

概要

2016 年 4 月 10 日から 6 月 5 日までの約 2 ヶ月間、米国ニューメキシコ州にあるロスアラモス国立研究所(LANL, Los Alamos National Laboratory)の Stephen K. Doorn 博士の研究室に滞在し、同研究所の Han Htoon 博士にも協力して頂きながら、ドーピングされたカーボンナノチューブとシリコン微小共振器との光結合に関する研究を行った。

研究の背景と目的

近年、カーボンナノチューブにドーピングを施すことにより表面に特定の種類の欠陥を導入し、それによって発光効率の劇的な向上や単一光子生成が実現できることが報告され、カーボンナノチューブの光デバイスへの応用へ向けた新たな手法として注目を集めている。特に、Doorn 博士のグループでは 2015 年にこの手法を用いてカーボンナノチューブを用いた室温における単一光子生成に成功している。また一方で、シリコンフォトニクス技術を用いてカーボンナノチューブの発光を増強する研究も注目されており、近年では 1 本のナノチューブとフォトニック結晶微小共振器とを高効率でカップリングさせることも実現している。

本研究では上に挙げた 2 つの手法を組み合わせることにより、さらに発展的なカーボンナノチューブの発光特性の向上を試みる。ドーピングを施したカーボンナノチューブをシリコン微小共振器の上に塗布し、ドーピングによって生じた欠陥準位からの発光を共振器モードとカップリングさせることで更なる発光効率の向上、及び単一光子生成効率の向上が期待される。

滞在中の研究実施内容

予め当研究室でドーピング準位に相当する波長に共振波長を合わせた 2 次元フォトニック結晶微小共振器を SOI(silicon-on-insulator)基板上に作製し、LANL に持参した。LANL では Doorn 博士の研究室でジアゾニウム塩を用いてドーピングを施したミセル化カーボンナノチューブを用意してもらい、発光スペクトルからドーピング準位の存在を確認した。

共振器を作製した基板上へのナノチューブ溶液の塗布は、当初はスピコート及びドロップキャストによる方法を試みたが、塗布されるナノチューブの密度をコントロールすることが難しく、また基板やサンプル溶液の消費が激しいため、共振器とのカップリングに適切な条件を見出すことは困難であることが判明した。そこで Htoon 博士から助言を頂き、マイクロピペットを用いた局所的なサンプル塗布を試みることにし、光学顕微鏡、マイクロマニピュレータ、マイクロピペットからなるマイクロインジェクションシステムを新たに構築した(図 1)。このシステムではマイクロピペットの先端の直径を変えることで様々なスケールの塗布が可能となるが、試行錯誤の結果、比較的大きな直径のピペット(~10 μm)を用いて基板上の複数の共振器に渡る範囲を一度に塗布する方法が適していることがわかった。この方法を用いると、基板上の場所によってナノチューブの密度にゆるやかな違いが生じるため、その中から適切にカップリングしたデバイスを見つけることが可能となる。

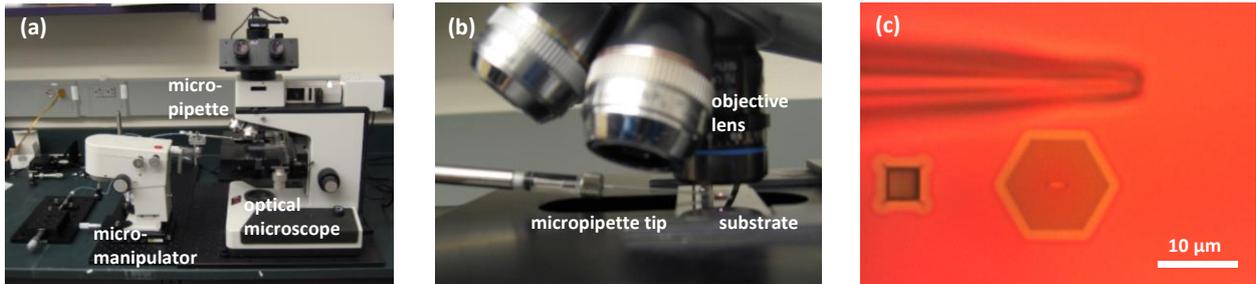


図 1 今回新たに構築したマイクロマニピュレーションシステム。(a) システムの全体像。(b) マイクロピペットを基板に接近させている様子。対物レンズは作動距離が 3.4 mm と長いものに交換した。(c) 本システムを用いてシリコン微小共振器に局所的な溶液塗布を行っている様子を示す光学顕微鏡像。この像の中のマイクロピペットは基板からわずかに浮かせているため、ピントが合っていない。

その後、カーボンナノチューブを塗布した共振器に対して光学測定を行い、発光スペクトルを確認した。波長 820 nm のレーザー光を対物レンズを用いて共振器の中心にフォーカスさせて照射し、デバイスからの発光を分光器に入射させスペクトルを得る。塗布されたカーボンナノチューブのうち、ドーピングの影響を受けていない部分からの発光は波長 1000 nm の位置に比較的細いピークとして現れ、ドーパントからの発光は 1280 nm 近辺に幅の広いピークとして現れる。共振器のモードはドーパントの発光波長に合わせて設計されており、今回作製したサンプルのうちいくつかのデバイスでは元のスペクトルの上に非常に細くて大きいピークが重なったスペクトルが得られ、カーボンナノチューブのドーピング準位からの発光が期待通りにシリコン微小共振器と結合していることが確認された。

今後はこのように作製したデバイスについて、パルスレーザーを用いた発光寿命測定、及び光子相関測定による単一光子検出を行い、共振器とのカップリングの影響を定量的に評価する予定である。

ロスアラモスでの研究生活

今回私の訪問を受け入れて頂いた LANL は米国でも有数の研究機関であり、非常に優れた研究環境が整えられていることを感じた。また、私の実験をサポートしてくれたのは主にポスドクの方々であり、年齢が近いこともあって親しみやすく、なんでも相談することができてとても助かった。

ロスアラモスは大きな街ではないが静かで治安が良く、また自然に溢れていてとても過ごしやすい場所であった。私は研究所の近くの家で部屋を借りたのだが、その家のオーナーの方、及びルームメイトの方々は皆とても親切で、私は何の不自由も無く 2 ヶ月間を過ごすことができた。また、その家で飼われていた 2 匹の犬、ルイスとカイはいつも私と遊んでくれて、とても楽しい時間を過ごすことができた。

謝辞

今回の私の訪問を受け入れて頂いた Stephen K. Doorn 博士、及び共同で実験のサポートをして頂いた Han Htoon 博士に深くお礼申し上げます。また LANL での実験装置の使い方やカーボンナノチューブに対するドーピングについて指導して頂いたポスドクの Nicolai さんと Xiaowei さん、及び当研究室でフォトニック結晶微小共振器の作製の大部分を手助けしてくれた修士課程の町屋君、木村君に感謝致します。最後に、長期海外派遣の機会を提供して下さった MERIT の方々に感謝申し上げます。