

課題名(タイトル):

低次元材料とフォトニクスの融合による光集積デバイスの開発

利用者氏名: 山下 大喜

理研における所属研究室名: 光量子工学研究センター 量子オプトエレクトロニクス研究チーム

1. 本課題の研究の背景、目的、関係する課題との関係

光通信の高速化とエネルギー効率の向上に対する需要が高まる中、光信号のルーティングや変調を担う全光スイッチングは、フォトニック集積回路(PIC)において重要な役割を果たす。従来のシリコンを基板材料とした全光スイッチングデバイスは、他の電気・光デバイスとの一体型の集積が可能である一方、シリコンのキャリア寿命によって応答速度が制約され、速度と効率に限界があった。これに対し、遷移金属ダイカルコゲナイドなどの 2 次元(2D)材料は、迅速なキャリア再結合や強い光と物質の相互作用といった特有の光電子特性を持ち、次世代のフォトニックデバイスの材料として有望である。本研究では、シリコンと 2D 材料を組み合わせたハイブリッド構造によって、PIC におけるシリコンのプラットフォームとしての優位性を活かしつつ、全光スイッチングの性能限界を克服することを目指した。

本研究において、光スイッチを構成するフォトニック結晶共振器設計のための計算を行った。

2. 具体的な利用内容、計算方法

本計算には時間領域差分(FDTD)法を用いた。この手法は、電磁界現象の基礎方程式であるマクスウェル方程式を差分化(Finite Difference)して、時間領域(Time Domain)で解く手法である。計算においては3次元構造を細かいセルに分けた上で、そのセル毎に微小時間発展を計算する必要があるが、その計算量は膨大になるが、スーパーコンピュータを用いることで高速並列計算が可能である。FDTD 計算にはオープンソースソフトウェアである MEEP を用いた。本年度は主に、ナノビームフォトニック結晶共振器に対して、電磁界計算を行った。

3. 結果

構造パラメータを用いることで、通信波長帯で動作する高い Q 値を持つナノビームフォトニック結晶共振器が設計できた。計算で分かった構造パラメータを用いて共振器を作製し、2D 半導体である二テルル化モリブデン(MoTe_2)を共振器に集積させたハイブリッド全光スイッチングデバイスを

開発した。実験の結果、高速(数十ピコ秒)かつ低エネルギー(数百フェムトジュール)のスイッチングが達成できた。

4. まとめ

FDTD 法を用いてナノビームフォトニック結晶共振器の電磁界分布計算を行った。所望の性能が得られる構造パラメータを計算から明らかにして、それを元に光スイッチデバイス作製を行った。実験の結果、高速かつ低エネルギーで動作する光スイッチ動作を得られた。

5. 今後の計画・展望

今後も実際のデバイス作製・共振器特性の評価と計算によるフィードバックのサイクルを効率よく回すことで目的に応じたデバイス開発を行っていきたい。

2024 年度 利用研究成果リスト

【雑誌に受理された論文】

Hybrid silicon all-optical switching devices integrated with two-dimensional material

D. Yamashita, N. Fang, S. Fujii, and Y. K. Kato

Adv. Opt. Mater. 13, 2402531 (2024).

【会議の予稿集】

D. Yamashita, N. Fang, S. Fujii, and Y. K. Kato, "All-Optical Switching Based on Silicon Nanocavities Boosted by Two-Dimensional Semiconductors," in CLEO 2024, Technical Digest Series (Optica Publishing Group, 2024), paper STh4P.5.

【口頭発表】

D. Yamashita, N. Fang, S. Fujii, Y. K. Kato, "All-optical switching based on silicon nanocavities boosted by two-dimensional semiconductors," Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2024), Charlotte, North Carolina, USA (May 9, 2024).

D. Yamashita, N. Fang, S. Fujii, Y. K. Kato, "Fast all-optical switching based on molybdenum ditelluride and silicon nanocavity hybrid," The 68th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium, Nagoya, Japan (March 3, 2025).