

審査の結果の要旨

氏名 朴 成鳳

シリコン集積回路の性能指数を飛躍的に向上する新しい技術としてシリコンフォトニクスに対する期待が高まっている。シリコンフォトニクスはシリコン CMOS 技術を電子回路のみならず光回路の製作に適用し、電子・光集積回路 (EPICs, Electronics and Photonics Integrated Circuits) を実現する技術体系である。これまでに導光路、フィルター、などパッシブ素子に関する報告は多くすでに実用のレベルにあるといえるが、受光素子を初めアクティブ素子は研究途上の技術である。特に、シリコン上にモノリシックに集積することが不可欠な受光器についてはさまざまなアプローチが提案され、精力的な研究が進められている。この中で Ge は直接遷移バンドギャップが光通信波長帯(1.55 ミクロン帯)にあり、かつシリコンと同じ 14 族半導体であることから集積化がプロセスを汚染する原因とはならない特徴を有する。このため、シリコンフォトニクスの集積化受光器としてきわめて有望である。しかし、格子定数の不一致による欠陥が存在し、受光器の高性能化には多くの課題を残している。さらに、欠陥低減のためにエピ成長後に行う高温の熱処理はシリコン集積回路性能を劣化し、このためシリコン導光路と Ge 受光器の集積を困難にしている。言い換えれば、Ge は III-V 族半導体受光器に無かった CMOS 技術に互換性を有する材料であるが、電子光集積化に対しては今後さらに CMOS プロセスに関する互換性を持たせることが課題といえる。本研究の目的は以下の二点に大別される。

1. シリコン上への Ge のヘテロエピ成長、および受光器の製作・評価を進め、単体素子の高性能化を達成する。
2. 最も単純な EPICs である光クロック配信回路を実現するため、シリコン導光路と受光器の集積化を実現する。

本論文は Integration of Ge Photodetectors on Si for Optical Clocking(光演算のための Si 上に集積した Ge フォトディテクター)と題し、上記二つの目的を達成するため展開した研究成果をまとめたものであり、世界に先駆けてシリコン導光路と Ge 受光器の集積化に成功した内容について述べている。全六章からなる。

第一章では研究の背景と研究の目的について述べている。第二章では Ge 受光

器の設計について、その素子性能の予測および材料の持つ課題について述べている。

第三章ではシリコン上の Ge のエピ成長について述べている。超高真空気相成長装置と成長条件、全面成長と選択領域成長、および熱処理方法についてまとめた。特に、シリコンと Ge との格子定数の不一致により導入される転位と熱処理による低減について明らかにし、さらに選択成長 Ge に特有な現象である、熱処理時に生じる Ge エピ表面の形態不安定化について報告している。

第四章ではシリコン上の Ge 受光器の製作と評価について述べている。先端クリーンルームでの製作プロセスと得られた受光器特性を明らかにしている。さらに、素子特性のシュミレータによりシリコン上に理想的な Ge 受光器が製作できたこと、および転位が受光器の暗電流特性を支配することを明確化した。さらに、この解析結果から欠陥の影響を低く制御することにより、高温の熱処理が不要となることを提唱し、実証した。この結果は Ge の CMOS プロセス互換化に大きく寄与するものである。

第五章ではシリコン導光路に集積化した Ge 受光器の製作と性能について述べている。導光路製作プロセスと受光器製作プロセスではさらに問題が発生すること、その解決策について述べ、光クロック配信回路の特性を明らかにしている。

第六章ではまとめと今後の提言について述べている。

以上述べたように、本論文はシリコン導光路上の Ge 受光器の集積化に世界で初めて成功したもので、そのエピ成長・プロセス基盤技術の構築と総合化に多大な寄与をしたと評価される。また、従来突破できていなかった CMOS プロセス互換性を Ge に付与する素子構造を提案・実証し、大規模な EPICs の実現に向けた重要なマイルストーンをクリアしたものであり、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。