

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 9 月 17 日現在

機関番号：32612

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2018～2019

課題番号：18K19036

研究課題名(和文) 拡張ナノ領域プロセッシングが実現させる微小光源開発

研究課題名(英文) Development of small light source with extended-nano space processing

研究代表者

田邊 孝純 (Tanabe, Takasumi)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・教授

研究者番号：40393805

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：超精密加工の技術を用いて、切削加工のみで高Q値微小光共振器を作製した。高Q値を得るために従来は、研磨加工が必要だったが、超精密加工による延性加工モードを実現すれば、滑らかな表面を得ることができる。延性モード加工条件を明らかにして、切削加工のみでMgF₂微小光共振器を作製し、Q値1億を達成した。形状を所望の形に設計することができる。2次分散と4次分散を設計した微小光共振器を用いて、光パラメトリック発振実験を行った。励起光から遠く離れた波長で位相整合が取れるために、1オクターブ以上周波数が離れた間隔でシグナル光とアイドラー光を発生させることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

微小光共振器を用いた光周波数コムは、高繰り返し光パルス光源として用いることができる。例えば、超高速な光通信光源として用いれば、従来波長の数だけ必要だった光源を1台の微小光共振器光周波数コム光源で賄うことができるので、システムの消費電力を大いに削減させることができると期待される。そのような微小光共振器コムにおいては、共振器の分散制御が重要であったが、最も高いQ値が得られる結晶微小光共振器で、形状を設計通りに得る優れた手法はこれまでなかった。今回超精密加工技術をナノフォトニクス作製に適用することで、それを初めて可能とした。

研究成果の概要(英文)：We fabricated a high-Q microcavity only by cutting by using the ultraprecision machining. To date, post-polishing was needed to obtain a high Q microcavity, but we demonstrated that a smooth surface is obtained if a ductile mode cutting is applied that is realized by ultra-precision processing. The ductile mode cutting conditions were studied, and the MgF₂ micro-optical resonator was fabricated only by cutting, where we achieved a Q value of 100 million. The shape of the cavity is obtained as designed. Optical parametric oscillation experiments were carried out by using micro-optical resonators of which second-order dispersion and fourth-order dispersion are designed accurately. Since the phase matching can be achieved at a wavelength far from the pump light, the signal and the idler light could be generated at frequencies interval of larger than one octave.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：光エレクトロニクス 量子エレクトロニクス 光周波数コム 微小光共振器

1. 研究開始当初の背景

機械加工は大型装置の製造に用いられてきたが、ナノフォトニクス素子の加工には nm の精度が必要とされ、その空間領域をカバーできるのは半導体プロセスしかなかった。唯一、大きなレンズの研磨に機械加工が使われてきたが、ナノフォトニクス素子に機械加工(特に切削加工)を活用するという発想は無かった。しかし超精密加工の技術分野の進展により、機械加工でも拡張ナノ空間領域のプロセスが可能となってきた。拡張ナノ空間とは nm 領域の構造や現象が影響を及ぼしている数 100~1000 nm 程度のマイクロ空間のことを指す。

本研究の目的は、所望の形状を有する結晶材料からなる微小光共振器を作製するために、超精密加工技術をナノフォトニクス研究に世界で初めて取り入れ、拡張ナノ空間をプロセスし、トップダウン的に微小光共振器素子を作製することを目指すものである。

本研究の意義は、以下の通りである。直径 100 μm 程度のパッシブな微小光学素子を用いて可搬可能な光周波数コム光源を実現させれば、将来高速信号処理用の光源としても、超高感度センサとしても利用できる。

これを実現するために、光を小さな素子に閉じ込め、非線形光学効果を効率的に生じさせることができる高性能(Q 値)なウィスパーリングギャラリモード(WGM)微小光共振器を開発する。WGM 共振器は超小型なリング共振器であり、全反射を用いて直径数 100 μm~mm 程度のサイズの素子に光を閉じ込める。特に CaF₂ や MgF₂ 等の結晶からなる WGM 共振器は超高 Q 値が得られる。

こうした高 Q 値微小光共振器を用いると、連続光を共振器に入力させるだけで、共振器内で四光波混合(FWM)が発生し、光周波数上で等間隔の楕状スペクトルとなる光周波数コムが得られる(図1参照)。

光周波数コムはフーリエ変換の関係を思い出せば、時間領域では超短光パルスとなるが、そのためには各縦モード間の位相がロックされていなくてはならない。実際には、共振器の中でパルスが形成され、WGM 共振中をソリトンパルスとして周回する条件としなくてはならない。そのためには、共振器を異常分散に設計する必要があるが、直径の小さな共振器では通常正常分散に傾いてしまうという問題がある。

一方で、切削加工の精度は近年向上しており、近年では nm 単位での工具の位置制御が可能となってきており、脆弱性材料でも、適切な加工条件を見つければ、ナノメートルオーダの表面粗さを実現することができる。この技術は今までナノフォトニクスと組み合わせられたことはない。しかし、共振器の断面形状を制御できれば、共振器の構造分散を制御できるので、異常分散を得たり、さらに高度に分散を制御できたりする。

2. 研究の目的

本研究では、工具を高精度にコンピュータで位置制御することが可能となってきている精密機械加工技術に着目し、その技術を用いて、非線形光学研究に給することができる高性能な結晶微小光共振器素子を作製することを目指している。微小光共振器素子をトップダウンにて作製できる超精密加工技術を、ナノフォトニクス素子作製に適用するのは初めての試みである。

初めに、形状を精密に制御した結晶材料で構成された高 Q 値微小光共振器を作製する。切削加工で微小光共振器を作製すれば、断面形状を制御することに着目し、共振器の分散を所望の形に設計する。次に、作製した共振器を用いて、パラメトリック光発生の研究を進め、微小光共振器での非線形光学効果が高度に制御できることを示す。

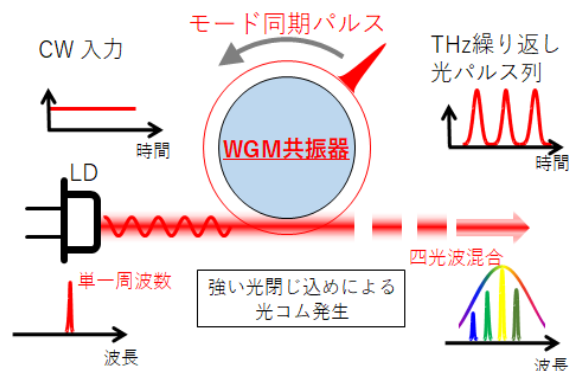


図1 : WGM 微小光共振器を用いた光周波数コム発生。

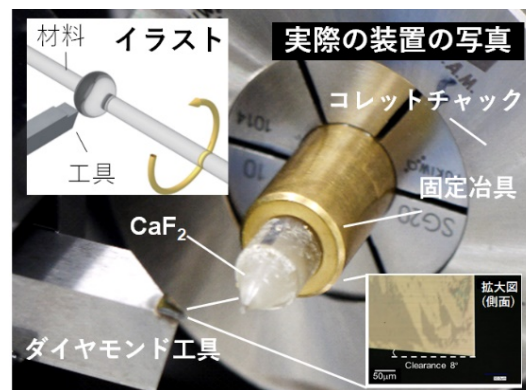


図2 : 結晶 WGM 微小光共振器の切削加工による作製

3. 研究の方法

(1) 切削加工条件の探求

高Q値共振器を実現するためには、光が散乱しない滑らかな表面を得る必要がある。硬くて脆い脆性材料の場合、ダイヤモンド工具を臨界切り込み厚さ以内で用いることで、延性モード加工が実現でき、研磨と遜色のない滑らかな表面が得られる。そこで、初めにCaF₂の延性モード加工が可能なパラメータを明らかとする。図3に示すように、異なる結晶方位に向けて切り込み深さを変えて切削加工を施し、結晶方位毎の切り込み深さを求める。その後、回転速さや工具の送り速度などの、実際に共振器を作製するために必要となる最適パラメータを明らかとする。

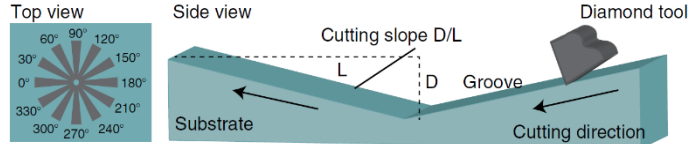


図3：切削加工条件の調査。臨界切り込み深さ試験。

(2) 高Q値微小光共振器の切削加工による作製

高Q値微小光共振器を切削加工で作製し、その光学特性をテーパファイバセットアップで測定し、光学特性を明らかとする。精密分散測定系を構築し、形状によって決まる分散と、得られた分散が一致することを確認する。

(3) 分散制御された微小光共振器によるパラメトリック光発生

微小光共振器の分散が所望の形状になっていれば、狙った波長でのパラメトリック光発生が可能となる。具体的には2次分散と4次分散の符号を逆となるように設計すると、励起光波長から離れた波長にて位相整合が取れ、遠く離れた波長の2波のパラメトリック光が発生できる。図4に共振器の分散と発生する光周波数コムのLugiato-Lefever方程式による計算結果を示す。

いずれも横軸は周波数である。光周波数コムは図4(a)に示すように、異常分散の時のみ生成できる。3次分散が存在すると、分散派が発生する。ここで、2次分散が異常分散と正常分散の場合それぞれに対して、4次分散の符号が異なるときの光スペクトルを図4(c)と4(d)に示す。ここに示すように、遠く離れた個所で位相整合が取れることがわかる。特に正常分散の場合には、ポンプ周辺では光コム発生が抑制されるので、遠くはなれば2波長に集中してパラメトリック光が発生できる。さらに、この位相整合する波長の位置は、励起光波長をわずかに変えるだけで大きく移動できるので、当帯域に波長掃引可能な、パラメトリック光源が実現できる。

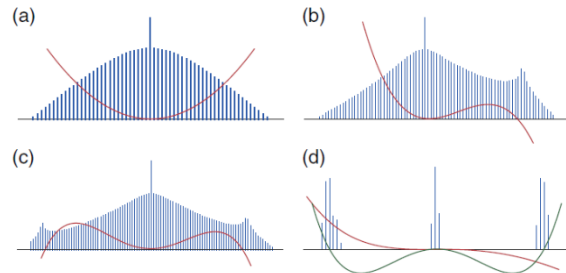


図4：様々な分散の微小光共振器における光周波数コム発生計算結果。(a)2次分散(異常分散)のみの場合。(b)2次(異常)・3次分散がある場合。(c)2次分散(異常)・4次分散がある場合。(d)2次分散(正常)・4次分散がある場合。

4. 研究成果

(1) 切削加工条件の探求

CaF₂結晶材料の異なる結晶方位に対して、切削加工を試みた。異なる切り込み深さにて切削を行い、表面粗さを計測することで、延性加工が可能な限界切り込み深さを求めた。図5に実験結果とCaF₂の結晶構造を示す。黒い点はクラックが発生した箇所であり、脆性モード加工となっている。それに対して、延性モード加工の切り込み深さでは、表面の粗さが全く観測されておらず、実際にAFMを用いて確認したところ表面粗さは研磨加工と遜色のない数nmオーダーが得られることが分かった。結晶構造からは、結晶の並びに対して平行に力が加わる場合には、結晶構造がずべるので、比較的綺麗な表面が得られるのに対して、へき開面に対して垂直方向に力が加わる

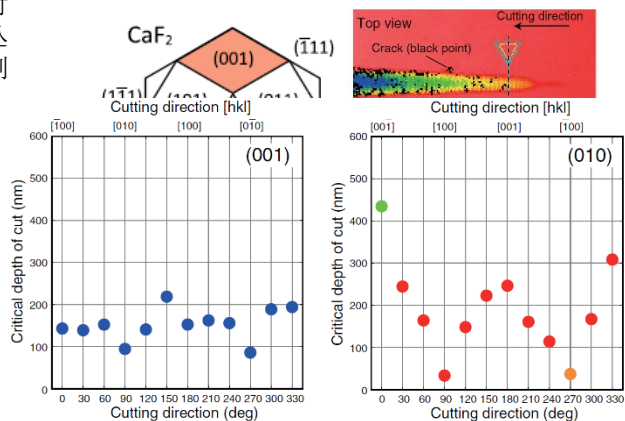


図5：2つの異なる面に対して異なる方向へ切り込み試験を行い臨界切り込み深さを求めた結果。

と、脆く破壊されることが予想される。

実際に図5の実験結果を見ると、すべり系の方向に対しては、臨界切り込み深さが深いことが確認された。またこの結果から、(001)面をエンドサーフェスの場合には、どの結晶方位に対しても100 nm以下の切り込み深さで加工すれば延性加工が実現できることが分かった。これらの成果は、[M. Yuta, *et al.*, “Development of CaF₂-brass hybrid WGM microcavity by using ultra-precision machining,” *Mechanical Engineering Letters*, Vol. 4 pp. 491 (2018).]等の研究成果としてまとめている。

(2) 高Q値微小光共振器の切削加工による作製

切り込み試験の結果から、延性加工モード条件がわかったため、図2に示すような装置を用いて、実際に微小光共振器を作製した。作製した微小光共振器の例を図7に示す。

さらに、回転速度やバイト送りなどの、切削加工条件を最適化することで、滑らかな表面を得ることに成功し、最終的に図6に示すような微小光共振器を光周波数コム発生に適しているMgF₂材料で得ることができた。

得られたQ値は10⁸を超えるものであり、切削加工のみで作製した結晶微小光共振器によるものとしては世界最高値を達成した。所望の形状が得られていれば、設計通りの分散が得られているはずである。図7に示すように、設計に対して、得られた分散の測定値は良い一致が得られたことから、所望の形状で微小光共振器が作製で来ていることが確認できた。これらの成果は[S. Fujii, *et al.* “Ultra-high-Q crystalline microresonator fabrication with only precision machining,” *Optica*, Vol. 7, No. 6, pp. 694-701 (2020).]にまとめている。

(3) 分散制御された微小光共振器によるパラメトリック光発生

所望の分散の共振器が得られるようになったので、分散が設計された微小光共振器を用いてパラメトリック発生の実験を行った。

用いた共振器は図4(d)に示すような分散を有する光共振器である。正常分散共振器であり、そのままではパラメトリック発振は生じないが、4次分散の符号が逆転しているため、励起光から離れた波長で、位相整合が取れて非線形光が発生する。実験セットアップと実験結果を図8(a)に示す。得られたスペクトルの拡大図が図8(b)である。

1550 nmの励起光に対して、1140 nm付近と2425 nm付近にそれぞれアイドラー光とシグナル光が発生している。アイドラーとシグナル光は、光周波数に直して1オクターブ以上離れており、広い波長領域で可変波長光を得ることができる可能性がある。

位相整合条件を計算すると図9に示されるようになる。プロットは実験値であり、理論曲線とよく一致していることがわかる。実験装置の制約で、ある特定の波長でのみ実験が行えたが、波長を変化させることができれば、1000 nmにわたる領域でシグナルとアイドラー光の波長を変化させることができる。これらの成果は[S. Fujii,

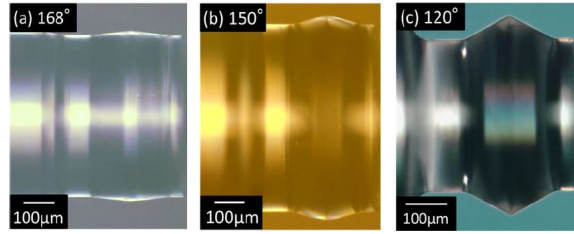


図6：作製したWGM結晶微小光共振器。

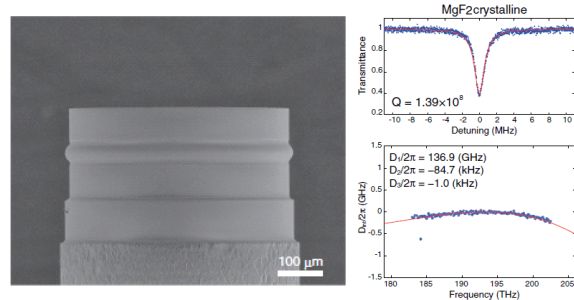


図7：MgF₂微小光共振器と測定した透過スペクトル及び、測定した分散。分散の赤線は設計値。

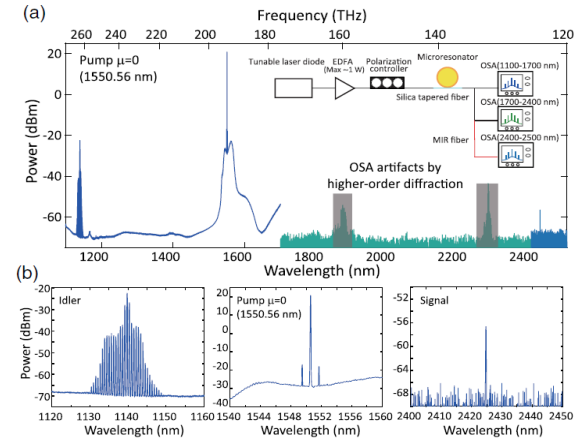


図8：(a) パラメトリック光の発生。(b) 拡大図。

励起光から離れた波長で、位相整合が取れて非線形光が発生する。実験セットアップと実験結果を図8(a)に示す。得られたスペクトルの拡大図が図8(b)である。

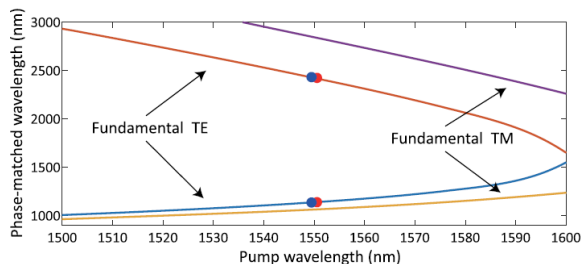


図9：励起光波長に対するシグナルとアイドラー光の波長。

S. Tanaka, *et al.*, “Octave-wide phase-matched four-wave mixing in dispersion engineered crystalline microresonators,” *Opt. Lett.*, Vol. 44, No. 12, pp. 3146-3149 (2019).]にまとめており、当該論文はエディタによる選定論文に選ばれている。

(4)研究成果のまとめ

高 Q 値が得られる結晶微小光共振器を切削加工のみで作製し、研磨を用いないトップダウンの手法で得た結晶 WGM 微小光共振器としては世界最高 Q 値である 10^8 を実現した。形状を精密に制御できるので、所望の分散が得られることを確認し、2次分散と4次分散が制御された微小光共振器を用いて、光パラメトリック発振を実現し、1オクターブを超える周波数間隔でシグナル光とアイドラー光を発生することに成功した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 MIZUMOTO Yuta, ITOBE Hiroki, KANGAWA Hiroi, FUCHIDA Mika, TANABE Takasumi, KAKINUMA Yasuhiro	4. 巻 4
2. 論文標題 Development of CaF ₂ -brass hybrid WGM microcavity by using ultra-precision machining	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Letters	6. 最初と最後の頁 491
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1299/mel.17-00491	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Suzuki Ryo, Kubota Akihiro, Hori Atsuhiko, Fujii Shun, Tanabe Takasumi	4. 巻 35
2. 論文標題 Broadband gain induced Raman comb formation in a silica microresonator	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Optical Society of America B	6. 最初と最後の頁 933 ~ 933
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1364/JOSAB.35.000933	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Honda Yoshihiro, Yoshiki Wataru, Tetsumoto Tomohiro, Fujii Shun, Furusawa Kentaro, Sekine Norihiko, Tanabe Takasumi	4. 巻 112
2. 論文標題 Brillouin lasing in coupled silica toroid microcavities	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 201105 ~ 201105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1063/1.5021062	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Fujii Shun, Okabe Yusuke, Suzuki Ryo, Kato Takumi, Hori Atsuhiko, Honda Yoshihiro, Tanabe Takasumi	4. 巻 10
2. 論文標題 Analysis of Mode Coupling Assisted Kerr Comb Generation in Normal Dispersion System	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Photonics Journal	6. 最初と最後の頁 1 ~ 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1109/JPHOT.2018.2865417	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Suzuki Ryo, Fujii Shun, Hori Atsuhiko, Tanabe Takasumi	4. 巻 11
2. 論文標題 Theoretical Study on Dual-Comb Generation and Soliton Trapping in a Single Microresonator with Orthogonally Polarized Dual Pumping	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Photonics Journal	6. 最初と最後の頁 1~11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1109/JPHOT.2018.2888637	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tanabe Takasumi, Fujii Shun, Hayama Yuka, Imamura Kosuke, Kumazaki Hajime, Kakinuma Yasuhiro	4. 巻 7
2. 論文標題 Ultrahigh-Q crystalline microresonator fabrication with only precision machining	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optica	6. 最初と最後の頁 694 ~ 701
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1364/OPTICA.394244	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 S. Fujii, M. Hasegawa, R. Suzuki, T. Tanabe
2. 発表標題 Nonlinear Parametric Oscillation Phase-matched via High-order Dispersion in High-Q Silica Toroid Microresonators
3. 学会等名 The 7th Advances Lasers and Photon Sources Conference (ALPS ' 18) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Tanabe, R. Suzuki, Y. Honda, and S. Fujii
2. 発表標題 Frequency comb and Brillouin lasing in optical microcavities
3. 学会等名 Asia Pacific Laser Symposium (APLS) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Tanabe
2. 発表標題 Brillouin lasing in a coupled toroid microcavities system
3. 学会等名 CLEO Pacific Rim 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Tanabe, S. Fujii, R. Suzuki, and Y. Honda
2. 発表標題 Microcavity based laser sources: Microresonator frequency comb and Brillouin lasing
3. 学会等名 23rd Microoptics Conference (MOC2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Tanabe, R. Suzuki, and S. Fujii
2. 発表標題 Kerr comb generation in a mode coupled system
3. 学会等名 SPIE Photonics West (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Tanabe
2. 発表標題 Brillouin Laser in Coupled Microresonator System
3. 学会等名 The 3rd Workshop on OptoMechanics and Brillouin Scattering (WOMBAT2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田邊孝純
2. 発表標題 微小光共振器を用いた光コム光源開発
3. 学会等名 2018年度精密工学会秋季大会シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中脩矢，藤井瞬，澁田美夏，天野光，久保田啓寛，鈴木良，柿沼康弘，田邊孝純
2. 発表標題 超高Q値フック化マグネシウム微小光共振器の精密分散測定
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019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
研究分担者	柿沼 康弘 (Kakinuma Yasuhiro) (70407146)	慶應義塾大学・理工学部(矢上)・教授 (32612)	