



2020年8月13日

報道関係者各位

慶應義塾大学

## シリコン光回路に集積した高効率・狭線幅カーボンナノチューブ光デバイス —通信波長駆動により光集積回路・量子暗号チップへの応用が可能に—

慶應義塾大学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）をシリコンチップ上に形成した光デバイス（シリコンフォトニクス：注2）と融合し、通信波長帯（注3）の光のみで駆動する狭線幅光源を実現しました。本技術は、シリコンチップ上に集積した光集積回路や量子暗号通信（注4）用チップなど、新たなシリコンチップ上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は、光通信やシリコンフォトニクス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、量子暗号などの量子情報応用も期待されています。しかし、これまでのシリコン上でのカーボンナノチューブ光デバイスは、シリコン光回路とのダイレクトな結合を実現していないものが多く、シリコンフォトニクスと結合した素子においても、チップ上部からの外部光励起や通信波長以外の波長での励起駆動などから、オンチップの光デバイス化が困難なものばかりでした。

今回、シリコンチップ上に光導波路及びリング共振器・ディスク共振器を形成したシリコンフォトニクスデバイスに対して、共振器上へカーボンナノチューブをダイレクトに形成することで、励起光と PL 発光を全てシリコン導波路を介してインラインで入出力し、全ての励起・発光が通信波長帯で駆動できるチップ上カーボンナノチューブ光源の開発に成功しました。本技術を用いることにより、カーボンナノチューブをシリコンフォトニクス用光源として利用することが可能となることから、次世代の高速・高集積・低消費電力の集積チップ技術として期待されるシリコンフォトニクスをベースにした光集積回路・光インターコネクト（注5）や、現在実用化が進む量子暗号技術において室温・通信波長帯で動作可能な量子暗号チップなど、様々なチップ上集積光デバイス技術への応用が期待されます。

本研究成果は、2020年8月5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

- ▶ 光通信やシリコンフォトニクス、単一光子を用いた量子情報デバイス用光源として、カーボンナノチューブが注目されている。
- ▶ シリコン光集積回路上でインライン動作し、通信波長帯の光のみで駆動するカーボンナノチューブ光源デバイスを実現した。
- ▶ 共振器とのダイレクトな結合により、発光の増強（34倍）や狭線幅発光（Q値：5700）を実現した。
- ▶ 次世代の集積デバイスとして期待されるシリコン上での光集積回路や光インターコネクト、チップ上で動作する量子暗号チップなどの新たなチップ上集積光デバイスへの応用が期待される。

### 2. 研究背景

次世代の半導体集積技術として、現在の集積化された電子デバイスに代わり、シリコンチップ上に光回路を集積するシリコンフォトニクスが注目されており、集積回路の高速化と低消費電力化を両立する技術として、シリコンチップ上での光集積回路やチップ内・チップ間等での光配線技術（光イン

ターコネク)などの集積光デバイス技術の実現が急務となっています。また、近年になり、従来の古典的な光通信だけではなく、量子光を用いた量子情報技術が注目されており、単一光子を用いた量子暗号技術などが実現するなど、今後大きな発展が期待されています。しかし、従来の光デバイスで用いられてきた化合物半導体材料は、シリコン上への直接成長が難しくシリコンチップ上へダイレクトな形成が難しいことや、液体ヘリウムを用いた極低温でしか量子光が得られないなど、材料固有の問題を抱えており、次世代のシリコンチップ上集積光デバイスの実現には、全く新しい材料系での光デバイス開発が望まれています。シリコンフォトニクスと融合したシリコン上光集積デバイスを実現するためには、シリコン中での伝搬損失が小さく伝搬が可能な、波長 1.3 $\mu\text{m}$  帯や 1.55 $\mu\text{m}$  帯の通信波長帯での光デバイス構築が望まれます。

一方、カーボンナノチューブは、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あり、特異な物理的・化学的・光学的・機械的特性を有していることから、従来の化合物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。半導体カーボンナノチューブは、直径に反比例したバンドギャップを有しており、通信波長帯で光吸収・発光することから、新たな光デバイス用材料として、光通信やシリコンチップ上での光集積デバイスへの応用が期待されています。さらに、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、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するとともに、最近になり、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を示すなど、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を報告しています\*。加えて、カーボンナノチューブは、従来の半導体材料と比べてシリコン上へも容易に形成することが可能であり、直接成長や散布法によって、ダイレクトにシリコンチップ上に形成することが可能です。以上のように、カーボンナノチューブは、シリコン上に直接形成しやすく、シリコンフォトニクスなどで必要となる通信波長帯での吸収・発光が得られることに加えて、このような発光特性や量子物性が室温で得られることから、次世代の高集積光デバイス用材料に有利な特徴を有しています。そのため、シリコンフォトニクスとダイレクトに結合させて融合できれば、シリコンチップ上での光集積回路や量子暗号用チップなど、新たなチップ上光デバイスを実現することができます。しかし、これまでのシリコンチップ上でのカーボンナノチューブ光デバイス研究では、シリコンフォトニクスとのダイレクトな結合を実現した研究は少なく、さらに、ダイレクトな結合をした光デバイスにおいても、チップ上部からの励起光照射や発光取り出しといった通信波長以外での間接的な光の入出力が行われてきました。そのため、シリコンチップ上シリコンフォトニクスとカーボンナノチューブをダイレクトに結合させて、チップ上でインラインでの光集積デバイスを通信波長帯で実演した例はほとんど知られておらず、シリコンチップ上での光集積デバイス化が困難である報告が多くみられました。

※プレスリリース「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」(2020年1月14日配信)

<https://www.keio.ac.jp/ja/press-releases/2020/1/14/28-66850>

### 3. 研究内容・成果

今回、新たな技術として、通信波長帯である 1.55 $\mu\text{m}$  帯で発光するカーボンナノチューブをシリコンフォトニクス上に形成した発光デバイスを開発しました。ここでは、幅 440nm の直線シリコン導波路に対して、10 または 20 $\mu\text{m}$  のリング共振器やディスク共振器を配置したシリコンフォトニクスデバイスを作製し、この共振器上の一部にカーボンナノチューブをダイレクトに形成しました(図 1)。このような光デバイスに対して、励起光として通信波長帯の波長 1.3 $\mu\text{m}$  の光をシリコン光導波路に入射した場合、共振器の共振波長を満たす励起光がシリコン導波路を通じてインラインで共振器に入射され、励起光が共振器内に閉じ込められます(図 2 上図)。そのため、共振器に閉じ込められた励起光によってカーボンナノチューブが高効率で光励起することが可能となったことから、カーボンナノチューブから 1.55 $\mu\text{m}$  帯の通信波長帯において、増強されたフォトルミネッセンス(PL)発光を得ることができました。カーボンナノチューブからの PL 発光も共振器内で閉じ込められることから、共振波長を満たす PL 発光のみがシリコン光導波路へ取り出され、狭線幅化された通信波長帯 PL 発光をチップ上からインラインで取り出すことに成功しました。リング共振器を用いたデバイスにおいて、

得られた発光スペクトルを図2左下図に示しますが、励起光の非共振条件ではカーボンナノチューブからの発光が全く得られないのに対して、共振条件では、非常に強く狭線幅の発光が得られることが分かりました。また、共振器が無い通常のPL発光と比べた場合、今回得られた共振器からの発光は、極めて細い線幅の発光が得られるとともに、その他の定量的な発光実験から共振器内のPL発光は、共振器外と比べて34倍の発光増強が得られることも分かりました。また、ディスク形状を有するディスク共振器を用いて同様のPL発光測定を行ったところ、さらなる狭線幅化に成功し、発光の線幅の指標となるQ値(Q値が大きいほど狭線幅化している)は、5700という極めて高いQ値が得られ、実用的に重要となるインライン・通信波長帯でのデバイスとしては、これまでで最も高いQ値であり、従来デバイスと比べて高品質な光デバイスであることが示されました。このような狭線化されたカーボンナノチューブからの発光がシリコンチップ上でダイレクトに得られる技術は、今後、シリコンチップ上での光集積回路や光インターコネクタなどのシリコンフォトニクス、量子暗号チップ等のチップ上の量子情報デバイス開発への応用が期待されます。

#### 4. 今後の展開

現在の情報化社会を支える集積電子回路は、小型化と高速化の両立で限界を迎えつつあることから、それを打破する次世代のデバイス技術として、集積化された光集積技術が注目されています。光を用いた情報処理通信技術は、現在の光ファイバーによる長距離通信にとどまらず、今後は、チップ内・チップ間などの光インターコネクタや光集積回路といった、シリコンチップ上での光集積技術へと発展していくと考えられています。しかし、技術的には、現在主流の光デバイス材料である化合物半導体をシリコン上に集積することが困難なことに起因して、光集積デバイスは、一般の電子機器等に実用化する目途が立っていないのが現状です。本研究のチップ上カーボンナノチューブ光源技術は、高集積・狭線幅・高効率な光源をシリコンチップ上において通信波長帯で励起・発光駆動できることを実証したことから、化合物半導体に代わる新たな材料系として、カーボンナノチューブを用いることで、シリコンチップ上に高集積な光デバイスを構築できることを示したものです。そのため、さらなる情報化社会の拡大が見込まれる中、次世代の集積光デバイスの実現に貢献できる新たな技術であると期待されます。さらに、カーボンナノチューブは、従来の半導体では実現できない、「室温・通信波長帯」での量子光源となることが既に示されており、当研究グループも世界に先駆けて室温・通信波長帯での高効率・高純度な単一光子源になることを示しています。このようなカーボンナノチューブの量子技術を本研究のシリコンチップ上の集積光技術と融合することで、量子暗号チップのような全く新しい量子情報デバイスの開発も可能になると考えられます。そのため、現在注目される量子暗号などの量子情報分野において、量子暗号装置をワンチップ化するような新たな量子情報デバイス開発にも応用できると期待されます。

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、地方独立行政法人神奈川県立産業技術総合研究所(KISTEC)戦略的シーズ育成事業、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)の支援を受けて実施されました。

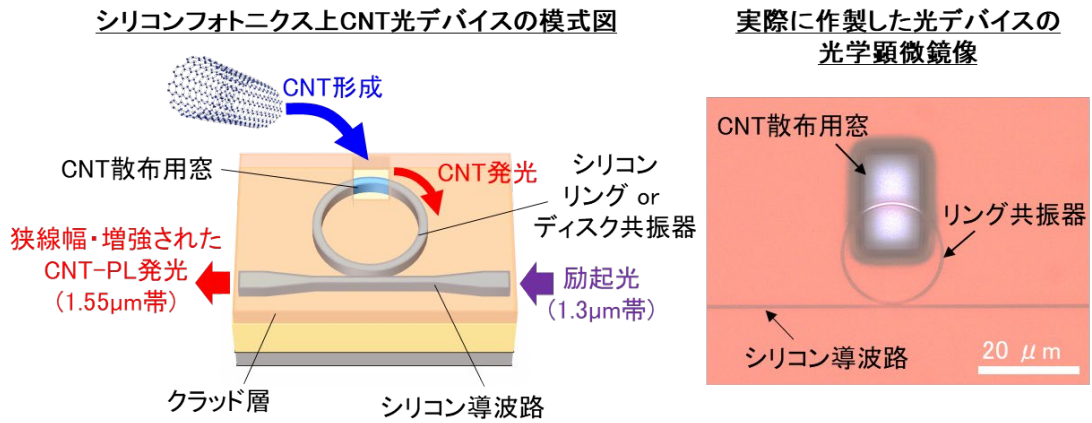
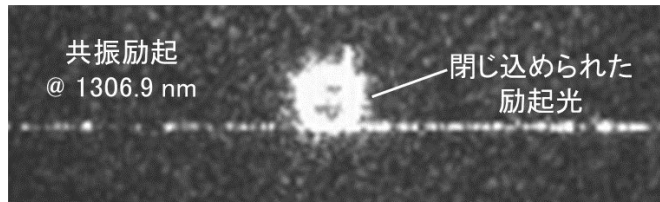
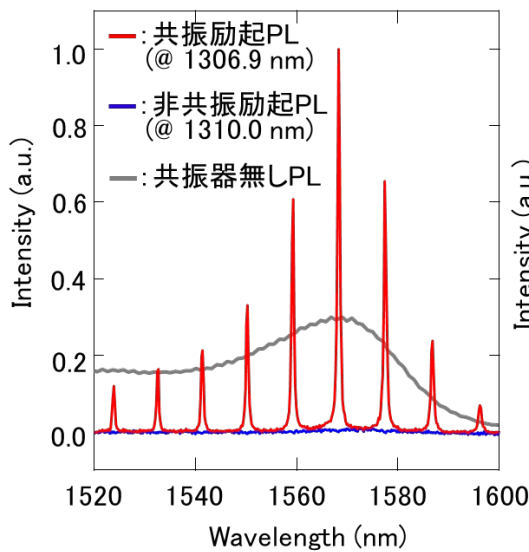


図1 左図：開発したシリコンフォトニクス上カーボンナノチューブ光デバイスの模式図。右図：実際に作製した光デバイスの光学顕微鏡像。

**励起光がリング共振器に閉じ込められた様子  
(共振励起時の近赤外カメラ像)**



**リング共振器からの狭線幅  
CNT-PL発光のスペクトル**



**ディスク共振器からの  
狭線幅発光**

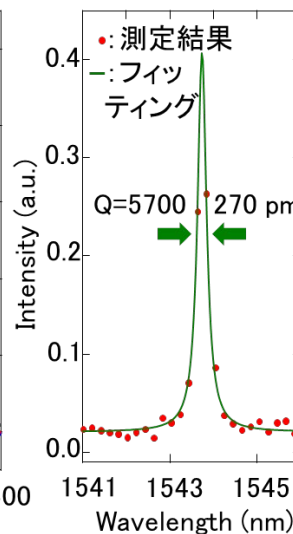


図2 上図：共振励起時の近赤外カメラ像。励起光が共振器に閉じ込められている様子が分かる。  
左下図：リング共振器デバイスにおいて、共振励起時、非共振励起時、共振器無しのカーボンナノチューブからの PL 発光スペクトル。非共振励起時は、共振器内に光が入らないために全く発光が観測されないのに対して、共振励起時は、共振器内に励起光が閉じ込められて、高効率で狭線幅の発光が観測される。この発光の線幅は、共振器無しの PL 発光と比べて大幅に狭線化されていることが分かる。  
右下図：ディスク共振器における狭線幅発光スペクトル。発光半値幅 270pm の非常に狭線幅の発光が得られ、線幅の鋭さを表す Q 値は 5700 を達成した。

<原論文情報>

“Efficient and Narrow-Linewidth Photoluminescence Devices Based on Single-Walled Carbon Nanotubes and Silicon Photonics”

Naoto Higuchi, Hiroto Niiyama, Kenta Nakagawa, and Hideyuki Maki, ACS Applied Nano Materials, accepted.

<https://dx.doi.org/10.1021/acsanm.0c01296>

<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) シリコンフォトニクス

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3) 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、シリコンフォトニクスにおいては、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4) 量子暗号通信

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を用いて、盗聴の検知による絶対的に安全な暗号光通信（鍵配信）を行う技術。様々な手法による量子暗号技術が開発されているが、地上では、光ファイバーを用いて単一光子を送受信する手法が主に用いられており、通信波長帯での単一光子の送受信が必要となる。

(注4) 光インターコネクト

チップ内、チップ間、ボード間、機器間などにおいて、従来の電気配線に代わり、光配線によって情報通信を行う技術。

※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](mailto: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 (澤野)

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