

## 審査の結果の要旨

氏名 谷和樹

半導体集積回路の微細化・高集積化にともない、金属多層配線部における信号伝達遅延および消費電力増大がデバイス性能向上を律速している。そこで、金属配線を光配線に置き換えるオンチップ光通信が注目されている。Si 集積回路にヘテロ集積可能な Ge は、オンチップ光通信における発光・受光素子の材料として有望である。しかし Ge 素子の発光強度は非常に弱く、また発光・受光素子のモノリシック集積に適した素子構造については検討されていなかった。

本論文は「歪制御技術を適用した横型 Si/Ge/Si ヘテロ接合発受光素子」と題し、2009～2013 年に実施した研究についてまとめられている。モノリシック集積可能な Ge 発光・受光素子を実現することを目的とし、モノリシック集積に適した素子構造の検討と Ge 発光素子の発光強度向上に取り組んでおり、全 7 章で構成される。

第 1 章は序論であり、本研究の背景、課題と目的についてまとめている。オンチップ光通信の有効性と、光源も含めたオンチップ集積の重要性について述べている。

第 2 章では、本研究が対象とする Ge 発光・受光素子に関連する研究分野の進展について、本研究実施後の 2014 年以降現在までの動向も含めてまとめつつ、本研究の位置付けを明確化している。

第 3 章では、モノリシック集積に適した横型 Ge 発光・受光素子構造を提案している。Ge-pin 構造を用いると、コンタクト抵抗などのデバイス特性上の問題と、プロセス温度などのデバイス作製上の問題の両面で、Si-CMOS プロセスとの整合性が低いことが確認された。そこで、Ge への熱負荷を低減するために Ge 結晶成長プロセスを最後に実施する Ge ラストプロセスを適用でき、Si-pin 構造を活用できるデバイス構造として、横型 Si/Ge/Si ヘテロ接合発受光素子を提案した。Ge-LED (発光素子) と Ge-PD (受光素子)、および Si 導波路、電気絶縁部からなるオンチップ光送受信システムを試作し、光送受信を実証した。一方、Ge 発光素子の発光強度向上が必須であることを明確化した。

第 4 章では、CMOS 互換性の高いプロセスを用いて Ge の発光強度を向上さ

せる技術を検討している。外部ストレッサ ( $\text{SiN}_x$  薄膜) を用いた Ge への伸張歪印加により, Ge のバンド構造が変化し直接遷移化する。Ge に電流注入可能な構造として, 上面ストレッサとデルタ型 (上面+側壁) ストレッサを比較した。3次元有限要素法解析により, デルタ型ストレッサでは Ge 側壁の面直方向に伸張歪が印加されることを明らかにした。計算した構造を実際に作製したところ, 計算と応力分布の傾向が一致した。また, 側壁に大きな伸張歪が印加されるデルタ型ストレッサの方が, 微細化の効果が大きく発現することを示した。1%の体積膨張に相当する伸張歪により,  $\Gamma$  点の伝導帯エネルギー低下にともなう電子密度が向上し, 発光強度が 5 倍向上したことを示した。

第 5 章では, 第 4 章で検討したデルタ型ストレッサを, 第 3 章で提案した横型 Si/Ge/Si ヘテロ接合 LED に適用した構造を検討している。 $\text{SiN}_x$  堆積による Ge への欠陥準位生成も見られず, 伸張歪によって  $\Gamma$  点の伝導帯エネルギーが 26 meV 低下し, 1.6 倍の発光強度向上を達成した。また, 電流注入効率向上のために素子構造を改善し, Ge への n 型ドーピングによる電流密度向上と Si-pn 構造の薄膜化によるリーク電流密度低減も併せて実現した。

第 6 章では, Ge の結晶性に着目し, Ge 中の結晶欠陥によるキャリアの非発光再結合を抑制する手法について検討している。Ge と Si の格子不整合や基板からの熱応力による結晶欠陥の発生を抑制するために, フィン構造を適用した。平滑な側壁を持つ Si フィンの形成, SiGe 擬格子整合成長, 酸化濃縮の工程を提案し, 結晶性の高い Ge フィン構造が作製できることを示した。また, 得られた Ge フィンを横型 Si/Ge/Si ヘテロ接合 LED に適用し, 直接遷移発光および Ge 中の結晶欠陥低減にともなう暗電流の低減を実証した。

第 7 章は結論であり, 各章で得られた知見をまとめるとともに, 本研究における今後の課題を, 2014 年以降の研究分野の進展と関連させて述べている。

以上, 本論文は, 半導体集積回路のオンチップ光通信に向けて, Ge に伸張歪を印加して直接遷移化させる技術を活用し, Si-CMOS プロセスとの整合性の高い横型 Si/Ge/Si ヘテロ接合発受光素子を提案・実証したものである。歪印加とバンドエンジニアリングおよび発光強度に関する知見のみならず, 実デバイス作製に不可欠なデバイス構造および作製プロセスの設計指針を与えている。これは材料・デバイス機能制御手法の学理構築ひいてはマテリアル工学に対する極めて重要な貢献である。

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。