

学位論文題名

Study on semiconductor quantum wells, dots, and dashes in telecommunication band: charge carrier dynamics and luminescence quenching mechanisms

(光通信波長帯半導体量子井戸・ドット・ダッシュにおける電荷キャリアのダイナミクスとルミネッセンス消光機構に関する研究)

学位論文内容の要旨

近年通信情報量の増大によって、光ファイバー通信ネットワークは世界的に拡大を続けている。特に通信の安全性・信頼性に対するニーズの高まりにより、信頼性の高い単一光子を用いた量子情報通信の研究が進められている。現在のところ、これまで光ファイバー通信に用いられてきたレーザー光源を単一光子レベルまで減衰させて研究が進められているが、原理的にレーザーのコヒーレンスのために単一光子の発生が不確定となる。そのため半導体ナノ構造を用いた固体単一光子源により、確実に光子を発生する単一光源の研究が活発化している。これまで研究が進んでいる GaAs 基板を用いた InAs 系量子ドットを中心として研究が進められてきたが、光ファイバー通信波長帯まで発光域を拡大するのは歪みが過大となり、困難であった。

現在光ファイバー通信用光源として広く使われているのはより格子定数の大きい InP 基板系である。一方 InP 基板上で作製した量子ドットはその密度が $\sim 1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ (32 nm 角の領域に 1 個) と高くなりがちで、特に動作温度の上昇によって隣り合う量子ドット間の結合が単一量子構造の特性に影響する。また成長する結晶面方位によって (001) 結晶面では細長い量子ダッシュとなるが、(311)B 結晶面では量子ドットとなり、その特性の違いなど詳しい比較検討はまだ十分には進められていない。さらに発生した光子を半導体面から垂直に取り出すためには、GaAs 基板上では屈折率の異なる積層構造を用いた分布反射ミラー (DBR: distributed Bragg reflector) が広く使用されている。しかし InP 基板上では高い反射率を持つ DBR が構成できない課題がある。一方 InP とともに長波長系に使用される GaSb 系は、GaAs 基板と大きな格子歪みを持つために従来は GaSb 系薄膜に転移などの欠陥が生じ特性を劣化させていた。しかし近年 GaSb/GaAs ヘテロ界面に発生する転移を界面だけに閉じ込める IMF (interfacial misfit dislocation array) 法が開発され、透過電子顕微鏡観察など構造的には大幅な改善が示されており、GaAs 系 DBR と組み合わせた面発光 GaSb 系半導体光源も期待される。しかし現在まで IMF 法がどのように光学特性の改善に寄与しているか、まだ詳細な検討は進んでいない。

本論文では、InP 基板上に形成された量子ドット・量子ダッシュ、ならびに GaAs 基板上に形成した GaSb 量子井戸構造に対するヘテロ界面に挿入した IMF の効果について、時間分解発光スペクトル測定によるナノ構造内部での電荷キャリアのダイナミクス解明を進め、それぞれのナノ構造に対する詳細な理解を深めると共に、ナノ構造での発光が環境温度上昇に伴って消光していく物理機構を明らかにして、今後のナノ構造作製の指針を明確にすることを目的とする。

著者はまず InP(311)B 基板上に形成した量子ドットでは、通常量子ドットに伴って形成される薄い量子井戸層 (WL: wetting layer) が形成されないことを示した。それと共に、InP 基板上に形成した量子ドット、量子ダッシュともに、40 K 以下では電荷キャリアの移動は起きないこと、40-140

Kの温度領域ではナノ構造間で結合した励起状態 (CES: coupled excited states) を通してよりサイズの大きいナノ構造の基底状態間へ電荷キャリアの移動が起こり、発光再結合確率の低下により発光効率が緩やかに減少すること、140 K 以上ではよりエネルギー差の大きいバリア層 (量子ドットの場合) や WL (量子ダッシュの場合) へ電荷キャリアが拡散して逃げてしまい、ナノ構造での発光が消光することを明らかにした。特に電荷キャリアの移動に際して、電子と正孔が互いに相関を持つ対として移動 (correlated electron-hole pair escape) し、その熱活性化エネルギーはエネルギーギャップ差の約半分となることを明らかにした。また量子ダッシュを用い、光通信波長帯である 1500nm 帯で発光する鋭い単一量子準位の発光を観測し、将来の光通信用単一光子源の可能性を示した。一方 GaAs 基板上に作製した InGaSb 量子井戸では、GaSb バッファ層との間に IMF 層を挿入することにより、光励起キャリアがバンドを埋めるバンドフィリング効果が増大することを時間分解発光スペクトル測定により明らかにした。これにより、IMF 層の挿入により量子井戸層での欠陥生成が抑制され欠陥にリークする電荷キャリアが減少することを示した。

以下に本論文の構成を示す。

第 1 章では、序章として本研究の背景、目的、本論文の構成について述べている。

第 2 章では、本論文に関連した理論的な背景と関連した物理について述べている。

第 3 章では、実験に使用した光学評価方法について述べている。

第 4 章では、InP 基板上での InAs 量子ドット、量子ダッシュの形成と、そのキャリアダイナミクスの評価、その結果得られたドット間の結合によるキャリアの移動と実効振動子強度の減少、より高い温度でのキャリアのバリア、WL への拡散による発光消光、それらのレート方程式解析について述べている。また単一量子ダッシュの鋭い発光スペクトルを観測し、単一光子源開発の可能性について述べている。

第 5 章では、InGaSb 系量子井戸について、特に光ファイバー通信波長帯で発光する量子井戸構造の構造、光学評価を行い、これに基づいて GaAs 基板上に成長した際に GaSb/GaAs ヘテロ界面に IMF を挿入する効果について、時間分解発光スペクトル測定に基づいて述べている。

第 6 章では、本研究の成果を総括し、今後の展望について述べている。

最後に、著者は InP 基板上の量子ナノ構造における電荷キャリアの移動を時間分解発光スペクトル測定によって解明するとともに基板結晶面による量子ナノ構造形成過程の違いを明らかにするとともに、GaSb/GaAs ヘテロ界面に発生する転移を界面だけに閉じ込める新手法の有効性を光学特性から明確にし、光通信波長帯光子源への応用に関する有益な知見を得た。

学位論文審査の要旨

主査	教授	末宗幾夫
副査	教授	本久順一
副査	教授	笹木敬司
副査	准教授	熊野英和

学位論文題名

Study on semiconductor quantum wells, dots, and dashes in telecommunication band: charge carrier dynamics and luminescence quenching mechanisms

(光通信波長帯半導体量子井戸・ドット・ダッシュにおける電荷キャリアのダイナミクスとルミネッセンス消光機構に関する研究)

近年通信情報量の増大によって、光ファイバー通信ネットワークは世界的に拡大を続けている。特に通信の安全性・信頼性に対するニーズの高まりにより、信頼性の高い単一光子を用いた量子情報通信の研究が進められている。現在のところ、これまで光ファイバー通信に用いられてきたレーザー光源を単一光子レベルまで減衰させて研究が進められているが、原理的にレーザーのコヒーレンスのために単一光子の発生が不確定となる。そのため半導体ナノ構造を用いた固体単一光子源により、確実に光子を発生する単一光子源の研究が活発化している。これまで、研究が進んでいる GaAs 基板を用いた InAs 系量子ドットを中心として研究されてきたが、光ファイバー通信波長帯まで発光域を拡大するのは歪みが過大となり、困難であった。

現在光ファイバー通信用光源として広く使われているのは GaAs 基板より格子定数の大きい InP 基板である。一方 InP 基板上で作製した量子ドットはその密度が $\sim 1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ (32 nm 角の領域に 1 個)と高くなりがちで、特に動作温度の上昇によって隣り合う量子ドット間の結合が単一量子構造の特性に影響する。また成長する結晶面方位によって(001)結晶面では細長い量子ダッシュとなるが、(311)B 結晶面では量子ドットとなり、その特性の違いなど詳しい比較検討はまだ十分には進められていない。さらに発生した光子を半導体面から垂直に取り出すためには、GaAs 基板上では屈折率の異なる積層構造を用いた分布反射ミラー(DBR: distributed Bragg reflector)が広く使用されている。しかし InP 基板上では高い反射率を持つ DBR が構成できない課題がある。一方 InP とともに長波長帯に使用される GaSb 系は、GaAs 基板と大きな格子歪みを持つために、従来は GaSb 系薄膜に転移などの欠陥が生じ特性を劣化させていた。しかし近年 GaSb/GaAs ヘテロ界面に発生する転移を界面だけに閉じ込める IMF(interfacial misfit dislocation array)法が開発され、透過電子顕微鏡観察などで構造的には大幅な改善が示されており、GaAs 系 DBR と組み合わせた面発光 GaSb 系半導体光源も期待される。しかし現在まで IMF 法がどのように光学特性の改善に寄与しているか、まだ詳細な検討は進んでいない。

本論文では、InP 基板上に形成された量子ドット・量子ダッシュ、ならびに GaAs 基板上に形成した GaSb 量子井戸構造に対するヘテロ界面に挿入した IMF の効果について、時間分解発光スペクトル測定によるナノ構造内部での電荷キャリアのダイナミクス解明を進め、それぞれのナノ構

造に対する詳細な理解を深めると共に、ナノ構造での発光が環境温度上昇に伴って消光していく物理機構を明らかにして、今後のナノ構造作製の指針を明確にすることを目的とする。

著者はまず InP(311)B 基板上に形成した量子ドットでは、通常量子ドットに伴って形成される薄い量子井戸層 (WL: wetting layer) が形成されないことを示した。それと共に、InP 基板上に形成した量子ドット、量子ダッシュともに、40 K 以下では電荷キャリアの移動は起きないこと、40-140 K の温度領域ではナノ構造間で結合した励起状態 (CES: coupled excited states) を通してサイズのより大きいナノ構造の基底状態へと電荷キャリアの移動が起こり、これに伴う発光再結合確率の低下により発光効率が緩やかに減少すること、140 K 以上ではよりエネルギー差の大きいバリア層 (量子ドットの場合) や WL (量子ダッシュの場合) へ電荷キャリアが拡散して逃げてしまい、ナノ構造での発光が消光することを明らかにした。特に電荷キャリアの移動に際して、電子と正孔が互いに相関を持つ対として移動 (correlated electron-hole pair escape) し、その熱活性化エネルギーはエネルギーギャップ差の約半分となることを明らかにした。また量子ダッシュを用い、光通信波長帯である 1500nm 帯で発光する鋭い単一量子準位の発光を観測し、将来の光通信用単一光子源の可能性を示した。一方 GaAs 基板上に作製した InGaSb 量子井戸では、GaSb バッファ層との間に IMF 層を挿入することにより、光励起キャリアがバンドを埋めるバンドフィリング効果が増大することを時間分解発光スペクトル測定により明らかにした。これにより、IMF 層の挿入により量子井戸層での欠陥生成が抑制され欠陥にリークする電荷キャリアが減少することを示した。

以下に本論文の構成を示す。

第 1 章では、序章として本研究の背景、目的、本論文の構成について述べている。

第 2 章では、本論文に関連した理論的な背景と関連した物理について述べている。

第 3 章では、実験に使用した光学評価方法について述べている。

第 4 章では、InP 基板上での InAs 量子ドット、量子ダッシュの形成と、そのキャリアダイナミクスの評価、その結果得られたドット間の結合によるキャリアの移動と実効振動子強度の減少、より高い温度でのキャリアのバリア、WL への拡散による発光消光、それらのレート方程式解析について述べている。また単一量子ダッシュの鋭い発光スペクトルを観測し、単一光子源開発の可能性について述べている。

第 5 章では、InGaSb 系量子井戸について、特に光ファイバー通信波長帯で発光する量子井戸の構造評価、光学評価を行い、これに基づいて GaAs 基板上に成長した際に GaSb/GaAs ヘテロ界面に IMF を挿入する効果について、時間分解発光スペクトル測定結果に基づいて述べている。

第 6 章では、本研究の成果を総括し、今後の展望について述べている。

これを要するに、著者は InP 基板上の量子ナノ構造における電荷キャリアの移動を時間分解発光スペクトル測定によって解明するとともに基板結晶面による量子ナノ構造形成過程の違いを明らかにし、GaSb/GaAs ヘテロ界面に発生する転移を界面だけに閉じ込める新手法の有効性を光学特性から明確にして、光通信波長帯光子源への応用に関する重要な知見を得た。この知見は光通信工学、情報科学の発展に寄与するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士 (情報科学) の学位を授与される資格あるものと認める。