

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05374

研究課題名(和文) 半導体レーザー励起ジスプロシウム中赤外レーザーの開発

研究課題名(英文) Development of diode-pumped dysprosium-doped mid-infrared lasers

研究代表者

上原 日和 (Uehara, Hyori)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：20725329

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：Dy³⁺のLD励起を実現するため、ErとDyを共添加したフッ化物ガラスを開発し、ダブルクラッド光ファイバーを設計・作製した。これを使い、極めて広帯域(波長2.5～3.7 μm)な自然放射増幅光源を実証した。この光源はファイバー結合が容易であるとともに、出力波長域に多くの分子吸収線が存在しており、ガスセンシングに有用である。

上記の経緯から、開発した光源を搭載したセンサーの開発を行い、世界初のインライン型赤外式フッ化物光ファイバーセンサーを実証した。更に、4 μm帯の量子カスケードレーザーをFe:ZnSeで増幅し、ガス吸収線よりも狭い線幅とワット級出力を両立したセンシング光源の開発に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、まず希土類共添加の利得媒質を作製し、発光特性を評価することで、Dy系レーザーの欠点であった汎用LD励起ができない問題を解決した。ErとDy共添加フッ化物ガラスにおけるエネルギー移動を詳細に解明したことは大きな学術的進歩であるとともに、DyのLD励起を可能にしたことで、レーザー装置開発を大きく前進させた。

また、上述の新規材料を使って開発した中赤外ASE光源は従来になく広帯域で、センシング光源として優位性の高いものである。実際に、開発した光源を使った世界初のインライン型赤外式フッ化物光ファイバーセンサーを実証しており、多用途に応用可能なことから関連分野に大きなインパクトを与えた。

研究成果の概要(英文)：To achieve diode pumping of Dy³⁺, Er/Dy co-doped fluoride glass was developed, and a double-clad optical fiber made of that material were designed and fabricated. Using this fiber, I have successfully demonstrated an extremely broadband (2.5 to 3.7 μm wavelength) amplified spontaneous emission (ASE) source. This ASE source is useful for gas sensing because of its easy fiber coupling and the presence of various molecular absorption lines in the output wavelength range.

Based on the above, we developed a sensor equipped with the developed light source and demonstrated the first in-line type mid-infrared fluoride fiber-optic sensor. Furthermore, 4 μm band quantum cascade laser was amplified with Fe:ZnSe gain medium and succeeded in developing a sensing light source with both a line width narrower than gas absorption lines and a watt-class output.

研究分野：レーザー工学

キーワード：中赤外レーザー ASE光源 ガスセンシング 光ファイバーセンサー フッ化物ガラス光ファイバー

1. 研究開始当初の背景

赤外吸収分光を利用した成分検出は、微量分子の存在を直接的に観測するため、最も高感度で高速なセンシング手法といえる。赤外吸収分光を利用した分子構造解析や環境モニタリング、危険物の遠隔検出、生体計測、医療診断などは、学術分野のみならず社会的に重要なセンシング技術と位置づけられる。光ファイバーをセンサー化した「光ファイバーセンサー」は、小型・軽量で長距離伝送が容易なことから、過酷環境や狭小環境において遠隔性に優れた次世代センシングデバイスとして発展が期待されている。代表者は、赤外吸収分光と光ファイバーセンサーとを組み合わせた「赤外光ファイバーセンサー」を構築することで、リアルタイム性と高感度を両立した小型で安価な遠隔センシングデバイスの実現、延いては社会実装を目指している。

一般的に普及している石英ガラスから成る光ファイバーは、赤外波長における材料吸収が大きく、赤外吸収分光に使うことができない。一方で、中空構造の光ファイバーを使った赤外吸収センシングが実用化されているが、伝送損失の制限から遠隔モニタリングには不向きである。そこで、代表者は、波長 $\sim 5\ \mu\text{m}$ の中赤外域で低損失なフッ化物ガラス光ファイバーを導波路としたセンサーデバイスを新たに提案している。このようなセンサーの開発には、光ファイバーとの光結合効率が高く、高輝度な安定光源が不可欠である。しかしながら、この条件を満たす実用的な赤外光源はこれまでに例が無く、そのことがデバイス開発の障壁となっていた。

波長 $3\sim 4\ \mu\text{m}$ で発振するレーザーはすでに複数のタイプのもものが販売されている。近赤外レーザーを基本とした波長変換レーザーはその一つであるが、非線形効果を用いるため出力安定性に難があり、また、一般的にシステムが大掛かりで高価である。量子カスケードレーザーなど半導体ベースの中赤外光源は近年発展が著しく、 $4\ \mu\text{m}$ でワット級出力が達成されているが、単色性や輝度が低く、ppm濃度の同位体検出は困難である。また、半導体は耐放射線性が低いのも欠点である。一方、希土類金属の直接発振を利用した固体レーザーは、高効率・高出力で安定性の高い発振が期待できる。例として $2\ \mu\text{m}$ 帯のTmやHo系、 $2.7\sim 2.9\ \mu\text{m}$ のEr系、Erの $3.5\ \mu\text{m}$ 帯発振が挙げられるが、波長 $3.0\sim 3.4\ \mu\text{m}$ はちょうど空白領域になっており、この波長域で発振可能な希土類は今回着目するジスプロシウム(Dy)のみである。Dyは $3\ \mu\text{m}$ 帯のほか $4\ \mu\text{m}$ 帯にも発光を呈する。 $4\ \mu\text{m}$ 帯では、鉄イオンを添加したZnSやZnSeが高効率な固体レーザー媒質として近年研究が盛んであり、今後さらなる高出力化も期待できるが、励起に $3\ \mu\text{m}$ 帯高出力レーザーが必要であること、発振動作にはレーザー媒質の低温冷却が不可欠であること、結晶が極めて高価という問題がある。

上記背景を鑑み、本研究では赤外センシング光源としての要件を満たすDy系レーザーを開発する。現状(申請時)で、Dy系 $4\ \mu\text{m}$ 帯レーザーの最高出力は $67\ \text{mW}$ にとどまっており、高出力な発振動作は得られていない。固体レーザーの出力を制限する要因として、熱伝導率やフォノンエネルギーといった熱特性、発光断面積や蛍光寿命などの光学特性、励起手法や共振器設計などが挙げられ、現状ではこれらの最適化がなされていない。本研究の核心をなす学術的「問い」は、高出力なDy系レーザーの実現のための「分光特性・熱特性に優れたレーザー媒質の探索」と「熱的・機械的・光学的に最適なレーザー装置の設計」である。さらには、「希土類で最も長波長の発光を示すDy³⁺系の発振特性や波長特異性の理解、Er³⁺からのエネルギー移動現象の解明」といった基礎的理解が問われている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、「Dy系レーザーの発振特性を理解し、LD励起で高出力な $3\ \mu\text{m}\cdot 4\ \mu\text{m}$ 帯Dy系レーザーの室温動作を実証する」ことである。そのために、下記独創的な研究目標を設定した。

- ・Dy添加酸化物及びフッ化物セラミックスの光学特性・熱特性を明らかにする
 - ・ $1.7\ \mu\text{m}$ LD励起 $4\ \mu\text{m}$ 帯Dy系セラミックレーザーでワット級の出力を得る
 - ・Er-Dyエネルギー移動現象を調査し、中赤外発光への寄与を明らかにする
- (最終目標) $970\ \text{nm}$ LD励起のEr, Dy共添加 $3\ \mu\text{m}$ 帯フッ化物ファイバーレーザーを実証

3. 研究の方法

本研究では以下の項目について研究をおこなった。

- ・希土類共添加フッ化物ガラスの材料開発
- ・希土類共添加ファイバーと光源装置構築
- ・中赤外ASE光源の出力特性の評価
- ・メタンガスセンシングの実証

4. 研究成果

(1) 希土類共添加フッ化物ガラスの材料開発

最近、Dy系の $3\ \mu\text{m}$ 帯フッ化物ファイバーレーザーが発振しており、それに伴って、波長 $2.6\sim 3.4\ \mu\text{m}$ における広帯域なASE出力も可能であることが推測されるが未報告である。ジスプロシウム系のファイバー発振器は、エルビウム系や他の希土類金属イオンと比較して波長 $3\ \mu\text{m}$

における利得帯域が広いという利点を有するが、安価で高出力な半導体レーザー（LD）での励起は困難である。励起光源には、長期安定性の乏しい波長 2.8 μm ファイバーレーザー等が用いられるが、この波長はクラディング材による光吸収が大きいので、繊細なコア励起が必須となり、ダブルクラッド型ファイバーを使用することができない。また、波長 1.1 μm、1.3 μm、1.7 μm での励起もジスプロシウム系固体レーザーにおいて報告されているが、いずれも高出力で安価な LD が存在しない波長である。

上記背景を鑑み、本研究では、従来のジスプロシウム系レーザーでは不可能であった高出力半導体レーザーによるクラッド層励起を可能にし、高出力で小型・安価な新規波長帯（3.0~3.4 μm）ファイバー光源の実現を目指した。本技術において最も重要かつ独創的な設計上のポイントは、Er と Dy を共添加したフッ化物光ファイバーを利得媒質に用いている点である。この特殊な光ファイバーを作製するに当たり、著者はガラス材料の独自開発からスタートした。

一般的な石英ファイバーは、波長が 2.4 μm よりも長い中赤外光を吸収するため、中赤外ファイバーレーザーや ASE 光源媒質に用いることができない。本技術では、ホストガラスにフッ化ジルコニウム（ZrF₄）系の ZBLAN ガラスを採用した。その理由として、波長 2.8 μm や 3.5 μm で発振可能な Er:ZBLAN ファイバーレーザーの研究が世界的に進展しており、ZBLAN ガラス光ファイバーの中赤外レーザー媒質としての実績が豊富であること、それに伴って ZBLAN ファイバーの品質が年々向上していることが挙げられる。

代表者は、Dy³⁺に加えて、LD 波長 976 nm で吸収の大きい Er³⁺を様々な濃度で共添加したフッ化ジルコニウム（ZrF₄）系の ZBLAN ガラスのバルク体を作製した（図 1）。この試料に波長 976 nm の LD を照射して、波長 3 μm 近傍の発光スペクトルを測定し、濃度の最適化をおこなった。図 8 に得られた発光スペクトルを示す。まず、図 2(a),(b)中の黒線スペクトルで示された、Dy 単独添加試料では、976 nm 励起による発光は確認されなかった。これは、Dy³⁺が LD 波長に吸収を持たないためである。一方、Er と Dy を共添加した試料では、中赤外域に広帯域な発光が観測され、2.9 μm よりも短波長側の Er 由来の発光に加えて、3.0 μm よりも長波長側の Dy 中心の発光も確認された。これは、波長 976 nm での励起によって、Er から Dy へのエネルギー移動が生じていることを意味している。(a)を見ると、Er 濃度 1mol% に対して、Dy を 1, 3, 5mol% と濃くするにしたがって蛍光強度が低下しており、アクセプターである Dy に対してドナーの Er が不足していることが推測される。(b)を見ると、Dy 濃度 1mol% に対して、Er を 1, 3, 5mol% と濃くするにしたがって蛍光強度が増加しており、高効率なエネルギー移動が起こっていることがわかる。Er が 1~3% では、Er 濃度にほぼ比例して蛍光強度が増加しているが、3~5% の間で増加率が飽和しており、濃度消光もしくは Dy の不足が推測される。また、光ファイバー化の際には、5% 以上の希土類添加で結晶化による失透の影響を考慮しなければならない。以上の結果から、Er3%, Dy1% が最適な共添加濃度であることを導いた。

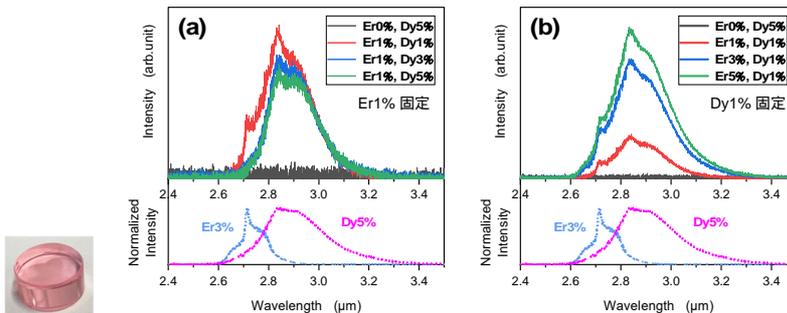


図 1 (左) 濃度最適化のために作製した Er/Dy 共添加 ZBLAN バルクガラス

図 2 (右) Er/Dy 共添加 ZBLAN ガラスの中赤外発光スペクトル（励起波長 976 nm）
 (a) Er 濃度 1% で Dy 濃度を変えたとき、(b) Dy 濃度 1% で Er 濃度を変えたとき
 下段は、Er 単独ドーブ、Dy 単独ドーブ時（励起波長 1.7 μm）の発光スペクトル

(2) 希土類共添加ファイバーと光源装置構築

上述した最適添加濃度のコア材と非添加の第一クラッド層からなるダブルクラッド型 ZBLAN ファイバーを作製した。コア径が 15 μm、第一クラッド径 200 μm、樹脂からなる第二クラッドの直径は 400 μm であり、コア及び第一クラッドの開口数はそれぞれ 0.12 と 0.5 に設計した。このとき、ASE モード（コアモード）はシングル横モードであり、カットオフ波長は 3.2 μm と求められる。本光源の高いビーム品質はこのファイバー構造設計に基づいている。励起用マルチ横モード LD の出力モードフィールド径は 105 μm であり、ZBLAN ファイバーの第一クラッドと容易に結合可能である。また、当該ファイバーのコア/第一クラッド直径比率における、波長 976 nm 励起光の吸収係数は 2.0dB/m であり、必要長、利得と発熱のバランスに優れた適したファイバー設計となっている。この ZBLAN ファイバーを用いれば、励起パワー 5 W の運用で、メンテナンスフリーでの長期安定性を確保できる。

ファイバー長さや装置構成の最適化のため、励起光に対して前方の ASE 出力を得る装置構成（図 3(a)）並びに後方の ASE 出力を得る装置構成（図 3(b)）を様々なファイバー長において観察した。図 4 に規格化した ASE スペクトルを示す。まず、(a) 前方の ASE スペクトルを見ると、ファイバーが長くなるにしたがって、波長 2.8 μm よりも長波長側の出力が低下した。これは、図中に破線で示した Dy の基底状態吸収スペクトルによる再吸収が原因と考えられる。励起光の吸収長よりもファイバーが長いと、余長分のファイバーで反転分布が形成されず、基底吸収の存在する長波長側では負の利得係数となる。複数のファイバー長さで検証した結果、励起パワー 5 W 時、0.5 m 前後が最適なファイバー長さであることが明らかとなった。(b) 後方の ASE スペクトルでは、ファイバー長さによる差異は見られるが、前方 ASE と比較すると顕著でない。これは、利得ファイバーの励起入力近傍で生じた ASE 光もしくは蛍光が主成分であり、再吸収の影響が小さいためである。このことは一方で、媒質長さによる十分な利得が期待できないことを意味しており、前方 ASE の長さ 0.5 m 時と比較して長波長側の ASE 強度が著しく低い結果

となった。この検証結果から、広帯域で高出力な ASE 光を得るには、長さ 0.5 m のファイバーを使用した前方 ASE 配置が最適であることがわかった。

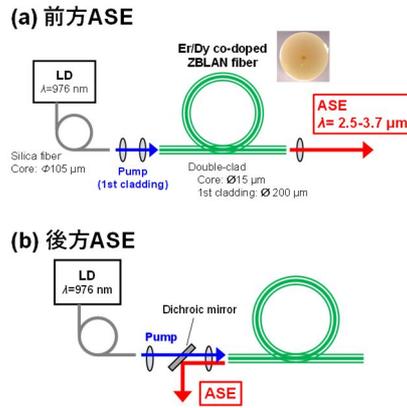


図3 装置構成最適化試験の光学系の概略図 (a)前方 ASE 出力配置 (b)後方 ASE 出力配置

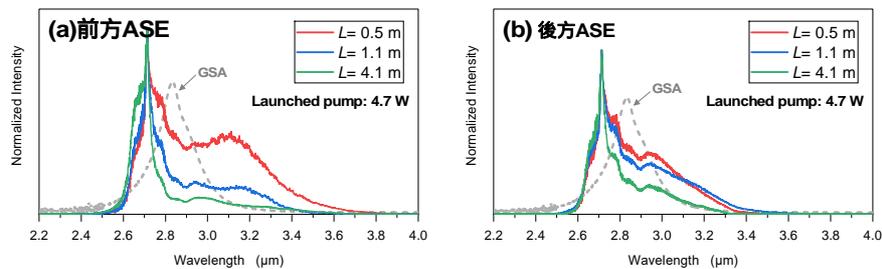


図4 様々なファイバー長さでの ASE スペクトル (a)前方 ASE 出力配置 (b)後方 ASE 出力配置

(3) 中赤外 ASE 光源の出力特性

構築した ASE 光源の規格化スペクトルを図 5 に示す。本応募書類に記載した赤外スペクトルは、いずれも FT-IR 式赤外光スペクトラムアナライザーを用いて測定したものである。波長 2.7 μm 近傍と 3.1 μm 近傍にそれぞれ Er と Dy を発光中心とした ASE 光が確認され (Er と Dy の蛍光スペクトルは図 2 の下段を参照)、2.5 ~ 3.7 μm に亘って連続的な ASE 出力を得ることができた。励起パワーに依存してスペクトル形状が変化していることから、単なる自然放光ではなく、誘導放出による増幅 (ASE) であることが確認された。励起パワーの増加にしたがって、3.0 μm よりも長波長側の Dy の利得が最も高い帯域において増幅が大きくなってきているのがわかる。特に励起パワーが強いとき、波長 3.1 μm 近傍において狭帯域で急峻なスペクトル構造が確認できるが、これはレーザー発振しきい値に至る直前の兆候と考えられる。レーザー発振に至った場合、一般的に ASE スペクトル中からスパイク状の狭線幅なピークが出現し、ASE は不安定化する。しかし、本提案の励起パワーの範囲では、ASE スペクトルは極めて安定であった。図 6 は、励起パワーに対して ASE 出力をプロットしたグラフである。ASE 出力は最大で 3 mW であり、分光用途の ASE 光源では十分に高出力である。ASE スペクトルと全出力から算出したパワースペクトルを図 7 に示した。励起パワー 5 W のとき、ASE は波長 2515 ~ 3735 nm に亘って出力しており (-10 dBm/ μm 基準) スペクトル幅は 1220 nm に及んでいる。これは従来の ASE 光源の常識を覆すほどの帯域幅であり、エネルギー幅に換算しても 1300 cm^{-1} (0.16 eV) と極めて大きい結果となった。

ビーム品質の指標となる M^2 (エムスクエア) 因子の測定結果を図 8 に示す。測定には、マイクロボロメーター式赤外カメラを用いている。 $M^2 = 1.1 \sim 1.3$ と極めて高ビーム品質であり、出力 3 mW であることを考慮すると、非常に高輝度な ASE 光源といえる。この結果から、ほぼ光損失なくシングルモード光ファイバーとの光結合が可能であることが示唆された。

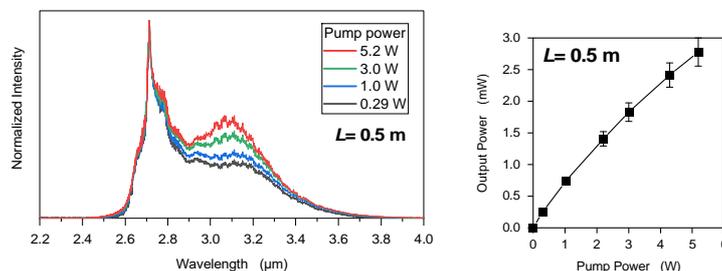


図5 ASE スペクトルの励起パワー依存性、図6 ASE 光源の入出力特性

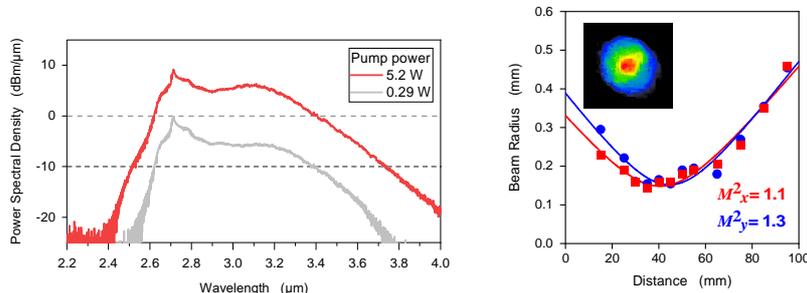


図7 ASE光源のワースペクトル、図8 ビーム品質 (M^2) 測定の結果とビームプロファイル

(4) メタンガスセンシングの実証

代表者は、本光源の波長優位性を示すため、メタンガスのセンシング検証を行った。開発した ASE 光源を用い、図 9 のような自由空間結合の透過型配置にて、長さ 20 mm のセル中のメタンガスを対象に吸収スペクトルを測定した。赤外吸収の無い窒素ガスをリファレンスとして、濃度 1%と 5%のメタンガスを充填した際に得られたスペクトルを図 10(a)に示す。波長 2.5~3.7 μm の範囲で光信号が得られ、全域にわたってセルの窓板の薄膜干渉信号が見られる。波長が 2.9 μm よりも短い領域では、狭線幅な多数のディップが確認され、これは大気中の水蒸気や炭酸ガスの赤外吸収である。波長 3.1~3.5 μm の領域で、メタンガスの CH 伸縮振動及び回転振動に起因した周期的な吸収線が観測された。リファレンススペクトルから算出した透過率スペクトルを図 10(b)に示した。メタンガスの当該波長域における回転振動吸収ピークを全てカバーできているのがわかる。本光源は、メタンガスのほかにも、図 2 に示した代表的なガス分子、さらには、液体試料、固体試料を対象とした赤外吸収分光にも適用可能と考えられる。

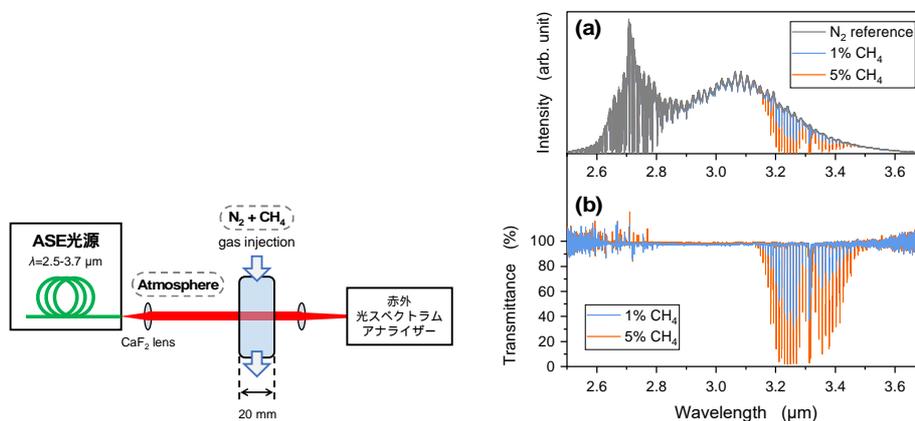


図 9 (左) 開発した ASE 光源を用いたメタンガスセンシング検証の概略図

図 10 (右) メタンガスセンシング検証試験の結果(a)分光検出器にて得られたスペクトル、(b)透過率スペクトル

(5) 本成果の優位性と今後の展望

本 ASE 光源技術の最大の優位点は、これまで LD 励起では得ることのできなかった Dy 起源の ASE 光が、汎用的な 976 nm LD での励起で取得可能になったことである。励起波長が短くクラッド層での励起光吸収が無くなったことで、より簡便でメンテナンス性に優れたクラッド層励起が可能になり、繊細で不安定なコア to コア結合技術が不要となった。これによって、極めて安価で小型、ロバストな装置構成で、Er 系 ASE 光源を遥かに凌駕するスペクトル特性の超広帯域光源が実現した。

また、光源性能上のアピール点として、センシングに重要な波長帯において従来になく広帯域であること、出力・スペクトルが安定でビーム品質が高く光ファイバー結合が容易なこと、小型で安価なことが挙げられる。近年、LD の小型化・低価格化が進んでおり、本光源をパッケージ化した場合、原価わずか ~20 万円、スマートフォンサイズまで小型化可能と見込まれる。本光源と波長特性・ビーム品質の類似した中赤外 SC 光源の市場価格は、500~1000 万円と高額で、サイズもビデオデッキ程であることから考えると、本技術は赤外光源分野における大きなブレークスルーといえる。

本技術で提案する ASE 光源は波長特性とビーム品質に優れている。そのため、今後の展開として、応募者が開発を進めるフッ化物ガラス光ファイバーを用いた赤外センサーデバイスへの搭載が最も有望と考えられる。図 2 の下段にも示したように、本光源の波長域には多くの分子固有の赤外吸収線が存在する「指紋領域」であり、様々なガス分子の検出に対応できる。さらに、波長 3~5 μm は、大気吸収の少ない「大気の窓」でもあるため、センシングに適した波長域といえる。窒素酸化物、硫酸酸化物、炭酸ガス等の温室効果ガスを監視する光ファイバーセンサーが実現すれば、工場施設への敷設に適したデバイスとなる。微量なメタン及びブタン濃度を検量するガス漏れ検知器、シックハウス症候群の原因であるホルムアルデヒド (波長 3.6 μm) のセンシングへの応用も有力である。特に水蒸気(酸素、水素同位体を含む)や炭化水素は、プラズマ・核融合科学分野において重要なガス種であり、将来の核融合炉における燃料プロセスや監視システムへの応用展開が期待できる。さらには、呼気診断装置などの医療分野への応用展開も想定される。例えば、本技術を搭載した赤外光ファイバーセンサーを用いて、呼気中の一酸化窒素濃度 (波長 2.7 μm) を高感度でリアルタイムモニタリングすることで、コロナ患者の重症化リスクの迅速な可視化が可能になる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件／うち国際共著 3件／うちオープンアクセス 10件）

1. 著者名 Yao Weichao, Li Enhao, Uehara Hiyori, Yasuhara Ryo	4. 巻 29
2. 論文標題 Efficient diode-pumped Er:YAP master-oscillator power-amplifier system for laser power improvement at 2920 nm	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 24606 ~ 24606
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.429984	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 Goya Kenji, Koyama Yuya, Nishijima Yoshiaki, Tokita Shigeki, Yasuhara Ryo, Uehara Hiyori	4. 巻 351
2. 論文標題 A fluoride fiber optics in-line sensor for mid-IR spectroscopy based on a side-polished structure	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators B: Chemical	6. 最初と最後の頁 130904 ~ 130904
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.snb.2021.130904	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 Li Enhao, Uehara Hiyori, Yao Weichao, Tokita Shigeki, Potemkin Fedor, Yasuhara Ryo	4. 巻 29
2. 論文標題 High-efficiency, continuous-wave Fe:ZnSe mid-IR laser end pumped by an Er:YAP laser	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 44118 ~ 44118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.444625	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 該当する
1. 著者名 Chen Tenghui, Yao Weichao, Uehara Hiyori, Ma Chunyang, Sohail Muhammad, Zhang Chunxiang, Ge Yanqi, Fan Dianyuan, Liu Jun	4. 巻 61
2. 論文標題 High-peak-power and wavelength tunable acousto-optic Q-switched Er:ZBLAN fiber laser	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 040902 ~ 040902
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac58d5	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 該当する

1. 著者名 Yao Weichao, Uehara Hiyori, Li Enhao, Yasuhara Ryo	4. 巻 152
2. 論文標題 Power-scalable two-wavelength pumped Er:YAP laser at 2.9 μm	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics and Laser Technology	6. 最初と最後の頁 108073 ~ 108073
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.optlastec.2022.108073	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 Hiyori Uehara, Takanori Tsunai, Bingyu Han, Kenji Goya, Ryo Yasuhara, Fedor Potemkin, Junji Kawanaka, and Shigeki Tokita	4. 巻 45
2. 論文標題 40kHz, 20ns acousto-optically Q-switched 4 μm Fe:ZnSe laser pumped by a fluoride fiber laser	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 2788-2791
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OL.391365	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 該当する

1. 著者名 Weichao Yao, Hiyori Uehara, Hiroki Kawase, Hengjun Chen, and Ryo Yasuhara	4. 巻 28
2. 論文標題 Highly efficient Er:YAP laser with 6.9 W of output power at 2920 nm	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 19000-19007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.395802	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 Hiyori Uehara, Weichao Yao, Akio Ikesue, Hiroyuki Noto, Hengjun Chen, Yoshimitsu Hishinuma, Takeo Muroga, and Ryo Yasuhara	4. 巻 3
2. 論文標題 Dy-doped CaF ₂ transparent ceramics as a functional medium in the broadband mid-infrared spectral region	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 OSA Continuum	6. 最初と最後の頁 1811-1818
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OSAC.398079	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 Ryo Yasuhara, Hiyori Uehara, Weichao Yao, Hengjun Chen, Shigeki Tokita, and Hiroaki Furuse	4. 巻 10
2. 論文標題 Dy-doped Y2O3 transparent ceramics as a mid-infrared laser medium and saturable absorber	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optical Materials Express	6. 最初と最後の頁 2998-3006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OME.409848	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 Weichao Yao, Hengjun Chen, Hiyori Uehara, and Ryo Yasuhara	4. 巻 10
2. 論文標題 Spectroscopic properties of Er:BZMT ceramics for laser emission	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optical Materials Express	6. 最初と最後の頁 3226-3234
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OME.408858	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 Weichao Yao, Hiyori Uehara, Shigeki Tokita, Hengjun Chen, Daisuke Konishi, Masanao Murakami, and Ryo Yasuhara	4. 巻 14
2. 論文標題 LD-pumped 2.8 μm Er:Lu2O3 ceramic laser with 6.7 W output power and >30% slope efficiency	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 12001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/abce9a	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 Kenji Goya, Akira Mori, Shigeki Tokita, Ryo Yasuhara, Tetsuo Kishi, Yoshiaki Nishijima, Setsuhisa Tanabe, and Hiyori Uehara	4. 巻 11
2. 論文標題 Broadband mid-infrared amplified spontaneous emission from Er/Dy co-doped fluoride fiber with a simple diode-pumped configuration	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 5432
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-84950-y	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17件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 合谷賢治、上原日和、安原亮、時田茂樹、岸哲生、西島喜明、田部勢津久
2. 発表標題 LD励起Er/Dy 共添加フッ化物ファイバーを用いた中赤外ASE光源と光ファイバーセンシングへの応用
3. 学会等名 レーザー学会・次世代ファイバーレーザー技術専門委員会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 合谷賢治、小山勇也、西島喜明、時田茂樹、安原亮、上原日和
2. 発表標題 側面研磨フッ化物ファイバーによる中赤外センサーデバイスの開発
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 合谷賢治、小山勇也、西島喜明、時田茂樹、安原亮、上原日和
2. 発表標題 フッ化物ファイバーを導波路とした中赤外光ファイバーセンシングシステムとガス計測への応用
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 合谷賢治、上原日和、西島喜明、時田茂樹
2. 発表標題 フッ化物ファイバを導波路とした中赤外光ファイバセンシングシステム
3. 学会等名 光ファイバ応用技術研究会（OFT）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Enhao Li, Hiyori Uehara, Weichao Yao, and Ryo Yasuhara
2. 発表標題 A watt-level mid-IR Fe:ZnSe laser pumped by a 3 μm Er:YAP laser
3. 学会等名 第6回フォトニクスワークショップ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Enhao Li, Hiyori Uehara, and Ryo Yasuhara
2. 発表標題 A high optical efficiency, CW mid IR Fe:ZnSe laser pumped by an Er:YAP laser
3. 学会等名 2021年度レーザー学会中部支部若手研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上原日和、ヤオ・ウェイチャオ、安原亮
2. 発表標題 3 μm 帯固体レーザーの高出力化のための増幅特性ならびに二波長励起法の検証
3. 学会等名 2021年度レーザー学会中部支部若手研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Enhao Li, Hiyori Uehara, and Ryo Yasuhara
2. 発表標題 Highly-efficient CW 4 μm Fe:ZnSe laser pumped by an Er:YAP laser
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第42回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 合谷賢治、西島喜明、時田茂樹、安原亮、上原日和
2. 発表標題 フッ化物ファイバーを導波路とした中赤外光ファイバーセンシングシステムによる赤外分光計測
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第42回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Enhao Li, Hiyori Uehara, and Ryo Yasuhara
2. 発表標題 Study of the CW laser amplification properties of the Fe:ZnSe crystal at mid-IR band
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上原日和、ヤオ・ウェイチャオ、安原亮
2. 発表標題 3 μm 帯固体レーザーの高出力化のための増幅特性の評価
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森朗、杉本尚哉、上原日和、安原亮、西島喜明、時田茂樹、合谷賢治
2. 発表標題 赤外フッ化物ファイバセンサにおけるエバネッセント波の染み出し長と研磨深さの最適化
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上原日和、松尾保孝、合谷賢治、西島喜明、安原亮、村上政直、小西大介
2. 発表標題 フッ化物光ファイバーデバイスの需要拡大のための耐候性・親水性ナノ薄膜の形成
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Weichao Yao, Hiyori Uehara, Hengjun Chen, Hiroki Kawase, Ryo Yasuhara
2. 発表標題 High power Er:Lu2O3 ceramic laser at 2.8 μm
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 時田茂樹、上原日和、合谷賢治、村上政直、小西大介、佐原諒、小田晃一、ヒョードル・ポチョムキン、アンドレイ・プーシキン
2. 発表標題 受賞記念：3 μm 帯および4 μm 帯の高出力固体・ファイバーレーザーの開発
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第41回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上原日和、合谷賢治、安原亮、時田茂樹、岸哲生、田部勢津久
2. 発表標題 LD励起・広帯域中赤外ファイバー光源の開発
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第41回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上原日和、合谷賢治、時田茂樹、安原亮、西島喜明、岸哲生、田部勢津久
2. 発表標題 広帯域な中赤外ファイバーASE光源の開発
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計6件

産業財産権の名称 光ファイバーおよびファイバーセンサ	発明者 合谷賢治、上原日和	権利者 秋田県立大学、 自然科学研究機 構
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-069885	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 光ファイバーおよび光ファイバーの製造方法	発明者 上原日和、安原亮、 合谷賢治、松尾保 孝、村上政直、小西	権利者 自然科学研究機 構、秋田県立大 学、北海道大
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-019461	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 可飽和吸収体およびレーザー発振器	発明者 上原日和、安原亮	権利者 自然科学研究機 構
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-058899	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 光ファイバおよびASE光源	発明者 上原日和、安原亮、 合谷賢治	権利者 自然科学研究機 構、秋田県立大 学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-208308	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 レーザー発振器	発明者 安原亮、チェン・エ ンジュン、上原日和	権利者 自然科学研究機 構
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-004189	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 光ファイバーおよびファイバーセンサ	発明者 合谷賢治、上原日和	権利者 秋田県立大学、 自然科学研究機 構
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-069885	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

Eurek Alert!
<https://www.eurekalert.org/news-releases/803494>
 環境モニタリングや医療など幅広い応用が期待される赤外光源を開発
https://www.nifs.ac.jp/research/r-report/lhdreport-o/mailinfo_345.html
 小型で安価な広帯域中赤外ファイバー ASE光源
<https://innovation.nins.jp/seeds/2021/seeds2021-09/>
 4μm帯中赤外パルスレーザーの開発
<https://innovation.nins.jp/seeds/2021/seeds2021-08/>
 高出力な中赤外パルスレーザー発振を可能とする新規可飽和吸収体
<https://innovation.nins.jp/seeds/2021/seeds2021-10/>
 【プレスリリース】環境モニタリングや医療など幅広い応用が期待される赤外光源を開発
<https://www.nifs.ac.jp/press/210311.html>
 【研究活動状況】環境モニタリングや医療など幅広い応用が期待される赤外光源を開発
https://www.nifs.ac.jp/lhdreport/mailinfo_345.html

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	ヤオ ウェイチャオ (Yao Weichao)	自然科学研究機構核融合科学研究所 (63902)	
研究協力者	チェン エンジュン (Chen Hengjun)	自然科学研究機構核融合科学研究所 (63902)	
研究協力者	シー チュエン (Shi Quan)	自然科学研究機構核融合科学研究所 (63902)	

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