

論文審査の結果の要旨

氏名 伊藤 弘毅

半導体量子細線は、1次元状態密度の先鋭化に伴うレーザー発振閾値の低減や、励起子束縛エネルギーの増大など、1次元系特有の光学応答が期待される物質である。しかし、量子細線は体積が小さく界面の不均一性の影響を強く受けるため、1次元系の特徴を発現する高品質試料の作製は一般に困難であった。近年、極めて高品質の量子細線が作製され漸く期待された1次元系の特異な応答が観測されるに至ったが、研究はごく一部の量子細線構造に限定されている。異なる構造の量子細線の作製がボトルネックとなっており、励起子束縛エネルギーの増大についても系統的な評価は欠如している。高品質の量子細線の実現には、光学的手法による試料評価と試料作製とを密接に連携して進めることが必須である。本研究では、低温顕微発光分光法を試料作製技術の向上へ還元できるレベルにまで高め、高品質の量子細線構造の実現とその1次元電子構造の解明に挑んでいる。

全11章からなる本論文は、大別して作製法の異なる二つの量子細線系、すなわちGaAs系T型量子細線とInGaAsP系ドライエッチング量子細線についての研究からなる。第1章では半導体量子細線に関する研究の歴史に始まり、それぞれの量子細線系に関する研究背景の概説、上述した本研究の目的が記されている。続いて、実験手法として顕微クライオスタットの改善について第2章に、小型堅牢な低温顕微分光系の開発が第3章に記されている。同測定系により、単一量子細線からの極微弱な発光を高感度に検出し、かつ効率よく膨大な数のスペクトル計測を行うことが可能となり、試料作製への密接な相互連携が可能となった。

第4章から第6章では、GaAs系T型量子細線について述べられている。まず第4章で、へき開再成長法によるT型量子細線の作製法が記され、過去の高品質14 nm×6 nm幅の量子細線の研究の総括がなされた。量子細線の励起子束縛エネルギーが量子井戸のそれと大きく違わなかったことから、本研究では1次元性を顕在化するためにより細い5 nm×5 nm量子細線を作製することを主眼としている。第5章にその作製に至る過程が記述されている。第一成長基板へのヒーリング層の導入効果や成長条件の違いについての系統的な顕微分光測定を通じて、高品質な量子細線の作製に到達した。量子井戸層の空間分解発光測定から、10 nmというマクロなサイズで数原子層(~1 nm)の勾配しかもたない極めて平坦な界面を実現したことが示された。第6章でこの高品質5 nm×5 nmの量

子細線の発光励起スペクトルが測定されている。不均一広がりを大幅に除去し、5 nm×5 nm の量子細線で初めて励起子吸収と連続帯吸収を分離して観測することに成功した。14 nm×6 nm の場合と比較して、閉じ込めエネルギーの増大が確認されたが、励起子束縛エネルギーはほぼ変わらないという結果が得られた。5 nm×5 nm 量子細線は励起子束縛エネルギーの増大が過去の実験から報告されており、数値計算による予測と隔たりがあったが、本研究では数値計算を支持する結果となった。

第7章から第10章は、InGaAsP系ドライエッチング量子細線の研究について述べている。ドライエッチング法は構造制御性に優れるという利点を持つ反面、エッチング界面の揺らぎや損傷のため、1次元性の検証も不十分であった。ここでも、本研究による精緻な顕微測定による試料評価を試料作製へと還元する手法が威力を発揮した。第7章ではドライエッチング量子細線研究の背景、作製工程の詳細が述べられている。第8章では、まず多重量子細線の発光スペクトルが測定され、第一成長基板の改善の必要性が指摘された。第9章では多重量子細線の測定で得られた知見から、Crをマスクとする単一量子細線が作製された。細線幅の制御性が悪いこと、構造不均一性が大きいことを見出し、さらにその要因が厚いCrのマスク構造にあることを示した。この結果、研究は第10章に示されるTiマスクによる細線作製へと展開する。比較的薄いTiマスクを用いることで、エッチングの制御性を向上し、ドライエッチング単一量子細線で初めて、1次元電子状態に起因する発光線を見出した。数値計算との比較から量子細線の基底サブバンドからの発光が同定された。

以上、本研究では、精密な顕微測定と試料作製への密接な相互連携に立脚して、従来にない高品質の半導体量子細線試料を実現している。その結果、特異な光物性を発現する1次元電子系の物理学を定量的に議論することを可能にしており、基礎物理学への貢献が認められる。

尚、本論文の主要部分は指導教員らとの共同研究として学術雑誌に公表予定であるが、論文提出者が主体となって行ったものであり、論文提出者の寄与は十分であると判断する。したがって、審査委員全員一致で博士（理学）の学位を授与できると認める。