

半導体超格子サブバンドの可視化技術

三村秀典・細田 誠*・大谷直毅**・横尾邦義

東北大学電気通信研究所 ☎ 980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1

*ATR 光電波通信研究所 ☎ 619-0288 京都府相楽郡精華町光台

**ATR 環境適応通信研究所 ☎ 619-0288 京都府相楽郡精華町光台

(1997年6月30日受理)

Visualization of Subbands in Semiconductor Superlattices

Hidehori MIMURA, Makoto HOSODA*, Naoki OHTANI** and Kuniyoshi YOKOO

Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8577

*ATR Adaptive Communications Research Laboratories, Hikaridai, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto 619-0288

**ATR Optical and Radio Communications Research Laboratories, Hikaridai, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto 619-0288

(Received June 30, 1997)

The paper describes a technique to visualize subbands in semiconductor superlattices, which consists of a photon counting method to measure extremely weak photoluminescence (PL) and an image processing using a personal computer for visualization. The technique has been applied to measure the electric-field dependence of the subbands for GaAs/AlAs superlattices with layer thicknesses of 6.8 nm/1.7 nm (sample 1), 6.2 nm/3.4 nm (sample 2) and 6.0 nm/5.0 nm (sample 3), respectively. The field effects of the subbands such as the resonance and Stark-ladder transition are clearly visualized from the PL images. We observed the PL emission between the second $\Gamma(\Gamma_2)$ and heavy hole (hh_1) states due to the resonance between the ground $\Gamma(\Gamma_1)$ and Γ_2 states, and the PL emission between the ground $X(X_1)$ and hh_1 states due to the resonance between X_1 and Γ_2 states. Furthermore, we observed the PLs from the Stark-ladder transitions between the $\Gamma_1(+1)$ and hh_1 states and between the $X_1(+1/2)$ and hh_1 states. This technique is useful for studying electronic states in semiconductor superlattices.

1. は じ め に

層ごとに半導体物質が入れ替わるヘテロ構造を多層に積み重ね、1次元的なポテンシャルの周期構造をつくる半導体超格子は、エネルギーバンド構造を人工的に制御できる系として、これまで物性・デバイス応用の両面にわたり注目を集めてきた¹⁾。すなわち、半導体超格子の電子状態は超格子中に形成されるミニバンド（障壁層が薄く、隣り合う井戸層の電子の波動関数が重なり合う場合）や離散的な量子化準位（障壁層が厚く、波動関数が井戸層に局在している場合）によって特徴付けられるが、超格子の井戸層や障壁層の材料（組成）や膜厚（周期）を変化させることにより、自由にサブバンド（ミニバンドと量子化準位を合わせてサブバンドと呼ぶ）を制御することが可能である。

超格子中のサブバンドの構造を実験的に検証する手段としては、光吸収スペクトルやホトルミネッセンス(PL)スペクトルを測定する光学的方法が広く用いられている。PL法は光吸収の逆過程、すなわち量子化準位にある電子と正孔との間の再結合によって起きるPLスペクトルを測定するもので、光源（レーザ光）と光検出器の著しい進歩により、サブバンドの性質を研究する益々有力な手段となってきた。

本稿では、筆者らが開発したPL法によるサブバンドの可視化技術について紹介し、またこの測定により直接視覚に訴えられるようになった、GaAs/AlAs超格子の興味あるサブバンドの性質であるシュタルク階段(Stark-ladder)準位や超格子のキャリア輸送特性において重要なサブバンド間の共鳴効果などの測定結果を示す。さらに、GaAsの Γ 準位とAlAsの X 準位という運動量の異

なる準位間の共鳴効果についても述べる。

2. 測定装置および試料

Fig. 1 に測定系を示す。CW レーザで試料を励起し、その PL を分光して検出する、通常の PL の測定系とはほぼ同様なものである。特徴は、高次サブバンドやシュタルク階段遷移、 X 準位からの発光など極微弱光を検出するため、検出器にストリークカメラのフォーカスモードを用い、微弱光検出用の光子カウンティングを最大限利用していることである。また、パソコンに取り込まれたデータを数値演算ソフトと画像処理ソフトを用い、例えば縦軸をエネルギーまたは波長、横軸をバイアス電圧、PL 強度を濃淡や色彩により 3 次元グラフィクス化して

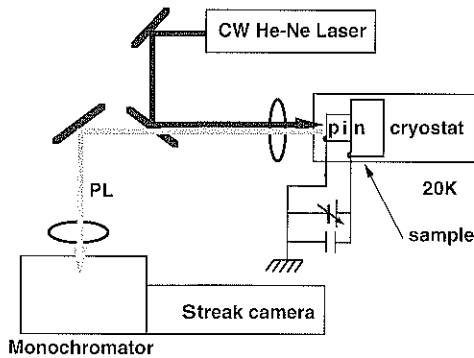


Fig. 1 Schematic diagram of the measurement system.

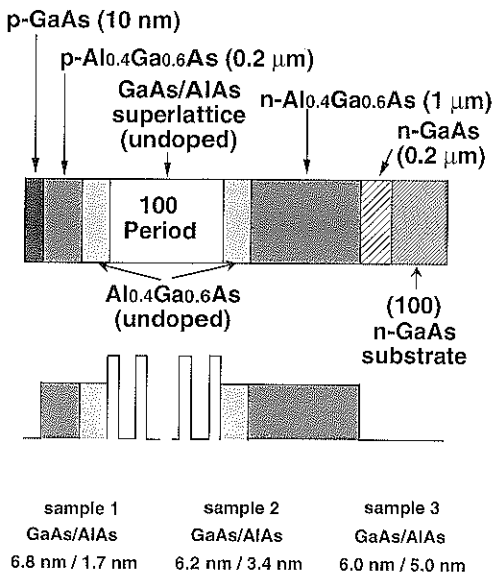


Fig. 2 Schematic structure of the superlattices used in the experiments.

いる。

Fig. 2 に測定に用いた超格子の構造を示す。試料は分子線エピタキシー (MBE) 法で (100) 面の n^+ -GaAs 基板上に成長した pin ダイオードで、i 層は 50 nm の Al-GaAs 層に挟まれた 100 周期の GaAs/AlAs 超格子からなる。試料 1 は GaAs/AlAs 層の膜厚が 6.8 nm/1.7 nm、試料 2 は 6.2 nm/3.4 nm、試料 3 は 6.0 nm/5.0 nm である。試料はクライオスタットに取り付け、ダイオードの逆方向にバイアスを印加し、PL を測定した。測定温度は 20 K、レーザ (He-Ne) 光は p キャップ側から照射し、強度は約 1 mW である。

3. 超格子のサブバンドの可視化

Fig. 3 に GaAs/AlAs 超格子の無電界時 (a) および電界印加時 (b) におけるサブバンド構造を示す。今回用いた障壁層が比較的薄い超格子では、無電界時にはミニバンドが形成されている。価電子帯側では超格子の量子効果のため、重い正孔と軽い正孔は別々のミニバンドを形成する。これに、電界 (F) を印加すると、量子井戸間で eFD (e は電気素量、 D は周期) のポテンシャル差が生じるため、各量子井戸層の波動関数は局在化し、ミニバンドは (b) に示した eFD のエネルギー間隔を有する局在準位 (シュタルク階段準位) に分裂する²⁾。ここで、基準となる井戸層の第 1 量子化準位を $\Gamma_1(0)$ 、第 2

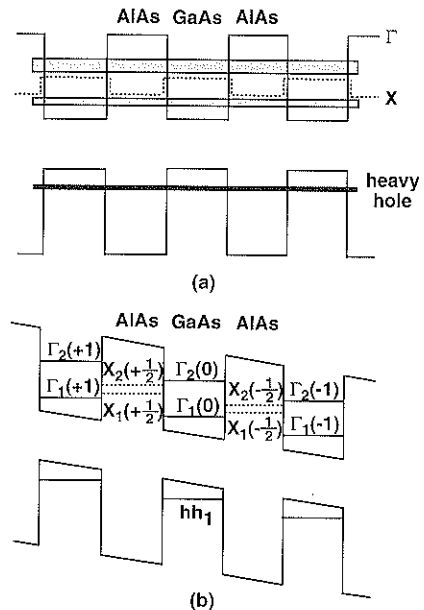


Fig. 3 Potential profiles for a GaAs/AlAs superlattice under a zero (a) and applied electric field (b). Solid and broken lines show the Γ and X band edges, respectively.

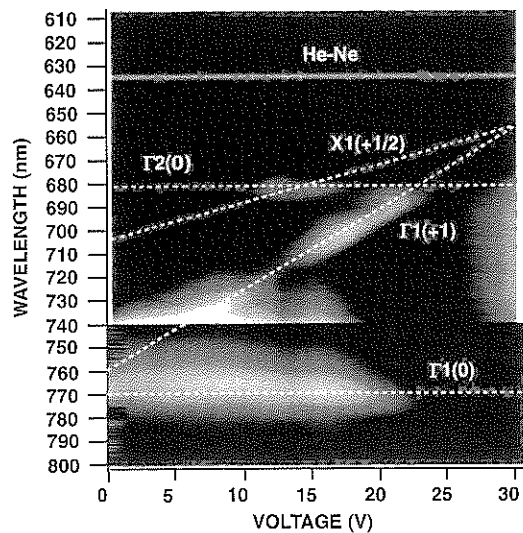
量子化準位を $\Gamma_2(0)$ とする。また、基準となる井戸層からみて低ポテンシャル（高ポテンシャル）側の隣の井戸層の準位を $-1(+1)$ と () 内に付けて区別する。一方、GaAs は直接遷移型半導体で伝導帯の最低エネルギーは Γ 点にあるため Γ 点の電子については、GaAs が井戸層で AlAs が障壁層となるが、AlAs は間接遷移型半導体で伝導帯の最低エネルギーは X 点にあり、 X 点の電子からみれば、AlAs が井戸層で GaAs は障壁層となる (Fig. 3 (a) の点線参照)。したがって、AlAs 内に

も量子化準位が形成されるので、基準井戸層からみて低ポテンシャル（高ポテンシャル）側の隣接する AlAs の第1量子化準位を $X_1(-1/2)$ ($X_1(+1/2)$)、第2量子化準位を $X_2(-1/2)$ ($X_2(+1/2)$) のように表す³⁾。() 内の係数を $1/2$ とする理由は、井戸層と障壁層でのポテンシャル差は $(1/2) eFD$ となるためである。

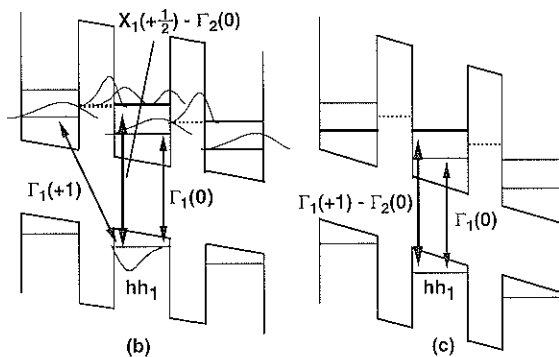
Fig. 4 に試料1の逆方向電圧に対する PL の測定結果 (a) と逆方向バイアス電圧 13 V 付近 (b) と逆方向バイアス電圧 23 V 付近 (c) で予想されるエネルギーバンド図を示す。図において、グレイスケールは対数で表した PL 強度を示す。ただし、740 nm より短波長側はホトンカウンティング法により測定をしているため短波長側の発光強度は長波長側に比べて強調されている。740 nm より短波長側の実際の発光強度は長波長側の強度の約 10^{-4} 倍である。このため強い 760 nm 付近の発光の裾が 730 nm 付近にも現れている。また、He-Ne レーザ光をフィルタによりカットしているが、その洩れ光も観測されている。点線は、有効質量のエネルギー依存性⁴⁾を考慮した有効質量近似計算により求めた伝導帯側の各サブバンドと基準となる井戸層の重い正孔との間の遷移波長のバイアス電圧依存性である。このことから、760 nm 付近の発光は $\Gamma_1(0)$ と重い正孔との発光で、バイアス電圧と共に、高エネルギー側にシフトして行く発光は $\Gamma_1(+1)$ と重い正孔との発光であることがわかる (Fig. 4 (b), (c) のバンド図参照)。GaAs/AlAs 超格子では正孔の有効質量は電子の有効質量に比べて非常に重いいため、正孔の波動関数は井戸層内にほぼ局在し、隣の井戸層への染だしは小さい。したがって、隣合う井戸層への波動関数の染だしの大きい伝導帯側のサブバンドのシュタルク階段遷移や共鳴効果が一般的に観測される。なお、試料は pin 構造をしているため、0 バイアス時においても、超格子には実際 1.5 V の拡散電位が印加されている。このため、0 バイアス時において、 $\Gamma_1(0)$ と $\Gamma_1(+1)$ のエネルギーは一致していない (ミニバンドは破れている)。

このサブバンド可視化図は GaAs/AlAs 超格子の電子状態について多くの情報を与えている。まず、 $\Gamma_1(0)$ の PL がバイアス電圧と共に長波長側にシフトしていくが、これは量子井戸内の電子の波動関数が低ポテンシャル側に、正孔の波動関数が高ポテンシャル側に寄ることによって生じる量子閉じ込めシュタルク効果⁵⁾ (Fig. 4 (b) 参照) によるものである (破線で示されている計算値は量子閉じ込めシュタルク効果を考慮していない)。

次に、 $\Gamma_1(+1)$ の発光は、シュタルク階段準位の存在を裏付けている。一方、 $\Gamma_1(-1)$ の発光が観測されないことより、 $\Gamma_1(-1)$ と正孔との振動子強度はほぼ 0 に近



(a)



(b)

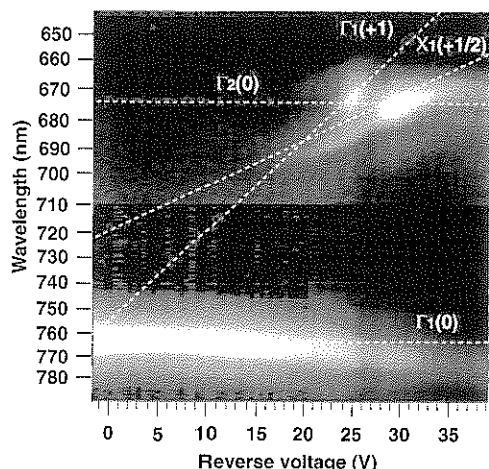
(c)

Fig. 4 PL intensity on a logarithmic scale as a function of the reverse bias voltage at 20 K (a) and the schematic energy band diagrams at 13 V (b) and at 23 V (c) of sample 1. In the image, the brightness represents the PL intensity. The white broken lines show the calculated transition wavelengths between electrons in the respective subbands and holes in the heavy hole state (hh). The probability density of the wave functions is also shown in (a). The Γ - X mixing effect is not included.

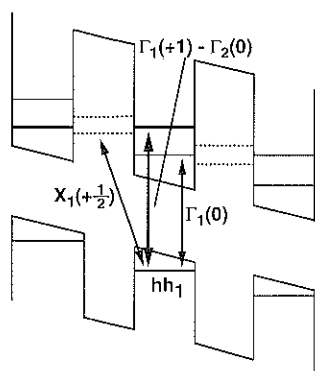
いことがわかる。これは、Fig. 4 (b) に示すように、バイアス電圧の増加に従い、井戸内の電子の波動関数が低ポテンシャル側に、正孔の波動関数は高ポテンシャル側にシフトすることによる（光物性でよく使われる振動子強度は、準位間の波動関数の重なり積分の絶対値の2乗に比例する量である）。また、 $\Gamma_1(+1)$ と $\Gamma_2(0)$ の交差する点で $\Gamma_2(0)$ の発光が見られるが、これは $\Gamma_1(+1)$ と $\Gamma_2(0)$ の共鳴効果（波動関数の混合効果）のため、 Γ_2 と重い正孔との振動子強度が増大していることを示している（Fig. 4 (c) 参照）。さらに、興味深いことは AlAs 内の量子化準位である $X_1(+1/2)$ が $\Gamma_2(0)$ 位と交差する点で $X_1(+1/2)$ が発光することである。このことは、 X_1 と重い正孔間は本来運動量の異なる間接遷移でありながら、 X_1 と Γ_2 の共鳴効果（波動関数の混合効果）のため、振動子強度が増大し発光することを示している。

また、 Γ 準位とは運動量の異なる X_1 準位に電子がトラップされていることも示している。このように、サブバンド可視化測定を用いれば、超格子の電子状態の電界依存性を極めて直接的に見ることができる。

Fig. 5 に試料 2 の逆方向電圧に対する PL の測定結果 (a) と試料 2 の逆方向バイアス電圧 25 V 付近の予想エネルギーバンド図 (b) を示す。試料 2 は、試料 1 に比べ井戸層がほぼ同じで、障壁層が約 2 倍であるため、試料 1 に比べて、 X 準位のみが低エネルギー側に位置している (Fig. 4 (a), Fig. 5 (a) 参照)。このため、 $X_1(+1/2)$ と $\Gamma_2(0)$ とが共鳴する電圧は試料 1 に比べ高バイアス側にシフトしており、 $\Gamma_1(+1)$ - $\Gamma_2(0)$ 共鳴による $\Gamma_2(0)$ 発光の後に、 $X_1(+1/2)$ と $\Gamma_2(0)$ の共鳴による $X_1(+1/2)$ 発光が観測される。Fig. 5 は、その様子を明確に可視化している。なお、試料 1 に比べて $\Gamma_1(+1)$ シュタルク

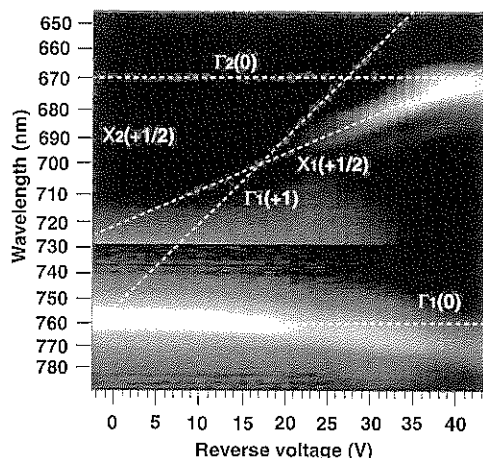


(a)

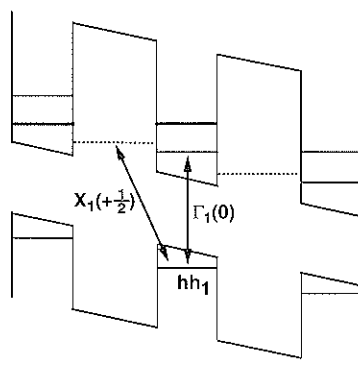


(b)

Fig. 5 PL intensity on a logarithmic scale as a function of the reverse bias voltage at 20 K (a) and the schematic energy band diagrams at 25 V (b) of sample 2.



(a)



(b)

Fig. 6 PL intensity on a logarithmic scale as a function of the reverse bias voltage at 20 K (a) and the schematic energy band diagram at 25 V (b) of sample 3.

階段遷移の発光が明確でないのは、障壁層が厚いため波動関数の染だしが少ないためである。さらに、興味深いことは、 $X_1(+1/2)$ のシュタルク階段遷移の発光が明確に観測され(試料1では観測されない)、また $X_1(+1/2)$ が $\Gamma_2(0)$ にエネルギー的に近づくにつれ発光強度が強くなることである。これは、試料2では、バイアス電圧 20 V 以上で、 X_1 が高ポテンシャル側で隣接する Γ_1 より低エネルギー側となるため、この電圧以上で試料1より多くの電子が X_1 準位にトラップされることと、また X_1 が Γ_2 に近づくに従い、振動子強度が増加していることを示している^{6, 7)}。

Fig. 6 に試料3の逆方向電圧に対する PL の測定結果 (a) と試料3の逆方向バイアス電圧 25 V 付近で予想されるエネルギーバンド図 (b) を示す。試料3は、試料1に比べ井戸層がほぼ同じで、障壁層が約3倍であるため、 X 準位は試料2よりさらに低エネルギー側に位置している (Fig. 5 (a), Fig. 6 (a) 参照)。このため、 $X_1(+1/2)$ と $\Gamma_2(0)$ とがエネルギー的に共鳴する電圧は試料2に比べさらに高バイアス側にシフトしている。一方、 $\Gamma_1(+1)$ シュタルク階段遷移の発光は、障壁層が試料2よりさらに厚いため波動関数はより局在化され、観測されない。また、障壁層が厚いためバイアス電圧 25 V 付近の $\Gamma_1(+1)$ - $\Gamma_2(0)$ 共鳴による発光も観測されない。

4. お わ り に

筆者らが開発した PL 法によるサブバンドの可視化技術とそれを用いて直接的に視覚に訴えられるようになった GaAs/AlAs 超格子のシュタルク階段準位やサブバンド間の共鳴効果の測定結果を紹介した。これら共鳴効果の測定は、超格子中のキャリアの輸送特性が共鳴トンネル効果により大きく影響を受けるため、超格子のキャリアの輸送特性を知る上で重要である。共鳴トンネル効果に関連したキャリア輸送特性で重要なものの一つに、主に超格子中のキャリア濃度が高い場合に見られる高電界ドメインの形成がある⁹⁾。本稿では紙面の都合で高電界ドメインの形成のない場合の測定例を示したが、強励起下でドメインが形成されると、低電界と高電界の各ドメインの電界に対応したシュタルク階段準位の発光が見られる。言い換えれば、本測定を用いて容易にドメインの形成を知ることが可能である⁹⁾。

ここで紹介したサブバンドの可視化は、超格子のサブ

バンドの電界依存性やサブバンド間の相互作用を直接視覚的に理解、解析できる。そのため、超格子の電圧-電流特性等と合わせるによりキャリアの輸送特性や高電界ドメインの形成機構を理解するのに非常に有効である⁹⁻¹¹⁾。本測定により、半導体超格子の理解の一層の進展が期待される。

謝 辞

本研究に有益な御討論を戴いた中山正昭先生 (大阪市立大) また日頃御支援を戴いている猪股英行社長、小川英一、渡辺敏英両室長 (ATR 光電波研)、小宮山牧児社長、江上典文室長 (ATR 環境適応研) に感謝致します。

文 献

- 1) 半導体超格子の解説書として、日本物理学会編: “半導体超格子の物理と応用” (培風館, 1984); 小長井誠: “半導体超格子入門” (培風館, 1987); 江崎玲於奈監修, 榊 裕之編: “超格子ヘテロ接合デバイス” (工業調査会, 1988); 岡本 紘: “超格子構造の光物性と応用” (コロナ社, 1988) などがある。
- 2) 中山正昭, 田中 功, 藤原賢三: 日本物理学会誌 **47**, 391 (1992).
- 3) 量子効果のため、 X 準位は超格子の成長方向の X_z 準位とそれに垂直な X_y 準位の 2 つのサブバンドを形成する。本稿で示す X 準位は X_z 準位である。
- 4) D.F. Nelson, R.C. Miller, C.W. Tu and S.K. Sputz: Phys. Rev. B **36**, 8063 (1987).
- 5) D.A.B. Miller, D.S. Chemla, T.C. Damen, A.C. Gossard, W. Wiegmann, T.H. Wood and C.A. Burrus: Phys. Rev. B **32**, 1043 (1987).
- 6) N. Ohtani, M. Hosoda, H. Mimura, K. Tominaga and T. Watanabe: Jpn. J. Appl. Phys. **36**, 1884 (1997).
- 7) M. Hosoda, H. Mimura, N. Ohtani, K. Tominaga, K. Fujita, T. Watanabe, H. Inomata and M. Nakayama: Phys. Rev. B **55**, 13689 (1997).
- 8) R. Tsu and L. Esaki: Appl. Phys. Lett. **22**, 562 (1973).
- 9) H. Mimura, M. Hosoda, N. Ohtani, K. Tominaga, K. Fujita, T. Watanabe, H. T. Grahn and K. Fujiwara: Phys. Rev. B **54**, 2323 (1996).
- 10) H. Mimura, N. Ohtani, M. Hosoda, K. Tominaga, T. Watanabe, G. Tanaka and K. Fujiwara: Appl. Phys. Lett. **67**, 3292 (1995).
- 11) M. Hosoda, N. Ohtani, H. Mimura, K. Tominaga, P. Davis, T. Watanabe, G. Tanaka and K. Fujiwara: Phys. Rev. Lett. **75**, 4500 (1995).