

氏名	種村拓夫
所属機関	東京大学
研究題目	透明導電性酸化物を用いた超小型光変調器の創製

1. 研究の目的

半導体チップ上にレーザ光源、光変調器、受光素子などの種々の機能光素子を搭載した「光集積デバイス」は、現代の情報化社会を支える要素技術である。従来、これらの光技術は、長距離光通信用途に開発が進められてきた経緯があるが、近年では、データセンターやサーバー間ネットワークなど、より短距離のデータ転送においても光が用いられるようになり、光集積デバイスの小型化と省電力化が求められている。特に、シリコン CMOS 電子回路と集積した光変調器は、低コストに光インターコネクトを実現する技術として近年活発に研究開発が行われている。

現在用いられている光集積デバイスは、半導体や誘電体など「誘電率が正の材料」の屈折率差を利用することで、光を導波路内に閉じ込めて制御している。その結果、光の回折限界により、導波路の大きさは波長以上にすることが必要である。一方、金属や透明導電性酸化物(TCO: transparent conductive oxide)に代表される「誘電率の実部が負の材料」を用いると、原理的に回折限界以下の領域に光を閉じ込めることができるため、超小型かつ低消費電力の究極的な光集積デバイスの実現が可能になる。

以上の背景を踏まえて、本研究では、成膜条件によって広い範囲で人為的に誘電率を制御できる TCO に注目し、このような新規材料を用いた新しい光変調器を開拓することを目的とした。特に、将来の光インターコネクトにおいて必要となる、 μm オーダーの超小型光変調器の実現可能性を実証することを目指した。

2. 研究の内容(手法、経過、評価など)

まず、TCO 材料として最も代表的な酸化インジウムスズ(ITO: indium tin oxide)に注目し、誘電率の制御性を実験的に検証した。RF スパッタ法により ITO 膜を成膜し、スパッタターゲットのスズ組成、スパッタ時の酸素流量、ポストアニール温度など、様々な条件に対して ITO 膜の誘電率がどのように変化するかを調べた。一例として、図1に、アニール温度を変化させたときの屈折率と吸収率の測定結果を示す。アニール温度を適切に調節することで、広い範囲で人為的に誘電率(屈折率の二乗)を制御できることを明らかにした。

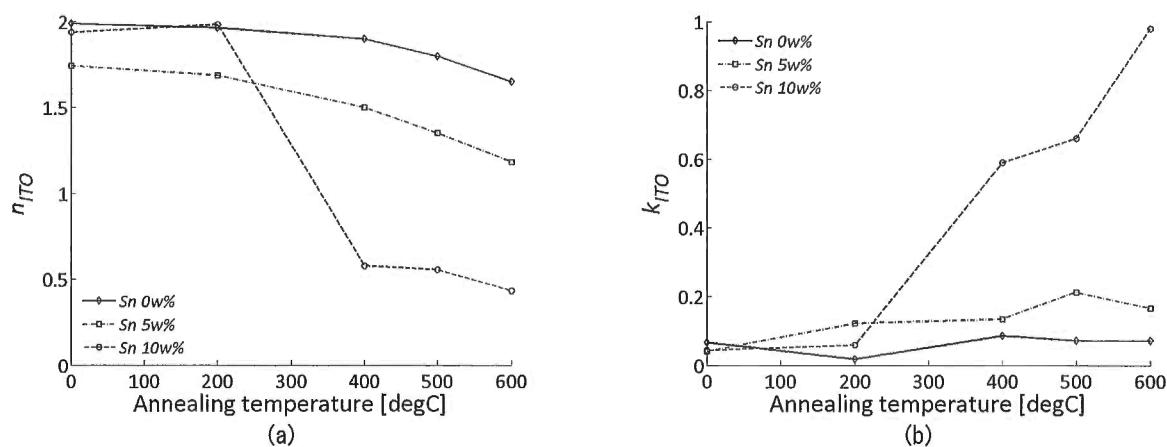


図1. アニール温度に対する ITO 膜の屈折率(a)と吸収率(b)の変化。スズ組成とアニール温度を調節することで、広い範囲で人為的に誘電率を制御することができる。

2. 研究の内容(続き)(書ききれない場合には、同一形態のページを追加しても結構です)

以上の予備実験結果を基に、最適な光変調器構造の設計を行った。図2に、本研究において新たに提案した光変調器の概形を示す。従来手法と異なり、2種類の異なるキャリア濃度を持つTCO層を積層して用いることで、過剰な光損失を抑えながら効率良く光変調を行う工夫がなされている。電極間に電圧を加えることで、TCO層の酸化膜界面にキャリアが蓄積し、誘電率が零に近づく(いわゆる、イプシロンニアゼロ材料になる)。その結果、伝搬光がTCO層に強く閉じ込められて吸収され、非常に効率良く強度変調を行うことができる。前述したように、2種類のTCO膜は、成膜条件を制御することで人為的に調整することが可能である。

TCOとしてITO膜を用いた場合について、必要な変調器長と光損失を計算した結果を図3に示す。ITO膜のキャリア密度を適切に選ぶことで、変調器長を1 μm 以下まで短縮できることが分かる。実際、変調器長を1 μm とした場合、3次元有限差分時間領域(FDTD)法により光の伝搬を計算した結果を図4に示す。電圧印加時に光強度が大きく減衰し、効率良く変調されていることが確認された。光損失は2.1 dB、消光比は3.2 dBであり、印加電圧と消費電力は、それぞれ1.3 V、22.3 fJ/bitと見積もられた。また、変調帯域は、40 GHz以上と見積もられ、将来の超低消費電力かつ高速な光インターコネク用光変調器として有望な技術であることが実証された。

本成果は、国内学会発表(2件)、および、査読付き国際会議発表(1件)を通じて大いなる注目を集めた。現在、本成果をまとめて国際学術論文誌への投稿を進めているところである。

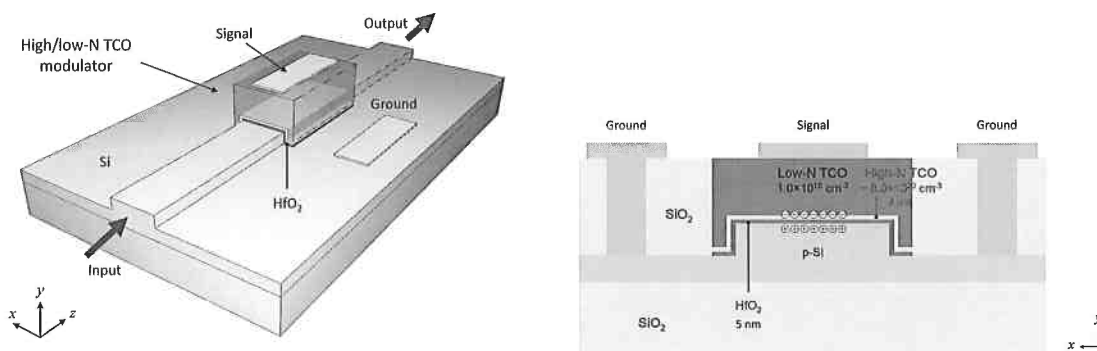


図2. 新たに提案した光変調器の概形。2種類のキャリア濃度を持つTCO層を用いることで、光損失を抑えながら効率良く変調を行う。

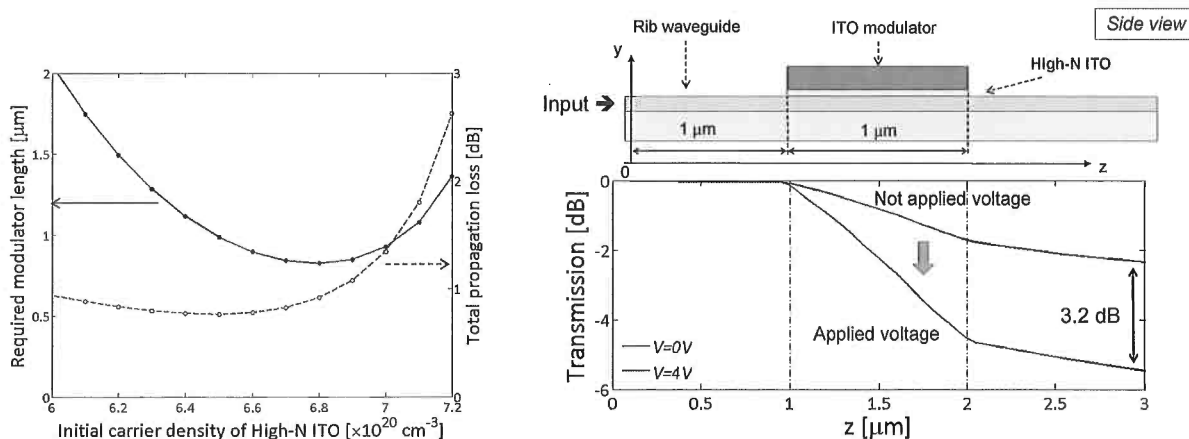


図3. 変調器長と光損失の計算結果。

図4. 3次元FDTD計算結果。僅か1 μm 長の変調器で十分な変調が得られている。

3. 研究の結論、今後の課題

本研究では、TCO 材料のキャリアプラズマ効果を利用した高効率な光変調器の開拓に取り組み、2 層の異なる TCO 層を用いることで、非常に効率良く強度変調が得られることを実証した。特に、酸化膜界面の TCO 層のキャリア密度を大きくし、電圧印加時に誘電率の絶対値を零に近づけた、いわゆるイプシロンニアゼロ材料として用いることは、本提案の独想的な点である。

本研究で提案した新規光変調器の従来技術に対する位置づけを図5に示す。従来材料を用いた光変調器は、デバイス長と光損失に明確なトレードオフがあったが、本研究で数値的に実証した新型光変調器は、小型化と低損失化を同時に達成できるという特徴がある。特に 1 μm 以下の長さの光変調器は前例がなく、インパクトが大きい。また、一般に TCO 材料はスパッタ法等により、どのような基板にも簡単に成膜できるため、シリコン CMOS 回路との一体集積の可能性も考えられる。将来の光インターコネクで用いられる低コストかつ超小型な光送信回路への応用が期待される。

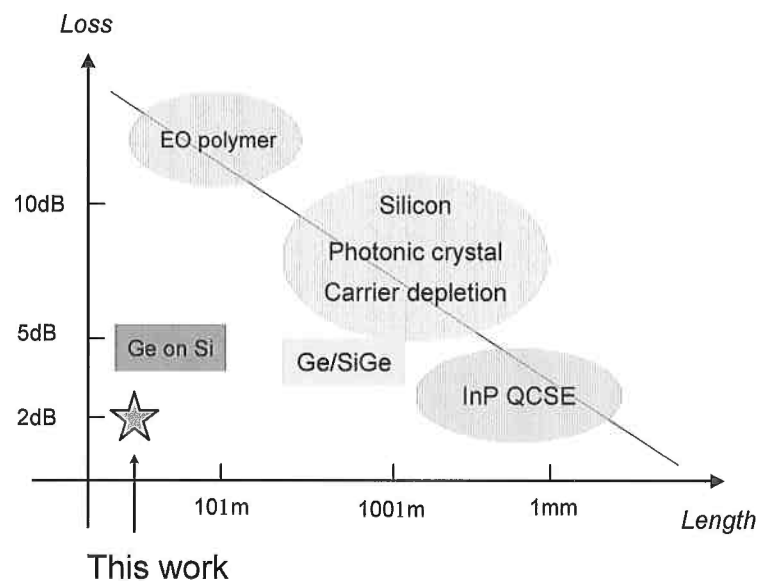


図5. 従来材料を用いた光変調器に対する本研究の位置付け。

今後の課題としては、素子の作製と実証が挙げられる。本研究期間内に TCO の成膜プロセスと誘電率の制御性を実験的に実証したものの、図1に示す光変調器の作製にあたっては、シリコンリブ導波路と集積する必要があり、細かい最適化が不可欠である。特に、上部 TCO 膜上の電極において低抵抗オーミック接続を得る必要があり、試行錯誤が必要となる。一方、素子の実証に関しても、困難が予想される。特に、40 Gb/s 以上の高速変調動作を実証する上では、電極構造の最適化と寄生容量の低減が不可欠となる。また、シリコンスラブ領域のドーピングプロファイルや電極間距離など、パラメータを細かく調節することで、全体の抵抗を削減する必要がある。

以上のように、本技術の実用化に向けて残された課題は少なくない。しかしその一方で、上記の大半は、シリコンフォトニクス素子の開発において直面する共通の課題である。シリコンフォトニクス技術に関しては、近年進展が目覚ましく、数年前から世界各地でファウンドリサービスが開始している。このようなファウンドリサービスを上手に活用して共通技術は外注することで、比較的容易に上記課題は解決できると期待している。

4. 成果の価値(とくに判りやすく書いて下さい)

4. 1. 社会的価値

本研究により、従来手法に比べて占有面積と消費電力が2桁以上小さく、シリコンチップ上に簡単に実装できる超小型光変調器の実現可能性が示された。本素子の実現すれば、光エレクトロニクスのパラダイムシフトとなり、光通信、光センシング、光スキャナをはじめとした広範な応用が期待される。中でも、直接的な波及効果として期待されるのが、LSIチップ間/チップ内光配線への応用である。データ転送に電気配線を用いる既存手法は、消費電力と配線密度の観点から限界を迎えつつあるが、本研究によって超小型光送信器が実現すれば、この電気配線ボトルネックの解消に向けた一里塚となる。ルータやサーバーを初めとし、多くの電子機器の省エネに繋がると期待される。

4. 2. 学術的価値

本研究により、光変調器の新しい可能性を切り拓いた点において学術的な価値がある。光変調器は、1970年代に始まった光通信技術の発展とともに進化を遂げてきたが、「誘電体や半導体からなる光導波路に光を閉じ込めて制御する」という基本的な原理は変わっていない。この原理に基づいてスケールリングを進める限り、光の回折限界以下の小さな変調器を作ることは不可能である。本研究は、透明導電性酸化物という誘電率の実部が負となる材料を用い、新たな自由度を導入することでこの物理限界を打破したものであり、学術的な新規性は少なくないと考えている。

4. 3. 成果論文(本研究で得られた論文等を年代順に書いて下さい。未発表のものは公表予定を書いて下さい)

- 綾田雅文, 種村拓夫, 中野義昭, "イプシロンニアゼロ材料を用いたシリコンリブ導波路変調器の解析," 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, 2014年4月.
- 綾田雅文, 種村拓夫, 中野義昭, "高キャリア密度ITO層を用いたシリコンリブ導波路変調器の解析," 2014年応用物理学会秋季大会, 18a-C6-6, 北海道大学, 2014年9月18日.
- M. Ayata, T. Tanemura, and Y. Nakano, "Compact silicon rib-waveguide electro-absorption modulator using multiple indium-tin-oxide layers," *12th Int. Conf. on Group IV Photonics*, WP16, Vancouver, Canada, Aug. 26, 2015.
- M. Ayata, Y. Nakano, and T. Tanemura, "Silicon rib-waveguide electro-absorption optical modulator using transparent conductive oxide bilayer," *Jap. J. Appl. Phys.*, 投稿準備中.