

本論文は、Study on strain-induced enhancement of plasma dispersion effect and free-carrier absorption for SiGe optical modulators/attenuators (和訳: SiGe 光変調器/減衰器に向けた歪誘起によるプラズマ分散効果及び自由キャリア吸収増大に関する研究)と題し、将来の省電力・高速・高密度光インターコネクションのための素子として期待されている Si 光変調器に、歪 SiGe を導入することでプラズマ分散効果や自由キャリア吸収を増大させることを提案し、素子特性を数値計算で解析すると共に、作製したキャリア注入型光変調器において、歪 SiGe による変調効率改善を実証し、その動作特性について実験的・解析的に調べた研究成果を纏めたものであり、全文 11 章よりなり、英文で書かれている。

第 1 章は序論であり、本研究の背景について議論すると共に本論文の目的と構成について述べている。

第 2 章は、「Theory of strain-induced enhancement of plasma dispersion effect and free-carrier absorption through mass modulation in SiGe」と題し、歪 SiGe 中におけるプラズマ分散効果や自由キャリア吸収について論じている。波長 1550 nm の光に対して、歪 $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$ を用いることで、プラズマ分散効果は 1.6 倍、自由キャリア吸収は 2.1 倍向上可能であることを述べている。

第 3 章は、「Numerical analysis of carrier-injection type SiGe optical modulator/attenuator」と題して、歪 SiGe を用いたキャリア注入型光変調器構造を提案すると共に、数値計算を用いた特性解析について述べている。膜厚 30 nm の歪 $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$ を Si 導波路メサ中に埋め込むことで、変調に必要な電流が Si と比較して、約 3 分の 1 になることを明らかにしている。

第 4 章は、「Demonstration of SiGe rib waveguide for SiGe optical modulator/attenuator」と題して、歪 SiGe 変調器において用いる歪 SiGe 光導波路特性について述べている。SOI 基板上に作製した歪 $\text{Si}_{0.72}\text{Ge}_{0.28}$ 光導波路の導波損失を評価することで、波長 1550 nm の光に対して、吸収増加は 0.54 dB/mm 程度であることを明らかにし、素子応用可能であることを述べている。

第 5 章では、「Demonstration of enhanced free-carrier effect in carrier-injection type SiGe variable optical attenuator」と題して、キャリア注入型 SiGe 光変調器構造を用いた可変光減衰器 (VOA) の実証について述べられている。素子作製手法が詳しく述べられていると共に、実際に作製した素子を用いることで、歪 SiGe による吸収変調の増大に成功したことが論じられている。

第 6 章では、「Low temperature Al_2O_3 surface passivation for carrier-injection SiGe optical modulator」と題して、低温パッシベーション技術に述べられている。ALD 法を用いて 350 度で堆積した Al_2O_3 は、導波路形成時のエッチング後の Si 表面においても良好にパッシベーション可能であることを容量-電圧特性から明らかにすると共に、キャリア注入型 Si 変調器において、熱酸化 SiO_2 パッシベーションと同等の性能が得られることが述べられている。

第 7 章では、「Optimization of distance between pin junctions for high carrier-injection efficiency」と題して、横方向 PIN 接合構造の最適化による変調器の特性改善手法について論じられている。数値計算により、高濃度ドーピング領域と導波路端との距離は 500 – 650 nm が最適であることを明らかにすると共に、電子線描画装置を用いて作製した歪 SiGe 光変調器において、20 mA/mm の電流注入で 20 dB の光減衰が得られたことが述べられている。また歪 SiGe 光変調器の RF 応答が 1.5 倍速い物理的要因についても論じられている。

第 8 章では、「SiGe-based carrier-injection Mach-Zehnder modulator with enhanced plasma dispersion effect in strained SiGe」と題して、マッハ・ツェンダー干渉計型光変調器の諸特性について論じられている。電子線描画装置で構造を最適化した非対称マッハ・ツェンダー干渉計を有するキャリア注入歪 SiGe 光変調器を作製し、共振波長のシフト量を測定することで、屈折率変調量を評価したことが述べられている。Si 素子と比較して、歪 SiGe 素子は、変調に必要な電流量が 30% 程度減少し、これにより歪 SiGe 中におけるプラズマ分散効果の増大を直接的に実証した旨が述べられている。また、10 Gbps における変調特性について論じられており、良好な変調特性が得られたことが述べられている。

第 9 章では、「High Ge fraction SiGe optical modulator by considering Ge diffusion at high temperature process」と題して、高 Ge 組成 SiGe 変調器の実現手法について論じられている。高温アニール時に Ge 拡散を考慮して、成長時の Ge 組成を高くすることで、所望の Ge 組成素子を作製可能であることが述べられている。臨界膜厚を考慮した場合、10 nm の $\text{Si}_{0.4}\text{Ge}_{0.6}$ 層を成長することが最適であると述べられており、これにより 1 mA を切る動作電圧の光変調器が実現可能であると論じられている。

第 10 章では、「Numerical Analysis of Carrier-Depletion Strained SiGe Optical Modulators with Vertical P-N Junction」と題して、歪 SiGe を空乏型光変調器に応用する可能性について論じられている。縦型 pn 接合中に SiGe 層を配することで、変調効率を約 1.8 倍になることが述べられている。

第 11 章では、結論と今後の展望が述べられている。

以上要するに本論文は、将来の省電力・高速・高密度光インターコネクション用のデバイスとして期待されている Si 光変調器において、歪 SiGe を用いた新しいキャリア注入型素子構造を提案すると共に、作製した素子において歪 SiGe 中におけるプラズマ分散効果および自由キャリア吸収の増大を実証し、光変調効率の向上手法を明らかにしたものであり、電子工学上、寄与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。