



2022年10月12日

報道関係者各位

慶應義塾大学

チップ上シリカ共振器による超狭線幅カーボンナノチューブ発光に成功

慶應義塾大学理工学部物理情報工学科の牧英之教授と同電気情報工学科の田邊孝純教授らは、シリカから作製したトロイド共振器（注1）を用いることで、これまでで最小の発光線幅を有する発光を得ることに成功しました。本技術は、シリコンチップ上に作製した微小の共振器を用いた素子であることや、通信波長帯（注2）である $1.55\mu\text{m}$ 帯の狭線幅発光であることから、チップ上に集積した光回路や光通信素子などの集積光デバイスへの応用が期待されます。

カーボンナノチューブ（注3）は、光通信やシリコンフォトニクス（注4）で必要とされる通信波長帯で発光することに加えて、近年は、室温かつ通信波長帯での単一光子源が実現可能なことから、量子暗号などの光による量子情報技術への応用も期待されています。しかし、一般に、カーボンナノチューブの発光の線幅（半値幅）は、数十nm程度と広いことから、発光をそのまま利用した場合、波長分散の影響による通信帯域や伝送距離の低下を招いたり、波長多重化が困難になったりといった問題があり、光通信への応用は進んでいませんでした。

今回、シリコンチップ上に形成したシリカトロイド共振器を用いて、共振器上にカーボンナノチューブをダイレクトに形成したところ、半値幅が 74pm という超狭線幅の発光を得ることに成功しました。線幅を表すQ値（注5）としては、2万を超える値が得られており、これまで報告されてきたシリコンディスク共振器の最高Q値（約5千）を大きく超えて、これまでで最高のQ値のカーボンナノチューブ発光を観測することに成功しました。本技術を用いることにより、将来的には、光集積デバイスや光通信素子、量子情報素子など、さまざまなチップ上集積光デバイスへの応用が期待されます。

本研究成果は、2022年10月12日（日本時間）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

- ▶ 従来のカーボンナノチューブの発光は、線幅が広がったため、波長分散による通信帯域や伝送距離の低下、波長多重化が困難といった問題があり、光通信への実用化が進んでいなかった。
- ▶ シリカトロイド共振器を用いることで、これまでで最小線幅（Q値：2万超）を有するカーボンナノチューブ発光を得ることに成功した。
- ▶ シリコンチップ上に作製した微小の共振器を用いた素子であることや、通信波長帯である $1.55\mu\text{m}$ 帯の狭線幅発光であることから、チップ上に集積した光回路や光通信素子などの集積光デバイスへの応用が期待される。

2. 研究背景

単層カーボンナノチューブは、原子一層の炭素シートを筒状に丸めた一次元構造を持つナノ材料ですが、その中でも半導体のカーボンナノチューブは、光通信で用いられる波長 $1.55\mu\text{m}$ 帯の通信波長帯で発光することから、化合物半導体に代わる次世代の光通信材料やシリコンチップ上での集積光デバイス用材料として期待されています。また、近年、カーボンナノチューブは、量子光源用材料としても世界的に注目されており、当研究グループにおいても、室温かつ通信波長帯の単一光子源の開発に成功するとともに、高効率で高純度な単一光子が室温・通信波長帯で発生可能なことも示してき

ました。しかし、カーボンナノチューブからの発光は、得られる発光をそのまま利用した場合、発光ピークの線幅が数十 nm 程度と非常に広いことから、そのまま光通信等に利用した場合は、波長分散などの影響で通信帯域や伝送距離の低下を招いたり、波長多重化が困難であったりといった問題がありました。そのため、カーボンナノチューブは、従来の半導体では得られない優れた特性があるにもかかわらず、光通信や量子情報技術分野へは、実用化がほとんど進んでいないのが現状です。

3. 研究内容・成果

今回、狭線幅の発光を得る新たな技術として、シリカトロイド共振器というリング状の共振器をシリコンチップ上に形成することにより、通信波長帯である 1.55 μm 帯において、これまでで最も狭線幅のカーボンナノチューブ発光を得ることに成功しました。ここでは、図 1 に示すように、シリコンチップ上に形成されたシリカトロイド共振器に対して、カーボンナノチューブを形成し、トロイド共振器側面に近接させたテーパファイバを介して励起光と結合しました。その結果、励起光が共振器と共振する条件において高輝度で狭線幅のカーボンナノチューブからの発光（フォトルミネッセンス）が得られました。この発光をテーパファイバを通して出射させて発光スペクトルを観測した結果、半値幅が 74pm という極めて狭い線幅のカーボンナノチューブ発光を得ることに成功しました。線幅を表す Q 値としては、2 万を超える極めて大きな値を示しており、これまで報告されてきたシリコンディスク共振器での Q 値（約 5 千）を大きく上回る、カーボンナノチューブ発光において最高の Q 値を得られました。また、発光の偏光状態も詳細に検討した結果、励起光の偏光方向によらず、安定して基板と平行方向の偏光が得られることも明らかにしました。

4. 今後の展開

現在、光通信などの情報社会を支える光源技術では、次世代技術としてチップ上の集積光デバイスの実用化が急務となっているが、現在の光デバイスで用いられている化合物半導体は、シリコンチップ上にダイレクトに形成できないといった問題を抱えています。そのため、次世代集積光デバイスに向けた新たな材料系として、カーボンナノチューブ光源の実用化が期待されています。今回開発したトロイド共振器による超狭線幅のカーボンナノチューブ発光は、シリコンチップ上に形成可能なことに加えて、通信波長帯の 1.55 μm 帯で発光が得られていることから、今後、チップ上に集積した光回路や光通信素子などの集積光デバイスや、カーボンナノチューブ量子光源との融合による量子情報素子など、さまざまなチップ上集積光デバイスへの応用が期待されます。

本研究の一部は、科学研究費補助金、科学技術振興機構（JST）A-STEP 事業、スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク、文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業（NIMS 微細加工プラットフォーム）などの支援を受けて実施されました。

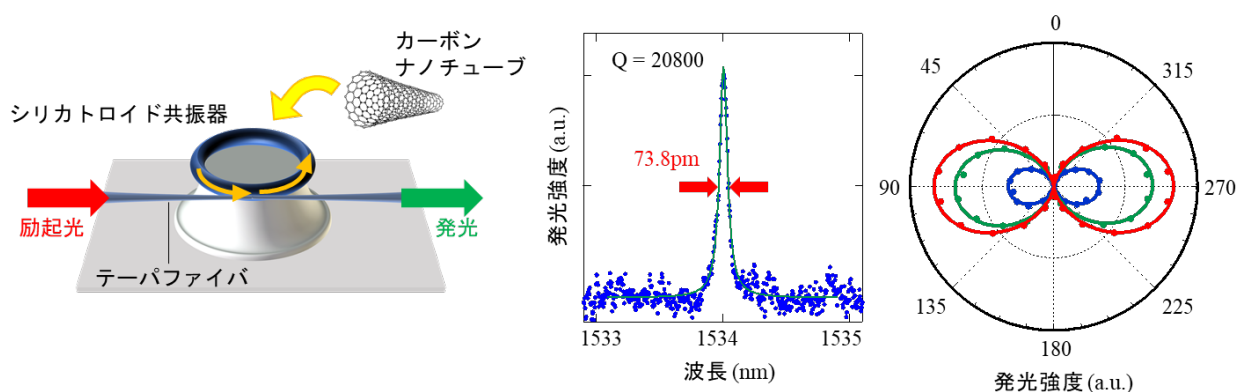


図 1 左図：シリカトロイド共振器によるカーボンナノチューブ発光測定の様式図。
 中図：観測したカーボンナノチューブの狭線幅発光。
 右図：励起光の偏光を 0~90 度回した際のカーボンナノチューブ発光の偏光依存性。

<原論文情報>

“Carbon Nanotubes Coupled with Silica Toroid Microcavities as Emitters for Silicon-Integrated Photonics”

Ren Tokunaga, Kotomi Kinoshita, Riku Imamura, Keigo Nagashima, Ryouhei Imafuku, Kenta Nakagawa, Takasumi Tanabe, Hideyuki Maki, accepted.

<https://doi.org/10.1021/acsanm.2c02431>

<用語説明>

(注1) シリカトロイド共振器

ガラスと同一材料のシリカを用いて、シリコンチップ上に作製したドーナツ形状の光共振器。テーパファイバなどによって光を導入することにより、光を閉じ込めることができる。

(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、後述の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。また、シリコンフォトンクス(注4)においては、通信波長帯でシリコン中の光伝送ロスが小さいことから、シリコンチップ上の光集積回路でも重要となる波長帯である。

(注3) 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1nm程度の一次元構造を有している。

(注4) シリコンフォトンクス

シリコンチップ上での微細加工技術を用いて、高集積な光技術を実現する新たな光デバイス技術。従来の集積回路では、シリコン半導体チップ上に集積化された電子デバイスによって信号の送受信や演算を行ってきたが、高速化と低消費電力化の両方を進めるには限界があることから、次世代の集積デバイス技術として、その一部を光に置き換える技術が注目されている。

(注5) Q値

共振状態を表す指標であり、光共振器においては、Q値が高いほど狭線幅の共振を意味する。

※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 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(望月)

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