

4-2-5 マイクロコムデバイス技術

4-2-5 Device Technology for Microcombs

古澤 健太郎 関根 徳彦

FURUSAWA Kentaro and SEKINE Norihiko

テラヘルツはおよそ 100 GHz ~ 10 THz に対応する、光と電波の中間周波数領域の呼称であり、そのユニークな分光特性を利活用したセンシング・イメージング等に加え、近年では Beyond 5G (B5G) の無線通信を目指した研究開発が活発化している。テラヘルツ連携研究室では、これらの応用に供する高精度テラヘルツ帯信号源の実現を目指して、マイクロコム技術の開発に取り組んでおり、そのデバイス作製に先端 ICT デバイスラボの様々なデバイス加工装置を利用して、デバイス作製技術の開発を行っている。本稿では、マイクロコムデバイス作製の関連技術を紹介する。

Terahertz refers to the frequency range spanning approximately from 100 GHz to 10 THz, which corresponds to the intermediate frequency range between light and radio waves. In addition to sensing and imaging applications, which take advantage of its unique spectral characteristics, recent years have seen active research and development for Beyond 5G wireless communications. We are working on the development of microcomb technology at the Terahertz Research Laboratory in order to realize high-precision terahertz-band signal sources for these applications and are developing device fabrication techniques using various tools available in the Advanced ICT Device Laboratory. In this paper, we review our approaches to the fabrication of microcomb devices.

1 まえがき

テラヘルツ周波数領域の研究の歴史は古く、電波のような透過性と分子の回転遷移による吸収といった特徴的な分光特性を有することから、その特徴を利活用した応用が検討されてきた。現在ではテラヘルツトモグラフィを利用したセキュリティ検査装置や、薬剤の結晶多形識別による品質管理などが実用化されるに至っている。これらをテラヘルツ波の透過強度変化を検出する応用を第1世代と考えると、次世代では、マイクロ波と同様にテラヘルツ電磁波の位相(またはIQ)成分を利活用した応用が増えることが予想される。実際、アルマ天体望遠鏡など電波天文学で利用されている高感度ヘテロダイン観測や、B5Gの無線通信には局発振器としての低ノイズテラヘルツ周波数帯信号源は必要不可欠である。しかし、テラヘルツ周波数帯において、マイクロ波と同レベルの低ノイズ信号源を実現することは単純ではない。なぜなら、マイクロ波周波数標準を逡倍すると、逡倍数が大きいため、逡倍ノイズによる位相ノイズ特性劣化が顕著になるからである。この課題に対して、我々の研究室ではEO変調器コム等、相対位相が安定な光源から光ビート信号を

合成し、フォトミキサーで変換する手法の開発に取り組んできた。光周波数からテラヘルツ周波数を合成する手法では、光源の同相ノイズがキャンセルできることに加え、周波数分割によってノイズを低減することも原理的には可能となる。しかし、EO変調器コムやモード同期レーザー等の固体レーザー光源で構成する手法では、^{てのひら} 掌サイズ以下の小型化には限界があった。

マイクロコムは、高Q値微小光共振器における非線形光学効果を利用して発生する[1]。連続波励起光レーザーを微小光共振器の共振波長に同調すると、共振器内光強度が非常に強くなるため、縮退四光波混合によって他の共振波長にサイドバンドが生成される。さらに、これらのサイドバンド間の非縮退四光波混合が生じることによって、新たなサイドバンドが発生し、結果的に周波数間隔 f_{rep} がほぼ等しい周波数コムが形成される(図1(a))。微小光共振器の自由スペクトル領域(FSR)はおよそ10 GHz ~ 1 THzであるため、従来の周波数コムよりも周波数間隔の広いコムとなり、サブテラヘルツ帯の光ビート信号発生に適する。四光波混合でサイドバンドを発生しただけでは各サイドバンド間の相対位相はランダムであるが、チューリングパターンと呼ばれる熱的平衡的状态、若しくは共振器内

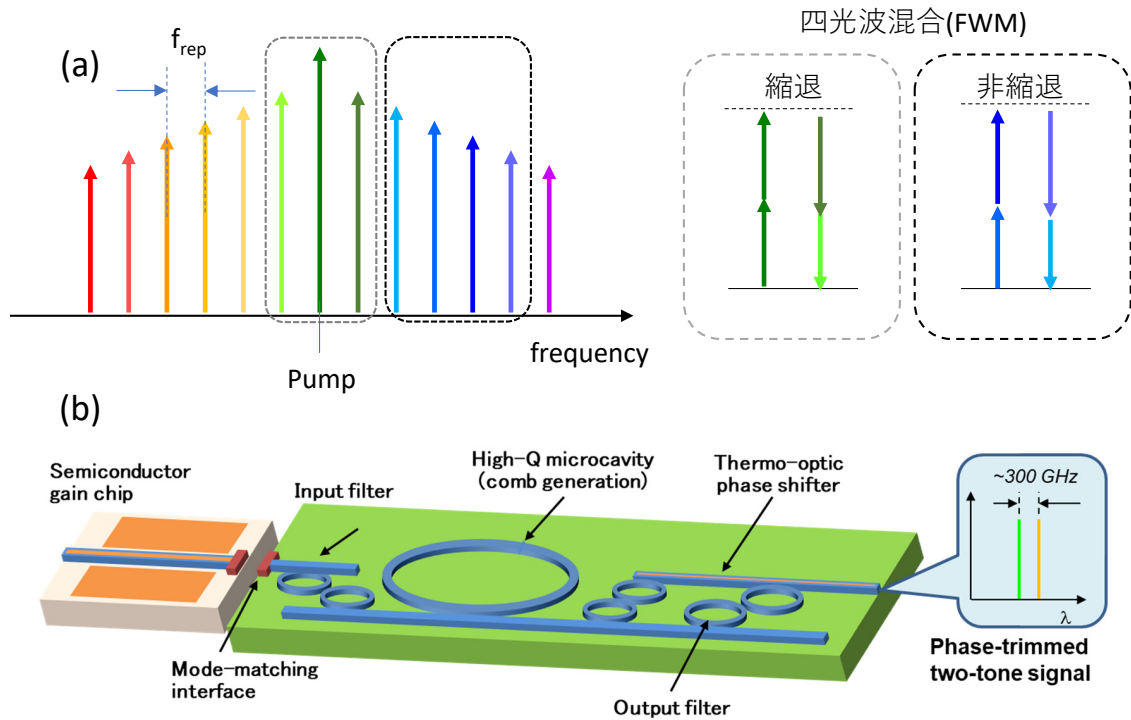


図1 (a) マイクロコムが発生メカニズム (b) マイクロコムデバイスの模式図

を周回する孤立波(ソリトン)状態を励振することによって、これらサイドバンド間の位相同期が実現できる [2]。従来型の周波数コムと比較して、励起用半導体レーザと高 Q 値微小光共振器の組み合わせによって構成できる点で、他の装置に組み込み可能なサイズにまでダウンサイズできる可能性を有している (図 1 (b))。

高 Q 値微小光共振器を構成する材料系は、様々なプラットフォームがある。非常に高い Q 値 ($> 10^8$) を実現する上では、ダイヤモンド旋削によって加工するフッ化物結晶共振器 [3] や、レーザーリフローを利用できるシリカマイクロトroid共振器 [4] 等が有利であるが、低損失にインターフェースを実現するためには長尺なファイバーテーパーが必要となるため、小型化には制約要因となる。一方、光集積回路のプロセスで導波路型リング共振器を作製する場合、成膜表面の粗さとドライエッチングで加工される導波路側面の表面粗さが損失の支配的要因になり、 10^8 以上の Q 値は実現困難となるが、再現性、量産性ともに優れたアプローチとなる [5]。材料としても、Si 熱酸化膜基板へ直接接合によって多様な薄膜結晶材料が実現されたことにより、SiN, Hydex ガラス、五酸化タンタル、カルコゲナイトガラス等、誘電体材料以外にも、ニオブ酸リチウム (LN)、ガリウム砒素等、高非線形光学応答を有する結晶材料をコア層に用いて 10^6 を超える Q 値が実現されている [6]。

2 マイクロコムデバイスの作製

我々は大量生産に適した CMOS プロセスにコンパクトな材料である SiN を用いて微小光共振器を作製している。光通信波長帯励起の三次の非線形光学効果に対しても高い透明性を有するからである。光集積回路ではシリコンフォトニクスが進展が著しいが、Si をコア層とすると、同じ三次の非線形効果である二光子吸収過程がコムを発生するメカニズムである四光波混合と競合してしまう。

SiN は光通信波長帯において正常分散を呈する材料であり、マイクロコムの縦モード間の位相同期を実現するために必要な異常分散領域にするためには、膜厚 700 nm 以上のマルチモード (実効的単一モード) 導波路にする必要がある [7]。しかし、SiN は Si よりも熱膨張係数が大きいため、低圧化学気相堆積法 (LPCVD) などの高温で成膜すると、室温において大きな引っ張り応力が生じ、厚膜では自発的にクラックが発生してしまう。そのため、クラックの伝搬を阻害するパターンを形成する手法 [8] や、光ダマシプロセスにおいて阻害パターンを埋め込む手法 [9] が提案されている。

一方、プラズマ化学気相堆積法 (PECVD) などの低温成膜法を用いれば、応力の問題は回避できる。しかし、原料ガス (SiH_4 と NH_3) の分解時に発生する水素分子に起因して、膜中の残留水素濃度が高くなるという問題がある。残留水素は膜中において N-H 結合基を形成し、その赤外振動モードの倍音吸収が $1.53 \mu\text{m}$ とな

るため、特にCバンドにおいて高Q値の実現が困難となるからである。そのため、重水素化原料 (SiD_4 , ND_3) を利用した低温堆積法によって光通信波長帯でも 10^6 を超えるQ値を実現した報告 [10] もあるが、原料コストを考えると現実的なアプローチとは考え難い。

そこで、我々は hot-wire CVD (HW-CVD) 装置を利用してデバイス作製を行っている。HW-CVD法は、低温堆積法であっても熱的クラッキングによって原料が分解されるため、PECVDと比較して、プラズマダメージが無く、応力制御性に優れ、残留水素濃度も低くできる [11]。実際、 $1\ \mu\text{m}$ 以上の成膜を行ってもクラックは生じず、プロセス中に自発的にクラックが生じることも皆無である。

図2に全体のプロセスフローを示す。HW-CVD法で熱酸化膜付きSi基板にSiN膜を成膜後、電子線描画装置を用いて、レジストマスクのパターニングを行う。そのマスクを用いてフッ素系ドライエッチング装置で異方性エッチングを行い、コア層を加工する。洗浄後、窒素雰囲気中でアニール処理を行い、水素濃度を低減する。そしてクラッド層をTEOS-CVD装置を用いて成膜する。最後に、ダイシング装置を用いて、チップ端

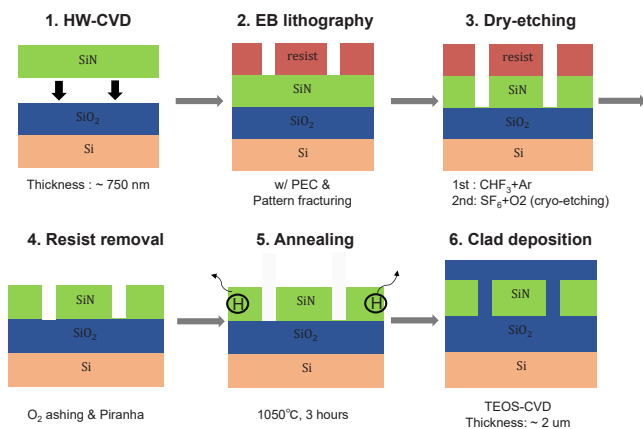
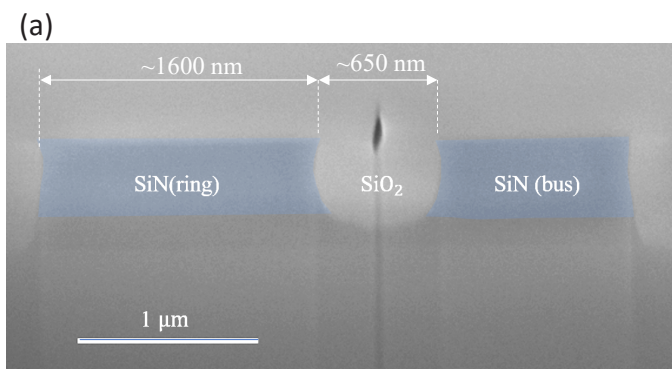


図2 デバイス作製のフロー



面の鏡面研磨処理を兼ねてチップの切り出しを行う。

マイクロコムに必要な導波路サイズは、上述のようにマルチモード導波路であるため、マスクの解像度としては、フォトリソグラフィで十分である。しかし、シングルモードファイバとの入出力インターフェースに必要なスポットサイズコンバータは導波路幅を $150\ \text{nm}$ まで狭くする必要があるため、電子線描画を利用している。電子線描画ではフィールド接続精度が低損失導波路の実現の障害となり、スループットにも課題がある。そこで電子線露光用近接効果補正ソフトウェア BEAMER 等を活用し、高速に低損失導波路用マスクを描画するための工夫を行っている。具体的には、レイアウトの微小図形分割最適化、描画順序の制御、多重露光、Bulk & Sleeves (B&S) [12] と呼ばれる大電流描画の併用等である。特に、B&Sを利用することによって描画時間を $1/4$ 以下に圧縮し、スループットを向上している。

ドライエッチング加工では、誘導性結合プラズマ (ICP) ドライエッチング装置において CHF_3 と Ar の混合ガスによって側壁保護膜を生成後、クライオエッチング装置を利用している。フッ素系ドライエッチングでは、プラズマによって生成されたフルオロカーボン分子が加工側壁に付着し、保護膜として作用することで、異方性ドライエッチングが実現される。しかし、この保護膜生成は、加工側面の表面粗さを悪化させる主要因となるため、必要最小限の側壁保護膜を形成した後、クライオエッチングを行っている。クライオエッチングでは SF_6 と O_2 の混合ガスを用いて SiO_xF_y 分子が側壁の保護膜として形成されるが、この分子は常温に戻すと気化するため [13]、過剰な保護膜形成を抑制することができ、加工後の保護膜除去も容易になるというメリットがある。図3 (a) に加工断面形状の電子顕微鏡写真を示す。

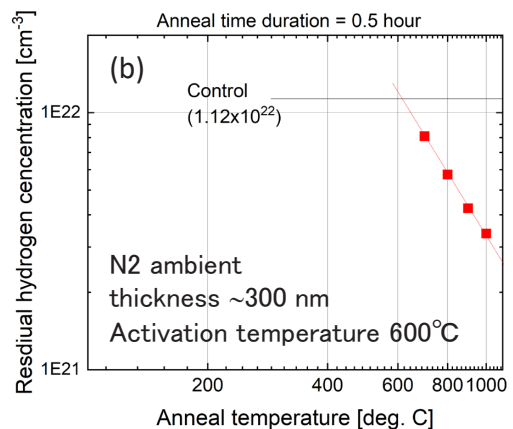


図3 (a) リング共振器結合器部分の加工断面図 (b) 残留水素濃度のアニール処理温度依存性

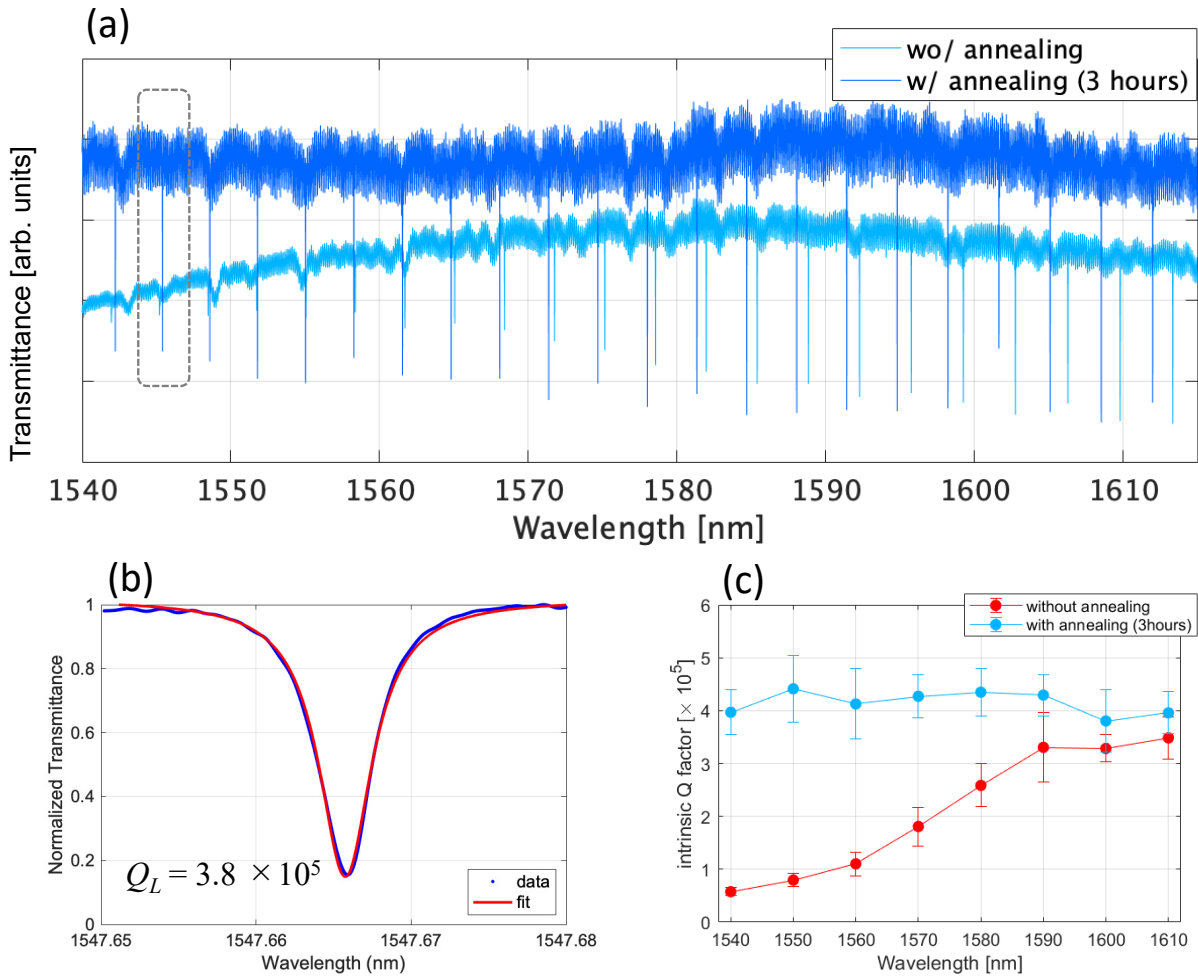


図4 (a) アニール処理の有無の差による透過スペクトル (b) 点線部の拡大スペクトル (c) Q 値の測定結果 [16]

SiN 膜中の残留水素濃度は透過型フーリエ変換赤外 (FTIR) 分光を用いて $3,350 \text{ cm}^{-1}$ の NH 基吸収を直接観測することによって、定量化が可能である [14]。図 3 (b) にアニール温度に対する残留水素濃度の依存性を示す。活性化温度は $600 \text{ }^\circ\text{C}$ であり、石英管炉の常用温度上限である $1,050 \text{ }^\circ\text{C}$ で処理することにより約 1/5 程度まで低減できることがわかる。Si 基板のアニール温度の上限である $1,200 \text{ }^\circ\text{C}$ まで高温アニール処理をすることにより、更に低減できる可能性がある。後述するようにアニール処理は膜の高密度化を伴うが、HW-CVD 法で成膜した SiN 膜では、高密度化に伴うクラック発生は生じないことを確認している。

3 デバイス評価

図 4 に作製したデバイスの透過スペクトルの例を示す。 $1,050 \text{ }^\circ\text{C}$ のアニール処理によって、光通信波長帯 C バンド短波長側の N-H 基に起因する吸収は抑制され、Q 値は L バンドと同程度に改善していることがわかる (図 4 (c))。短波長側での Q 値の相対的な減少がみら

れないことから、NH 基の吸収損失が Q 値の律速要因でなくなっていると考えられる。なお、C バンドにおける負荷時の Q 値は $\sim 3.8 \times 10^5$ であった。一方、アニール処理により SiN 膜が高密度化し、屈折率は上昇するが、膜厚は顕著に減少する ($\sim 7 \%$)。これらの複合的な結果として、群屈折率は減少し、FSR は 408 GHz から 399.3 GHz 程度まで低下していることがわかった。

図 5 (a) に光通信波長帯の共振周波数を高精度に測定 [15] することによって求めた分散測定結果を示す。成膜時の膜厚は 750 nm であり、アニール未処理時は 100 ps/nm/km 程度の異常分散を呈するが、アニール処理によって膜厚が減少することによって、 23 ps/nm/km 程度まで低分散化していることがわかる。図 5 (b) にアニール処理を行った光共振器を強励起した時に得られた四光波混合によるパラメトリック発振のスペクトルを示す。発振閾値は $\sim 100 \text{ mW}$ であり、 520 mW の励起パワーにおいて、光通信波長帯 C 及び L バンドをカバーする広帯域な発振が確認できた。低分散共振器では広帯域なサイドバンドの発生が

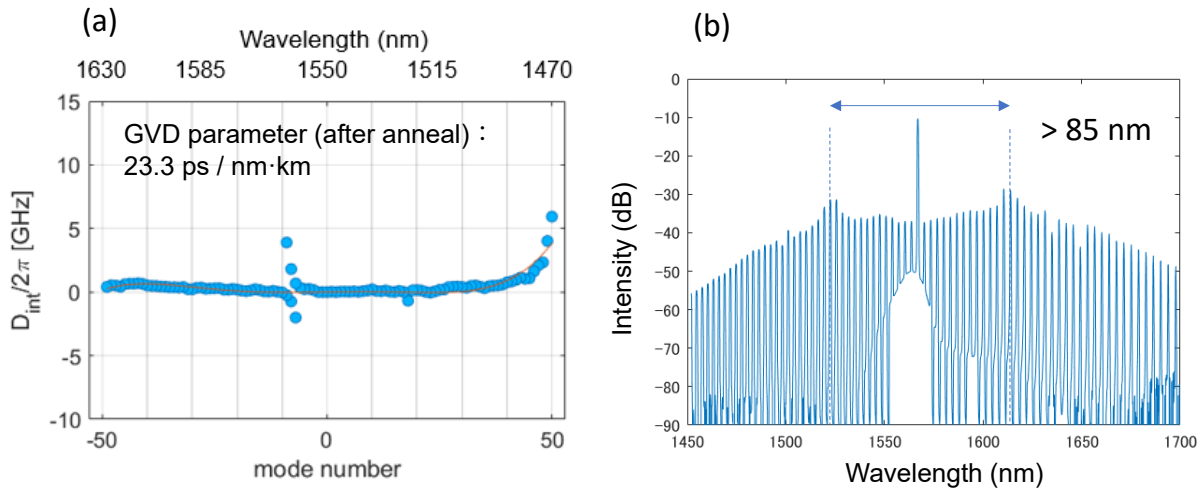


図5 (a) 共鳴周波数測定による分散測定結果 (b) 強励起時 (~ 520 mW) のパラメトリック発振スペクトル [16]。

可能になる一方、位相同期状態である安定なソリトンを生成するためには、ある程度分散が大きい必要があることが計算から予測されており [17]、ソリトンの発生には成膜時の膜厚最適化が必要であると考えられる。

4 おわりに

マイクロコムデバイスに必要な SiN 導波路型微小光共振器の作製技術及びその評価結果を紹介した。低温堆積法である HW-CVD 法にアニール処理を併用し、先端 ICT デバイスラボで利用できる装置を利用したプロセスによって、広帯域パラメトリック発振が可能であるデバイスを作製可能であることを示した。今後は、ドライエッチング加工条件の最適化等により更なる高 Q 値化を目指すと共に、励起レーザ光源や、テラヘルツ発生用のフォトミキサの共集積化を検討していくことが重要と考えられる。

謝辞

本研究の一部は慶應義塾大学理工学部電気情報工学科 田邊孝純教授との共同研究である。本共同研究を推進するにあたり、ご助力を賜りました田邊研究室の半田浩一朗氏、曾田昇汰氏に感謝いたします。本研究の一部は、科研費 JP17K06410 の助成を受けたものである。

【参考文献】

- 1 T. J. Kippenberg, R. Holzwarth, and S. A. Diddams, "Microresonator-based optical frequency combs," *Science*, vol.332, pp.555–559, April 2011.
- 2 T. J. Kippenberg, A. L. Gaeta, M. Lipson, and M. L. Gorodetsky, "Dissipative Kerr solitons in optical microresonators," *Science*, vol.361, eaan8083, Aug. 2018.
- 3 A. A. Savchenkov, A. B. Matsko, V. S. Ilchenko, I. Solomatine, D. Seidel, and L. Maleki, "Tunable optical frequency comb with a crystalline whispering gallery mode resonator," *Phys. Rev. Lett.*, vol.101, 093902, Aug. 2008.
- 4 P. Del'Haye, A. Schliesser, O. Arcizet, T. Wilken, R. Holzwarth, and T. J. Kippenberg, "Optical frequency comb generation from a monolithic microresonator," *Nature*, vol.450, pp.1214–1217, Dec. 2007.
- 5 J. S. Levy, A. Gondarenko, M. A. Foster, A. C. Turner-Foster, A. L. Gaeta, and M. Lipson, "CMOS-compatible multi-wavelength oscillator for on-chip optical interconnects," *Nature Photon.* vol.4, pp.37–40, Jan. 2010.
- 6 A. L. Gaeta, M. Lipson, and T. J. Kippenberg, "Photonic-chip-based frequency combs," *Nature Photon.* vol.13, pp.158–169, March 2019.
- 7 K. Furusawa, N. Sekine, A. Kasamatsu, and Y. Uzawa, "Dispersion properties of bent silicon nitride waveguides," *IEEE Photonics Conference (IPC 2015)*, M.D. 1.1. Reston, United States, Oct. 2015.
- 8 A. Godarenko, J. S. Levy, and M. Lipson, "High confinement micron-scale silicon nitride high Q ring resonator," *Opt. Express*, vol.17, pp.11366–11370, June 2009.
- 9 M. H. P. Pfeiffer, D. Herkommer, J. Liu, T. Morais, M. Zervas, M. Geiselmann, and T. J. Kippenberg, "Photonic damascene process for low-loss high-confinement silicon nitride waveguides," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* vol.24, pp.6101411, Aug. 2018.
- 10 J. Chiles, N. Nader, D. D. Hickstein, S. P. Yu, T. C. Briles, D. Carlson, H. Jung, J. M. Shainline, S. Diddams, S. B. Papp, S. W. Nam, and R. P. Mirin, "Deuterated silicon nitride photonic devices for broadband optical frequency comb generation," *Opt. Lett.*, vol.43, pp.1527–1530, April 2018.
- 11 H. Matsumura, "Formation of Silicon-based thin films prepared by catalytic chemical vapor deposition (Cat-CVD) method," *Jpn. J. App. Phys.*, vol.37, pp.3175–3187, June 1998.
- 12 <https://www.genisys-gmbh.com/advanced-exposure-technique.html>
- 13 R. Dussart, T. Tillocher, P. Lefaucheux, and M. Boufnichel, "Plasma cryogenic etching of silicon: from early days to today's advanced technologies," *J. Phys. D.*, vol.47, pp.123001, March 2014.
- 14 W. A. Lanford, and M. J. Rand, "The hydrogen content of plasma-deposited silicon nitride," *J. Appl. Phys.* vol.49, pp.2473–2477, April 1978.
- 15 古澤健太郎、諸橋功、長野重夫、熊谷基弘、関根徳彦、笠松章史、[光基準信号伝送を利用した微小光共振器の分散測定] *信学技報 OFT2019–49*, Jan. 2020.
- 16 S. Sota, K. Handa, T. Tanabe, Y. Uzawa, K. Furusawa, and N. Sekine, "Frequency comb generation in a silicon nitride microring resonator fabricated by using hot-wire CVD method," *Conference on Lasers and Electro-optics (CLEO 2022)*, STh2F.5, Online, May 2022.
- 17 S. Fujii, S. Tanaka, T. Ohtsuka, S. Kogure, K. Wada, H. Kumazaki, S. Tasaka, Y. Hashimoto, Y. Kobayashi, T. Araki, K. Furusawa, N. Sekine, S. Kawanishi, and T. Tanabe, "Dissipative Kerr Soliton microcombs for FEC-free optical communications over 100 channels," *Opt. Express*, vol.30, pp.1351–1364, Jan. 2022.



古澤 健太郎 (ふるさわ けんたろう)

B5G 研究開発推進ユニット
テラヘルツ研究センター
テラヘルツ連携研究室
主任研究員
Ph.D.
マイクロコム、集積型イオントラップ



関根 徳彦 (せきね のりひこ)

B5G 研究開発推進ユニット
テラヘルツ研究センター
テラヘルツ連携研究室
室長
博士(工学)
半導体量子構造、テラヘルツデバイス