

100Gbit/s 超級歪 SiGe 光変調器の研究開発 (112103007)

Strained SiGe optical modulator toward 100Gbit/s modulation speed

研究代表者

竹中 充 東京大学

Mitsuru Takenaka The University of Tokyo

研究期間 平成 23 年度～平成 25 年度

概要

本研究では、Si よりも大きなキャリアプラズマ効果が期待される SiGe 混晶を導波路とした光変調器の研究を進めた。キャリアプラズマ効果はキャリアの有効質量に反比例することから、高移動度材料である高 Ge 組成歪 SiGe を Si プラットフォーム上に集積した SiGe-on-Insulator (SGOI) 基板を、酸化濃縮と再成長技術により実現し、高移動度化によるキャリアプラズマ効果の増大を明らかにするとともに、Si と較べて大きな変調効率を実証することで、省電力 100Gbit/s 超級広帯域ネットワーク実現に向けた基盤技術を確認した。

1. まえがき

データセンターやクラウドネットワークの急速な拡大に伴い、インターネットトラフィック量は急増している。このような旺盛なトラフィック量の増加に対応するために、より高度で柔軟なフォトニックネットワークを実現するための研究開発が進められている。このような背景を受けて、Si をベースとした光通信デバイス、いわゆる Si photonics が大容量・省電力フォトニックネットワークを実現する上で必要不可欠なデバイステクノロジーとして期待されている。これまでに、超小型光導波路、光受光器、光変調器などの研究報告が多数されており、通信距離が短い光インターコネクション市場を大きく変革しようとしている。

Si 光変調素子においては、主にキャリア濃度変調を通じたキャリアプラズマ効果による屈折率変化を利用した光変調器が報告されている。これまでに多数の Si 光変調器が報告されているが、Si 中のキャリアプラズマ効果は十分に大きいとはいえず、素子長が数 mm と長くなり、動作電圧も大きくなってしまい、実用性の観点からは十分な性能を得られていない。キャリア注入時のより大きな屈折率変化を利用した光変調器も多数報告されているが、キャリア寿命が遅く本質的に高速動作を得るのが難しく、変調電気信号をあらかじめプリエンファシスするため、低消費電力動作にも限界がある。キャリアプラズマ効果を補うために、リング共振器などの大きな Q 値を利用した小型変調器も報告があるものの、動作波長範囲が極端に狭く、実用化においては温度制御が不可欠なことから低消費電力動作を得るのは難しい。以上のように、Si のキャリアプラズマ効果を用いた変調器においては、高変調効率、小型、広動作波長範囲、高速動作をすべて同時に達成することは現状困難であり、長・中距離通信にも適用可能な変調器を実現するためには Si を越えるキャリアプラズマ効果を持つ材料の導入が必要不可欠な状況となっている。

このような背景を受け、本研究では、Si よりキャリアプラズマ効果が大きいことが期待される高 Ge 組成歪 SiGe を導波路材料として導入することで、より変調効率の高い光変調器を実現することを目指した。一般的にキャリアプラズマ効果は、導波路材料の電子と正孔の有効質量に反比例することが知られている。Si CMOS においては歪印加による移動度向上技術が広く用いられており、圧縮歪により Si の正孔移動度が 3 倍以上向上することが知られている。高移動度材料である SiGe と歪印加技術を組み合わせ

ることで、Si に対して大きなキャリアプラズマ効果が得られるものと期待され、従来の Si 光変調器の性能を飛躍的に向上させることが可能になるものと期待される。そこで本研究では、歪 SiGe 中におけるキャリアプラズマ効果の増大を理論的・実験的に明らかにするとともに、Si よりも変調効率の高い光変調器の実現を目指した。

2. 研究開発内容及び成果

歪 SiGe のキャリアプラズマ効果を定量的に解析するために、価電子帯の 3 つのバンド (Heavy Hole, Light Hole, Split-off) を考慮した 6x6 ラッティンジャー・コーン・ハミルトニアンを求め、このハミルトニアンの固有値を計算することで、歪印加時における SiGe の価電子帯バンド構造を計算した。バンド計算で求めた有効質量をドルーデモデルに適用することでキャリアプラズマ効果を計算した。この結果 Ge 組成 50% の歪 SiGe においてプラズマ効果が Si 比で 3 倍以上に増大することが明らかになった。この結果を踏まえて、歪 SiGe 光変調器の変調特性のシミュレーションを進めた。精密な電気特性が計算可能な TCAD と光特性を計算可能な有限差分法による導波路解析シミュレーターを組み合わせた光変調器 TCAD を開発することで、図 1 に示す歪 SiGe MOS 型光変調器の特性解析を行った。

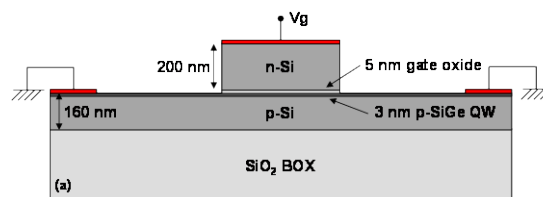


図 1. 歪 SiGe MOS 型光変調器の素子構造

シミュレーションの結果、膜厚 3 nm の歪 Si_{0.5}Ge_{0.5}量子井戸を用いた素子構造において、既報告の Si 変調器と比べて 10 倍以上の 0.033 Vcm 程度の変調効率を得られることが分かった。

そこでまずは図 2 に示す SiGe を導波路コアとした歪 SiGe 光導波路を実際に作製して導波損失を評価した。歪印加によりバンドギャップが狭くなることから導波損失の増加が懸念されるが、Ge 組成が 30% の歪 SiGe においては波長 1550 nm の光に対して損失増加はほぼ無視できる程度であることが分かった。

これらの結果を受けて、実際に歪 SiGe を導波路コアに含

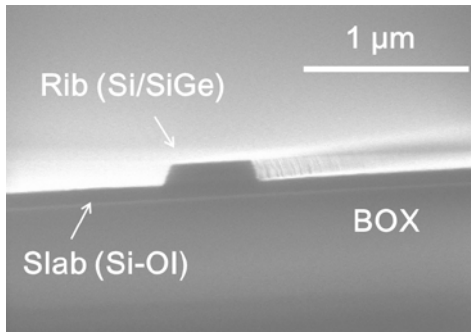


図 2. 歪 SiGe 光導波路の SEM 像

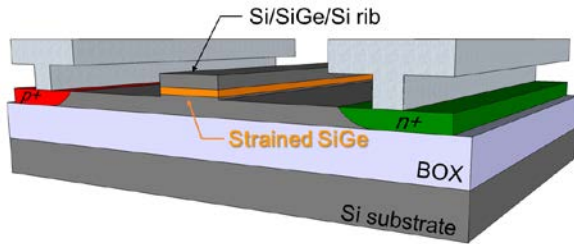


図 3. キャリア注入型歪 SiGe 光変調器の素子構造

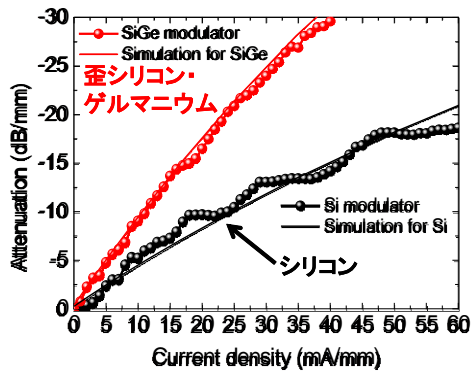


図 4. キャリア注入型歪 SiGe 光変調器の変調特性

んだ図 3 に示す歪 SiGe 光変調器の作製を進めた。横型 PIN 接合を形成してキャリア注入時における Si 変調器と SiGe 変調器の光減衰量の変化を測定した結果を図 4 に示す。同じ電流注入量時において、Si 素子よりも歪 SiGe 素子はより大きな減衰量が得られており、歪 SiGe 中におけるフリーキャリア効果の増大を実証することに成功した。吸収スペクトル測定から屈折率変化についても求めた結果、ほぼ理論通りのキャリアプラズマ効果の増大が SiGe 中で得られていることが明らかになった。これにより歪印加による変調効果増大が可能であることを実験的に明らかにすることが出来た。

さらに、EB 描画装置を用いて PIN 接合位置を最適化することでさらなる高性能化を目指した。これまでに報告されている Si 光変調器との比較を示すベンチマーク結果を図 5 に示す。歪 SiGe を用いることで 20 dB の光減衰を得るための電流量は 20 mA 程度まで低減することに成功した。

3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取り組み

本研究開発を通じて、歪 SiGe を光変調器に用いる優位性を実験的に明らかにすることに成功した。今後は、歪 SiGe 光変調器の性能をさらに向上させる取り組みを続ける。Ge 組成をさらに上げることで、より大きな変調が得られることが期待できる。また素子構造のさらなる最適化によ

る改善も検討する余地が残されている。

Si よりも高効率かつ低消費電力動作が可能な光変調器が実現できることから、データセンター等のインターコネクションへの適用などの波及効果が期待できる。

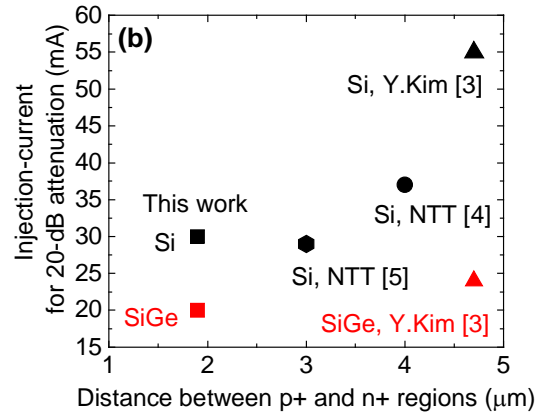


図 5. 歪 SiGe 光変調器の変調特性ベンチマーク

4. むすび

本研究を通じて、歪 SiGe 中におけるフリーキャリア効果の増大を実証することに成功し、歪印加による光変調器の性能向上が可能であることが明らかになった。歪 SiGe は既存の CMOS 製造技術と整合性があることから、作製技術の最適化により、さらなる性能向上が見込める。また、歪 SiGe を用いた高性能 MOS トランジスタも一部実用化が始まっていることから、歪 SiGe をベースにした高性能・省電力光電子融合回路への応用が期待される。

【誌上发表リスト】

- [1] M. Takenaka and S. Takagi, "Strain engineering of plasma dispersion effect for SiGe optical modulators," IEEE J. Quantum Electron., vol. 48, no. 1, pp. 8 - 15, 2012 (2012 年 1 月)
- [2] Y. Kim, M. Takenaka, T. Osada, M. Hata, S. Takagi, "Strain-induced enhancement of free-carrier effects in SiGe for optical modulator and VOA applications," Optical Fiber Communication Conference (OFC2014), Th1C.4, 13 March 2014 (2014 年 3 月)
- [3] Y. Kim, M. Takenaka, T. Osada, M. Hata, and S. Takagi, "Strain-induced enhancement of plasma dispersion effect and free-carrier absorption in SiGe optical modulators", Scientific Reports, vol. 4, 4683, 2014 (2014 年 4 月)

【申請特許リスト】

- [1] 竹中充、高木信一、光変調器、日本、申請年月日 2012 年 3 月 8 日
- [2] 竹中充、高木信一、ハンジェフン、秦雅彦、高田朋幸、長田剛規、ポストプラズマ窒化、日本、申請年月日 2012 年 8 月

【報道掲載リスト】

- [1] “東大・住友化学、圧縮歪みの SiGe 利用し消費電力 3 分の 1 の光変調器を開発”、日刊工業新聞、2014 年 4 月 16 日
- [2] “東大、歪 SiGe を用いた低消費電力な光変調器を開発”、マイナビニュース、2014 年 4 月 18 日
- [3] “光変調、電力 1/3、東大と住友化学 LSI 信号伝送に”、日経産業新聞、2014 年 4 月 22 日

【本研究開発課題を掲載したホームページ】

[http:// www.mosfet.k.u-tokyo.ac.jp/](http://www.mosfet.k.u-tokyo.ac.jp/)