高ビーム品質な励起光特性を利用した波長 2.1 μm 帯ホロニウム添加 ps-fs 短パルス加工光源

電気通信大学　レーザー新世代研究センター
准教授　戸倉川　正樹
（2023 年度 一般研究開発助成 AF-2023208-B2）

キーワード：短パルスレーザー加工光源，高出力アイセーフレーザー，2.1 μｍ帯 Ho レーザー

１．研究の背景

波長 0.8~1 μm 帯フェムト秒(fs)・ピコ秒(ps)超短パルスレーザー加工は、高ピーク光強度に起因する非線形吸収を利用することで、ガラスなどの透明材料内部の集光領域のみにエネルギーを付与でき、三次元内部加工を可能とする[1)]。また、熱が媒質内で拡散する前に加工を完了できるため、熱変質やクラックを抑制した高精度微細加工も可能である[2)]。このため近年では、半導体、医療、大容量記憶ディスク、精密機械分野を中心に応用が進んでいる[3,4)]。

上記波長を 1.1 μm~1.5 μm 帯へと長波長化することによって、Si に対する線形吸収が低下し、3 次元加工の一種であるステルスダイシングを用いた Si ウェハーの高スループット加工が盛んに進められている[5)]。さらに上記波長を 2 μm 帯付近まで長波長化することにより、ポリマー材料での線形吸収増加、Si での残存線形吸収の低下、Ge の線形吸収の低下、レーザー生成プラズマ中でのエネルギー吸収特性の変化など 0.8～1.5 μm 帯では得られない新たな特性が発生し[3)]、これらを利用したポリマー材料の加工、Si ウェハーの 3 次元加工の高品質化、Ge ウェハーの 3 次元加工、高効率な Laser Produced Plasma による EUV 光源の実現などの応用研究が見込まれる[5)]。

２．波長 2 μm 帯レーザー光源と本研究の目的[6)]

ツリウム(Tm)添加レーザーは波長 800 nm 帯の高出力かつ安価な半導体レーザー励起により波長 2μm 帯で動作可能である。この際交差緩和過程($^3H_4 + {}^3H_6 \rightarrow 2 \times {}^3F_4$)によって 2μm 帯レーザー発振の理論限界量子効率を 2 まで上昇させるとともに（図 1 左）、実効的な量子欠損を最小で 20%以下とすることが可能である。このためファイバーレーザーでは 100 W を超える高平均出力領域で 50%以上の高効率な波長 2 μm 帯レーザー動作が可能であり[4)]、固体レーザーでは 100 J 級の高エネルギー動作も報告されている。しかし前者のファイバーレーザーでは得られるパルスエネルギーが制限されやすく、後者の固体レーザーでは半導体レーザー励起に起因してビーム品質が制限されやすい。特に精密加工応用には、単なる高出力化だけでなく、高いビーム品質による優れた集光性と安定性が必要なケースが多い。

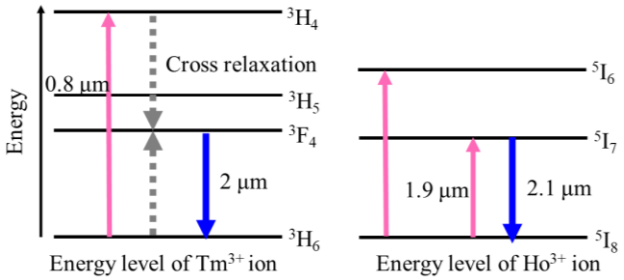


図 1　（左）Tm と（右）Ho のエネルギー準位模式図

ホロニウム(Ho)添加レーザーは、前述の高効率な波長 2 μm 帯 Tm レーザーを励起光源とし波長 2.1 μm 帯において動作可能であり（図 1 右）、このとき量子欠損は 10%以下となり、高効率・高出力な動作が可能となる[7)]。さらに励起光源に Tm ファイバーレーザーを用いると回折限界に近いビーム品質が利用可能であり、Tm や Yb のような半導体レーザー励起型レーザーにはできないレーザー共振器設計のもと高ビーム品質なレーザー動作も期待される。

本研究では高精度レーザー加工への応用を目指し、高ビーム品質で高出力な Tm ファイバー励起光源を開発し、それを励起光源に用いた波長 2.1 μm 帯ホロニウム添加 ps-fs 短パルスレーザー光源の開発を行った。

３．研究方法

本研究では Tm ファイバーレーザーの有する高ビーム品質な励起光特性を利用した波長 2.1 μm 帯ホロニウム添加 ps-fs 短パルス加工光源の開発とその高精度レーザー加工への応用を目指し、特に以下 3 つの課題に取り組んだ。

3.1　高出力な Tm ファイバーレーザー励起光源の開発

この研究では①単一偏光発振器と大口径ファイバーを用いた増幅器による多段構成と②大口径ファイバーを用いたランダム偏光発振器からの直接発生の 2 種を試行した（図 2）。前者は Fiber Bragg Grating(FBG)により波長制御された低出力の単一偏光種光源を用い、単一偏光かつ高平均出力動作を目的とし、後者はファイバー結合半導体レーザーに FBG と大口径 Tm ファイバーを融着するだけで構築可能であり、ランダム偏光であるがシンプルで安価な構成での高出力動作を目指した。

3.2　超短パルス Ho:YAG モード同期レーザーの開発

この研究では自作した波長可変 Tm ファイバーレーザーを励起光源とし新規 Ho 添加セラミックレーザーと Ho:YAG 単結晶レーザー、半導体可飽和吸収体を用いたモード同期レーザーの開発を行った。

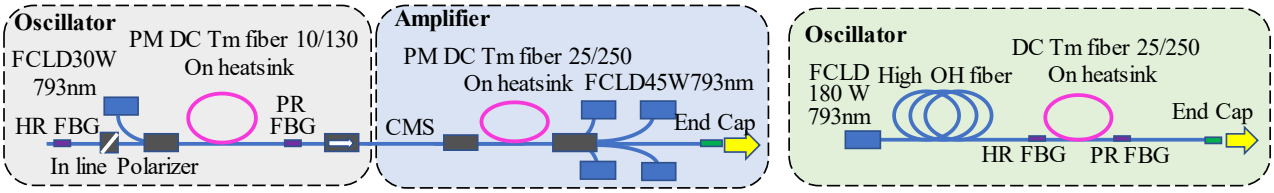


図 2　（上）発振器と増幅器による多段単一偏光構成、（左下）発振器からの直接発生によるランダム偏光構成、（右下）多段構成システムの出力特性

3.3　Ho 添加固体増幅器の開発

この研究では I. II. を励起光源、種光源とした高出力増幅システムの実現を目指し、その利得媒質として使用する Ho:YAG と Al_2O_3 を接合した distributed face cooling レーザーの開発を進めるとともに、ヒートシンクなどの開発を進めた。これらを用いて最終的には、従来の 1 μm 帯レーザーでは困難であった難加工材料や透明材料への低熱影響・高品質加工技術の実現を目指した。

4．実験装置の概要及び実験結果

4.1　高出力な Tm ファイバーレーザー励起光源の開発

①単一偏光発振器と大口径ファイバーを用いた増幅器による多段構成図 2（左）。発振器はインライン型偏光子、励起コンバイナー、波長 1907 nm 高反射 FBG、低反射 FBG、利得ダブルクラッド Tm ファイバー（10 μm コア/125μm クラッド、NA 0.15/0.45）にて構成され、全て偏波保持ファイバーにて構成されている。波長 1907 nm は後述の Ho 固体レーザー発振器、増幅器で使用する Ho:YAG の吸収ピークに一致させている。励起光源には最大出力 30 W のファイバー結合 LD を用い、この構成においてスロープ効率約 20%、最大出力 5 W の波長 1907 nm 出力が得られた。インライン偏光子を挿入する前はスロープ効率約 40%がえられていたため、インライン偏光子の挿入損失が大きいと思われるが、これは後述するコア系 25 μm Tm ファイバーを用いた増幅器の種光源として使用する場合には十分な出力となっている。

上記種光源インライン型のアイソレーターを介して大口径 PM Tm ファイバー（25 μm コア/250 μm クラッド, NA 0.09/0.46）と(1+6)励起 PM コンバイナーにて構成される増幅器にて出力特性を評価した。最大励起出力 180W にて最大力 95 W が得られた（図 3 上）。この最大出力は励起 LD の出力限界にて決まっており、現構成でも最大 270 W 励起まで調整可能であり、150 W 出力までの向上が見込まれている。今回の波長 1907 nm での動作は Tm の基底状態吸収が存在しより一般的な＞1940 nm 帯での動作に比べて高出力化が難しく、また同様に単一偏光出力動作も高出力化が難しいとされており、この波長帯で単一偏光の 100 W クラスの Tm ファイバーレーザーの市販品は存在しない。

また高出力 Tm ファイバーレーザーの開発においては利得ファイバーを水中に沈めて冷却する報告が多いが、その場合はシリカファイバーの Si と O の酸素結合が切れてしまい、ガラスが脆弱になってしまい長期的な安定動作に課題があった。本研究ではファイバーのヒートシンクを最適化することによって、水中に沈めることなく動作可能としている（図 3 下）。結果として市販の高出力 Tm ファイバーレーザーを凌駕しうるシステムの開発に成功し（波長帯、単一偏光）、またコスト的にも数分の 1 であり、研究室内で保守・改良可能な体制を整えることができた。現在はこのシステム全体の BOX 化も進めている。

②大口径ファイバーを用いたランダム偏光発振器。半導体レーザーの出力ファイバーに直接 HRFBG、High OH fiber、ダブルクラッド Tm ファイバー、LFFBG を融着する構成により、レーザー発振器を構築した。High OH ファイバーはレーザー発振光である 2000 nm 帯には強い吸収を有するが、励起光である 800 nm 帯においては吸収がほぼ無視できるため、半導体レーザーの破壊を防ぐ実効的な保護フィルターとして動作する。本構成の強みはその構成のシンプルさと低価格化である。この構成において最大約 70 W励起にて無偏光出力 32 Wが得られた。最大励起パワーは 180Wまで上げることが可能で、その場合は約 100 Wレベルの出力が期待される。本構成では FBGs、high OH ファイバー、利得ファイバーを融着させることのみで、変換効率約 50%にて 793 nm のマルチモード半導体レーザー出力を 1900 nm 帯の高ビーム品質なレーザー出力に変換できることを示している。実験当初は出力の不安定性が観測され、高出力化を妨げていたが、1907 nm 付近に存在する水分子の吸収が原因とわかり、高出力動作が可能となった。

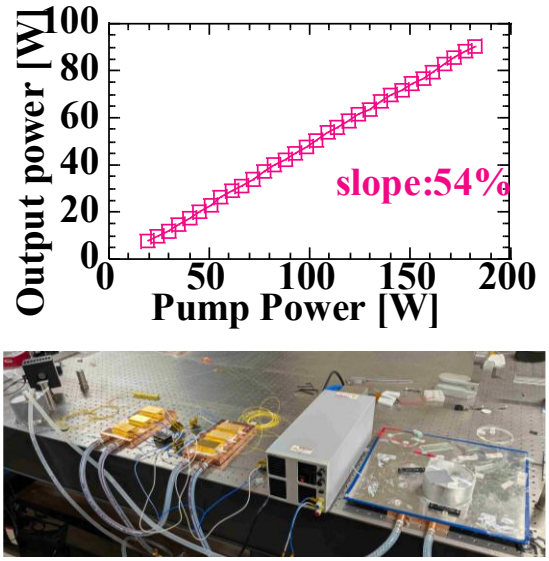


図 3　（上）開発した Tm ファイバーレーザーの出力特性と（下）外観写真

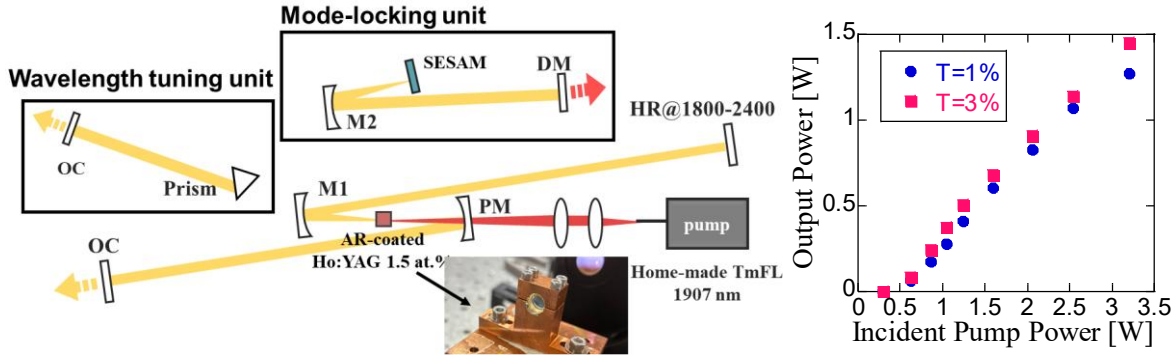


図 4　（左）Ho 添加固体モード同期レーザー実験図　　（右）連続発振実験出力特性

4.2　超短パルス Ho:YAG モード同期レーザーの開発

図 4 に示される共振器構成にて利得媒質は Ho:YAG 単結晶（添加濃度 1.5%、結晶長 6 mm、1900－2100 nm 無反射コート有）を用い、①連続発振実験、②モード同期（超短パルス）発振実験を行った。

①連続発振共振器は高反射ミラーHR、折り返しミラーM1、M2、取り出し鏡 OC（透過率 1% or 3%）の 4 枚のミラーで構成にて出力特性を評価した。このときの結果を表 1 に示す。両 OC に最大おいて約 50%程度のスロープ効率、T＝3%OC 時において最大出力 1.47 W が得られた（図 4 右）。

表 1.　連続発振特性の OC 依存性

OC 透過率 (%)	最大出力 (W)	スロープ効率(%)	中心波長 (nm)
1%	1.38	48.6	2129.5
3%	1.47	52.1	2121.7

②モード同期（超短パルス）発振実験においては図 4 に示される波長可変ユニットおよび半導体可飽和吸収体鏡 SESAM を共振器中に挿入した。また、この時構成するミラーは分散補償鏡となっており、共振器を負分散領域としている。この構成において T=1%、3%OC 両者に置いてモード同期発振が得られた。T-1%OC を利用した時の結果を表 2 に示す。2090～2130 nm の範囲において離散的ではあるが中心波長可変性を有するモード同期発振が得られた。中心波長を 2097 nm としたとき最大スペクトル幅 2.1nm が得られた（図 5 上）。これは sech2 型のフーリエ限界パルス幅を仮定すると約 2.2 ps に相当する。しかしこの時スペクトルは二つのピークを有しており、sech 型パルスからは乖離している。

表 2　T=1%　OC を用いた時のモード同期レーザー特性

中心波長(nm)	2090	2097	2122	2130
波長幅(nm)	1.4	**2.1**	0.9	0.7
スロープ効率(%)	11	17	15	13
最大出力(W)	0.25	0.337	0.285	0.259

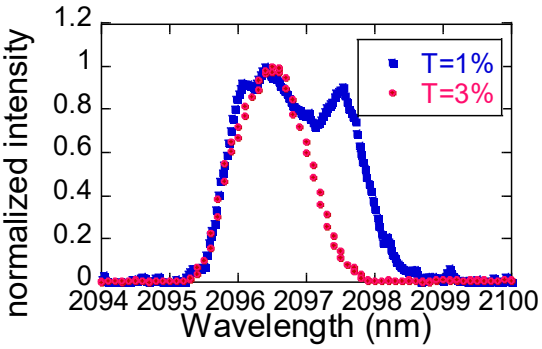


図 5　モード同期発振時スペクトル

次に T=3%の OC を利用したときの結果を示す。最大吸収励起パワー約 3.5 出力時に 1 W 出力を得ることができた（図 6）。モード同期発振開始後からスロープ効率が 2 倍以上に上昇している。この時のスペクトル幅は 1.3 nm となり（図 5）、T＝1%使用時に比べて狭帯域化しているがガウス型に近い形状をしており、ガウス型のフーリエ限界パルス幅を仮定すると 5 ps となる。これは後述の増幅器にて ps パルス増幅をする際の種光源として使用することを現在進めている。またこのほか、新規の Ho 添加結晶を利用したより短パルス性に優れたモード同期発振器の開発にも取り組み、連続発振実験に成功している。

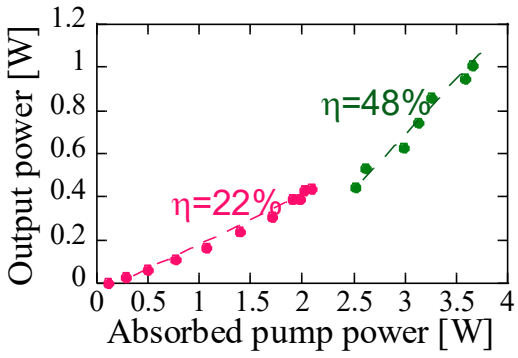


図 6　T=3%OC 使用時のモード同期発振時出力特性

4.3　Ho 添加固体増幅器の開発

加工光源としての応用を考えると、少なくとも数十 W 以上の平均出力が必要となるため、前述の発振器出力を種光源とした増幅器の開発を進めた。出力数十 W 以上では利得媒質中での熱負荷がレーザー動作に大きな影響を与えるために、まず高熱負荷条件でも高効率に動作が可能となりうる利得媒質の種類と形状の探索を進めた。

①Ho:YAG セラミックレーザー媒質

レーザーグレードのセラミック媒質は多結晶体でありながら、nm 未満の薄い粒界と ppm レベルの不純物の濃度によって単結晶と同等な透過特性を示し、かつ非破壊特性が向上しうることが知られている [8]。本研究ではまず市販の Ho:YAG 単結晶と神島化学工業にて新規に試作された Ho:YAG セラミックレーザーの連続発振時の出力特性の比較を行った。使用した利得媒質は Ho:YAG セラミック、結晶長: 5 mm、添加濃度 3 at.%（図 7 左）と Ho:YAG 単結晶 結晶長: 6 mm、添加濃度 1.5 at.%であり、実験装置構成は図 8 のとおりである。利得媒質に無反射コートはないため、ブリュースターアングルにて共振器中に設置し、自作の波長 1907 nm Tm ファイバーレーザーにて励起を行った。このとき得られた出力特性を図 9 に示す。セラミックにおいては透過率 40%OC 使用時に最大出力 0.67 W、スロープ効率 38%が得られ、単結晶においては透過率 30% OC 使用時に、最大出力 0.73 W スロープ効率 46%が得られた。市販単結晶の方が試作セラミックよりもわずかに高い効率が得られているが、試作セラミックの方は簡易的な

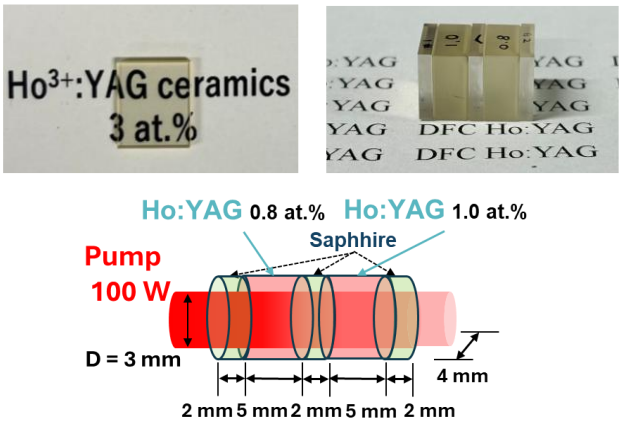


図 7　Ho:YAG セラミックと Ho:YAG - Al2o3 接合結晶

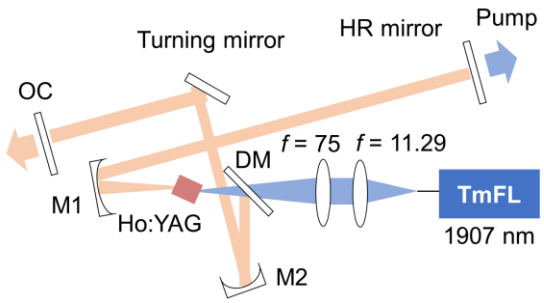


図 8　Ho:YAG セラミックと Ho:YAG 単結晶比較実験図

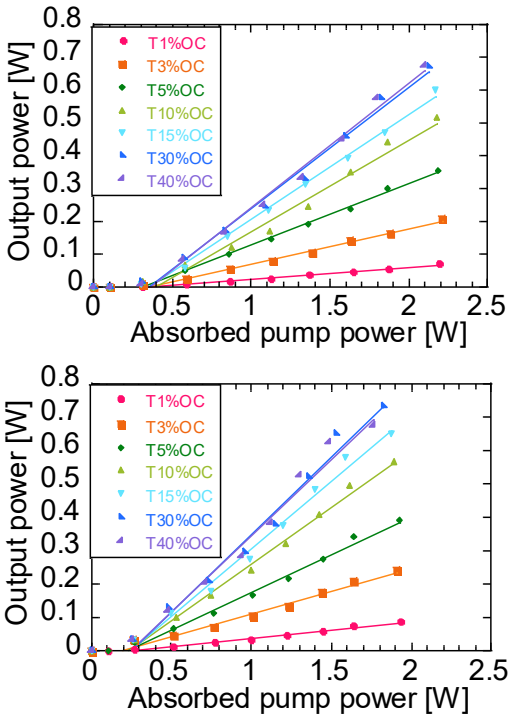


図 9　（上）Ho:YAG セラミックレーザー出力特性
（下）Ho:YAG 単結晶出力特性

研磨のみで実験を行ったため、表面状態に差がある可能性が存在する。また今回も用いた試料では Ho 添加濃度もセラミックの方が高いため、濃度消光などの影響が出やすくなっているが、実験中より濃度の低い Ho:YAG 単結晶の方にてより強い energy transfer up conversion(ETU)によると思われる赤色発光が確認された。これはセラミックの方がクラスタリングが起こり難く ETU を抑制している可能性が存在する。

②Ho:YAG:Al_2O_3 Distributed Face Cooling(DFC)結晶

DFC 結晶とは理化学研究所の平等らにより考案された、熱伝導率の高い Al_2O_3 などを利得媒質に接合することによって実効的な熱伝導率を向上させたレーザー手法である [9,10]。本研究では将来的な 100 W 以上の高出力化を目指し、Ho:YAG 単結晶と Al_2O_3 サファイア基盤を接合した DFC 結晶を作成した（図 7 右、下）。3 層の Al_2O_3 と 2 層の濃度を変えた Ho:YAG から構成され、無反射コートを有している。これを用いて図 10 に示す構成にて連続発振動作を行った。得られた出力特性を図 11 に示す。

OC 透過率 1%から 15%までほぼ変わらないスロープ効率が得られており、これはレーザー媒質の有する損失が十

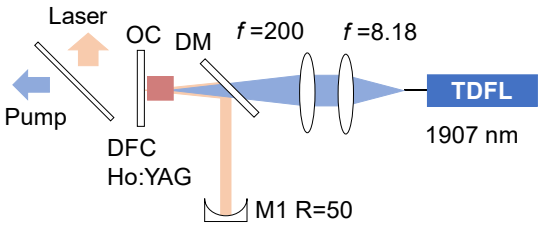


図 10　DFC レーザー実験系概略図

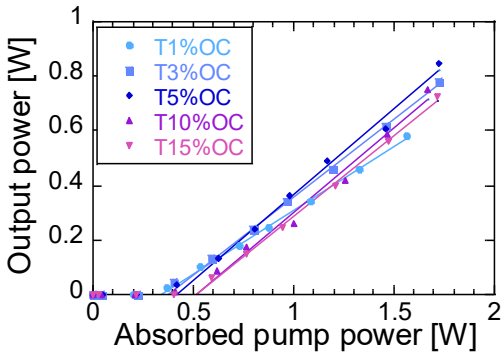


図 11　DFC レーザー実験系概略図

分に低いことを示している。透過率 5% OC を利用したときに最大出力 0.85 W スロープ効率 62.7%を得ることができた。これは波長 2 μm 帯で初めての DFC レーザー動作であり、非常に低い内部損失を示唆しており、実際に各 OC での発振閾値から損失を評価すると 0.84%となっている。これは Ho の再吸収損失の影響も含まれてしまっており、実際にレーザー動作に害する損失はより小さいと推測される。またこのほかに口径 1 mm 長さ 20 mm 程度の微小径 Ho:YAG ロッドと冷却方式を変えたヒートシンク 2 種を用意して、100 W 級の励起光源を用いた増幅器の開発を現在進めている。

５．結論

本研究では、高精度レーザー加工への応用を目的として、高ビーム品質な励起光特性を利用した波長 2.1 μm 帯ホロニウム添加 ps-fs 短パルス光源の開発を行った。まず、高ビーム品質 Tm ファイバーレーザー励起光源の開発において、初年度はファイバーが燃えてしまうことが多発したが、波長 1907 nm、単一偏光動作において最大 95 W 出力を達成し、水冷浸漬を用いない安定動作を実現した。また、簡易かつ低コストなランダム偏光構成においても、波長 2 μm 帯で高効率な高ビーム品質出力が得られた。さらに、Ho:YAG を用いた波長 2.1 μm 帯モード同期レーザーの開発を行い、中心波長 2097 nm において最大スペクトル幅 2.1 nm を有するモード同期発振を実現した。また、T=3%出力鏡を用いた構成では最大 1 W 出力のモード同期動作を達成した。加えて、Ho 添加固体増幅器の開発においては、波長 2 μm 帯で初となる Ho:YAG セラミックおよび Ho:YAG-Al2O3 DFC 結晶を用いたレーザー動作を実現するとともに、最大スロープ効率 62.7%、内部損失 0.84%という低損失動作を確認し、高出力化に向けた有効性を示した。以上のことから、本研究により、高ビーム品質 Tm ファイバー励起を利用した波長 2.1 μm 帯 Ho 添加短パルス加工光源の基盤技術を構築するとともに、将来的な高平均出力・高品質レーザー加工光源への展開可能性を示すことができた。また本文には記載しなかったが、ns パルス幅の平均出力 30 W レベルの Tm ファイバーレーザーシステムの開発も派生的に行い、ポリマー材料の溶着実験や Ge ウェハーのステルス加工を行っており、本研究がさらに進展し ps－fs パルス幅の高出力レーザーが完成すれば、上記加工実験を速やかに行える準備も進めている。

謝　辞

本研究の DFC 接合結晶の開発においては、理化学研究所の平等拓範教授らに多大なるご協力を受けたことをここに感謝します。また Ho:YAG セラミックは神島化学工業高橋功太郎様、村松克洋様よりご提供いただきましたことここに感謝いたします。また本研究の一部は科研費、Q-LEAP「CPS 型レーザー加工」、JST さきがけ研究「光融合」からもご支援をいただいたことをここに感謝いたします。

参考文献

1) R. R. Gattass and E. Mazur, “Femtosecond laser micromachining in transparent materials,” Nature Photonics 2, 219–225 (2008).
2) B. C. Stuart, M. D. Feit, A. M. Rubenchik, B. W. Shore, and M. D. Perry, “Laser-induced damage in dielectrics with nanosecond to subpicosecond pulses,” Physical Review Letters 74, 2248–2251 (1995).
3) K. Itoh, W. Watanabe, S. Nolte, and C. B. Schaffer, “Ultrafast processes for bulk modification of transparent materials,” MRS Bulletin 31, 620–625 (2006).
4) K. C. Phillips, H. H. Gandhi, E. Mazur, and S. K. Sundaram, “Ultrafast laser processing of materials: a review,” Advances in Optics and Photonics 7, 684–712 (2015).
5) 浜松ホトニクス株式会社, “Stealth Dicing™ technology,” Technical information, Hamamatsu Photonics K.K., accessed May 28, 2026.
6) M. Eichhorn, “Quasi-three-level solid-state lasers in the near and mid infrared based on trivalent rare earth ions,” Applied Physics B 93, 269–316 (2008).
7) J. Kwiatkowski et al., “Continuous-wave and high repetition rate Q-switched operation of Ho:YLF laser in-band pumped by a linearly polarized Tm:fiber laser,” Optics & Laser Technology 68, 1–6 (2015).
8) A. A. Kaminskii et al., “Laser ceramics and their properties,” Crystallography Reports 48, 515–523 (2003).
9) Y. Sato, A. Kausas, and T. Taira, “Composite thin-disk laser ceramics and distributed face cooling concept,” IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 13, 838–843 (2007).
10) L. Zheng, A. Kausas, and T. Taira,“Drastic thermal effects reduction through distributed face cooling in a high power giant-pulse tiny laser,” Optical Materials Express 7, 3214–3221 (2017).