

研究終了報告書

「ハイブリッド集積シリコン量子フォトニクスの開拓」

研究期間：2018年10月～2022年3月

研究者：太田 泰友

1. 研究のねらい

シリコン集積電子回路は、人類が獲得した最も精緻な微細加工技術(CMOSプロセス技術)の上に成立している。その光応用であるシリコンフォトニクスは、大規模かつ高機能な光回路を実現可能であり、光量子情報処理のプラットフォームとして有望視されている。しかし、同プラットフォームにおいては、大規模な量子情報処理に求められる高性能な量子光源や非線形量子ゲートが実現されていない。CMOSプロセスに整合するフォトニクス材料のみでは、それら高性能な要素デバイスを実現することが極めて難しいことも知られている。

本研究は、ハイブリッド集積手法を新規に開拓することで、スケーラブルなシリコン量子フォトニクス回路実現のための基盤技術を構築することを目的としている。集積手法として透明粘弾性ゴムを用いたピックアンドプレース操作に基づく転写プリント法を開拓し、後載せの形で量子光デバイスをハイブリッド集積することでCMOSプロセスへ完全整合させることを狙った。転写プリント法の位置合わせ誤差を光波長の100分の1のスケールに抑え、複雑なナノフォトニクス構造を高精度に組み上げる技術を実現することを目指した。集積対象としては、化合物半導体量子ドットを扱い、決定論動作が可能な量子光源および非線形量子ゲートのシリコン上集積の実現を目標に掲げた。特に、高い性能を有する単一光子源の実現を第一のターゲットとし、シリコン導波路への高い結合効率の実現を図るとともに、成熟したシリコンフォトニクスの利点を最大限に生かすことで光ファイバ出射が可能な光源モジュールの開発も目標とした。また、複数量子ドット光源の単一シリコンチップ上への集積にも取り組むことで、多光子をスケーラブルに扱うことのできるシリコン量子フォトニクス技術の基盤構築も研究目標とした。さらには、複雑な立体構造をベースとした集積もつれ光子対源、量子ドット-ナノ共振器系に基づくシリコン上非線形量子ゲート、半導体以外の光量子材料のハイブリッド光集積技術の構築も検討課題に含め、重層的な研究展開を狙った。本研究では、これらの研究項目に取り組むことで、様々な材料系からなる量子・古典デバイスを自在に集積したハイブリッド集積シリコン量子フォトニクスデバイスの実現に向けた基盤技術構築を目指した。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、主に3つの研究テーマ(A)シリコン光回路上量子ドット単一光子源の開発、(B)複数量子ドット光源の単一チップ上ハイブリッド集積技術の構築、(C)光ファイバ出力が可能な単一光子源モジュールの開発、を中心に重要な成果をあげることができた。この他に得られた成果については、「その他の成果」において詳しく述べる。また、「さきがけ研究を通じて実現した研究連携」についても報告する。

テーマ(A)では、基本となるシリコン上量子ドット単一光子源構造の電磁界設計、同構造の作製技術および光学評価技術の構築に取り組んだ。基本構造として、フォトニック結晶ナノビーム

共振器をガラス埋め込みシリコン細線導波路上へ装荷した構造を検討した。同3次元ナノ光構造は一見複雑であるものの、転写プリント法を用いれば高品質に作製することができる。最適化した構造では、99%を超える効率で量子ドット発光をシリコン導波路へ結合できることを数値計算により明らかにした。これは、スケーラブルな光量子情報処理に向けて極めて重要な成果である。実験的には、50nm程度の位置合わせ誤差でハイブリッド集積可能な転写プリント法の開発に成功した。転写先となる光回路はCMOSプロセスファウンドリから入手した。開発した転写技術を用いて設計構造を作製し、世界に先駆けてCMOSシリコンフォトニクス光回路上への量子ドット単一光子源のハイブリッド集積に成功した。テーマ(B)においては、開発した光源集積技術を発展させることで二つの量子ドット光源を単一チップ上に集積し、各々から出射された単一光子をチップ上で合波することに成功した。また、転写プリント集積を繰り返すことで各光源上に光駆動ヒーターを追加集積し、互いの発光波長を一致させることに成功した。テーマ(C)に関しては、単一方向への光出射を可能とする構造を検討し、99%を超える出射効率を数値計算により実現するとともに、同構造をベースとした光ファイバ出力単一光子源モジュールの開発を進めた。実験では、ファイバ接続済み光チップへ量子ドット単一光子源を転写プリント集積する技術を開発した。作製デバイスから、単一光子の光ファイバ出射を確認することに成功した。これは、転写プリント法を用いることで、成熟したシリコンフォトニクス技術と光量子デバイスを適切に融合できることを示す重要な結果である。

(2) 詳細

■ 研究テーマ A「シリコン光回路上量子ドット単一光子源の開発」

図1(a)に本研究で検討した基本光学構造を示す。化合物半導体により形成したフォトニック結晶ナノビーム共振器の内部に光源となるInAs/GaAs量子ドットが内包されている。同共振器は、ガラス埋め込みシリコン細線導波路上に装荷されている。本構造では、光回路を構成する導波路へ量子ドット発光を効率的に結合することができる。まず、微小共振器内部で発現する強い光物質相互作用を通じ、量子ドット発光のほぼすべてが共振器へと結合する。次に、共振器内光子はエバネッセント結合により導波路へ結合する。図1(b)に最適化した光学構造における量子ドット発光の導波路結合効率を示す。効率は、エバネッセント結合の強さを決める共振器-導波路間距離 d をパラメータとしてプロットされている。その最適条件において、99%を超える効率が実現できることが分かった。これは、スケーラブルな光量子情報処理に向けて重要な設計上の発見と言える。図1(c)に、開発を行った転写プリント法によるデバイス作製プロセスを示す。量子ドットを含むナノ共振器は別途電子線リソグラフィーを用いて加工した。転写集積するため、中空構造として作製することが重要である。シリコン光回路はCMOSプロセスファウンドリに設計図を送りマルチプロジェクトウェハとして入手した。上部ガラスクラッド厚みは所望の値ではなかったため、ドライエッチングにより厚みを調整した。両者は、透明粘弾性ゴムを用いた転写プリント法を用いてハイブリッド集積した。図1(d)に完成したデバイスの光学顕微鏡写真を示す。50nm程度の位置合わせ誤差で転写することに成功した。これは、転写装置や転写用ゴム形状の最適化の結果である。一般的なハイブリッド光集積手法では、対象とした3次元光学構造の作製は容易でなく、転写プリント法の利点を示す結果となった。作製構造は、低温顕微分光法により評価した。測定した発光スペクトルを図1(e)に示す。設計通り、共振器に結

合した量子ドット発光のみが導波路終端部に到達することで外部出射され、観測されていることが分かった。測定した共振器 Q 値や量子ドットの発光寿命から量子ドット発光の導波路結合効率^{70%}程度と見積もられた。これは、ハイブリッド集積単一光子源としては世界トップレベルの値と位置付けられる。実験効率が理想値ではない主因として、共振器内での量子ドット位置が最適化されていないことが考えられる。最後に、導波路に結合した量子ドット発光に対して量子強度相関測定を行った。その結果を図1(f)に示す。明瞭なアンチバンチングが観測され、単一光子発生とその導波路伝搬を確認することでできた。以上の実験から、世界に先駆けて CMOS シリコン光回路^上への量子ドット単一光子源のハイブリッド集積を実証することに成功したと結論できる。

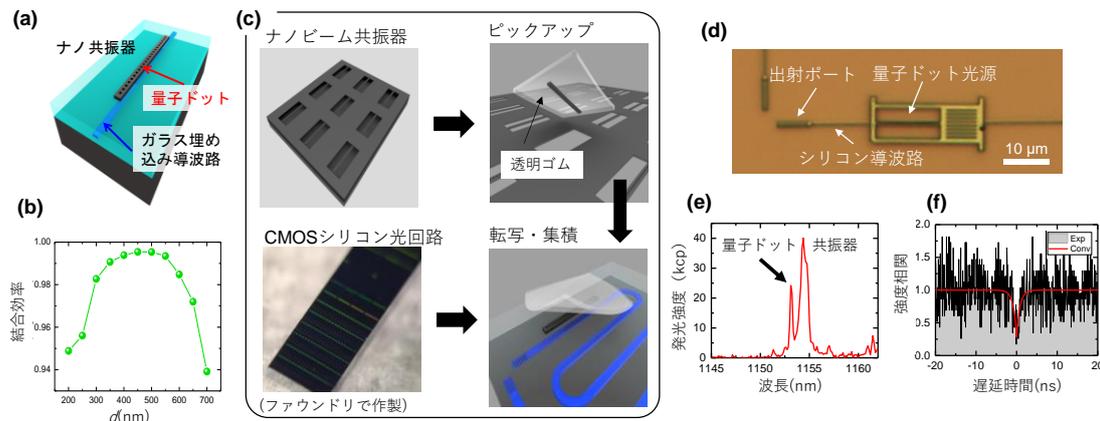


図1 シリコン光回路上量子ドット単一光子源の作製と評価

■研究テーマ B「複数光源の単一チップ上ハイブリッド集積技術の構築」

テーマ A の内容を発展させることで、複数光源を単一チップ上へ集積する研究にも取り組んだ。図2(a)に作製した構造を示す。二つの量子ドット光源が多モード干渉ビーム合波器で結合した二つの導波路上に集積されている。この構造はスタンプ構造を工夫しつつ転写プリント集積を繰り返すことで作製した。また、二つの光源上には、その余剰領域に光駆動ヒーターパッドが追加で装荷されている。その概念図を図2(b)に示す。ヒーターパッドは金属クロムを蒸着したシリコン薄膜からなる。同構造を集積済み光源の上へ転写プリント法を用いて装荷した。外部からレーザーを照射しパッドを加熱することでその下部の量子ドットの温度を変化させ波長制御する仕組みとなっている。転写プリント法を使うことで、光回路や光源作製プロセスを大きく変更することなく、より複雑な集積構造を形成することに成功した。図2(c)に作製デバイスの光学評価結果を示す。二つの光源を同時に励起し、合波器を通過した後の信号を単一ポートから取得した。スペクトルには、共振器からのブロードなピークに加え、二つの光源から出射された量子ドットからの発光ピークが観測された。ヒーター加熱パワーを増加することで、片方の量子ドットピーク位置を選択的に調整することに成功した。最大加熱パワーで二つの量子ドット波長の一致を確認できた。これらの成果は、シリコン光回路^上への転写プリント集積により複数光源を含む複雑な構造を作製できることを示す、重要な結果である。一方、実現した光源の性能はより発展的な量子光学実験を進める上では不十分であることも判明した。そのため、共同研究を通じて高品質な量子ドットウェハを入手することで、より高いレベルでの実験研究に臨むために研究計画を見直しも行った。

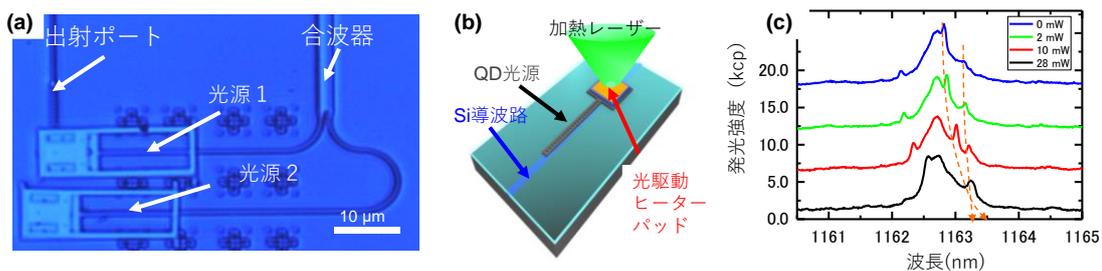


図2 単一チップ上への複数光源のハイブリッド集積

■研究テーマ C「光ファイバ出力が可能な単一光子源モジュールの開発」

シリコン量子フォトニクス活用の利点が顕著となる一つの応用として、ファイバ出力型の単一光子源モジュールの開発にも取り組んだ。図3(a)に検討したデバイス構造を示す。ファイバ接続された光チップに量子ドット単一光子源が転写プリント集積されている。シリコンフォトニクスで成熟したファイバ接続技術は、専門企業へ業務委託することで用意に利用することができる。そのような洗練されたデバイス技術を研究者自らが開発する必要がないことも、本研究アプローチの利点である。応用においては、単一のファイバからの光出力が求められる。そこで、一方向の光出力が可能なデバイス構造の設計と実験実証にも取り組んだ。図3(b)に検討した構造を示す。シリコン導波路にフォトニック結晶ミラーを導入し、設計を最適化することで、99%を超える効率で一方向出力が可能なのが数値計算により分かった。予備的な実験においては、電子線リソグラフィーにより試作したシリコン導波路を用いてデバイスを作製し、光学実験により一方向光出射を実証することに成功した。実際のファイバ出力の実験では、共同研究で入手した InAs/InP 量子ドットを目的の光素子に転写プリント集積することでデバイスを作製した(図3(c))。光ファイバ接続済みの光チップへ転写集積を行うため、転写ゴムやそれを支えるガラスホルダーなどの形状を工夫した。また光学実験では、ファイバ接続済み素子を測定するための専用のクライオスタットアダプタを構築した。図3(d)に測定した光ファイバ出力を示す。光ファイバから量子ドット発光を観測することに成功するとともに、その単一光子性も確認することができた。これらの成果は、シリコンフォトニクス技術の新しい量子技術応用を拓くものである。しかし、ファイバ接続部分での損失が大きくファイバ結合効率は高々1%程度であった。この点は今後大きく改善する必要がある。

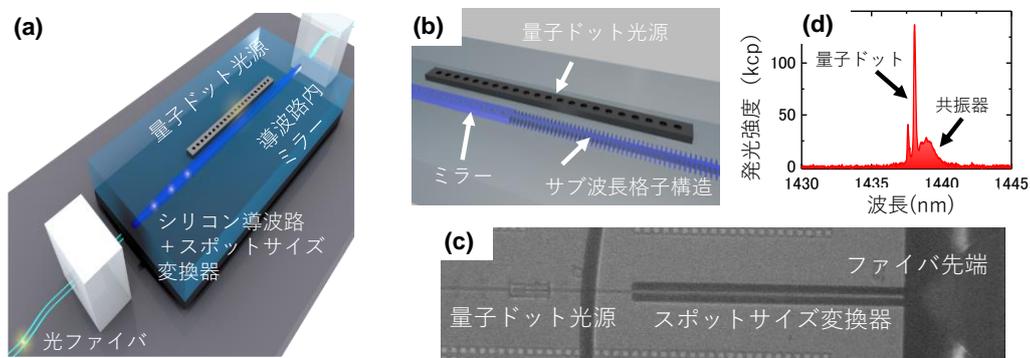


図3 ファイバ出力が可能な単一光子源モジュールの開発

3. 今後の展開

本研究を通じて、転写プリント法によりシリコンフォトニクス回路上へ量子ドット光源を自在に集積できることを世界にさきがけて明らかにした。本成果は、スケーラブルなシリコン量子フォトニクス回路を実現する上での重要な技術基盤を与えるものである。転写プリント技術の汎用性を考えれば今後は様々な発展が多いに期待できる。順調に研究が進展すれば、1-3年以内には単一チップ上に集積した複数の量子ドット光源を自在に干渉させることが可能になると考えている。同技術が実現できれば、様々な量子プロトコルと組み合わせることで、量子暗号・中継・計算に関する基礎的な応用研究が可能になると考えられる。また本研究のアプローチを洗練し単一光子源として性能を高めつづけることで、理想に近い性能を有しかつ誰もが簡単に利用できる単一光子源モジュールが5年以内を目安に実現することが可能だと考えている。これは光量子情報処理技術における大きなインパクトを与えるものだと考えられる。一方、長いスパンでみると、本研究プロジェクトが最終目標で掲げているように、多様な材料からなるあらゆる量子光デバイスに対するハイブリッド集積技術がますます重要になると考えられる。その中で転写プリント法によるアプローチは、より一層重要性を増すものだと期待される。その際に集積量子フォトニクスにおける先導的な研究を進めるため、地道な技術開発を今から進めておくことも重要だと考えている。

4. 自己評価

計画通りシリコン上への量子ドット光源の転写プリント集積を実現した点は評価したい。転写プリント法は、光量子ハイブリッド集積の中心的な技術として、当該分野の主要レビュー論文に研究代表者の論文を引用しつつ紹介されている(Nat. Photonics 14, 285 (2020), Optica 7, 291 (2020)等)。また、多くの研究者にその有用性を認めてもらい、様々な共同研究へと繋がった。さらに本さきがけ研究で得られた成果には、国内外での招待講演(16件)や総説(2件)の執筆、受賞(4件)といった客観的な評価を受けることもできた。一方、量子ドットウェハが一時期入手困難になるなど研究計画当初の狙い通りに進まない部分もあり、集積もつれ光子対源や非線形量子ゲートに関する実験研究があまり進められなかった点は反省しなくてはならない。研究の進め方としては、代表者を中心としつつ所属機関内外の研究者とうまく協力して進めることができたと考えている。本研究では、最終的なデバイス作製に必要な要素技術は多岐に渡っている。その中で、重要な点に力点をおき、その他の部分は共同研究等により手間をかけずに進める手法を確立できたと感じている。また、慶應義塾大学への移動後は研究環境の構築に苦勞する面があったものの、さきがけの支援を受けてうまく研究を継続・推進することができたと考えている。研究費の執行としては、コロナ禍の中でもあり、ファウンダリプロセスやウェハ供給の遅延、異動による研究環境の変化等で計画通りに進まない部分もあったが、JSTとも相談し臨機応変に執行することができたと考えている。波及効果の面では、本さきがけ研究は将来非常に大きな実りをもたらすと考えている。今後優れたデバイス性能を実証することで、光量子情報処理においてハイブリッド集積シリコンフォトニクスが主流になることは十分に見込まれる。本研究プロジェクトは、まさにそのさきがけとなることが期待される。さらに、一般的なシリコンフォトニクス技術においても本研究の成果は有用であり、光システムの低コストで迅速な試作を可能にする技術などとして花開くことも期待できる。広く俯瞰した視点を持ち、今後の発展に繋がりたい。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 6件(暫定版提出時では1件は投稿中)

1. R. Katsumi, Y. Ota, A. Osada, T. Yamaguchi, T. Tajiri, M. Kakuda, S. Iwamoto, H. Akiyama and Y. Arakawa, "Quantum-dot single-photon source on a CMOS silicon photonic chip integrated using transfer printing", APL Photonics **4**, 036105 (2019)

CMOS プロセスにより作製したシリコンフォトニクス回路上へ InAs/GaAs 量子ドット光源をハイブリッド集積することに成功した。集積には転写プリント法を用い、50nm 程度の高い位置合わせ精度を実証した。数値計算により 99%を超える効率で量子ドット発光を導波路へ結合できることを示した。実験では、量子ドットからの単一光子発生と導波路への高効率結合効率を観測し、シリコン上ハイブリッド集積量子ドット単一光子源を実証した。

2. R. Katsumi, Y. Ota, A. Osada, T. Tajiri, T. Yamaguchi, M. Kakuda, S. Iwamoto, H. Akiyama, and Y. Arakawa, "In situ wavelength tuning of quantum-dot single-photon sources integrated on a CMOS-processed silicon waveguide", Appl. Phys. Lett. **116**, 041103 (2020)

単一のシリコンフォトニクス回路チップ上へ二つの量子ドット単一光子源をハイブリッド集積することに成功した。さらに、各光源へ光駆動ヒーターを装荷し、独立に波長制御が可能であることを示した。これらの集積は、転写プリント集積を繰り返すことで実行した。二つの光源からの発光をビーム合波させるとともに、波長を一致させることに成功した。本成果は、複数光源を有する高度な量子光回路構築に向けて重要である。

3. R. Katsumi, Y. Ota, T. Tajiri, M. Kakuda, S. Iwamoto, H. Akiyama and Y. Arakawa, "Unidirectional output from a quantum-dot single-photon source hybrid integrated on silicon", Opt. Express, accepted (2021).

シリコン導波路へ結合した光を99%以上の効率で一方向へ出射させる光学構造を見出した。シリコン導波路にフォトニック結晶ミラーを実装し、導波路上へ転写集積したナノ共振器との距離を適切に制御することで一方向出射を実現した。実験では、設計構造を電子線リソグラフィーにより作製し、量子ドットからの単一光子発生と一方向出射を観測した。本技術は、光ファイバー出射可能な単一光子源モジュールの実現に重要である。

(2) 特許出願

研究期間全出願件数: 0 件(特許公開前のもも含む)

(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)

【主要な招待講演(招待講演計 16 件)】

Y. Ota, R. Katsumi, A. Osada, M. Kakuda, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, "Hybrid integration of quantum dot-nanocavity systems on silicon", Frontiers in Optics + Laser Science APS/DLS, FM3D.4, Washington DC, USA (2019).

Y. Ota, Y. Arakawa and S. Iwamoto, "Hybrid integrated light sources on silicon assembled by transfer printing", IEEE Photonics Conference 2021, MB3.1, Online (2021)

【主要な受賞(受賞計 4 件)】

丸文学術賞(丸文財団) 2022 年

The Young Scientist Award (The International Symposium on Compound Semiconductors)
2021 年

【主要な解説記事(解説記事計 4 件)】

太田泰友、岩本敏、荒川泰彦、「転写プリント法を用いた量子ノ古典光源のハイブリッド光
集積」、電子情報通信学会論文誌 C (2021)