

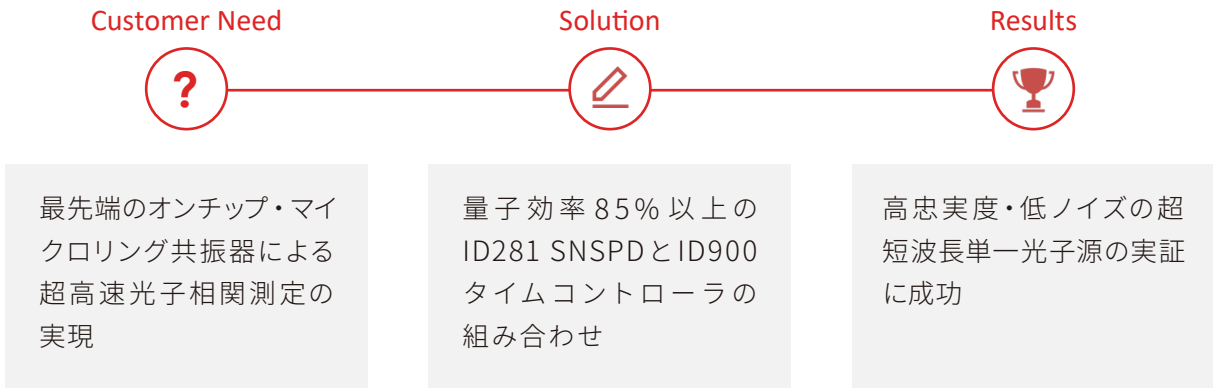
Redefining Measurement

Use Case: Integrated Quantum Photonics

オンチップの超高輝度単一光子源



お客様：スティーブンス工科大学
研究分野：ナノフォトニクス
国：アメリカ



コンテキスト

量子インターネットの恩恵を受けるためには、量子ビットを長距離にわたって忠実に伝送する必要があります。しかし、飛行量子ビットを作成して扱うためには、膨大な技術的要件が必要です。

量子ビットを符号化するためには、単一光子源、つまりある時間間隔に、1つだけ光子が生成されるとわかっている光源が必要です。減衰したレーザー光では、この条件を満たすことができません。1つの時間間隔に平均1個のレーザー光がある場合、実際には0個の光子か、1個以上の光子がある可能性が高いからです。

私たちは伝送損失を最小限に抑えたいので、光ファイバーの低吸収波長（通信用Cバンド、1530 ~ 1565nm）付近で自然に光子を放出する光源が望ましいのです。量子インフラの規模を拡大するためには、豊富なフォトニック回路を構築する可能性が必要であり、そのためには固体基板に埋め込まれたコンパクトな光源が望ましいのです。そしてもちろん、量子ビットをできるだけ高速に送信するためには、タイミングエレクトロニクスが管理できる限りのシングルフォトン数を持つ明るい光源が必要です。

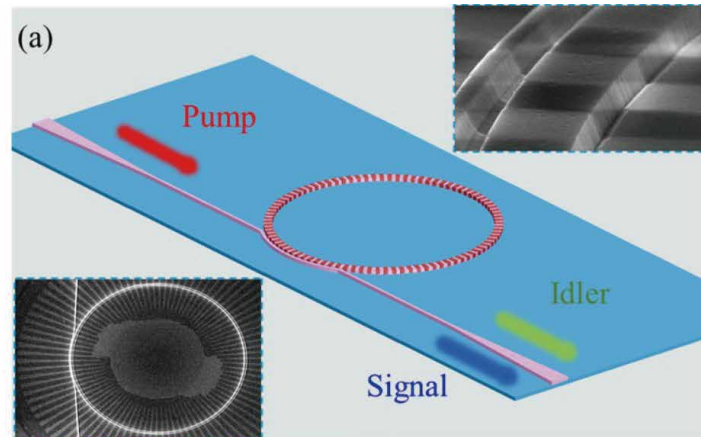


図1：(Zhaohui Ma et al. [1]より引用) PPLN マイクロリング共振器の模式図、およびその走査電子顕微鏡写真(挿入図)。ペアの通信波長の光子(～1550nm)に変換される。

スティーブンス工科大学のQuEST (Laboratory for Quantum Enhanced Systems and Technology) に所属するZhaohui MaとJia-Yang Chenは、通信波長の単一光子を生成する最先端のオンチップ光源を開発しました [1] [2]。

このデバイス(図1)は、周期的に研磨されたニオブ酸リチウム(PPLN)のマイクロリング共振器をベースにしており、入射した光子は、PPLNの非線形光学特性を介して相互作用し、入射光の2倍(自発的パラメトリックダウンコンバージョン、SPDCなど)または1/2(第2高調波発生、SHGなど)の波長の光子を生成します。SPDCによって生成された光子対を利用して、ZhaohuiとJia-Yangのデバイスは、ヘルルド単一光子源として動作させることができます。スペクトル的に区別されたシグナル光子とアイドラー光子が別々の光路にフィルタリングされ、シグナル光子を検出すると、同時にもう一方のアームにちょうど1つのアイドラー光子があるはずだということがわかります。

お客様のニーズ

ZhaohuiとJia-Yangは、自分たちのデバイスの性能を示すために、次のような重要な数値を測定したいと考えています。

- **PGR (Pair Generation Rate)**：デバイス内で光子のペアが生成される速度
- **輝度**：入射したポンプの出力によって生じるPGRの変化
- **同時計数比 (CAR)**：出力に含まれる多光子のスプリアス発光の測定値
- **$g^{(2)}(0)$ 、遅延ゼロの2次自己相関**：単一光子信号の純度を示す標準的な尺度

これらの測定には、時間相関単一光子計数(TCSPC)が必要で、単一光子検出器と時間制御電子機器が必要となります。また、これらの測定は、高い検出効率、低いダークカウントレート、高いタイミング分解能によってより優れたものになります。

しかし、第一の課題は、ナノフォトニックデバイスの単一光子光源としての性能を実証することです。そのためには、HBT (Hanbury Brown and Twiss) 実験で2次の自己相関関数($g^{(2)}(\tau)$)を測定して、放出された単一光子に強いアンチバンチングがあることを示す必要があります。

ZhaohuiとJia-Yangが使用したHBTのセットアップを図2に示します。 $g^{(2)}(\tau)$ の2次自己相関関数の測定は自己相関関数の測定は、アイドラー光子の腕にある2つの検出器の間の開始-停止時間の遅延のヒストグラムです。光子の腕にある2つの検出器間の開始-停止時間遅延のヒストグラムであり、1つの検出器で光子を観測した後、時間遅延 τ で2番目の光子を観測する可能性を示しています。遅延ゼロの値 $g^{(2)}(0)$ は、一光子の純度を測る標準的な尺度となります。

レーザの場合、各光子の到着時間は他のすべての光子に対して独立しているため、一様な $g^{(2)}$ の曲線が見えます。単一光子源では、(理想的には) ゼロ遅延では偶然性はなく、無相関な偶然性の均一な正のバックグラウンドが見られます。

この種のナノフォトニックデバイスでは、 $g^{(2)}$ カーブの測定にはいくつかの技術的課題があります。

1. 時間分解能

$g^{(2)}$ カーブの時間幅は、通常、ナノ秒以下のオーダーです。ジッタが大きい検出器では、曲線のそのような鋭い特徴を検出することができないため、実験では統計的に有意なアンチバンチング・ディップを観測することができません。QuESTラボの場合、彼らのデバイスの空洞寿命のオーダーである約80 psに時間が制限されているため、同等の時間枠でのタイミング・ジッタを持つ検出器が必要であり、2倍短い時間枠が望ましい(すなわち、40-80 psのタイミング分解能を持つ検出器)とされています。

2. 効率

通常のHBT実験では、2つの検出器で二重検出イベントが記録されるため、信号は平均単一光子計数率の2乗に比例して向上します。厳密に言えば、ヘラルド配置は3回の同時検出に依存するため、信号は平均計数率の3乗に比例します。比較的高い単一光子計数率であっても、二重および三重検出はまれであり、統計的に有意な測定値を得るためには数分、数時間、または数日にわたる測定を必要とします。

TCSPCの光子検出統計がポアソン分布に従うことを考えると、検出器の効率を向上させることで、同等の統計を構築するために必要な時間を2~3の累乗で削減することができます。検出器の効率を2倍にすることは、300秒の測定と300日の測定の違いに相当します。

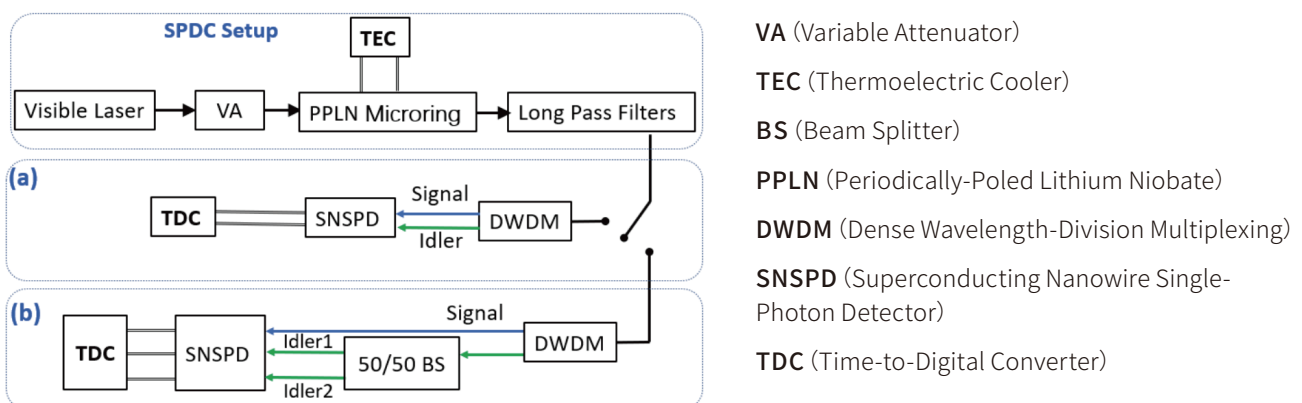


図2: (Zhaohui Ma et al. [1]より引用) (a) 光子対生成率を評価するための実験セットアップ。(b) ヘラルド単一光子生成の忠実度。

3. ノイズフロア

ポンプパワーが高い場合、実験のノイズはマイクロリングデバイスからの多光子対の放出に支配され、パワーが低い場合は、検出器のダークカウントレートが支配的になります。測定時のノイズは、観測された $g^{(2)}$ 曲線の最小ディップを増大させます。したがって、このデバイスの単一光子純度を可能な限り忠実に実証するためには、検出器のダークカウントレートを最小限に抑えることが最も重要です。

ソリューション

QuEST ラボの量子センシングのニーズに応えるために、ID Quantique は ID281 超電導ナノワイヤ単一光子検出器と ID900 タイム・コントローラの組み合わせを提供しました。SNSPD の高効率 (1550nm で 85% 以上)、タイミング分解能 (46ps 以下) および低ダークカウントレート (50 ~ 100Hz) と ID900 のタイミング精度が相まって、QuEST 研究室の量子センシングに貢献しました。これにより、単一光子および光子対 TCSPC のすべての主要な測定を超高速で実行することができました。

結果

ID281 SNSPD と ID900 タイム・コントローラの組み合わせでマイクロリング共振器デバイスの出力を測定することにより、QuEST ラボは最先端の超小型通信波長単一光子源の性能を実証することができました。

Zhaohui と Jia-Yang のデバイスの輝度とペア生成率は、類似のデバイスに比べて桁違いに高い結果でした。特徴的な単一光子アンチバンチングディップは、低出力のポンプパワーでゼロに極めて近く、 $3.4\mu\text{W}$ のポンプパワーで $g^{(2)}(0) = 0.0080(7)$ となり、高品質の単一光子源であることを示しました。さらに高いポンプパワーでも、 $13.4\mu\text{W}$ のポンプパワーで $g^{(2)}(0) = 0.097(76)$ と、説得力のあるサブポアソンの光が得られ、スケーラブルな単一光子技術として期待されています。ポンプパワーが高くなると多光子対発光が相対的に増加することから、信号フォトンアームに光子数分解検出器を用いることで、高出力単一光子の純度をさらに向上させることができると考えています。

ID281 SNSPD は、ダークカウントレートが非常に低いため、測定された $g^{(2)}$ カーブのノイズへの影響はごくわずかであり、デバイス自体を忠実に再現することができました。また、ID281 と ID900 の組み合わせによる低いタイミング・ジッタは、高分解の $g^{(2)}$ カーブの測定を可能にしました。一方、ID281 の高い検出効率は、非常に低い励起パワーでも、実験条件を変えて合理的な時間内に様々な TCSPC 測定を繰り返すことを可能にしました。



TCSPC 装置を ID281 SNSPD と ID900 タイム・コントローラにアップグレードすることで、最新の超高輝度オンチップ量子光子源の真の性能をよりよく示すことができました。SNSPD の効率性、低ノイズ、正確なタイミングがなければ、我々の実験は現実的な時間では行うことができず、質の低いデータしか得られなかったと思います。

Zhaohui Ma
スティーブンス工科大学博士研究員

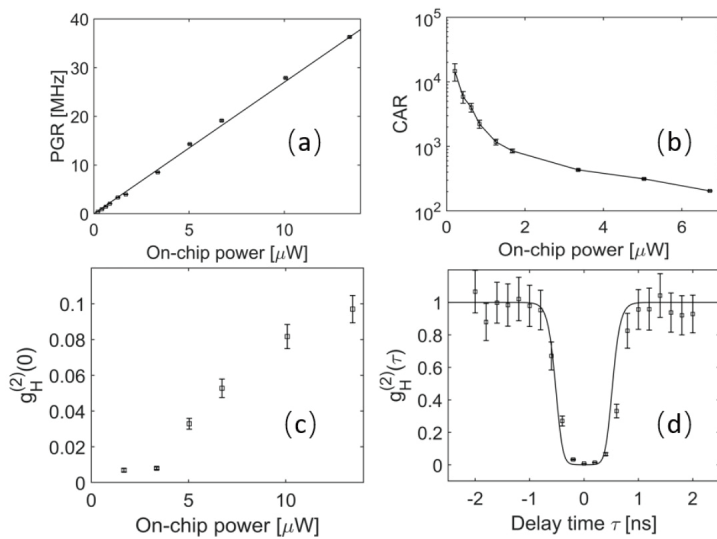


図3: (Zhaohui Ma et al. [1]より引用) 光源の (a) 入射ポンプパワーの関数としてのペア生成率、(b) ポンプパワーの関数としての生成された光子ペアの同時計数比、(c) ポンプパワーの関数としてのゼロ遅延 $g^{(2)}(0)$ アンチバンチングディップ、(d) 3.4 μ Wのポンプパワーで $g^{(2)}(0)=0.0080(7)$ に対応するヘラルド・アイドラー・フォトンの単一 $g^{(2)}$ 測定の実験結果。

このようなデバイスは、量子ネットワークにおける統合フォトニック回路の有望な候補技術です。このデバイスは、コンパクトで明るい通信波長の単一光子源としての性能が実証されており、マイクロ共振器チップを高度な光/物質相互作用が可能により複雑なデバイス統合できる可能性があります。

このような高性能単一光子源は、量子通信、コンピュータ、計測、顕微鏡など、さまざまな用途に利用できます。例えば、これらのデバイスを1つのチップ上にカスケード接続すれば、長距離量子リレーのためのエレガントなエンタングルメントソースとなり、さらに長距離でより豊かな量子ビット状態を共有できる実用的な量子リピーターとなるかもしれません。これらのフォトニック・ビルディングブロック技術は、強力で将来性のある量子インターネットを実現するために必要なリソースを提供してくれると考えています。

MEET THE PRODUCT



ID281 Superconducting Nanowire



ID900 Time Controller Series

[1] 'Ultrabright Quantum Photon Sources on Chip', Zhaohui Ma et al., 2020, [Phys. Rev. Lett. 125, 263602](https://doi.org/10.1126/science.1263602)

[2] 'Photon Conversion and Interaction on Chip', Jia-Yang Chen et al., 2021, [arXiv:2105.00275](https://arxiv.org/abs/2105.00275)