

フェムト秒レーザー直描導波路で作る ガラス量子回路

トマス・ミーニ

ガラスに短パルス幅レーザーを照射する非線形吸収により、集積フォトニクスを描画することができる。量子集積フォトニクス(QIP)デバイスが、この技術を利用して製造されようとしている。

量子情報科学(QIS)が、大きな資金と熱狂を集めている。英国では、2億7000万ポンドの資金が、特に量子を使うことで可能になる技術に割り当てられた。このような関心と投資の理由に含まれるのは、破壊的な将来性への見通し、前世紀を超える意義深い加速度的な進展である。量子力学の理解と応用における最初の進展は半導体技術の開発とその実用的な利益だった。しかし、今世紀は、本質的に粒子の量子力学的振る舞いを基にした技術的イノベーションにつながっていく。

例えば、量子ビット、キュビットをシングルフォトンの偏光にエンコードすることに可能性が存在する。これは当然である。なぜなら、フォトニクス研究者としてわれわれは、波長板を利用して通常、電界の垂直(V、ビットの1に相当)偏波と水平(H、ビットの0に相当)偏波を操作しているからである。われわれは、これらの状態の極めて不確実な重ね合わせにも精通している、つまり0と 2π の間の水平偏向状態と垂直偏向状態によって記述する楕円偏光ビームである。

この記事では、情報キャリアとしてフォトンを利用することの展望について説明する。特に、フェムト秒レーザー直描技術を用いて作製する光回路におけるフォトンの利用だ。このアプローチは、QISのいわゆる「究極目標」、量

子コンピューテーションに好都合であるだけでなく、通信にとっては当然の選択である。

フォトンチップ上の導波路に閉じ込めることで、入れ子型の干渉計コンポーネントに安定した環境が得られる。つまり、フォトンは量子デコヒーレンスを起こすことも、無作為に周辺環境と相互作用することもない。実際、量子のコヒーレンスタイムは極めて長く、宇宙から来るフォトンでさえ偏向方向を表示することがあるので、いかなる量子技術においてもフォトンは何らかの役割を果たすことになりそうだ。

ガラスに導波路を描く

集積フォトニクス分野では重要な展開であり、入れ子型干渉計の安定化に見通しを与えている。この干渉計は、キュビットの操作、究極的にはキュビットの相互作用を扱う際に必要不可欠である(入れ子型の干渉計は、そのアームの1つに第2の完全な干渉計を含んでいる)。集積フォトニクスによって造られた小型サイズは、言うまでもなく、研究室から出て実験を行い、実用的な技術とするためにも極めて重要である。これらのオンチップ光回路は、主に全反射プロセスで動作する(フォトニック結晶のバンドギャップ閉じ込めを使う代替法も通常用いられるが、ここでは触れない)。

様々な集積デバイス利用されているが、これは最先端の光インタコネクタや通信分野で起こっていることの反映である。オンチッププラットフォームの多様な範囲によって、QISの進歩が加速されている。リッジ、埋め込み、フォトニック結晶導波路構造が、シリコン、ガリウムヒ素(GaAs)、シリコンカーバイド(SiC)の半導体、ダイヤモンドでさえ実証されている。さらに、結晶材料を用いて導波路回路が作製されている。リチウムナイオベートは2次の光非線形性によって高速スイッチングやフォトン生成機能を実現する。

しかし、ガラスも、低損失伝送と光ファイバとの効率的な結合が可能であるので、QIS実験には便利なプラットフォームである。この特性の価値を過大評価することはできない。と言うのは、集積光プラットフォームで可能になる光機能の複雑さは別にして、フォトンが効率よく取り出せなければ実用にならないからである。

いわゆる「量子複製不可能」定理が、量子情報の増幅を不可能にしている。その結果、量子情報システムの全てのフォトンが貴重になる。実際、集積量子フォトニクスの最初の実証は、ガラス導波路を利用して、まさにガラスの効率的な特性を十分に引き出した⁽¹⁾。

ガラス導波路は、フォトリソグラフィ技術を利用して作製した。この技術は、

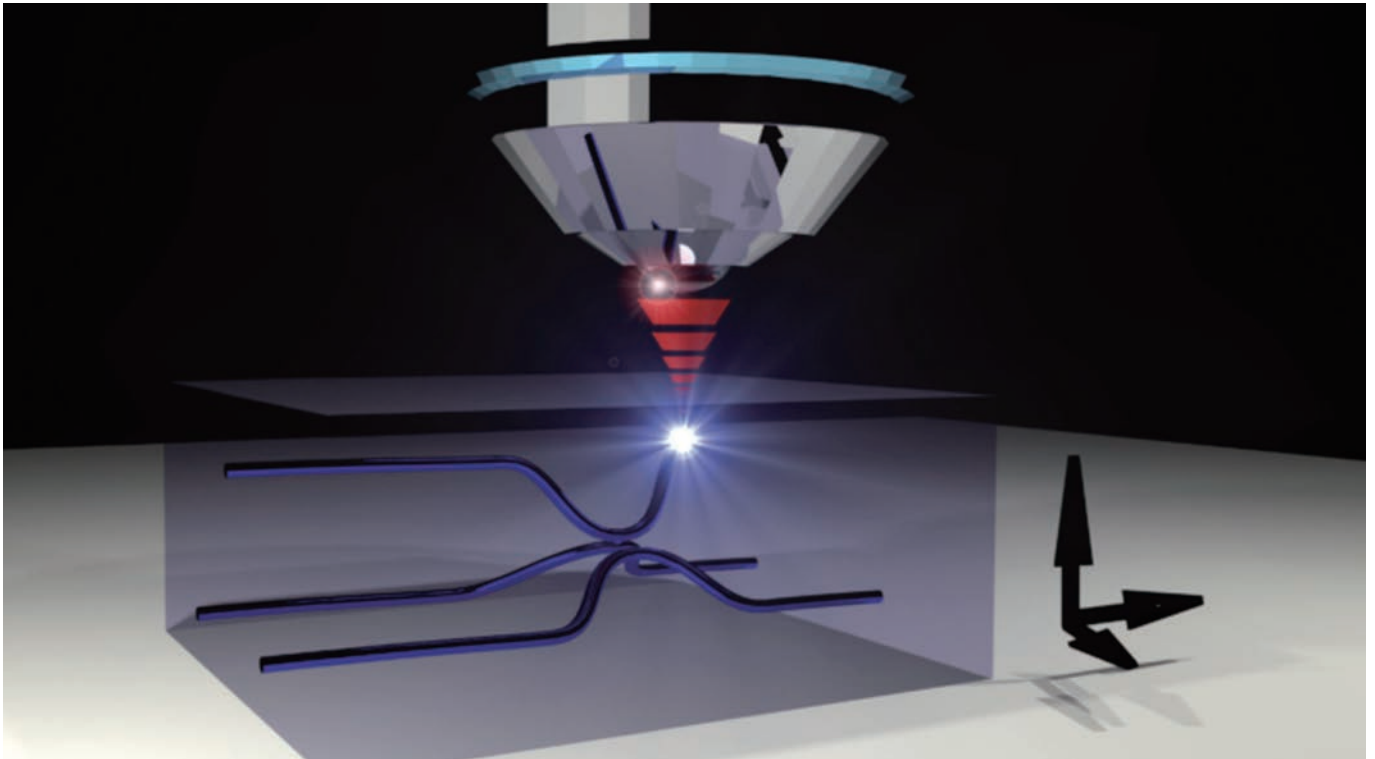


図1 概念図はレーザー描画プロセスを示している。非線形吸収はレーザーの焦点で起こり、結果として白色光放出と高度に局所化されたエネルギー堆積が得られる。レーザーは、バルクガラス材料に効果的に導波路を形成することができる。

効果的ではあるが、現在の新しいプロトタイプデバイスのデザイン用には、新しい構造それぞれに対して新しいマスクを作製しなければならない。これは、プロトタイプ処理としては時間とコストがかかる。

ガラスに導波路を形成する代替技術は、フェムト秒レーザー直描 (FLDW) 技術と言う。これは、透明材料において、レーザー強度が高いときに起こる非線形吸収プロセスを利用している。その結果、透明材料の表面下に集光すると、非線形効果を起こし、吸収がレーザー焦点に高度に局所化される。

この吸収プロセスは非常に複雑であり、結果として得られる材料の特性は、そのレーザー強度に依存する。高強度では、損傷やボイド形成さえも起きるが、中強度では周期的なサブ波長構造が観察できる。レーザー焦点に対して基板を平坦に移動させることによって導波路

を形成することができる (図1)。これは3次元で起こるので、この技術は多様な深さの低損失導波路デバイスを簡単に作製できる^{(2), (3)}。

レーザー描画技術は、フォトリソグラフィ導波路加工に必要なクリーンルーム施設に比べると、安価であり、柔軟性がある。このような特性から、1996年に初めてこの技術が実証されて以来、世界中で幅広く研究グループが立ち上がった⁽⁴⁾。

この技術はすでに商業的に採算がとれる技術になりつつある。例えば、フェムトプリント社、(Femtoprint、スイス、ムツァーノ; www.femtoprint.ch) は FLDW を使ったガラス加工システムを開発した⁽⁵⁾。別の会社、オプトスクライブ社、(Optoscribe、スコットランド、リビングストン; optoscribe.com) は、FLDW を使ってマルチモードファンアウトデバイスを専門に製造している。

また、ナノスクライブ社、(Nanoscribe、独エッゲンシュタイン-レオポルトシュハーフェン; www.nanoscribe.de) が開発したレーザー加工技術は、センチメートルサイズ、ナノメートルの分解能で、多くの材料に多様な範囲の構造を作製するのに使用できる。

レーザー描画量子フォトニクス

回路をレーザー描画するのは、ある程度簡便であることから、多くの重要な作業に使われてきた。光子の生成、操作、検出はすべて個別に、レーザーで描画した回路を用いて達成された。効率的な光子生成は、材料の高抽出効率と組み合わせた熔融シリカの微小三次非線形を用いることで達成できる⁽⁶⁾。

チップ上の偏光状態の操作は、回転したり偏波依存パワースプリッターに組み込める複屈折導波路を用いることで達成する⁽⁷⁾。チューナブルデバイスと

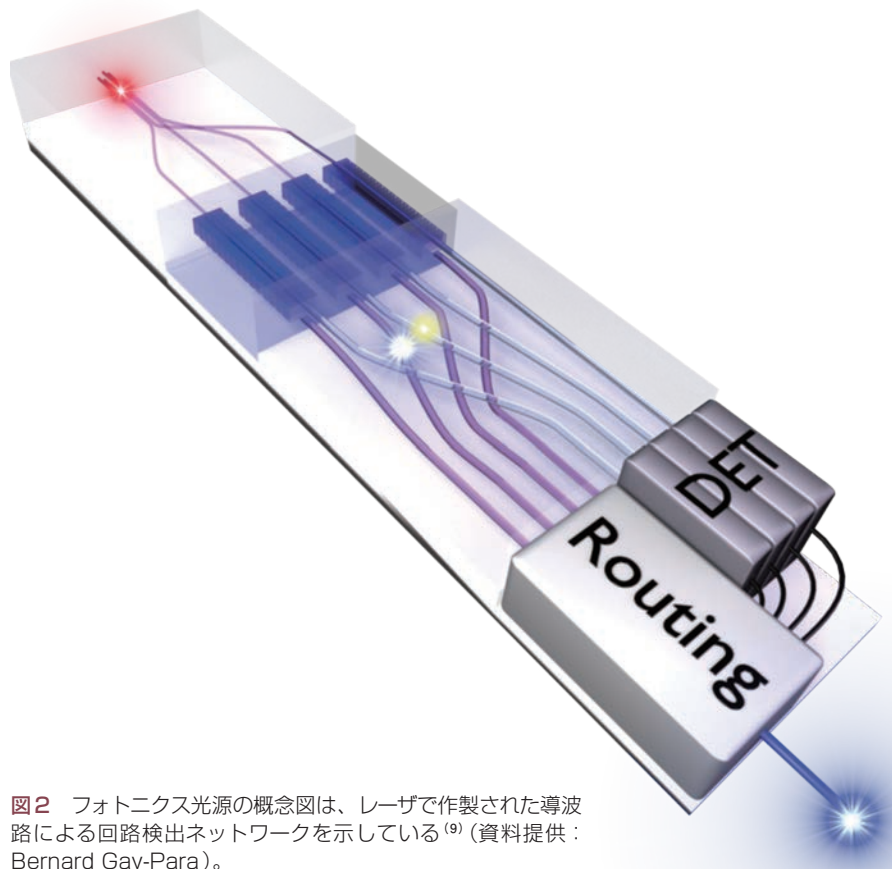


図2 フォトニクス光源の概念図は、レーザーで作製された導波路による回路検出ネットワークを示している⁽⁹⁾(資料提供: Bernard Gay-Para)。

導波路ベースのシングルフォトン検出の両方とも、UVレーザーにより感光性のガラスに作製した導波路を用いて達成した⁽⁸⁾。さらに、他のフォトニクスコンポーネントとの集積のしやすさは、レーザー描画回路が多くの技術の橋渡しをする手段として使えることを意味する(図2)⁽⁹⁾。

量子コンピューティングは、ビジョンは非常にすばらしいが、困難な目標でもある。短期的には多くの階梯があり、それらは現在のコンピューティングや通信技術を破壊することになる。その一つが量子シミュレーションだ。ここでは、フォトニックアナログが、光合成から化学まで、あらゆるもののシミュレーションを行う膨大な潜在力を提供している⁽¹⁰⁾。

レーザー描画回路は、量子シミュレーションの研究では変革的であった。オーストラリアのシドニー、イタリアのミラノ、ドイツのイエナのグループが、

光子相関の研究に向けた導波路アレイを実証した。これらの回路は導波路を使用しており、近接させるとエネルギーの交換が可能になる、例えばグラフェンに似た格子のシミュレーションに使える⁽¹¹⁾。

多数の異なるデバイスプラットフォーム

を相互接続する潜在力があるので、将来の微小量子回路はレーザー描画デバイスの利便性を活用することになりそうだ。しかし、今までの所、まだ攻め込む余裕がある。高屈折率差(>2%)と大きな非線形性の両方とも未踏であり、これらはいずれも回路密度を高めるのに不可欠である。

例えば、マクミランの研究チームは、カルコゲナイドガラスで低損失フォトニック回路開発に向けて大きく前進した⁽¹²⁾。この材料は、ガリウム・ランタン・硫黄でできており、すでに低コストで入手可能になっている。スコットランド、エディンバラのレーザー描画グループは、この材料が持つ高い非線形性や中赤外透過性などの可能性を調べ始めた⁽¹³⁾。

これらの例は、フォトン操作にとどまらず、フォトン生成やフォトン検出にもレーザー描画導波路を利用することの優位性と展望を示している。大きな非線形性と高屈折率導波路などの課題は研究が進められており、幅広い範囲で小規模量子コンピューションが仕上がっている。このことは、FLDW技術を数少ない競合の中に押し込み、短時間で基本的な量子プロセッサの完全モノリシックを実証することになる。

参考文献

- (1) A. Politi, et al., *Sci.* 320 (5876), 646-649 (2008); doi:10.1126/science.1155441.
- (2) T. Meany, et al., *Appl. Phys. A* 114 (1), 113-118 (2013); doi:10.1007/s00339-013-8090-8.
- (3) T. Meany, et al., *Opt. Express* 20 (24), 26895-26905 (2012); doi:10.1364/OE.20.026895.
- (4) K.M. Davis, et al., *Opt. Lett.* 21 (21), 1729-1731 (1996).
- (5) Y.J. Bellouard, *Laser Micro/Nanoengineering*, 7 (1), 1-10 (2012); doi:10.2961/jlmm.2012.01.0001.
- (6) J. Spring, et al., *Opt. Express* 21 (11), 5932-5935 (2013); doi:10.1364/OE.21.013522.
- (7) A. Crespi, et al., *Nat. Commun.* 2 (566) (2011).
- (8) T. Gerrits, et al., *Phys. Rev. A*, 84 (6), 60301 (2011).
- (9) T. Meany, et al., *Laser Photon. Rev.* 8 (3), L42-L46 (2014).
- (10) B.P. Lanyon, et al., *Nat. Chem.* 2 (2), 106-111 (2010); doi:10.1038/nchem.483.
- (11) A. Crespi, et al., *New J. Phys.* 15 (1), 013012 (2013); doi:10.1088/1367-2630/15/1/013012.
- (12) McMillen et al., *Opt. Lett.* 37 (9), 1418 (2012).
- (13) J.E. McCarthy, et al., *Opt. Express* 20 (2), 1545-1551 (2012).

著者紹介

トマス・ミーニは、オーストラリア、ノースライドのマコーリー大学、光システム向け超広帯域デバイスセンター(CUDOS)でPh.D取得。
email: thomas.meany@students.mq.edu.au URL: <http://physics.mq.edu.au>