

審査の結果の要旨

氏名 中山 茂

高密度光配線を導入する次世代集積回路に向けて、シリコンフォトニクスと呼ばれる研究分野・技術領域が注目を集めており、CMOS 技術との整合性が高いシリコンおよびその関連材料を用いた各種光学素子の研究開発が進められている。その中において、シリコン系材料を用いた高効率発光素子に関しては、依然として挑戦的な課題となっている。本論文は、「Control of Light Emission from Silicon by Using Photonic Crystals (フォトニック結晶を用いたシリコンの発光制御)」と題して、間接遷移半導体である結晶性シリコンの発光現象のフォトニック結晶構造による制御と、それを利用したシリコンの発光特性改善の可能性を論じており、7章から構成され、英文で書かれている。

第1章では、「Introduction」と題して、シリコンフォトニクスの研究分野の背景を論じた後、本研究の意義と目的を示している。

第2章では、「Spontaneous emission from indirect bandgap materials and its control by using photonic crystals」と題して、間接遷移型半導体の発光、フォトニック結晶に関する基礎原理について概説している。特に、本論文で要となるフォトニック結晶を用いた場合の発光強度増大について理論的に議論している。

第3章では、「Enhanced photoluminescence from indirect bandgap materials by utilizing photonic crystals」と題して、間接遷移半導体にフォトニック結晶を作製し、光励起により発光の増大に成功している。シリコンに関しては、電磁界のモード体積が小さいH0型フォトニック結晶共振器を用いて、パターンのないSOI(Silicon-On-Insulator)基板からの発光強度と比較し、約21倍の増大を観測した。さらに、ゲルマニウムに関してもエアブリッジ型フォトニック結晶スラブを作製し、取り出し効率の高い Γ 点のバンド端モードを利用することでGeOI(Germanium-On-Insulator)基板の発光積分強度と比較し、22倍の増大比を実現し、シリコン以外の間接遷移半導体についても、フォトニック結晶構造がその発光特性制御に有効であることを示している。

第4章では、「Effect of cavity mode volume on photoluminescence from

silicon photonic crystal nanocavities」と題して、シリコンの室温での発光に対するモード体積の効果を議論している。第 3 章において、共振器を用いることでパーセル効果に起因すると考えられるシリコンの発光効率の増大の可能性が示唆されていた。しかし、発光再結合寿命の短縮を直接観測するのが困難なため、その議論が不十分であった。本章では、モード体積が異なる複数の種類の共振器の設計・作製し、PL 評価を行ない、各共振器からの発光実測値を基に、取り出し効率・レンズ集光効率を考慮し、内部量子効率の変化を詳細に検討している、その結果として、モード体積が小さい共振器ほど発光効率が増大されることを示し、パーセル効果の寄与に対する議論を展開している。

第 5 章では、「**Demonstration of silicon light emitting diodes with photonic crystal slab**」と題して、フォトニック結晶を用いたシリコン LED(light emitting diode)の実現について述べている。フォトニック結晶スラブの特徴を活かしながら、電流を注入させられる構造として横方向 *p-i-n* 構造を作製し、真性領域近傍にフォトニック結晶を導入した構造を作製し、パターンのない平面 SOI LED と比較し、約 14 倍の電流注入発光積分強度の増大を達成している。また、この増大について、取り出し効率の高い Γ 点のバンド端モードに起因することを論じている。

第 6 章では、「**Efficient electroluminescence from silicon light emitting diode with nanobeam photonic crystal cavities**」と題して、共振器への効率的電流注入とナノ共振器効果を利用出来る構造としてナノビーム型フォトニック結晶共振器を採用したシリコンナノ共振器 LED の作製とその評価について述べている。作製したデバイスについて、注入電流 0.1mA において、シリコン細線 LED と比較して約 80 倍の電流注入発光ピーク強度が得られたことを報告するとともに、その起源を論じている。

第 7 章では、「**Conclusions and future outlook**」と題して、各章の主要な研究成果をまとめて総括し、本論文の結論、及び、将来展望について述べている。

以上、これを要するに、本論文では、フォトニック結晶構造による間接遷移型半導体であるシリコンの発光特性の制御について論じるとともに、その知見に基づきフォトニック結晶シリコン LED やシリコンナノ共振器 LED を実現したものであり、電子工学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る。