

ラマンレーザ励起 VLMA-ErDFA を用いた 1550 nm 帯 10 W 出力ファイバ光源の開発

Development of 10 W Output in 1550 nm Wavelength Region Fiber Light Source by Use of VLMA-ErDFA Pumped by Raman laser

太田 健史^{*1}
Takefumi Ota

富永 敬介^{*1}
Keisuke Tominaga

鍵本 太志^{*2}
Taishi Kagimoto

山内 駿^{*2}
Shun Yamauchi

三木 健一^{*2}
Kenichi Miki

〈概要〉

空間光通信や LiDAR (Light Detection and Ranging) などレーザを空間に照射するアプリケーションの市場開拓が進んでいる中、高出力でシングルモード (SM: Single mode) 特性を有する光源の需要が高まっている。我々は高出力なラマンレーザ (CRRL: Cascaded Raman Resonator Laser) を用いて大口径 Er ドープファイバ (VLMA-ErDF: Very Large Mode Area Er Doped Fiber) を励起することで 10 W 以上を出力するファイバアンプのプロトタイプ機を開発した。また、OFS Fitel, LLC. では時間幅 2 μsec のパルスと同様の構成を用いて増幅し、1.6 mJ のパルスエネルギーを有する出力を実証したことを併せて報告する。

1. はじめに

レーザはその特性を活かし、光通信分野をはじめ、顕微鏡や分析機器などのサイエンスや医療の分野、高出力化して金属・材料加工などを行う産業分野など、社会実装と応用が広がっている。

レーザは高いエネルギーを持ち遠方まで空間を伝搬できる特性を持つ。このため、波長フィルタや干渉測定を利用することで、遠距離の高感度センシングや通信が可能である。また、無

人化や省人化の進展に伴い、LiDARの研究開発が進んでおり、人の「目」に代わる役割を果たしている。LiDARは、気候変動や防災の観点から大気や地上の計測に活用されるほか、自動運転車や工場内ロボットのセンサとしても応用が実証されている。また、Beyond 5Gに向けて、電波では実現が難しい高速通信を可能にするため、人工衛星や、成層圏も含む上空を飛行する UAV (Unmanned Aircraft Vehicle) やドローン、地上局、さらにはそれら飛行体同士の相互通信を光通信で行う技術が検討されている (図1)。

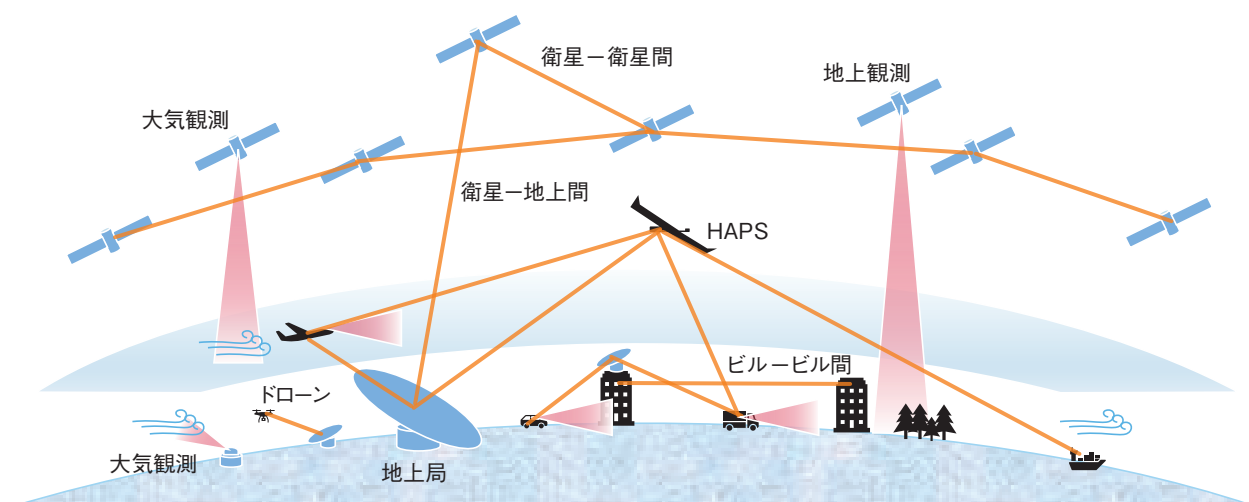


図1 空間光照射応用のイメージ
Image of free space laser applications.

^{*1} 研究開発本部 フォトニクス研究所

^{*2} 営業統括本部 ソーシャルデザイン統括部 市場開拓部

このように、これまでレーザは室内や工場内などといった管理された限られた環境で利用されることが主流であった。しかし、空間へ光を放射し、より遠くへ伝搬させるニーズが高まってきている。レーザ光を遠距離に伝搬させる際に求められる特性として、以下が挙げられる。

- ①ビーム品質が良いこと
- ②高出力であること
- さらに、移動体への搭載を想定すると、
- ③小型であること
- ④低消費電力であること

これらの要求に対して、光ファイバアンプは次のような特性を持つことから、空間照射分野での実用が期待されている。

- i) 高効率な光増幅が可能であること
 - ii) シングルモード出力が可能であること
 - iii) ファイバの長さに応じて高出力と放熱性を両立できること
- 一方で、光ファイバ内では光が伝搬するコア径が小さいため、高出力化に伴い光強度密度が増加し、非線形効果による出力特性の劣化や光による破壊が生じてしまうなどの課題がある。

そこで、我々はカスケードラマンレーザ (CRRL: Cascaded Raman Resonator Laser)¹⁾ を励起光源として採用し、大口径 Er ドープファイバ (VLMA-ErDF: Very Large Mode Area Er Doped Fiber) を利得ファイバに用いて、ワンボックス化した CRRL+VLMA 一体ファイバアンプのプロトタイプ機を試作したので報告する。

2. 構成

今回試作した CRRL + VLMA 一体化ファイバアンプの構成を図2に示す。CRRLはマルチモード (MM) の半導体レーザにより励起された Yb ドープファイバレーザ (YbDFL) をシード光源としており、YbDFLからは波長1117 nmの光が出力され、CRRLに入射される。CRRL内でラマン利得により入射した1117 nmよりも長波長の光が発振し、その光によるラマン利得によりさらに長波長の光が発振することを繰り返すことで、シングルモードファイバ (SMF) から波長1480 nmの光が出力される。

VLMA部は、WDM (Wavelength Division Multiplexing) カプラにより、増幅したい信号光と上記CRRLから出力された1480 nm光を重ね合わせて VLMA-ErDFへ導光され、信号光が増幅されて出力される。CRRL出力がSMF出力であることから、VLMA-ErDFはWDMカプラを用いた合波によりコア励起が可能となり、吸収・増幅率を維持したまま VLMA-ErDF長を短くすることが可能となる。このことにより、ファイバ内で生じる非線形効果やファイバ分散量を低減することが可能となる。また、VLMA-ErDFはコア径50 μm であり、高出力増幅時であっても非線形効果とファイバ破壊の出力閾値を大きくできる。さらに、VLMA-ErDFの配置の工夫により、シングルモード出力を実現できる。

3. 結果

電源は外部入力とし、上記の構成の通り、波長915 nmのMM-Pump LD、LDドライバ、ユニット化されたCRRL、VLMA-ErDFを一つの筐体に納めた。さらにファイバアンプを保護するために、信号光の入力が途絶えた場合に励起LDの出力を切断する保護回路を内蔵した。MM-Pump LDならびにLDドライバは発熱するため、冷却機構が必要であり、空冷冷却を基本とし、今後の高出力化に備えて水冷冷却も行える設計とした。構築したファイバアンプの写真を図3に示す。サイズは552(W) $\times$ 102(H) $\times$ 619(D) mmとなった。

図4に示すように、CRRLの1480 nm光の強度に対する出力変化を測定した。CRRLからは複数の波長成分の光が出力されるが、スペクトルを測定し1480 nmの光成分の強度のみを算出し横軸の値としている。波長は1545 nm, 1550 nm, 1565 nmのそれぞれで測定した。なお、入力したレーザ光は連続波 (CW) 光とした。VLMAの出力についても、光スペクトラムアナライザにより取得したスペクトル波形から自然放射増幅 (ASE) 光成分を分離し、パワーを計算して求めた。CRRL出力 (= 励起光の光量) に応じて VLMA 出力が大きくなり、いずれの波長においても20 W以上の励起光を入力することで10 Wを超える出力を確認した。

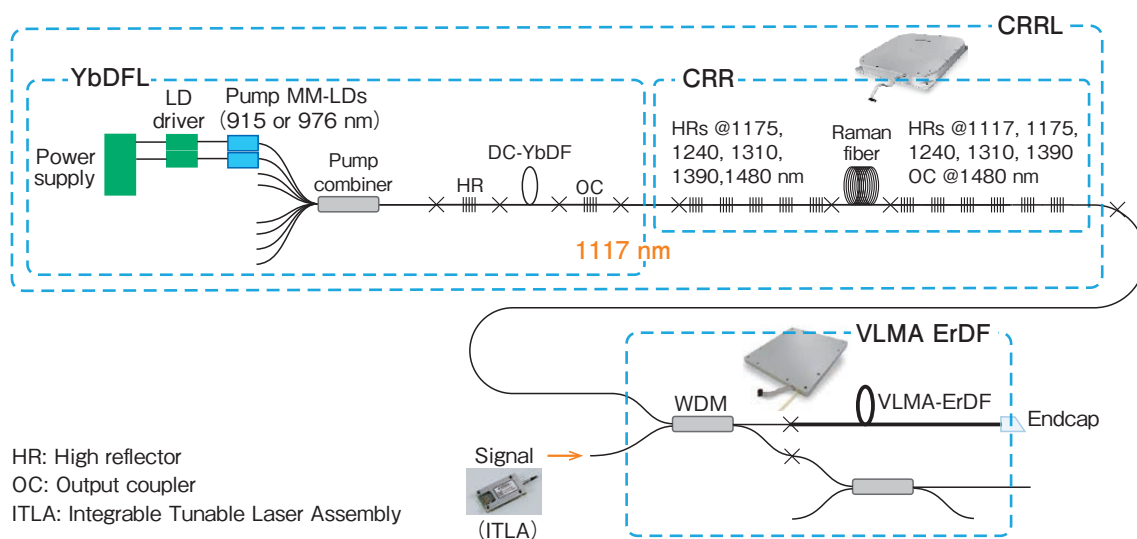


図2 ラマンレーザ + VLMA 光アンプの構成
Configuration of CRRL+VLM amplifier.

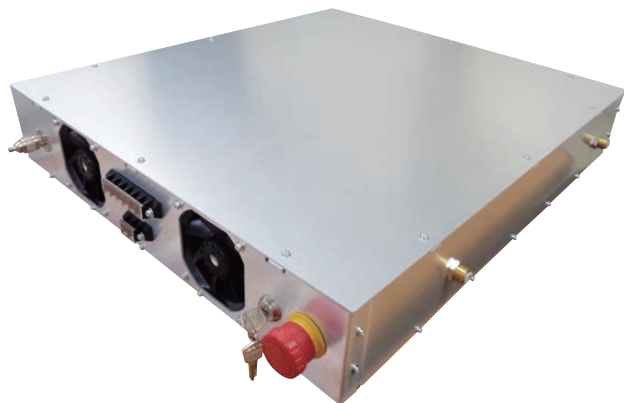


図3 開発したプロトタイプ光アンプの写真
Photo of prototype of the amplifier.

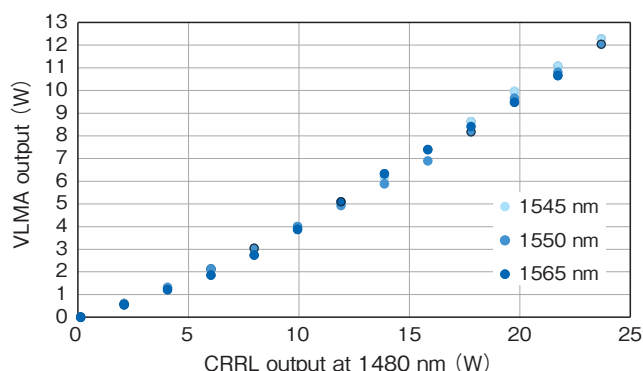


図4 ラマンレーザ出力に対するVLMA出力
VLMA Output depending on CRRL output.

図5に出力増幅された光スペクトルを示す。入力信号光はITLA (Integrable Tunable Laser Assembly) により波長を1545 nm, 1550 nm, 1565 nmに変化させ、プリアンプによって200 mW程度に増幅し入力した。1545 nm, 1550 nm, 1565 nmのそれぞれの光が本光ファイバアンプにより増幅され、増幅帯域幅が20 nmあることを確認した。信号光とASE光の比は40 dB以上となった。

光ファイバアンプから出力された光をコリメートレンズでコリメート光とし、30 cm離れた位置で観測した。図6に観測した出力光のビームプロファイルを示す。ビームプロファイルはほぼ円形、ガウシアンであることを確認した。

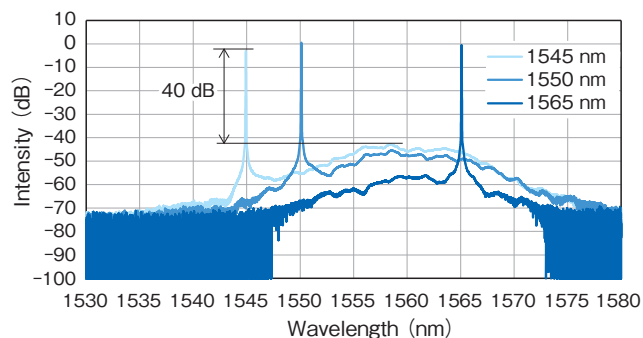


図5 出力スペクトル
Output spectrum.

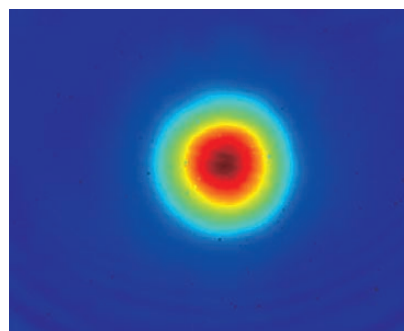


図6 観測したビームプロファイル
Observed beam profile.

4. パルス光の増幅

上記ではCW光の増幅を行うためのCRRL+VLMA一体型ファイバアンプの開発を報告した。一方、パルス光に対するCRRL+VLMAによる光ファイバアンプの開発も行われ報告されている²⁾。近年では、LiDARなどのセンシング分野において、スペクトル線幅が狭い数100 nsec～数10 μsecの時間幅のパルス光の増幅が必要となっている。そこで、OFS研究所では、図7に示す構成により時間幅1.24 μsecのパルス光の増幅を実証した³⁾。

パルスの繰返し周波数を150 Hz, 1 kHz, 5 kHzと変え、1480 nmの励起光に対する出力パルスのパルスエネルギーを測定した結果を図8に示す。いずれの繰返し周波数でも1 mJを超えるパルスエネルギーを実証することができた。特に1 kHzにおいては1.6 mJのパルスエネルギーを達成した。

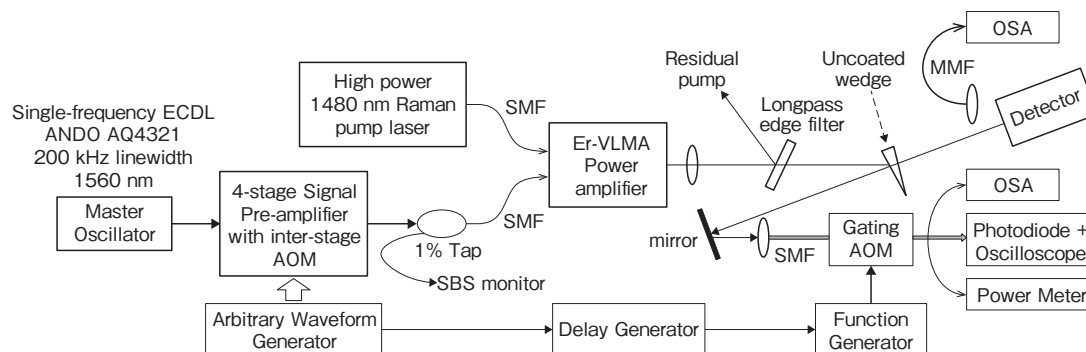


図7 VLMA ファイバMOPAと出力評価の実験系図
Schematic of experimental setup of VLMA fiber MOPA, including the output pulse diagnostics setup.

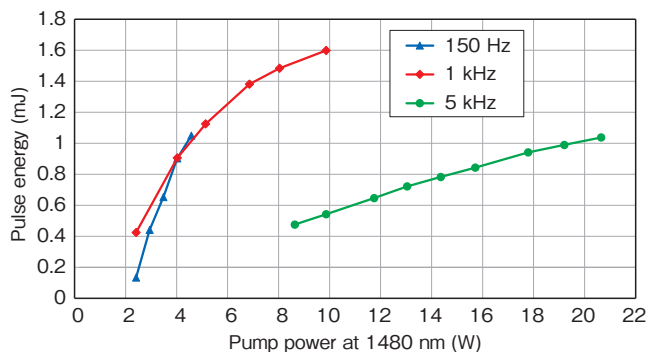


図8 150 Hz, 1 kHz, 5 kHz のパルス繰返しにおける 1560 nm パルスエネルギー
Power amplifier output pulse energy at 1560 nm for repetition rates of 150 Hz, 1 kHz and 5 kHz.

図9に繰返し周波数1 kHz, パルスエネルギー1.6 mJを出力した際の時間波形を示す。プリアンプでの出力は2.5 μsec であったが、最終出力時には1.48 μsec 程度まで短パルス化している。

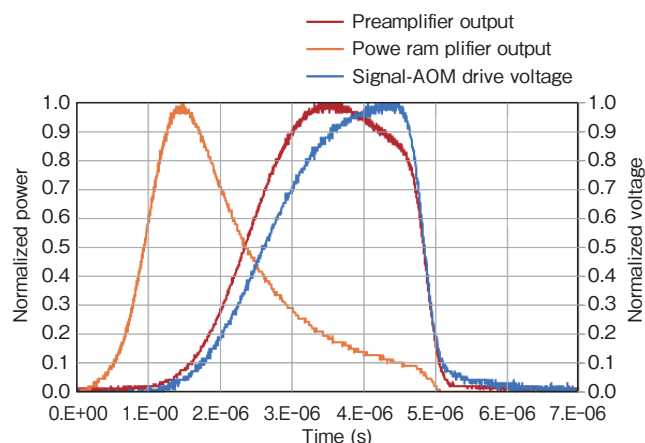


図9 1 kHz, 1.6 mJ 出力時のパルス波形
(i)AOM への入力信号波形, (ii) プリアンプの出力波形, (iii) 最終アンプの出力波形
Normalized pulse waveforms at (i) the input to the signal-AOM, (ii) the output of the preamplifier, and (iii) the output of the power amplifier. Recorded during 1.6 mJ operation at 1 kHz.

5. まとめと今後の展望

1480 nm のラマンレーザを励起光源とし、ファイバ内での非線形効果を抑制し高出力化するためにコア径が大きな VLMA-ErDF を一体化した光ファイバアンプを試作した。この光ファイバアンプは1545 nm～1565 nm にわたる広帯域で10 W 以上の出力を実現している。また、OFSでは1.6 mJ のエネルギー、パルス幅1.48 μsec のパルス出力が実証された。

今後は、CW およびパルスのいずれにおいても、遠距離伝搬を目的としたアプリケーションの拡大が見込まれる。ピュア SM 出力を維持しながら、さらなる高出力化が求められると予想される。すでに100 W を超える出力が報告されているが^{4), 5)}、入力される信号光の条件に応じて、誘導ブリリュアン散乱 (SBS: Stimulated Brillouin Scattering) のような非線形現象や ASE 光の影響が課題として挙げられる。これらの課題を解決するためのさらなる取り組みが必要である。

参考文献

- 1) V. R. Supradeepa, Jeffrey W. Nicholson, Clifford E. Headley, Man F. Yan, Bera Palsdottir, and Dan Jakobsen: "A high efficiency architecture for cascaded Raman fiber lasers", Optics Express Vol. 21, Issue 6, pp. 7148-7155 (2013).
- 2) R. Kawahara, H. Hashimoto, J. W. Nicholson, E. Otani, and S. Matsushita: "The Development of a High Quality and a High Peak Power Pulsed Fiber Laser With a Flexible Tunability of the Pulse Width", Furukawa Electric Review, No.49, (2018).
- 3) Venkatapuram S. Sudarshanam, Cang Jin, and Jeffrey W. Nicholson: "Single-frequency erbium-doped fiber amplifier with high energy gain at low repetition rates", Proc. SPIE 12865, Fiber Lasers XXI: Technology and Systems, 1286507 (12 March 2024).
- 4) J. W. Nicholson, R. Ahmad, A. DeSantolo, and Z. Várallyay: "High average power, 10GHz pulses from a very-large-mode-area, Er-doped fiber amplifier", Journal of the Optical Society of America B Vol. 34, Issue 3, pp. A1-A6 (2017).
- 5) J.W. Nicholson, A. Grimes, A. Hariharan, V. Sudarshanam, C. Jin, and I. Sun: "High Power EDFAs for Free Space Communication", Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2023 Technical Digest Series (Optica Publishing Group, 2023), paper Th3C.7.