

令和 2 年 6 月 29 日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06410

研究課題名(和文) マイクロリング共振器を利用した集積化テラヘルツ光源のシステム検討

研究課題名(英文) A study on integrated systems based on microring resonators for THz radiation sources

研究代表者

古澤 健太郎 (Furusawa, Kentaro)

国立研究開発法人情報通信研究機構・未来ICT研究所フロンティア創造総合研究室・主任研究員

研究者番号：40392104

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、高Q値導波路型光マイクロリング共振器を活用した新しいタイプのテラヘルツ波光源を実現し、その周波数安定性を評価することを目的とした。窒化シリコン(SiN)光導波路作製技術の向上に取り組み、hot-wire CVD法を用いた高Q値リング共振器の作製・評価を行った。また、マイクロコムを発生して得られる光ビート信号を単一走行キャリアフォトダイオード(UTC-PD)に入射することで0.3 THzまでのテラヘルツ波を発生し、その周波数安定性をマイクロ波基準を参照可能な測定手法で評価した。これらから、通信や高周波計測に有用な小型狭線幅なテラヘルツ光源の実現に向けた基盤技術となる成果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

CMOSコンパチブルな材料であるSiNを用いた高Q値微小光共振器デバイスを実現するための作製技術は高温堆積法に限られており、応力によるデバイスの自発的損傷などの課題があった。低温堆積法を用いた低応力デバイスの作製は、作製プロセスを簡便化できるだけでなく、デバイスの信頼性の向上にも寄与できると考えられる。また、100 mW以下の励起光パワーで発生したマイクロコムのビート信号を利用することで高効率なテラヘルツ発生を実証し、狭線幅のテラヘルツ信号が発生できることを示した。これらの成果から、将来の高精度高周波計測技術に供する小型テラヘルツ光源を開発していく上で重要な知見が得られた。

研究成果の概要(英文)：This study aimed at development of a novel type of terahertz light sources using high-Q microresonators and characterization of frequency stabilities of such light sources. In device fabrication, the hot-wire CVD method was used, demonstrating the opportunities offered by a low-stress low-temperature deposition technique for microresonator devices. Terahertz radiation up to 0.3 THz was successfully generated using a mode-locked microcomb source based on SiN microresonators, combined with a uni-travelling carrier photodiode (UTC-PD). The frequency stabilities were characterized based on the methods that are compatible with the microwave frequency standards. These results pave the way for realization of compact narrow linewidth terahertz sources via heterogeneous integration, useful for telecommunication and high frequency measurement.

研究分野：フォトンクス

キーワード：光マイクロリング共振器 テラヘルツ 窒化シリコン

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

「光周波数コム」は、2005年のノーベル物理学賞が契機となり、「周波数を正確に測定できる光の物差し」として広く知られるようになった。最先端の光周波数コムでは、測定の不確かさとして 10^{-19} オーダーが実現され、光原子時計等の極限的な精密測定に利用されている。その技術をテラヘルツ波領域に展開する研究も行われているが、固体レーザ技術をベースとしているために、小型化には限界がある。一方、多少精度を犠牲にして、光周波数コムを小型化する研究開発も活発化している。安価で低損失な光通信波用途の部品を利用し、高繰り返しの光周波数コムが実現できれば、スペクトル輝度も向上し、波長フィルタでコムの1本を切り出すことが可能になるなど、取扱いが簡便になるため、より汎用性のある応用展開が期待できる。小型化を進めて1 secで $\sim 10^{-13}$ 程度の周波数安定度でチップサイズの高精度光周波数コムが実現できれば、装置に組み込んでミリメートルオーダーの精密位置情報サービスの提供が可能となり、自動車やドローン自動操縦技術の深化に貢献できるであろうし、時間領域の高いタイミング精度を活用して、低消費電力な超高速アナログ・デジタルコンバータ(ADC)を実現できれば、現在では幹線系の先端的通信技術である高速デジタルコヒーレントシステムをアクセス系に展開する上でキーデバイスになると考えられる。また、帯域の枯渇が懸念される無線通信の電波資源(275 GHz帯など)として注目されているテラヘルツ波領域における局発振器としての応用も期待される。

小型デバイスから光周波数コムを発生する手法として、微小光共振器を利用した光周波数コム(マイクロコム)の発生とその応用が近年多数報告されている。マイクロコムの特徴は、広いモード間隔(>100 GHz)が得られることであり、将来のテラヘルツ帯無線通信における通信用クロックデバイスには魅力的である。また将来的には、励起用半導体レーザ光源、微小光共振器、テラヘルツ発生用の単一走行キャリアフォトダイオード(UTC-PD)等をハイブリッド集積した、THz波発生システムがチップサイズで実現することが期待される。

2. 研究の目的

CMOSコンパチブルな材料である窒化シリコン(SiN)をコアとする高Q値導波路型光マイクロリング共振器を活用した新しいタイプのテラヘルツ波光源を実現し、その周波数安定性を評価することを目的とした。キーコンポーネントであるSiNマイクロリング共振器のデバイス作製を行うと共に、光マイクロリング共振器を参照共振器として2台の光通信波長帯光源の波長を同時安定化し光ビート信号を発生する手法、及び強励起下で生じるマイクロコムを利用して光ビート信号を発生する手法などを用いて光源を構成、単一走行キャリアフォトダイオード(UTC-PD)を用いてテラヘルツ波を発生し、その周波数安定性をマイクロ波基準と比較可能な形で実験的評価を行うことを目指した。

3. 研究の方法

本研究では、光マイクロリング共振器のデバイスの作製、評価、マイクロコムの発生、及びテラヘルツの発生と計測を平行して取り組んだ。以下に各項目別に内容を述べる。

(1) デバイス作製

SiNマイクロリング共振器の作製は、SiN窒化膜成膜、電子線描画、ドライエッチング、クラッド層堆積、ダイシング、端面処理といった各工程を通して作製される。低消費電力でテラヘルツ波を発生するために、最も重要なパラメータはQ値である。この値は、本研究開始当初、導波路伝搬損失、及び方向性結合器の挿入損失に律速していたことから、上記の工程の中でも成膜、ドライエッチングとクラッド層堆積がこれらの損失低減に効果があると考え、これらのプロセスに対して改善策を重点的に検討した。また、従来的高温化学気相堆積(CVD)法によるSiNでは、応力によるデバイスの自発的損傷が問題となるため、低温低応力堆積法であるhot-wire CVD法を用いてデバイス作製を検討した。

(2) デバイス評価

透過特性(自由スペクトルレンジ(FSR)やQ値など)の評価と共に、パラメトリック発振やソリトンパルス生成に重要なパラメータとなる群速度分散を測定するためのシステムを構築し、評価を行った。

(3) テラヘルツの発生と評価

テラヘルツ波発生的手法としては、当初想定していたよりも熱光学効果が顕著であることが判明したため、2台のレーザ光源を十分なパワーで同時安定化することが困難であると判断し、マイクロコムを発生した上で、光学フィルタによって光ビート信号を生成する手法で検討を行った。

本手法において周波数が安定なテラヘルツ波を発生するには、マイクロコムのモード間の相対位相が安定(すなわちモード同期)している必要がある。そこで、モード同期状態を確実に生成する手法の検討を行った。また、モード同期状態から光学フィルタを用いて生成した光ビート信号をUTC-PDに入射し、100 / 300 GHzのテラヘルツ波の発生を確認すると共に、複数の手法を用いて周波数を測定し、その安定性を評価した。

4. 研究成果

(1) デバイス作製

本研究の開始当初、マイクロコムの発生は、高温堆積法である低圧 CVD 法によって成膜された SiN を用いたデバイスからのみ報告されていた。しかし、マイクロコムの発生には異常分散が必要であり、SiN では厚膜(> 700 nm)の導波路(幅~1.5 μm)が必須となる。SiN は基板の Si よりも熱膨張係数が大きいため、高温堆積法では大きな応力が残留し、自発的なクラックが発生しやすい問題がある。プラズマ CVD 法などの低温堆積法では、この応力の問題が解決できるが、残留水素濃度が高く、波長 1.52 μm 周辺における NH 基由来の赤外吸収が大きくなり、光通信波長帯においてマイクロリング共振器の Q 値を低減する要因となってしまうことが課題であった。そこで本研究では、低圧 CVD 法と同様に原料を熱的にクラッキングしつつ、低温堆積を行う hot-wire CVD 法に注目し、それをベースとしたマイクロリング共振器デバイスを作製し、その性能を評価した。

SiN 導波路の伝搬損失は側壁粗さの 2 乗に比例し、導波路幅の 4 乗に反比例するため、屈折率差の大きい ($\Delta n > 0.3$) 擬似シングルモード光導波路では、ドライエッチング加工によって生じる導波路側壁の表面粗さが損失の主要原因となりやすい。本研究では、 CHF_3 と Ar の混合ガスを用いた低圧(~0.1 Pa) 誘導性プラズマ(ICP)によるドライエッチング加工を行ったが、この場合、長時間エッチングによって側壁保護膜の空間的不均一性が助長されるために、表面粗さはあるエッチング時間を境に急激に悪化することがわかった。そこで、エッチングレシピの最適化を行い、膜厚~600 nm までは電子顕微鏡(SEM)で顕著な表面荒れを観測することなくエッチングできるようになった(図 1(a))。これは Δn を大きくとれる空気クラッドを用いると異常分散を実現できる膜厚に相当する。

図 1(b)に hot-wire CVD 法の SiN 膜($t=500$ nm)を加工したリング共振器の透過特性例を示す(TE モード)。光通信波長帯 L バンドにおける負荷時 Q 値は($\sim 1.8 \times 10^5$)が得られた。膜厚が薄くなるとは、平均的な Q 値が低くなっていることから、SiN 膜表面の粗さが損失要因になっていることがわかったが、原子間力顕微鏡(AFM)表面観察の結果では、1 $\mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ の領域において RMS 値は 0.3 nm であった。この値は結晶材料の原子層ステップの高さと同程度であり、極限的な数字であるが、このことは相関長も含めた表面粗さの検討をしていく必要があることを示唆している。また、損失は界面におけるモードの電磁界強度に強く依存(膜厚の 4 乗にも反比例)して損失が増加することを反映していると考えられる。従って厚膜化は分散制御だけでなく、低損失化にも重要であることを意味している。

しかし厚膜を加工していく上で別の課題点も顕在化した。リング共振器では、バスとリングの導波路の間隔が狭く(< 400 nm)なるため、構造のアスペクト比が 1 以上となり、ドライエッチングでノッチ構造が顕著になることにより、一般的な CVD 法によるクラッド層堆積ではボイドが形成されてしまう(図 2(a))。これは、挿入損失が増大するだけでなく、高次モードが励起されやすくなり、特定の波長において Q 値の劣化や FSR のずれが顕著になることがわかった。そこで、表面張力の小さい SOG(Spin-On-Glass)材料を用い、ボイド・フリーなクラッド層の形成を実現した(図 2(b))。これにより、Q 値の波長依存性のばらつきは小さくすることができた。一方、C バンドでは NH 基吸収による損失が顕著となっており、L バンドと同程度の Q 値を実現するには高温ポスト・アニールなどによる残留水素濃度の低減が必要と考えられる。

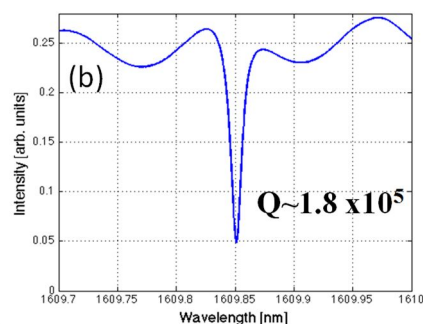
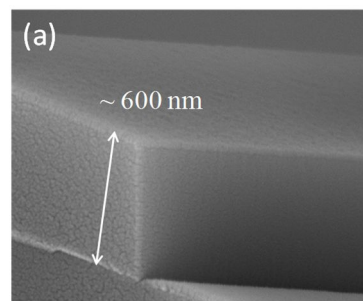


図 1 hot-wire CVD 法 SiN による導波路の SEM 像(a)とリング共振器の透過特性例(b)

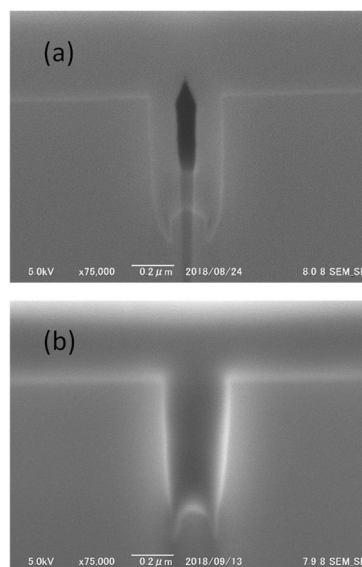


図 2 方向性結合器部分の狭ギャップ埋め込み(a) TEOS-CVD 法、(b) SOG

(2) 分散測定手法の開発

光カーブの発生に重要な役割を果たしている共振器ソリトン、パラメトリック利得と損失、非線形位相シフトと群速度分散のダブルバランスの上に成立することが理論的に知られている。従って、マイクロリング共振器の群速度分散は、マイクロコム発生時の閾値や、スペクトル帯域に関わる重要なパラメータである。しかし、その測定は、光共振器の FSR が一定間隔からわずかにずれていく、わずかな周波数差の変化を観測する必要があり、一般に光周波数においてサブ MHz 以下の精度での自由スペクトルレンジ(FSR)の測定が必要となる。そこで、温度安定化非対称マツハツエンダー干渉計(a-MZI: FSR~2 MHz)を構築し、分散測定を行った。なお、MZI の FSR のキャリアレーションには、安定化光共振器にロックしたモード同期ファイバレーザによる光周波数コムシステムを構築し、それを基準に用いた。実験系の概略を図 3(a)に示す。光周波数における周波数計測精度は、使用した波長可変レーザ程度 (~400 kHz)であり、分散測定に対して十分な精度が得られた。

測定結果の例を図 3(b)に示す。縦軸は中心周波数(モード数 0)を基準とした FSR の累積値(D_{int})を示しており、この曲線フィットパラメータから光ファイバで用いられる分散パラメータと等価な値を得ることができる。高次モードとの結合によって特定波長において FSR に大きなずれが観測され、周辺波長域のフィッティング精度に影響を及ぼしていることがわかったが、分散を補償するようにリング内導波路幅を設計したリングにおいては狙い通り低分散値が得られていることがわかった(図 3(b) 赤線)。

(3) モード同期手法の開発

相対位相が安定している光パラメトリック発振の形態として、チューリング・パターンやソリトン状態が知られている。マイクロリング共振器の FSR 設計値でマイクロコムを発生させるためには基本ソリトン(ひとつのソリトンパルスがマイクロリング共振器を周回している)状態を実現することが必要となる。微小光共振器におけるソリトン状態は、非線形シュレーディンガー方程式と方向性結合器の入出力関係式を連立させて、平均場近似によって得られる Lugiato-Lefever 方程式(LLE)を解析することでモデル化が可能である。図 4(a) はスプリット・ステップ・フーリエ法により、現実的な実験条件のパラメータを用いて LLE を解析したものである。初期条件をガウシアンパルスとし、 10^5 周回後のスペクトルを終状態スペクトルとして、正規化された励起光の離調の依存性としてプロットしたものである。共振周波数に対して励起光周波数を共鳴周波数から低周波側へ離調をずらしていくと、カオス的で安定状態に収束しない状態があり、ある離調範囲で滑らかなスペクトルプロファイルを持つソリトン状態が存在することがわかる。しかし実際には光共振器に結合されるパワーが増加すると、励起光エネルギーの一部は熱として散逸されるため、熱光学効果によるシフトによって共振周波数も低周波側にシフトし、ソリトン状態の生成に影響を与える。実験的に、熱的な効果を極力排してソリ

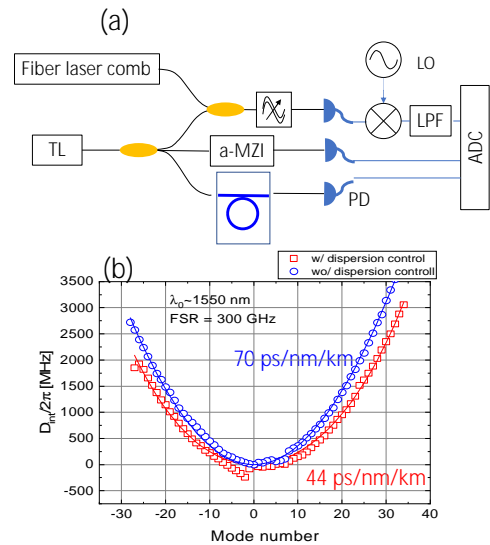


図 3 (a)マイクロリング共振器の群速度分散測定系(TL: 波長可変レーザ、LPF: ローパスフィルタ、LO: 局発発振器、PD: フォトダイオード)。(b)測定結果の例。

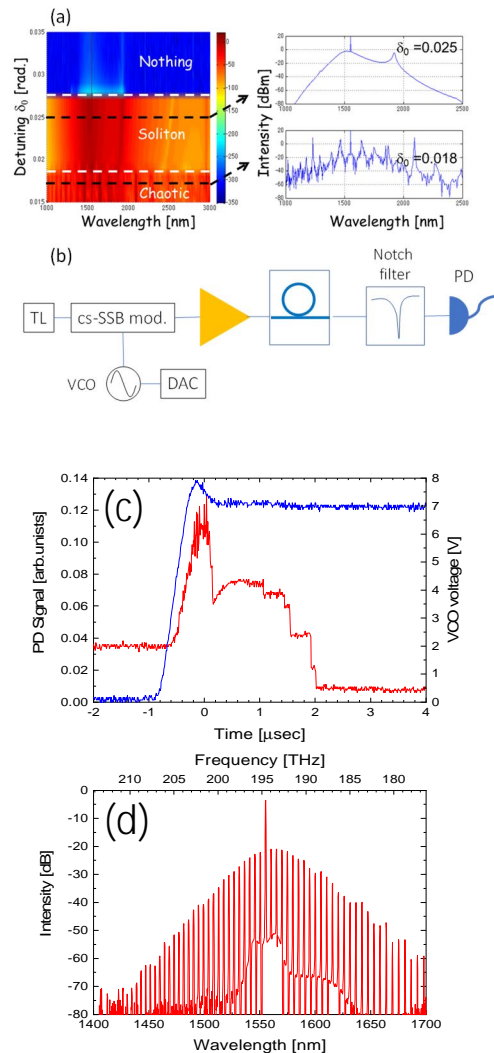


図 4 (a) LLE 解析による終状態スペクトルの離調依存性(b)モード同期実験系 (c) VCO の電圧波形と PD 出力によるソリトンステップの観測 (d) ソリトン状態のスペクトル

トン状態に到達するには、高速に離調パラメータを掃引し、断熱的にソリトン状態に必要な離調を実現すればよい。そこで、キャリア抑制シングルサイドバンド(cs-SSB)変調器を広帯域電圧制御発振器(VCO: ~ 400 MHz/V)で駆動し、離調制御を行った。実験系の概略図を図 4(b)に示す。また、図 4(c)に離調を与える電圧信号と、出力の PD 信号の波形例を示す。熱的な効果が抑制できる高速掃引(~ 2 GHz/ μ sec)をすると、PD 信号にカオス的な領域を通過する際の揺らぎの大きいピークが現れ、その後に振幅揺らぎの小さいステップ構造が観測されていることがわかる。これらがソリトン状態(ソリトンステップ)に対応しており、特定のステップで離調掃引を停止することにより、図 4(d)のような sech 型のスペクトルが得られ、モード同期状態が実現できていることがわかった。なお、ソリトン状態に必要な励起光強度は ~ 50 mW であった。

(4) テラヘルツ波の発生と評価

モード同期状態に達したマイクロコム出力は、励起光をノッチフィルタで除去した後に増幅し、プログラマブル波長フィルタを通して、任意のコムを切り出して光ビート信号を得た。この測定系を図 5(a)に示す。励起光の OSNR は 50 dB であり、マイクロコムは励起光に比べて ~ 20 dB 低いスペクトル強度となる。そのため、フィルタリング後の OSNR は ~ 30 dB であった。ダークソリトンを活用することや、コム発生後のフィルタリング・増幅プロセスの最適化によって、OSNR は今後さらに改善できることが期待される。

テラヘルツ波発生評価には、光ビート信号を UTC-PD に入力し、校正済のパワーメータで測定した(図 5(a)-(1))。UTC-PD の出力は光入力パワーの 2 乗に比例し、許容電流量 (4 mA) で律速されるが、周波数 100 GHz において ~ 100 μ W が得られた(図 5(b))。切り出すコム 300 GHz 間隔として、UTC-PD に入射した場合は、パワーメータの導波管入力整合性の問題で測定できなかったため、焦電検出器で測定を行った。しかし、同様の出力依存性を確認できた(図 5(c))。

周波数測定では、超高速 PD で受光し、ハーモニックミキサを用いて IF 周波数を RF スペクトルアナライザで検出した(図 5(a)-(2))。スペクトルで測定した結果例を図 5(d)に示す。線幅は分解能の 10 kHz 程度で、長時間(~ 10 分)スパンの周波数ドリフトは 500 kHz 程度であった。このドリフトの要因は、マイクロリング共振器の共振周波数に対する励起レーザの周波数の離調がドリフトすることに起因していると考えられる。即ち、フィードバック機構を設けることにより、さらなる狭線幅化が期待できる。一方、電気光学変調器(EOM)でサイドバンドを発生し、そのオーバーラップ部分をバンドパスフィルタ(BPF)で切り出して光検出することにより(図 5(a)-(3))、有限な光検出器の帯域(< 10 GHz)であっても、テラヘルツ波周波数が測定可能となる系も構築し、比較を行った。EOM のサイドバンド発生効率、及びオーバーラップする光パワーのみが信号に寄与するため、ハーモニックミキサには SN 比で劣るものの、周波数線幅、揺らぎの量は同程度であることを確認できた。これにより、マイクロ波標準を基準として、測定周波数のスケールリングを行う基盤を構築できたといえる。

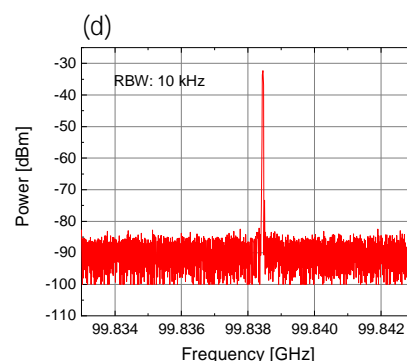
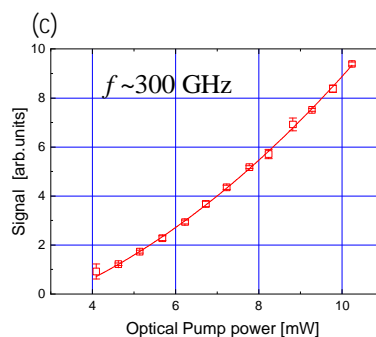
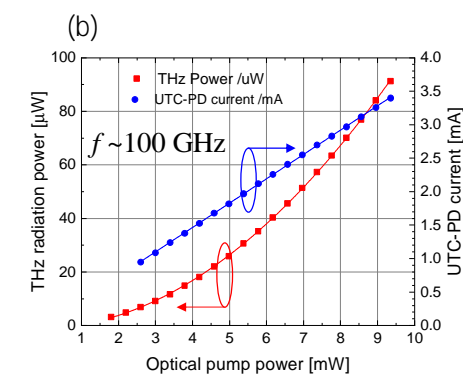
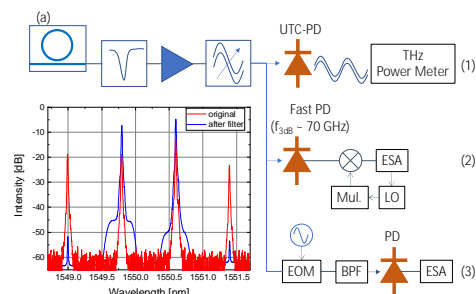


図 5(a) マイクロコムを用いたテラヘルツ波発生・周波数評価実験の系。ESA: 電気スペクトルアナライザ、LO: 局発発振器、Mul: 乗算器。光入力に対する(b)100 GHz テラヘルツ波出力と UTC-PD の電流値と(c) 300 GHz テラヘルツ波の焦電検出。(d) ハーモニックミキサを用いて測定された 100 GHz 信号のスペクトル。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 古澤健太郎、 関根徳彦、 笠松章史、 鶴澤佳徳
2. 発表標題 窒化シリコンリング型光共振器からハイパーパラメトリック発振の観測
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kentaro Furusawa and Norihiko Sekine
2. 発表標題 Microcomb light source for terahertz measurement
3. 学会等名 Philippine-Japan Conference on Photonics and Optical Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古澤健太郎、 諸橋功、 長野重夫、 熊谷基弘、 関根徳彦、 笠松章史
2. 発表標題 光基準信号伝送を利用した微小光共振器の分散測定
3. 学会等名 電子情報通信学会 第5回光ファイバ応用技術研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kentaro Furusawa, Yoshimi Yamashita, Kanna Aoki, Norihiko Sekine, Akifumi Kasamatsu, Yoshinori Uzawa
2. 発表標題 Hot-wire CVD based SiN films for linear and nonlinear photonics device applications
3. 学会等名 Advanced Solid-state Lasers 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古澤健太郎、山下良美、青木画奈、関根紀彦、笠松章史、鶴澤佳徳
2. 発表標題 cat-CVD法によるSiN膜を用いた光リング共振器の光学特性
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古澤健太郎、関根徳彦、笠松章史、鶴澤 佳徳
2. 発表標題 導波路型微小光共振器における光周波数コム発生の閾値検討
3. 学会等名 第34回「センサ・マイクロマシンと応用システム」
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 古澤健太郎
2. 発表標題 マイクロリング共振器を用いた光周波数コム光源の開発～小型テラヘルツ波光源に向けて～
3. 学会等名 第18回ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Furusawa, N. Sekine, A. Kasamatsu, and Y. Uzawa
2. 発表標題 Microring resonator based frequency comb sources for compact continuous-wave THz generators
3. 学会等名 42 International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	諸橋 功 (Morohashi Isao)	国立研究開発法人情報通信研究機構・未来ICT研究所フロンティア創造総合研究室・主任研究員 (82636)	