

加藤ナノ量子フォトニクス研究室 Nanoscale Quantum Photonics Laboratory

主任研究員 加藤 雄一郎
KATO, Yuichiro



キーセンテンス：

1. デバイス構造を利用してナノ材料の光物性を解明する。
2. ナノスケールにおける光デバイスの物理を理解する。
3. ナノ光デバイスによる量子状態制御手法を開拓する。

キーワード：

光物性、励起子、光子相関、ナノデバイス物理、光デバイス、カーボンナノチューブ、フォトニック結晶、微小光共振器、顕微分光、フォトルミネッセンス、電界発光、光伝導度

研究概要

当研究室ではナノ光デバイスを利用した基礎研究を推進している。半導体微細加工技術を駆使して作製した微小なデバイス構造に、カーボンナノチューブをはじめとするナノ材料を組み込むことで、ナノスケールにおいて光子と相互作用するデバイスを構成し、フォトルミネッセンスや電界発光、光伝導度の顕微分光測定に取り組んでいる。ナノ材料の光物性やデバイスの動作にかかわる物理的理解を深め、また、新たな量子状態制御手法を開拓することで、光量子デバイスを組み込んだ光集積回路による量子情報通信技術への展望を開くことを目指している。

1. 架橋カーボンナノチューブを用いた室温における単一光子発生

A. Ishii, T. Uda, Y. K. Kato, *Phys. Rev. Appl.* **8**, 054039 (2017).

架橋カーボンナノチューブにおいて励起子がとても長い拡散長を持つこと、また、それによって励起子-励起子消滅が非常に高い効率で起こることを利用して、カーボンナノチューブ中の励起子拡散を用いた室温・空気中における単一光子生成実験を行った。図1に示すように、基板に作製した溝にカーボンナノチューブを架橋させ、その発光に対して光子相関測定を行ったところ、時間差0でのピークが他のピークよりも小さくなる光子アンチバンチングが確認され、その強度比が0.5以下となることから単一光子が発生していることが確認された。本実験では1280 nmから1510 nmの波長を持つ複数のカーボンナノチューブについて測定を行い、その全てで光子アンチバンチングが確認されたことから、通信波長帯において波長選択可能な室温単一光子発生が達成された。

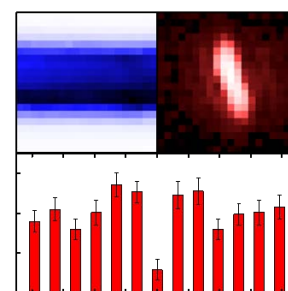


図 1: 溝を掘った基板(左上)と、そこに架橋しているカーボンナノチューブからの発光(右上)、及び、室温中での単一光子の発生を示す光子相関ヒストグラム(下)。

2. 波長領域における空気モードナノビーム共振器と単一カーボンナノチューブの光結合の制御

H. Machiya, T. Uda, A. Ishii, Y. K. Kato, *Appl. Phys. Lett.* **112**, 021101 (2018).

架橋カーボンナノチューブ表面の分子をレーザー加熱によって着脱することで共振器とカーボンナノチューブの波長のずれを制御できることを実証した。空気モードのナノビーム共振器はシリコン・オン・インシュレータ基板から作製し、化学気相成長法によってカーボンナノチューブを共振器上に成長した。このようなデバイスにフォトルミネッセンス(PL)測定をレーザーパワーを変えながら行った[図2(b)]。加熱によって分子が外れることでカーボンナノチューブ由来の線幅の太いピークが短波長側にシフトする一方、共振器由来の鋭いピークはほとんど波長が動かないことが分かる。2つのピークが重なる状態で共振器からの発光が最大化されていることが確認でき、最もずれが小さい場合と大きい場合では発光増強率が10倍も違うことが分かった。

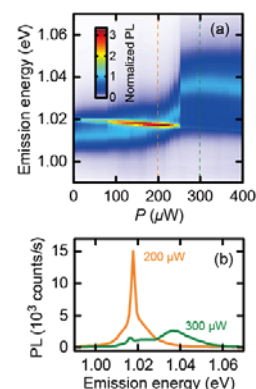


図 2: (a) PL スペクトルの励起強度依存性。(b) 離調が小さい領域(オレンジ)と大きい領域(緑)のスペクトル。

3. 単一カーボンナノチューブ超小型全光メモリ

T. Uda, A. Ishii, Y. K. Kato, ACS Photonics 5, 559 (2018).

表面に吸着した分子に由来した特殊な非線形光学効果を利用して、単一のカーボンナノチューブを光メモリとして動作させることに成功した。図3に架橋カーボンナノチューブにおける発光スペクトルの励起強度依存性を示す。ナノチューブが同一の入力状態に対し、励起強度の履歴に依存して異なる2つの出力状態をとることがわかる。カーボンナノチューブの直径は波長の1000分の1程度と非常に小さいため、全光メモリの高集積化が期待できる。

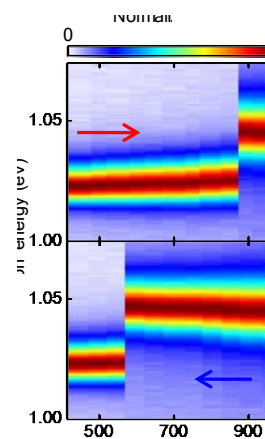


図 3: 架橋カーボンナノチューブにおける発光スペクトルの励起強度依存性。

Key Sentences :

1. Investigate the optical properties of nanomaterials using device structures.
2. Elucidate the physics underlying operation of photonic devices at the nanoscale.
3. Develop methods for manipulating quantum states by utilizing nanoscale photonics.

Key Words :

optical properties, excitons, photon correlation, nanoscale device physics, photonics, optoelectronics, carbon nanotubes, photonics crystals, optical microcavities, microspectroscopy, photoluminescence, electroluminescence, photoconductivity

Outline

Control over the quantum nature of photons at the nanoscale opens up unique opportunities in quantum information processing. We study the physics underlying the operation of nanoscale photonic devices to explore new approaches for manipulating quantum states, with focus on devices that make use of individual single-walled carbon nanotubes. By combining microspectroscopy with electronic techniques, we investigate unconventional methods for manipulating the optical properties of nanomaterials within device structures, which should form the basis for future quantum technologies employing integrated quantum photonic circuits.

1. Room-temperature single photon emission from micron-long air-suspended carbon nanotubes

A. Ishii, T. Uda, Y. K. Kato, *Phys. Rev. Appl.* **8**, 054039 (2017).

We have demonstrated single photon generation at room temperature and telecom wavelength using air-suspended carbon nanotubes, where exciton diffusion length is long and therefore exciton-exciton annihilation occurs very efficiently. Autocorrelation measurements using a Hanbury-Brown Twiss setup are performed on air-suspended carbon nanotubes (Fig. 1), and we observe clear photon antibunching, where a peak count at zero delay is smaller than other peaks. The degree of antibunching is smaller than 0.5, indicating that single photons are generated. We use individual carbon nanotubes with emission wavelengths ranging from 1280 nm to 1510 nm and show that all of them exhibit photon antibunching, which means that wavelength selectable room-temperature single photon emitters are achieved.

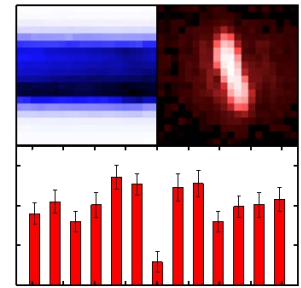


Fig. 1: (Top left) Scanning image of the substrate with trenches. (Top right) Photoluminescence image of a suspended carbon nanotubes. (Bottom) Autocorrelation histogram, showing single photon emission at room temperature.

2. Spectral tuning of optical coupling between air-mode nanobeam cavities and individual carbon nanotubes

H. Machiya, T. Uda, A. Ishii, Y. K. Kato, *Appl. Phys. Lett.* **112**, 021101 (2018).

We utilize heating-induced molecular desorption to tune the nanotube emission in and out of the cavity resonance. Air-mode nanobeam cavities are fabricated from silicon-on-insulator wafers, and carbon nanotubes are suspended over the cavities by chemical vapor deposition. We have measured excitation power dependence of the photoluminescence spectra on those devices. As we heat up the device by increasing the laser power, a large blueshifting of the broad nanotube peak is observed, while the sharp cavity peak slightly redshifts. When the nanotube and the cavity peaks are overlapped, we observe the largest emission enhancement, which is 10 times brighter than the off-resonance emission.

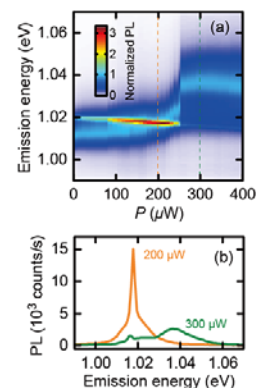


Fig. 2: (a) Excitation power dependence of PL. (b) PL spectra for small (orange) and large (green) detunings.

Single carbon nanotubes as ultrasmall all-optical memories

T. Uda, A. Ishii, Y. K. Kato, ACS Photonics 5, 559 (2018).

We report on operation of single carbon nanotubes as optical memories where we utilize a unique nonlinear optical effect arising from molecule induced screening. In Fig. 3, we present excitation power dependence on emission spectra from an air-suspended carbon nanotube. This result shows that the nanotube can take two different output states for the same input, depending on the excitation history. Our results could lead to an unconventional route for high density integration of all-optical memories.

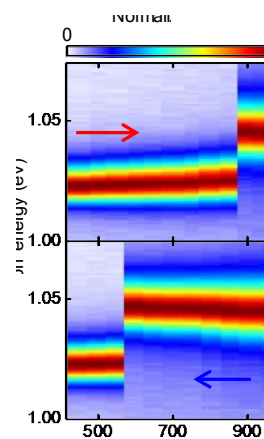


Fig. 3: Excitation power dependence on emission spectra from an air-suspended carbon nanotube.

Laboratory members list

Principal Investigator

加藤 雄一郎 Yuichiro Kato

Research Staff

石井 晃博 Akihiro Ishii

Widianta Gomulya

田中 駿介 Shunsuke Tanaka

Students

宇田 拓史 Takushi Uda

町屋 秀憲 Hidenori Machiya

Assistant and Part-timer

新坂 頼子 Yoriko Nissaka