

学 位 論 文 題 名

Experimental study of the Γ -X mixing in symmetric GaAs/AlAs
short-period superlattices

（短周期超格子GaAs/AlAsにおける Γ -X混成）

学位論文内容の要旨

1. はじめに

短周期超格子GaAs/AlAsにおいては、GaAsの伝導帯の Γ バンド極小とAlAsの伝導帯のXバンド極小のエネルギーの上下関係は、超格子を構成する物質（即ちGaAs, AlAs）の層の厚さを適当に選ぶことによって調整することができる。 n 層のGaAsと n 層のAlAsから成る超格子では、直接型から間接型への移行（ Γ -X交差）は $n=12$ 付近でおきると考えられている。 Γ -X交差近傍では、2種類の異なった伝導帯バレー間の相互作用のために状態の混成（ Γ -X混成）がおきると予想されている。このことに関し、本研究では、以下の点を明らかにすることを目的として研究をおこなった。

- （a）混成ポテンシャルの大きさの評価。
- （b）混成メカニズムにおけるランダム過程と非ランダム過程の役割。
- （c） Γ -X混成の超格子の対称性に対する依存性。

この目的のために、 $(\text{GaAs})_n/(\text{AlAs})_n$ 超格子（ $n=8\sim 15$ ）に対して、低温高圧下において発光のcw測定、時間分解測定および吸収スペクトル測定をおこなった。結果として、 Γ -X交差近傍での Γ -X混成の存在を確認し、その大きさがAlAs層の層数に敏感に依存することを実験的に見出した。

2. 試料と実験方法

試料は半絶縁性GaAs（001）基盤上に分子線エピタキシー（MBE）成長させた $(\text{GaAs})_n/(\text{AlAs})_n$ 超格子（以後 (n/n) 超格子と呼ぶ）である。試料の各層の厚さはX線回折と電子顕微鏡測定の2つの方法により独立に求められ、

よい一致を示している。吸収測定に際しては、試料の基盤は選択エッチングにより除いた。試料はメルル＝バセット型のダイヤモンド・アンヴィルにセットした。ルビー・チップとバルクのGaAsからの蛍光測定により静水圧を評価した。圧力の一様性は0.1 kbar程度である。吸収スペクトル測定の光源としては、ハロゲン・ランプを用いた。蛍光測定の際の光源として、モード同期Nd/YAGレーザーの2倍波で励起されたモード同期色素(R6G)レーザーをキャビティ・ダンプの方法で適当な時間間隔にして用いた。このレーザー・システムと時間相関単一光子計数システムを合わせた時間分解能は約0.3 nsであった。測定はすべて液体ヘリウム温度でおこなった。

3. 結果と考察

最初に、発光のピーク・エネルギーと、吸収のピーク・エネルギーを超格子の各層の数 n の関数として測定した。これにより、 (n/n) 超格子の Γ -X交差が $n=13$ で起きることを見出した。吸収は、伝導帯の Γ 電子と価電子帯の Γ ヘビー・ホールとから成る直接型の励起子によるものと考えられる。一方、発光に関しては、 $n \leq 12$ の試料では、発光のピークは吸収端よりも低エネルギー側にシフトしており、これらの試料が間接型のバンド・ギャップをもつことを示している。発光の起源はAlAs中のX電子と Γ ヘビー・ホールとから成る間接型励起子であると考えられる。これに対して、 $n \geq 13$ の試料では、発光のピークは吸収の立ち上がり的一致しており、これらの試料が直接型バンド・ギャップをもつことがわかる。従って発光の起源は、GaAs中の Γ 電子と Γ ヘビー・ホールから成る直接型励起子であるといえる。測定結果は、クロニッヒ＝ベニー・モデルを用いて計算した直接ギャップと間接ギャップのエネルギー値によく一致することが見出された。以上の結果から、 (n/n) 超格子における直接形-間接型(或はタイプI-タイプII)遷移は、 $n=13$ 付近で起きることがわかった。

次に、タイプI-タイプII境界付近にある試料(13/13)について発光、吸収及び発光の時間分解測定を静水圧下でおこない、 Γ -X交差近傍での Γ -X混成の存在を強く示唆する結果を得た。発光ピーク・エネルギーは、1.1 kbarまでは係数約10 meV/kbarで高エネルギー側へシフトする一方、それ以上の圧力領域では約-2 meV/kbarで低エネルギー側へシフトすることを見出した。この

圧力依存性は、1. 1 k b a rで試料が直接型から間接型へ移行 (Γ -X 交差) したことを示している。交差近傍での発光寿命の測定を行った結果、寿命は、直接型領域では、ナノ秒程度で指数関数的に減衰する一方、間接型領域では摂動論で予想されるように圧力の2乗に比例して急激に長くなることを見出した。しかしながら、直接型の速い減衰が1. 1 k b a rの交差点よりも高い圧力範囲 ($\sim 1. 4$ k b a r) でも観測された。これは Γ -X 混成のために間接型励起子の輻射減衰率が増大したためであると考えられる。さらに吸収ピークについても Γ -X 交差近傍で圧力に対する線形性が保たれていないことを見出した。このことも、寿命測定の結果と併せて、交差付近での Γ -X 混成の存在を強く示唆している。

次に、(14/14), (15/15) 超格子において、輻射寿命の比較をおこなひ、 Γ -X 混成が層数 n に強く依存することを見出した。静水圧によって、 Γ -X エネルギー分裂 (Δ) を変化させたときの、各試料の輻射寿命の変化は、どちらの試料に関しても、 Δ の2乗に対して線形に増加しているが、その依存性は $n = 14$ の試料に対しての方が顕著であった。即ち、同程度の Δ に対しては常に $n = 14$ の試料の寿命が長くなっている。この結果は、対称的な超格子 (n/n) における Γ -X 混成度は、 n が奇数の試料に対しての方が大きいことを意味している。同様の結果が、 $n = 8 \sim 12$ の試料に関しても得られた。輻射寿命が n の偶奇に依存することは、とりもなおさず Γ -X 混成が存在していることの直接的な証拠であるといえる。最近のバンド計算によれば、 Γ -X 混成は、A l A s 層の層数に強く依存することが示唆されている。これを併せて考えると、我々の結果は、奇数の A l A s 層をもつ試料の方が、偶数のものよりも、 Γ -X 混成が顕著であることを示しているといえる。

タイプ II 領域における発光強度の減衰曲線の解析結果から、混成の主なメカニズムが、超格子界面の無秩序ポテンシャルによる散乱過程であり、非無秩序な過程による寄与は非常に小さいことがわかった。最後に、輻射寿命の測定と吸収ピークの圧力依存性の結果とから、 Γ -X 混成に対応するポテンシャルが、約 1. 8 m e V と求められた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 井 上 久 遠

副 査 教 授 中 原 純一郎

副 査 助教授 大 川 房 義

副 査 教 授 南 不二雄 (東京工業大学理学部)

学 位 論 文 題 名

Experimental study of the Γ -X mixing in symmetric

GaAs/AlAs short-period superlattices

(短周期超格子GaAs/AlAsにおける Γ -X混成)

二種類の半導体を交互に人工的に積層させた超格子は、典型的な準二次元電子系であり、低次元化に伴う新しい物理現象を研究する格好の場となっている。また、構成物質の組み合わせや、周期即ち層厚を変えることにより電子や正孔の量子閉じ込め状態を制御できるため、新しい物質設計の道を開くものとして応用上も注目されている。就中、GaAs/AlAs系は近年のMBE法等の結晶育成法の進歩によって良質な試料が得られるようになり、超格子のモデル物質として集中的に研究されている。しかしながら、電子構造の最も基本的ないくつかの側面は未だ解明に至っていない。GaAsに由来する伝導帯の Γ バンド極小と、AlAsの伝導帯のXバンド極小のエネルギー関係は、GaAs層の厚さに依存する。即ち、厚さにより量子閉じ込め効果が変わるため、十分厚い場合には前者がエネルギー的に下になり、十分薄い場合には後者が下になる。価電子帯の極大は常にGaAsの Γ の位置にあるため、それぞれI型、II型と分類される。光励起した場合に、伝導帯極小準位から価電子帯極大準位への発光は、前者では強く、後者では弱いことで特性づけられる。

この研究は、GaAsとAlAsの層厚がそれぞれ同じ n 層の対称超格子(n/n)に関して、1)上記のI型からII型への移行、2)AlAs層が伝導帯極小の場合の波動関数の性格、並びに発光の機構、3)I型とII型が交差する場合に Γ -X混成の有無と、

混成ポテンシャルの起源、などを明かにすることを目的として行ったものである。研究は、 $n=8$ から15までの一連の良質な試料を対象として行った。実験方法としては、圧力印加を、関与する各準位の相対的エネルギーを変化させることに用い、発光、並びに吸収スペクトル及び発光スペクトルの時間分解のそれぞれの観測によった。主な成果を以下に要約する。

1、I型からII型への移行は、 n が12から13でおきる。即ち、 $n \leq 12$ ではAlAs層のX点が超格子周期で Γ 点に折り返えされた X_z (Z :層成長方向)が伝導帯の極小である。 X_z が X_{xy} より下であることは、発光の一軸性圧力依存性から同定できた。

2、II型の発光の機構が、 Γ -X混合によるものであることがわかった。即ち、発光の時間減衰曲線は、非指数関数的な特色を示しており、この解析から、GaAsとAlAsの界面の一層のゆらぎが混合の起源となって発光する。

3、I型とII型の境界付近にある $n=13$ の試料に関して圧力下での詳細な実験から次のことが判明した。即ち、発光と吸収スペクトルの対比から、 Γ -X交差は1.1kbarでおこる。交差近傍での発光寿命測定は、1.1kbarを過ぎた1.4kbarまで依然として Γ 的な速い減衰を示す。この事実は、関与した状態が Γ -X混成から成り、 Γ 成分に寄因したものである。さらに、吸収スペクトルの圧力依存性も、1.1kbar近傍で異常を示す。従って、 Γ -X混成が生じていること、混成ポテンシャルが2meVであることがわかった。

4、II型の領域における発光寿命が n の偶奇に強く依存することを見い出した。即ち、静水圧によって Γ とXのエネルギーの差 Δ を変化させたとき、 $n=14, 15$ の各試料の発光寿命は Δ の2乗に対して線形に増大するが、 $n=14$ の場合の方が顕著である。また、 $n=8-12$ の試料に関しても同様な結果が得られた。このことは、 Γ -X混合がAlAs層の層厚に強く依存し、対称性の関係から奇数の場合の方が Γ -X混成が強いことを示している。最近の理論における論争に終止符をうつ結果を得たことになる。

以上のように、申請者は種々の分光手段により、また圧力印加手段を併用して、GaAs/AlAs超格子の量子閉じ込め電子構造の基本的な解明を行い、多くの重要な知見を得ることに成功した。これらの成果は、半導体物理学、並びに低次元系物性物理学の分野の進歩に大きな寄与を与えるものであり、高く評価される。なお、参考論文7編はいずれも権威ある国際誌に発表されている。

以上の所見に基づき、審査員は一致して申請者が博士(理学)の学位を受けるのに十分な資格を有するものと認めた。