

## 論文審査の結果の要旨

論文提出者名 安原 望

$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  混晶は Si をベースとするヘテロ構造の構成上、欠くべからざる Si 同族のビルディングブロックのひとつである。Si と Ge は全率固溶であり  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  混晶は Ge 組成とともにバンドギャップ縮小を示すが、とくに Si 基板上にコヒーレント成長した歪  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  混晶薄膜ダブルヘテロ構造は  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  歪量子井戸ともよばれ、最も基本的な量子閉じ込め構造として GaAs/ $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  化合物半導体の量子構造と双璧をなしている。

もとより  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  歪ヘテロ構造には CMOS に代表される Si の無類の輸送特性をさらに向上させる発展力が期待されていたが、近年ではフォトニック結晶などの SOI 導波路デバイスを通じた光電子融合という新たなテクノロジーノードに向けた  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  歪ヘテロ構造の潜在的な原動力が注目を集め、基礎・応用分野にわたって精力的な研究が行われている。

Si(001)基板上の  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  歪量子井戸は、伝導帯バンドオフセット ( $\Delta E_c$ ) が極めて小さくほとんどのバンド不連続が価電子帯側で生じる特異な type-II 型のポテンシャル接続を示す。しかし、伝導帯マルチバレーの複雑な歪シフトやバンド不連続が極めて小さいせいもあって、このようなバンド端の振る舞いが検証できるようになったのはつい最近のことであり、キャリアの動的振る舞いはもとより電子・正孔の束縛状態など基本的な物性に関する理解と知識の集積が著しく遅れていた。

一方、 $\Delta E_c$  が極めて小さいと電子は量子井戸の正孔とクーロン相互作用を通してゆるく束縛されるのみであり、バンド端に励起された電子が井戸から容易に非局在化するせいで複数の量子井戸が電子の実空間トランスファを通して結合する (coupling due to real-space transfer of electrons: CRSTE)。その結果、 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$  歪量子井戸の輻射再結合は活性層のみならずシステム全体が関与するという意味での非局所性を有するとともに、非局在化を促進する電場の下では電子・正孔分離状態など多くの興味深いキャリアダイナミクスが発現する可能性のあることを論文提出者は指摘した。

本研究では、本質的に CRSTE 系である  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  歪量子井戸をプラットフォームとして CRSTE システムに特異的かつ材料に依存せず普遍的に発生する電場下のキャリア輸送・再分布・再捕獲・再結合などの動的な振る舞いを光プローブ法によって精密に調べることで、材料の個性に縛られないより広い視点から  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  歪量子井戸を眺望し、同物質系の理解を一層深化させることを目指している。さらに CRSTE 系に特徴的な物性の中に新たな機能性の種を見出し、これらをデバイスプロトタイプへと発展させることがいまひとつの重要なターゲットに据えられている。応用の具現化スタイルとして新機能の光エミッターを提唱しているが、論文では原理の検証実験に終始するものの従来、問題とされてきた  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  歪量子井戸の低い内部効率が結晶性改善によって十分克服できることを指摘し、実際に室温

GHz 帯域変調を通じた検証を行っている点で単なるフーズビリティ研究の類とは一線を画している。

本論文は 7 章よりなる。まず、今回の研究を構想するにいたった経緯と研究の目的が第 1 章で詳述された後、第 2 章では実験に用いた装置の構成と計測の概要が述べられている。今回の研究で得られた具体的な成果は第 3-6 章に項目別に述べられており、縮退間接励起子の観測と偏光異方性が第 3 章に、CRSTE 系における電場下における特異なキャリアダイナミクスが第 4 章に、そして CRSTE 系の物性の応用編として双方向 LED、波長可変 LED 動作の検証が第 5 章にそれぞれまとめられている。最終の第 6 章では研究の総括とともに今後の展望が述べられている。

本研究によって以下の新たな知見が得られている。

まず、光プローブとして用いる  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$  歪量子井戸の間接励起子について CRSTE 系の特徴である浅いアンチ電子 type-II 型の接続を前提とした電子・正孔の束縛状態の再考により、歪分裂した低エネルギーバレーの  $\Delta_1^{x,y}$ -hh 間接励起子とは別に高エネルギーシフトしたバレーに帰属される第二の  $\Delta_1^z$ -hh 励起子が大きな電子の有効質量を起源として発生することが見出された。とくに井戸、障壁の歪符号が逆転した特殊な量子井戸における蛍光の面内偏光異方性とパルス励起にともなう偏光の過渡応答および偏光の消滅過程を調べることでこれらの縮退励起子が共存することが直接検証された。一方、 $\Delta_1^z$ -hh と  $\Delta_1^{x,y}$ -hh 励起子の非フォノン遷移では反転対称性が破れた SiGe 混晶の歪異方性を起源とする z 対称性の弾性散乱が関与することが見出された。これらの結果は 3 章に詳述されている。

次いで CRSTE 系のモデルシステムである  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  歪量子井戸の間接励起子が縦電場に応答する様子が蛍光の時間ドメイン計測によって調べられ、縦電場のもとで井戸に弱束縛された電子が井戸外へと電場イオン化によって非局在化することで容易に電子 RST が発生することおよび電子・正孔の空間分離が長時間保持可能なことが検証された。しかし、非局在化した電子が逆に印加電場を遮蔽する結果、電場イオン化には明確な遅延が発生することが二重量子井戸蛍光の時間発展から明らかになった。この励起子電場イオン化のダイナミクスは偏光異方性の過渡応答からも確認された。CRSTE 系は広義には表面・量子井戸や局所電子トラップ・量子井戸などの結合系をも包含するが、単一量子井戸における近表面電子トラップとの間での電子移動発生する効果が見出された。さらに多重量子井戸における電子局在分布の電場制御が試みられ、DC 電場によって 1 次元両極性の分布偏重が発生可能な一方、AC 電場を重畳したバイアス電圧下では中間位置への電子局在が動的トラッピングにより制御可能であることが検証された。これら一連の結果と論考は第 4 章につづられている。

さらに CRSTE 系におけるキャリアダイナミクスを電場で制御する試みとして  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  歪量子井戸多重量子井戸を活性領域とする光エミッター (LED) が試作され、低温での動作検証が行われた。単一量子井戸における電子・正孔分離系による遅延パルス発生が ms 領域まで可能であることが示されたが、これは単一正孔注入構造を確保することで単一光子エミッタが構成できる可能性を示唆している。また、Si 系物質に共通の低いインパクトイオン化閾値を利用することで pn 接合でありながら逆方向でも電流注入が可能な双方向 LED の動作が検証され、多重量子井戸および高温動作ほど逆バイアス時の注入効

率が上昇する効果が見出された。さらに CRSTE 系独自の電子トランスファの性質を生かしてインコヒーレント光源では不可能とされてきた単一チップ上での波長可変性が試みられた。その結果、非局在側の井戸が電子欠乏により非輻射化する一方、局在側井戸が選択的に輻射に寄与することで大きな抑圧比の 2 波長選択性が得られている。さらに AC 電場による動的電子トラッピングによって 3 波長目の選択的な輻射が観測されている。これらの結果は第 5 章にまとめられている。

以上の成果は、 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  歪量子井戸の物性に関する理解を深める上で、かつまた特異なバンド接続を起源とする井戸間結合という新たな物性物理の研究領域を開拓するきっかけとなる一方、 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  歪量子井戸に隠された未開拓のデバイス機能を顕在化させる上ではじめての試みである。これらの成果が当該研究領域での国際的な評価に十分値する内容であることは、すでに 9 本の報告文が学術誌に掲載されている事実が物語っている。

尚、本論文中の第 3 から 5 章の一部は、深津 晋との共同研究であるが、論文提出者が主体となって実験、解析、考察を行ったものであり、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

よって本論文は博士（学術）の学位請求論文として合格と認められる。