



2020年1月14日

報道関係者各位

慶應義塾大学
国立大学法人 東京学芸大学

量子暗号に向けたカーボンナノチューブ高純度・高効率単一光子源 —高性能な室温・通信波長帯単一光子源を得る技術を理論的に発見—

慶應義塾大学理工学部物理情報工学科の牧英之准教授らは、直径約1nmの微細な一次元物質である単層カーボンナノチューブ（注1）を用いて、室温において高純度と高効率を両立した単一光子源が理論的に可能であることを世界で初めて示しました。

1パルス中に含まれる光子が1個に制限された単一光子は、近年、量子暗号通信などの量子情報デバイスで注目されており、特に高集積で汎用の量子情報デバイスを実現するには、室温かつ通信波長帯（注2）において、高純度で高効率な単一光子を発生させる単一光子源が必要とされています。これまでに、当研究グループはカーボンナノチューブを用いることで、世界初の室温・通信波長帯の単一光子源を実験的に示しており、その後世界中で研究が行われています。しかし、現状の単一光子源では、高純度化と高効率化を両立することが困難であり、量子情報デバイスへの実用化に向けては、それらを両立する技術の構築が望まれています。今回、カーボンナノチューブから高純度かつ高効率な単一光子発生を実現する技術として、架橋した短尺のカーボンナノチューブに分子修飾をすることにより、その両立が達成可能であることを理論的に初めて示しました。これにより、カーボンナノチューブを用いることで、非冷却で通信波長帯での高性能な単一光子素子が開発可能であることが明らかとなり、本技術を用いることで、チップ上で集積化可能な汎用の量子暗号素子といった、次世代の量子情報素子の開発が推進されることが期待されます。

本研究は、東京学芸大学の前田優准教授と共同で行ったものです。

本研究成果は、2019年12月27日に米国化学会（ACS）のACS Applied Nano Materials オンライン版で公開されました。

1. 本研究のポイント

- ▶ 原理上絶対的安全性を持つ量子暗号通信など新たな量子情報通信技術を広く実用化するためには、室温かつ光ファイバーの通信波長帯で動作する単一光子光源が不可欠。
- ▶ カーボンナノチューブは、室温かつ通信波長帯で動作する唯一の単一光子源であるが、実用化には、単一光子発生の純度と効率を同時に向上させることが課題であった。
- ▶ 架橋した短尺のカーボンナノチューブに分子修飾をすることにより、単一光子の高い純度（99.9%）と高い効率（99.8%）を同時に達成できることを理論的に発見し、課題であった高純度と高効率の両立が可能であることを世界で初めて示した。
- ▶ 非冷却で光ファイバーやシリコンフォトニクス向けの単一光子源が可能となり、高集積な量子情報デバイス用光源として、量子情報通信技術の普及を推進すると期待される。

2. 研究背景

1パルス中に含まれる光子が1個に制限された単一光子は、量子力学に関する基礎研究分野や、その応用で盗聴の検知による絶対に安全な量子暗号通信などの量子情報分野において近年注目されています。これらの応用では、光ファイバー通信波長帯である波長1.3 μm 帯や1.55 μm 帯において、室温において非冷却で動作する単一光子源が必要とされており、現在は、レーザー光源を単純に減衰する疑似的な単一光子源が用いられています。しかし、これらを将来的に広く一般に普及させる

には、安価で高集積な量子情報デバイスの実現が不可欠であり、シリコンフォトニクスと呼ばれる光集積回路などとも融合可能な、シリコンチップ上で高集積化できる単一光子源の開発が望まれます。

一方、カーボンナノチューブは、その一次元構造に由来して、特異な物理的・化学的・機械的特性を有した新しい材料であり、通常の半導体材料では得られないさまざまなデバイスを開発できる新素材として注目されています。カーボンナノチューブは、光デバイス材料としても注目されており、さまざまな光デバイスが開発されていますが、当グループはこれまでの研究で、カーボンナノチューブを用いて室温かつ通信波長帯の単一光子源を開発することに世界に先駆けて成功してきました。その後、世界中でカーボンナノチューブ単一光子源の研究開発が精力的に進められるようになり、米国研究グループでは、カーボンナノチューブに分子修飾を行うことで、極めて高い単一光子純度が室温で実現できることを報告するなど、従来の半導体材料では得られなかった高性能な単一光子源が報告されています。しかし、現状では高い単一光子純度は実現されているものの、単一光子の生成効率が低いといった問題があり、量子暗号素子などの量子情報デバイスとして実用化する場合には、単一光子源の高い純度と高い効率を両立する新たな技術を確立する必要があります。

3. 研究内容・成果

今回、新たな技術として、短尺の架橋カーボンナノチューブ（注3）を用いて分子修飾を行う手法を考案し、本技術による単一光子発生を理論的に解明したところ、これまで報告されてきた高い単一光子純度を維持しつつ、極めて高い単一光子発生効率を達成できることを発見しました。ここでは、単一光子発生で重要な役割を果たす励起子（注4）に注目し、カーボンナノチューブ内に光励起された励起子の挙動を、モンテカルロシミュレーションをベースにして解析し、カーボンナノチューブの長さや表面修飾の有無に注目して単一光子が得られるメカニズムを解析しました。その結果、長さ100nmオーダーの極めて短尺な架橋カーボンナノチューブに対して、励起子の局在サイトとなる分子修飾を行うことにより、室温においても、局在化した励起子から極めて高い単一光子純度を維持しつつ高い単一光子生成効率が得られることを見出しました。また、そのメカニズムも詳細に明らかにしており、短尺のカーボンナノチューブでは、励起子のエンドクエンチング（注5）と励起子対消滅（注6）によって余分な励起子が消滅し、高励起下においても局在励起子から高い純度で高効率に単一光子発生が可能であることを明らかにしました。このような架橋カーボンナノチューブや分子修飾技術といった要素技術は、既にカーボンナノチューブ分野では実験的に確立された技術であることから、本技術は実用化可能な技術であり、本技術を用いた高性能な単一光子源開発が期待されます。

4. 今後の展開

カーボンナノチューブを用いた本手法による高性能な単一光子源は、量子暗号などの量子情報分野における、安価で高集積な汎用の量子情報デバイス開発を実現する新たな技術となります。特に近年は、光デバイスの高集積化やチップ化が進んでおり、従来のレーザー光源・光学素子・光ファイバーなどを組み合わせたマクロな光装置は、シリコンウェハー上に光デバイスを集積するシリコンフォトニクスなどの集積光デバイス化が必要とされており、今後、量子光デバイスもさらなるチップ化・高密度化が進むと考えられ、室温でシリコンフォトニクス上でも動作可能なカーボンナノチューブによる高性能な単一光子源は、安価で汎用の量子情報デバイス開発の発展に貢献すると考えられます。

本研究の一部は、科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業（さきがけ）、科学研究費補助金、JSPS Core-to-Core プログラム、スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワークの一環として実施されました。

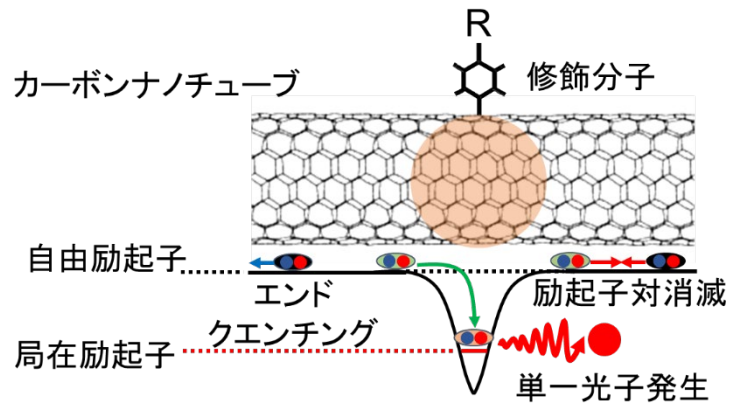


図1 上図：短尺分子修飾カーボンナノチューブの模式図。
下図：分子に励起子が局在して単一光子が発生する模式図。

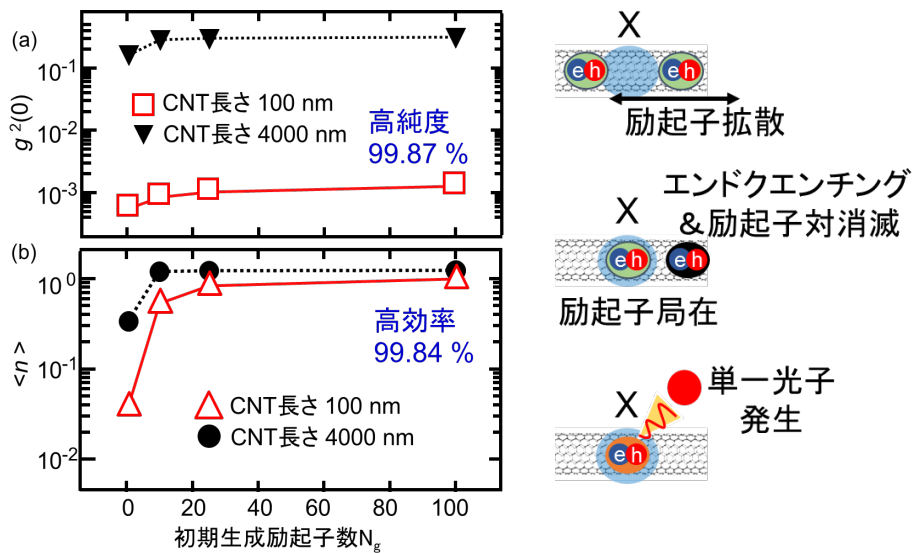


図2 左図：様々な励起条件下における長さ 100nm と 4000nm の分子修飾架橋カーボンナノチューブ (CNT) からの単一光子発生特性の結果。長さ 100nm のカーボンナノチューブでは、高励起条件において、高い純度と効率が得られることが分かる。
右図：短尺の分子修飾カーボンナノチューブ (CNT) からの単一光子発生のメカニズム。分子修飾部分で一つの励起子が局在すると同時に、余分な励起子がエンドクエンチングと励起子対消滅で非発光で消滅することから、局在励起子から単一光子が得られる。

<原論文情報>

“Pure and Efficient Single-Photon Sources by Shortening and Functionalizing Air-Suspended Carbon Nanotubes”
Rintaro Kawabe, Hiroshi Takaki, Takayuki Ibi, Yutaka Maeda, Kenta Nakagawa, and Hideyuki Maki, ACS Applied Nano Materials, accepted.
<https://doi.org/10.1021/acsnm.9b02209>

<用語説明>

(注1) 単層カーボンナノチューブ

鉛筆の芯等の原料である層状物質グラファイトの一層であるグラフェンを筒状に巻いた物質。直径が約 1nm 程度の一次元構造を有している。

(注2) 通信波長帯

光ファイバーにおける光透過率が高く伝送損失が小さい波長帯。この波長において、現在、光ファイバーを用いた長距離光通信が実現している。また、現在研究段階であり原理上絶対的に安全とされる量子暗号通信においても、光ファイバーによる単一光子の長距離伝送を行うため、従来の光ファイバー通信と同様に通信波長帯における単一光子光源が必要とされている。

(注3) 架橋カーボンナノチューブ

微細加工技術でシリコンチップ上に作成したラインアンドスペース構造を用いて、両端が支えられて空中に浮いた構造のカーボンナノチューブ。

(注4) 励起子

物質中において、電子と正孔がクーロン力により束縛されて対をなし、束縛状態になったもの。半導体中では、励起子は発光特性に重要な役割を果たすが、通常の化合物半導体では束縛エネルギーが小さく、特に通信波長帯で発光する半導体においては、室温で励起子は存在しにくい。一方、カーボンナノチューブでは、束縛エネルギーは数百 meV と巨大であり、室温の熱エネルギー (26meV) と比べても非常に大きいことから、通信波長帯で発光するものでも室温で安定して励起子が存在する。励起子を狭い空間に閉じ込めた場合、一つの励起子からの発光を取り出すことが可能となることから、ここから生成する一つの光子が単一光子となる。

(注5) エンドクエンチング

カーボンナノチューブの両端で励起子が非発光で消滅する現象。

(注6) 励起子対消滅

2つの励起子が出会った際に、片方の励起子がもう一つの励起子にエネルギーを渡して非発光で緩和して1つの励起子が消滅する現象。これにより、2つの励起子が1つに減少する。

※ご取材の際には、事前に下記までご一報くださいますようお願い申し上げます。

※本リリースは文部科学記者会、科学記者会、各社科学部等に送信させていただいております。

・研究内容についてのお問い合わせ先

慶應義塾大学 理工学部 物理情報工学科 准教授 牧 英之 (まき ひでゆき)

TEL : 045-566-1643 E-mail : maki@appi.keio.ac.jp <http://www.az.appi.keio.ac.jp/maki/>

・本リリースの配信元

慶應義塾広報室 (村上)

TEL : 03-5427-1541 FAX : 03-5441-7640 Email : m-pr@adst.keio.ac.jp <https://www.keio.ac.jp/>

国立大学法人東京学芸大学 総務部広報企画課

TEL : 042-329-7116 FAX : 042-329-7878

Email : kouhouty@u-gakugei.ac.jp <http://www.u-gakugei.ac.jp/>