

修士学位論文要約（令和4年3月）

Q 値変調微小リング共振器を用いた量子光発生に関する研究

福永 雅樹

指導教員：山田 博仁， 研究指導教員：松田 信幸

Research on quantum light generation using Q -value modulated micro-ring resonators

Masaki FUKUNAGA

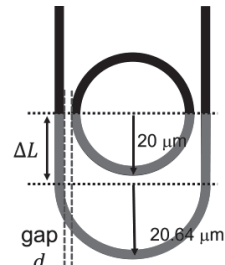
Supervisor: Hirohito YAMADA, Research Advisor: Nobuyuki MATSUDA

Photon pairs generated by nonlinear optical processes such as spontaneous four-wave mixing are widely used in optical quantum information processing. Photon pairs can be efficiently generated using silicon micro-ring resonators. In the photonic quantum computation, photon-pairs generated from multiple light sources are interfered with in an optical circuit to perform information processing. However, due to the high Q value ($>10^4$) of the micro ring resonator, *i.e.*, the narrow resonant linewidth, it is difficult to match the wavelength of the idler photons with each other while matching the wavelength of the signal photons with each other in all ring resonators due to the fabrication errors. To solve this problem, we designed and fabricated a Q -value-modulated micro-ring resonator that can modulate the resonant Q -value of the micro-ring resonator depending on the wavelength and demonstrate the generation of correlated photons.

1. はじめに

近年、光量子情報技術全般に用いられることから光子対に関する研究が活発に行われている。光子対は、自発四光波混合等の非線形光学過程を経て発生することができる。特にシリコン細線導波路などの高い光学非線形性を有する導波路からなる微小リング共振器は、共振器閉じ込めによる非線形増強効果により、光子対を高効率に発生できる事から注目されている¹⁾。光子対を量子計算に用いる場合、複数の光源から発生する光子対を光回路で干渉させることで演算を行う。微小リング共振器型の光子対源を複数個用いた量子計算²⁾では、各々のリング共振器において、リング共振器で決まる共振波長にシグナル光子とアイトラ光子の対が放出される。しかしながら、微小リング共振器の高い共振 Q 値($> 10^4$)、すなわち狭い共振線幅のため、すべてのリング共振器においてシグナル光子の発生波長を互いに一致させつつ、アイトラ光子の波長も互いに一致させることは、製造誤差の観点から困難である。この問題を回避するためにリング共振器の Q 値を低減することが考えられるが、これを行うと非線形性の増強効果が低下し、光子対発生効率が減少してしまう。

本研究では、微小リング共振器の共振 Q 値を波長に依存して変調することのできる Q 値変調微小リング共振器を設計し、試作した。 Q 値変調により、ポンプ光を発生させる共振モードの Q 値は高く維持しつつ、シグナル光子とアイトラ光子を発生させる共振モード

図 1: Q 値変調微小リング共振器の構造

の Q 値を低く設計することで、シグナル光子とアイトラ光子の発光スペクトル幅を広げ、前記の問題を解決可能である。さらに試作した Q 値変調微小リング共振器を用いて光子対発生実験を行い、その評価を行った。

2. Q 値変調微小リング共振器の設計

リング共振器の共振 Q 値はリング共振器と入力用導波路(以下、バス導波路と呼ぶ)との結合強度によって決定される。従って、その結合強度に波長依存性を持たせることができれば、リング共振器の Q 値に波長依存性を持たせることが可能である。我々は、リング共振器のカプラ部分に非対称マッハツェンダー干渉計の構造を用いる。非対称マッハツェンダー干渉計の波長依存性を用いることで、微小リング共振器とバス導波路との結合強度に波長依存性を持たせることができる。本研究では非対称マッハツェンダー干渉計の自由スペク

トル領域 (FSR) がリング共振器の FSR の 2 倍となるように共振器を設計した。共振器の模式図を図 1 に示す。シリコン導波路の断面サイズは、シングルモード条件を満たす幅 440 nm, 高さ 220 nm とし, ΔL 及び gap 幅 d はそれぞれ 30.4 μm , 150 nm とした。また, 非対称マッハツェンダー干渉計構造を持たない通常のシリコンリング共振器と同様のギャップ幅で試作した。試作した素子の透過スペクトルを計測したところ, Q 値変調微小リング共振器において, 共振波長におけるスペクトル線幅の広がりを確認できた。したがって Q 値の波長依存性を確認できた。

3. 光子対発生実験

試作素子を用いて光子対発生実験を行った。光源には利得スイッチパルスレーザを用い, 入力偏波は TE 偏波とした。試作素子の共振波長とポンプ光パルスの中心波長を一致させるために, 試作素子を搭載したチップの温度を調整した。素子への光入出力には先球ファイバを用いた。出力光のうち, シグナル, アイドラ光子の発生に用いる共振波長近傍の光波を, 2 つの BPF により別々の光ファイバ経路へと分離し, 2 台の単一光子検出器を用いてそれぞれ検出した。各検出器からの光子検出信号の時間相関を, TDC (time-to-digital converter) を用いて計測した。その結果, リング共振器からの時間相関のある光子対の発生を確認することに成功した。

次いで, 時間相関ヒストグラムから得られた同時計数値の入力光強度依存性を図 3 に示す。光子対の同時計数は入力光強度の二乗に比例している。このことは, 光子対が自発四光波混合過程を通じて発生したことを示唆している。また, チップの温度を調整し, ポンプ光波長とリング共振器の共振波長を離調したところ, 同時計数は約 70% に低下した。このことより, リング共振器における非線形増強効果を確認できた。

次に, 非対称マッハツェンダー干渉計を持たない通常の微小リング共振器との比較を行った。微小リング共振器を用いて観測した光子対の同時計数を図 3 に示す。 Q 値変調構造の導入により, 光子対発生レートは 0.4 倍に低下した。リング共振器からの光子対発生レートはリング共振器の Q 値に依存する。透過スペクトルから得られる Q 値の測定値を用い, Q 値変調リング共振器からの光子対発生レートとリング共振器からの光子対発生レートの比を理論式³⁾から求めたところ, 約 0.3 と得られた。この値は実験結果である 0.4 に概ね一致するため, Q 値変調構造の導入による同時計数の低下は Q 値の低下を用いて説明できることが分かった。

4. まとめ

本報告では, Q 値変調微小リング共振器を用いた

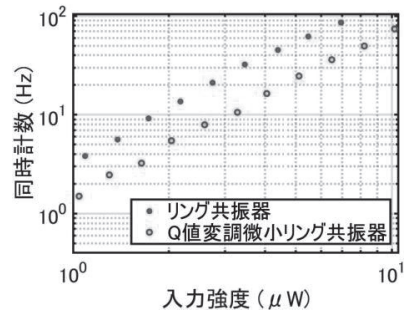


図 3: 同時計数のポンプ光強度依存性

光子対の発生に成功し, 光量子情報処理のための量子光源として Q 値変調微小リング共振器の応用可能性を示した。また Q 値変調構造の導入による光子対発生レートの低下は共振 Q 値の減少で説明できることを確認した。

文献

- 1) S. Clemmen, K. Phan Huy, W. Bogaerts, R. G. Baets, Ph. Emplit, and S. Massar, *Opt. Express* **18**, 14107-14107 (2010).
- 2) J. M. Arrazola, V. Bergholm, K. Brádler, T. R. Bromley, M. J. Collins, I. Dhandl, A. Fumagalli, T. Gerrits, A. Goussev, L. G. Hel, J. Hundal, T. Isacson, R. B. Israel, J. Izaac, S. Jahangiri, R. Janik, N. Killoran, S. P. Kumar, J. Lavoie, A. E. Lita, D. H. Mahler, M. Menotti, B. Morrison, S. W. Nam, L. Neuhaus, H. Y. Qi, N. Quesada, A. Repeating, K. K. Sabapathy, M. Schuld, D. Su, J. Swinerton, A. Száva, K. Tan, P. Tan, V. D. Vaidya, Z. Vernon1, Z. Zabaneh and Y. Zhang, *Nature* **591**, 54 (2021).
- 3) C. Wu, Y. W. Liu, X. W. Gu, X. X. Yu, Y. C. Kong, Y. Wang, X. G. Qiang, J. J. Wu, Z. H. Zhu, X. J. Yang, and P. Xu, *Sci. China-Phys. Mech. Astron.* **63**, 220362 (2020).