

## 審査の結果の要旨

論文提出者 張芫瑄

シリコン基板上で動作する量子ドットレーザはシリコンフォトニクスに代表される電子デバイスと光デバイスを融合した光電子集積回路用の高性能（低閾値・低温度依存性・高速変調）レーザ光源として注目を集めている。そのような高性能半導体レーザ構造の実現に向けてシリコン-化合物半導体間の異種材料を接合する技術を確立することが重要である。本論文は「Fabrication and Characterization of Wafer-Bonded Quantum Dot Lasers on Silicon（ウェハ融着法によるシリコン基板上量子ドットレーザの作製とその評価に関する研究）」と題し、シリコン基板上高性能量子ドットレーザを目指し様々なウェハボンディング技術を用いてシリコン基板上に量子ドットレーザ構造を直接融着することにより作製するとともに、ウェハボンディングにより作製したシリコン基板上量子ドットレーザの発振および直接変調特性等デバイス評価を行った結果を中心にまとめたものであり、全9章から成り英文で書かれている。

第1章は「Introduction」と題し、本博士論文の背景及び構成について述べるとともに、シリコン基板上の高性能半導体レーザの実現を目指した研究の重要性を論じている。

第2章は、「Light Sources for Silicon Photonics」と題し、シリコン基板上シリコン系光源及び化合物半導体レーザ光源の歴史的背景及び変遷について述べている。

第3章では、「Fundamentals of Quantum Dot Lasers」と題し、量子ドットレーザの原理について述べている。他の量子構造（量子井戸等）を持つ半導体レーザに比べて閾値・温度特性及び変調特性において優れた特性を持ち、シリコンフォトニクス用レーザ光源として適している理由について論じている。

第4章では、「General Overview of Wafer Bonding Technology」と題し、シリコン-化合物半導体間を融着させる様々なウェハボンディング技術についてその概要と基礎原理を述べている。

第5章では、「Gallium Arsenide on Silicon by Wafer Bonding」と題し、量子ドットレーザの母体基板であるヒ化ガリウムとシリコン基板間を融着させるウェハボンディング技術についてその概略及び基礎原理を述べた後、融着強度等のボンディング特性のプロセス条件依存性について詳細に論じている。本論文ではプロセスがより簡便な直接融着法と電気特性やボンディング特性がより優れている金属を介した融着法の二つの方法

を用いてウェハボンディングを行っているが、300°C以上での直接融着或は金属を介した融着を行う場合に最も低い抵抗が得られることを実証している。また融着強度を向上させる方法として紫外線照射による表面活性化処理技術に関しても論じている。

第6章では、「Fabrication of InAs/GaAs Quantum Dot Lasers Wafer-Bonded onto Silicon」と題し、シリコン基板にウェハボンディングされたヒ化ガリウム基板上ヒ化インジウム系量子ドットレーザの作製手法について述べるとともにそのデバイス特性について論じている。直接融着及び金属を介した融着法の何れの方法においても、ボンディングする前と後ではほぼ同程度のデバイス性能を得ることが出来、光通信用波長帯 1.3 $\mu\text{m}$  での室温レーザ発振に成功している。

第7章では、「Direct Modulation in Quantum Dot Lasers on Silicon」と題し、シリコン基板にウェハボンディングされた量子ドットレーザの直接変調特性について論じている。変調測定用デバイスの作製及びシリコン基板上量子ドットレーザの連続動作時のデバイス特性について示した後直接変調動作の実証を行っている。ウェハボンディングされた量子ドットレーザにおいて変調速度 6Gbps、消光比 5dB での動作に成功している。また、端面に高反射コーティングを施す等による直接変調特性の更なる向上の可能性についても触れている。

第8章では、「Towards Hybrid Quantum Dot/Silicon Lasers」と題し、量子ドットレーザとシリコン導波路をウェハボンディングした量子ドット-シリコンハイブリッドエバネッセントレーザについて論じている。まず酸化膜上シリコン基板上にウェハボンディングした量子ドットレーザの作製方法について触れた後、ブロードエリア型およびリッジ導波路型のレーザ構造についてデバイス特性評価を行い世界初となるレーザ発振動作の実証を行っている。また、厚みや組成等の異なるレーザ及びシリコン導波路構造による導波モード及び注入電流分布の数値解析を行うとともに、レーザーシリコン導波路構造の最適化及び討論を行っている。

第9章では、「Summary」と題し、各章の主要な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、本論文は、シリコン基板上の高性能量子ドットレーザの実現に向けて、複数のウェハボンディング技術についてその有効性を検討するとともに、ウェハボンディングにより作製したシリコン基板上 InAs/GaAs 量子ドットレーザの発振および直接変調動作を実証したものであり、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 として合格と認められる。