

審査の結果の要旨

論文提出者氏名

橘 浩一

本論文は「Fabrication of Nitride-Based Quantum Dots and Their Application to Optical Devices」(窒化物半導体量子ドットの形成と光デバイスへの応用)と題し、英文で書かれており6章からなる。量子ドットは、情報通信技術用デバイスの性能を大幅に向上させるナノ構造として広く期待されている。本研究は、量子ドット構造を導入した窒化物ガリウム半導体(以下 GaN 系と呼ぶ)光デバイスの実現をめざして、量子ドットの形成技術の確立、光学評価、デバイス試作について論じている。

第1章は序論であって、研究の背景、動機、目的と、論文の構成について述べている。特に、GaN 系量子ドットの形成技術やレーザ素子への応用の研究は、まだ始まったばかりであり、未開拓な部分が多く残されていることを指摘するとともに、GaN 系などワイドバンドギャップ系半導体においては、閾値電流の低減に於いて、量子ドットの役割が例えばガリウム砒素系より一層重要であることを、理論的立場から指摘している。

第2章は「InGa_N Quantum Dots by Self-Assembled Growth (自然形成による InGa_N 量子ドット)」と題し、InGa₁N 量子ドットの自然形成技術について明らかにしている。自然形成による量子ドットにおいては、結晶の成長機構のみを用いるので構造の微細化や高密度化が容易であるという利点を持つ。有機金属気相成長法を用いて、常圧において Al₂O₃ (0001)上に結晶成長を行った。まず、2段階成長法という手法により、格子定数差が16%ある Al₂O₃ (0001)基板上に、Root-mean-square 粗度が0.17nmと極めて平坦な GaN 表面が得ることに成功した。その後、InGa_N を供給しその供給量や成長温度(675~770°C)を系統的に変化させることにより、InGa_N 量子ドットを自然形成させて、量子ドットの平均直径と高さがそれぞれ16nmと4nm、ドット密度が $1.6 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$ という構造を実現した。また、InGa_N 自然形成量子ドットの単一ドット分光を行い、個々の量子ドットのからの発光と考えられる線幅が170μeVと非常に狭い蛍光スペクトルが得られた。さらに、InGa_N 量子ドットを成長方向に積層化することによって、全体の量子ドット密度と蛍光強度が増加することを見出した。

第3章は「InGa_N Quantum Dots by Selective Growth (選択成長による InGa_N 量子ドット)」と題し、InGa_N 量子ドットの選択成長について論じている。選択成長による量子ドットの形成では、電子線描画法によりパターンニングした基板上で成長を行うので、量子ドット構造の均一性や位置の制御性が優位である。SiO₂/GaN/Al₂O₃ 基板上に、フォトリソグラフィによって正方形のパターンを描画し、適切な成長条件下では GaN 六角錐構造が形成されることを示すことが出来た。その後に、InGa_N 多重量子井戸構造を3周期成長させることにより、六角錐構造の頂上部分に InGa_N 量子ドットが形成され、均一な六角錐構造が形成されていることを確認した。試料の断面 SEM 像より、六角錐構造の先端の曲率半径は30nm以下であり、

先鋭な構造であることが明らかになった。量子ドットの横方向の大きさも、先端の曲率半径と同じ程度であると考えられ、ピーク波長 430nm において InGaN 量子ドットからの明瞭な蛍光を観測することができた。150~200nm という非常に高い空間分解能を有する顕微蛍光分光法を用いて発光位置を特定し、六角錐構造の頂上に InGaN 量子ドットが形成されていることを明瞭に示すことが出来た。

第4章は「GaN Quantum Dots by Selective Growth (選択成長による GaN 量子ドット)」と題し、GaN 量子ドットの選択成長について調べた。GaN は InGaN と比較して大きなバンドギャップエネルギーを有するので、紫外光領域で発光するデバイスを作製する上で適している。また InGaN 量子ドットと比較して、混晶ではないため考察や解析を行い易いという特徴を有している。SiO₂/GaN/Al₂O₃ 基板上に第3章と同様に、GaN 六角錐構造を形成し、その後に、GaN/AlGaIn 多重量子井戸構造を 20 周期成長して、六角錐構造の頂上部分に GaN 量子ドット構造を形成した。SEM 断面像より先端の曲率半径は 10nm 以下であった。このことから、非常に先鋭な構造であることが分かる。GaN 量子ドットの横方向の大きさは、この曲率半径と同程度であると考えられる。

第5章は「Application of GaN-Based Quantum Dots to Optical Devices (GaN 系量子ドットの光デバイスへの応用)」と題し、これまでの知見で得られた GaN 系量子ドット構造を、光デバイスに応用することを試みた。10 層積層化した InGaIn 自然形成量子ドットを活性層に有するリッジ型レーザ構造を作製し、室温において光励起によって評価を行った。明確なしきい値や、発振後の分解能以下まで細くなったスペクトル線幅により、GaN 系量子ドットレーザの室温における初めての発振を示すことが出来た。

第6章は結論であって、本研究で得られた成果を総括している。

以上、本論文は、GaN 系半導体量子ドット構造の形成技術の確立をめざして、結晶成長条件の最適化をはかるとともに、それらの光学特性を明らかにし、さらに、GaN 系量子ドット構造を活性層に有する青色レーザ構造を作製し、室温においてレーザ発振（光励起）を初めて実現したものであり、電子工学の発展に貢献するところが少なくない。よって、本論文は、博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。