



丸文学術賞 受賞者

太田 泰友
慶應義塾大学 理工学部物理情報工学科
准教授

量子ドットを有するナノフォトニック構造の高品質化と機能実現

ものづくりの進化が可能にする物理探求と応用開拓

研究の背景

ナノフォトニクスは、光物質相互作用の探求といった基礎物理からレーザーや光集積回路など幅広い応用までを支える基盤学術である。同分野の発展には、光の振る舞いの深い理解と微細な光学構造を精緻に形成する技術の進展が必要不可欠であり、産学官を問わず世界中で研究開発が競われている。中でも化合物半導体によるナノフォトニック構造は、情報通信の基幹素子である発光・受光デバイスから光量子情報処理に必要な量子光源まで、現在・未来の応用にとって最も重要な光学構造の一つと位置付けられている。

本研究では、化合物半導体によるナノフォトニック構造の形成技術を開拓するとともにその応用展開を目指した。特に、3次元的な量子閉じ込め構造であり優れた発光体である量子ドットを内包したナノ光構造の形成を行い、同系で発現する興味深い光物質相互作用の物理探求と応用技術の開拓を進めた。

研究の成果

本研究で得られた主な成果は、以下に示

す3つの内容にまとめることができる。

1. 高Q値ナノ共振器による光物質相互作用の探求

フォトニック結晶ナノ共振器は、高い共振器Q値と回折限界に迫る小さなモード体積を同時に実現可能なことから、光物質相互作用の物理探求に適した最も重要なプラットフォームの一つである(図1)。本研究では、素子作製プロセスを一から見直し、独自の表面パッシベーション手法を取り入れることで、Q値が10万を超えるGaAsフォトニック結晶ナノ共振器の形成技術を実現した^[1]。また、同系を単一量子ドットと結合させることで、量子ドット共振器量子電磁力学における強結合領域での世界最高性能指数を実現した^[2]。性能指数の向上は、様々な量子電磁力学現象を観測・制御する上で本質的に重要なものである。実際、高品質に形成された量子ドットナノ共振器系を用いることで、高次の自然放出過程である二光子自然放出を固体量子系としてはじめて観測することに成功した(図2)^[3]。さらには、真空ラビ分裂スペクトラムにおけるファノ干渉の観測^[4]やレーザー出力特性に閾値動作を示さない無閾値レーザー発振^[5]などを実現している。これらの成果は、基礎物理と工学応用の両

面にとって重要な進展と位置付けられる。

2. ハイブリッド集積量子ナノフォトニクス

光集積回路を用いた光量子情報処理が注目されている。一方、従来の限られた材料のみで構成される光集積回路ではスケラブルな量子光回路の実現が難しいとされ、異種材料を融合したハイブリッド光集積回路が必要になると考えられている。本研究では、転写プリント法を用いた光回路上へのナノ光量子素子のハイブリッド集積技術を開発した(図3)^[6]。同手法では、中空構造に形成したナノ光素子を透明な粘弾性ゴムによりピックアップし、導波路上へ転写集積する。素子の接着は主にファンデルワールス力を用いており、材料系に依存しない自在な光集積が可能である。これまでの研究で、量子ドットを内包したGaAsナノビーム共振器をシリコンフォトニクス光回路に集積し、単一光子を生成することに成功している^[7]。その他にも、単一プラズモン光源^[8]やシリコン上量子ドット共振器量子電磁力学系^[9]などのハイブリッド集積デバイスを転写プリント法により実現することに成功している。その汎用性を鑑みれば、転写プリント法はナノフォトニック構造の形成技術を今後も大

図1 フォトニック結晶ナノ共振器

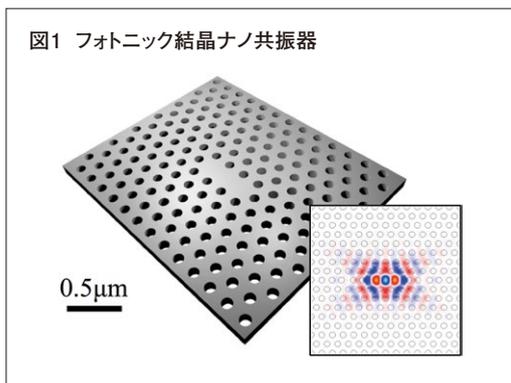


図2 二光子自然放出を示す発光スペクトル

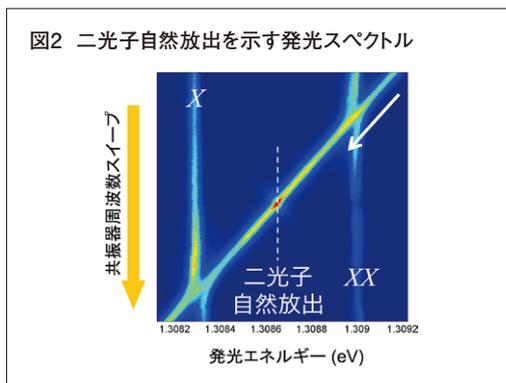
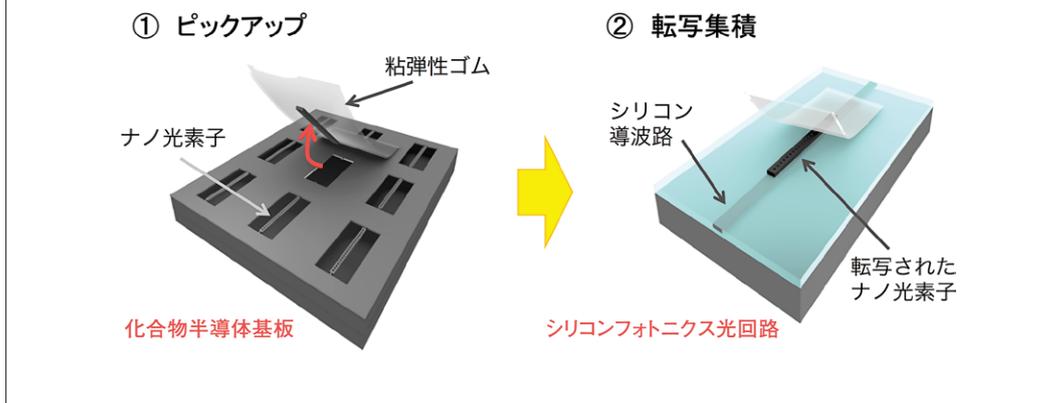


図3 転写プリント法によるナノ光素子のハイブリッド集積



きく発展させるものであると期待される。

3. 半導体トポロジカルナノフォトニクス

トポロジカルフォトニクスにおいては、波数空間における光バンドのトポロジーに着目することで、新しい光閉じ込め機構が次々と発見されている。それらトポロジカル光モードには擾乱に強いという特徴があり、構造不完全性に起因する光学損失等が課題となる集積フォトニクスへの応用が期待されている。本研究では、光集積応用に適した半導体トポロジカル“ナノ”フォトニクスの分野を先駆的に開拓した。比較的大きな光学構造で行われていた先行研究を参考に、トポロジカルナノ共振器を設計・作製し、量子ドットをゲイン媒質としたトポロジカルナノ共振器レーザーを実現した^[10]。さらには、図4に示す近赤外波長域で動作する2次元半導体フォトニック結晶が光高次トポロジカル絶縁体として動作することを見出し、実験的にトポロジカルコーナー状態の存在を示した^[11]。こ

れらの成果は、トポロジカルフォトニクスの工学応用を拓くとともに、その物理に深化をもたらすものである。

将来の展望

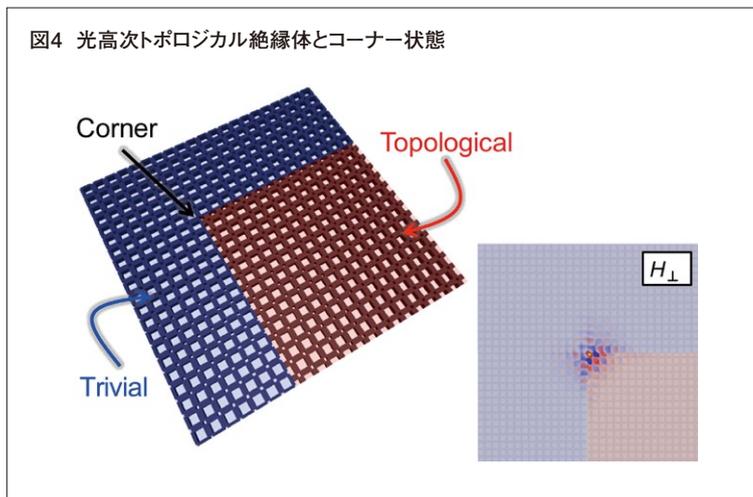
半導体ナノフォトニクスの発展にはものづくりにおける進化が欠かせない。これからも新しい材料や構造が新しい物理と応用を生み出し続けると思われる。その先端に立ち続けるためには、地道なものづくりに真摯に取り組む必要がある。そしてその先には、光集積回路、レーザーや量子光源といった

デバイスの革新が間違いなくあるだけでなく、量子情報処理、VR/AR、LIDAR、光インターコネクト、Beyond 5Gなど、ナノフォトニクスが関わる数多の応用も大きく拓けるものであると考えている。

謝辞

本研究の遂行にあたっては、非常に多くの方々にご支援・ご助力を頂いた。大学院生時代からご指導を頂いている東京大学・荒川泰彦先生、岩本敏先生をはじめ、国内外の共同研究者と一緒に研究を進めた学生の皆様に心より感謝を申し上げます。

図4 光高次トポロジカル絶縁体とコーナー状態



References (参考文献)

- [1] K. Kuruma, Y. Ota, M. Kakuda, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, *APL Photonics* 5, 046106 (2020).
- [2] Y. Ota, D. Takamiya, R. Ohta, H. Takagi, N. Kumagai, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, *Appl. Phys. Lett.* 112, 093101 (2018).
- [3] Y. Ota, S. Iwamoto, N. Kumagai, and Y. Arakawa, *Phys. Rev. Lett.* 107, 233602 (2011).
- [4] Y. Ota, R. Ohta, N. Kumagai, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, *Phys. Rev. Lett.* 114, 143603 (2015).
- [5] Y. Ota, M. Kakuda, K. Watanabe, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, *Opt. Express* 25, 19981 (2017).
- [6] R. Katsumi, Y. Ota, M. Kakuda, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, *Optica* 5, 691 (2018).
- [7] R. Katsumi, Y. Ota, A. Osada, T. Yamaguchi, T. Tajiri, M. Kakuda, S. Iwamoto, H. Akiyama, and Y. Arakawa, *APL Photonics* 4, 036105 (2019).
- [8] A. Tamada, Y. Ota, K. Kuruma, K. Watanabe, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, *ACS Photonics* 6, 1106 (2019).
- [9] A. Osada, Y. Ota, R. Katsumi, M. Kakuda, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, *Phys. Rev. Appl.* 11, 024071 (2019).
- [10] Y. Ota, R. Katsumi, K. Watanabe, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, *Commun. Phys.* 1, 86 (2018).
- [11] Y. Ota, F. Liu, R. Katsumi, K. Watanabe, K. Wakabayashi, Y. Arakawa, and S. Iwamoto, *Optica* 6, 786 (2019).