

## 審査結果の要旨

論文提出者氏名 河川 研一

Si を基盤とした光学デバイスは、高度に発達した Si 電子デバイス技術との融合によって光・電子集積回路を実現し、集積回路の性能を飛躍的に向上させるとともに、新機能を付加できる可能性がある。これを実現できる有力な候補として期待されているのが、Si と同じ IV 族半導体である Ge との混晶を用いた Si/SiGe 量子構造である。本論文では、光デバイスの基礎として電流注入発光現象を調べるため、Si/Ge 量子構造を有する Si p-i-n 構造を作製し、そのエレクトロルミネッセンス(EL)特性を詳細に調べるとともに、発光特性の向上と新しい光デバイス応用を目指して、歪み補償多層量子構造や SiGe 微小共振器構造を開発するとともに、その光学特性に関する知見を得ることを目的としている。

本論文は7章で構成されている。

第1章の序論では、本研究の背景を述べ、光学デバイス応用を目指した Si/Ge 系量子構造の光学特性に関する研究の必要性が示されている。

第2章では、本研究で扱う Si/Ge 系ヘテロ構造のバンド構造、Si/Ge 系量子構造の中で最も基本的な Si/SiGe 量子井戸構造の発光特性について述べ、さらに、組成傾斜バッファを用いる SiGe 緩和仮想基板の形成方法について述べている。

第3章では、本研究で用いた実験方法について説明している。結晶成長法であるガスソース分子線エピタキシー法、構造評価法、光学特性評価法について述べている。

第4章では、Si/Si<sub>0.4</sub>Ge<sub>0.6</sub>タイプII量子構造を有する Si p-i-n 構造の形成と EL 特性について述べている。Si<sub>0.4</sub>Ge<sub>0.6</sub>層厚の増加に伴い、2次元井戸層を反映した NP、TO 発光から3次元島を反映したブロードな発光への変化を観測している。また、低温において h-h-e オージェ過程が発光特性を支配していることを示唆する特異な温度依存性を見出し、その定量的な解析を行っている。

また、井戸幅が厚くなるほど、発光の活性化エネルギーは大きくなり、高温まで発光が持続し、井戸層に SiGe 量子ドットを有する試料においては、室温においても EL が観測されることを見出し、SiGe 量子ドットを用いることにより室温発光する Si p-i-n ダイオード実現の可能性を示している。

なお、当初予想していた発光層にタイプII量子井戸を用いたことによる発光特性の顕著な変化は観測されなかったが、これは、伝導帯のオフセット量が小さく、井戸層が薄いためタイプIIの特性が顕在化しないためと考察している。

第5章では、歪み補償 Si/SiGe 量子井戸構造の作製と光学特性に述べている。本研究で用いた歪み補償条件は、弾性歪みエネルギーによって多層構造が基板にかかる応力を補償するという発想に基づいており、多層構造の平均の格子定数を補償条件とする一般に行われている設計法とは異なっている。

Si 基板上に直接形成した場合の臨界膜厚を大きく越える40周期数の多重量子井戸(MQW)構造にお

いても、歪み補償構造にすることにより、結晶性が良く平坦で均一な井戸幅の MQW が作製されることが、X 線回折、断面 TEM 観察より確認されている。また、量子井戸からの明瞭な NP, TO 発光を観測しており、歪み補償構造が Si/Ge 系に有効であることを実証し、厚い活性層を必要とする太陽電池や発光・受光素子への応用が可能である事を示している。

また、温度上昇に伴い、励起子の非局在化による発光ピークのブルーシフトを観測するとともに、励起強度の増加に伴って、タイプ II 量子井戸を反映したバンド曲がり効果による顕著なブルーシフトを観測している。

発光特性の仮想基板の Ge 組成依存性を調べた結果、Ge 組成が増加するに従って、Si/Si<sub>0.68</sub>Ge<sub>0.32</sub> MQW からの PL ピークは、単調にブルーシフトした。このシフトは、最も低い準位間の遷移である  $\Delta(2)_{\text{Si}}\text{-HH}_{\text{SiGe}}$  タイプ II 遷移では説明がつかず、観測される発光は  $\Delta(4)_{\text{SiGe}}\text{-HH}_{\text{SiGe}}$  タイプ I 遷移によると結論している。その理由として、SiGe 井戸幅が 8 nm と厚いため、 $\Delta(2)_{\text{Si}}$  の電子と  $\text{HH}_{\text{SiGe}}$  のホールの波動関数の重なりが非常に少なく、タイプ II 遷移の確率はタイプ I 遷移の確率に比べて非常に低いことによると推測している。

第 6 章では、歪み補償 SiGe/Si 分布ブラッグ反射鏡の作製と微小共振器構造への応用について述べている。1 層の膜厚が 90 nm 以上もある DBR においても歪み補償構造が実現できることが示され、38.5 周期の Si<sub>0.73</sub>Ge<sub>0.27</sub>/Si DBR において、波長 1.33  $\mu\text{m}$  で 90% の記録的な反射率をうることに成功している。この歪み補償 SiGe/Si DBR を SiGe 微小共振器構造の作製に応用し、SiGe 微小共振器による変調された発光を世界で初めて観測するとともに、発光の指向性も PL 強度の角度依存性より確認している。また、屈折率差の大きい Si/CaF<sub>2</sub> ミラーを上部ミラーに有する SiGe 微小共振器構造も作製し、発光ピークの半値幅の減少と発光の指向性がさらに顕著となることを示している。発光ピーク波長が共振器によって制御されていることも励起強度依存性より確認するとともに、自然放出寿命が短くなることも見出している。

第 7 章では、本研究で得られた成果について総括している。

以上、本研究によって Si/Ge 量子構造を有する Si 発光素子の電流注入発光特性を明らかにし、SiGe 量子ドットが室温動作可能な発光デバイスを実現しうることを示した。また、歪み補償 Si/SiGe 量子井戸構造および SiGe 微小共振器構造を開発し、その光学特性を明らかにすることにより、歪み補償構造を Si/Ge 系へ応用することの有用性と、Si/Ge 系においても微小共振器構造による光学特性の向上が可能であることを示した。

これらの成果は、Si 基板上 Si/Ge 系発光デバイスの実現、さらには Si 系半導体材料による光集積回路へ発展していくものと考えられ、物理工学に大きく貢献するものである。以上の理由より、本論文は、博士（工学）の学位を授与するのに十分値する。