

歪を加えて光信号への変換効果を増大
～シリコン・ゲルマニウムを用いた低消費電力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）

高木信一（東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻 教授）

2. 発表のポイント：

- 歪を加えたシリコン・ゲルマニウムを用いて、従来のシリコンよりも効率的に電気信号を光信号に変換できる低消費電力な光変調器（注1）の開発に成功。
- 歪を加えたシリコン・ゲルマニウムは、光ファイバー通信で用いられる近赤外光に対して、屈折率や吸収率が効率的に変換できることを世界で初めて実証。
- 低消費電力かつ小型な光集積回路を大規模集積回路に内蔵できるようになり、IT機器の大幅な省電力化や高性能化、オンチップ光配線を用いたスーパーコンピューターチップなどの実現に道を拓く。

3. 発表概要：

東京大学の竹中 充 准教授らは住友化学株式会社との共同研究により、歪を加えたシリコン・ゲルマニウム（SiGe、歪シリコン・ゲルマニウム）結晶中において、電子や電子が抜けることにより正の電荷をもった正孔により誘起される屈折率や吸収率の変化が増大することを、世界で初めて実証しました。これにより、光ファイバー通信で用いられる近赤外光で動作し、電気信号を光信号に変換できる低消費電力な光変調器の開発に成功しました。

ビッグデータの出現による情報量の増大により、膨大な情報処理や通信が求められるIT機器の消費エネルギーは増加の一途であり、世界的な課題となっています。このため低消費電力かつ高速な光通信機能を大規模集積回路（注2）内に組み込みシリコンフォトニクス（注3）の研究が世界的な規模で進められています。しかし大規模集積回路で使われているシリコンでは十分に高性能な光通信機能を実現することが難しく、低消費電力かつ小型な光通信機能を大規模集積回路上に実現することが急務となっています。

本研究グループは、シリコン（Si）基板上に歪シリコン・ゲルマニウム結晶を成長させて、従来のシリコンを用いた光変調器よりも高性能かつ低消費電力な光変調器の開発に成功しました（図1、2）。開発の決め手となったのは、シリコン・ゲルマニウムに歪を加えることで、光変調器を実現する上で必要となる屈折率や吸収率の変化が大きくなることを、世界で初めて実証したことです。これにより、シリコンよりも効率的に電気信号を光信号に変換することが可能になりました。

歪を加えることによる高性能化が実証されたことで、今後、より大きな歪をシリコン・ゲルマニウムに加えることで更なる高性能化、低消費電力化、小型化が期待されます。今回実現したシリコン・ゲルマニウム光変調器は、既存の大規模集積回路向け半導体工場で作製が可能であり、低消費電力かつ小型な光集積回路を大規模集積回路に内蔵できるようになります。これによりIT機器の省電力化、高性能化だけでなく、将来的には大規模集積回路上の配線を光化したワンチップスーパーコンピューターなどの実現に道を拓くものと期待されます。

本成果は、英国科学雑誌「Scientific Reports」2014年4月15日（火）（英国時間）オンライン版にて公開されます。

本研究は、総務省における戦略的情報通信研究開発推進事業（SCOPE）「100Gbit/s 超級歪 SiGe 光変調器の研究開発」より、一部支援を受けて行われました。

4. 発表内容：

<研究の背景>

スマートフォンの爆発的な普及やそれに伴うビッグデータの登場により、IT 機器が消費する電力は増加の一途をたどっています。特に膨大な情報を IT 機器間や機器内でやりとりするため、指数関数的に通信容量が増加しており、通信機器の省電力化や小型化が極めて重要です。このため、大規模集積回路に光通信機能を内蔵するためのシリコンフォトニクス技術が急速に立ち上がろうとしています。しかし、シリコンは各種光通信機能を実現するには不向きな半導体材料であることが課題となっています。特に、電気信号を光信号に変換する機能を持つ光変調器においては、電気信号により効率的に屈折率や吸収率を変換することが必要となります。しかし、シリコン中ではこのような効果があり大きくなく、光変調器の小型化や省電力化が難しく、この課題の解決が急務です。

これまで化合物半導体と組み合わせた光変調器の報告例があるものの、既存の大規模集積回路用半導体工場で作製が可能な低消費電力かつ小型な光変調器を実現する技術開発が待たれていました。

<研究内容>

本研究グループは、シリコン上に、歪を加えたシリコン・ゲルマニウム（歪シリコン・ゲルマニウム）結晶を成長させ、光導波路（注 4）を作製することで、既存のシリコンを用いる場合よりも効率が高く、低消費電力な光変調器の開発に成功しました（図 1 a, b）。開発に成功した素子は、二酸化ケイ素（SiO₂）上にシリコン層が形成された SOI（Si on Insulator）基板（注 5）上に歪シリコン・ゲルマニウム層を成長させた構造です。歪シリコン・ゲルマニウムを含む層を凸状に加工することで、歪シリコン・ゲルマニウム層に近赤外光が閉じ込められる光導波路として機能します。光導波路の幅は 600 nm（ナノメートル）であり、強く光を閉じ込めることができる構造です。光導波路の両脇部分に P 型シリコンと N 型シリコンを使ったダイオードが形成されており、このダイオードを通じて光導波路部分に電流を注入することができます。電流を注入することで、光導波路内に電子や正孔が蓄積されると、光が感じる屈折率や吸収率が変化し、電気信号を光信号に変換することができます。実際に作製した歪シリコン・ゲルマニウム光変調器（図 2 a）に電流を注入して、吸収率の変化を測定したところ、既存のシリコン光変調器よりも、同じ電流量でより大きな吸収の変化が得られました（図 2 b）。100 倍の吸収変化を得るための電流量は歪シリコン・ゲルマニウム光変調器において、既存のシリコン光変調器の半分程度でした。歪シリコン・ゲルマニウム光変調器の駆動に必要な電圧も同時に小さくなることから、既存の光変調器と比べて消費電力量を約 3 分の 1 にまで削減することに成功しました（図 2 c）。

今回の開発の決め手は、光通信で広く用いられている近赤外光に対して、シリコン・ゲルマニウム結晶に歪を加えることで、電子や正孔による屈折率変化や吸収率変化が増大することを、世界で初めて実証したことです。シリコン・ゲルマニウムに歪を加えることで、半導体中のバンド構造が変調され、正孔の有効質量が軽くなります。有効質量が軽くなることで、正孔が光に及ぼす影響が大きくなり、より大きな屈折率変化や吸収率変化が起きます。このような現象が近赤外光に対しても起こりうることは理論的には提唱されていましたが、実用的な光変調器構造において実証されたのは世界で初めてです。

シリコン・ゲルマニウムは既に大規模集積回路の中でトランジスタの一部として広く利用されています。このため、今回開発した歪シリコン・ゲルマニウム光変調器は、大規模集積回路を製造している既存の半導体工場で容易に製造することができます。この点においても、今回の開発成果は極めて実用的であり有用な技術です。

<社会的意義・今後の展開>

今回の成果を通じて、歪を加えることでシリコン材料を母体とする光変調器の性能が向上可能であることが実験的に示されました。前述のようにシリコン・ゲルマニウムは既存の半導体工場で容易に製造可能であることから、既存のシリコン光変調器をすべてシリコン・ゲルマニウム光変調器に置き換えることもそれほど難しくはありません。今回の原理を適用することで、大規模集積回路に低消費電力かつ小型な光集積回路を組み込むことが可能となります。これによりインターネット通信やデータセンター内における IT 機器の消費電力を大幅に削減することができるようになる可能性が高まります。また、将来的には大規模集積回路内の配線を光配線により置き換えることも現実味をおび、現在のスーパーコンピューターを1つのチップ上で実現した光配線スーパーコンピューターチップの実現も期待されます。つまり、本研究の成果は高度情報化社会と省エネルギー社会を両立する基盤技術となりえるものです。

今後の課題は、より大きな歪を加えることで、さらに高い光変調効果を実現することです。歪は、シリコン・ゲルマニウム中に含まれるゲルマニウムの割合を増やすことで大きくなることから、光変調器を一層高性能化、省電力化、小型化することを目指します。

5. 発表雑誌：

雑誌名：英国科学雑誌「Scientific Reports」（2014年4月15日（火）（英国時間）オンライン版）

論文タイトル：Strain-induced enhancement of plasma dispersion effect and free-carrier absorption in SiGe optical modulators

著者：Younghyun Kim, Mitsuru Takenaka, Takenori Osada, Masahiko Hata and Shinichi Takagi

DOI 番号：10.1038/srep04683

6. 問い合わせ先：

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

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 工学部 10 号館 490 号室

URL: <http://mosfet.k.u-tokyo.ac.jp>

7. 用語解説：

注1) 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、光が感じる屈折率や吸収率が変化することで、光のオン・オフの強弱信号などに電気信号を変換する。

注2) 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。

注3) 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、現在世界中で活発に研究開発が進められている。

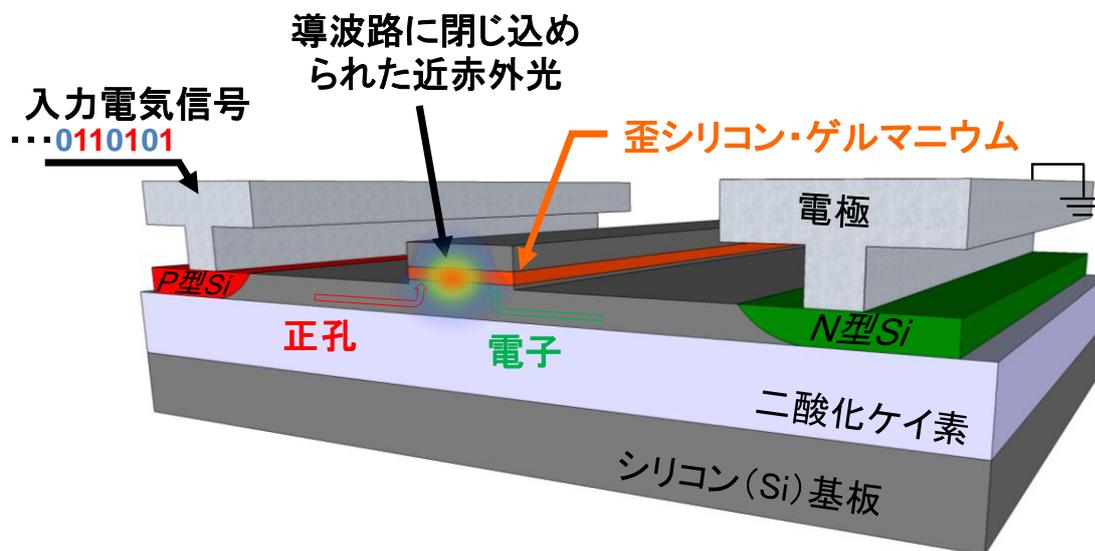
注4) 光導波路

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上に加工したもの。半導体や誘電体を使って作製することができる。

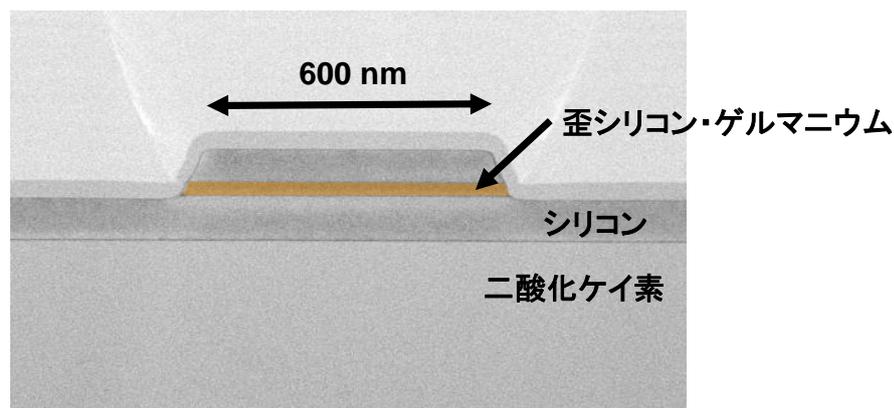
注5) SOI (Si on Insulator) 基板

素子が作製される上部シリコン層とシリコン基板との間に絶縁膜となる二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、シリコンフォトクス用途で多用されている。

<参考図>



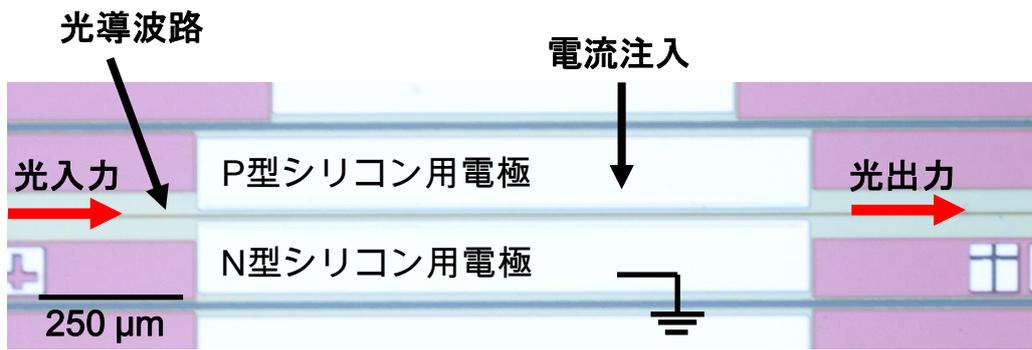
(a) 歪シリコン・ゲルマニウム光変調器の素子構造図



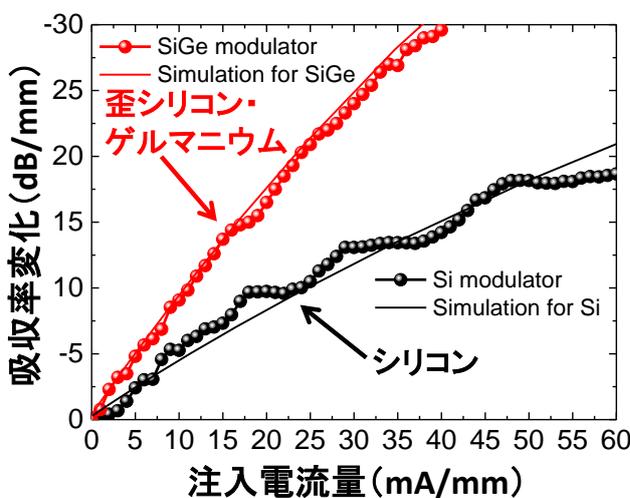
(b) 歪シリコン・ゲルマニウム光変調器の導波路部分の断面透過電子顕微鏡像

図1 世界初となる歪シリコン・ゲルマニウム光変調器

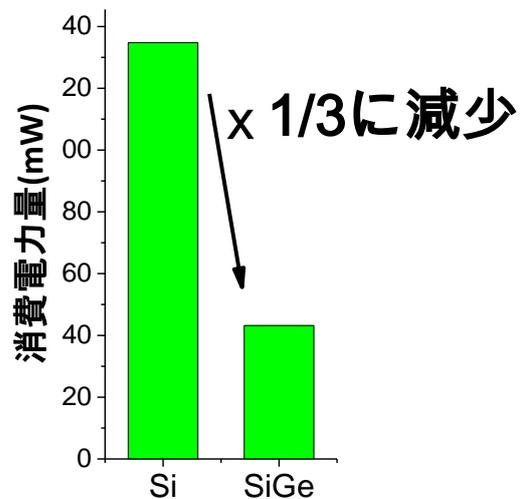
(a) 歪シリコン・ゲルマニウム光変調器の素子構造。シリコン基板上に歪を加えたシリコン・ゲルマニウムの結晶を成長させて、光導波路とすることで高効率かつ低消費電力な光変調器を実現できる。(b) 歪シリコン・ゲルマニウム光変調器の断面透過電子顕微鏡像。既存の大規模集積回路向け半導体工場で製造可能であり、大規模集積回路に低消費電力で小型な光通信機能を内蔵できる。



(a) 作製した歪シリコン・ゲルマニウム光変調器の上部写真



(b) 注入電流量に対する吸収率変化



(c) 消費電力量

図2 歪シリコン・ゲルマニウム光変調器の上部写真および諸特性

(a) 歪シリコン・ゲルマニウムを導波路とすることで光変調器を作製することができる。
 (b) 既存のシリコン光変調器と比較して、同じ電流量でより大きな吸収率の変化が得られる。歪シリコン・ゲルマニウム光変調器では、既存のシリコン光変調器の 100 倍の吸収率の変化を得るために必要な電流は約半分となる。(c) 歪シリコン・ゲルマニウム光変調器では、駆動する電圧も小さくなることから、既存のシリコン光変調器の駆動に要した消費電力を約 3 分の 1 に減らせる。