

プロジェクト名(タイトル):

カーボンナノチューブ単一光子源に用いるフォトニック結晶共振器モードの計算

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

1. 本課題の研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

我々は、フォトニック結晶を用いたカーボンナノチューブ単一光子源モジュールの研究開発を行っている。本研究では、カーボンナノチューブからの発光を、フォトニック結晶共振器を用いて増強し、さらに、効率よく導波路に結合させることが重要である。Q 値(共振器の閉じ込め強さの指標)を高く保ちつつ、共振器から高効率に導波路へ光を取り出せる構造を、電磁界分布シミュレーションを使って探索・最適化することが重要となる。

また、今年度よりフォトニック結晶共振器に二次元層状物質を積載したデバイスの研究も開始した。デバイスの特性を調べるために二次元層状物質が共振器の Q 値や共振波長、放射パターンに与える影響を、電磁界分布シミュレーションを用いて検討する。

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り、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[1,2]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[3]と二次元層状物質-共振器ハイブリッドに対して、電磁界計算を行った。

3. 結果

前年度から引き続き、様々な構造パラメータに対して電磁界分布計算を行い、共振器の共振波長や Q 値、モード体積の関係性を調べた。また今年度から取り組み始めた二次元層状物質-共振器ハイブリッドにおいては、共振器の上に二次元層状物質を積載した構造で、その層数(厚さ)依存性を調べた。その結果、高い Q 値($\sim 10^4$)を維持しながら共振

器の共振波長を二次元層状物質の層数(厚さ)で制御できることがわかった。

4. まとめ

FDTD 法を用いてフォトニック結晶共振器、二次元層状物質-共振器ハイブリッドの電磁界分布計算を行った。後者について、二次元層状物質の層数(厚さ)を変えることでロスが大きくなることなく、高い Q 値($\sim 10^4$)を維持しながら共振器の共振波長を制御できることがわかった。

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く。

6. 参考文献

- [1] A.F. Oskooi, D. Roundy, M. Ibanescu, P. Bermel, J.D. Joannopoulos, and S.G. Johnson, MEEP: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method, *Comput. Phys. Commun.* 181, 687 (2010).
- [2] <https://github.com/NanoComp/meep>
- [3] R. Miura, S. Imamura, R. Ohta, A. Ishii, X. Liu, T. Shimada, S. Iwamoto, Y. Arakawa, and Y. Kato, "Ultralow mode-volume photonic crystal nanobeam cavities for high-efficiency coupling to individual carbon nanotube emitters," *Nature Communications* 5, 5580 (2014).

2021 年度 利用研究成果リスト

【雑誌に受理された論文】

- [1] D. Yamashita, H. Machiya, K. Otsuka, A. Ishii, Y. K. Kato, “Waveguide coupled cavity-enhanced light emission from individual carbon nanotubes”, *APL Photonics* **6**, 031302 (2021).