

Title	狭いエネルギーギャップを持つ半導体の超格子と深い不純物の磁気光学的研究
Author(s)	下村, 哲
Citation	大阪大学, 1987, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/874">https://hdl.handle.net/11094/874</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

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

Osaka University

【3】

氏名・(本籍)	しも 下	むら 村	さとし 哲
学位の種類	理	学	博 士
学位記番号	第	7864	号
学位授与の日付	昭和62年9月30日		
学位授与の要件	理学研究科物理学専攻 学位規則第5条第1項該当		
学位論文題目	狭いエネルギーギャップを持つ半導体の超格子と深い不純物の磁気 光学的研究		
論文審査委員	(主査)		
	教 授	邑瀬	和生
	(副査)		
	教 授	伊達 宗行	教 授 金森順次郎
	教 授	大塚 穎三	教 授 櫛田 孝司

論 文 内 容 の 要 旨

PbTe/Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Te超格子のサブバンド構造をサイクロトロン共鳴を用いて解析した。また、Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>TeにInをドーピングした系で起こる強い光伝導の機構を、磁気プラズマ反射から求めたキャリア数の温度依存性より明らかにした。

母体結晶として用いたPb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Teは狭いエネルギーギャップを持ち、このギャップはSn組成の増加とともに減少しx=0.35でバンド反転を起こす。PbTeとPb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Teを交互にかさねた超格子は、正孔と電子がPb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Te層にたまるタイプI超格子であるという実験結果と、電子がPbTe層に、正孔がPb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Te層にたまるタイプI'超格子であるという実験結果が報告されており、バンド不連続の問題も確立されていない。バンド不連続に関してLCAOを基にしたモデルと、Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>TeにドーピングしたInの不純物準位を基準にしたモデルがそれぞれの実験結果にたいして提案されており、この問題を解決することと、障壁層の厚みを制御して電子系の2次元から3次元への転移を観測するのが超格子系に対する本論文の目的である。

超格子の試料は、易動度の良いエピタキシャル フィルムの得られるホットウォール法をもちいてBaF<sub>2</sub>の劈開面上に作製した。超格子の電子構造を決定する重要な因子である周期および各層間のSnとPbの相互拡散をX線回折により決めた。PbTe層の厚さをほぼ200Åに固定し、Pb<sub>0.8</sub>Sn<sub>0.2</sub>Te層の厚さを変えた拡散の非常に小さい超格子に対するサイクロトロン共鳴磁場の角度依存性より、バンド端構造を解析した。〈111〉方向に成長するこの超格子では、L点の四つのバレーのうち〈111〉方向のバレー (V<sub>s</sub>バレー) と他の3つのバレー (V<sub>t</sub>バレー) で超格子構造の影響の受け方が違う。V<sub>s</sub>バレーについてはどの試料についても2次元であったが、V<sub>t</sub>バレーについてはある厚さ以下で3次元的になった。バレー

による次元性の違いは超格子方向の電子の質量が $V_t$ バレーの方が $V_s$ バレーより $1/10$ 小さいことによる。これらの実験と比較するため、包絡関数近似の方法を用いてサブバンドを計算した。包絡関数近似の方法はバンドの非放物線性、および質量の違うPbTe層と $Pb_{1-x}Sn_xTe$ 層の波動関数についての境界条件を問題なく繰り込むことができる。この計算により、Inの不純物準位を基準にしてバンド不連続を求めるモデルで実験結果をよく再現でき、このモデルがよく成り立っていることが解った。

Inをドーピングした $Pb_{1-x}Sn_xTe$ に対してストリップライン法による磁気プラズマ反射の実験を行い、300 Kの輻射のあたる状況では、4.2–15 Kではほとんどキャリア数は変化しないが、15 K以上では急激に減少し、20 Kでキャリアが非常に少なくなることを見いだした。これまでの $Pb_{1-x}Sn_xTe/In$ に対する実験はIn準位の電子と格子が強く相互作用してアンダーソンの負のポテンシャルが生じるモデルで定性的に説明されてきたが、このキャリア濃度の温度依存性について、光励起緩和現象のメカニズムを負のポテンシャルモデルで明らかにし、定量的な考察を行った。これより電子格子相互作用の重要なパラメーターを決定した。また、バンド端質量が、ドーピングしていない $Pb_{1-x}Sn_xTe$ に比べ、非常に重くなっていることを見だし、その原因はInがつくりだす静的および動的ランダムポテンシャルによるものと考えられる。

## 論文の審査結果の要旨

異種の半導体を規則正しく積み重ねて超格子構造にすると、電子のポテンシャル エネルギーが面に垂直に変調を受ける。各層の厚さ、層内の合金組成や不純物等を制御できれば、周期ポテンシャルの形やフェルミ準位を人工的に設定できる。電子ポテンシャル井戸の幅が電子波の波長程度で、隣合う井戸間のトンネル効果が小さいと多重量子井戸になり、井戸内で層面に平行な2次元電子系が実現できる。ヘテロ界面や超格子の2次元電子系は半導体物理の新しい研究対象で、基礎物理学と工学の両面に深く係わっている。

下村哲君の論文は2つの主要部分で構成されている。一つはPbTe/ $Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te$ 超格子の2次元サブバンド構造をサイクロトロン共鳴によって解析したことで、もう一つは、 $Pb_{1-x}Sn_xTe$ にInをドーピングした系の磁気プラズマ反射から強い光伝導によるキャリア数の温度依存性を測定し、永久光伝導の機構を明らかにしたことである。2つの部分は超格子の量子井戸のタイプを決める上で密接に関係している。

$Pb_{1-x}Sn_xTe$ は狭いエネルギーギャップを持つ縮退半導体で、Sn組成 $x$ の増加とともにギャップが減少し、 $x=0.35$ でゼロとなり、バンド反転して再び増加する。従来、PbTeと $Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te$ を交互に重ねた超格子の井戸について、正孔と電子が $Pb_{1-x}Sn_xTe$ 層にたまるタイプIと、電子がPbTe層に、正孔は $Pb_{1-x}Sn_xTe$ にたまるタイプI'との2つの報告があった。下村君は量子井戸の厚みを制御して2次元電子と、電子系の2次元から3次元への転移を詳細に研究し、Inレベルを合金系の電子エネルギーの標準にとって予測したタイプI'モデルが正しいことを明らかにした。PbTe層の厚さを200 Åに固定し、 $Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te$ 層の厚さを変えた各種の超格子をホットウォール法を用いて、 $BaF_2$ の〈111〉劈開面上にエピタキ

シャル成長させた。電子のL点の4つのバレイが超格子構造で受ける影響が異なることから、バレイによる次元性の違いを調べた。実験による有効質量の異方性を包絡関数近似の方法による計算によって再現している。次いで、Inを含むバルク $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ の光励起緩和現象を理解するため、電子-格子強結合によるアンダーソンの負ポテンシャルモデルを発展させ定量的に現象を説明した。バンド端質量がIn(1%)によって、非常に重くなっていることを見出し、その原因をInによる静的および動的ポテンシャルによるものと考察した。

本論文は、狭いエネルギーギャップを持つ半導体超格子の電子状態と、深い不純物の電子-格子強結合による光励起緩和機構を明らかにしたことで、新しい内容豊かなものであり、 $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ を舞台とするソリトン状態とパリティ異常などの基礎物理と、応用面にも大きく貢献するもので、理学博士の学位論文として十分価値あるものと認める。