

シリコンナノビーム共振器による 架橋カーボンナノチューブの発光増強

加藤 雄一郎*

Enhancement of light emission from suspended carbon nanotubes by silicon nanobeam optical resonators

Yuichiro Kato*

Advances in silicon photonics have enabled on-chip integration of various devices, expanding the capabilities of monolithic photonic circuits. For further scaling and increased functionality, however, integration of nanoscale emitters is desirable. In this regard, carbon nanotubes are promising because they are room-temperature telecom-band emitters that can be directly synthesized on silicon and be electrically driven. In particular, as-grown air-suspended carbon nanotubes show excellent optical properties, making them ideal for use as individual emitters. Here we demonstrate integration of individual light-emitting carbon nanotubes with silicon nanobeam optical resonators. In order to achieve efficient coupling, we utilize photonic crystal cavity structures that have high quality factors. We fabricate the devices from silicon-on-insulator substrates by using electron beam lithography and dry etching to form the nanobeam structure. The buried oxide layer is removed by wet etching, and carbon nanotubes are grown onto the cavities by chemical vapor deposition. We perform photoluminescence imaging and excitation spectroscopy to characterize the optical properties of individual nanotubes coupled to nanobeam resonators.

1. 単層カーボンナノチューブとシリコンフォトニクス

単層カーボンナノチューブは、よく光るナノ材料である。グラフェンを筒にした構造を持つカーボンナノチューブは、その円筒周に相当するベクトル \mathbf{C} を指定する整数 (n, m) の組み合わせ(カイラル指数)により電子構造が大きく変わり、金属にも半導体にもなりうる事が知られている(図1)。このうち、半導体カーボンナノチューブは直接バンドギャップを持ち、通信波長帯を含む近赤外領域で発光し、電極を取り付けるのが比較的容易であるため、オプトエレクトロニクスへの応用が期待されている。特に、成長直後の高品質で清浄なカーボンナノチューブを架橋させたものは極めて発光効率が高い。

一方で、シリコンフォトニクスの近年の発展は目覚しく、電子回路と光回路を融合させた光配線などが利用できる新しい情報通信集積素子への応用が期待されている。しかし、シリコンは間接遷移半導体であるため、電子と正孔の再結合による発光は効率が低く、発光素子には適さない。そこで、シリコンフォトニクスに集積可能なナノ光源として、シリコン基板上で直接合成可能であるカーボンナノチューブの利用が考えられる⁽¹⁾。

すでに、フォトニック結晶共振器を用いたミセル化カーボンナノチューブの発光増強^(2,3)や単一カーボンナノチューブと微小ディスク共振器の光結合⁽⁴⁻⁶⁾は実現しており、単層カーボンナノチューブとシリコンフォトニクスは相性が良いことが分かっている。そこで、本研究では単一の架橋カーボンナノチューブと強く結合する微小共振器として、シリコンナノビーム共振器に着目し、ナノチューブの発光増強を試みた。

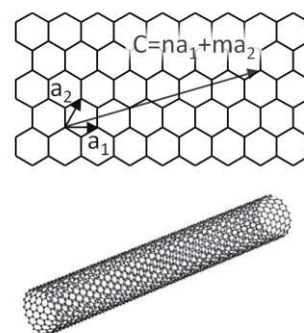


図 1. 単層カーボンナノチューブの構造。筒にしたときに円周に相当するベクトル \mathbf{C} は基底ベクトル \mathbf{a}_1 と \mathbf{a}_2 を用いてカイラル指数 (n, m) で指定でき、これによって構造が一意に定まる。

2. シリコンナノビーム共振器

本研究で用いるナノビーム共振器は、一次元フォトニック結晶共振器であり、シリコンナノビームに周期的に穴を開けることによってフォトニックバンドギャップを形成し、中央部分でその周期を変調させることにより光閉じ込めを実現している。この構造では周囲が自由空間になっており、架橋ナノチューブと結合させるために理想的な形状になっている。

ナノビーム共振器の作製では、シリコン・オン・インシュレータ基板に電子線リソグラフィによりナノビームのパターニングを行い、ドライエッチングによりトップシリコン層をエッチングする。ナノビームの下部の埋め込み酸化膜をフッ酸でエッチングすることによりナノビームを完成させる (図2)。

作製した共振器は顕微フォトルミネッセンス分光に評価した。図3に共振器のスペクトルを示す。目的とするナノチューブの発光波長内にモードがあり、十分高いQ値を持つ共振器が作製できていることが確認できた。

3. 共振器による架橋カーボンナノチューブの発光増強

再度デバイス上に電子線リソグラフィを行なうことにより、触媒を配置した。図2の共振器の上下に見える黒い正方形の領域が触媒である。触媒を中央部分にのみ配置することにより、共振器との結合確率を向上させる狙いである。アルコール化学気相成長法により合成を行い、共振器部分へ単一カーボンナノチューブを架橋させる。

共振器部分にナノチューブが架橋したデバイスについて、顕微フォトルミネッセンス測定を行った結果が図4である。カーボンナノチューブの自然線幅は10 nm程度であり、この線幅の中に共振器モードとの結合により更に細い発光ピークが観測できた。ピークの高さは通常カーボンナノチューブのフォトルミネッセンス強度の数倍以上に増強されていることが確認できた。

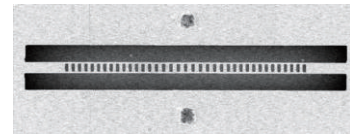


図2. デバイスの走査電子顕微鏡像。

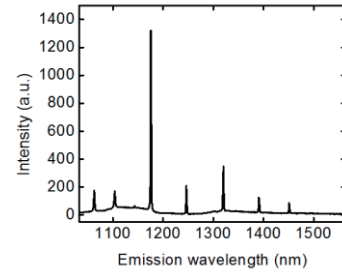


図3. ナノビーム共振器のフォトルミネッセンススペクトル。多数のモードが観測され、Qは1000~3000程度である。

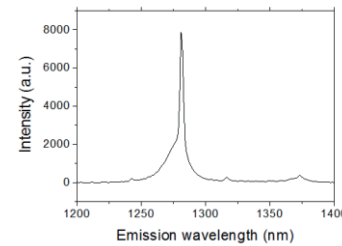


図4. カーボンナノチューブを架橋させたデバイスのフォトルミネッセンススペクトル。

REFERENCES

- (1) Y. K. Kato, "Optical coupling of carbon nanotube emission to silicon photonic structures", 5th Workshop on Nanotube Optics and Nanospectroscopy (WONTON13), Santa Fe, New Mexico (June 19, 2013) (invited).
- (2) R. Watahiki, T. Shimada, P. Zhao, S. Chiashi, S. Iwamoto, Y. Arakawa, S. Maruyama, Y. K. Kato, "Enhancement of carbon nanotube photoluminescence by photonic crystal nanocavities", *Appl. Phys. Lett.* 101, 141124 (2012).
- (3) R. Watahiki, T. Shimada, P. Zhao, S. Chiashi, S. Iwamoto, Y. Arakawa, S. Maruyama, Y. K. Kato, "Enhancement of carbon nanotube photoluminescence by photonic crystal nanocavities", 第74回応用物理学会学術講演会, 京田辺市 (2013年9月17日).
- (4) S. Imamura, R. Watahiki, R. Miura, T. Shimada, Y. K. Kato, "Optical control of individual carbon nanotube light emitters by spectral double resonance in silicon microdisk resonators," *Appl. Phys. Lett.* 102, 161102 (2013).
- (5) S. Imamura, R. Watahiki, R. Miura, T. Shimada, Y. K. Kato, "Optical control of individual carbon nanotube emitters by spectral double resonance in silicon microdisk resonators", 第74回応用物理学会学術講演会, 京田辺市 (2013年9月17日).
- (6) S. Imamura, R. Watahiki, R. Miura, T. Shimada, Y. K. Kato, "Optical control of individual carbon nanotube emitters by spectral double resonance in silicon microdisk resonators", FIRST International Symposium on Topological Quantum Technology, Tokyo, Japan (January 29, 2014).
- (7) R. Miura, S. Imamura, T. Shimada, R. Ohta, S. Iwamoto, Y. Arakawa, Y. K. Kato, "Photoluminescence microscopy on air-suspended carbon nanotubes coupled to photonic crystal nanobeam cavities," March Meeting of the American Physical Society, Denver, Colorado (March 7, 2014).