

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14624

研究課題名（和文）二次元層状半導体を積載した微小光共振器による光スイッチデバイスの研究

研究課題名（英文）All optical switching devices based on microcavities with two-dimensional materials

研究代表者

山下 大喜（Yamashita, Daiki）

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・研究員

研究者番号：40858099

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、シリコンフォトニック結晶ナノビーム光共振器上に二次元材料を積載し、レーザー照射による屈折率変調を利用して、高速・省エネ光スイッチを実証しました。まず、共振器のQ値を維持しつつ屈折率変調を行うデバイスを作製し、その後、光スイッチ動作特性と光生成キャリアダイナミクスを評価しました。二次元材料MoTe₂を屈折率変調材料として用いることで、33psの高速スイッチング速度と200-300fJの省エネ動作を実現しました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の意義は、シリコンフォトニックデバイスに新しい機能性材料である二次元材料を集積し、ハイブリッドデバイスを開発することで、シリコンの材料限界を超えた高速・省エネ光スイッチングを実証したことです。具体的には、二次元層状半導体を屈折率変調材料として用いた微小共振器型光スイッチの研究を行い、大きな屈折率変調が可能な材料とそれを最大化する共振器構造を組み合わせることで、従来の同型の光スイッチデバイスをを超える性能を実現しました。この研究により、将来の通信技術の発展に寄与することが期待されます。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to create a high-speed and energy-efficient optical switch using two-dimensional layered semiconductors. We achieved this by utilizing refractive index modulation induced by photo-absorbed carriers when a laser is directed onto two-dimensional materials on a micro-optical resonator. Initially, we developed a device that could modulate the refractive index while maintaining the Q-factor of a silicon photonic crystal nanobeam optical resonator. Subsequently, we assessed the characteristics of the optical switch operation and examined the dynamics of photo-generated carriers. Using the two-dimensional material MoTe₂, we successfully produced a device capable of achieving a high-speed switching time of 33ps and demonstrated energy efficiency, requiring only about 200-300fJ for switching energy. This research has the potential to contribute to the advancement of future communication technologies.

研究分野：光工学および光量子科学関連

キーワード：シリコンフォトニクス 二次元材料 光スイッチ フォトニック結晶 微小共振器

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、ますます増加していく情報通信量を背景に、より高速で省エネな次世代光通信技術の重要性が高まっている。さまざまな要素技術について研究が進められてきた中で、光信号の光路を切り替える光スイッチは高速動作を実現する上で重要な素子の一つである。代表的な変調方式として、機械的動作、電気、光を用いた光スイッチング方式がある中で、共振器と光生成キャリアによる屈折率変調を用いた全光スイッチデバイスが、高速応答かつ非常に省エネな方式として注目されている。この全光スイッチの動作原理は、共振器の共振波長に合わせておいた信号光を ON の状態としたときに、光励起でバンド内に生じたキャリアによる屈折率変化によって共振波長がシフトすることで、共振器に光が入らない OFF の状態を作るというものである[図 1(b)]。一般的に、スイッチング時間は、共振器の Q 値と屈折率変調材料のキャリア寿命に制限されている。Q 値について、小さいエネルギーでスイッチングをするためには高い Q 値を持つ共振器が望ましいが、高い Q 値は信号光も共振器に長く閉じ込めてしまうためスイッチング時間とスイッチングエネルギーはトレードオフの関係となってしまう。また、従来型の共振器光スイッチでは、基本的に共振器材料そのものを屈折率変調材料として用いており、キャリア寿命や起こせる屈折率変調に制限があった。

2. 研究の目的

本研究では、二次元層状半導体を屈折率変調材料に用いた微小共振器型光スイッチの研究を行う。共振器上に積載した二次元層状半導体にレーザーを照射し、光吸収キャリアによる屈折率変調を起こして共振器の共振波長をシフトさせることでスイッチングを行う。従来型の共振器光スイッチでは、基本的に共振器材料そのものを屈折率変調材料として用いており、キャリア寿命や起こせる屈折率変調に制限があった。屈折率変調材料に二次元層状半導体を用いることでその限界を打ち破りたい。デバイス動作原理の実証から着手し、スイッチング特性を左右する二次元層状半導体における光生成キャリアダイナミクスを明らかにする。高速かつ省エネで動作する光スイッチデバイスの実証を目指すとともに、最終的に本デバイスが既存の光スイッチデバイスと比較してどのような優位性を持つのかを明らかにすることを研究目的とする。

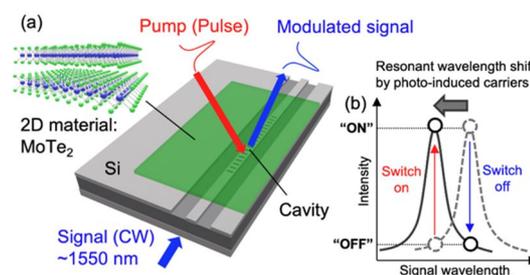


図 1. (a) 共振器の上に 2 次元材料を搭載した、我々が提案するハイブリッド全光スイッチングデバイスの概略図。(b) マイクロ共振器を用いた全光スイッチングの動作原理。光誘起キャリアが共振スペクトルをシフトさせ、信号波長に応じてスイッチオンまたはスイッチオフ動作を選択できる。

3. 研究の方法

上述の目的達成に向け、以下の項目に取り組む。

- 二次元層状半導体を積載した微小光共振器デバイスの作製
- 光生成キャリアのダイナミクスの研究
- 光スイッチ動作特性の評価

4. 研究成果

【研究】二次元層状半導体を積載した微小光共振器デバイスの作製

共振器-導波路構造を半導体微細加工プロセスで作製した。構造をチップの端に配置することでチップ端から信号光を導波路入力できるようにした[図 2(a)]。通信波長帯で動作する共振器の評価を行い、Q 値が平均して 10^4 程度のデバイスを作製した。

次に特定の共振器上に転写法を用いて二次元材料の積載を試みた。積載する二次元材料には、通信波長帯で透明で、早いキャリア寿命を持つ MoTe₂ を用いた。転写の前後における Q 値の変化は、二次元材料の膜厚が大きくなるほど低下が見られ、これは事前の数値計算と一致した。Q 値が大きく低下しない厚さで転写する条件を見出した。

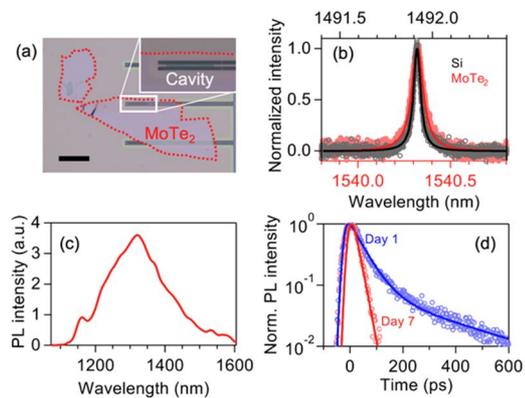


図 2. (a) 厚さ 11nm の MoTe₂ フレークを集積したハイブリッド Si 共振器型スイッチングデバイスの光学顕微鏡写真。(b) MoTe₂ フレークの転写前(黒)と転写後(赤)の共振モードスペクトル。丸印はデータ、線はローレンツフィット。(c) 950nm および 100 μW の連続波励起で測定したスイッチング素子上の MoTe₂ の発光スペクトル。(d) 異なる日付の 1,000nm および 256fJ パルス励起で得られたスイッチング素子上の MoTe₂ の PL 減衰曲線。

【研究】光生成キャリアのダイナミクスの研究と最適化

キャリアダイナミクスは、共振器上の MoTe₂ フレークの発光(PL)減衰曲線を測定することで調べた[図 2(d)]。MoTe₂ は表面欠陥の形成により空気中で劣化することが知られているため、同じフレークを転写後の異なる日に測定した。いずれの日においても(1日目: 50 ps、7日目: 19 ps)、PL 寿命はシリコン(フォトニック結晶で ns 程度)よりもはるかに短いため、MoTe₂ による高速スイッチングが期待できる。また、日数経過による非放射速度の高速化は、一般的に発光デバイスの性能劣化をもたらすが、我々のデバイスにとっては、スイッチング速度を向上させる方向に働くため有益である。

【研究】光スイッチ動作特性の評価

作製したデバイスに対して、光スイッチ動作の実験を行った。共振器の共振波長に合わせて信号光を共振器に入力し、二次元層状材料の励起子共鳴吸収波長でスイッチング光をチップ直上から入射した。通信波長帯超伝導単一光子検出器で信号光強度の時間変化をモニターすることで光スイッチング特性を評価した。比較のために、共振器の(Q) がほぼ同じ(~20,000)のシリコンのみからなるデバイスを作製した。図 3(a)は、サンプル作製から 2日後と 6日後のシリコン(Si)デバイスと MoTe₂ ハイブリッドデバイスのスイッチング応答を示している。Si、MoTe₂ Day 2、および Day 6 デバイスのスイッチング時間はそれぞれ、3600 ± 500 ps、50 ± 10 ps、および 33 ± 5.5 ps であり、MoTe₂ によってスイッチング速度が大幅に向上していることがわかる。

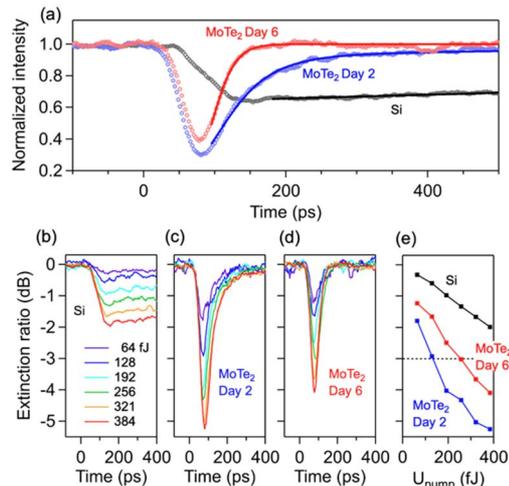


図 3. (a) 試料作製から 2 日後(青)と 6 日後(赤)の Si デバイス(黒)と MoTe₂ デバイスのスイッチング応答。丸はデータ、線はフィット。異なる励起エネルギー(U_{pump})における(b)Si、(c)MoTe₂ Day 2、(d)MoTe₂ Day 6 デバイスのスイッチング応答。(e) Si、MoTe₂ Day 2、および MoTe₂ Day 6 デバイスの消光比の U_{pump} 依存性。

特に、Day 6 デバイスのスイッチング速度は、Si デバイスのスイッチング速度よりも 2 桁近く速く、この 33 ps のスイッチング速度は、基板材料としてシリコンを用いたフォトニック結晶共振器ベースの全光学スイッチの中で最速である。またスイッチングエネルギーは、Day 2 と Day 6 のデバイスでそれぞれ 133fJ と 254fJ で、省エネ動作を達成した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Fang N., Chang Y. R., Fujii S., Yamashita D., Maruyama M., Gao Y., Fong C. F., Kozawa D., Otsuka K., Nagashio K., Okada S., Kato Y. K.	4. 巻 15
2. 論文標題 Room-temperature quantum emission from interface excitons in mixed-dimensional heterostructures	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 2871
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-024-47099-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Fujii Shun, Fang Nan, Yamashita Daiki, Kozawa Daichi, Fong Chee Fai, Kato Yuichiro K.	4. 巻 24
2. 論文標題 van der Waals Decoration of Ultra-High-Q Silica Microcavities for (2)- (3) Hybrid Nonlinear Photonics	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 4209 ~ 4216
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.4c00273	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Fang N., Chang Y. R., Yamashita D., Fujii S., Maruyama M., Gao Y., Fong C. F., Otsuka K., Nagashio K., Okada S., Kato Y. K.	4. 巻 14
2. 論文標題 Resonant exciton transfer in mixed-dimensional heterostructures for overcoming dimensional restrictions in optical processes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 8152
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-023-43928-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Fang Nan, Yamashita Daiki, Fujii Shun, Otsuka Keigo, Taniguchi Takashi, Watanabe Kenji, Nagashio Kosuke, Kato Yuichiro K.	4. 巻 10
2. 論文標題 Quantization of Mode Shifts in Nanocavities Integrated with Atomically Thin Sheets	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Optical Materials	6. 最初と最後の頁 2200538 ~ 2200538
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adom.202200538	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計7件(うち招待講演 0件/うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Shun Fujii, Nan Fang, Daiki Yamashita, Daichi Kozawa, Chee Fai Fong, Yuichiro K Kato
2. 発表標題 Second-order Nonlinear Optics in Ultrahigh-Q Silica Microcavities Decorated by Two-Dimensional Materials
3. 学会等名 CLEO Pacific Rim 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Daiki Yamashita, Nan Fang, Shun Fujii, Yuichiro K. Kato
2. 発表標題 All-Optical Switching Based on Silicon Nanocavities Boosted by Two-Dimensional Semiconductors
3. 学会等名 CLEO 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 C. F. Fong, D. Yamashita, N. Fang, S. Fujii, Y.-R. Chang, T. Taniguchi, K. Watanabe, Y. K. Kato
2. 発表標題 Nanocavity induced by atomically thin transition metal dichalcogenide in photonic crystal waveguide
3. 学会等名 JSAP-Optica Joint Symposia 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Daiki Yamashita, Nan Fang, Shun Fujii, Yuichiro K. Kato
2. 発表標題 Hybrid silicon all-optical switching devices integrated with two-dimensional materials
3. 学会等名 JSAP-Optica Joint Symposia 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1 . 発表者名 D. Yamashita, N. Fang, S. Fujii, K. Otsuka, T. Taniguchi, K. Watanabe, K. Nagashio, Y. K. Kato
2 . 発表標題 Quantization of mode shifts in nanocavities integrated with atomically thin sheets
3 . 学会等名 JSAP-Optica Joint Symposia (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 C. F. Fong, D. Yamashita, N. Fang, T. Taniguchi, K. Watanabe Y. K. Kato
2 . 発表標題 Formation of heterocavity by deposition of hexagonal boron nitride flake on photonic crystal waveguide
3 . 学会等名 JSAP-Optica Joint Symposia (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 N. Fang, D. Yamashita, S. Fujii, K. Otsuka, T. Taniguchi, K. Watanabe, K. Nagashio, Y. K. Kato
2 . 発表標題 Quantization of mode shifts in nanocavities integrated with atomically thin sheets
3 . 学会等名 The 63rd Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium
4 . 発表年 2022年

〔 図書 〕 計0件

〔 産業財産権 〕

〔 その他 〕

D. Yamashita, N. Fang, S. Fujii, and Y. K. Kato, "Hybrid silicon all-optical switching devices integrated with two-dimensional material," arXiv:2403.18199 (2024).
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------