilde{\mathbf{e}} \cdot \mathbf{M}_{if} \right|^{2} \delta \left(\mathbf{E}_{f} - \mathbf{E}_{i} - \hbar \omega \right) d^{3}k \qquad (4 \cdot 1)$$

と表わされる. ここで 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

 $\varepsilon_{2}(\omega) \sim 1 \stackrel{\sim}{e} \cdot M_{if}^{2} \cdot J(\Delta E)$ (4・2) と書ける、ここに、 $\Delta E = E_{f} - E_{i} = \pm \omega$ で $J(\Delta E)$ は

$$J(\Delta E) = \int_{BZ} \frac{2 d^{3}k}{(2\pi)^{3}} \delta(\Delta E - h\omega) = \frac{2}{(2\pi)^{3}} \int_{\Delta E=Const} \frac{dS}{\nabla_{k}(\Delta E)}$$

$$(4 \cdot 3)$$

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・3)の最後の式はd E = -定の等エネルギー面での表面積分で表わされている.(4・3)より \mathbb{Q}_k (dE) = 0を満足する k 点が J(dE)すなわち \mathcal{E}_2 (ω)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 \mathbb{Q}_k (dE)=0となる k 点上では、 $E_f \ge E_i$ が平行になる 場合($\mathbb{V}_k E_f = \mathbb{V}_k E_i \pm 0$) $\ge E_f \ge E_i$ の傾きがともに0になる場合($\mathbb{V}_k E_i$ = $\mathbb{Q}_k E_i = 0$)がある。前者はブリルアンソーン内のどこにでも存在しうる。 例えば<111)方向における $A_a - A_1$ (E_1)帯端がそれである。また後者は 対称性からいって、ソーンの中央(Γ 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 移を表わすバラメータを図示している。





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

$$\Delta \mathbf{E} = \mathbf{E}_0 + \sum_{\alpha=1}^{3} \mathbf{a}_{\alpha} (\mathbf{k}_{\alpha} - \mathbf{k}_0)^2 \qquad (4 \cdot 4)$$

となる、ここで $E_0 = \Delta E(k_0)$ である、(4・4)より a_α の符号により4 種類の帯端が存在することが分る、すなわち、 ΔE の極小点に対応する M_0 型 帯端($a_1a_2a_3 > 0$)、極大点に対応する M_3 型帯端($a_1a_2a_3 < 0$)、鞍点 (Saddle Point)に対応する M_1 型帯端($a_1a_2 > 0$, $a_3 < 0 >$, および、 M_2 型帯端($a_1 > 1$, a_2 , $a_3 < 0$)である.

4 · 2 · 2 電場による誘電率の変化と 4 R / R

As pnes 達 $\binom{(10)}{1}$ は電場 F が印加された場合の複素誘電率の虚数部 ϵ_2 を次のような Airy 関数を含む形で表わした.

$$\varepsilon_{2}(\omega, \mathbf{F}) \sim \int_{\mathbf{B}Z} \frac{2}{(2\pi)^{3}} d^{3}\mathbf{k} | \widetilde{\mathbf{e}} M_{\mathbf{i} \mathbf{f}} |^{2} \cdot \{| \hbar\Omega|^{-1} \cdot A_{\mathbf{i}} [\frac{\Delta \mathbf{E} - \hbar\omega}{\hbar\Omega} \}$$

$$(4 \cdot 5)$$

ここに

h Ω (k) =
$$\left[\frac{e^2 F^2 h^2}{2 \mu/(k)}\right]^{\frac{1}{3}}; \frac{1}{\mu//} = \frac{1}{h^2} \frac{\partial^2}{\partial k^2} A E$$
 (4 · 6)

(4・5)式は(4・1)のる関数る($\Delta E - h\omega$)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 h w と等しい $E_i \ge E_f$ 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、



Aspnes⁽¹⁰⁾は(4・5)の積分を 行い,4種類の帯端について電場 による誘電率の変化分 $4 \in_2 (\omega,$ F)を二つのエレクトロ・オプティ カル関数F(7),G(7)で表 わした、

図4・3 M_0 帯端近傍でみられる ϵ_2 (ω , 0)と ϵ_2 (ω , F)の概形

すなわち

$$\Delta \varepsilon_{2} (\omega \cdot F) = \left\{ \frac{\pm AF(\pm \eta)}{AG(\pm \eta)} \right\}$$
(4 · 7)

ここに、A=B $\Omega^{\frac{1}{2}}$ /w、B=(2 e^2 /m² h⁴)・1 $e^{M_{if}}$ ²・(8 $\mu_x \mu_y \mu_z$)² η =(AE-hw)/h Ω 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(η),G(η)により表わされる.ところで M_1 および M_2 の鞍点(Saddle 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($4 \cdot 4$)の α =3の方向)と が平行に近いか($M_{1/2}, M_{2/2}$)、垂直に近いか(M_{11}, M_{21})で $\Delta \varepsilon_2$ (w,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

$$\varepsilon_{2} (\omega, F)_{LB} = \int_{0}^{\infty} \frac{\Gamma \cdot \varepsilon_{2} (\omega', F)}{(\omega - \omega')^{2} + \Gamma^{2}} d\omega' \qquad (4 \cdot 8)$$

となる. これは Lorentz型の Broadening である. この Γ が 0.5のときの(11) $\Delta \epsilon_1, \Delta \epsilon_2$ が図4・4の実線で示されている.

次にエレクトロレフレクタンス *d* 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 ε_1 , ε_2 との関係は,

$$R = \frac{\left(\varepsilon_{1}^{2} + \varepsilon_{2}^{2}\right)^{\frac{1}{2}} - \sqrt{2} \varepsilon_{s}^{\frac{1}{2}} \left[\varepsilon_{1} + \left(\varepsilon_{1}^{2} + \varepsilon_{2}^{2}\right)^{\frac{1}{2}}\right]^{\frac{1}{2}} + \varepsilon_{s}}{\left(\varepsilon_{1}^{2} + \varepsilon_{2}^{2}\right)^{\frac{1}{2}} + \sqrt{2} \varepsilon_{s}^{\frac{1}{2}} \left[\varepsilon_{1} + \left(\varepsilon_{1}^{2} + \varepsilon_{2}^{2}\right)^{\frac{1}{2}}\right]^{\frac{1}{2}} + \varepsilon_{s}} \qquad (4 \cdot 9)$$



図 4 · 4 各種帯端でみられる電場による複素誘電率の変 化分 $\Delta \varepsilon_1 (\omega, F) \ge \Delta \varepsilon_2 (\omega, F)$ 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 ε_{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,

$$\Delta \mathbf{R} / \mathbf{R} = \alpha (\omega) \Delta \varepsilon_1 + \beta (\omega) \Delta \varepsilon_2 \qquad (4 \cdot 1 \circ 1)$$

となる、ここに

$$\alpha(\omega) = \frac{\sqrt{2} \varepsilon_{\rm s}^{\frac{1}{2}} \left[\left(\varepsilon_{\rm 1}^{2} + \varepsilon_{\rm 2}^{2} \right)^{\frac{1}{2}} + \varepsilon_{\rm s}^{2} \right]^{\frac{1}{2}} \left[2 \varepsilon_{\rm 1} - \left(\varepsilon_{\rm 1}^{2} + \varepsilon_{\rm 2}^{2} \right)^{\frac{1}{2}} - \varepsilon_{\rm s}^{2} \right]}{\left[\left(\varepsilon_{\rm 1} - \varepsilon_{\rm s}^{2} \right)^{2} + \varepsilon_{\rm 2}^{2} \right] \left(\varepsilon_{\rm 1}^{2} + \varepsilon_{\rm 2}^{2} \right)^{\frac{1}{2}}}$$

$$(4 \cdot 1 1)$$

$$\beta(\omega) = \frac{\sqrt{2} \varepsilon_{s}^{72} \cdot \varepsilon_{2} [2 \varepsilon_{1} - (\varepsilon_{1}^{2} + \varepsilon_{2}^{2})^{72} - \varepsilon_{s}]}{[(\varepsilon_{1} - \varepsilon_{s})^{2} + \varepsilon_{2}^{2}] (\varepsilon_{1}^{2} + \varepsilon_{2}^{2})^{1/2} [(\varepsilon_{1}^{2} + \varepsilon_{2}^{2})^{1/2} + \varepsilon_{1}]^{1/2}}$$

$$(4 \cdot 12)$$

の関係が得られる.

またエレクトロレ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 $\Delta \varepsilon_1$ (ω , F), $\Delta \varepsilon_2$ (ω , F)の そ れぞれの成分に分割することができる.⁽³⁾

$$\mathcal{\Delta} \varepsilon_{1} = \frac{n}{2n_{s}} (n^{2} - n_{s}^{2} - 3k^{2}) \frac{\mathcal{\Delta}R}{R} + \frac{k}{n_{s}} (3n^{2} - n_{s}^{2} - k^{2}) \mathcal{\Delta}\Theta$$

$$(4 \cdot 13)$$

$$\mathcal{\Delta} \varepsilon_{2} = \frac{k}{2n_{s}} (3n^{2} - n_{s}^{2} - k^{2}) \frac{\mathcal{\Delta}R}{R} + \frac{n}{n_{s}} (3k^{2} + n_{s}^{2} - n^{2}) \mathcal{\Delta}\Theta$$

$$(4 \cdot 14)$$

$$\mathcal{\Delta}\Theta (E_{0}) = \frac{E_{0}}{\pi} \int_{0}^{\infty} \frac{(\frac{\mathcal{\Delta}R}{R} - \frac{\mathcal{\Delta}R_{0}}{R})}{E^{2} - E_{0}^{2}} dE$$

$$(4 \cdot 15)$$

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わ 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2.0~6eVのフォトンエネルギー範囲のエレクトロレフレクタン

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4 R / R を 測定する必要がある.この<math>4 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<math>4 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 + 4 R) Io 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($H = + - \pi$)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, $- - - - \pi \pi$ 駆動させて、光電子増倍管の直流出力を一定(= 2 0 0 m V)に保つ、一方周 波数f($1 0 0 - 1 k H_Z$)の交流電界で変調された交流分 $I_0 A R d u - - - \pi$ 記録計に記録される. $I_0 R m$ -定になっているため記録計には4 R / Rに 比 例した値が直接示されていることになる.



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、UXL5000 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54 61Åで2~3Å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、ロックイン増幅器として、PAR(Princeton A-PPlied 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、CH₃OH+Br₂でエッチした、電解液としては0.1 規定のNH₄Cl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(~9µ)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1000V_{p-p}程度必要であるし、クーロン力による機械的振動により-^{***}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⁽³⁾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。Iifetime broadening によるエネルギ ー準位の"ぼやけ"が大になるために信号が broad になっている。とくに E₂ (X₇ - X₆)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 $\Delta \varepsilon_1$ 、 $\Delta \varepsilon_2$ を求めた。ただし電解液の屈折率として、 $n_s = 1.3.3$ を用いた。 この結果を図4・8に示す。いま周波数fHz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Ei 帯端(<1.1.1 > 方向に関

-53-



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、 $M_{i\perp}$ 型帯端が存在する場合、 $M_{i\perp}$ 型帯端も同時に存在する が、 横方向の有効質量より縦方向(<111)>方向)の有効質量の 万がかなり大きいので、⁽¹¹⁾(CdTeでは約10倍)縦方向からの寄与($M_{i\perp}$) は少なく、 $M_{i\perp}$ 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、 $\Delta \varepsilon_i$ に対しては $M_{i\perp}$ 型、 $\Delta \varepsilon_i$ に対しては $M_{i\perp}$ 型がよく対応 する、しかし $M_{i\perp}$ 型からバンドギャップを決めると妥当な値になるのに対して、 $M_{i\perp}$ 型からこれを決めると若干大きな値になってしまう、以上のように $M_{i\perp}$ 型だけで説明できない原因として $M_{i\perp}$ 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 エレクトロレ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. As Pnes 達 はこの電界の不均一性によって $d\epsilon_1$ と $d\epsilon_2$ の混合が起ることを報告している.

また HgTe と HgSe のエレクトロレ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、 $E_1 + A_1$ 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 de_2 の スペクトルが M_{1L} 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 ベ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.この方法ではネサ 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 $E_1 + 4_1$ 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 $E_1 + d_1$ 近傍の エレクトロレフレクタン ス・スペクトルを示す。図から明らかなように、 $T = 290^\circ$ Kから77°K に 至るまでは、温度による broadening 効果が著しくきき、dR/Rのピーク 値は約12倍にまでなっている。しかし77°Kと15°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 ・ 1 0 にこれらの実験から得られた E_1 および $E_1 + A_1$ 帯端の 温度依存性 を示す. T = 1 5°K~250°Kの範囲では E_1 および $E_1 + A_1$ 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 A_1 の温度依存性はほとんど ない が,室温近くになると A_1 の値が大きくなる.この傾向は Cardona 達 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 エレクトロレフレクタンスの測定より求めたHgTeのEiおよびEi+4i の温度依存性



図4・11 E₁帯端近傍におけるエレクトロレフレクタンス信号の
 直流バイアス電圧依存性・(a) V_{AC}=1100V_{P-P}, V_{DC},
 1:1480V, 2:1000V 3:600V 4:400V, 5:0V 6:-600V,
 (b) V_{AC}=2100V_{P-P}, V_{DC}=0V

図4・11 に 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 A 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ても表面準位などの存在による表面電 $場が存在することが知れる。HgTe に正の電圧 <math>V_{DC}$ を加えてゆくとこの表面電 場が小さくなり A R / Rの信号が小さくなる。 $V_{DC} \approx + 1000 V c A R / R o$ 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AR/Rの正のビークと負 のビ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、正のビークに対応 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 $E_1 + A_1$ の値を示す。

	НдТе		НgSe	
	E ,	$E_1 + \Delta_1$	E ₁	E ₁ + <i>A</i> ₁
室温	2.12	2.78	2.8 5	3.17
77°K	2.2 4	2.86	2.94	3. 2 2 ₃
15°K	2.25	2.89		

表 4 ・ 1 エレクトロレフレクタンスの測定より求めた HgTe と HgSe の室温, 7 7° K, 1 5° K における E_1 および E_1 + d_1 の値(eV)

 $4 \cdot 4 \cdot 2$ HgSe $n \perp \nu \gamma \restriction n \nu \gamma \rho \phi \gamma \gamma$

HgSeの電解液法による結果を図4・12に示す. $E_1 \ge E_1 + A_1$ 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^{f} についてはCardona達⁽³⁾が求めた値よりも大きく $E_0^{f} = 5.44$ 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 *トン・エネルギー近傍には帯端における直接帯間遷移がなく、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 E₁ 帯端とほぼ同じように Δ ε₁ では M_{1L}型が Δ ε₂では M // 型がよく対応し, M₁// 型をとれば帯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 $\Delta \varepsilon_1$ および $\Delta \varepsilon_2$

HgSe の場合には HgTe に比べてスピン軌道分裂 J_1 の値が小さく,室温では $E_1 \ge E_1 + J_1$ 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 (5) デンサ法を用いて液体窒素温度で測定した. 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 $E_1 \ge E_1 + J_1$ 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て, 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 $E_1 + J_1$ 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($E_1 + J_1$)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 ・ 1 4 – 7 7 ° Kにおける HgSe の E, 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

 $\Delta R / R のバイアス電圧依存性と <math>\Delta R_{f}$ とその第2高調波 ΔR_{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.⁽¹⁴⁾ 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, パン ド・バラメータE₁, E₁ + A_1 E₀⁻, E₂, E₂ + δ の値を求めるとともに, E₁ ($A_{4,5} - A_6$)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 E₁ と E₁ + A_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
- 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
- Y.Hamakawa, F.A.Germano and P.Handler, Phys Rev. 167(1968)709
- (15) T.C.Harman, "II-VICompounds" North Holland Publ.Co.
 Amsterdam (1967)767

第5章 Cd_xHg_{1-x}Teのエレクトロレフレクタンス

5・1 緒言

最近 $Cd_xHg_{1-x}Te$ 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. また混晶比 x を変えることにより 1.3 μ 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 $cr_6 \ge \Gamma_8$ 状 態に対応するベンドが入換るという興味深い問題がある.⁽²⁾ところでCd_xHg_{1-x}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 ^{(3)~(5)}によって、報告がなされているが、吸収端以上の帯間遷移の混 晶比依存性については、ほとんど報告されていない.⁽⁶⁾⁽⁷⁾これらのエネルギー・ ギャップの混晶比依存性を求めることにより、 Γ 点における $\Gamma_6 \ge \Gamma_8$ 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.

HgTe とCdTe は共に、閃亜鉛鉱型の結晶構造であり、格子定数⁽²⁾もあまり 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⁽⁸⁾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⁽⁹⁾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⁽¹⁰⁾ はCd_xHg_{1-x}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⁽¹¹⁾は、II-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, $E_0 = a + bx + cx^2$ の関係式を得ている. ここで cは nonlinear 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 ⁽¹²⁾は dielectric two band modelにもとず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 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 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_xHg_{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 A_0 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.⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾

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4 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4 R/Rに比例する量となり、これが記録計に記録される.

-66-



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 μ 近傍からOH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. ここでは,電解液セルの石英窓と試料の間に12 μ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1.8~6 eVのフォトンエネルギー領域における HgTe, Cd_{0,20} Hg_{0.80}Te, Cd_{0.30}Hg_{0.70}Te, Cd_{0.35}Hg_{0.65}Te, 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 ⁽¹⁷⁾が報告した結果と良く 一致している。図 5 · 2 より x = 0.9 7 を除いた混晶(0< x ≤ 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 ロレフレクタンス信号 (a) HgTe,

図5・3の(a)~(c) に0.4~2 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} Hg0.50Te, 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 E₁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 E₂ お よび E₂ + 3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



 \boxtimes 5 · 2 (b) $Cd_{x}Hg_{1-x}Te$



応を起して、表面の反射率が下がるためで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っ 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 ーによる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(HgTe, CdTe)より小さ



-71-



くなることが考えられる.

5 · 3 · 2 $E_0 + \Delta_0$ a L $U \Delta_0$

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×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Cdn grHgn n3Te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⁽¹⁸⁾もGa_xIn_{1-x}Asのエレクトロレフレクタンスの測定でE₀+ 𝑍, 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 Γ_{r} - Γ_{s} 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、 $\Gamma_6 \ge \Gamma_8$ 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 $\Gamma_r - \Gamma_s$ は許容遷移である し⁽¹⁹⁾ 反転した後は、フェルミレベルの位置を考えると、 x が Q 1 から 0 まで 減少するにつれて, Γ_6 レベルは電子で満され, Γ_7 ー Γ_8 間の遷移確率は Γ_7 ー Γ。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Β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 4.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了。の伝導 帯の底より上にあれば、このエネルギー値はΓ,からフェルミ面までの遷移に



図5・4 $Cd_x Hg_{1-x} Teo E_0$, $E_0 + \Delta_0$ および $\Delta_0 o$ 混晶比依存性 ・ エレクトロレフレクタンスより得られた Δ_0 ($0 \le x < 0.1$) および $E_0 + \Delta_0$ ($0.1 < x \le 1$)の混晶比依存性.----: 直線的 変化の場合, -- および X: $r_v = 1.0.4 r_v$ 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 Δ_0 の値, -・-および O: $r_v = 1.08 r_v$ 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 Δ_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 F_s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 Γ 点近傍におけるエネルギー帯構造 HgTeのスピン軌道分裂 Δ_0 の理論計算値は幾人かの研究者 $^{(10)(20) \sim (22)}$ 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、このことからもビークBを Δ_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、 Γ_6 - Γ_8 間の直接遷移によるものか他の原因(目由電子による吸収、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 $E_0 \ge \Delta_0$ 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 E₁ $zz = 1 + 4_1$

図 5 ・ 2 から分るように, 混晶($0 < x \le 0.7$)の E_1 帯端近傍におけるスペットルは 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 ⁽²¹⁾	1.20(lons)0.98(Atoms)
Cardona ⁽²⁰⁾	1. 2 1
Verie (22)	1. 1 0
(10) Katsuki	0,89(77K)
Present Work	1.08±0.02

表5・1 スピン軌道分裂 A。の理論値と実験値(eV)

の E.帯端においては最初の正のピークがパンド・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 E1(1)と正のピー クに対応するエネルギー値 E,(2)の二つの可能性があり、従って Q.7 < x < Q.97の範囲では E.(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, + 4, 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Gax In1-xAs (23)においても報告されている. 図5 ・ 6に E₁および E₁ + A₁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), E, + Δ,(1)の場合だけを示してある.図には Galazka と Kisiel の反射測定の結果(×)とLudeke と Paul 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, と E, + 4, 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 D < x < D, 1 領域の異常な変化はみられなかった。 そして x ≈ 0.1 前後でなめらかな変化を示しているところから Γ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. Γ点とL点の comPatibility relation はΓ_a ↔ $L_{4}, L_{5}, L_{6}, \Gamma_{6} \leftrightarrow L_{6}$ なので×が0から増加していって反転を起すと Γ_{6}

は価電子帯側のL。状態から伝導帯側のL。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 $E_1, E_1 + A_1$ なよび A_1 の混晶比依存性, @ : エレクトロレフレクタンスより得られた値,〇:吸収測定より得られた $<math> (7)_{, \times : 反 射測定より得られた値} (6)$

このようにして得られた E₁ と E₁ + 4₁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レ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 E₁ 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思われる.



図5・7 $Cd_{x}Hg_{1-x}$ 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 Δ_{1} の混晶比依存性も示してある、 Δ_{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 Λ 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.⁽²⁴⁾ 5・3・4 E'_{0} , E,および E, + δ

 $E'_{0} E_{2}E_{2} + \delta$ 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 Γ 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、 $図5 \cdot 5 o$ HgTe のバンド構造に示されているように、 Γ_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 $E_2 \approx 5.6 \text{ eV}$ 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 のエレクトロレフ レクタンスより得られた 5.7 7 eV における信号のピークとほぼ一致している.



図5・8 エレクトロレフレクタンスより得られた E'_{0} , E_{2} および E_{2} + δ の混晶比依存性. (×) は吸収測定より得られた結果 (7)

Hengehold と Fraim⁽²⁵⁾はCdS_{1-x}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. $Cd_{x}Hg_{1-x}Te$ 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レフレクタンスより得られたHgTe とCdTe の各バンド ギャップの値を表 5 ・ 2 に示す.

	CdTe				HgTe					
	E ₁	$E_1 + \Delta_1$	E'	E ₂		E ₁	$E_1 + \Delta$	F 🕻	E ₂	$E_2 + \delta$
Cardona ⁽²⁹⁾	3.3 2	3.88	5.1 6	5.40		2.09	2.7 1	4.03	4.8 4	-
Ludeke ⁽⁷⁾	3.3 9	3.99	-	5.32		2.15	2.85	_	4.8 4	_
Cardona ⁽¹⁷⁾	3.28	3.87	5.3 0	-	_	2.12	2.7 8	4.1 4	4.79	5.24
Galazka ⁽⁶⁾	3.2 8	3.86	_	_		2.06	2.7 3	_		-
Present work	3.3 <u>1</u>	3.9 1	5.3 4	~5.5 6	~5.77	2.12	2.7 8	4.14	4.7 0	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⁽²⁶は A_N B_{8-N} (N=1~4) 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⁽¹²⁾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

$$E_{.} = a + bx + c x^{2} \qquad (5 \cdot 1)$$

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。前者は結晶ボテンシャルを混晶比に従って平均化する virtualcrystal 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 ボテンシャルには virtual-crystal 近似におけるボテンシャルに加えて、 これらの置換原子によるボテンシャルの"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。このボテンシャルの "ゆらぎ"の大きさはMF_{1-x}G_xの混晶においては、

 $C_{FG} = b e^{2}Z | 1/r_{F} - 1/r_{G} | e^{-kR}$ (5・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 ceは

$$c_{e} = C_{FG}^{2} / A \qquad (5 \cdot 3)$$

で表わされる。ここに

b, A:定数

Z:価電子数

「F, 「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:価電子の Fermi-Thomas 半径

またバンドギャップE:は

 $E_{i} = E_{ih} [1 + (C/E_{ih})^{2}]^{\frac{1}{2}} \quad 又は \qquad (5 \cdot 4)$ $E_{i} = [E_{ih} - (D_{av} - 1) \Delta E_{i}] [1 + (C/E_{ih})^{2}]^{\frac{1}{2}} \quad (5 \cdot 5)$ 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

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 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⁽²⁷⁾ 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 N 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_xHg_{1-x} Te の E₀, E₁, および E₀ 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 Stelzer が求めた基礎吸収端 E₀のデータも示してある(×)。図より明らかなように計

-82-



図5・9 E_0 , E_1 および E'_0 の混晶比依存性.----: 直線的変化, ---: $r_v = 1.0.4 r_v$ と仮定して得られた計算結果, ---・: $r_v = 1.0.8 r_v$ と仮定して得られた計算結果, ×: Schmit と Stelzer⁽⁵⁾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 Eoについては Schmit らの結果とよく合っているが、 EiとE' につ いては本実験結果と相当の開きがある.このE。に対する計算値を用いて.図5 ・4のE₀ + 4₀の実験値から4₀の混晶比依存性を求めると、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、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.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 E₁と E₂ 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 NaCI 型 閃亜鉛鉱型,ウルツ型を通じて,15の値から上下,10%以内の変動に収ま (26) っている. Aの値は ZnS - Te 系の混晶から決定されたもので A ≈ 0.98 eV の値をもっている、この値も若干不確実な値といえる、しかし(5・2)。 $(5 \cdot 3)$ 式より共有給合半径 r_{F} , r_{C} が C_{FC} ひいては, c_{a} 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 rv 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。の混晶比依存性と図5・4の E。+ 4。 の実験値から」の混晶比依存性を求めると図5・4の(〇)になり、」のがほ 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ボー ラエネルギーギャップにはほとんど影響を与えず,従って intrinsic Parameter c_i の変化は無視できる.また表より Cd_xHg_{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ボテンシャルに起因しており, virtual crystal ボ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, intrinsic 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.

	ci		c _e		с	calc	c _{exp}
r _V	1.04r _{IV}	1.08r w	1.04r IV	^{1.08} r IV	1.04r _{IV}	1.08r _{IV}	
E ₀	0.2 2	0.2 2	0.22	0.67	0.4 4	0.89	_
E ₁	0.16	0.16	0.2 2	0.67	0,3 8	0.83	0.8 4
E ₀ ¹	0.0 2	0.0 2	0.2 2	0.67	0.2 4	0.69	0.7 0

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レフレクタンス・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±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 対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_{*}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⁽²⁸⁾ 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 $\alpha \ge \beta$ 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 AR/Rの信号はほぼ A E だけで表わされる 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 $よび CdTe に おける <math>E_0 + A_0$ に対応する AR/Rの形と図4・4の $A E_1$ 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=133)中に浸した場合のHgTe(---)

および Cd Te (---) の α (ω) 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、 Γ_{τ} レベルに励起された目由正孔の寿命は 目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ォトン

エネルギー0.5~6 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.また主要なパンドギャップ(E₀+ A_0 , E₁, E₁+ A_1 E'₀, E₂, E₂+ δ)の混晶比依存性を求め. E₀+ A_0 E₁ E₁+ A_1 , E'₀ はほぼ放物線的な変化を示し, E₂, E₂+ δ 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 E₂ および E₂+ δ 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 Γ_6 , Γ_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・バ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. C 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 Semimetels
 5 (1970) 175
- (2) T.C.Harman, "II-VI Compounds" North Holl and Publ.Co.Amstardam(1967)767

ç

- (3) C.Verie, "II-VI Semiconducting Compounds" Intern.Cont.,
 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.Stelzer, J.APPI.Phys.40(1969)4865
- (6) R.R.Galagka and A.Kisiel, Phys.Status Solidi **34**(1969)63
- (7) R.Ludeke and W.Paul, J.APPI.Phys. 37(1966)3499
- (8) J.B.Blair and R.Newhnam, "Metallurgy of Elemental and Compound Somiconductors" 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)33 3351
- (13) A.Moritani, K.Taniguchi, C.Hamaguchi, J.Nakai, R.Ueda, O, Ohtsuki and Y.Ueda, J.Phys.Soc.JaPan 31(1971)945
- 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
- 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. SoPP1.11(1969)70
- (21) V.V.Sobolev, OPtics and Spectroscopy 18(1965)456
- (2) C.Verie, Advances in Solid State Phys.edited by O.Madelung.(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.APPI, Phys. 10(1971)1410
- (29) M.Cardona and D.L.Greenaway Phys.Rev. 131(1963)98

第6章 結 論

水銀カルコゲナイドと 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バ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 法によりフォトンエネルギー 1.8 ~ 3.5 eVの 領域でフォトン・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 E₁ ($A_{4, 5} - A_{6}$), E₁ + A_{1} ($A_{6} - A_{6}$)に対応するピークが認められ, それぞれ, E₁=2.18 eV, E₁+ A_{1} = 2.80 eV および E₁ = 2.92 eV, E₁ + 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

-90-

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 $E_1 E_1 + d_1$, 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 $E_1 + d_1 = 2.78$ eV $E'_0 = 4.14$ eV

 $E_2 = 4.70 \text{ eV} E_2 + \delta = 5.40 \text{ eV}, \text{ HgSe では} E_1 = 2.85 \text{ eV},$ $E_1 + A_1 = 3.17 \text{ eV} E_0' = 5.44 \text{ eV}$ が得られた.また,これらを Kramers-Kronig変換し、 $A_{\varepsilon_1}, A_{\varepsilon_2} \varepsilon 求め, A_{\varepsilon_1} \text{ tM}_{1}$ 型に A_{ε_2} は $M_{1/2}$ 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E₁とE₁ + A_1 の値として、それぞ れ E₁ = 2.24 eV E₁ + A_1 = 2.86 eV およびE₁ = 2.946 eV E₁ + A_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 $A R \neq R$ の大きさを制限 していることがわかった、
- (5) $Cd_{x}Hg_{1-x}Te$ 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. $E_{0} + A_{0}$, E_{1} , E_{1} + $A_{1} E_{0}'$ 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) E₂, E₂ + δの混晶比依存性からCdTeのE₂およびE₂ + δの値をE₂ ≃
 5.56 eV, E₂ + δ ≃ 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) Г点における Г₆ と Г₈ のパンドの反転はブリルアンソ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 4,の値を実験的に求め、室温における値を 4, =
 1.08±0.02 eVと決定した。
- (10) E₁の混晶比依存性より逆に Cd_xHg_{1-x}Te 混晶の混晶比 x をエレクトロレ 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 からエレクトロレ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緒兄,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.