

世界初の電子・フォトニック・量子統合チップの製造に成功

サリー・コール・ジョンソン

ボストン大、カリフォルニア大バークレー校、ノースウェスタン大の科学者らは、世界初の電子・フォトニック・量子統合チップを、商用の45nmのCMOS(Complementary Metal-Oxide Semiconductor: 相補型金属酸化膜半導体)チッププラットフォーム内で製造するという、量子スケーリングにおける飛躍的進歩を成し遂げた。

米ボストン大(Boston University: BU)、カリフォルニア大バークレー校(University of California Berkeley: UC Berkeley)、ノースウェスタン大(Northwestern University)の科学者グループによって開発された、世界初の電子・フォトニック・量子統合チップ(System on a Chip: SoC)は、標準的な45nmの半導体製造プロセスで量子光源と安定化電子回路を組み合わせることにより、相関光子対のストリームを生成する。

シリコン内でこれを実現できることは大きな意味を持つ。なぜなら「それは、繰り返し製造可能で、制御可能な量子システムを、商用の半導体ファウンドリで製造できることを示している」からだ、ボストン大の電気およびコンピュータ工学准教授でこの共同研究を統括したミロス・ポポヴィッチ氏(Miloš Popović)は述べた。

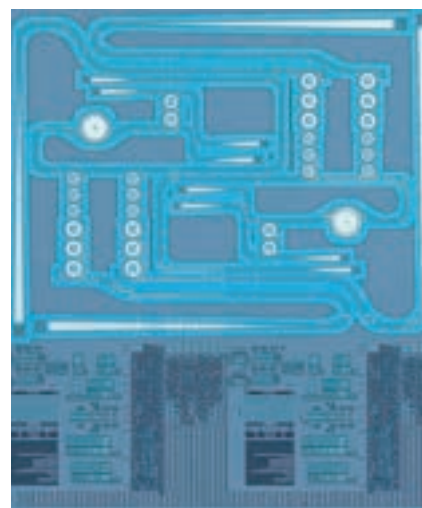
同グループのデバイスによって生成される光子対は、量子情報を伝送するための量子ネットワークのプロトタイプを構築するために利用できる。1つの用途は、セキュアな通信のための離散量子鍵配送(Discrete Variable Quantum Key Distribution: DV-QKD)を実装することである。重要な点として、これが使用する1550nmの

波長は、既存の長距離ファイバインフラストラクチャと互換性がある。つまり、量子信号と従来信号が同じファイバ上に共存できる可能性がある。

そして、この電子・フォトニック・量子統合チップを支えた学際的な共同研究こそが、「量子システムを実験室からスケーラブルなプラットフォームへと移行させる」ためにまさに必要なものだと、量子光学のパイオニアであり、ノースウェスタン大の電気およびコンピュータ工学教授であるプレム・クマール氏(Prem Kumar)は指摘した。同氏のグループは、量子特性評価の作業を統括した。

量子分野の究極の目標：スケーラビリティ

量子技術が今日直面する1つの大きな課題は、「実行可能性よりもスケーラビリティ」と、ダニエル・クラムニク氏(Daniel Kramnik)は言う。同氏は、当時はカリフォルニア大バークレー校の博士課程学生としてウラジミール・ストヤノヴィッチ教授(Vladimir Stojanović)のグループでチップ、設計、パッケージング、統合を主導し、現在はGoogleXでシリコンフォトニクスのスタートアップを目指している。「量子技術の概念実証は数多く存在するが、



量子光源電子フォトニック回路の光学顕微鏡写真。製造されたシリコンチップ上には合計12個の量子光源が配置されているが、そのうちの4個がこの図に示されている(図はすべてボストン大提供)

難しいのは、それらをスケールアップする方法を見出して、有用な機能を果たせるほど大きな規模の量子情報システムを構築できるようにすることだ」(クラムニク氏)。

クラムニク氏はこれを、1947年に発明された初めてのトランジスタと、その後の数十年間に開発された集積回路(IC)の差になぞらえた。ICは、コンピュータを有用にして広く普及させ、やがては、インターネットやiPhoneをはじめとする、現代生活を支えるあらゆるものを生み出した。「量子ハードウェア向けのスケーラブルなコンポーネントを構築するための有望な方法の1つが、シリコンフォトニクスである。シリコンフォトニクスは、CMOS互換の製造技術を利用して、物質ではなく光の操作に基づく量子システムを構築

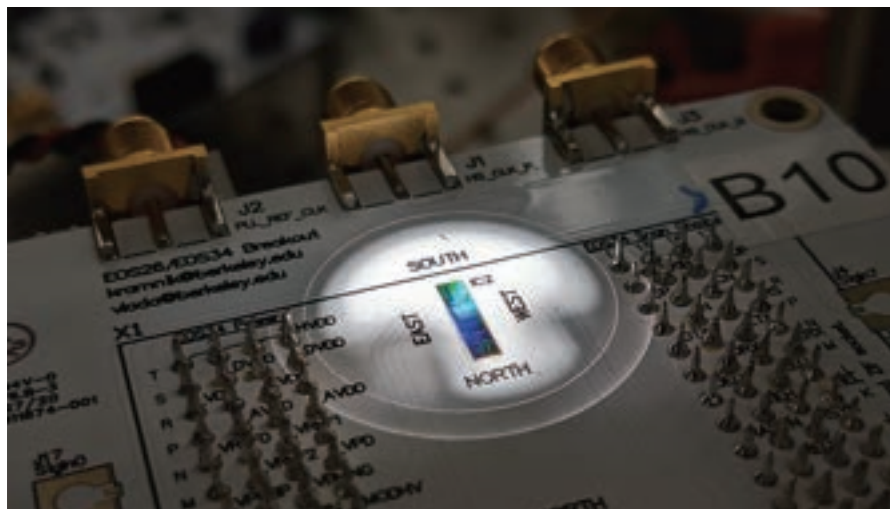
する」と同氏は述べた。

なぜCMOS製造なのか。それは、これが大規模システムを構築するための最もスケーラブルな手段であり、これによって数十億個ものトランジスタを搭載するチップの製造が可能だからである。「これを量子コンピュータに適用することができれば、有用なタスクを実行できる規模で量子コンピュータを製造するための手段になるだろう」とクラムニク氏は説明した。

シリコンフォトニクスデバイスは、製造プロセスと温度変化の影響を受けやすく、それによって非線形効果が生じることでデバイスが共振状態から外れ、量子対生成プロセスの効率が低下する可能性がある。「現在は、大きなオフチップコンポーネントと実験室設備によってこれが行われている」とクラムニク氏は述べた。「量子情報処理向けにシリコンフォトニクスを真にスケーラブルなものにするには、量子、フォトニック、電子の機能を単一のCMOS製造可能なデバイスに統合するためのスケーラブルな手段が必要である」。

その解決策が、同グループの電子部品とフォトニクスの集積技術に量子光学を組み合わせて、「世界初のそのようなシステムを構築するというだけでなく、現在45nmの精度で高周波SOI (Silicon On Insulator) 基板上(45 RFSOIプロセス)での量産を行っている、米グローバルファウンドリーズ社 (GlobalFoundries) の商用CMOSファブ内でこれを実現する」ことだと、クラムニク氏は述べた。この共同研究では、「シリコン導波路内における量子相関光子対生成を初めて特性評価して発表した」クマール教授のグループが保有する専門技術が活用された。

この分野における大半の研究で、量子フォトニクスに対する「CMOS互換」



このパッケージ化された回路基板には、実験時にプローブステーションで顕微鏡の下に配置されたチップが含まれている

のアプローチであることが主張されているが、ただ原理的にCMOS製造と互換性があるというだけでなく、実際にCMOSプロセスで製造されることに、非常に大きな意味がある。

量子光の安定したストリーム

それぞれ1mm×1mm未満のサイズのシリコンチップ上に構築された、同グループの「量子光工場」は、マイクロリング共振器によって光の量子状態を生成する。これらのマイクロリング共振器は、非常に小さくて温度に敏感な個々の光工場に電力を供給する、入射レーザー光と同期して調整される。これらのデバイスは、温度だけでなく製造上のばらつきにも敏感であるため、デバイスの同期を保つことが課題である。

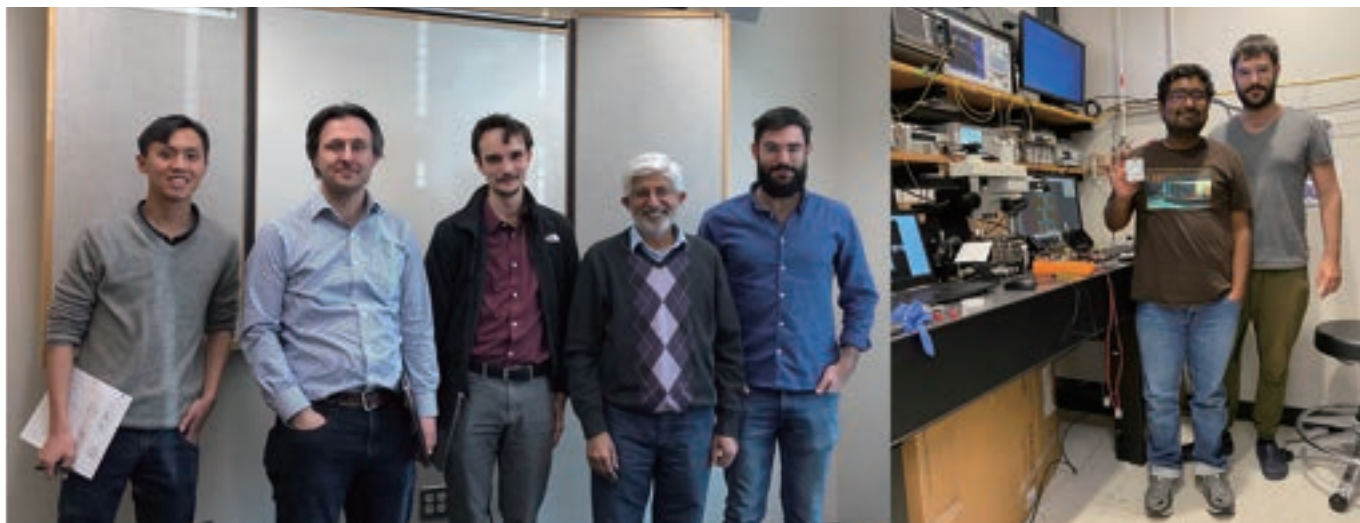
各チップには、マイクロリング共振器に基づく量子光源が12個搭載されている。量子光源は並列に動作し、温度変化や周辺デバイスからの干渉の可能性があるので、入射レーザー光との同期を保つ必要がある。

これらを安定化させるために科学者らは、量子光の生成効率を維持しつつ、共振器内部のフォトダイオードによっ

て、入射レーザーの波長とのアライメントを正確に監視している。微小なオンチップヒーターと制御ロジックにより、ドリフトに応じて各マイクロリングの共振が自動的に調整される。この部分は、量子システムのスケールアップを実現するために不可欠である。

「量子測定では、モデルを検証するために微小なシステム損失を考慮する必要がある」とアニルード・ラメシュ氏 (Anirudh Ramesh) は述べた。同氏は、当時はノースウェスタン大の博士課程学生で同グループの量子測定を主導し、現在は米サイクォンタム社 (PsiQuantum) に所属している。「測定データで理論モデルに近づけたことは、大きな成果のように感じた」。

また、「フィードバック制御器が設定値を決定してシステムを安定化させる過程で、電子的なD/AコンバータとA/Dコンバータ (DAC/ADC) のコード、フォトニック (光伝送) パラメータ、量子 (光子対の真の同時計数と偶発的同時計数の比 [coincidence to accidental ratio]) パラメータの時間的変化を観測したのは、非常に素晴らしいことだった」とラメシュ氏は付け加



このグループの研究は、複数の異なる学術分野にまたがる、長年にわたる努力の結晶だった。メンバーは次のとおり。(左側の写真一番左、中央、一番右)大学院生のイムバート・ワン氏、ダニエル・クラムニック氏、ジョセップ・ファルガス氏(Josep Fargas)。(左側の写真左から2人目と右から2人目)ミロス・ポポヴィッチ准教授とプレム・クマール教授。(右側の写真)大学院生のアニルード・ラメシュ氏(ファルガス氏とともに研究室にて)

えた。「その測定の調整は難しかったが、量子フォトニックシステムの較正に関する他では得られない視点をわれわれに与えてくれた」。

ファウンドリへの移転

この電子・フォトニック・量子チップ設計に対し、同グループが、ファウンドリが提供するトランジスタCADレイヤを使用してフォトニックデバイスを描画し、続いてファウンドリが、電子回路とフォトニック回路を同一チップ上に製造する。「われわれの研究グループ内で開発された一連のカスタムソフトウェアにより、フォトニック設計者の意図がファウンドリのCADレイヤの組み合わせに変換されるとともに、CMOS製造に必要な数千もの幾何学的な設計ルールに適合するよう自動的に調整される」と、クラムニック氏は説明した。

得られたフォトニックチップは直ちに動作するのか。そんなに簡単ではない。フォトニックデバイスを活性化するために、プリント回路基板(PCB)にはんだ付けした後にチップ全体を二

フッ化キセノン(XeF_2)エッチング装置に入れて、チップ裏面からシリコンハンドル層を除去する。すると、上下逆さまになったチップの上面からも、チップ上の導波路や光学デバイスに光を入射／出射させることが可能となる。これはプロセス固有の処理であり、グローバルファウンドリーズ社の新しいシリコンフォトニクス向けの専用量産プロセスである45SPCLOプラットフォームでは不要となっている。

通常の高速データ通信トランシーバーではなく、高品質な光子対を生成するために、フォトニックデバイスと電子回路を最適化する必要があった。「そのためには、デバイス内部の非線形光学系の詳細なモデルと最適化が必要だった」と、当時はボストン大の博士課程学生で、フォトニックデバイス設計と統合作業を主導したイムバート・ワン氏(Imbert Wang)は述べた。「回路はフィードバック制御を行って、光子対の生成を較正して安定化させる。これを利用して、ヘラルド単一光子のストリームを生成することができる。これは、多くの種類の光量子情報システ

ムに必要な重要要素である」。

同グループは、高消光光学フィルタも実際に構築した。「(これは)同じチップ上の散乱したポンプ光(迷光)からこれらの単一光子を分離するためのもので、シリコンフォトニクスに基づく多くの量子光学実験において、これも場所をとるオフチップコンポーネントとなっている」とワン氏は付け加えた。

量子ネットワークのプロトタイプとプラグブル光ファイバ量子通信モジュールへの応用

同グループのデバイスによって生成される光子対は、量子情報を伝送するための量子ネットワークのプロトタイプの構築に利用できる状態にある。

「既存の長距離ファイバインフラストラクチャと互換性がある1550nmの波長を使用しており、ノースウェスタン大のクマール教授のグループは最近、量子テレポート実験によって、量子信号と従来信号が同じファイバ上に共存できることを示した」⁽¹⁾と、クラムニック氏は述べた。「現在、これらのネットワークは主に、実用的な量子コンビ

ュータが完成すれば将来的に必要となる、通信インフラの開発に向けた研究目的に使用されている」。

もう1つのより直接的な応用例は、量子セキュアネットワークを対象とした、同グループのチップに基づくプラグブル光ファイバ量子通信モジュールである。「一部の政府機関や企業が、Wi-Fiやイーサネットのように盗聴されることのない、100%安全なインターネット通信を備えたノートPCを望んでいることは想像できるだろう。シリコンフォトニックチップに接続された光ファイバを介してエンドデバイスまで直接量子接続することが、その光ファイバを所有していない場合でも、これを確保するための1つの方法である」と、クラムニク氏は述べた。「これには、III-V族半導体ポンプレーザと室温単一光子検出器を同一チップ上に集積するためのさらなる作業が必要になる可能性がある。これについては既に、CMOS互換の形で他の分野で実証されている」。

より長期的には、同グループのプラットフォームを使用して、サイクオンタム社や加ザナドゥ社(Xanadu)が先駆的に開発しているような光量子コンピュータに必要な、多数のヘラルド単一光子源を構築することが可能となる。

「量子技術は問題を探しているソリューションだと言う人がいる」とワン氏は述べた。「面白いことに、『問題を探しているソリューション』という表現は、レーザの発明に関する1964年の出版物⁽²⁾で使われたことに由来している。それから60年が経過し、レーザは至る所で使われている。レーザの潜在能力を解き放つ鍵は、その生産規模を拡大することだった。われわれは今、量子光源の規模を拡大する能力を手に入れており、これが量子技術に何



このパッケージ化された回路基板には、同グループの実験に使われたチップが含まれている

をもたらすのか、私は本当に楽しみにしている」。

次なる課題は機能性

当然ながら、同グループは既にチップの機能強化に取り組んでいる。グループは最近、この光子対発生源を使用した、シカゴ周辺の地下に埋設された通信光ファイバ内のタイミングドリフトの特性評価に関するOFCカンファレンス論文を発表した。

「この研究では、意外にも、長距離の地下光ファイバのほうが実験室内の光ファイバスプールよりもドリフトが少ないことが示された。これは、地下では温度が安定し、あらゆる変動(温度、ひずみなど)がファイバの距離にわたって平均化されるのに対し、実験室内でスプールに巻き付けられた状態では、ファイバ全体が同じ変動の影響を受けるためだと、われわれは考えている」と、ラメシュ氏は述べた。

明らかに、この量子光子源が量子ネットワークに関する工学および科学研究に有用であることは、既に判明している。シカゴは、量子インターネット研究の主要拠点の1つであり、同グル

ープは、「量子情報処理や量子ネットワークに必要な、ヘラルド単一光子の間の量子もつれを生成するためにこれが利用できることを示すために、複数のこのCMOSチップの間の量子干渉実験に取り組んでいる。また、光子対生成率を向上させて、システムのより多くの部分を同一チップ上に集積した、一連の次世代CMOSチップも、実現に向けて作業を進めている」と、クラムニク氏は述べた。

「数千もの光学部品が電子部品とともに高密度に集積された大規模集積回路(Very Large Scale Integration: VLSI)シリコンフォトニクスは現在、AIハードウェア用の光インターコネクットのニーズに主にけん引されて、量産化を目指す主要業界の取り組みの焦点となっている」と、ポポヴィッチ氏は述べた。同氏は、米アヤール・ラブズ社(Ayar Labs)という光インターコネクットの新興企業を2015年に、ストヤノヴィッチ教授とその他複数の現在および元チームメンバーとともに共同創設している。「量子システムはインターコネクトよりもさらに感度が高く損失に縛られるため、この産業界の勢いに乗ることが、さらに大規模な量子光学システムの開発を加速化させる機会となる」(ポポヴィッチ氏)。

本研究は、米国立科学財団(National Science Foundation: NSF)(同財団のFuture of Semiconductors[FuSe]プログラムなど)、Packard Fellowship for Science and Engineering、Catalyst Foundation、アヤール・ラブズ社、グローバルファウンドリーズ社の支援を受けて実施された。

参考文献

- (1) J. M. Thomas et al., Optica, 11, 1700-1707 (2024); <https://doi.org/10.1364/optica.5403622>.
- (2) C. S. Porter, "U.S. Army role in laser development, future potential discussed," Army R&D News Magazine, 10 (Dec. 1964).