

加工用レーザー光源の現状と動向

鷲尾 邦彦

State of the Art Laser Sources for Materials Processing and Their Trends

Kunihiko WASHIO

Laser materials processing is now being widely utilized not only for thermally-induced machining or welding processes, but also for relatively novel processing such as photochemical exposure, surface modification, laser annealing, etc. In this review article, market trends and operating features of representative lasers for materials processing, such as CO₂ lasers, excimer lasers, solid state lasers, and high-power semiconductor lasers are explained. Currently, CO₂ lasers have the largest share in market in terms of both revenues and units. However, since the recent progress in diode-pumped solid state lasers is significant and worthy for detailed explanation, this article describes solid-state lasers in more detail, including disk lasers and fiber lasers as well as conventional rod lasers.

Key words: laser sources, materials processing, CO₂ lasers, excimer lasers, solid-state lasers, disk lasers, fiber lasers, diode lasers

レーザー光は、コヒーレンス性にすぐれており、レーザー光固有の高指向性、高集光性、高エネルギー密度性、単色性、短パルス発生等の波形の高制御性などを利用して、物質にさまざまな物理的ないし化学的な変化を誘起することができる。レーザー加工は、レーザーの発明の当初からその有力な応用のひとつとして考えられており、1960年にルビーレーザーが出現してまもなくの1963年には、Qスイッチルビーレーザーを用いてナノ秒領域における物質の高速な蒸発過程など、レーザー加工に関する基礎的な研究報告がなされている¹⁾。

しかしながら、ルビーレーザーは、連続発振や高速繰り返しパルス発振などが困難であったため、レーザーの工業への応用は、当初、線引き用ダイヤモンドへの穴あけ加工など、限られたものしかなかった。1960年代の後半になると、連続発振可能な四準位系のNd:YAGレーザーやCO₂レーザーの高性能化が進展し、1968年には高速繰り返しQスイッチ発振Nd:YAGレーザーを用いた薄膜抵抗のトリミング²⁾が開始されるなど、レーザーの工業への

応用研究が活発化した³⁾。CO₂レーザーやNd:YAGレーザーによる熱加工を中心としたレーザー加工は、1970年代には加工機産業の創業期に入り、1980年代には成長期を迎えた⁴⁾。

紫外域で高出力が得られるエキシマーレーザーは、1976年には簡便な放電励起によるレーザー発振が実現し、1977年には市販品が得られるようになった⁵⁾。これに伴い、短波長レーザーからの高い光子エネルギーによる光化学的なプロセスを利用した研究開発が1980年代ごろから活発化した⁶⁾。高分解能な露光が得られるエキシマーレーザーリソグラフィは、1990年代の後半から半導体集積回路の量産用として導入されている。また、Ti:サファイアレーザーなどから得られる高ピーク強度の超短パルスレーザーを用いた、非熱的な過程を加味した新しいプロセス応用の研究開発が1990年代後半から活発化している⁷⁾。

レーザー加工は、レーザー熱加工から始まり、次にレーザープロセッシング、さらにはレーザープロセスへとその応用範囲を拡大し、発展してきた⁸⁾。学会レベルでは、材

(有)パラダイムレーザーリサーチ (〒195-0072 町田市金井7-7-35) E-mail: k-washio@paradigm-laser-research.jp

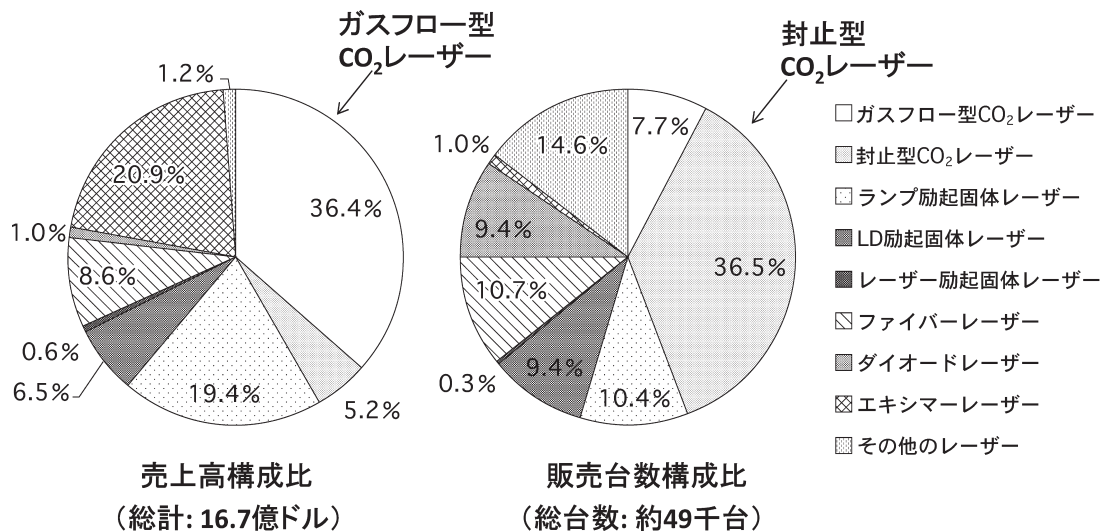


図1 世界の加工用市販レーザーの機種別シェア。

料・部品の形状，構造，姿を用途に適した形態に変える加工をレーザー加工とよび，これに加えて材料・部品やデバイスの性質，特性を変える加工や新材料・新デバイスの創出までを含むプロセスをレーザープロセッシングとよんで区別しているようであり，最近ではレーザープロセッシングをタイトルに含んだ解説書も種々出版されている^{9,10)}。ここではタイトルに加工用レーザー光源という用語を用いているが，以下では熱加工用には限定せず，より広義のレーザープロセッシング用のレーザー光源について，市場の動向ならびにレーザー発振の原理や動作特性の概要などを解説する。

1. 加工用レーザーおよびレーザー応用生産装置の市場動向

米 Laser Focus World 誌の調査によれば，世界の加工用市販レーザーの2006年における売上高は約16.7億ドル，販売台数は約49,000台であった。加工用市販レーザーの機種別の販売高構成比および販売台数構成比を図1に示す。現在，販売高および販売台数ともに，CO₂レーザーのシェアが最大である。ガスフロー型のCO₂レーザーは，平均出力20kW級までが市販されており，平均出力2kW～6kW級の比較的高価な高出力レーザーが金属の切断加工用などとして多用されているため，台数比に比べて売上高比がかなり大きくなっている。このところ，ファイバーレーザーの市場伸張率はきわめて高く，売上高比および販売台数比で，すでに全加工用レーザーの約10%前後に達しているのが大いに注目される。

また，金属加工，半導体・電子部品加工，マーキング，その他の加工に分けて，2006年における世界の加工用市

販レーザーの売上高および販売台数に関する用途別シェアを図2に示す。図からわかるように，売上高比では金属加工用のシェアが約58%と最大であり，また販売台数比ではマーキング用が約33%と最大である。

図3には，(財)光産業技術振興協会による光産業の国内生産額の調査結果¹¹⁾をもとにして作成したレーザー応用生産装置の国内生産額の年次推移を示す。

2. 各種の加工用レーザー

2.1 CO₂ (炭酸ガス) レーザー

2.1.1 CO₂ レーザーの動作原理

図4に，CO₂レーザーのエネルギー準位を示す。CO₂レーザーは，炭酸ガス(CO₂)，窒素(N₂)，ヘリウム(He)の3種類の混合ガス中でのグロー放電により励起される。寿命の長いN₂分子のν=1準位は，CO₂の(00¹)準位とのエネルギー差が少なく，近接しているので，効率のよいエネルギー移乗によりCO₂を(00¹)準位へ励起する。CO₂レーザーの発振は，(00¹)準位から(10⁰)準位への遷移(10.4μm帯)および(00¹)準位から(02⁰)準位への遷移(9.4μm帯)などとして得られる¹²⁾。CO₂レーザーにおけるレーザー遷移の下準位に緩和した分子は，さらに(01⁰)準位を経て基底状態に緩和するが，(01⁰)準位は低いエネルギー状態にあるので，ガス温度が550K程度まで上昇すると，基底状態のCO₂が容易に(01⁰)準位にまで熱励起されるため，レーザー遷移の下準位の緩和が妨げられ，発振効率が低下する¹²⁾。このため，CO₂レーザーにおいては，ガスの冷却が高出力・高効率動作にとって重要である。

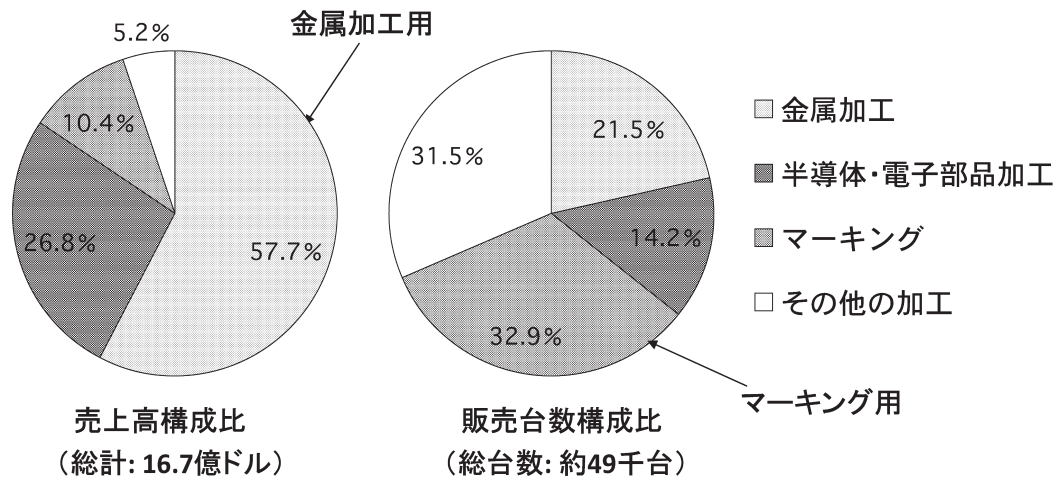


図2 世界の加工用市販レーザー発振器の用途別シェア。

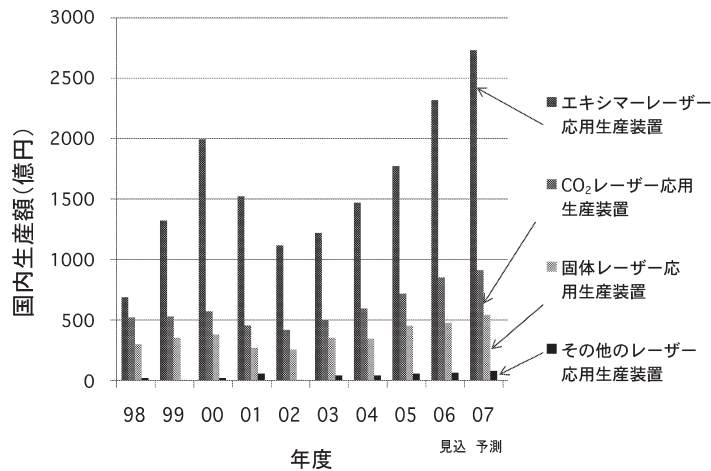


図3 レーザー応用生産装置の国内生産額の年次推移。

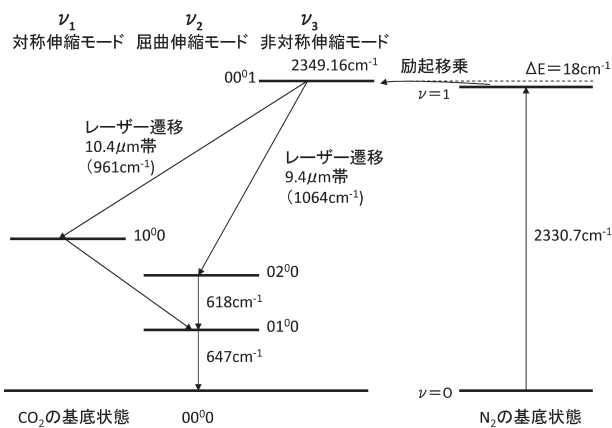


図4 CO₂レーザーのエネルギー準位。

2.1.2 CO₂レーザーの具体的な構成例と代表的な動作特性

CO₂レーザーは、連続発振(CW発振)を基本として高繰り返しパルス発振が可能な比較的低ガス圧のCWレ

ーザーと、低速繰り返しで短パルス高ピーク出力のパルス発振TEAレーザー(transversely excited atmospheric pressure laser)とに分けられる⁸⁾。いずれも放電励起によりレーザー発振が得られる。放電励起CO₂レーザーは、光軸を基準として、放電、ガス流などの組み合わせ構成の違いにより、さまざまなタイプが知られている⁸⁾。

励起用の放電形態には、直流のグロー放電、あるいは交流の無声放電(SD: silent discharge)やRF(radio frequency)放電が用いられる。アーク放電はエネルギーが高すぎて、CO₂レーザーの励起には適さない。

なお、同軸型導波構造やスラブ型(平行平板型)導波構造の採用により、壁面へのガス拡散を利用してガス温度の冷却効果を積極的に高めることができ、単位体積あたりの励起入力密度を従来的高速ガスフローレーザーなどと比べて格段に大きくすることができる^{12,13)}。図5に、スラブ型CO₂レーザーの原理的構成図を示す¹²⁾。近年、この種のス

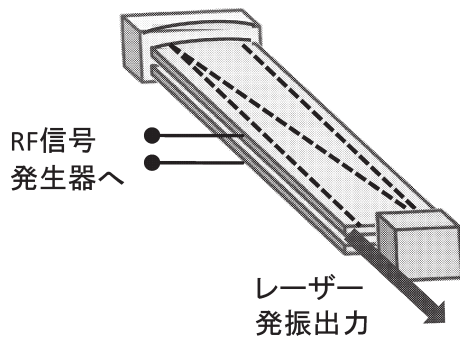


図5 スラブ型（平行平板型）CO₂レーザーの原理的構成図。

スラブ型CO₂レーザーの高出力化の進展が目覚ましい。高出力動作時には、間欠的にガスを交換する必要があるため、完全な封止型ではなく、セミ封止型として動作させることになるが、2006年には、平均出力8kW機までが市販されるようになった。

高出力が得られる高速ガスフロー型CO₂レーザーや高出力なスラブ型CO₂レーザーは、金属の切断、穴あけ、溶接、表面改質などに量産されており、産業用レーザーの主力機として位置づけられる。比較的low出力の封止型CO₂レーザーは、マーキングや回路基板の穴あけ、ガラスの切断加工などに多用されている。

ガス圧を1気圧以上にして動作させるTEA CO₂レーザーは、立ち上がりの速い放電励起により、パルス幅100~150 ns、ピーク出力1~2 MW程度の高ピーク出力を得ることができる。ただし、あまり高速な繰り返し発振は困難であるため、レーザー発振の平均出力は最大300 W程度である⁸⁾。

2.2 エクシマーレーザー

2.2.1 エクシマーレーザーの動作原理

エクシマー (excimer) とは、励起状態でのみ強い結合を示す寿命の短い分子である。2つの原子のうちの1つが希ガスのような安定な原子の場合、基底状態では互いに結合しないが、一方が励起されると強く結合して分子化する。この状態の分子をエクシマーとよび、このエクシマーがもとの2原子に解離するときの発光をエクシマー遷移とよぶ。希ガスとハライドのエクシマーは、エクシマー遷移の波長が紫外に分布しており、紫外域で高出力なレーザー発振が得られる特徴がある¹⁴⁾。代表的な希ガスハライドエクシマーレーザーには、ArFレーザー（発振波長193 nm）、KrFレーザー（発振波長248 nm）、XeClレーザー（308 nm）などがある。

希ガスハライドの代表として、KrFのエネルギー準位の概略を図6に示す¹⁴⁾。KrFエクシマーは、KrイオンとFイオンとの結合状態であるが、準位がクロスするため、

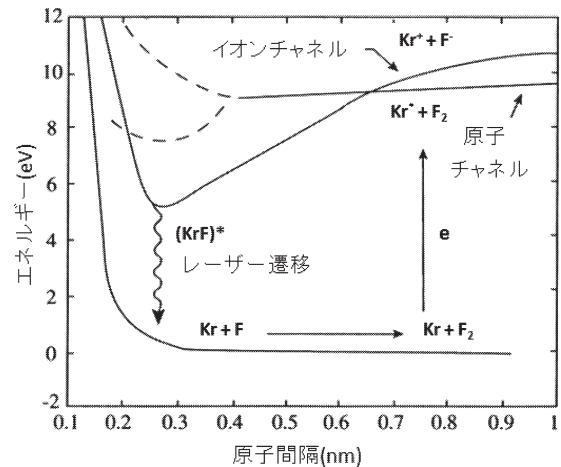


図6 KrFのエネルギー準位の概略。

Krの励起状態からも効率よく生成する¹⁴⁾。図からわかるように、約10 eVの励起に対して、約5 eV (248 nm)の光子が得られるので、比較的効率がよい。

KrFは、レーザー遷移の下準位が解離準位であるため、蛍光波長幅が広い。XeFやXeClでは、下準位もゆるい結合をもち、いくつかの振動準位があるため、蛍光波長帯が複数に分かれる。

2.2.2 エクシマーレーザーの具体的構成例と代表的な動作特性

実用化されているエクシマーレーザーは、光軸、放電方向、およびガス流の向きが互いに直交した3軸直交型の構成である。ガス圧は3~4気圧程度とかなり高いので、大面積を均一に放電させるために予備電離が必要である。予備電離方式には、UV（紫外線）予備電離、コロナ放電予備電離、X線予備電離など種々の方式がある。図7に、UV予備電離方式エクシマーレーザー装置の断面構成の模式図を示す。

パルスエネルギーの大きな大出力レーザー用にはもっぱらX線予備電離方式などが用いられ、XeClレーザー（波長308 nm）では、13 J-80 Hzや10 J-100 Hz動作により1 kW出力が得られており、繰り返し0.16 Hzでは60 J出力も得られている¹⁵⁾。X線予備電離方式は繰り返しの高速化が課題であったが、XeClレーザーでは1 kHzまでの繰り返し動作は実現しており、実験では1 J出力-1 kHz動作により平均出力1 kHzが得られている¹⁶⁾。

現在、産業用として普及している高出力エクシマーレーザーの用途には、低温ポリシリコンのアニーリングがある。その目的には、平均出力200 W~300 W級のXeClレーザーなどが多用されている。2007年の初頭には、繰り返し周波数600 Hzで動作する平均出力560 W級の高出

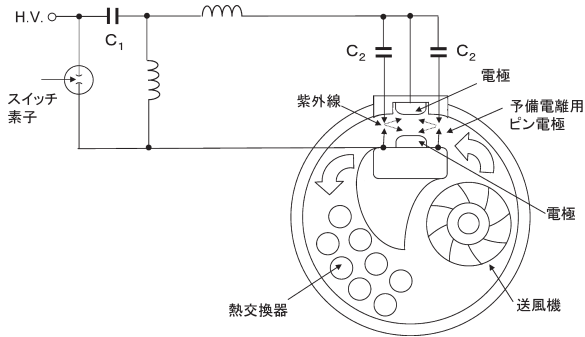


図7 UV (紫外線) 予備電離方式エキシマーレーザー装置の断面構成の模式図。

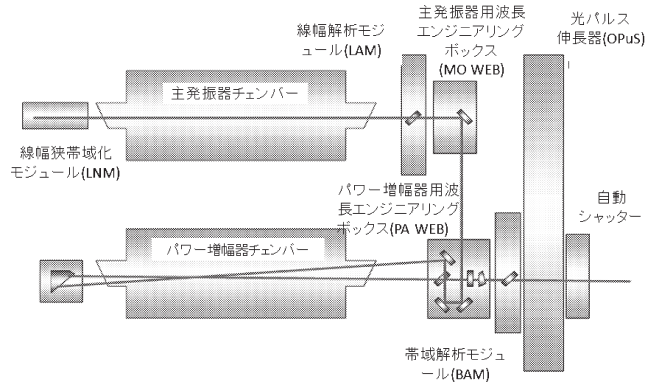


図8 再循環リング増幅器を搭載した露光用エキシマーレーザー¹⁹⁾。

力・高安定度な産業用エキシマーレーザーが市販されるに至った¹⁷⁾。

現在、エキシマーレーザーの産業用途として最も出荷高の大きな応用は、リソグラフィ用の光源である。リソグラフィ用レーザーとしては、当初は KrF レーザー (248 nm) が実用化されたが、半導体デバイスの微細化・高集積化の進展とともに、より短波長の ArF レーザー (193 nm) が実用化された。リソグラフィ用光源としては、露光用光学系による色収差を回避する目的で、きわめて狭帯域な発振スペクトルが求められ、また露光量の安定化のために、高出力安定度ならびに高速なパルス繰り返し速度などが求められる。線幅 65 nm 以下 45 nm 程度までの超微細な液浸リソグラフィの実用化に向けて、発振線幅 0.35 pm (E95%)、平均出力 60 W といった、狭帯域かつ高出力な ArF レーザーの開発が進展している¹⁸⁾。米 Cymer 社は、このような狭帯域・高出力レーザーを、発振用レーザーとパワー増幅用レーザーとのカスケード接続による MOPA (master-oscillator power-amplifier) 構成により実現している。同社は、増幅器として従来の折り返し型増幅に換えて、図 8 に示したごとく、再循環リング増幅器を搭載することにより、主発振器用の光学部品などの長寿命化や、増幅後のパルス出力の高安定度化を図っている。本方式によれば、従来方式に比べて主発振器に必要なパルスエネルギーは約 1 桁小さな 0.1 mJ 程度にまで低減でき、また光パルスはリング増幅器内で再循環されるので、パルスの安定後が約 1.5 倍程度改善される¹⁹⁾。

なお、増幅器を用いた MOPA 方式のほかに、より高安定動作が得られる注入同期方式による狭帯域・高出力レーザーの開発も進められている²⁰⁾。2006 年には、注入同期方式で 6 kHz/60 W/0.5 pm (E95%) 仕様の液浸露光用 ArF レーザーが、国産品としてギガフォトン社から市販された²¹⁾。

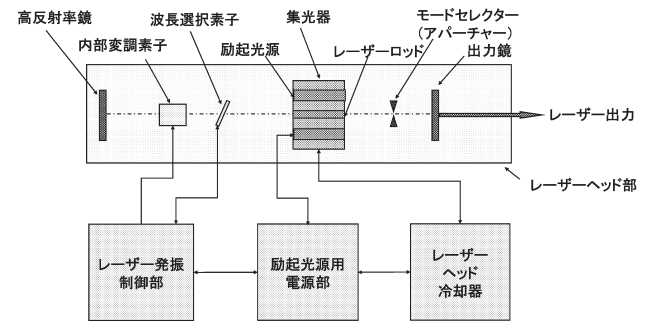


図9 固体レーザーの基本的構成。

2.3 固体レーザー

2.3.1 固体レーザーの動作原理

固体レーザーは、光によって励起される²²⁾。光励起用光源としては、ランプや高出力半導体レーザーなどが用いられる^{23,24)}。図 9 に、固体レーザーの基本的構成を示す²³⁾。レーザー媒質の形状としては、ロッドのほかに、スラブ、ディスク、ファイバーなどが用いられる。固体レーザーは、CW 発振、ノーマルパルス発振、Q スイッチ発振、モード同期発振など、時間的に多彩な発振制御ができ、発振パルス幅やピーク強度を広範囲に変化できる²²⁻²⁵⁾。

図 10 に、固体レーザー媒質の中で代表的なレーザー結晶である Nd:YAG のエネルギー準位の模式図を示す^{22,24)}。Nd:YAG レーザーのおもなレーザー遷移波長は 1.064 μm である。Nd 系固体レーザーのレーザー媒質には、高平均出力用などでは Nd:YAG が最も多用されている。しかし、用途によっては Nd:YVO₄ や Nd:YLF などよく用いられている。Nd:YVO₄ は、Nd:YAG に比べて誘導増幅断面積が大きく、かつレーザー発振始準位の蛍光寿命が短いので、Q スイッチパルス発振の高速繰り返し動作などに適している。他方、Nd:YLF は、Nd:YAG に比べて熱伝導度が低く、高速繰り返しのパルス発振には

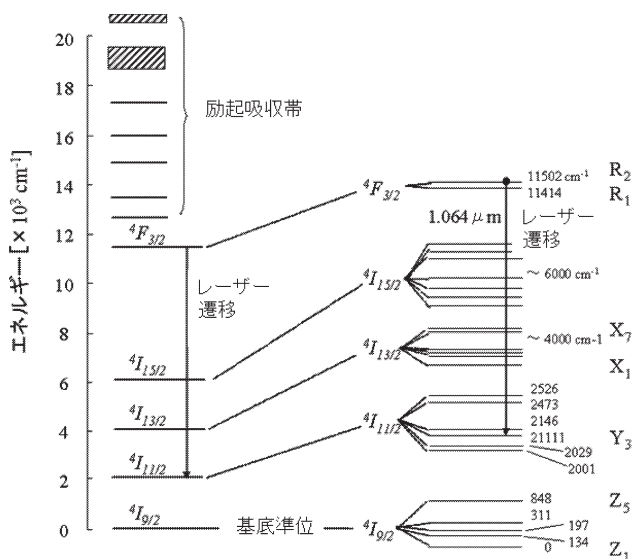


図10 Nd:YAGのエネルギー準位の模式図。

適さないが、蛍光寿命が長いので、低速の繰り返しならばパルスエネルギーのかなり大きなレーザー出力が得られる。

従来のランプ励起ではこれまで高出力の発振動作が困難であったYb系の固体レーザーは、1991年に米マサチューセッツ工科大学(MIT)のFanら²⁶⁾によって、Yb³⁺イオンの²F_{5/2}→²F_{7/2}遷移(波長1.03 μm)が半導体レーザー励起によって室温発振可能なことを示されて以来、励起用半導体レーザーの高出力化と高輝度化の進展に伴って発達し、次世代の固体レーザーとして大いに注目されるようになった^{27,28)}。現在では、Nd:YAGを凌ぐ高効率、高出力レーザーが実現している。

Yb:YAGには、Nd:YAGに対して、次のようないくつかのメリットがある^{26,29)}。

- ① Yb:YAGは、励起波長の光子エネルギーとレーザー波長の光子エネルギーとのエネルギー差が小さく、発熱損失が少ない³⁰⁾。
- ② 吸収波長帯域幅がNd:YAGに比べて数倍広く、また蛍光寿命も約1 msと4倍ほど長いので、励起光源への負担が緩和できる。
- ③ エネルギー準位の構造が単純で、レーザー発振始準位からさらに上の準位への吸収(ESA: excited state absorption)やクロス緩和が生じないため、強励起しても励起に無駄がなく、効率が劣化しない。
- ④ 濃度消光が生じにくく、Yb³⁺イオンを高濃度に添加できるため、薄板ディスク構造のアクティブミラー構成を採用すれば、熱レンズ効果や熱誘起複屈折を緩和できる。

⑤ レーザー発振帯域が広いので、サブピコ秒レーザー、フェムト秒レーザーなどの超短パルスレーザー用としても適している。

フランスでは、Ybを添加した種々の結晶について、レーザー媒質としての特性が、モデル計算によりYb:YAGと比較されている³¹⁾。これによれば、YAGは必ずしもベストな母体結晶とはいえ、発振効率やスロープ効率などからは、KYW (KY(WO₄)₂)やKGdW (KGd(WO₄)₂)などのほうが好ましい値をとることが示された。

なお、微小なナノ多結晶からなる高透明なセラミックYAGなど、透明セラミックス技術の進展により、従来の光学結晶では育成困難な大型のレーザー材料が比較的容易に得られるようになった³²⁾。セラミックNd:YAGの破壊靱性はアンドープYAG結晶の2.8倍程度も大きな値となっており、高出力レーザー材料として望ましい特性を兼ね備えている³³⁾。米LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory)では、10 cm×10 cm×2 cmのセラミックNd:YAGスラブを5枚用い、これらを出力の半導体レーザーアレイによりパルス励起し、発振繰り返し周波数200 Hzで、パルスエネルギー335 J、平均出力67 kWのレーザー発振をすでに実現している。

2.3.2 ロッドレーザーの特徴と問題点

ロッドレーザーは、ランプなどの励起密度の低い光源を用いても、光源を長手方向に配置して側面から励起でき、高出力化が比較的容易であり、また、後述するディスクレーザーやファイバーレーザーよりもレーザー媒質の体積が大きいので、パルスエネルギーの大きなパルス発振が容易に行える特徴がある。

ただし、励起されたレーザーロッドには中心部の温度が高くなる軸対象(パラボリック)な温度分布が生じるため、屈折率の温度変化や熱応力による光弾性効果などによりレーザーロッドには熱レンズ効果や熱誘起複屈折が生じる^{22,34-36)}。熱レンズ効果を有するレーザー媒質を含んだレーザー共振器では、励起入力を大きくすると共振器が不安定条件になり、レーザー発振出力が飽和し、さらにはレーザー発振が停止する^{37,38)}。また、直線偏光させたレーザー共振器では、熱誘起複屈折率により消光比が劣化するので、レーザー損失が顕著に増加する。また、熱レンズ効果には非球面収差も含まれるため、ビーム品質も著しく劣化するといった問題点がある。高輝度なレーザー光が必要な応用には、利用目的に適したビーム品質が確保できるよう、共振器の最適化設計を行う必要がある^{34,36,37)}。

ロッドレーザーの場合、レーザーロッド内に生じた熱レンズをリレーレンズとして利用することにより、ビーム品

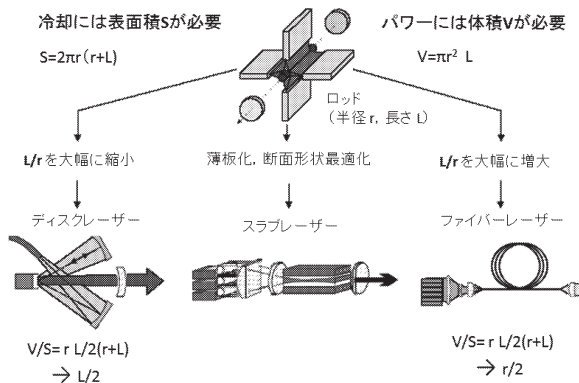


図11 高出力・高ビーム品質固体レーザーの技術的進化の流れ。

質の劣化をある程度抑制しつつ、多段カスケード接続により高出力化が図れる³⁹⁻⁴¹⁾。マルチロッドを用いたMOPA構成のQスイッチ発振・増幅システムを用い、これから得られる基本波出力を非線形光学素子に照射して光高調波発生を行えば、容易に短波長域で高平均出力を得ることができる。端面励起Nd:YVO₄レーザーロッドを2本用いたMOPAシステムからのQスイッチ光出力を3通倍した実験では、平均出力約36Wの波長335nm光が⁴²⁾、また側面励起Nd:YAGレーザーロッドを8本用いたMOPAシステムからのQスイッチ出力を3通倍した実験では、平均出力80.8Wの波長355nm光が得られている⁴³⁾。

最近、Ndイオンの通常の励起波長帯(808nm帯)よりは長波長域にあり、それよりは吸収係数が比較的小さな励起波長帯で発光する半導体レーザーを用いて、細長いレーザーロッドを端面励起することにより、レーザーロッドの熱歪みを抑制して高出力を得る試みがなされている。2本のNd:YVO₄レーザーロッドをカスケード接続したレーザー共振器内に波長変換素子を挿入して第二高調波発生を行った実験では、波長変換素子挿入前のTEM₀₀モード

基本波CW出力117Wに対して、波長変換素子挿入後には波長532nmでTEM₀₀モードの出力62Wが得られており、CW動作で高い光変換効率を得られていることが注目される⁴⁴⁾。

2.3.3 ディスクレーザーおよびファイバーレーザーによる高輝度高出力化

近年、ディスクレーザーやファイバーレーザーの高輝度高出力化が著しく進展しており、それらのレーザー加工への応用に関する技術開発も大いに活発化している⁴⁵⁻⁴⁷⁾。ディスクレーザーやファイバーレーザーは、図11に示したごとく⁴⁸⁾、レーザー媒質の体積を一定とした場合、ロッドレーザーに比べて表面積を格段に大きくでき、熱歪みの少ないすぐれた冷却能力があるため、高ビーム品質・高出力動作に本質的に適していると考えられる。図12に、各種高出力レーザーのビーム特性を比較した例を示す⁴⁶⁾。スラブレーザーも、最近励起入力2.4kWで、発振出力982W、x方向のビーム品質M_x²=2、y方向のビーム品質M_y²=7が得られ、コア径100μmの光ファイバーに効率よく結合できたという報告⁴⁹⁾があるなど、技術的には興味深い。ここではロッドの長さを極限まで短縮したディスクという形態と、ロッドの長さを極限にまで延長したファイバーという両極端に注目し、ディスクレーザーおよびファイバーレーザーの現状と動向につき、以下に項を分けて、それぞれ解説する。

2.3.4 ディスクレーザー

図13に、ディスクレーザーの概念的構成図を示す⁵⁰⁻⁵²⁾。ディスクレーザー材料としては、厚さ200μm程度の薄板のYb:YAGが用いられている。Yb濃度は8%程度である⁵⁰⁾。励起光源としては、930nm帯の半導体レーザーなどが用いられている⁵²⁾。放熱をよくするためディスクの厚さを非常に薄くしているため、一度の照射では励起光は

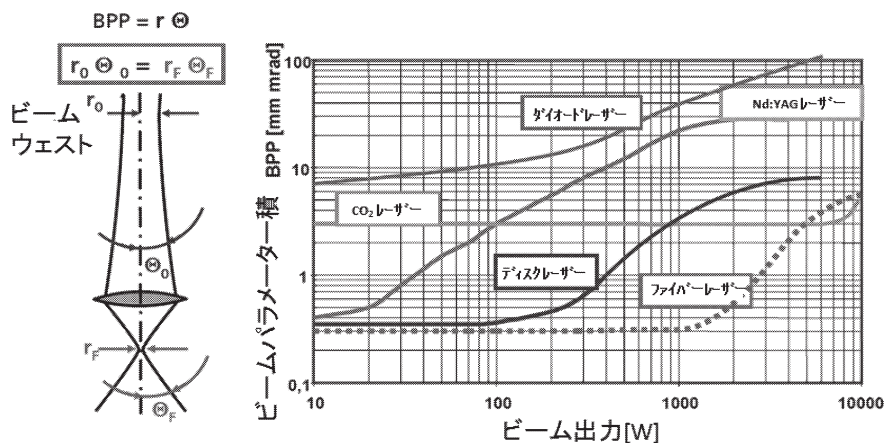


図12 各種高出力レーザーのビーム特性の比較例。

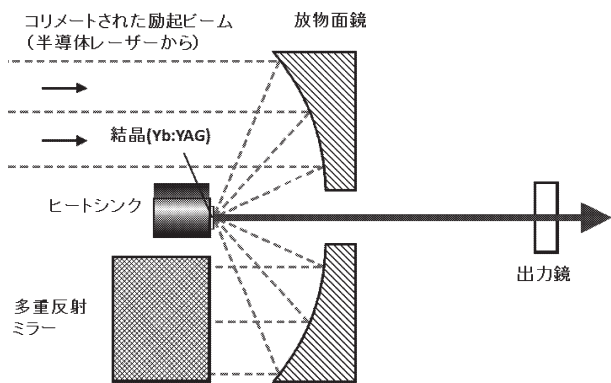


図13 高出力ディスクレーザーの概念的構成図。

Yb:YAG にあまり吸収されない。このため、ディスクを透過した励起光を再度ディスクに反射して戻すことを何回も繰り返すことができるような構成が採用されている。本方式により、製品レベルのものでは、現在ディスク1枚で1~2 kW 程度が得られており、その光束品質は、同程度の出力の半導体レーザー励起ロッドレーザーに比べて約3倍程度よい、8 mm・mrad (光束半径×光束広がり角 (半角)) が得られている⁵¹⁾。独シュトゥットガルト大学などでは、ディスク1枚あたり出力が10 kW 以上を目指した超高出力ディスクレーザーの研究開発も行われている⁵²⁾。独Trumpf社では、実験段階ではあるが、すでに単体で最大出力5.3 kW、光-光変換効率65%のレーザー発振を実現した⁵³⁾。国内でも、肉薄のディスクレーザー、マイクロチップレーザーならびに薄型スラブレーザーの研究開発が活発化しつつある⁵⁴⁻⁵⁶⁾。

2.3.5 ファイバーレーザー

高出力ファイバーレーザーは、通常、図14に示したごとく、二重のクラッド (ダブルクラッド) 構造を有している^{57,58)}。レーザー活性イオンとなる希土類はコア部にのみ添加される。励起光は、透明な内部クラッド内で多重反射して進むうちに徐々にコア部で吸収され、希土類イオンを励起する。レーザー活性イオンとなる希土類には、Ybのほか、Tm⁵⁹⁾、Er⁶⁰⁾、Nd⁶¹⁾などが用いられている。これらの中ではYbで最も高出力が得られている。

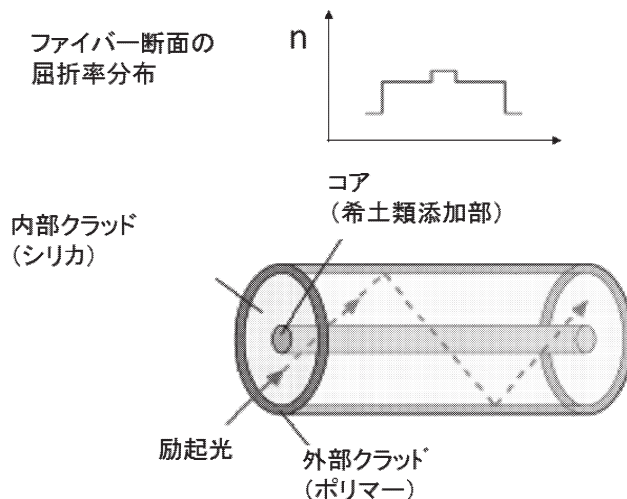


図14 ダブルクラッドファイバーの構造。

コアとクラッドの形状が同心円であると、コアの中心から離れて入射する励起光はクラッドでヘリカル状に反射してコア部にはなかなか到達しないため、励起効率が低下する。その対策として、内部クラッドの外形をD形⁶²⁾や、直方形⁶³⁾にしたり、コア部をクラッドの中心からずらして偏心させたりするなどの試みがなされている。

ダブルクラッドファイバーレーザー励起方式には各種の方式がある⁶⁴⁻⁶⁸⁾。図15に、米IPG Photonics社が採用している励起方式を用いたファイバーレーザーの構成例を示す^{69,70)}。この方式は、励起光導入用のマルチモードファイバーを多数分散してダブルクラッドファイバーの側面に融着接続する方式であり、容易に励起入力を大きくすることができる。

光通信用のシングルモードファイバーには、コア径10 μm程度のものが一般に使用されているが、高出力ファイバーレーザー用としては、ファイバー内での各種非線形光学現象の発生を抑制し、さらに高出力化を実現するために、コア径のより大きなマルチモードファイバーが利用される。マルチモードファイバーの使用による光束品質劣化の対策として、マルチモードファイバーを小半径のコイル状に巻いて、高次モードに大きな曲げ損失を与えること

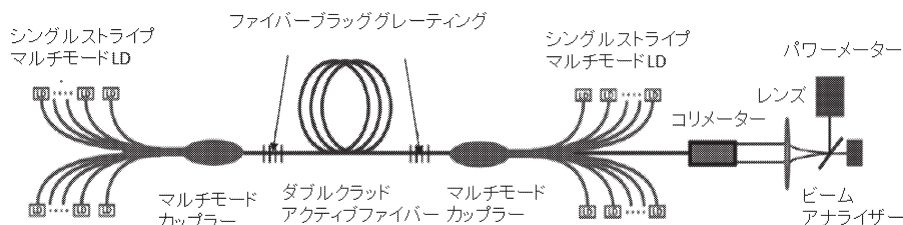


図15 高出力シングルモードファイバーレーザーの構成例。

により、高次モードを抑制し、シングルモード出力の増大を図っている^{68,71)}。

2段の光ファイバー増幅器を用いた MOPA 構成のファイバーレーザーにより、ビーム品質 $M^2=1.2$ で、CW 出力 1.96 kW (波長は 1075 nm) が得られている⁷²⁾。製品レベルとしては、すでにビーム品質 $M^2<1.15$ で CW 出力 1.5 kW が得られる高出力な単一モードファイバーレーザーが市販されている。このような高出力な単一モードファイバーを多数束ねて、それらのレーザー出力をやや太めのファイバーに結合することにより、CW 出力 50 kW 以上もの超高出力なマルチモードファイバーレーザーシステムが構築できる⁷³⁾。

1本のファイバー出力からどれだけ高出力のレーザー出力を得ることが可能か、ファイバーレーザーのパワー限界についての理論的な考察がなされている^{74,75)}。2006年には、ビーム品質 $M^2<1.1$ で、単一モード出力 CW 3 kW (波長 1075 nm) のファイバーレーザーが、ロシアで開催された学会において IPG Photonics 社から口頭発表された。

2.4 半導体レーザー

半導体レーザーは、電流の注入により高効率なレーザー

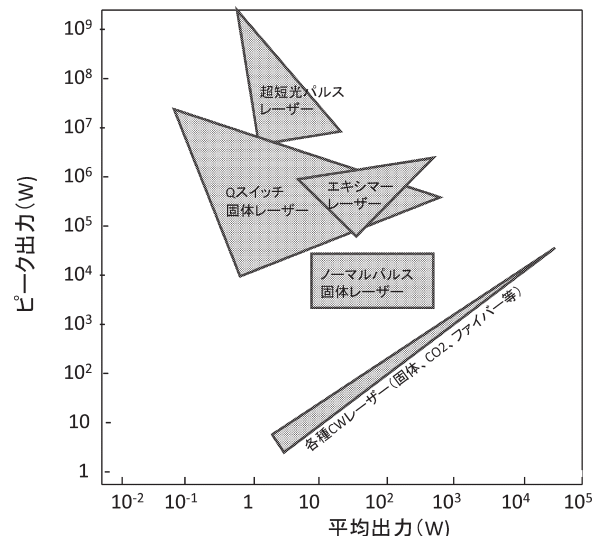


図 16 種々の加工用レーザーの概略の動作領域。

発振が可能であり、シングルエミッターでも、高出力なものは CW 10 W 以上が得られており、ファイバーレーザーの励起用光源などとして多数使用されている。しかし、半導体レーザーは高ピーク出力のパルス発振にはあまり適し

表 1 各種加工用レーザー (基本波) の代表的な動作特性と特徴。

レーザーの種類	励起方式	発振波長 (μm)	平均出力 (W)	パルス発振繰り返し	パルス幅	特徴
ガスフロー型 CO ₂ レーザー	放電励起 (RF 等)	10.6	1000~20000	10 Hz~100 kHz	CW~10 μs	赤外域大出力 効率~10%
封止型 CO ₂ レーザー	RF 放電励起	10.6 9.4	10~8000	DC~100 kHz	>50 μs	高ビーム品質
ランプ励起 固体レーザー	光励起 (ランプ)	1.064 (Nd: YAG)	10~6000	0.001~0.5 kHz	0.3~100 ms	大出力 おもに溶接用 効率~数%
LD 励起 固体レーザー (ノーマル発振)	光励起 (LD)	1.064 (Nd: YAG) 1.03 (Yb: YAG)	1000~6000 1000~100000	DC~0.5 kHz	CW~1 ms	近赤外域で高平均出力 おもに溶接用 効率 10~20%
連続励起 Q スイッチ 固体レーザー	光励起 (LD)	1.064 (Nd: YAG)	7~800	~50 kHz (Nd: YAG)	20~200 ns	高ピーク強度 薄膜加工用等
超短パルス 固体レーザー	光励起 (LD)	1.064 (Nd: YVO ₄)	1~10	1~100 kHz	8~12 ps	増幅方式は MOPA または REGEN
レーザー励起 固体レーザー	光励起 (0.53 μm)	~0.8 (Ti: sapphire)	1~10	~2 kHz	~0.1 ps	超短パルス 高ピーク強度
ファイバー レーザー	光励起 (LD)	~1.075 (Yb 系)	1~20000	DC~5 kHz	~0.1 ms	効率~25% 高ビーム品質
超短パルス ファイバー レーザー	光励起 (LD)	1.064 1.045	20 1	1~4 MHz 100~1000 kHz	~20 ps <0.7 ps	高速繰り返し 高平均出力 超短パルス
半導体レーザー	電流注入	0.78~0.98	30~10000	DC~5 kHz	~0.1 ms	効率~60%
エキシマー レーザー	パルス 放電励起	0.308 (XeCl) 0.248 (KrF) 0.193 (ArF)	5~600	0.01~0.6 kHz ~6 kHz (露光用)	20~70 ns	紫外で大出力 効率~数%

ていないので、直接加工用に用いるには、多数のエミッターを並べたアレイバーやこれらを重ねたスタックにして、高出力化する必要がある。このような空間多重方式の高出力半導体レーザーは、空間的なコヒーレンスが低く、集光性に劣るため輝度は低いが、高効率で動作するので、樹脂の溶接やクラディング、熱伝導溶接など、輝度をそれほど要しない用途に用いられている。

米国では、国防高等研究計画局 DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) の SHEDS (Super High Efficiency Diode Sources) 計画により、半導体レーザーの高出力化の研究開発が精力的に進められた結果、波長 9xx nm 帯ではピーク効率 74% が得られており、その波及効果として、例えば 808 nm 帯でもピーク効率 72% の高効率動作が実現している⁷⁶⁾。ドイツでは、高輝度半導体レーザーの開発プロジェクト BRIOLAS (brilliant diode lasers) のもとで、半導体レーザーの高効率化や高信頼度化ならびに高輝度半導体レーザーの応用開発などが広範な規模で推進されている⁷⁷⁾。その研究成果の一環として、例えば半導体レーザーからのレーザー出力として CW 200 W 以上が高効率で得られている⁷⁸⁾。高出力半導体レーザーからのレーザー出力を直接用いるのは使い勝手が悪いので、光パワー伝送用のマルチモードファイバーを用いた、ファイバー結合型の高出力半導体レーザーの研究開発が活発化している。ファイバー結合型で高出力のものでは、ファイバー出力として CW 11 kW 程度が得られるものまで開発されている⁷⁹⁾。

3. 各種加工用レーザー光源の特性の比較

レーザー光源には、発振波長、平均出力、発振繰り返し周波数、ピーク出力、パルス幅、ビーム品質、効率、出力安定度、メンテナンス性などに関してさまざまな仕様のものがあるので、レーザー加工の最適化には加工目的に適した仕様のレーザー光源を選択する必要がある。誌面に限りがあるので、ここでは詳しい説明は省略するが、参考までに、各種加工用レーザーについての、平均出力とピーク出力に関する概略の動作範囲を図 16 に、また各種加工用レーザー（基本波）の代表的な動作特性とおもな特徴を表 1 に示す。

文 献

- 1) J. F. Ready: "Development of plume of material vaporized by giant-pulse laser," *Appl. Phys. Lett.*, **3** (1963) 11-13.
- 2) M. L. Cohen, B. A. Unger and J. F. Milosky: "Laser machining of the thin films and integrated circuits," *Bell Syst. Tech. J.*, **47** (1968) 385-404.

- 3) F. P. Gagliano, R. M. Lumley and L. S. Watkins: "Lasers in industry," *Proc. IEEE*, **57** (1969) 114-141.
- 4) 鷲尾邦彦: "レーザー加工機産業の変遷と発展," *レーザー研究*, **29** (2001) 44-47.
- 5) D. Basting, N. Djeu and K. Jain: "Historical review of excimer laser development," *Excimer Laser Technology*, eds. D. Basting and G. Marowsky (Springer-Verlag, Berlin, 2005) pp. 8-20.
- 6) D. Bäuerle: *Laser Processing and Chemistry*, 2nd ed. (Springer-Verlag, Berlin, 1996).
- 7) S. Nolte: "Micromachining," *Ultrafast Lasers, Technology and Applications*, eds. M. E. Ferman, A. G. Galvanuskas and G. Sucha (Marcel Dekker, New York, 2003). pp. 359-417.
- 8) 永井治彦: レーザプロセス技術 (オプトロニクス社, 2000).
- 9) レーザー学会編: レーザプロセッシング応用便覧 (エヌジャーティエー, 2006).
- 10) 次世代レーザプロセッシングとその産業応用調査専門委員会編: 最新レーザプロセッシングの基礎と産業応用 (電気学会, 2007).
- 11) (財)光産業技術振興協会: 光産業の動向, 2006FY-002-1 (2007) pp. 7-26, など.
- 12) D. R. Hall: "Carbon dioxide lasers," *Handbook of Laser Technology and Applications*, Vol. II, eds. C. Webb and J. Jones (Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 2004) pp. 751-790.
- 13) D. R. Hall, H. J. Baker and F. Villarreal: "High power RF excited planar waveguide carbon dioxide lasers for micro-processing applications," *Proc. SPIE*, **5120** (2003) 23-29.
- 14) 渡部俊太郎: "エキシマレーザ", *新編光学材料ハンドブック*, 福見俊夫監修 (リアライズ社, 2000) pp. 274-279.
- 15) B. Godard, P. Laborde, C. Dutems, S. Prochasson, D. Zahorski and M. Stehlé: "60J XeCl laser for single shot excimer laser annealing," *Proc. SPIE*, **3092** (1997) 161-164.
- 16) J. C. M. Timmermans: "1-kW industrial excimer laser (308-nm)," *Proc. SPIE*, **3343** (1998) 687-691.
- 17) L. Herst, I. Klaft, K. Schmidt, I. Bragin and H.-S. Albrecht: "New high repetition rate, high energy 308 nm excimer laser for material processing," *Proc. SPIE*, **6459** (2007) 64590I-1-8.
- 18) Cymer 社カタログ: XLR 500i, Revolutionary Ring Technology Enabling 45 nm Immersion Lithography (San Diego, CA, USA, 2006) <http://www.cymer.com>
- 19) D. J. W. Brown, P. O'Keeffe, V. B. Fleurov, R. Rokitski, R. Bergstedt, I. V. Fomenkov, K. O'Brien, N. R. Farrar and W. N. Partlo: "XLR 500i: Recirculating ring ArF light source for immersion lithography," *Proc. SPIE*, **6520** (2007) 652020-1-7.
- 20) H. Mizoguchi, T. Inoue, J. Fujimoto, T. Yamazaki, T. Suzuki, T. Matsunaga, S. Sakanishi, M. Kaminishi, Y. Watanabe, T. Ohta, M. Nakane, M. Moriya, T. Nakaike, M. Shinbori, M. Yoshino, T. Kawasuji, H. Hogawa, T. Ito, H. Umeda, S. Tanaka, H. Taniguchi, Y. Sasaki, J. Kinoshita, T. Abe, H. Tanaka, H. Hayashi, K. Miyao, M. Niwano, A. Kurosu, M. Yashiro, H. Nagano, N. Matsui, T. Mimura, K. Kakizaki and M. Goto: "High power injection lock laser platform for ArF dry/wet lithography," *Proc. SPIE*, **5754** (2005) 780-789.
- 21) H. Watanabe, S. Komae, S. Tanaka, R. Nohdomi, T. Yamazaki, H. Nakarai, J. Fujimoto, T. Matsunaga, T. Saito, K. Kakizaki and H. Mizoguchi: "Reliable high power injection locked 6 kHz 60 W laser for ArF laser for ArF immersion lithography," *Proc. SPIE*, **6520** (2007) 652031-1-7.
- 22) W. Koehler: *Solid-State Laser Engineering*, 4th ed. (Springer-

- Verlag, Berlin, 1999).
- 23) 鷺尾邦彦：“固体レーザー装置”，固体レーザー，日本分光学会測定法シリーズ37，小林喬郎編（学会出版センター，1997）pp. 97-139.
 - 24) 鷺尾邦彦：“LD 励起固体レーザー”，新編光学材料ハンドブック，福見俊夫監修（リアライズ社，2000）pp. 237-249.
 - 25) R. Iffländer: *Solid-State Lasers for Materials Processing, Fundamental Relations and Technical Realizations* (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2001).
 - 26) P. Lacovara, H. K. Choi, C. A. Wang, R. L. Aggarwal and T. Y. Fan: “Room-temperature diode-pumped Yb: YAG laser,” *Appl. Opt.*, **16** (1991) 1089-1091.
 - 27) 平等拓範：“Yb系固体レーザー”，*光学*, **28** (1999) 435-442.
 - 28) W. F. Krupke: “Ytterbium solid-state lasers—The first decade,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **6** (2000) 1287-1296.
 - 29) D. S. Sumida, H. Bruesselbach, R. W. Byren, M. Mangir and R. Reeder: “High-power Yb: YAG rod oscillator and amplifiers,” *Proc. SPIE*, **3265** (1998) 100-105.
 - 30) T. Y. Fan: “Heat generation in Nd: YAG and Yb: YAG,” *IEEE J. Quantum Electron.*, **29** (1993) 1457-1459.
 - 31) A. Brenier and G. Boulon: “Overview of the best Yb³⁺-doped laser crystals,” *J. Alloys Compd.*, **323-324** (2001) 210-213.
 - 32) 植田憲一：“固体レーザーに革命をもたらすセラミックレーザー技術”，第23回光産業技術シンポジウム講演資料（光産業技術振興協会，2003）pp. 15-28.
 - 33) A. A. Kaminskii, M. S. Akchurin, V. I. Alshits, K. Ueda, K. Takaichi, J. Lu, T. Uematsu, M. Musha, A. Shirikawa, V. Gabler, H. J. Eichler, H. Yagi, T. Yanagitani, S. N. Bagayev, J. Fernandez and R. Balda: “New data on the physical properties of Y₃Al₅O₁₂-based nanocrystalline laser ceramics,” *Crystallogr. Rep.*, **48** (2003) 515-519.
 - 34) R. Iffländer: *Solid-State Lasers for Materials Processing, Fundamental Relations and Technical Realizations* (Springer-Verlag, Berlin, 2001) pp. 99-121.
 - 35) D. C. Brown: “Nonlinear thermal distortion in YAG rod amplifier,” *IEEE J. Quantum Electron.*, **34** (1998) 2383-2392.
 - 36) 鷺尾邦彦：“固体レーザーの熱歪みとビーム品質”，固体レーザー，日本分光学会測定法シリーズ37，小林喬郎編（学会出版センター，1997）pp. 107-113.
 - 37) N. Hodgson and H. Weber: *Optical Resonators* (Springer-Verlag, London, 1997) pp. 367-412.
 - 38) N. Hodgson and H. Weber: “Influence of spherical aberration of the active medium on the performance of Nd: YAG laser,” *J. Quantum Electron.*, **29** (1993) 2497-2507.
 - 39) K. P. Driedger, R. M. Iffländer and H. Weber: “Multirod resonators for high-power solid-state lasers with improved beam quality,” *IEEE J. Quantum Electron.*, **24** (1988) 665-674.
 - 40) 窪田憲一，鷺尾邦彦：“高出力YAGレーザーの最近の進歩”，*レーザー研究*, **28** (2000) 729-735.
 - 41) 湯浅広士，秋山靖裕，高田弘之，西田直人：“ロッド型高出力10 kW全固体レーザー”，*レーザー研究*, **31** (2003) 508-512.
 - 42) C. X. Wang, G. Y. Wang, A. V. Hicks, D. R. Dulley, H. P. Pang and N. Hodgson: “High power Q-switched TEM₀₀ mode diode-pumped solid state lasers with >30 W output power at 355 nm,” *Proc. SPIE*, **6100** (2006) 610019-1-14.
 - 43) 瀬口正記，園 淳弘，山本達也，桂 智毅，岡本達樹，黒澤満樹，西前順一：“産業用高出力高繰り返し波長変換UVレーザーとその加工応用”，*レーザー学会第354回研究会報告*，RTM-08-38 (2006) pp. 19-23.
 - 44) L. McDonagh, R. Knappe, A. Nebel and R. Wallenstein: “888 nm pumping of Nd: YVO₄ for high-power high-efficiency TEM₀₀ lasers,” *Proc. SPIE*, **6451** (2007) 64510F-1-15.
 - 45) R. Poprawe, P. Loosen, H. D. Hoffman, D. Petring and K. Wissenbach: “Holistic development of high power laser sources and corresponding applications,” *Proc. 2nd International Conf. on Applications of Lasers and Optics (PICALO 2006)* (Laser Institute of America, Orland, 2006) pp. 10-17.
 - 46) E. Beyer: “High power laser applications,” *Proc. Automotive Laser Applications Workshop* (Univ. Michigan, USA, 2006).
 - 47) 宮本 勇：“高出力ファイバーレーザーによる加工”，*O plus E*, **27** (2005) 1253.
 - 48) F. Bachmann: “The impact of laser diodes to solid state lasers and materials processing applications,” 第61回レーザー加工学会講演論文集 (2004) pp. 16-28.
 - 49) C. Scnitzler, J. Giesekus, M. Leers, R. Meyer, D. Hoffmann and R. Poprawe: “A compact fiber coupled high brightness diode end pumped slab laser with kW output power,” *Proc. ICALEO2003*, LMP Section D (Laser Institute of America, Orland, 2003) pp. 89-94.
 - 50) G. Stewen, K. Contag, M. Larionov, A. Giesen and H. Hügel: “A 1-kW CW thin disc laser,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **6** (2000) 650-657.
 - 51) 独 Trumpf 社のカタログ：High-Power Disk Lasers, Excellent Beam Quality at High Power (2006).
 - 52) 門屋輝慶：“ディスクレーザー技術の動向”，高出力レーザーによる加工技術とインプロセスモニタリング・加工状態の評価（技術情報協会，2004）pp. 257-266.
 - 53) A. Giesen: “High-power thin-disk lasers,” *Advanced Solid State Photonics (ASSP) Conference Program and Technical Digest*, MA1.pdf (OSA, Washington, 2007).
 - 54) 柳澤隆行，山本修平，平野嘉仁：“側面励起高出力Yb: YAGコンポジットディスクレーザー”，*レーザー研究*, **33** (2005) 223-227.
 - 55) 川戸 栄，末田敬一，小林喬郎：“高出力薄型スラブYb: YAGレーザーの開発”，*レーザー研究*, **33** (2005) 236-241.
 - 56) M. Tsunekane and T. Taira: “>400 W CW operation of diode edge-pumped, composite all-ceramic Yb: YAG microchip laser,” *Advanced Solid State Photonics (ASSP) Conference Program and Technical Digest*, MA2.pdf (OSA, Washington, 2007).
 - 57) D. Kliner, J. Koplrow, F. Di Teodoro and S. Moore: “Fiber laser technology reels in high power results,” *SPIE's oemagazine*, January (2004) 32-35.
 - 58) P. Even and D. Pureur: “High power double clad fiber lasers: A review,” *Proc. SPIE*, **4638** (2002) 1-12.
 - 59) S. D. Jackson and T. A. King: “High-power diode-cladding-pumped Tm-doped silica fiber laser,” *Opt. Lett.*, **23** (1998) 1462-1464.
 - 60) J. K. Sahu, Y. Jeong, D. J. Richardson and J. Nilsson: “A 103 W erbium-ytterbium co-doped large-core fiber laser,” *Opt. Commun.*, **227** (2003) 159-163.
 - 61) H. Zellmer, U. Willamowski, A. Tünnermann, H. Welling, S. Unger, V. Reichel, H.-R. Müller and J. Kirchhof: “High-power cw neodymium-doped fiber laser operating at 9.2 W with high beam quality,” *Opt. Lett.*, **20** (1995) 578-580.
 - 62) V. Reichel, S. Unger, H.-R. Müller and H. Zellmer: “High power single-mode Nd-doped fiber-laser,” *Proc. SPIE*, **3265** (1998) 192-199.
 - 63) J. Nilsson, J. D. Minelly, R. Paschotta, A. C. Tropper and D. C. Hanna: “Ring-doped cladding-pumped single-mode three-level fiber laser,” *Opt. Lett.*, **23** (1998) 355-357.

- 64) X. Li, S. Ippolito and T. F. Morse: "A technique for the combining of double clad optical fiber lasers," Proc. SPIE, **4974** (2003) 236-243.
- 65) A. Hideur, T. Chartier, C. Özkul and F. Sanchez: "All-fiber tunable ytterbium-doped double-clad fiber ring laser," Opt. Lett., **26** (2001) 1054-1056.
- 66) 中谷勝彦: "高出力ファイバレーザの開発動向と応用事例", 高出力レーザによる加工技術とインプロセスモニタリング・加工状態の評価 (技術情報協会, 2004) pp. 245-256.
- 67) S. Norman, M. Zervas, A. Appleyard, M. Durkin, P. Skull, D. Walker, P. Turner and I. Crowe: "Power scaling of high power fiber lasers for micromachining and materials processing application," Proc. SPIE, **6102** (2006) 61021P-1-7.
- 68) J. Limpert, A. Liem, T. Schreiber, H. Zellmer and A. Tünnermann: "Power and energy scaling of fiber laser systems based on ytterbium-doped large-mode-area fibers," Proc. SPIE, **5335** (2004) 135-147.
- 69) N. S. Platonov, D. V. Gapontsev, V. P. Gapontsev and V. Shumilin: "135 W CW fiber laser with perfect single mode output," *CLEO 2002*, CPDC3 (2002).
- 70) V. Gapontsev and W. Krupke: "Fiber lasers grow in power," Laser Focus World, August (2002) 83-87.
- 71) J. P. Koplow: "Single-mode operation of a coiled multimode fiber amplifier," Opt. Lett., **25** (2000) 442-444.
- 72) V. Gapontsev, D. Gapontsev, N. Patonov, O. Shkurikhin, V. Fomin, A. Mashkin, M. Abramov and S. Ferin: "2 kW CW ytterbium fiber laser with record diffraction-limited brightness," *Conference Digest of CLEO-Europe 2005*, CJ1-1-THU (2005).
- 73) 米 IPG Photonics 社のカタログ: YLR-HP Series, 1 to 50 kW CW Ytterbium Fiber Laser Systems (2005).
- 74) J. Limpert, T. Schreiber and A. Liem: "Power-scaling of (micro-structured) fiber lasers and amplifiers to kW-output powers, Advanced Solid-State Photonics," *Technical Digest of Advanced Solid-State Photonics (ASSP)*, TuA1 (2004).
- 75) A. Liem, J. Limpert, T. Schreiber, S. Nolte, H. Zellmer, A. Tünnermann, J. Broeng, G. Vienne, A. Peterson, C. Jacobsen, T. Peschel, V. Guyenot, V. Reichel and S. Unger: "Air-clad large-mode-area photonic crystal fibers: Power scaling concepts up to the multi kW-range," Proc. SPIE, **5335** (2004) 158-169.
- 76) P. Crump, W. Dong, M. Grimshaw, J. Wang, S. Patterson, D. Wise, M. DeFranza, S. Elim, S. Zhang, M. Bougher, J. Patterson, S. Das, J. Bell, J. Farmer, M. DeVito and R. Martinsen: "100-W+diode laser bars show >71% power conversion from 790-nm to 1000-nm and have clear route to >85%," Proc. SPIE, **6456** (2007) 64560M-1-11.
- 77) F. Bachmann: "Goals and status of the German national research initiative BRIOLAS (brilliant diode lasers)," Proc. SPIE, **6456** (2007) 645608-1-12.
- 78) R. Hülsewede, H. Schulze, J. Sebastian, D. Schröder, J. Meusel and P. Hennig: "High reliable-high power AlGaAs/GaAs 808 nm diode laser bars," Proc. SPIE, **6456** (2007) 645607-1-8.
- 79) S. D. Roh, D. M. Grasso and N. P. Ostrom: "High-brightness fiber coupled diode laser systems," Proc. SPIE, **6456** (2007) 64560P-1-8.

(2007年5月9日受理)