

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02636

研究課題名(和文)希土類酸化膜光導波路によるオンチップ光子-電子コヒーレント結合

研究課題名(英文)On-chip photon-electron coherent coupling using rare-earth oxide film optical waveguides

研究代表者

俵 毅彦(TAWARA, Takehiko)

日本大学・工学部・教授

研究者番号：40393798

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,500,000円

研究成果の概要(和文)：固体オンチップ量子光メモリの動作実証を目指し、Si基板上167Er添加希土類酸化薄膜導波路構造による光-電子量子コヒーレント結合を通信波長帯光で実現することを目的に研究を行った。低屈折率層に光を伝搬させるスロット型光導波路を新たに設計し、構造の最適化を行うことで目標としていた伝搬損失10dB/cmを大きく下回る2.3dB/cmを達成した。また167Er添加希土類酸化バルク結晶を用い、ゼロ磁場下において0.5μsのメモリ時間を3.5%という高い効率で量子光メモリ動作を実現した。これら結果は薄膜導波路型量子光メモリの実現に大きく貢献するものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子情報通信ネットワークの実現に向け、世界的に熾烈な研究開発が進められている中で、様々な要素技術が実用レベルまで進歩しつつある。一方で量子中継に必須となる固体量子ノード、特に量子光メモリの研究が他と比べ遅れをとっている。この課題を解決する手段として、我々は通信波長帯光子と直接リンクでき、かつ成熟したSiフォトニクス技術とも親和性が高いSi基板上167Er添加希土類酸化薄膜導波路構造に着目した。今回得られた成果は量子光メモリおよびグローバル量子インターネットの実現に大きく近づく成果である。

研究成果の概要(英文)：Aiming to demonstrate the operation of solid-state on-chip quantum optical memory, we studied the realization of optical-electronic quantum coherent coupling using a 167Er-doped rare earth oxide thin film waveguide structure on a Si substrate at telecom-band light. By designing a new slot-type optical waveguide that propagates light through a low-refractive-index layer and optimizing the structure, a propagation loss of 2.3 dB/cm was achieved, which is much lower than the target of 10 dB/cm. In addition, quantum optical memory operation with a high efficiency of 3.5% for a memory time of 0.5 μs under a zero magnetic field was achieved using 167Er-doped rare-earth oxide bulk crystals. These results contribute significantly to the realization of thin-film waveguide quantum optical memory.

研究分野：光物性

キーワード：量子メモリ 希土類 導波路

## 1. 研究開始当初の背景

将来実現が期待されている量子情報通信ネットワークは、量子情報を伝送する量子チャネル、および量子光メモリや量子メディアコンバータで構成される量子ノードから構成される [Nature 453, 1023 (2008)]。その優れた量子性から量子情報伝送媒体として光子が用いられるため、量子チャネルは光損失の少ない 1.5  $\mu\text{m}$  通信波長帯光ファイバー網が用いられる事になる。量子ノードはこの量子チャネルとリンクされるわけであるが、当然 1.5  $\mu\text{m}$  帯光子で動作する固体メモリやコンバータが必要不可欠となることは容易に想像できる。

量子ノードの構成要素の基本的な動作原理は、光子と物質（電荷やスピン）のコヒーレントな量子結合、すなわち光子の持つコヒーレンスと物質系の波動関数の可逆的かつコヒーレントな転写を基にしている。近年この量子コヒーレント結合を用いた量子メモリの動作実証実験が様々な物質系、例えば半導体量子ドット [Phys. Rev. Lett. 119, 060502 (2017)]、Si 中のドナー [Science 336, 1280 (2012)]、ダイヤモンド中の NV センター [Science 336, 1283 (2012)] などにおいて報告されている。しかしながらいずれの場合も相互作用波長は可視光 $\sim$ 1  $\mu\text{m}$  程度であり、量子チャネルとのリンクには波長変換が必要となる。

これらの視点から、希土類、特にエルビウム (Er) 添加結晶に量子コヒーレント結合物質系としての大きな期待が寄せられている [Phys. Rev. Lett. 104, 080502 (2010)]。これは固体中の添加 Er イオンの 4f-4f 軌道遷移が通信波長帯光子と直接相互作用することができるからである。従来 Er は Kramers 縮退により電子スピンの二重縮退が残るためコヒーレンス時間 ( $\equiv$ メモリ時間) がナノ秒程度と非常に短くなるが、ごく最近、 $^{167}\text{Er}^{3+}$  (天然存在比 23%) の超微細構造準位間遷移を用いることで 100 ミリ秒 (ゼロ磁場)  $\sim$ 1 秒 (7T) までコヒーレンス時間の長寿命化が可能となったことがわかってきた [Appl. Phys. Express 10, 042801 (2018), Nature Phys. 14, 50 (2018)]。さらに Er 電子スピンと母体結晶核スピンの superhyperfine 結合を用い、核スピンにおけるさらに長いメモリ時間の実現 (4 秒) やマイクロ波光子の通信波長帯光子への変換なども試みられ始めている [Phys. Rev. Lett. 120, 197401 (2018)]。

このような急速な進展が見られる Er を用いた量子コヒーレント結合研究のほとんどは、 $\text{Y}_2\text{SiO}_5$  母体結晶に添加されている。なぜなら  $\text{Y}_2\text{SiO}_5$  を構成する各元素の核スピン存在比率が非常に低く、添加する Er イオン (Y と置換) の電子状態に与える磁氣的擾乱が小さいためである。しかし  $\text{Y}_2\text{SiO}_5$  は斜方晶構造であるため立方晶半導体基板上へのエピタキシャル成長には向かず、一般には引き上げ成長によるバルク結晶が用いられる。すなわち Er 添加  $\text{Y}_2\text{SiO}_5$  に導波路等の光閉じ込め構造の作製や同一基板上への集積化は困難であり、量子コヒーレント結合の高効率化や cavity-QED 効果の利用、他の光素子とのシームレスな接続などは事実上不可能である。これは量子ノードの実現に向け、深刻な問題となることは必至である。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、量子情報通信ネットワークの実現に必須な通信波長帯光子で動作する固体オンチップ量子光メモリの動作実証を目指す。具体的には Si 基板上にエピタキシャル成長された  $^{167}\text{Er}$  添加希土類酸化物薄膜 ( $^{167}\text{Er}:\text{REO}$ ) による光導波路構造を用い、量子光メモリの基本動作となる光-電子量子コヒーレント結合を通信波長帯 (1.53  $\mu\text{m}$ ) 光子かつオンチップで実証する。

## 3. 研究の方法

(1) 核スピン除去された  $^{167}\text{Er}:\text{REO}$  エピタキシャル薄膜の成長とコヒーレンス評価：我々はこれまでに、Si 基板上への Er:REO 結晶の MBE エピタキシャル成長を実現してきた [Opt. Mater. Express 7, 1097 (2017)]。REO は立方晶 bixbyite 構造をとり、その格子定数は Si 結晶格子の 2 倍に等しい。そのため Si 基板上へのエピタキシャル成長が可能となる。また希土類のイオン半径がイオン種によらずほぼ一定であることから、目的に応じた希土類を選択した多様な REO を成長することが可能である。この独自の成長技術を用い、Er のデコヒーレンスの主要因である核スピンの除去された REO エピタキシャル薄膜 (Ce および Gd 酸化膜) に同位体制御された  $^{167}\text{Er}$  (核スピン  $I=7/2$ ) のみを添加することで、磁氣的擾乱が排除された環境下に置かれた  $^{167}\text{Er}$  超微細構造準位における長いコヒーレンス時間  $T_2$  ( $>100$  ミリ秒) をゼロ磁場下で実現する。

(2) 低光損失 Si/ $^{167}\text{Er}:\text{REO}$ /Si スロット型光導波路の実現：オンチップデバイスを考えた場合、基板上に光導波路型デバイス構造を形成する必要がある。しかしながら REO 結晶の屈折率は  $n_{\text{REO}}=1.5\sim 1.9$  程度と、成長基板の Si ( $n_{\text{Si}}\sim 3.4$ ) にくらべ低いため、REO に光を閉じ込めることができない。また希薄添加された  $^{167}\text{Er}$  と通信波長帯光子の相互作用を十分に確保するために、 $^{167}\text{Er}:\text{REO}$  内で数百マイクロメートル程度光を導波させる必要がある。そのため本研究では、Si/ $^{167}\text{Er}:\text{REO}$ /Si のスロット型光導波路を Si 基板上に形成する。この構造では低屈折率層に TM 偏光の光 (一般的な光導波路では TE 偏光) を導波させることが可能 [Opt. Lett. 29, 1209 (2004)] で、我々独自の REO/Si ヘテロエピタキシャル成長技術により実現させる。

(3) 通信波長帯光での量子コヒーレント結合とメモリ動作の実証：これまで我々は  $^{167}\text{Er}$  のポピュレーションダイナミクスを明らかにするための、精密分光技術を構築してきた。これまでにコヒーレンス時間  $T_2$  に与える Er-Er 相互作用の大きさ (同位体純化の効果) をスペクトルホールバーニング (SHB) 測定により明らかにした [APEX **10**, 042801 (2017)]。SHB はメモリ動作の際の初期化にも相当する。また Rabi 振動とフォトンエコー (PE) の観測 [Opt. Lett. **44**, 4933 (2019)] など、 $^{167}\text{Er}$  超微細構造分裂準位に対するパルスエリア制御と最も基礎的な量子コヒーレント結合制御を実現させてきた。これら精密分光技術により、得られた導波路構造における通信波長帯光子での量子コヒーレント結合とメモリ動作を実証する。

#### 4. 研究成果

(1) 核スピン除去された  $^{167}\text{Er}:\text{REO}$  エピタキシャル薄膜の成長とコヒーレンス評価：Ce および Gd 酸化物の成長条件を詳細に調べ、 $^{167}\text{Er}$  の添加母体として高品質な  $\text{CeO}_2$  および  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  の Si 基板上での MBE エピタキシャル成長に成功した (図 1)。また希薄に添加された Er からの発光特性を調べたところ、 $1.53\ \mu\text{m}$  付近における Stark (結晶場分裂) 準位の形成が確認され、またその準位におけるエネルギー緩和時間 ( $T_1$ ) が 10 ミリ秒程度であることが分かった。これは母体結晶の高品質性を示すと同時に Er の高い添加濃度制御性を示すものである。

一方、これらエピタキシャル薄膜は 100 nm 程度の膜厚である。結晶成長方向での光学応答信号は、光と Er の相互作用長 (つまり膜厚) に制限されるため非常に小さく、SHB や PE などによるコヒーレンス時間 ( $T_2$ ) の評価測定は困難となることが予想される。そのため成長膜内を光伝播させ光と Er の相互作用長を十分長く取ることで、光学応答信号の増大化が期待できる。この実現には研究方法 (2) で示した低光損失 Si/ $^{167}\text{Er}:\text{REO}/\text{Si}$  スロット型光導波路の実現が不可欠となる。後述のように極低損失なスロット型光導波路を実現できたものの、本課題期間内にコヒーレンス時間の評価には至ることができなかった。現在も引き続きスロット型光導波路を用いた評価を進めており、今後速やかに達成できるものと考えている。

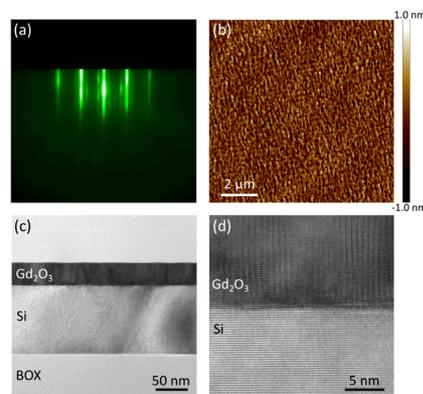


図 1  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜の (a) REED 像、(b) AFM 像、(c, d) 断面 TEM 像。

(2) 低光損失 Si/ $^{167}\text{Er}:\text{REO}/\text{Si}$  スロット型光導波路の実現：Si/Er: $\text{Gd}_2\text{O}_3/\text{Si}$  スロット型光導波路構造、導波損失評価用リング共振器、および光入出力用グレーティングカップラの設計及び FDTD シミュレーションによる構造最適化を行った。その結果をもとに Si/ $^{167}\text{Er}:\text{REO}/\text{Si}$  薄膜の SOI 基板上への MBE 成長と微細加工を行い、Si/ $^{167}\text{Er}:\text{REO}/\text{Si}$  スロット型光導波路構造の作製を行なった (図 2)。グレーティングカップラを介した光導波測定において、リング共振器の共振モード線幅から見積もられた導波損失は、 $284\ \text{dB}/\text{cm}$  と非常に高い値となってしまった (図 3)。これは主に REO 層上部のアモルファス Si の光吸収と導波路横方向への光漏洩に起因する損失が支配的であると考えられる [Opt. Express **28**, 14448 (2020)]。

そこでアモルファス Si 層を SiN 膜に変更するとともに、導波路幅の最適化を試みた。図 4 に FDTD シミュレーション結果を示す。この結果から導波路幅を変化させると、TM モードの光が

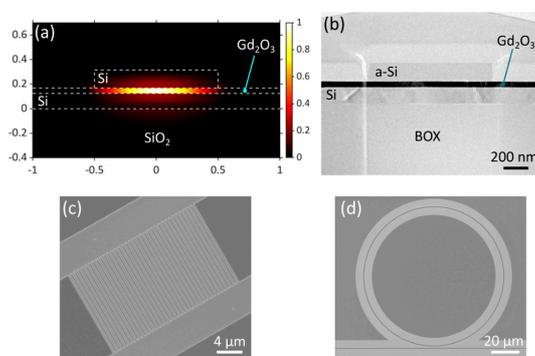


図 2 Si/ $^{167}\text{Er}:\text{Gd}_2\text{O}_3/\text{Si}$  スロット型光導波路の (a) TM モードの電磁界強度分布の計算結果、および (b) 断面、(c) グレーティングカップラ、(d) リング共振器の電子顕微鏡写真。

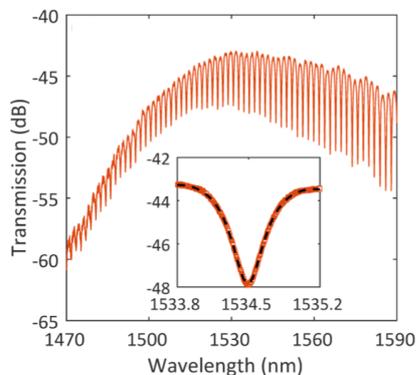


図 3 Si/ $^{167}\text{Er}:\text{Gd}_2\text{O}_3/\text{Si}$  スロット型光導波路の透過スペクトル。内挿は共振モードの拡大図。

導波路内に強く閉じ込められる最適な幅が存在し(図4(e)),これまでのような横方向への漏洩(図4(f))を強く抑制することができることが明らかとなった。この構造を用い光導波測定を行なった。この測定より導波損失は4.70 dB/cmと見積もられ、劇的な光損失の抑制に成功した[Opt. Express 29, 41132 (2021)]。これにより、 $^{167}\text{Er}$  添加薄膜によるオンチップデバイスの基本構造が確立し、この構造を用いた通信波長帯光子による光-電子量子コヒーレント結合実験の準備が整った。

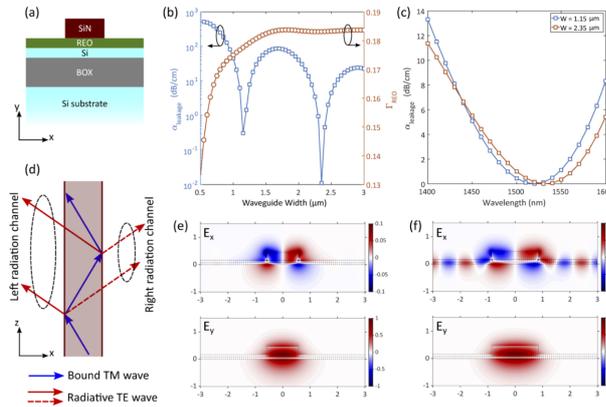


図4 (a) 計算に用いた構造、(b) TMモードの漏れ損失とモード閉じ込め係数の導波路幅依存性、(c) 幅1.15  $\mu\text{m}$ と2.35  $\mu\text{m}$ の導波路の漏れ損失、(d) 伝播の模式図、(e, f) 幅1.17  $\mu\text{m}$ と1.70  $\mu\text{m}$ の導波路の電界強度。

(3) 通信波長帯光での量子コヒーレント結合とメモリ動作の実証: 低光損失スロット型光導波路の実現に時間がかかってしまったため、当初計画していた導波路構造における通信波長帯光子での量子コヒーレント結合とメモリ動作の実証については、期間内での実施ができなかった。そのため、薄膜光導波路構造ではなくバルク結晶において、予備的な実験を行い各種パラメータの取得やメモリ動作検証を行うこととした。

まずメモリ動作実証に用いるレーザー光源の周波数安定化をおこなった。ここでは、まず基準となる周波数安定化マスターレーザー(線幅1 Hz)に対し光周波数コムを周波数ロックし、その安定化された光周波数コム1本に対し評価光源としての半導体レーザー(線幅1 kHz以下、発振周波数195.1 THz)を周波数ロックした(図5(a))。この方法では、広帯域に広がる光周波数コムの任意のコム1本に周波数ロックすることができるため、ロック可能な周波数範囲が非常に広いという特徴がある。評価用半導体レーザーは周波数のアラン偏差が180秒の積算時間で300 kHz程度あったが、この手法を用いることで2 Hzまで安定化させることに成功した(図5(b)) [Opt. Express 29, 27137 (2021)]。

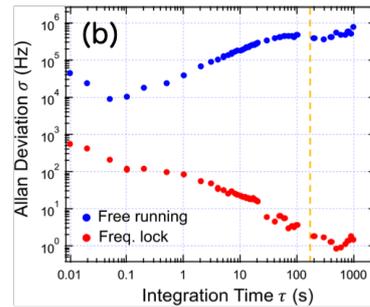
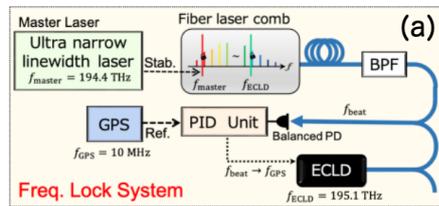


図5 (a) 周波数安定化システム、(b) 周波数ロックの有無によるアラン分散の積算時間依存性

次にこの周波数安定化された評価光源を用い、 $^{167}\text{Er}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$  バルク結晶 ( $^{167}\text{Er}$  添加濃度: 10 ppm) における光メモリ動作についての検証実験を行った。メモリ動作には Atomic Frequency Comb (AFC)法 [E. Saglamyurek et al., Nat. Photon. 9, 83 (2015)] を適用した。これは  $^{167}\text{Er}$  の不均一広がりに対し周波数選択光ポンピングを行うことで光吸収の櫛を作成しそこに信号光を書き込む。そしてその櫛の周波数幅の逆数に対応する時間の後に、書き込まれた信号が AFC エコーとして再生されるというプロトコルである。AFC メモリプロトコルの動作実証実験結果を図6に

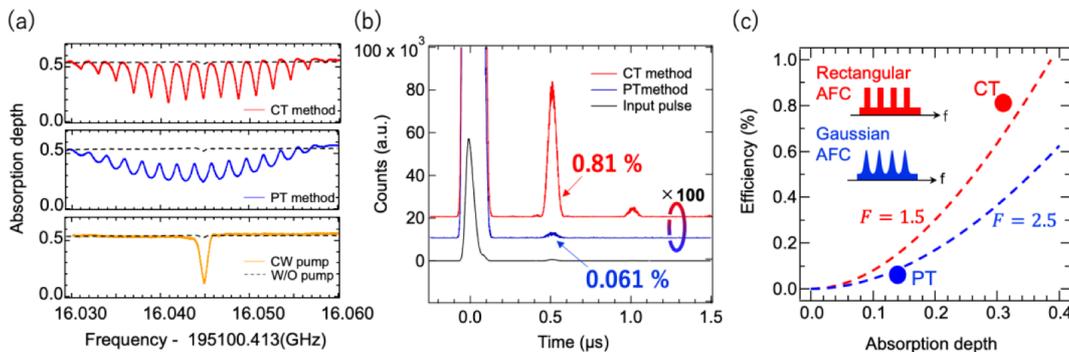


図6 (a) 各手法により作製した AFC スペクトル。(b) 各手法における AFC エコー信号とメモリ効率。(c) 測定から得られたメモリ効率と、ガウシアンおよび矩形 AFC によるメモリ効率の理論曲線との比較。

示す。ここでは AFC の作製に、従来から用いられている光パルス列を用いる方法 (Pulse Train

(PT) 法) 及び今回我々が提案した光周波数コムを直接  $^{167}\text{Er}$  に転写する方法 (Comb Transfer (CT) 法) の2つの手法を比較した。図6(a)より、作製された AFC は PT 法に比べ CT 法がより深く明瞭な櫛が形成されていることがわかる。また AFC エコー信号から見積もられるメモリ効率は、PT 法で 0.061% だったのに対し、CT 法では 0.81% と飛躍的に効率が改善されることがわかった (図6(b))。これら得られたメモリ効率は、ガウシアン型 AFC (PT 法) および矩形型 AFC (CT 法) とした場合の理論曲線によく一致した (図6(c)) [2022 年応用物理学会春季学術講演会, 25p-D214-4 (講演奨励賞受賞)]。

期間内に導波路構造における通信波長帯光子での量子コヒーレント結合とメモリ動作の実証に至ることはできなかったが、 $^{167}\text{Er}$  添加結晶を用いた量子メモリ動作の検証と効率の改善は、大きく進展することができた。今後早急に導波路型デバイスを作製し、今回得られた知見を適用することで、当初目標であったオンチップ光導波路構造光量子メモリの動作を引き続き実証していく。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5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 Yasui S., Hiraishi M., Ishizawa A., Omi H., Kaji R., Adachi S., Tawara T.	4. 巻 29
2. 論文標題 Precise spectroscopy of 167Er:Y2SiO5 based on laser frequency stabilization using a fiber laser comb	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 27137 ~ 27137
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.433002	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 Xu Xuejun, Inaba Tomohiro, Tsuchizawa Tai, Ishizawa Atsushi, Sanada Haruki, Tawara Takehiko, Omi Hiroo, Oguri Katsuya, Gotoh Hideki	4. 巻 29
2. 論文標題 Low-loss erbium-incorporated rare-earth oxide waveguides on Si with bound states in the continuum and the large optical signal enhancement in them	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 41132 ~ 41132
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.437868	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 Ohta Ryuichi, Herpin Loic, Bastidas VictorM., Tawara Takehiko, Yamaguchi Hiroshi, Okamoto Hajime	4. 巻 126
2. 論文標題 Rare-Earth-Mediated Optomechanical System in the Reversed Dissipation Regime	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 047404/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.126.047404	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 Xu Xuejun, Fili Viviana, Szuba Wojciech, Hiraishi Masaya, Inaba Tomohiro, Tawara Takehiko, Omi Hiroo, Gotoh Hideki	4. 巻 28
2. 論文標題 Epitaxial single-crystal rare-earth oxide in horizontal slot waveguide for silicon-based integrated active photonic devices	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 14448 ~ 14448
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.389765	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 Hiraishi Masaya, IJspeert Mark, Tawara Takehiko, Adachi Satoru, Kaji Reina, Omi Hiroo, Gotoh Hideki	4. 巻 44
2. 論文標題 Optical coherent transients in 167Er3+ at telecom-band wavelength	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 4933 ~ 4933
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OL.44.004933	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 -

〔学会発表〕 計28件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 14件)

1. 発表者名 安井翔一郎, 平石真也, 石澤淳, 尾身博雄, 稲葉智宏, Xuejun Xu, 鍛冶怜奈, 足立智, 依毅彦
2. 発表標題 167Er:Y2SiO5における零磁場下での通信波長帯Atomic Frequency Comb時間多重量子メモリプロトコルの実証
3. 学会等名 2022年春季応物学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 太田竜一, 徐学俊, 稲葉智宏, 眞田治樹, 石澤淳, 依毅彦, 小栗克弥, 山口浩司, 岡本創
2. 発表標題 Er3+:Y2SiO5結晶上における表面弾性波の生成
3. 学会等名 2022年春季応物学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安井翔一郎, 平石真也, 石澤淳, 尾身博雄, 稲葉智宏, Xuejun Xu, 鍛冶怜奈, 足立智, 依毅彦
2. 発表標題 167Er:Y2SiO5におけるAtomic Frequency Comb多重量子メモリプロトコルの実証
3. 学会等名 第57回応用物理学会北海道支部学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Hiraishi, T. Inaba, X. Xu, H. Sanada, T. Tsuchizawa, A. Ishizawa, T. Tawara, H. Omi, J. Longdell, K. Oguri, H. Gotoh
2. 発表標題 Optical Coupling between Er <sup>3+</sup> and Integrated Microring Resonators on Si
3. 学会等名 2021年秋季応物学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 俵 毅彦、平石 真也、稲葉 智宏、徐 学俊、太田 竜一、足立 智、尾身 博雄
2. 発表標題 量子情報プラットフォームとしてのEr添加固体材料の開発
3. 学会等名 2021年秋季応物学会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 R. Ohta, L. Herpin, V. M. Bastidas, T. Tawara, H. Yamaguchi, H. Okamoto
2. 発表標題 Micromechanical Control of the Optical Resonances of Erbium Ions
3. 学会等名 International Symposium on Novel Materials and Quantum Technologies (ISNTT2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Hiraishi, T. Inaba, X. Xu, H. Sanada, T. Tsuchizawa, A. Ishizawa, T. Tawara, H. Omi, J. Longdell, K. Oguri, H. Gotoh
2. 発表標題 Photoluminescence Enhancement of Erbium Ions in Rare-earth Oxide Thin Films Using Si-based Microring Resonators
3. 学会等名 International Symposium on Novel Materials and Quantum Technologies (ISNTT2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 S. Yasui, M. Hiraishi, A. Ishizawa, H. Omi, R. Kaji, S. Adachi, T. Tawara
2 . 発表標題 Frequency and Time Domain Measurements of 167Er <sup>3+</sup> :Y <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> by Stabilizing the Optical Frequency Using a Fiber Laser Comb
3 . 学会等名 International Symposium on Novel Materials and Quantum Technologies (ISNTT2021) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 S. Yasui, M. Hiraishi, A. Ishizawa, H. Omi, R. Kaji, S. Adachi, T. Tawara
2 . 発表標題 Evaluation of Homogeneous Linewidth of 167Er:Y <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> in Frequency Domain Measurement using Laser Stabilization with Optical Frequency Comb
3 . 学会等名 2021 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2021) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 R. Ohta, L. Herpin, V. Bastidas, T. Tawara, H. Yamaguchi, H. Okamoto
2 . 発表標題 Strain-Mediated Energy Control of Rare-Earth Ions Toward a Highly-Coherent Hybrid Opto-Mechanical System
3 . 学会等名 CLEO2021 (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 T. Miyake, R. Osako, X. Xu, K. Sawano, T. Maruizumi, T. Tawara, H. Gotoh
2 . 発表標題 Silicon Microdisk Resonators in the Mid-Infrared for On-Chip Gas Sensing
3 . 学会等名 2020 Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (SSDM2020) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1. 発表者名 X. Xu, T. Inaba, T. Tsuchizawa, A. Ishizawa, T. Tawara, H. Omi, H. Gotoh
2. 発表標題 Optical Signal Enhancement in Er-incorporated Rare-Earth Oxide Waveguides on Si
3. 学会等名 2021年3月春季応物学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三宅拓磨, 徐学俊, 澤野憲太郎, 丸泉琢也, 俵毅彦, 後藤秀樹
2. 発表標題 高Q値中赤外Siマイクロディスク共振器
3. 学会等名 2021年3月春季応物学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安井翔一郎, 平石真也, 石澤淳, 尾身博雄, 鍛冶怜奈, 足立智, 俵毅彦
2. 発表標題 167Er <sup>3+</sup> :Y <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> の超微細構造 型準位系における位相緩和時間の周波数および時間領域測定
3. 学会等名 2021年3月春季応物学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 太田竜一, Bastidas Victor, 俵毅彦, 山口浩司, 岡本創
2. 発表標題 機械振動子を用いたEr <sup>3+</sup> :Y <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> 励起準位の歪制御
3. 学会等名 2020年9月秋季応物学会
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 M. Hiraishi, M. IJspeert, T. Tawara, S. Adachi, R. Kaji, H. Omi, H. Gotoh
2 . 発表標題 Optical Coherent Transient of 167Er3+ in Y2SiO5 at Telecom-band Wavelength
3 . 学会等名 Int. School and Symp. on Nanoscale Transport and phoTonics 2019 (ISNTT2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Inaba, X. Xu, T. Tawara, H. Omi, H. Yamamoto, H. Gotoh
2 . 発表標題 Improvement of the Crystallinity of Gd2O3 on Si by an Interface Control
3 . 学会等名 Int. School and Symp. on Nanoscale Transport and phoTonics 2019 (ISNTT2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 X. Xu, V. Fili, T. Inaba, T. Tawara, H. Omi, H. Gotoh
2 . 発表標題 Optical absorption and Emission of Erbium Ions in Integrated Optical Waveguides
3 . 学会等名 Int. School and Symp. on Nanoscale Transport and phoTonics 2019 (ISNTT2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 X. Xu, V. Fili, T. Inaba, T. Tawara, H. Omi, H. Gotoh
2 . 発表標題 Horizontal slot waveguides based on epitaxial rare-earth oxide on Si
3 . 学会等名 2019 Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (SSDM2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 X. Xu, T. Inaba, T. Tawara, H. Omi, H. Gotoh
2 . 発表標題 Horizontal slot waveguides with strong optical confinement in low refractive index oxide films
3 . 学会等名 24th Optoelectronics and Communications Conf. (OECC2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 M. Hiraishi, M. IJspeert, T.Tawara, S. Adachi, H. Omi, H. Gotoh
2 . 発表標題 Evaluation of Rabi frequency and coherence time in the hyperfine structure of $^{167}\text{Er}^{3+}$ in $\text{Y}_2\text{SiO}_5$ through coherent transients
3 . 学会等名 Compound Semiconductor Week 2019 (CSW2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Inaba, X. Xu, T. Tawara, H. Omi, H. Yamamoto, H. Gotoh
2 . 発表標題 Suppressing interdiffusion of Si in Er-doped $\text{CeO}_2 / \text{Si}(111)$ and its impact on the optical property
3 . 学会等名 Compound Semiconductor Week 2019 (CSW2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 M. Hiraishi, M. IJspeert, T. Tawara, H. Omi, H. Gotoh
2 . 発表標題 Population relaxation and coherence times of $^{167}\text{Er}^{3+}$ diluted to 10 ppm in $\text{Y}_2\text{SiO}_5$ at zero magnetic field
3 . 学会等名 Conf. on Lasers and Electro-Optics 2019 (CLEO2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 稲葉智宏, 徐学俊, 依毅彦, 尾身博雄, 山本秀樹, 後藤秀樹
2. 発表標題 Si基板上に成長したGd2O3の高品質化における成長初期表面状態の重要性
3. 学会等名 2019年秋季応物学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 V. Fili, W. Szuba, 徐学俊, 稲葉智宏, 依毅彦, 尾身博雄, 後藤秀樹
2. 発表標題 Si基板上へのSi/Gd2O3ヘテロ構造のMBE成長
3. 学会等名 2019年秋季応物学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 X. Xu, V. Fili, T. Inaba, T. Tawara, H. Omi, H. Gotoh
2. 発表標題 Optical properties of Er-incorporated rare-earth oxide in horizontal slot waveguide
3. 学会等名 2019年秋季応物学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大迫力人, 徐学俊, 忠永修, 澤野憲太郎, 丸泉琢也, 依毅彦, 後藤秀樹
2. 発表標題 サブ波長格子構造を有するSi中赤外導波路
3. 学会等名 2019年秋季応物学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大迫力人, 徐学俊, 忠永修, 澤野憲太郎, 丸泉琢也, 依穀彦, 後藤秀樹
2. 発表標題 サブ波長格子構造を有するSi中赤外導波路
3. 学会等名 2019年秋季応物学会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 (Editors) Y. Hirayama, K. Ishibashi, K. Nemoto (Authors) T. Tawara, et al.	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Springer Nature	5. 総ページ数 347
3. 書名 Hybrid Quantum Systems	

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 固体量子メモリ	発明者 太田竜一, 依穀彦, 岡本創, 山口浩司	権利者 日本電信電話株 式会社
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2020/009939	出願年 2020年	国内・外国の別 国内
産業財産権の名称 アモルファス酸化シリコンを介した希土類酸化物結晶の成長	発明者 稲葉智宏, 依穀彦, 尾身博雄	権利者 日本電信電話株 式会社
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2019/0306741	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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	足立 智  (Adachi Satoru)  (10221722)	北海道大学・工学研究院・教授   (10101)	

6. 研究組織（つづき）

	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	後藤 秀樹  (Gotoh Hideki)  (10393795)	日本電信電話株式会社N T T 物性科学基礎研究所・企画・主席研究員    (92704)	
研究分担者	尾身 博雄  (Omi Hiroo)  (50257218)	大和大学・理工学部・教授    (34453)	
研究分担者	徐 学俊  (Xu Xuejun)  (80593334)	日本電信電話株式会社N T T 物性科学基礎研究所・フロンティア機能物性研究部・主任研究員    (92704)	
研究分担者	章 国強  (Zhang Guoqiang)  (90402247)	日本電信電話株式会社N T T 物性科学基礎研究所・フロンティア機能物性研究部・主任研究員    (92704)	
研究分担者	稲葉 智宏  (Inaba Tomohiro)  (90839119)	日本電信電話株式会社N T T 物性科学基礎研究所・フロンティア機能物性研究部・研究員    (92704)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
ニュージーランド	University of Otago		