

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 渡辺 健太郎

本論文は「STM を利用したナノ領域のルミネッセンス分光技術に関する研究」と題し、論文提出者が行った、STM - カソードルミネッセンス(STM-CL)分光法、および、STM - エレクトロルミネッセンス(STM-EL)分光法の研究成果をまとめたものである。STM-CL 分光法は、STM 探針を低速電子線源として試料の表面ナノ領域を励起し CL を集光して、発光材料の局所発光効率評価を可能にする手法である。一方、STM-EL 分光法は、通電状態の素子の発光(EL)を導電性光ファイバプローブで局所集光評価し、発光素子の電気 - 光信号変換効率の局所評価を可能にする手法である。

本論文は6章から構成されている。

第1章は序論である。Si ベース光電子集積回路用の発光素子の開発を発光素子材料探索段階および発光素子特性評価段階に分けて、各段階における単一素子評価技術の必要性と、本研究で提案する評価技術である STM-CL 分光法および STM-EL 分光法の概要および特長を述べている。本章では、Si ベース光電子集積回路の発光素子は一般に、GaAs などの既存の発光素子よりも発光効率が低く、高面密度であるため、単一素子評価には高空間分解能・高励起強度が必要となるが、STM-CL 分光法はこれらの条件を満たす理想的な評価ツールと成りうること、および、STM-EL 分光法は通電状態の素子の発光(EL)を局所評価可能な唯一の手法であることを明確に述べている。

第2章では STM-CL 分光法の背景、変調 PL/STM-CL 分光装置開発および動作確認、STM-CL 分光法の空間分解能評価、多結晶タングステン STM 探針(poly W-tip)の電子エミッタとしての諸問題、STM-CL 分光法の Si ドープ GaAs 面への応用について述べている。本章で得られた主な実験結果は以下の通りである。

- ・電子線励起強度の振幅変調による変調分光法を適用することで、STM-CL 分光法の S/N を大きく向上可能であることを実験的に示した。
- ・poly W-tip の傍熱脱ガス処理により強度の安定した電界放射電子線を得られ、炭化水素系汚染物を添加した GaAs 面を試料として、STM-CL イメージングに初めて成功した。
- ・poly W-tip からの電界放射電子線を極薄熱酸化膜を有する Si 基板に照射して、試料面上の電子線照射領域サイズ D と探針試料間距離 d の関係を評価した。探針試料間距離($d \sim 100\text{nm}$)に比べて探針先端サイズが小さい(曲率半径 $r < 50\text{nm}$)ことから電子線は探針先端から放射状に放出され、 D は d のオーダーとなる。本章の測定では典型的に $D \sim 0.6d$ であった。
- ・GaAs/AlGaAs 多層構造断面および炭化水素系汚染物を添加した GaAs 面を試料として STM-CL 分光法の空間分解能を評価した結果、空間分解能はともに試料面上の電子ビーム径 D で決まることが分かった。また、GaAs/AlGaAs 多層構造断面を試料として、GaAs/AlGaAs ヘテロ界面近傍で測定した STM-CL プロファイルから、少数キャリアの緩和・拡散過程の STM-CL 空間分解能への寄与が無視できることが分かった。更に、同等の集光系を有する装

置による STM 発光分光測定の結果に比べて2桁以上高い発光強度が得られていることが分かり、GaAs よりも発光効率の低い材料も評価可能であることが示された。

- ・極薄熱酸化膜を有する Si 基板を用いて poly W-tip からの電界放射電子線の探針試料間距離依存性を評価した。結果、一部の poly W-tip では探針先端近傍に局所仕事関数の異なる複数の局所電子エミッタが存在し、電子線も複数生じることが分かった。局所電子エミッタは、仕事関数の低い W ファセット面や微小突出部に由来すると考えられる。このような場合、探針試料間距離を小さくとり、最も探針先端に近いエミッタに電界を集中させることで、電子エミッタを単一に出来ることを実験で示した。

第3章では導電性ファイバースプローブ(FP)集光による STM-CL の集光効率の改善、STM-EL 集光系としての FP 集光系の立ち上げを目的として、導電性 FP および導電性 FP 用 STM スキャナを開発した。フッ酸緩衝溶液の混合比および光ファイバーのエッチング時間のみでプローブ線鋭角およびプローブ部高さを任意に制御することが可能になった。

第4章では、導電性 FP の電界放射電子線源・STM-CL 集光系への応用の可能性を提示した。導電性 FP を集光系とすることで、従来のレンズ集光系よりも高い集光効率を実現可能なことを理論的に示し、p-GaAs(110)面を用いた測定で実証した。電界放射電子線源としての Cr コート FP は、Cr 膜が非晶質かつファイバーコアのプローブ軸対称性が高いことから、第2章で述べた多重電子ビームの問題を本質的に解決できる可能性がある。本章ではこれを実験的に示した。

第5章では、第2章で開発した変調 PL/STM-CL 分光装置、第3章で開発した導電性 FP 集光系を元に、新たに STM-EL 分光測定用試料ホルダおよび GaAs 層用 In オーミック電極作製手法の開発を行った。また、シグナル検出テスト用プローブとして Cr コート FP を用いて GaAs/AlGaAs ダブルヘテロ pin-構造断面の STM-EL 測定を行い、GaAs 活性層の EL 発光の空間分解測定を実現した。本測定による空間分解能は 1 μ m 程度であり、これが近接場集光ではなく、遠隔場集光によることを明らかにした。

第6章では、STM-EL 分光測定の近接場集光による空間分解能向上のため、開口型導電性 FP の開発を行った。Cr 中間膜および Au 遮光膜を逐次蒸着した FP の先端に集束イオンビームを照射し、高い開口径精度で微小光開口を作製することに成功した。

以上を要約すると、本論文では、変調 PL/STM-CL 分光装置、導電性 FP と FP 用 STM スキャナ、および、STM-EL 分光装置の開発を行った。また、GaAs/AlGaAs 系試料を用いて STM-CL 分光測定、および、無開口 FP による STM-EL 分光測定を行い、各測定の空間分解能およびその起源を明らかにした。導電性光ファイバースプローブを電界放射電子源および集光系に用いた STM-CL 測定では、高集光効率および電子ビームの単一化を実現できることが示された。更に、STM-EL 分光測定の空間分解能の向上を目的として、集束イオンビームによる開口型導電性ファイバースプローブの作製に成功した。本研究の成果は、STM ベースの既存の局所分光技術では困難であった、低発光効率材料の局所発光効率評価・局所 EL 評価を可能にするものであり、今後の物理工学の発展へ大きく貢献することが期待できる。

よって本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認められる。