

9. GaAs/AlAs 短周期超格子の電子構造

中山 毅

1. 序論

1970年にEsakiとTsuによって層ごとに半導体物質が入れ替わるヘテロ構造が提案された。これらの半導体超格子系は、典型的な準2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物質であることや、新しいデバイスへの応用が期待できる等のことから活発に研究されている。その結果GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs系超格子では、各層の厚さが30Å以上のものではKronig-Penney型のポテンシャルを用いた有効質量近似でうまく記述できることがわかった。しかし層の厚さが30Å以下の短周期超格子では層間の相互作用のために、Kronig-Penneyモデルは使えないと考えられる。そこで様々な方法を用いて電子状態が計算されているが、バンドギャップの大きさや性質に関しての一致は良くない。

本研究では、光学的手法を用いてGaAsとAlAsの層厚のほぼ等しい短周期超格子の電子構造を解明することを目標とした。

2. 実験結果と議論

4.2 KにおけるGaAs/AlAs (7層/5層), (5/5), (10/10) 超格子の発光スペクトルを図1に示す。I_{xx}で表したピークが励起子による発光である。励起子線は比較的広く、超格子界面によるポテンシャルゆらぎが存在することを示している。I_{xx}ピークでモニターした励起スペクトルも図1に示してある。スペクトルは、I_{xx}ピークよりもかなり高エネルギー側から急激に減少しており、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。

(5/5), (10/10) 試料の発光寿命の測定結果を図2に示す。減衰時定数(τ)は、 $<100\text{ nsec}$ で非指数関数的に減衰している。直接遷移型の半導体の発光寿命は通例 $<1\text{ nsec}$ であるので、この結果もこれらの試料が間接遷移型であることを示している。発光減衰の非指数関数的振舞いは、界面散乱によって部分的に許容になった間接型励起子のフォノンを介さない輻射過程として説明できる。^{(1),(2)} この過程による発光強度の時間変化は、励起子がブリルアンゾーンの境界または中心にあるときには次式にしたがう。

$$I(t) = \exp(-\omega_r t) / (1 + 2\omega_r t)^{3/2} \quad (1)$$

ここに、 ω_r はフォノンを介さない輻射減衰率、 ω_n はその他の過程による減衰率である。理論値と実験結果との一致は良い(図3)。 Γ 点の励起子からの発光も式(1)に従うので超周期ポテンシャルによって Γ 点に折り返されたAlAsのX点の電子と Γ 点のホールで作られる準直接型励起子も可能性がある。そこで(5/5)の結果から Γ -X混成度を見積ると 10^{-4} 程度になるが、これは最近の理論予測⁽²⁾ 10^{-2} に比べ明らかに小さく、I_{xx}ピークが準直接型励起子に由来する可能性は小さい。

電子状態の対称性を調べるために発光スペクトルの圧力(静水圧力、一軸性圧力)依存性を測定した。静水圧下ではI_{xx}ピークは長波長側にシフトし、この励起子発光がX極小点に由来するものであることが示唆されている。超格子においては、超周期ポテンシャルのためにX点は等価な2つの点 X_x , X_y と X_z に分裂する。このとき X_z は Γ 点に折り返され他の Γ 点と僅かに混成する。 X_x , X_y 極小と X_z 極小のどちらがエネルギー的に低い位置にあるかを決定するために[001]方向に一軸性圧力を加えて測定を行った。 X_z , X_x , X_y 極小のエネルギーシフトは、静水圧ひずみポテンシャルを a 、価電子帯、伝導帯に対するせん断ひずみポテンシャルをそれぞれ b , E_2 として、

$$E_{nn1} = a(s_{11} + 2s_{12})P + b(s_{11} - s_{12})P + 2E_2(s_{11} - s_{12})P/3 \quad (2)$$

$$E_{1nn,010} = a(s_{11} + 2s_{12})P + b(s_{11} - s_{12})P - E_2(s_{11} - s_{12})P/3 \quad (3)$$

と書ける。⁽³⁾ ここで、 s_{11} , s_{12} は弾性コンプライアンス、 P は加えられた一軸性圧力である。GaAs/AlAs系では E_2 に関する項の寄与が最も大きいので、[001]方向の一軸性圧力は X_z 極小に関するエネルギーギャップを減少させる一方、横方向の膨張のために X_x , X_y 極小は高エネルギー側に移動する。測定結果はいずれの試料も負の圧力係数を示し(図4)、I_{xx}で表される発光が X_z 励起子に起因していることを示唆している。しか

しこの結論は L_{α} ピークが準直接型励起子でないという寿命測定の結果に反する。そこで実際の極小点は折り返された X_2 点ではなく、そこより $[001]$ 方向に少しずれた所にあるのではないかと考えている。

3. 結論

以上の実験結果から、この超格子系の電子構造は図5のようになっていると考えている。ホールはGaAs層に閉じ込められた Γ 状態から作られていて、超格子ポテンシャルによって重いホール状態と軽いホール状態に分裂している。伝導電子は Γ 点近傍ではGaAs層に、X点近傍ではAlAs層に閉じ込められる。バンドオフセットのためにAlAs層のX点はGaAs層の Γ 点よりも低くなっている。こうして、最低励起状態はGaAs層に局在した Γ ホールとAlAs層に局在したX点近傍の電子とからなる間接型励起子となる。

References

- (1) F.Minami, K.Hirata, K.Era, T.Yao and Y.Masumoto, Phys.Rev.B **35**, 2517 (1987).
- (2) E.Finkman, M.D.Sturge, M.H.Meynadier, R.E.Nahory, M.C.Tamargo, D.H.Hwang and C.C.Chang, J.Lumin.**39**, 57 (1987).
- (3) F.Minami, K.Todori and K.Inoue, Semicond.Sci.Technol.**4**, 265 (1989).

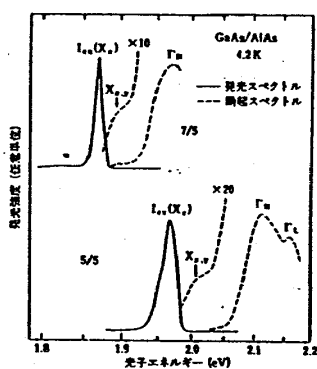


図1

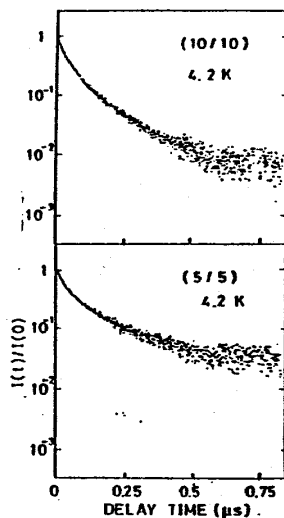
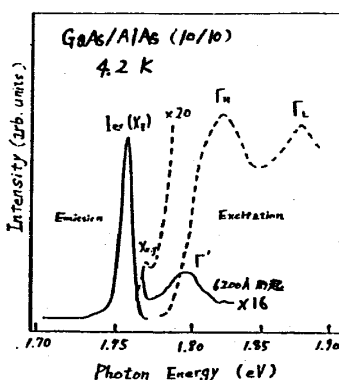


図2

図3

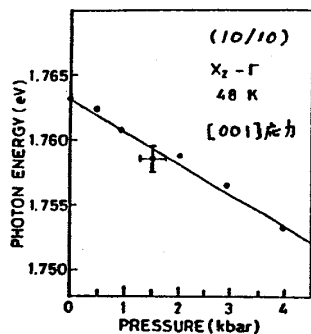
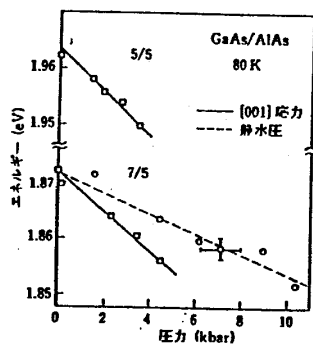


図4

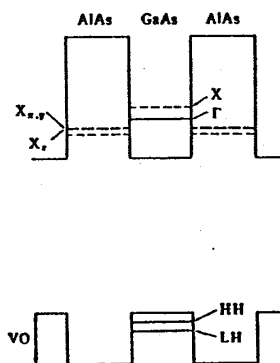


図5