

Er/Dy 共添加フッ化物ファイバを利用した 広帯域 ASE 光源の実用化研究

秋田県立大学 機械工学科
助教 合谷 賢治

(2021 年度 一般研究開発助成 AF-2021206-B2)

キーワード：中赤外光源，フッ化物ファイバー

1. 研究の目的と背景

近年、中赤外波長帯の光源技術が多岐に渡って展開されている。この波長帯の特徴として、重要な分子の吸収波長が多数存在する「指紋領域」に該当するため、様々な材料の加工や計測に応用可能である。中赤外域の中でも、特に波長 3~5 μm の領域は、大気中での減衰が小さな「大気窓」であるとともに、例えば、ガラスや樹脂の透過特性に着目すれば、当該波長領域の光源が任意に選択できる場合、材料への吸収効率の調節が可能である。このように材料への吸収特性が優れた光源があれば、産業応用上の既存の課題や歩留りを大きく改善できると考えられ、中赤外レーザー光源は潜在的な用途が数多く存在する。本研究グループにおいても、中赤外ファイバーレーザー用のファイバブラッググレーティング (FBG) の作製とその評価手法 (AF-2018209-B2、[1]) を開発しており、それらの技術を用いて世界トップクラスの加工用高出力中赤外レーザーの試作に成功している[2]。

近年では、特に波長 3~4 μm の領域の中赤外光源の開発を目的として、希土類元素を添加したレーザー光源の開発が活発化している。特に、エルビウム Er (2.6~3.0 μm 、3.3~3.8 μm)、ホルミウム Ho (2.7~3.0 μm)、ディスプロシウム Dy (2.6~3.4 μm) といった希土類元素を利用したレーザー光源技術は波長 3~4 μm 帯をカバーしており、有用な光源技術として期待されている[3]。光学素子 (レンズ、ミラー、フィルター、グレーティング等) の性能評価には同じ波長帯の光源が必要である。光学

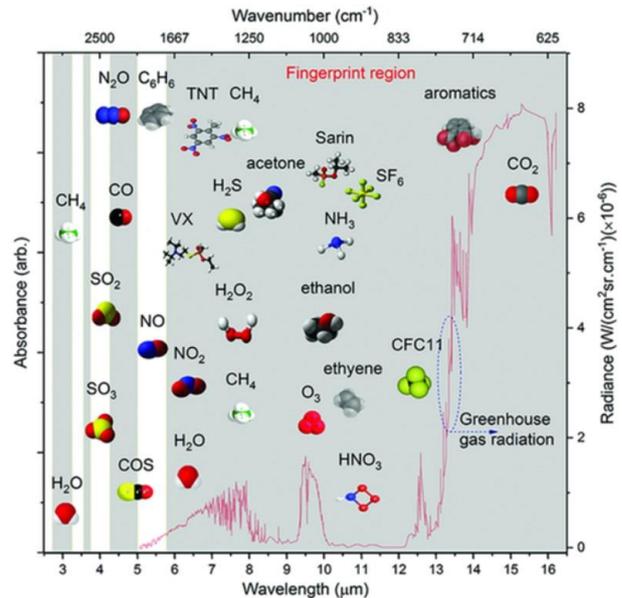


図1 中赤外波長帯で検出可能な分子の例

素子の評価用光源の候補として、黒体放射光源、量子カスケードレーザー (QCL)、スーパーコンティニューム光源 (SCL)、自然放射増幅光 (ASE) を利用した ASE 光源が挙げられる。それぞれの光源は特徴が異なるが、申請者においては、特殊なファイバーを用いることで、波長 2.5~3.7 μm を出力する超広帯域 ASE 光源の実証に成功している (Scientific Reports 11 5432 (2021))。既存の市販光源と申請者が開発した光源の代表的な特徴を表 1 にまとめる。

表 1 既存の中赤外光源と提案技術の比較表

光源の種類	波長帯	帯域幅	出力	ビーム品質	操作性	装置規模	装置単価
黒体放射	◎ 0.4~9 μm	○ 広帯域	◎ 数W	×	◎ ターンキー	◎	<50万円
QCL	○ 可変	△ 狭線幅	◎ 数W	◎ $M^2 < 1.5$	◎ ターンキー	◎	>200万円
SCL	◎ 1~10 μm	◎ 超広帯域	○ 数十mW	◎ $M^2 < 1.5$	△ 調整が必要	×	>500万円 光学補償素子必須
ASE	×	△ 狭帯域	○ 数十mW	◎ $M^2 < 1.5$	◎ ターンキー	◎	<100万円
提案ASE	○ 2.5~3.7 μm	○ 広帯域	○ 数mW	◎ $M^2 < 1.5$	◎ ターンキー	◎	<50万円

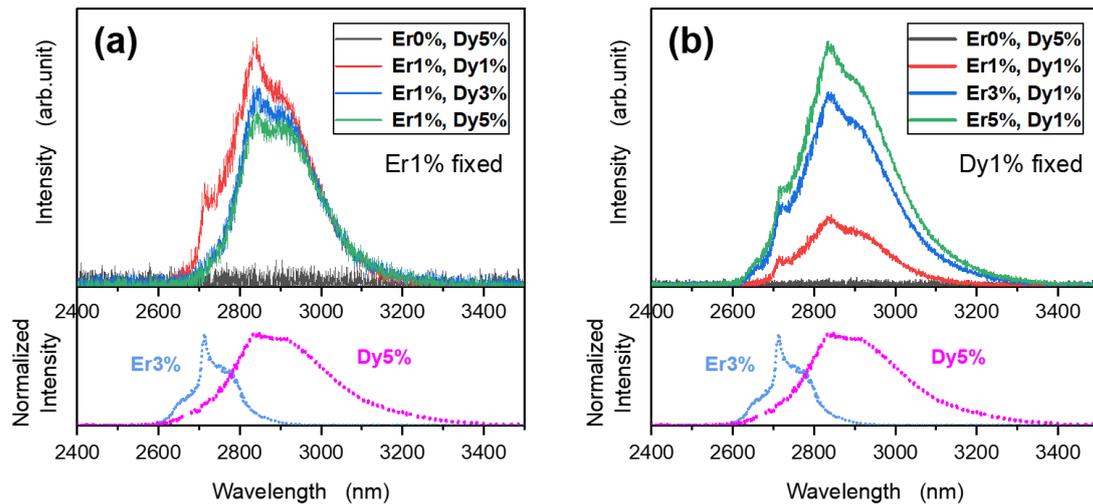


図2 各濃度における蛍光スペクトル

SCL 光源については理想的な光源特性を有しており、市販化される向きもあるが、安定性と装置単価が設備導入の妨げになっている。ASE 光源については、出力や波長安定性に優れているが、市販品の中赤外光源の波長帯は 2.2 μm 以下であり、要求を充たしていない。黒体放射光源は、原理上の制約として集光性が悪く、特に光ファイバーへの光結合効率が著しく劣る。近年では産業用の加工用光源としてファイバーレーザーが主流になりつつある情勢を鑑みると、ビーム品質に優れ、集光性の良い光源の需要が高まると考えられる。提案する光源技術は、波長 2.5~3.8 μm の広帯域光源を実現するために、Er と Dy を共添加したフッ化物ファイバーを用いている。本手法の特徴は Er から Dy へのエネルギー移動を利用することで、安価な市販のレーザーダイオード光源 (0.98 μm) で Er と Dy の励起を達成している。また本光源の模式図を図 1 に示すように、極めてシンプルな構成で安定出力可能な広帯域中赤外光源を実証している。提案する光源技術は SCL 光源とは異なり、装置起動後の光学調整が一切不要であるため、ターンキーオペレーションが可能である。そのため、本光源が実用化されれば、光学分野に不慣れな異分野の技術者であっても光学素子の検査や光学実験の成功率が向上すると期待できる。

本研究の目的は、提案する ASE 光源の実用化を目指し、提案手法のさらなる高度化である。具体的にはフッ化物フ

ァイバーへの添加濃度の最適化と Er と Dy 間の準位間のエネルギー移動のプロセスについて調べる。これにより、添加濃度、ファイバー長、励起パワーといった条件の設計指針を明確にし、より効率的な ASE 光の発振と低コスト化を試みる。装置単価の目標は、筐体や制御装置も含めて黒体放射光源と同程度 (50 万円以下) の価格帯を目標としている。

2. 光源装置の設計

提案する光源の特徴は Er と Dy 間の準位間のエネルギー移動を利用することで、市販の安価な 976 nmLD (半導体レーザー) により、中赤外光を出力可能なことである。これまでの研究により、フッ化物 (ZBLAN) ガラス材料を新たに作製し、両元素の添加濃度の選定を行った。具体的には図 2 に示すように、Er 濃度 0% の場合には Dy の発光は確認できず、Er 濃度 1% 以上では Dy の発光が認められた。このことから、両者の元素を共添加することで Er から Dy へのエネルギー移動により Dy の発光が可能であることを確認した。つづいて、このガラスをコア材に用いたダブルクラッド型 ZBLAN ファイバーを作製し、図 3 に示す構成で LD 励起の ASE 光源を構築した。この光ファイバーは、コア径が 15 μm 、第一クラッド径 200 μm 、樹脂からなる第 2 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。

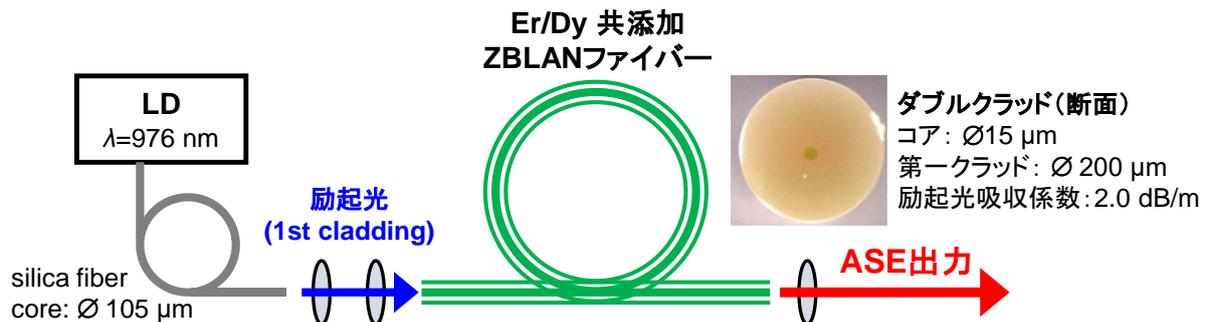


図3 開発した中赤外 ASE 光源の概略図

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、規格化周波数を元に算出し、カットオフ波長は $3.2 \mu\text{m}$ 近傍と求まる。励起光源には、汎用的な波長 976 nm のファイバー結合型マルチ横モード LD を用いており、出力モードフィールド径は $105 \mu\text{m}$ であり、ZBLAN ファイバーの第一クラッドと容易に光結合可能である。第一クラッド励起における吸収係数は約 2.0 dB/m である。

ファイバー長の最適化のために図 3 の装置構成にて、ファイバー長を変化させた際の ASE 出力のスペクトルを測定した。長さ毎の正規化した波長スペクトルを図 4 に示す。実験結果から、ファイバー長に比例して長波長側の光強度が減少していることが確認できる。これは、図中の基底準位吸収 (GSA) に由来しており、長波長側を効率良く出力するためには比較的短いファイバー長を用いる必要がある。本研究ではファイバー長は 0.5 m 以下を用いる。つづいて、励起出力毎の波長スペクトルを図 5 に示しており、励起出力の増加に伴いおおむね様に光強度が増加していることが確認できる。波長 $2.7 \mu\text{m}$ の急峻なピークは Er を発光中心とした ASE であり、 $3.1 \mu\text{m}$ を中心波長としたブロードなピークは Dy 由来の ASE である。本 ASE 光源は、波長 $2515 \sim 3735 \text{ nm}$ に亘って連続的なスペクトルで安定して出力しており ($-10 \text{ dBm}/\mu\text{m}$ 基準)、スペクトル幅は 1220 nm に及んだ[4]。これは従来の ASE 光源のよりも遥かに広い帯域幅であり、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。

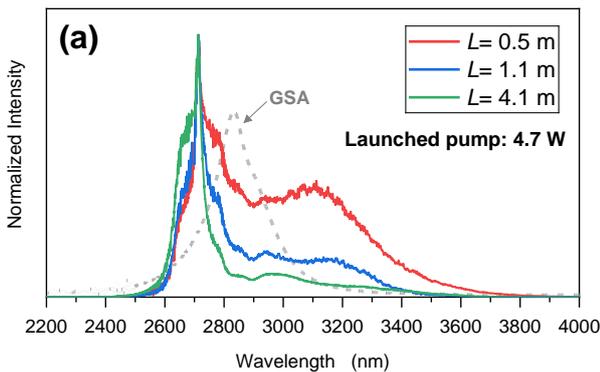


図 4 ファイバー長毎の ASE スペクトル

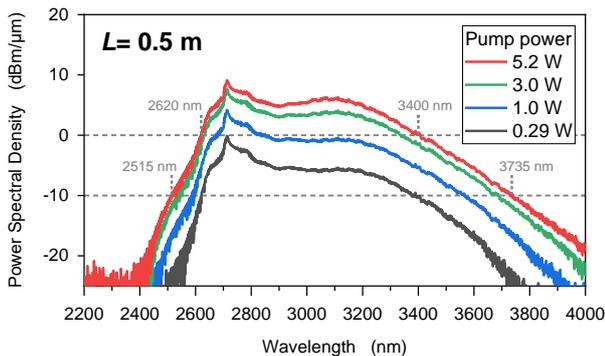


図 5 励起出力毎の ASE スペクトル

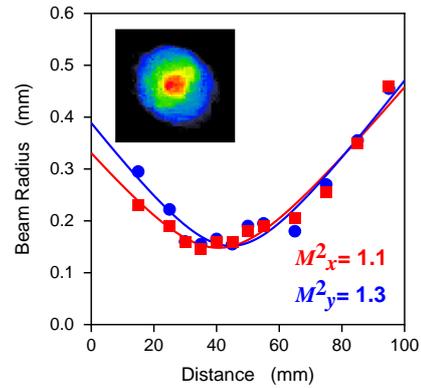


図 6 ASE 光のビームプロファイル

3. ASE 出力の評価

光源装置の重要な指標として、ビーム品質及び、経時安定性について調べた。ビーム品質については表 1 で示すように同等の装置価格体である黒体放射光源においては、極めて低いビーム品質である。一方で提案する ASE 光源については、ビーム品質の指標となる M2 因子は $1.1 \sim 1.3$ と高いビーム品質である。この結果から、本光源は、ほぼ光

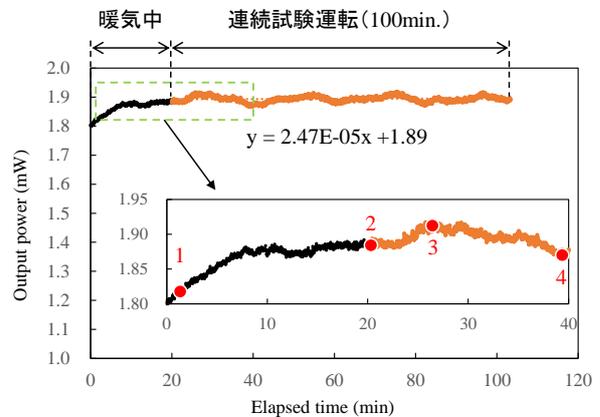


図 7 ASE 光の出力安定性 (100min.)

表 2 ASE 光源の出力安定性のまとめ

Power	Max. /mW	Min. /mW	Ave. /mW	RMS%
1.8 mW	1.92	1.87	1.89	0.51

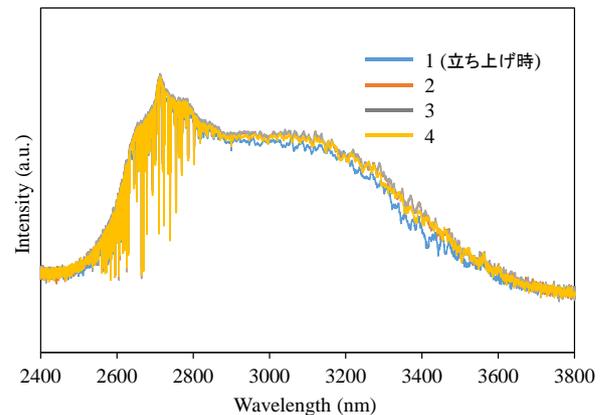


図 8 各時点における波長スペクトル

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。

つづいて、経時による出力安定性を評価した結果を図7に示す。出力 1.8 mW における出力安定性を観察したところ、暖気後（およそ 20 分後）以降は少なくとも 100 分間では大きな出力の変動は見られず、暖気時の出力増加や周期的な変動は励起光源（LD976 nm）の変動に起因していることを確認した。以上の結果から、ファイバー端部の周辺素子の耐性については課題が残るものの、試作した ASE 光源については、実用性能を充たしていると判断した。またこれまでに開発した高出力フッ化物ファイバーレーザーに関する要素技術[1,5]を組み合わせれば、より安定した光源装置に仕上がることが期待できる。

4. まとめ

提案する ASE 光源について、Er と Dy の添加濃度や、ファイバー長や光学系の最適化を行い、実用性能に耐えうる設計条件を示した。また、本装置を用いて実際に計測実験を行い、自由空間及び光ファイバー結合によりメタンガスの吸収分光計測が可能であることを確認した[4,6]。さらに課題であった波長、出力の安定性について調査を行い、励起光源由来の変動は確認できるものの、これは解決可能な課題である。また、オペレーションについてもターンキーオペレーションが可能で、煩雑な光学調整等を要しないことから提案する ASE 光源を用いた中赤外域の分光計測装置として導入のハードルは低いといえる。一方で長波長帯（3500 nm）高出力化について、現有の構成では限界があり、添加元素の選定[3,7]や励起波長の増設により達成の見込みがある。具体的には、図9に示すように長波長側の利得を増加させる場合には、Er： ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ の発光を利用する必要があり、1950 nm の励起光源が必要である[8]。

謝辞

本研究は、公益財団法人天田財団の一般研究開発助成のご支援を受けて実施しました。深く感謝いたします。また共同研究者である京都大学化学研究所 教授 時田茂樹氏、核融合科学研究所 准教授 上原日和氏に感謝します。

参考文献

[1] K. Goya, H. Matsukuma, H. Uehara, S. Hattori, C. Schäfer, D. Konishi, M. Murakami, S. Tokita, Plane-by-plane femtosecond laser inscription of first-order fiber Bragg gratings in fluoride glass fiber for in situ monitoring of lasing evolution, *Opt. Express*. 26 (2018) 33305. <https://doi.org/10.1364/oe.26.033305>.

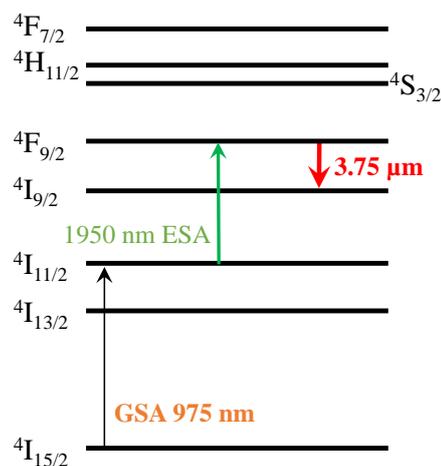


図9 エルビウム Er³⁺のエネルギー準位

[2] K. Goya, H. Uehara, D. Konishi, R. Sahara, M. Murakami, S. Tokita, Stable 35-W Er: ZBLAN fiber laser with CaF₂ end caps, *Appl. Phys. Express*. 12 (2019) 102007. <https://doi.org/10.7567/1882-0786/ab3f44>.

[3] J. Wang, X. Zhu, M. Mollae, J. Zong, N. Peyghambarian, Efficient energy transfer from Er 3+ to Ho 3+ and Dy 3+ in ZBLAN glass, *Opt. Express*. 28 (2020) 5189. <https://doi.org/10.1364/oe.384435>.

[4] K. Goya, A. Mori, S. Tokita, R. Yasuhara, T. Kishi, Y. Nishijima, S. Tanabe, H. Uehara, Broadband mid-infrared amplified spontaneous emission from Er/Dy co-doped fluoride fiber with a simple diode-pumped configuration, *Sci. Rep.* 11 (2021) 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84950-y>.

[5] H. Uehara, D. Konishi, K. Goya, R. Sahara, M. Murakami, S. Tokita, Power scalable 30-W mid-infrared fluoride fiber amplifier, *Opt. Lett.* 44 (2019) 4777. <https://doi.org/10.1364/ol.44.004777>.

[6] K. Goya, Y. Koyama, Y. Nishijima, S. Tokita, R. Yasuhara, H. Uehara, A fluoride fiber optics in-line sensor for mid-IR spectroscopy based on a side-polished structure, *Sensors Actuators B Chem.* 351 (2022) 130904. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130904>.

[7] J. Wang, X. Zhu, R.A. Norwood, N. Peyghambarian, Widely wavelength tunable Dy 3+ /Er 3+ co-doped ZBLAN fiber lasers, *Opt. Express*. 29 (2021) 38646. <https://doi.org/10.1364/oe.443808>.

[8] L. Zhang, S. Fu, Q. Sheng, X. Luo, J. Zhang, W. Shi, Q. Fang, J. Yao, Gain-Switched Er-Doped Fluoride Fiber Laser at ~3.75 μm, *Photonics*. 11 (2024) 449. <https://doi.org/10.3390/photonics11050449>.