

論文の内容の要旨

論文題目 SiGe/Si 歪量子井戸におけるキャリアダイナミクスと制御に関する分光学的研究

Spectroscopic study on dynamics and control of carriers in SiGe/Si pseudomorphic quantum wells

氏 名 安原 望

$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 混晶は Si ベースのヘテロ構造を構成する上で欠かすことのできない Si 同族の重要なビルディングブロックのひとつである．全率固溶の $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 混晶は組成比によってバンドギャップを制御可能であり，エピタキシャル技術によってさまざまな基板の上に単結晶薄膜が成長できる．

代表的なヘテロ構造である量子井戸ではキャリア閉じ込めを利用でき，この場合バンド接続が重要になる．Si(001)に格子整合した $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 歪混晶 ($x < 0.5$) では，価電子帯のバンドオフセットが数百 meV である一方，伝導帯のバンドオフセットは非常に小さい (数 meV) アンチ電子型 type-II 構造をとり，量子井戸構造では電子の量子井戸への閉じ込めは弱い特徴的な構造を有する (図 1)．このため $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$ 歪量子井戸では，間接遷移型半導体であることによるキャリアの長寿命性も伴い，電子の実空間トランスファ (real-space transfer, RST) が発生しやすく電子が拡散長程度に分布していると考えられる．したがって， $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$ 歪量子井戸における物理現象の理解ではシステム全体 (表面，量子井戸，基板，他) が電子の RST により結合していること (coupling due to RST of electron, CRSTE) が本質的となっている．

CRSTE 系ではシステム全体が電子の再分布を通じて強く相互作用しているため，量子井戸面に縦電場を印加した際，電子分布変調にともない非常に興味深いダイナミクスが観測されることが予想される．しかし，電場下における間接励起子の質的变化や，それに伴うキャリアの動的な過程は殆ど調べられていない．

本研究では，本質的に CRSTE 系である $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 歪量子井戸を用いて，電場下におけるキャリア (電子) のダイナミクスを，蛍光プローブを駆使して調べることを目的としている．さらにそれに伴って可能となるキャリア分布制御を通じて新奇デバイスにつながる新原理の提案を行う．

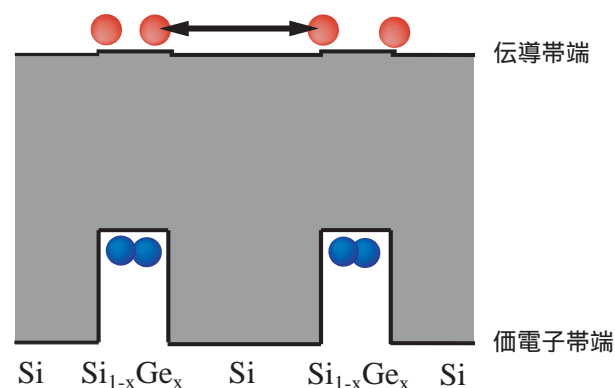


図 1 CRSTE 系 SiGe/Si 歪量子井戸のバンドラインアップの概観．

1. 間接励起子発光の偏光異方性

アンチ電子型 type-II 接続と電子の有効質量の違いを反映して形成される 2 種類の間接励起子を検証し，その輻射再結合過程の再考を行うとともに，間接励起子の電場下における過渡応答をフォトルミネッセンス (PL) の偏光測定により調べた．これにより $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 歪量子井戸の電子・ホール基底状態の理解を深めるとともに，研究全般で用いている蛍光プローブの原理的側面を補強した．

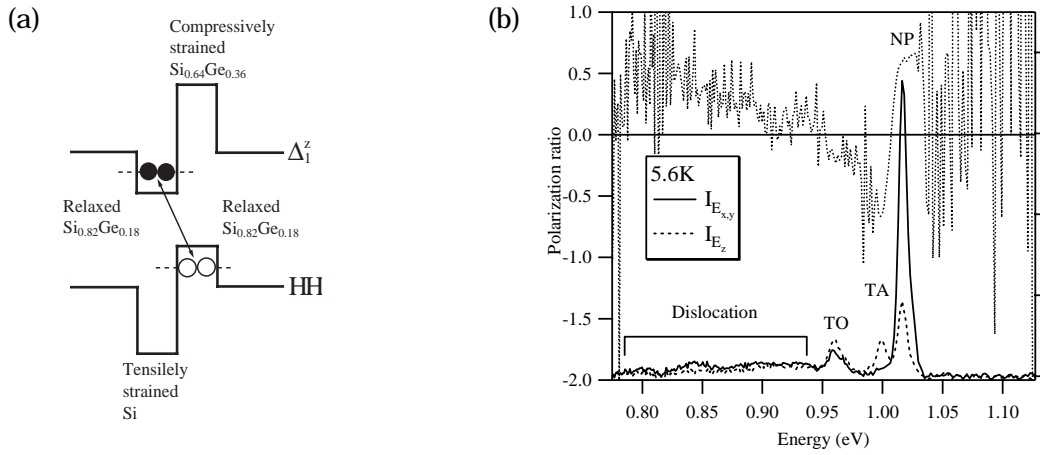


図2 (a) ACP 構造のバンドラインアップ .(b) ACP 構造のフォトルミネッセンススペクトルの偏光特性 .

◆ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$ 歪量子井戸における間接励起子の再考

これまでの報告から, $\text{Si}(001)$ 基板上 (x,y 面上) に歪成長させた $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 量子井戸では, $\Delta_1^{x,y}$ -hh 励起子が形成されると考えられる. フォノン遷移を介する輻射再結合では偏光異方性が観測されず, NP 遷移では x,y 偏光成分が強いことが知られているが, 形成される間接励起子のみならず輻射再結合過程についても未だに不明な点が多い. そこで, Δ_1^z -hh 励起子の形成される非対称ポテンシャル(ACP)構造を用いて Δ_1^z -hh 励起子発光の偏光特性を調べた(図2). この結果から, TA, TO フォノン発光では $\Delta_1^{x,y}$ -hh 励起子の場合偏光異方性はなく, Δ_1^z -hh 励起子の場合 z 偏光成分が強いことを実験により確認した.

NP 発光では $\Delta_1^{x,y}$ -hh 励起子と Δ_1^z -hh 励起子ともに x,y 偏光成分が強いことが明らかになり, NP 遷移の弾性散乱ポテンシャルは z の対称性を持つこと示した. z の対称性の起源として反転対称性の破れた $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 混晶がコヒーレントな歪を受けることにより異方性が生じることを提案した.

◆ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$ 歪量子井戸における間接励起子の電場応答

$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$ 歪量子井戸に形成される励起子の電場に対する変化を調べるために, $\text{Si}_{0.82}\text{Ge}_{0.18}/\text{Si}(001)$ 歪多重量子井戸を用いて間接励起子の解離過程に伴う TO フォノン発光と NP 発光の偏光比の変化を PL 時間分解測定により観測した(図3). NP 発光では励起子の解離に伴う偏光比の変化が観測された. 一

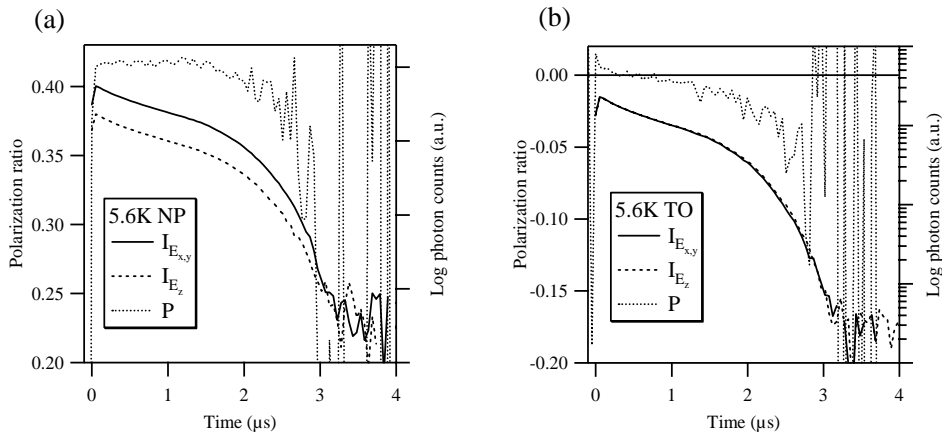


図3 (a,b)歪多重量子井戸の NP 発光, TO フォノン発光における偏光の時間変化 .

方，電場強度の増大に伴う TO フォノン発光の z 偏光成分の増加が観測され，有効質量の違いにより生じる $\Delta_1^{x,y}$ -hh 励起子と Δ_1^z -hh 励起子の結合エネルギー差の変化を示していると考察した．

2. CRSTE 系のキャリアダイナミクス

CRSTE ではシステム全体が電子の再分布を通じて相互作用していることに着目し，CRSTE 系 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$ 歪量子井戸における電場下でのキャリアダイナミクスを調べ，電場下における電子 RST 発生とそれに伴う電子分布変調のメカニズムを明らかにし，キャリアダイナミクスの制御を試みた．

◆ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$ 歪量子井戸の間接励起子の CRSTE 系における異常な縦電場応答

電場による電子の RST 発生を検証し制御を行うために，2 重量子井戸を用いて間接励起子の縦電場に対する応答を PL 時間分解測定により調べた．図 4 (a) に示すように縦電場下での $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 歪量子井戸の蛍光減衰では，通常の type-I 量子井戸では見られない異常な振る舞いが観測された．これは $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 歪量子井戸では，伝導帯のバンドオフセットが小さいため量子井戸に弱束縛された電子が電場により井戸外へと脱離されることによる電子 RST 発生を示しており，さらに図 4 (a, b) に示すように交番電場による電子 RST 制御が可能であることを実証した．

◆ 表面 量子井戸結合 CRSTE 系におけるキャリアダイナミクス

$\text{Si}_{0.85}\text{Ge}_{0.15}(51\text{\AA})/\text{Si}$ 歪単一量子井戸を用いて，表面と量子井戸が CRSTE により結合した系において，縦電場による電子の RST 発生によるキャリアのダイナミクスを調べ，制御を試みた．表面-量子井戸 CRSTE 系では，表面近傍の電子リザーバ (NSER) が電場下において形成され，量子井戸と NSER との間で電子正孔分離状態が形成されることを明らかになった．この電子正孔分離状態を利用することによる，光励起したキャリアを任意の時間遅れの後に光信号として読み出すメモリー動作を提案した．

◆ 多重量子井戸 CRSTE 系におけるキャリアダイナミクス

多重量子井戸が CRSTE により結合した系において，縦電場による電子の RST 発生によるキャリアの

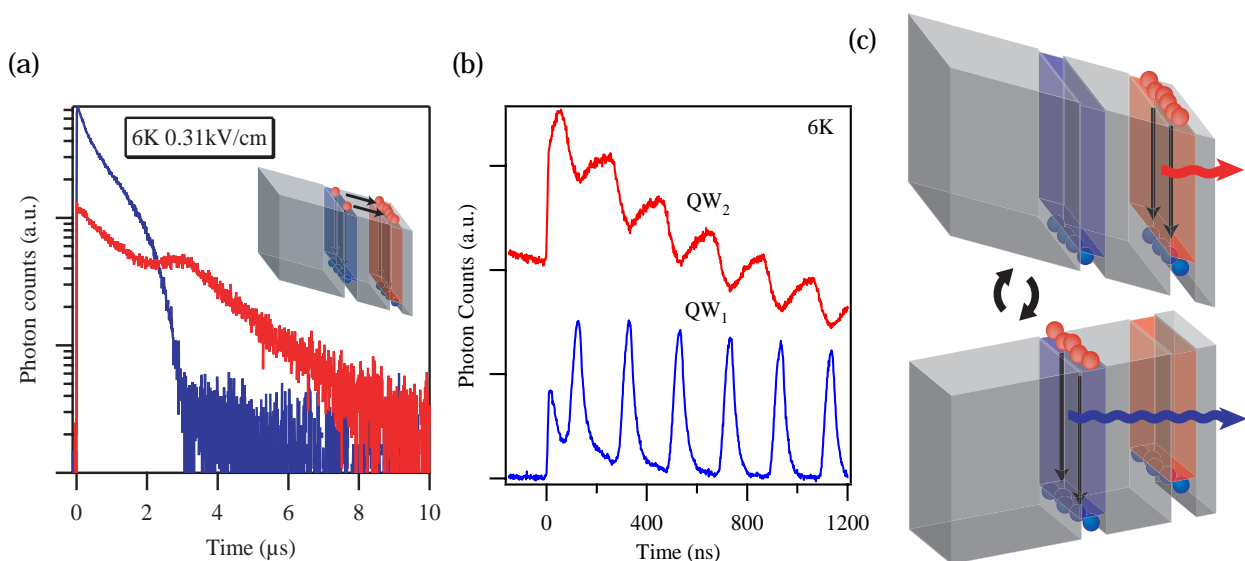


図 4 (a) 2 重量子井戸の NP 発光の縦電場下における時間変化．(b) 2 重量子井戸の交番電場下における蛍光減衰．(c) キャリアのダイナミクスを示す図．

ダイナミクスを調べ、発光波長制御を試みた。歪2重量子井戸では電場により電子分布変調が可能であることが知られており、この原理を3量子井戸に拡張し、同時に電場の変化に対する電子RST発生を調べ、発光波長のスイッチング動作を行った。

3. CRSTE 系のキャリアダイナミクス制御の応用

CRSTE 系 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$ 歪量子井戸における縦電場によるキャリアダイナミクス制御原理を電流注入動作に応用し、新奇デバイスにつながる動作原理の提案を行った。

◆ 逆バイアス電流注入の検証と双方向 LED

まず逆バイアス下における電流注入を検証した。本研究で用いた単一量子井戸では整流作用が観測される。LED は通常順方向バイアスのみで用いられるが、キャリア制御の自由度を増やすためには双方向に電流を注入できた方が好ましい。シリコン系構造では逆バイアス下でインパクトイオン化によりキャリアが注入されるため、これが可能となることを明らかにした。

◆ 表面 量子井戸 CRSTE 系におけるキャリアダイナミクス制御の応用

表面 量子井戸 CRSTE 系における電流注入でのキャリアダイナミクス制御の検討を行い、機能化を行った。逆バイアスによりキャリア注入を行い、その後、電圧を解除した時の発光の変化を調べたところ、図5(a)に示すように逆バイアスを印加している間は発光が観測されず、電圧を解除した時に発光が観測されたことから、キャリアはNSERと量子井戸との間で電子正孔空間分離状態を形成し、電圧を解除すると分離状態が解除され発光が観測されることが明らかになった(図4(b))。電子正孔分離状態の形成には閾値電圧が存在することから、この電子正孔分離状態を3つの電圧レベルによりコントロールすることにより、電場注入したキャリアを任意の時間遅れの後に光信号として読み出すメモリ動作が可能であることを示した。

◆ 波長可変 LED

多重量子井戸 CRSTE 系において電流注入によるキャリア分布の制御を行い、発光波長を制御することを試みた。まず2重量子井戸を用いて、電場の向きによって発光する井戸の選択が可能であることを

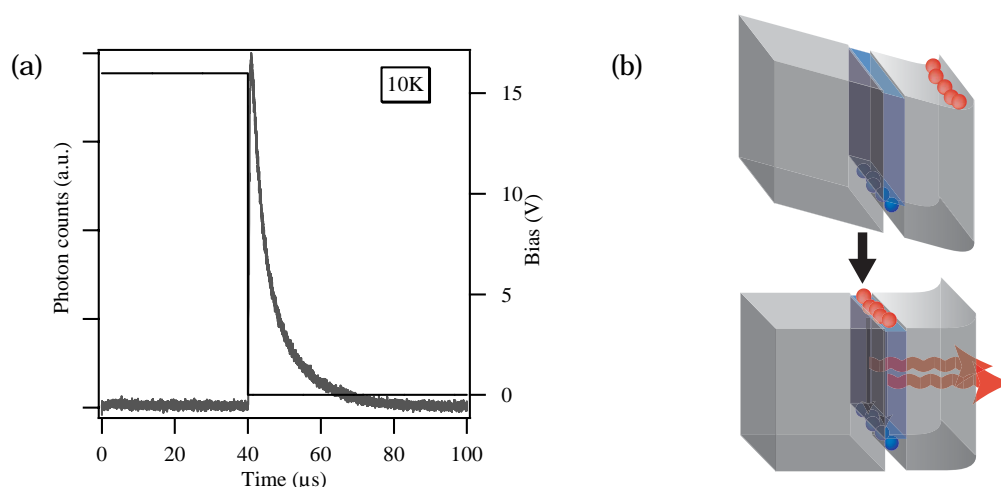


図5 (a)単一量子井戸のNP発光の縦電場を印加した後電場を解除した場合の時間変化。(b)キャリアのダイナミクスを示す図。

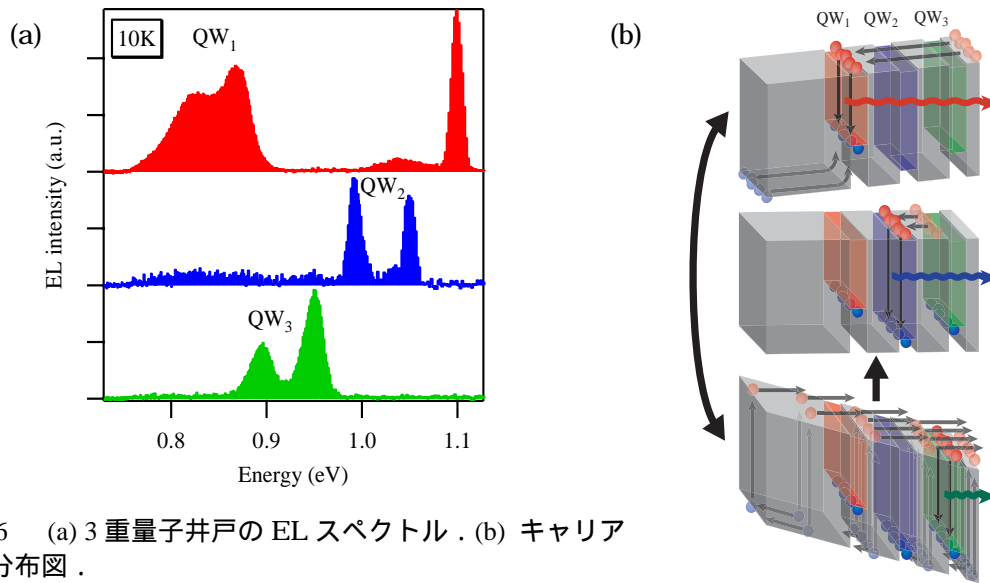


図 6 (a) 3 重量子井戸の EL スペクトル . (b) キャリアの分布図 .

示した . 順バイアス下と逆バイアス下ともに正バイアス側の量子井戸にキャリアが集まることを明らかにした .

上記の原理を拡張することにより , 3 重量子井戸における 3 波長制御を試みた . まず , 3 重量子井戸の両端の量子井戸を用いて 2 重量子井戸と同様 , 電場の向きを変えることにより発光する量子井戸を選ぶことができることを示した (図 6) . 電場に対するキャリアの応答を調べたところ , 逆バイアス下におけるインパクトイオン化は負バイアス側 (基板側) から順に発生することが明らかになった . この性質に着目し , キャリア生成が表面量子井戸に到達する前に電場を解除するような交番電場を印加することにより , 電子分布を中間量子井戸に動的トラッピングし中間井戸からの発光を支配的にできることを示した (図 6) . これにより 3 波長スイッチング LED のプロトタイプを構築した .