

中赤外シリコンオンチップ量子計測に向けた 量子もつれ光子対の生成と評価

香川大学創造工学部 助教 小野 貴史

1. はじめに

近年、光量子技術の発展により、量子センシングや量子計測の分野では、高性能かつ高効率な実験系の実装が強く求められている。なかでも、シリコンを基盤とする光集積回路は、小型・高集積化が可能であり、さらに既存の CMOS 技術との高い互換性を持つことから、将来的な量子デバイスのスケーラビリティを支えるプラットフォームとして期待されている [\[1\]\[2\]](#)。

これまでの光量子計測回路は、主に通信波長帯域 ($1.55\mu\text{m}$) を用いて実装されてきた [\[3\]\[4\]](#)。しかしこの波長帯では、シリコン中で不可避な 2 光子吸収により光損失が大きくなるという課題があり、非線形光学効果を用いた高強度な量子光源の実装が難しいという課題があった。これは、高性能な量子デバイスの開発におけるボトルネックの一つとなっている [\[5\]\[6\]](#)。

本研究では、このような課題を克服するために、2 光子吸収が抑制される中赤外波長領域（およそ $2\mu\text{m}$ ）に着目し、シリコンフォトニクスプラットフォーム上での非線形量子光源の開発と、それに基づく量子計測技術の基盤構築を目的とした [\[7\]\[8\]\[9\]](#)。具体的には、波長 $2.2\mu\text{m}$ 帯の中赤外光を用い、シリコン導波路内で自発的四光波混合 (Spontaneous Four-Wave Mixing, SFWM) を利用して量子もつれ光子対を生成し、その特性を評価することを目指している。

最終的な中赤外量子光源の構築に向けて、本研究では以下の準備を進めた。まず、中赤外波長に最適化された導波路構造の設計と、光学的伝搬特性に関する数値解析を行い、損失やモードプロファイルの最適化を図った。

さらに、量子光源実現に必要なレーザー光源の立ち上げを行い、先行的に通信波長帯域における SFWM 実験を実施した。また、分光器を用いたレーザースペクトルの計測やフィルタリングを通じて、光子対生成に適した波長およびスペクトル条件の検討を行った。

これらの取り組みは、中赤外波長帯での本格的な量子光源構築に向けた技術的基盤を整えるものであり、今後の研究展開において極めて重要な成果と位置付けられる。

2. 中赤外シリコンオンチップ量子計測に向けて

2.1. 導波路構造の最適化

四光波混合 (Four-Wave Mixing, FWM) は、三次の非線形光学効果の一つであり、3 つの異なる周波数を持つ光が媒質に入射されると、新たに第 4 の光が生成される現象である。中でも、シード光（外部からの入力光）を用いない場合は「自発的四光波混合」と呼ばれる。

本研究で用いる自発的四光波混合では、単一の周波数を持つ励起光（ポンプ光）を導波路に入射することで、異なる周波数を持つシグナル光子とアイドラー光子の対が生成される。この現象を光子の観点から見ると、励起光中の 2 つの光子が、シグナル光子とアイドラー光子へと波長変換される過程として理解できる。

自発的四光波混合を効率よく発生させるためには、エネルギー保存則と位相整合条件の両方を満たす必要がある。ポンプ光、シグナル光、アイドラー光の周波数をそれぞれ ω_p 、 ω_s 、 ω_i とすると、エネルギー保存則は以下のように表される：

$$2\omega_p = \omega_s + \omega_i \quad \text{Eq.(1)}$$

また、それぞれの波数を k_p 、 k_s 、 k_i としたとき、位相整合条件は以下のように表される：

$$-(2k_p - k_s - k_i) + 2\gamma P \approx 0 \quad \text{Eq.(2)}$$

ここで、 P は励起光の強度、 γ は非線形係数であり、媒質の非線形性の強さを表すパラメータである。

本研究では、生成されるシグナル光の(波長 λ_s)とアイドラー光(波長 λ_i)の波長差 $\Delta\lambda = \lambda_i - \lambda_s$ が、励起光の中心波長 λ_p に比べて非常に小さい条件($\Delta\lambda \ll \lambda_p$)を利用する。この条件下では、Eq.(2)の第1項は、シリコン導波路における群速度分散(Group Velocity Dispersion, GVD)により近似可能である。一方、Eq.(2)の第2項は常に正の値を持つため、位相整合条件を満たすには、少なくとも負の群速度分散を持つ導波路構造が必要であることが分かる。

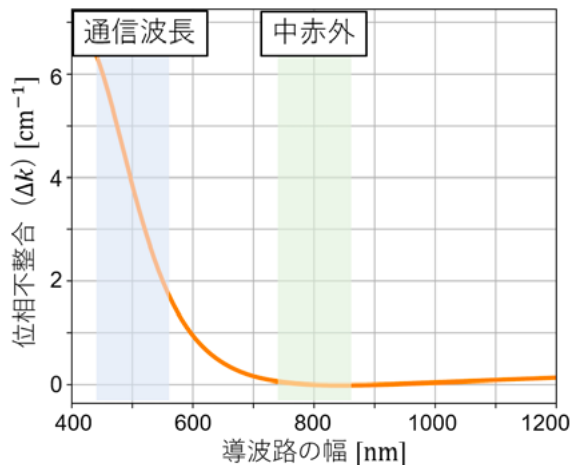


Fig. 1 位相不整合の導波路幅依存性

このような背景のもと、本研究では、シリコン導波路の厚みと幅を変化させた際の群速度分散の変化をシミュレーションによって調べた。Fig. 1には、波長 2200 nm、導波路厚み 220 nm の条件における、導波路幅に対する群速度分散の依存性を示している。縦軸には、光が 1 cm 進んだときの位相不整合量を示している。

シミュレーションの結果、通信波長帯域 (1.55

μm) においては導波路幅が約 500 nm 付近で群速度分散が最小となる一方で、中赤外波長帯 (2.2 μm) では約 800 nm 付近で位相不整合の値が最小となることが確認された。

さらに、導波路の厚みを増加させることで位相不整合の値をさらに低減できることも、同様のシミュレーションから明らかとなった。今後は、導波路厚みを大きくした設計についても検討を進めていく予定である。

2.2. 中赤外励起光源の構築

本研究では、シリコン光導波路における自発的四光波混合を利用した光子対生成において、より高効率な生成の実現を目指している。従来、通信波長帯域 (約 1550 nm) を用いた実験では、ポンプ光として 100 mW 程度の出力を導波路に入力すると、シリコン材料における二光子吸収 (Two-Photon Absorption, TPA) の影響により、顕著な光損失が発生していた。これは、光子対生成効率を大きく制限する主要因の一つであった。

この課題を克服するため、本研究では、TPA の影響を受けにくい中赤外波長領域 (2 μm 以上) を励起光源として採用し、自発的四光波混合による高効率な光子対生成の実現を試みている。中赤外領域では、シリコンのバンド構造上、TPA が大幅に抑制されることが理論および先行研究から知られており、これにより、従来の波長帯では困難であった高強度の励起光を用いた光子対生成が可能になると期待される。

本研究で構築した中赤外励起光源は、中心波長約 2200 nm、線幅 1 nm 以下の狭帯域な連続波 (CW) レーザーである。出力は安定しており、シリコン光導波路への十分な光入力が可能である。一方、スペクトル計測の結果、ピーク波長から若干離れた領域にも不要なスペクトル成分が確認されたため、これらを除去する目的で周波数フィ

ルタを導入し、光源の狭帯域化に取り組んだ。

中赤外領域での光学実験においては、通信波長帯とは異なり、市販のファイバーベースの光学部品（波長フィルタ、偏光板、アイソレータなど）の入手が困難であるという課題がある。そこで本研究では、ファイバーベースの構成を避け、バルク光学系による光制御を採用した（Fig. 2）。具体的には、ポンプ光スペクトルの狭帯域化には、焦点距離 10 cm のモノクロメータを用いた。モノクロメータは波長ごとの回折角を利用して高い波長選択性を実現できるため、中赤外領域においても有効な波長分離手段となる。このモノクロメータは、約 30 dB の除去比と 1 nm 程度の波長分解能を有しており、中赤外領域における SFWM 実験に十分な性能を示すことが確認された。

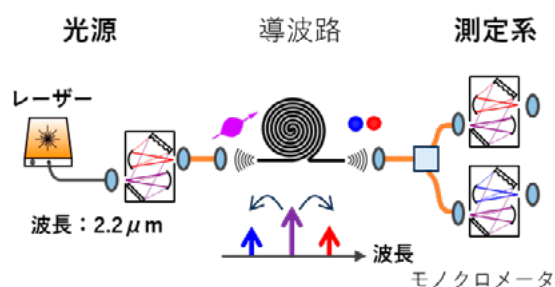


Fig. 2 測定系の概略図

モノクロメータによるスペクトル整形の結果、ピーク波長から離れた不要なスペクトル成分は測定限界程度にまで抑制され、目的とする波長のみを高純度で抽出できることが確認された。これにより、導波路内での非線形光学過程に対する不要な影響を低減し、効率的な光子対生成に寄与することが期待される。

2.3. 中赤外自発的四光波混合におけるシグナルおよびアイドラー光子の分離と検出系の設計

自発的四光波混合（SFWM）によって生成されるシグナル光子およびアイドラー光子の光強度

は、通常ごく微弱であり、数フェムトワット (fW) 程度にとどまると予想される。一方、これらの光子は高強度の励起光と同じ導波路内を伝搬し、かつ波長も励起光と非常に近接しているため、高精度に検出するには励起光と確実に分離するための高性能な波長選別手法が不可欠である。

本研究では、シリコン光導波路内で生成された光子対（シグナル光子およびアイドラー光子）と励起光を分離する手段として、光源スペクトルの狭帯域化と同様に、モノクロメータを採用する。これにより、微弱な光子信号の検出において、励起光に起因するノイズを大幅に抑制することが可能となる。

Fig. 2 には、本研究で構想する中赤外領域における SFWM 実験系の全体構成を示す。まず、前節で述べたように、モノクロメータによってスペクトルを狭帯域化した中心波長 2200 nm のレーザー光をシリコン光導波路に入射する。導波路内では、非線形光学効果によってシグナル光子およびアイドラー光子が生成され、励起光とともに射出される。これらの射出光は光ファイバに結合された後、ファイバ出力からバルク光学系へと導かれる。

バルク光学系では、まずビームスプリッターを用いて光を 2 つの空間モードに分岐させる。それぞれの光路にはモノクロメータを設置し、一方ではシグナル光子のみを選択的に取り出し、励起光およびアイドラー光子を除去する。もう一方では同様にアイドラー光子を抽出し、その他の成分を除去する。このようにして、シグナル光子とアイドラー光子をそれぞれ独立に検出できる実験系を構築する。

このような分離には、非常に高い除去率を持つモノクロメータが必要である。特に、励起光はシグナルおよびアイドラー光子よりも数桁以上強

力であるため、微弱な光子信号を正確に取り出すには、励起光を十分に抑圧する性能が不可欠である。

本研究では、候補として焦点距離の短いダブルモノクロメータと、焦点距離の長いシングルモノクロメータの2種類を比較検討した。一般に、焦点距離の短いモノクロメータは光の取り込み効率に優れ、装置をコンパクトにできる利点がある一方で、波長分解能や迷光抑制性能に劣る傾向がある。一方、焦点距離の長いモノクロメータは装置としては大型化するが、高い分解能と優れた迷光除去性能を有する。

これらを踏まえ、微弱なシグナルおよびアイドラー光子の精度の高い分離を最優先し、本研究では焦点距離の長いモノクロメータを採用することとした。現在、このモノクロメータを用いた検出系は構築段階にあり、今後、1台のモノクロメータで十分な迷光除去性能が得られない場合には、2台構成のダブルモノクロメータ系やバンドパスフィルタとの併用など、さらなる改善策についても検討を進める予定である。

2.4. 通信波長帯域レーザーを用いた自発的四光波混合による光子対生成

中赤外領域での自発的四光波混合に関する実験系の構築を進めるとともに、本研究では並行して、通信波長帯域の励起光を用いた自発的四光波混合による光子対生成実験を行った。通信波長帯域における光子対生成はすでに確立された技術であるが、中赤外領域での高強度励起光を用いた場合との生成効率の比較において重要な基準となる。

通信波長帯域の実験では、厚さ 220nm、幅 440nm のシリコン光導波路を使用した。中心波長 1549nm、出力約 10mW の連続波 (CW) 光源を長さ約 6mm の導波路に入射し、光源との結合に

はスポットサイズコンバータを用いた。結合損失は約 4dB であり、導波路内の光パワーは約 5mW と見積もられる。

シリコン導波路内では、自発的四光波混合によりポンプ光中の2光子が波長の異なるシグナル光子およびアイドラー光子へと変換される。これらの光子は同時に生成されるため、非常に短い時間幅内に存在し、時間的に強い相関を持つ。

導波路で生成されたシグナル光子とアイドラー光子は、再びスポットサイズコンバータを介して光ファイバへ結合し、その後、波長フィルタにより空間的に分離した。各光子は超伝導単一光子検出器によって検出し、同時検出のレートを計測した。

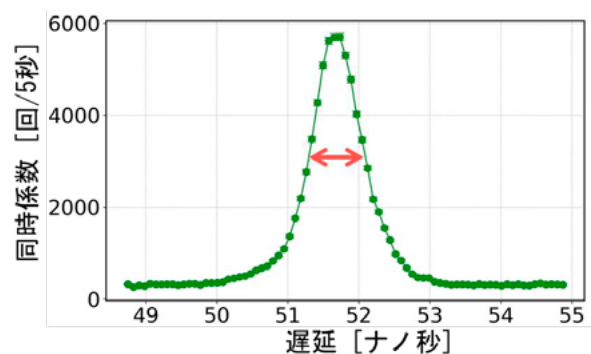


Fig. 3 シリコン中で生成した光子対の観測結果

Fig. 3 には、生成された光子対の一方に時間的な遅延を与えた際の、同時検出イベントのカウンtrateを示す。横軸は光子間に与えた時間差である。なお、今回の実験では、時間幅 1 ナノ秒内で同時に検出されたイベント数を「同時係数」としてカウントした。結果として、時間遅延が 0 のときにカウント数が増加することが確認され、時間的に相関のある光子が生成されていることが明らかとなった。

3. まとめ

本研究では、シリコンフォトニクスを基盤とした中赤外波長領域での非線形量子光源の構築を目指し、導波路構造の最適化、励起光源の開発、そして高精度な光子分離・検出手法の確立に取り組んだ。特に、シリコンにおける二光子吸収が抑制される中赤外波長域の活用により、従来の通信波長帯域では困難であった高強度励起下での自発的四光波混合を可能にする基盤技術を整えることができた。

また、シミュレーションによる群速度分散の最適化や、モノクロメータを用いた高性能なスペクトル分離系の設計・構築により、今後の光子対生成実験における高効率かつ高純度な信号抽出の実現に向けて、大きな一歩を踏み出すことができた。

これらの成果は、中赤外領域における量子計測・量子センシング技術の高度化だけではなく、将来的なオンチップ量子情報処理の実現にもつながる重要な基礎技術と位置付けられる。今後は、今回構築した実験系を用いた実際の光子対生成および量子相関測定の実施、さらには中赤外フォトニック回路の複雑化・多機能化に向けた展開を進め、量子フォトニクスの発展に貢献していきたい。

4. 参考文献

- [1] B. Jalali and S. Fathpour, "Silicon Photonics," *Journal of Lightwave Technology*, 24, 12, pp. 4600-4615.
- [2] Sun, C., Wade, M., Lee, Y., *et al*, "Single-chip microprocessor that communicates directly using light", *Nature*, 528, (2015) 534–538.
- [3] J. W. Silverstone, D. Bonneau, J. L. O'Brien and M. G. Thompson, "Silicon Quantum

Photonics," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 22, 6, (2016) pp. 390-402.

- [4] Wang, J., Sciarrino, F., Laing, A. *et al*. Integrated photonic quantum technologies., *Nat. Photonics*, **14**, (2020), p.273–284
- [5] Qiang, X., Zhou, X., Wang, J., *et al*, Large-scale silicon quantum photonics implementing arbitrary two-qubit processing., *Nature Photon*, **12**, (2018), p.534–539.
- [6] Shekhar, S., Bogaerts, W., Chrostowski, L., *et al*, Roadmapping the next generation of silicon photonics., *Nat Commun*, **15**, 751, (2024), p.1-15.
- [7] Jeff Chiles and Sasan Fathpour, "Mid-infrared integrated waveguide modulators based on silicon-on-lithium-niobate photonics," *Optica*, 1, (2014), p. 350-355
- [8] Yi Zou, Swapnajit Chakravarty, Chi-Jui Chung, Xiaochuan Xu, and Ray T. Chen, "Mid-infrared silicon photonic waveguides and devices [Invited]," *Photon. Res.* 6, (2018), p. 254-276
- [9] C. J. Mitchell, T. Hu, S. Sun, C. J. Stirling, M. Nedeljkovic, A. C. Peacock, G. T. Reed, G. Z. Mashanovich, and D. J. Rowe, "Mid-infrared silicon photonics: From benchtop to real-world applications," *APL Photonics* 9, 080901, (2024), p.1-15.

5. その他成果発表等

・ 山下普暉, 藤原幹生, 三木茂人, 寺井弘高, 小野貴史, ボソニック光集積量子回路を用いた量子もつれ状態の評価, 第 48 回量子情報技術研究会, 京都, 2023 年 5 月 29 日.

- ・ 小野貴史, シリコンフォトニクスを利用した光量子回路とその応用, 第三期第 1 回光集積及びシリコンフォトニクス研究会, オンライン, 2023 年 6 月 30 日.
- ・ 安部駿佑, Wojciech Roga, 武岡正裕, 小野貴史, 少ない光子を用いた光量子分類器, 第 50 回量子情報技術研究会, つくば, 2024 年 5 月 28 日.
- ・ Takafumi Ono, Photonics in Japan, Quantum Bridge, オンライン, 2024 年 7 月 10 日.
- ・ 小野貴史, シリコンフォトニクスを活用した量子情報処理, フォトニクス技術フォーラム 第 3 回定例研究会, 大阪, 2024 年 11 月 14 日
- ・ Takafumi Ono, Wojciech Roga, Kentaro Wakui, Mikio Fujiwara, Shigehito Miki, Hirotaka Terai, Masahiro Takeoka, “Demonstration of a Bosonic Quantum Classifier with Data Reuploading”, Phys. Rev. Lett. 131, 013601, (2023), p.1-6.

6. 謝辞

本研究は、公益財団法人島津科学技術振興財団の研究開発助成を受け、実施されたものである。心より御礼申し上げます。