

研究報告書

「ナノカーボン光・電子量子デバイス開発と量子暗号通信応用」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2015 年 10 月～2019 年 3 月

研究者: 牧 英之

1. 研究のねらい

近年の情報化社会の急速な進展に伴って、様々なサービスや機器がインターネットを介して行われる時代となり、従来にも増して、高いセキュリティを確保した情報通信が要求される新たな時代を迎えた。このようなセキュリティを確保する重要な要素として暗号通信があるが、現在の暗号化技術は、量子コンピュータの実現により破られてしまう可能性があり、より安全な暗号通信の実現が急務とされている。このような中、高いセキュリティを有する暗号化技術の一つとして、量子暗号通信が注目されている。量子暗号通信は、光の最小単位である光子一個に情報を乗せることで絶対的に安全な暗号通信を実現する技術であり、量子力学に関する基礎研究分野だけではなく、実用化可能な光通信技術として近年注目されている。

量子暗号通信の実用化には、光ファイバー低損失領域(通信波長帯)である波長 1.3mm 帯や 1.55mm 帯での長距離単一光子伝送を行うため、効率よく確実に単一光子を発生させる単一光子源が望まれている。このような単一光子発生源としては、半導体量子ドットやダイヤモンド中欠陥(NV 中心)などが報告されている。しかし、化合物半導体では 10K 程度の極低温でのみでしか動作しないことから高コストの冷却が必要となっていること、GaN 系や NV 中心では、波長が可視域であり通信波長帯での発光は得ることが出来ない、といった問題を抱えており、室温かつ通信波長帯での単一光子発生は実現できていない。一方、我々は、最近になり、カーボンナノチューブを用いることで、「室温・通信波長帯」において単一光子発生が可能であることを世界で初めて示した。この成果は、カーボンナノチューブに限らず全ての物質系を含めても世界で初めて「室温・通信波長帯」を実現した成果であり、カーボンナノチューブが量子暗号通信に対して極めて有利な材料系であることを示した決定的な成果である。そこで本研究では、申請者のこれらの成果をさらに進展させ、カーボンナノチューブやグラフェンといったナノカーボン材料を用いて、室温・通信波長帯における高効率な単一光子発生技術の構築、ナノカーボン材料とシリコンフォトニクスとの融合による高集積光デバイス技術構築、シリコンチップ上量子光デバイス開発に関する研究を進めた。これにより、従来の固体半導体材料系では実現できない、ナノカーボンデバイス独自の量子光デバイスの開発を目指した。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、低次元ナノカーボン材料として知られるカーボンナノチューブやグラフェンを用いることで、室温かつ光通信波長帯で動作可能な単一光子光源や量子暗号に向けた要素技術となる光デバイスを提案する。ここでは、光励起・電流注入による高効率・高歩留りの室温・通信波長

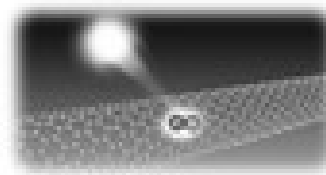


図 1 単一光子発生の概念図

帯単一光子発生技術を構築するとともに、光ファイバー・共振器・導波路との融合デバイスの開発、ナノカーボン・超伝導体複合デバイスによる単一光子検出器開発を進めた。これにより、高効率の単一光子送受信デバイス開発やチップ化を進めて、超小型・超高速・低コストの量子暗号通信技術に貢献することを目指して研究を進めた。

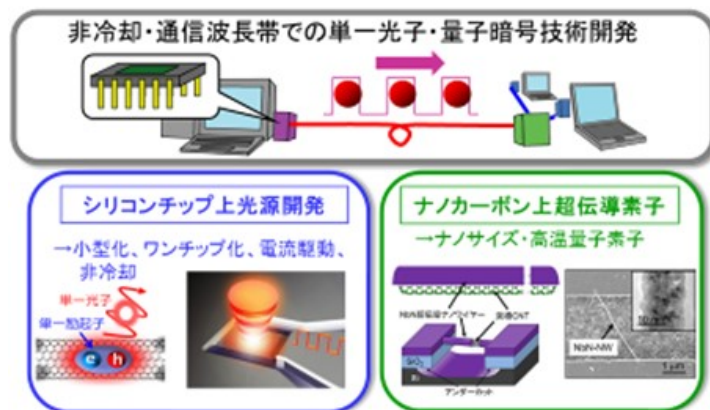


図 2 本研究概要

我々は、これまでの研究で、カーボンナノチューブを用いることで、「室温・通信波長帯」において単一光子発生が可能であることを世界で初めて示し、カーボンナノチューブが量子暗号通信に対して極めて有利な材料系であることを示してきた(図 1)。本研究では、申請者のこれらの成果をさらに進展させ、より高効率な単一光子発生技術の構築を行い、光励起や電流駆動での高い歩留りでの単一光子光源を実現する方法を提案するとともに、シリコンチップ上でのナノカーボン高集積光デバイスを実現することを目指した(図 2)。さらに、チップ上での量子デバイス実現を目指し、ナノカーボンをテンプレートとした極細超伝導ナノワイヤーを開発し、シリコン上での低次元超伝導特性の観測とその量子応用と目指して研究を進めた。本研究では、シリコンチップ上でのナノカーボン光源開発、ナノカーボンテンプレートによる超伝導ナノワイヤー開発等に成功したが、これらの詳細を下記に示す。

(2) 詳細

【シリコンチップ上でのナノカーボン光源開発】

本研究では、シリコンチップ上での光集積デバイス開発とそれによる光通信技術の構築を目指して研究を進めてきた。その中でも、光集積デバイスの中心的な役割を果たすものが光源技術であるが、本研究の目標である量子暗号技術といった光通信技術において、ナノカーボン材料を用いた光源技術が光通信に用いることが可能であることを実証することは、最重要課題である。そこで本研究では、シリコンチップ上にナノカーボン光源を集積する技術を構築し、それらが量子光技術や光通信技術に応用可能であることを実証することを目指した。

本研究では、シリコンチップ上での光源として、グラフェンを用いた超小型・超高速な黒体放射光源開発を行った。特性インピーダンス 50Ω に設計したコプレーナ導波路を用いたグラフェンデバイスを作製した。この発光素子では、グラフェンに電圧を印加することにより、通電加熱に伴う黒体照射によりグラフェンから発光が得られた(図 3)。さら

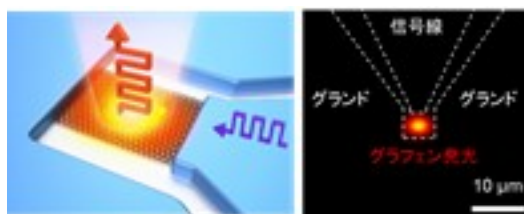


図 3 グラフェン光源の構造と発光の様子

に、本素子に対して、高速変調した電圧信号を入力して発光させ、発光素子の高速応答性を評価したところ、グラフェンの層数に依存して図4に示すような高速な発光特性が得られ、数 GHz 程度で高速変調可能であることを実験的に示した。このような高速応答性の理論的モデルの構築を進めた結果、この高速な発光は、従来の古典的な熱輸送モデルに基づく発光機構では説明することができないことを示し、これまで知られていなかった表面極性フォノンを経た量子的な遠隔熱輸送が発現していることを新たに発見し、この特異な熱輸送によって GHz オーダーの超高速のグラフェン黒体放射光源が可能であることを見出した(図5)。また、このモデルに基づいて、発光素子性能のグラフェン層数依存性の理論的な解明も進めた結果、グラフェン-基板間の接触熱コンダクタンスの違いによって発光性能が異なることを理論的に示すことにも成功した(図4)。

また、本研究では、ナノカーボン光源を用いた光通信実証実験も行った。上記のグラフェン光源を用いて、通常の光通信で用いられているフォトレシーバーを利用してリアルタイムの光通信実験を行ったところ、図6に示すように、1Mbpsでの光通信に成功した。この光源自体は、時間分解測定で1GHzでの連続変調が可能であることも示されていることから(図6下図)、1GHz程度での光通信も可能であることが示唆される。また、従来の化合物半導体の光源では実現できないような、シリコンチップ上での超高集積光源の実現を目指したところ、図7に示すように、ピッチ3 μm での高集積アレー光源を実証した。

これは、ナノカーボン材料の優れた微細加工性に起因して、従来の化合物半導体での発光素子と比べると、少なくとも100倍程度の高集積化が容易に実現できることを示している。また、ナノカーボン黒体放射光源は、酸素との反応を避けるために通常の測定は真空中で行っていたが、実用上は大気中動作が望まれるため、原子層堆積装置(ALD)によりアルミナキャップ層を設けて大気中動作可能な発光素子作製も試みた。その結果、図8に示すように、大気中でも長時間発光特性が変わらず、安定に大気中動作可能な発光素子開発に成功した。さらに、このような大気中動作素子が得られたことから、図8bに示すような、光ファイバーとのダイレクトな結合も可能になったため、レンズ等の光学素子を用いない、ダイレクトな光

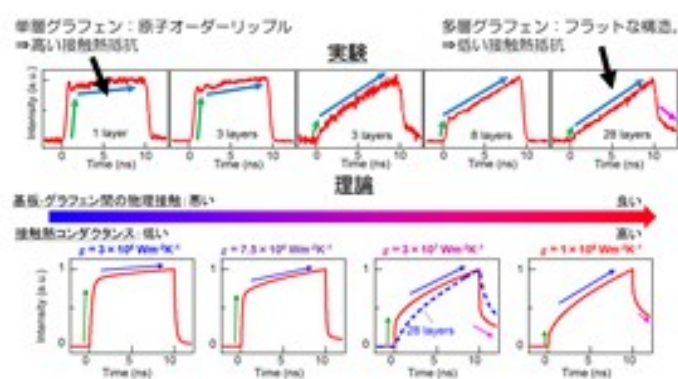


図4 発光の高速応答性の実験とシミュレーション結果

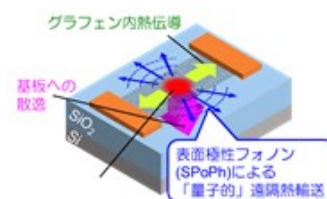


図5 新しい熱輸送モデル

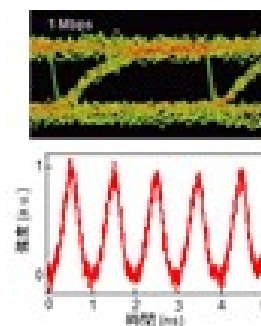


図6 光通信実験

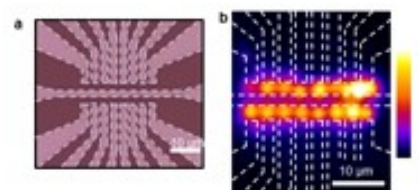


図7 グラフェンアレー光源

ファイバー結合を試みた。その結果、本素子が光ファイバーのコア径よりも小さいことを利用して、発光素子に光ファイバーを接触させるだけで、ダイレクトに光結合可能なことを示した(図 8c)。

以上のように、従来の化合物半導体では難しいシリコンチップ上での高集積光源技術を構築し、超高速で高集積光源をシリコンチップ上で実現し、実際に光通信、大気中動作、光ファイバーダイレクト結合、アレー化を実証した。本技術は、現在、次世代光技術として注目されているシリコンフォトニクスへの応用や、量子暗号通信用チップ開発を可能とする基本技術であり、今後、ナノカーボン材料が光通信技術に応用可能であることを示した。

以上のようなナノカーボン光素子とその応用に関しては、Nature Communications などの論文への掲載、特許申請、招待講演、プレスリリースを行った。^{1,3}

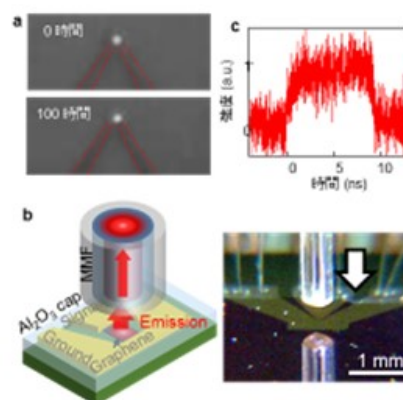


図 8 大気中動作の発光の様子と光ファイバーのダイレクト結合実験

【ナノカーボンテンプレートによる超伝導ナノワイヤー開発】

超伝導体は、マクロなサイズの量子現象に由来するものであることから、比較的大きなデバイスサイズでも量子現象が発現し、量子コンピュータなどの次世代量子デバイスで主役となっているが、超伝導体をさらに微細化してナノメートルオーダーとした場合、これまでのマクロな超伝導体では知られていない新しい超伝導の量子現象が現れ、新しい量子物理現象の観測や、高感度単一光子光検出といった量子デバイス開発が可能となる。しかし、超伝導体として知られる多くの材料は、半導体デバイスと比べて微細化が困難であり、量子現象が発現する 10 ナノメートルオーダーの低次元構造を容易に得られないことが、低次元ナノワイヤーを用いた量子デバイス開発を阻む障害となっている。本研究では、架橋したカーボンナノチューブをテンプレートとして超伝導材料である窒化ニオブを成長し、カーボンナノチューブ上に最小で約 10nm 幅の極細超伝導ナノワイヤーを形成することに成功した(図 9)。

この超伝導ナノワイヤーを電子デバイス化して測定したところ、低温にするほど超伝導状態が壊れて抵抗が上がるという超伝導-絶縁体転移や磁束が超伝導ナノワイヤーを横切ってトンネルするという量子位相スリップなど

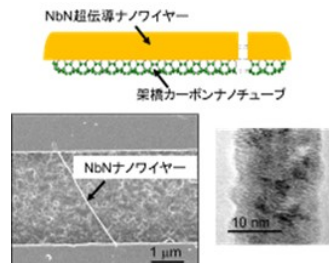


図 9 CNT 上超伝導ナノワイヤー

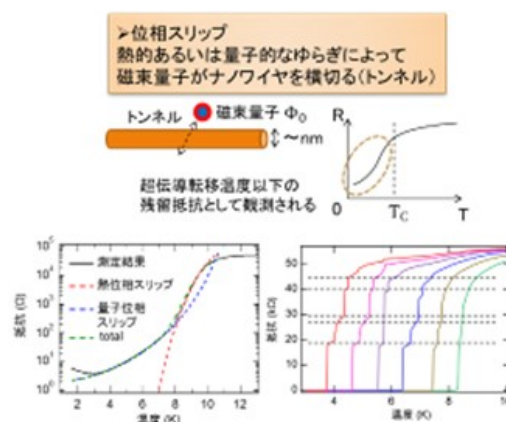


図 10 超伝導ナノワイヤーで観測される低次元超伝導特性 (位相スリップ)。

の、マクロな超伝導体では現れない特異な超伝導量子現象の観測に成功した。

以上のようなナノカーボン光素子とその応用に関しては、論文への掲載、招待講演、プレスリリースを行った。⁵

3. 今後の展開

本研究では、ナノカーボン材料を用いることで、単一光子発生技術構築、発光素子などの光源開発やシリコンチップ上光デバイス集積、光通信素子開発、超伝導ナノワイヤーを用いたチップ上量子デバイス開発を行った。これらの技術は、室温・通信波長帯で動作するシリコンフォトニクス、シリコン上光集積回路、チップ上量子暗号素子開発を可能とする要素技術であり、今後、集積ナノカーボン光デバイスが、シリコンテクノロジーと融合して、安全な情報通信技術の構築とそれによる安全・安心な社会に貢献することが期待される。

4. 自己評価

【研究目的の達成状況】

本研究の研究開始の目標としていたナノカーボン光素子開発に関しては、目標の成果はほぼ得られており、目的は達成された。また、目標以上の成果も多く得られ、ナノカーボン光源による光通信実証により、Nature Communications などのハイインパクト誌にも掲載されたり、応用物理学会講演奨励賞を受賞するなど、専門家から評価されるとともに、多くの特許申請も行うことができたことから、学術的・産業的にナノカーボン光デバイスの有用性を示すことが出来た。

【研究の進め方（研究実施体制及び研究費執行状況）】

本研究は、研究代表者を中心に研究が進められ、スムーズに研究が進み多くの成果が得られた。また、適宜学生からもサポート受けて、効率的研究を進めることができた。予算も有効に利用し、素子開発や測定に必要な物品を適切に購入して、効率よく研究を進めることができた。

【研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果（今後の見込みを含む）】

本研究により、ナノカーボン素子とシリコンテクノロジーの融合技術を実演したことから、シリコンチップ上の集積ナノカーボン素子が開発可能であるとともに、単一光子技術を集積した量子素子も開発可能となると期待される。特に、ナノカーボンデバイスは、化合物半導体とは異なり、「室温」「通信波長帯」で動作することから、現在の高価な量子暗号装置に変わり、ワンチップで一般人も利用可能な量子暗号システムを提供することが可能となり、今後実現が必要とされている量子暗号技術の一般への普及に大きく貢献する。特に、本研究では、シリコンチップ上に出動するグラフェン光源を開発することで、ナノカーボン光源を用いた光通信を世界で初めて実証しており、シリコンチップ上ナノカーボン光源が光通信に応用できることを示すことに成功した。

また、ナノカーボン研究領域への波及効果も大きく、ナノカーボン材料の特異な低次元物

性を利用して、従来の固体半導体では実現できない高性能化や新規機能デバイス開発が期待される。特に、ナノカーボン材料は、電子デバイス分野では実用化が遅れているのが現状であるが、ナノカーボンでしか実現できない物性・機能を明らかにしていくことが、次世代の光デバイス・電子デバイス用材料としてナノカーボンを実用化するためには重要であると考えられ、その意味で、本研究のナノカーボン光素子は、ナノカーボン材料研究分野への波及効果も極めて大きい。

本研究の成果により、今後、単一光子技術を非冷却で安価に構築することが可能となることに加えて、新たな量子暗号配信システムの提案や、量子暗号を広く一般に普及するためのブレイクスルーとなる。情報化社会の進展によりネットワーク化が益々拡大しており、機密情報管理・電子商取引・電子金融サービスなどの高いセキュリティ分野で量子暗号配信技術が広く普及することで、ナノサイエンスが安全・安心なネットワーク社会の実現に貢献することを示すことが出来る。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

- [1] T. Kumagai, N. Hirota, K. Sato, K. Namiki, H. Maki, and T. Tanabe, Saturable absorption by carbon nanotubes on silica microtoroids, *J. Appl. Phys.*, 123, 233104 (2018).
- [2] Hongyu An, Satoshi Haku, Yusuke Kanno, Hiroyasu Nakayama, <U>Hideyuki Maki</U>, Ji Shi, and Kazuya Ando, Manipulation of spin-torque generation using ultrathin AU, *Phys. Rev. Applied* 9, 064016 (2018).
- [3] K Yamada, M Yamada, H Maki and K M Itoh, Fabrication of arrays of tapered silicon micro-/nano-pillars by metal-assisted chemical etching and anisotropic wet etching, *Nanotechnology*, 29, 28LT01 (2018).
- [4] Y. Miyoshi, Y. Fukazawa, Y. Amasaka, R. Reckmann, T. Yokoi, K. Ishida, K. Kawahara, H. Ago, H. Maki, High-Speed and on-Chip Graphene Blackbody Emitters for Optical Communications by Remote Heat Transfer, *Nature Communications*, 9, 1279 (2018).
- [5] Hongyu An, Takeo Ohno, Yusuke Kanno, Yuito Kageyama, Yasuaki Monnai, Hideyuki Maki, Ji Shi, Kazuya Ando, Current-induced magnetization switching using an electrically insulating spin-torque generator, *Science Advances*, 4, 2250 (2018).
- [6] K. Masuda, S. Moriyama, Y. Morita, K. Komatsu, T. Takagi, T. Hashimoto, N. Miki, T. Tanabe, and H. Maki, Thermal and Quantum Phase Slips in Niobium-Nitride Nanowires Based on Suspended Carbon Nanotubes, *Appl. Phys. Lett.* 108 (2016) 222601.

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 7件

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

【主要な学会発表】

- [1] 【招待講演】○Hideyuki Maki, “Nanocarbon Based Light Sources and Detectors for Integrated Optoelectronics”, THE 24TH INTERNATIONAL DISPLAY WORKSHOPS (IDW '17), Sendai, 2017 年 12 月
- [2] 【招待講演】○Hideyuki Maki, “Nanocarbon-based light emitters for optical communications”, Optoelectronics and Communication Conference/International Conference on Photonics in Switching (OECC/PS 2016), Nigata, 2016 年 7 月
- [3] 【招待講演】○牧英之, 「ナノカーボンを用いた光電子デバイス開発」, 電子情報通信学会 2018 年総合大会, 2018 年 3 月.
- [4] 【招待講演】○牧英之, 「ナノカーボンによるチップ上量子デバイス・光電子デバイス開発」第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 2018 年 3 月.
- [5] 【招待講演】○牧英之, 「集積光・電子デバイスおよび光通信に向けたナノカーボン光源開発」, 第 50 回 FNTG 総合シンポジウム(2016) 東京大学, 2016 年 2 月
計、30 件

【受賞】

- [1] 第 45 回 (2018 年秋季) 応用物理学会講演奨励賞、Si チップ上での高速・高集積グラフェン黒体放射発光素子、深澤 佑介, 三好 勇輔, 天坂 裕也, レックマン ロビン, 横井 智哉, 河原 憲治, 吾郷 浩樹, 牧 英之

【著作物】

- [1] 牧英之、他(共著)、シリコンチップ上超小型 CNT 発光素子開発、**カーボンナノチューブ・グラフェンの応用研究最前線**、株式会社エヌ・ティー・エス、第 2 編、第 5 章、第 4 節、pp. 365-370、(2016).
- [2] 牧英之、他(共著)、次世代量子暗号技術動向、*Yano E plus*、矢野経済研究所、105、63-65、(2016).

【プレスリリース等】

- 2018 年 4 月 4 日、Optics.org、「Japanese researchers develop high-speed, on-chip graphene blackbody emitters」
- 2018 年 3 月 29 日、プレスリリース(慶應義塾大学)、「シリコンチップ上のグラフェン高速発光素子を開発 ーチップ上光集積素子へ新たな道ー」
- 2016 年 12 月 1 日、日刊工業新聞、「グラフェン光検出器を開発ー1 個で広域波長帯に対応、シリコン光回路の小型化へ」
- 2016 年 6 月 8 日、日刊工業新聞、「慶大など、超電導ナノワイヤで特異現象ー量子デバイス開発に道」
- 2016 年 6 月 1 日、プレスリリース(慶應義塾大学)、「カーボンナノチューブをテンプレートとした世界最小クラスの超極細超伝導ナノワイヤーを実現ー様々な材料系で超伝導量子デバイスをシリコンチップ上で作製可能にー」
- 計 16 件