



化合物半導体中の電子のみを用いた高効率光変調を実現 ～省電力シリコン光集積回路への応用に期待～

1. 発表者： 竹中充（東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻 准教授）

2. 発表のポイント：

- ◆化合物半導体をシリコン光集積回路に貼り合わせることで、世界最高性能の半導体光変調器の開発に成功。
- ◆化合物半導体中での電子誘起屈折率変化のみを用いて、高効率・低損失光変調を世界で初めて実証。
- ◆シリコン光集積回路の大幅な省電力化、小型化が可能に。データセンターの高性能化・省電力化だけでなく、大規模集積回路（LSI）に内蔵することで膨大な情報のやりとりが求められる人口知能への応用にも期待。

3. 発表概要：

東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻（工学部電気電子工学科 兼担）の竹中充准教授らは、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の「超消費電力型光エレクトロニクス実装システム開発」プロジェクトの下、技術研究組合光電子融合基盤技術研究所（PETRA）との共同研究により、シリコン（Si）光導波路（注1）上に化合物半導体を貼り合わせることで世界最高性能の半導体光変調器（注2）の実証に成功しました。IoT（注3）や人工知能の出現により膨大な情報を高速かつ低エネルギーで通信するためのシリコン光集積回路の重要性が増しています。しかし電気信号を光信号に変換する効率が悪く、光損失も大きいことが課題となっていました。本研究では、化合物半導体の一種であるリン化インジウム（InP）とヒ化ガリウム（GaAs）を混ぜ合わせた四元混晶であるインジウムガリウムヒ素リン（InGaAsP）中の電子により誘起される屈折率変化のみを用いた光変調に成功しました。これにより光変調器の効率と損失を大幅に改善することに世界で初めて成功しました。半導体チップ上での光変調技術に全く新しい選択肢を与え、データセンターの高性能・省電力化に加えて、膨大な情報処理が求められる人工知能の発展に貢献することが期待されます。

本成果は、英国科学雑誌「Nature Photonics」2017年7月24日（月）（英国時間）オンライン版にて公開されます。

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）「超低消費電力型光エレクトロニクス実装システム技術開発」プロジェクトから助成を受け実施されました。また日本学術振興会（JSPS）科研費 JP26709022 から一部助成を受けています。

4. 発表内容：

<研究の背景・先行研究における問題点>

IoTの進展や人工知能の登場により、膨大な情報を蓄積、処理するデータセンターや機械学習を実行する人工知能チップの役割がますます重要となっており、膨大な情報を高速かつ省電力にやり取り可能な超小型シリコン光集積回路に注目が集まっています。大規模集積回路（注4）と同様の製造技術を用いるシリコンフォトニクス（注5）の急激な進展により、従来では不可能だった大規模光集積回路が実現しつつあります。しかし、シリコンは電気信号を光信号に変換する効率が悪いことが課題となっています。このため、電気信号を光信号に変換する

シリコン光変調器の小型化や省電力化、低損失化が困難であり、この問題の解決が強く求められていました。

<研究内容>

本研究グループは、シリコン光導波路上に、光学特性に優れた化合物半導体の一種であるインジウムガリウムヒ素リン (InGaAsP) を貼り合わせることで、インジウムガリウムヒ素リン中の電子により誘起される屈折率変化のみを用いた高効率・低損失光変調動作を世界で初めて実証しました (図 1)。シリコン光導波路で形成された干渉計の光位相変調部にインジウムガリウムヒ素リン層が貼り合わされた構造となっており、光位相変調部に電気信号を入力することで、光の位相 (注 6) が変調され、光変調信号が出力されます。

実証に成功した素子の位相変調部は、二酸化ケイ素上にシリコン層が形成された SOI (Si on Insulator) 基板 (注 7) 上に作製されたシリコン光導波路上に、ゲート絶縁膜となるアルミナ (Al_2O_3) を介して薄膜インジウムガリウムヒ素リンが貼り合わされた構造となっています (図 2)。凸状に加工されたシリコンとインジウムガリウムヒ素リン層は近赤外光を閉じ込められる光導波路として機能します (図 3)。シリコン層とインジウムガリウムヒ素リン層の間にゲート電圧を印加すると、インジウムガリウムヒ素リンとアルミナの界面に電子が蓄積し、それにより界面近傍の屈折率が減少します (図 3)。これにより入力された光の位相が変調され、電気信号を光信号に変換することができます。

インジウムガリウムヒ素リン中での電子誘起屈折率変化はシリコンと比べて 10 倍以上大きいため、極めて高い変調効率が期待されます。また、電子による光吸収は小さいことから、同時に光損失の低減も期待されます。一方、インジウムガリウムヒ素リン中での正孔による光吸収は著しく大きく光変調には適していません。インジウムガリウムヒ素リンの優れた電子特性はこれまでも知られていましたが、従来手法では電子の効果のみを引き出すことが極めて困難でした。

今回、インジウムガリウムヒ素リンをアルミナを介してシリコン上に貼り合わせた構造を実現することで (図 4)、インジウムガリウムヒ素リン中の電子のみを用いて光変調することが可能になりました。これにより、従来のシリコン光変調器と比較して、損失を 10 分の 1 に低減しつつ、5 倍の変調効率を実証することに成功しました。変調効率の改善と損失の大幅な低減により、光変調振幅 (注 8) が 10 倍以上改善し、多値変調による 100 ギガビット/秒の変調速度においても良好な光信号が得られることを明らかにしました (図 5)。本成果は、光の位相を高効率かつ低損失に制御する新しいフロンティアを提供するものと言えます。

<社会的意義・今後の予定>

今回の成果はシリコン光集積回路中での光変調器の特性を大幅に改善するものであり、これにより次世代データセンターの高性能化・省電力化につながると期待されます。また大規模集積回路への内蔵も可能であることから、インターフェースの光化に加えて、回路内配線の光化により、大規模集積回路の大幅な性能向上が期待されます。

今回の成果は、光の位相を高効率かつ低損失に変調する新たな手段を与えるものであり、光変調器への応用のみならず、次世代光ネットワークで必須となる光スイッチや自動運転車で必要になるレーザースキャナなどの光ビーム制御技術、全光深層学習処理を通じた人工知能チップなど幅広い分野への応用が期待されます。

5. 発表雑誌：

雑誌名：英国科学雑誌「Nature Photonics」（オンライン版：7月24日）

論文タイトル：Efficient low-loss InGaAsP/Si hybrid MOS optical modulator

著者：Jae-Hoon Han*, Frederic Boeuf, Junichi Fujikata, Shigeki Takahashi, Shinichi Takagi, and Mitsuru Takenaka*

DOI 番号：10.1038/nphoton.2017.122

6. 問い合わせ先：

東京大学 大学院工学系研究科 電気系工学専攻
准教授 竹中 充（たけなか みつる）

7. 用語解説：

注1) 光導波路

光を導くためのガイド。光にとっての配線に相当するもの。光が屈折率の高い部分に集まる性質を利用して、屈折率の高い部分を配線に加工したもの。半導体や誘電体を使って作製することができる。

注2) 光変調器

入力された電気信号を光の信号に載せ換える素子。電気信号によって光が感じる屈折率を変化させることで、デジタル電気信号をデジタル光信号に変換する。

注3) IoT (Internet of Things)

モノのインターネットと呼ばれ、あらゆるものに通信機能を付与してインターネットに接続することで、種々の情報の収集や相互制御などを実現する仕組み。

注4) 大規模集積回路

シリコン基板上に無数のトランジスタを集積した大規模な電子回路。コンピューターやスマートフォンなどの頭脳となるチップや IT 機器の制御用チップなど、あらゆる電子機器に広く使用されている根幹技術。LSI とも呼ぶ。

注5) シリコンフォトニクス

従来、大規模集積回路などの電子機器に使われてきた半導体であるシリコンを用いて、光通信機能を実現する素子を作製する技術。大規模集積回路で培われた高度な製造技術を転用可能であり、大規模集積回路中に光通信機能を組み込むことが可能となることから、世界中で活発に研究開発が進められている。

注6) 光の位相

光の波が一周期内のどのタイミングにいるかを示す量。

注7) SOI (Si on Insulator) 基板

上部シリコン層とシリコン基板との間に絶縁膜となる酸化ケイ素が挿入された特殊なシリコン基板。シリコン基板と電氣的に絶縁されることから、高速かつ低消費電力な大規模集積回路向けに使

用されている。また上部シリコン層に強く光を閉じ込めることが可能であり、シリコンフォトニクス用途で用いられている。

注 7) 光変調振幅

デジタル光変調信号の論理レベル“1”の平均エネルギーと論理レベル“0”の平均エネルギーの差。光変調信号品質を表す。

8. 添付資料 :

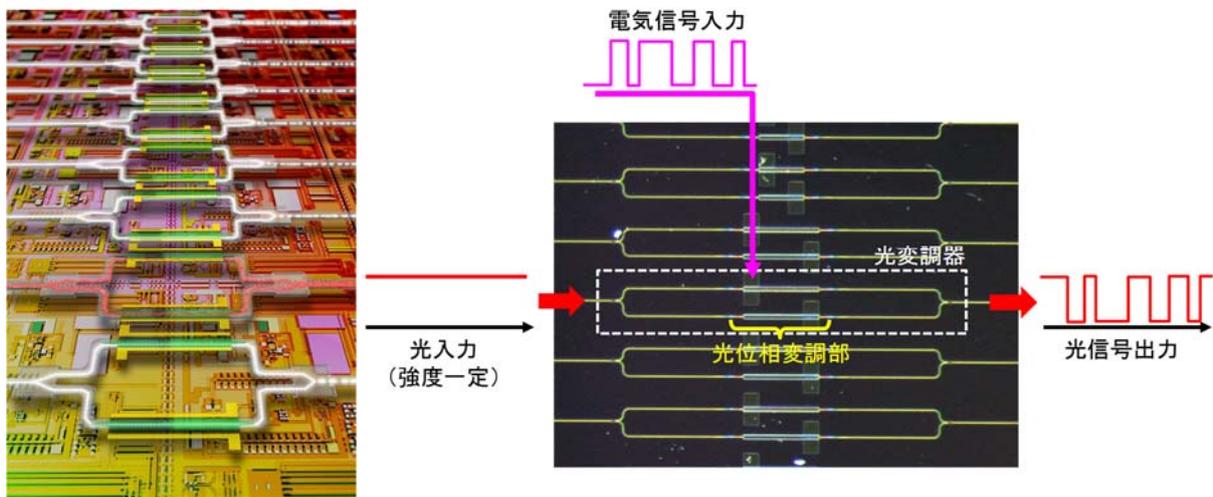


図1 本成果で実証した光変調器チップのイメージ図および顕微鏡写真

シリコン光導波路で形成された干渉計の光位相変調部に化合物半導体の一種であるインジウムガリウムヒ素リンが貼り合わされています。光位相変調部に変調された電気信号を入力すると、変調された光信号が出力されます。

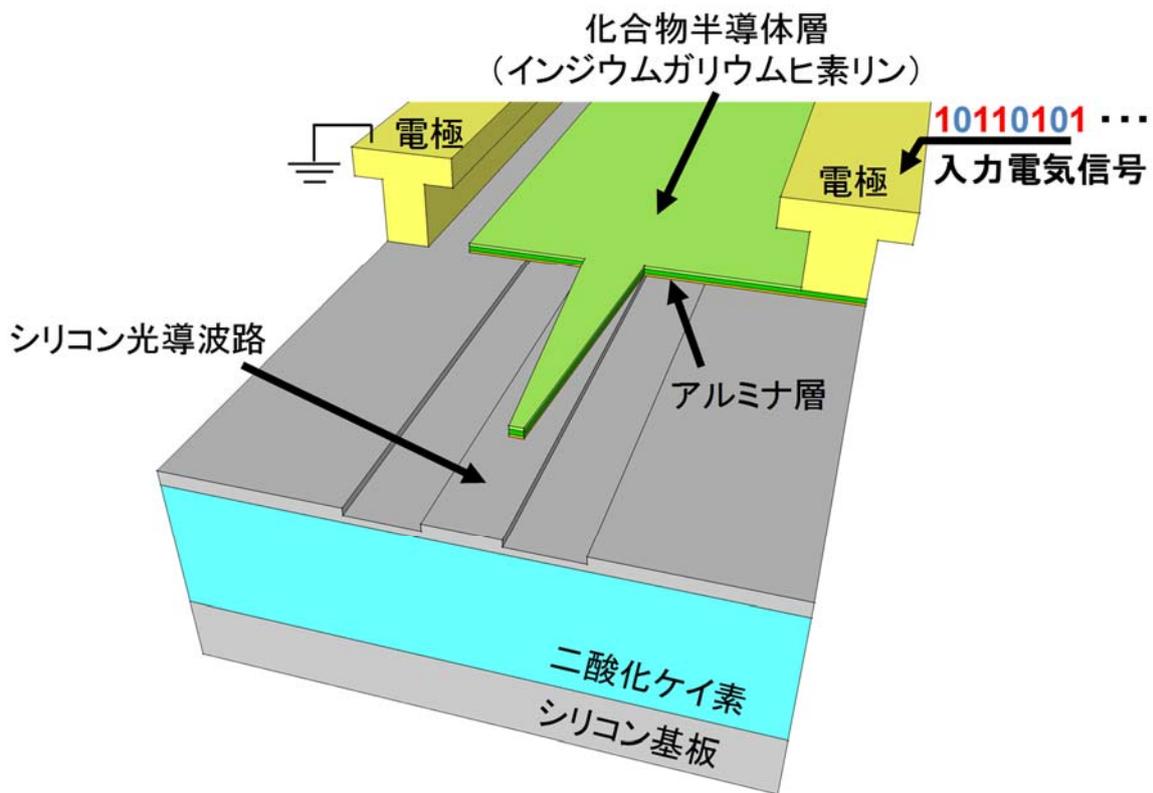


図2 本成果で実証した光変調器の光位相変調部の素子構造図

二酸化ケイ素上にシリコン層が形成された SOI (Si on Insulator) 基板上に作製されたシリコン光導波路上に、ゲート絶縁膜となるアルミナ (Al_2O_3) を介して薄膜インジウムガリウムヒ素リンが貼り合わされた構造となっています。シリコン層とインジウムガリウムヒ素リン層の間に電圧を印加することで光の位相を変調することができます。

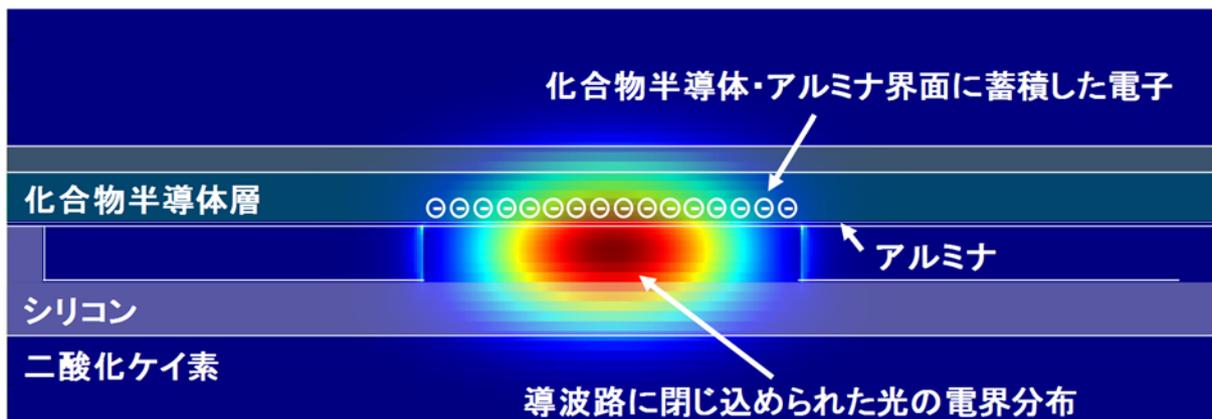
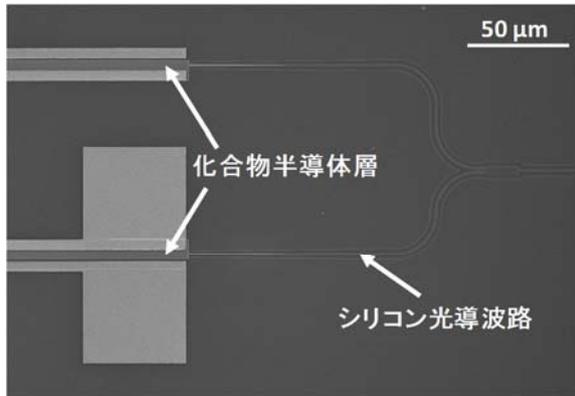
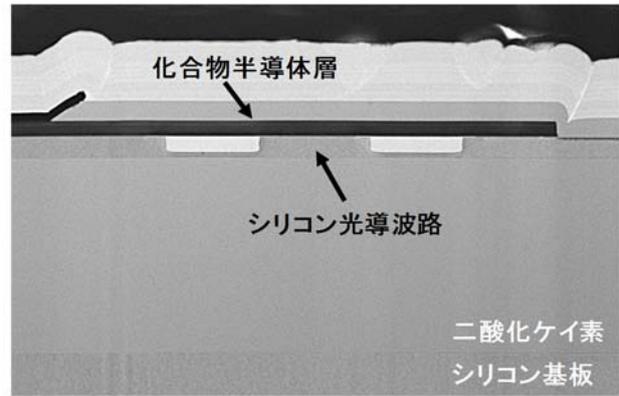


図3 光位相変調部の断面構造図および導波路に閉じ込められた光の電界分布

凸状に加工されたシリコンとインジウムガリウムヒ素リン層により近赤外光を閉じ込めることができます。シリコン層とインジウムガリウムヒ素リン層の間に電圧を印加すると、インジウムガリウムヒ素リンとアルミナの界面に電子が蓄積し、界面近傍の屈折率が減少することで閉じ込められた光の位相が変調され、電気信号を光信号に変換することができます。



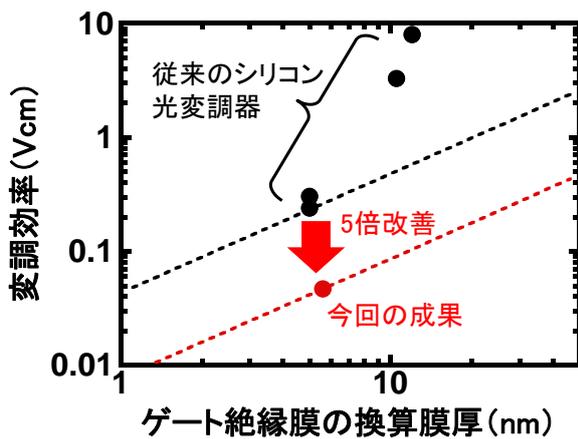
(a) 作製した光変調器の
上部電子顕微鏡写真



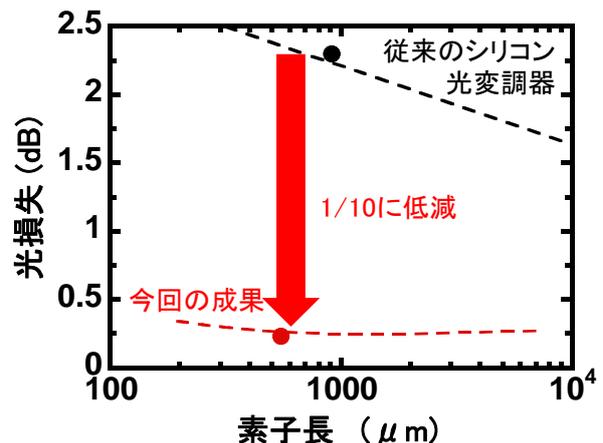
(b) 作製した光変調器の断面透過
電子顕微鏡像

図4 作製した光変調器の電子顕微鏡像

アルミナを介したウェハボンディングにより、薄膜インジウムガリウムヒ素リン層がシリコン導波路上に良好に貼り合わせることに成功しました。



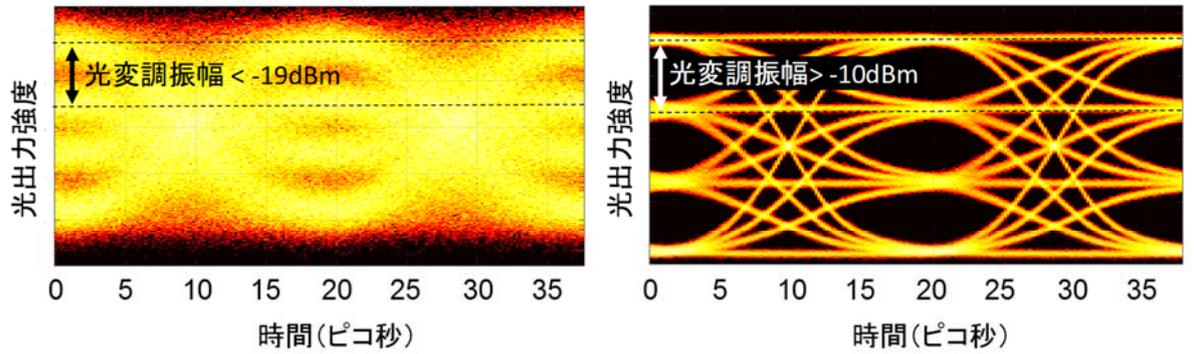
(a) 変調効率の比較結果



(b) 光損失の比較結果

図5 作製した光変調器特性

(a) インジウムガリウムヒ素リン層中の電子誘起屈折率変化により、従来のシリコン光変調器よりも変調効率が5倍程度改善しました。(b) インジウムガリウムヒ素リン層中の電子起因の光吸収が小さいため、光損失は従来のシリコン光変調器の10分の1に低減しました。



(a) 従来のシリコン光変調器の100ギガビット/秒・多値変調光出力パターン

(b) 今回の成果で得られた光変調器の100ギガビット/秒・多値変調光出力パターン

図6 100ギガビット/秒・多値変調時の光変調出力パターン比較

従来のシリコン光変調器 (a) と比較して今回実証した光変調器 (b) では、光変調振幅が10倍以上改善し、100ギガビット/秒・多値変調時においても明瞭な光信号出力が得られることが分かりました。