

令和元年6月13日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K04955

研究課題名(和文) 金属 絶縁体転移を利用した光スイッチ機能の創出

研究課題名(英文) Development of optical switch using a metal-insulator transition

研究代表者

渋谷 圭介 (SHIBUYA, KEISUKE)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員

研究者番号：00564949

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：光スイッチの小型化を目指し、金属 絶縁体転移を示す二酸化バナジウムをシリコン導波路に組み込んだ光デバイスを作製した。初めに、有限要素法による光伝搬シミュレーションを行い、設計したデバイス構造が光スイッチ機能を示すことを確認した。次に、実際に作製したデバイスが二酸化バナジウムの相転移に伴う屈折率の巨大な変化によって30dB以上の良好な消光比を示すことを実証した。得られたデバイス特性はシミュレーション結果と良い一致を示した。また、光スイッチの動作速度が数十nsに達することを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

既存のシリコン導波路型光スイッチでは、内部に干渉計や共振器の構造を作り込む必要があり、デバイスサイズは小さくとも数十マイクロメートルとなる。これは、外的刺激に対するシリコンの屈折率変化が微小であるためである。この問題を解決するためには、屈折率変化が巨大な材料を持ち込む必要がある。しかしながら、半導体以外の材料をシリコン導波路と組み合わせようとする研究事例は多くない。本研究では、二酸化バナジウムをシリコン導波路のクラッドに利用することを試みた。これにより光スイッチの高密度化を達成しており、本成果は光通信技術の発展に貢献するものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：An optical switch has been developed combining vanadium dioxide exhibiting a metal-insulator transition with a silicon waveguide for miniaturizing optical switches. At first, the light propagation simulation by the finite element method was performed, and it was confirmed that the designed device exhibits an optical switch function. It has been demonstrated that the fabricated device exhibits a good extinction ratio of over 30 dB due to the huge change in refractive index induced by the phase transition of vanadium dioxide. The obtained device property showed a good agreement with the result of the simulation. It was confirmed that the operating speed of the optical switch reached several tens of ns.

研究分野：機能性酸化物

キーワード：二酸化バナジウム 金属絶縁体転移 シリコン導波路 光スイッチ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高度情報化社会の進展により通信機器の消費電力が増加の一途を辿っており、今後も IT 機器やネットワークシステムの消費電力量が大幅に増加することが懸念されている。昨今の発電コストの急増・温室効果ガス排出削減の必要性といった国内外の情勢を踏まえると、ネットワーク機器の更なる省エネルギー化は喫緊の課題であると言える。この課題を解決するため、オール光通信技術への転換が提案されている。従来の電気スイッチによるネットワーク方式では、情報処理量に比例して消費電力も増加してしまう。これを光信号のまま通信処理することで、大幅な低消費電力化が見込まれる。オール光通信技術の確立には、高性能な光スイッチの開発が必要不可欠である。ネットワーク機器において、既存の電気スイッチの代替として光スイッチを利用するには、光スイッチの省エネルギー化・高密度化・高速化が求められる。しかしながら、従来の光スイッチでは、マイクロメートルスケールの微細化を達成することは困難である。これは、既存のフォトリソ材料の屈折率変化が温度・電場・圧力などの外的刺激に対して非常に微小であるためである。そこで、光スイッチに新規機能性材料を利用する研究の進展が期待されているという状況にあった。

2. 研究の目的

本研究では、光スイッチの省エネルギー化・小型化を目標とし、金属絶縁体転移を示す材料をシリコン導波路に組み込んだ新規光スイッチの開発を行った。具体的には、シリコン導波路のクラッド(シリコンコアを覆う材料)の一部に、二酸化バナジウム(VO_2)を導入する。 VO_2 は、室温付近約 70 で結晶構造変化を伴って金属絶縁体転移を示す材料である。シリコン導波路では、シリコンよりも屈折率の小さい材料(通常は SiO_2)をクラッドに用いることで光を閉じ込めている。本研究では、このクラッドに屈折率の変調材料である VO_2 を使用し、光伝搬を制御する。実際には、 VO_2 のみでは光の閉じ込めは不十分であるので、 VO_2 をさらに SiO_2 で覆った構造を採用する。金属絶縁体転移を引き起こして VO_2 の屈折率を変化させることで、光スイッチとしての機能が期待できる。本研究では、光スイッチの動作実証を行い、その特性や動作速度の議論を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、(1)シリコン導波路上に VO_2 層を堆積させて光スイッチを作製した。(2)作製したデバイスの構造をラマン散乱分光法、走査イオン顕微鏡(SIM)、透過電子顕微鏡(TEM)により評価した。(3)実デバイスのパラメータを用いて光伝搬シミュレーションを実施した。また、 VO_2 層の膜厚の最適化を行った。(4)作製した光スイッチの特性を評価した。デバイス温度を変化させることで VO_2 の金属絶縁体転移を引き起こし、相転移前後の光スイッチ機能を確認した。さらに、(5)光スイッチの動作速度の評価を行った。

4. 研究成果

(1)光スイッチの作製

Silicon on Insulator(SOI)ウェハからフォトリソグラフィと反応性イオンエッチングによりシリコンコア(幅: 400 nm、高さ: 220 nm)を形成した後、化学気相成長(CVD)法により SiO_2 ($\sim 2 \mu\text{m}$)を堆積させ、シリコン導波路を作製した。その後、ウェットエッチングにより開口部の SiO_2 を除去した。開口長は 3-8 μm である。次に、パルスレーザー堆積(PLD)法により多結晶 VO_2 層($\sim 30 \text{ nm}$)を開口部に堆積した。最後に、開口部の VO_2 層上に SiO_2 ($\sim 1 \mu\text{m}$)をスパッタリング法により堆積した。作製したデバイスの開口部の概略図を図 1 に示す。開口部以外では、シリコンコアは 2 μm 厚の SiO_2 に覆われており、 VO_2 層に接していない。このため、シリコンコアを伝搬する光は開口部以外では VO_2 層の影響を受けない。

(2)光スイッチの構造評価

VO_2 は少量の水素ドーピングや酸素欠損により、室温においても金属化することが知られている。 SiO_2 下に埋め込んだ VO_2 層が、上記の影響を受けずに金属絶縁体転移を示すことを確認するため、デバイス構造作製後に VO_2 のラマン散乱分光を測定した。その結果、室温付近では絶縁体相、80 では金属相であることが明らかとなった。これは VO_2 がデバイス構造内でも金属絶縁体転移を示す特性を保持することを意味する。また、光ス

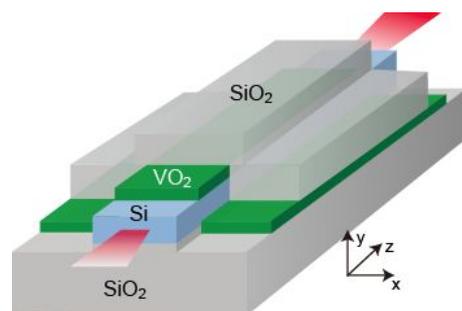


図 1 : 開発した導波路型光スイッチの概略図

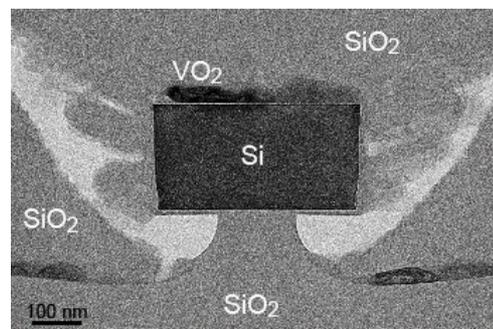


図 2 : シリコンコア付近の断面 TEM 像

ツチの積層構造を観察するため、収束イオンビーム (FIB) による加工後に、SIM と TEM による断面観察を行った。図 2 に作製した光スイッチの断面 TEM 像を示す。シリコンコア上に粒成長した VO₂ 層が観察されるが、側壁には VO₂ が堆積していないことが明らかとなった。これは VO₂ 堆積に指向性の高い PLD 法を使用したためであると考えられる。シリコンコア内を伝搬する光は、その上面に成長した VO₂ 層の屈折率変化の影響を受ける。

(3) 光スイッチ特性のシミュレーション

作製した光スイッチの特性を議論するため、有限要素法によるシミュレーションを行った。その結果を図 3 に示す。波長は 1550 nm であり、各材料の屈折率には実測値を用いている。また、構造モデルには(2)で求めた実デバイスの測定値を使用している。VO₂ が低温絶縁体相である時は、(a)1.00 dB/μm と透過損失が小さく、高温金属相に転移すると、(b)6.69 dB/μm と損失が増大する。これは、図 3 (b)に示したように金属相 VO₂ がシリコンコア内を伝搬する光を吸収するためである。シリコン導波路のクラッド層に使用した VO₂ の金属絶縁体転移を利用することで、光スイッチ機能を実現することを実証した。また、VO₂ 層の厚みを変化させた計算結果から、30-40 nm の厚みで最も大きな消光比が達成されるという結果を得た。

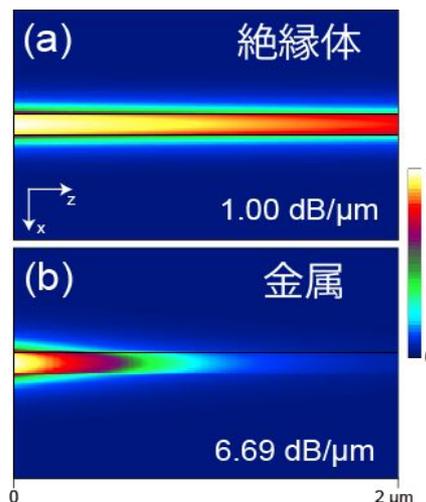


図 3 : デバイス上面から俯瞰したシミュレーション結果 (a)絶縁体相、(b)金属相での透過効率

(4) 光スイッチの特性評価

作製したデバイスの光スイッチ機能を実験的に評価した。第一段階として、環境温度の変化により VO₂ の相転移を引き起こした。自然放射光 (ASE) 光源を用いて C バンド帯 (1530-1565 nm) での測定を、室温 (20°C) から高温 (80°C) までの温度範囲で実施した。図 4 に示すように、VO₂ の転移温度 (70°C) 付近で透過損失が増大する。80°C 程度の温度領域では、Si や SiO₂ の屈折率変化は無視できる。このため、光スイッチ機能は VO₂ の金属絶縁体転移に因るものである。各温度でのデバイス長依存性から単位長さあたりの透過損失を求めることができる。室温 (20°C) では 1.27 dB/μm であり、高温 (80°C) では 4.55 dB/μm であった。室温 (20°C) での値は計算結果と良い一致を示す。高温 (80°C) での値は計算結果より若干小さくなっており、実デバイスにおける VO₂ の結晶性低下による屈折率変化などが原因と考えられるが、高温で透過損失が増大するという結果には変わりはない。マイクロメートルサイズの小型光スイッチにおいて、30 dB 以上の消光比を達成することに成功した。

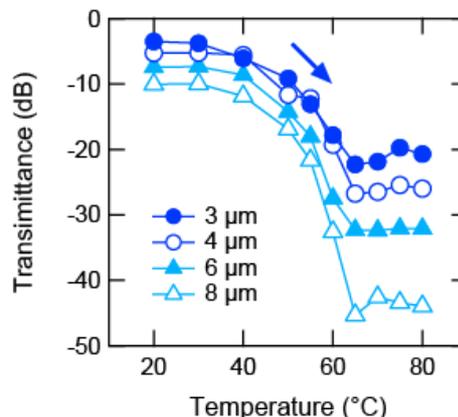


図 4 : 光スイッチの透過損失の温度特性

(5) 動作速度の評価

最後に、光スイッチの動作速度を検証した。任意波形発生器・オシロスコープ・市販の高速光スイッチを使用して測定を行った。光源には、上記と同様に ASE を用いた。高強度の光を入射させることでクラッド層である VO₂ の金属絶縁体相転移を引き起こし、金属相 VO₂ が光吸収を起こすことによりスイッチ機能を実現した。100mW の光を入射した場合に数十 ns の光スイッチ動作を実証した。この結果を受けて、熱伝導シミュレーションにより光スイッチ動作原理について検討を行った。三次元の導波路構造をモデルとして使用することにより上記で観測した現象を再現することに成功した。本研究で開発したデバイスの特性は、主に熱力学によって決定することを明らかにした。また、熱伝導シミュレーションにより光スイッチの高速動作を実現するための指針を得ることができた。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 5 件)

[1] S. Migita, H. Ota, K. Shibuya, H. Yamada, A. Sawa, T. Matsukawa, and A. Toriumi

“Phase transformation behavior of ultrathin Hf_{0.5}Zr_{0.5}O₂ films investigated through wide range

annealing experiments”

Jpn. J. Appl. Phys. **58**, SBBA07 (2019). DOI: 10.1364/OE.27.004147

- [2] Y. Tomioka, N. Shirakawa, K. Shibuya, and I. H. Inoue
“Enhanced superconductivity close to a non-magnetic quantum critical point in electron-doped strontium titanate”
Nature Commun. **10**, 738 (2019). DOI: 10.1038/s41467-019-08693-1
- [3] K. Shibuya, Y. Atsumi, T. Yoshida, Y. Sakakibara, M. Mori, and A. Sawa
“Silicon waveguide optical modulator driven by the metal–insulator transition of a vanadium dioxide cladding layer”
Opt. Express **27**, 4147 (2019). DOI: 10.7567/1347-4065/ab00f6
- [4] S. Migita, H. Ota, H. Yamada, K. Shibuya, A. Sawa, and A. Toriumi
“Polarization switching behavior of Hf–Zr–O ferroelectric ultrathin films studied through coercive field characteristics”
Jpn. J. Appl. Phys. **57**, 04FB01 (2018). DOI: 10.7567/JJAP.57.04FB01
- [5] K. Shibuya and A. Sawa,
“Polarized Raman scattering of epitaxial vanadium dioxide films with low-temperature monoclinic phase”
J. Appl. Phys. **122**, 015307 (2017). DOI: 10.1063/1.4990988

[学会発表](計 5 件)

- [1] “Phase stability and metal-insulator transition of VO₂ on Si”, K. Shibuya, Collaborative Conference on Materials Research 2018, Incheon, Korea, 2018/06/26.
- [2] “Polarized Raman scattering of epitaxial vanadium dioxide films”, K. Shibuya and A. Sawa, Material Research Society spring meeting, Phoenix, USA, 2018/04/05.
- [3] 「VO₂ の金属 - 絶縁体転移を用いたシリコン導波路光スイッチ」 渋谷圭介、渥美裕樹、吉田知也、榊原陽一、森雅彦、澤彰仁、第 65 回応用物理学会春季学術講演会、早稲田大学、2018/03/20.
- [4] “Impact of electron doping on electronic phases of vanadium dioxide”, K. Shibuya, Collaborative Conference on Materials Research 2017, Jeju, Korea, 2017/06/28.
- [5] “Metal–insulator transition in vanadium oxides films and its applications”, K. Shibuya, 3rd Euro Intelligent Materials 2017, Keil, Germany, 2017/06/9.

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。