

講座

固体レーザーの基礎

Basics of Solid-State Laser

1. レーザーの基礎

1. Fundamentals of Lasers

上原日和

UEHARA Hiyori

自然科学研究機構 核融合科学研究所

(原稿受付: 2021年2月4日)

1960年にメイマンがレーザー発振を実証して以来、レーザーはあらゆる分野に応用され、プラズマ・核融合分野はもちろん、現代の情報通信、自動車生産、先進医療などを支えている。本講座では、レーザーの構成原理と技術要素について全3回にわたって解説する。第1回となる本章では、1.1 レーザーの歴史、1.2 レーザーの動作原理、1.3 レーザーの分類と特徴、について解説する。

Keywords:

solid-state lasers, gas lasers, laser diodes

1.1 レーザーの歴史

1.1.1 レーザーとは

レーザー (laser) は、Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation の頭文字を集めた頭字語であり、「輻射の誘導放出による光増幅」を意味する。図1は光の吸収と放出を説明した概念図である。励起状態 E_2 にある原子は、一定の励起寿命が経過すると、とある確率で自発的に光子を放出して準位 E_1 に緩和する(自然放出)。しかし、準位 E_2 にある原子に、2準位間のエネルギー差 $h\nu$ に等しい光を入射すると、原子はそれに誘導されて、入射光と波長・位相・方向・偏光の揃った光子を放出して即座に準位 E_1 に緩和する。これが誘導放出であり、この現象を

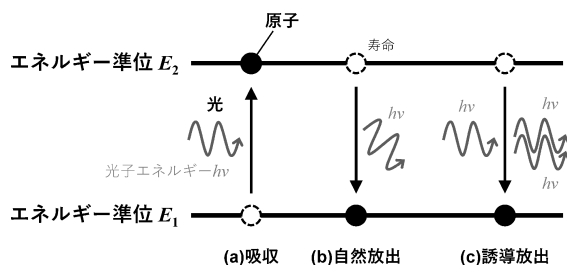


図1 光の吸収と放出の概念図。

利用して増幅した光やその発生装置のことをレーザーと呼ぶ[1]。誘導放出の特性からわかるように、レーザーは波長と位相が時間的・空間的に揃った特殊な光(コヒーレント光)である。レーザーの特徴として、一つの色から成る単色性、ビームが一定方向に直進する指向性、レーザー同士が互いに干渉し合う可干渉性が挙げられる。ビームを狭い領域に絞ってエネルギー密度を高めることができるのもレーザーの特徴である。これら特徴を活用することで、自然光では成し得なかった計測や、物質と光の強い相互作用を人為的に引き起こすことが可能になる。

1.1.2 レーザー開発の歴史

レーザー動作の基礎となる誘導放出の理論は、1916年にEinsteinによって発表された。様々な理論検証の後、1954年にTownesらは、アンモニアガスを用いて誘導放出による増幅作用を最初に観測した。このときの波長は1.25 cmのマイクロ波であり、メーザー(MASER)と呼ばれている。

世界で最初のレーザーは、1960年にMaimanがルビー結晶をフラッシュランプで励起することでパルス発振動作を実証した。同じく1960年にJavanらは、He-Neレーザーの連続発振に成功し、その後、1960年代にArイオンレーザーやCO₂レーザーなどのより高出力なガスレーザーが、1970

年代に紫外域のエキシマレーザーが開発された。固体レーザー開発においては、ルビーレーザーに続いて、Nd ガラスレーザー、Nd:YAG レーザーが1960年代に開発された。波長1.06 μm で発振する Nd:YAG レーザーについては後ほど詳細に解説するが、高出力な連続波、パルス動作が可能であることから、現在最も代表的な固体レーザーとなっている。1961年に初の発振実証がなされたファイバーレーザーも固体レーザーの一種であり、現代社会において重要な役割を担っている[2]。1965年の Kao の光ファイバー通信の提案を皮切りに、1970年代には通信用光ファイバーの高品質化が為され、1987年には Er 添加ファイバー増幅器が開発、その後実用化された。通信用途以外でも、Nd や Yb 添加の高出力ファイバーレーザーの開発が進み、キロワット級ファイバーレーザーは、今や YAG レーザーや CO₂ レーザーと並ぶ主要な加工用光源にまで発展した[3]。ここまで、代表的なレーザーについてのみ述べたが、固体レーザー、ガスレーザー、色素レーザー、半導体レーザー、自由電子レーザーなど、数えきれない種類のレーザー媒質での発振器がこれまでに開発され、発振波長は遠赤外線から X 線に及んでいる。これまでに報告されているレーザーや市販レーザーの波長については文献[4]に詳しい。

従来の固体レーザーは、ガラスや結晶を利得媒質とするものが主であった。しかし、ガラスのように成形性が高く、大口径化が可能で、なおかつ単結晶のような優れた熱特性・光特性を兼ね備えた透明セラミックス材料が近年注目を集めている。1995年に Ikesue がレーザー発振可能な YAG セラミックスを実証してから[5]、レーザー媒質用透明セラミックスの開発、および次世代の高出力セラミックレーザーの研究が盛り上がりを見せている[6]。レーザー材料については、次号掲載予定の本講座第2章「固体レーザー材料」において、レーザーセラミックス開発に携わる北見工業大学・古瀬裕章氏より解説する。

一方、固体レーザーの短パルス化の歴史に着目すると、1961年に、ルビーレーザーを用いた Q スイッチ発振が考案され、パルス幅は 1 μs 以下に短縮した。この Q スイッチング技術の登場によって、パルスエネルギーとピーク出力が飛躍的に向上し、ラマンレーザーの発振や高調波発生など、非線形光学の広範な研究が展開されるようになった。その後、モード同期レーザーが実証されてからは、パルス幅はサブピコ秒まで短縮された。さらに、フェムト秒オーダーの超短パルスレーザーが広く用いられるようになり、光パラメトリック発振や高調波発生、和周波・差周波発生などの非線形光学効果を利用した波長変換が容易になった。特に、1982年に登場した Ti:sapphire レーザーは、その広い利得帯域のために 10 fs 以下の超短パルス化が可能である。1985年に Mourou らが考案したチャープパルス増幅[7]とパルス圧縮技術の進歩によって、現在では、ミリジュール級のフェムト秒 Ti:sapphire レーザーが市販されるようになった。最近では、このような超短パルスレーザーによる高次高調波発生過程を用いたアト秒パルスの発生が実現し、計測応用のための光源高性能化が進められている[8]。さらに、モード同期レーザーの実証に伴って周

波数コムという概念が誕生しており、これを利用した次世代計測法の開発が活発になっている[9]。

レーザーを語るうえで、半導体レーザーの存在を忘れてはならない。1957年に Nishizawa が半導体レーザーの最初提案をしたのち、1962年に GE, IBM, MIT の 3 研究所でほぼ同時に、低温で GaAs の pn 接合を用いて近赤外レーザーのパルス発振が観測された。その後、1970年に室温連続発振が実証され、1979年に面発光レーザーが、1994年に量子カスケードレーザーが誕生しており、半導体レーザーの発振波長は現在、紫外から中赤外域までをほぼ連続的に網羅している[4]。半導体レーザーは、比較的安価で、発振波長や出力のバリエーションが豊富なため、ブルーレイなどの光学ドライブ、光ファイバー通信、レーザープリンターなど身近な装置に多数実装されている。YAG レーザーやファイバーレーザーなど固体レーザーの励起光源としても、高出力な半導体レーザー (LD; Laser diode) が重要な役割を担っている。LD の高効率・高出力化、長寿命化が進んだことから、フラッシュランプ励起に代わって LD 励起の Nd:YAG レーザーが普及しつつある。LD の出力も年々飛躍的に向上しており、アレイ化やスタック化でキロワットを超えるものが上市されるようになった[10]。

以上、簡単に纏めたが、レーザーの発明や開発の歴史については、文献[11-14]により詳しく記載されている。特に文献[11]は、開発年表を関連文献と併せて参照することができるため、レーザーの歴史に興味のある方にはそちらをご覧いただきたい。

プラズマ・核融合科学に関連した最近の動向としては、大型の固体レーザー施設が全世界で建設されており、高出力化が急速に進んでいる。パルスエネルギーが高いものは、米国ローレンス・リバモア国立研究所の NIF やフランス原子力委員会の LMJ に代表されるナノ秒のメガジュール級レーザーが運用されている。また、ピーク出力が高いものでは、大阪大学の LFEX やフランスの PETAL などのピコ秒ベタワット級レーザーのほか、量子科学技術研究開発機構の J-KAREN などのフェムト秒ベタワット級レーザーが開発されている。これらのレーザーは、レーザー核融合、レーザー粒子加速、プラズマフォトリクス、超高圧物性や実験室宇宙物理等の高エネルギー密度科学分野のほか、レーザー加工などの産業用途も含めた幅広い応用が期待されている。近年の世界におけるパワーレーザー開発の実情や高エネルギー密度科学の動向、今後の展望については、文献[15]に詳細が記載されている。また、パワーレーザーの高繰り返し化に取り組む大阪大学・北島将太郎氏が著者となり、本講座第3章において、高出力固体レーザー技術の概要と最新動向について解説予定である。

このように現代のレーザーは、遠赤外線から X 線までの発振波長、単一光子からベタワットまでの出力、アト秒から連続波までのパルス幅を網羅し、その多様性は計り知れない。レーザー技術の著しい進展に伴い、小型で高効率かつ信頼性の高いレーザー光源が産業・医療・科学などの分野で実用に供されるようになった。レーザー光源への要求は益々高度化・多様化しており、高出力化、短パルス化、

高効率化、低価格化、新波長帯開発など、様々なニーズに応じた研究開発が今後も展開されていくであろう。

1.2 レーザーの動作原理

1.2.1 反転分布の形成

ここでは、レーザーの動作原理について、なるべく簡単に説明する。レーザーがいかんして発振するかを理解するには、まず、反転分布について知っておく必要がある。いま、図1に示したようなエネルギー状態 E_1 , E_2 を有する系を考え、準位 E_1 をレーザー下準位、 E_2 をレーザー上準位と呼ぶこととする。ここにエネルギー $h\nu$ の光を入射すると、(a)吸収と(c)誘導放出のどちらもが誘導されるが、吸収によって光子数が減少し、誘導放出によって光子数は増加(増幅)する。つまり、レーザーの効果である光増幅を得るには、誘導放出が吸収を上回らなければならず、下準位状態にある原子(分子)数 N_1 よりも上準位状態にある原子数 N_2 のほうが多い必要がある。このように $N_2 > N_1$ となっている状態のことを反転分布状態と呼び、この状態を形成することがレーザー動作の基本となる。通常の熱平衡状態においては、ボルツマン分布に従って $N_2 < N_1$ となっているため、反転分布を形成するには、第3、第4の準位を介して光励起(主に固体レーザー)を行うか、放電励起(主にガスレーザー)、電流注入(半導体レーザー)による励起が必要となる[1]。

1.2.2 レーザー発振器の概要

図2にレーザー発振器の概念図を示した。レーザーの主な構成要素は、①誘導放出を起こすためのレーザー媒質、②レーザー媒質を反転分布状態にするための励起源、③光を閉じ込めて増幅するための光共振器、である。図の光共振器は、対面したミラー対で構成されたファブリ・ペロー共振器であり、一方のミラーの反射率は十分に高く、もう一方のミラーは光の一部が透過する部分反射ミラーとなっている。励起源からのエネルギーを吸収して反転分布状態となったレーザー媒質は、等方的に蛍光を発するが、そのうちの共振器ミラー間を往復して生き残る光のみが誘導放出によって増幅される。特に、図中に波線で電場分布を示したような共振条件を満たす光は、共振器内に効率的に閉じ込められるため、レーザー媒質を往復(増幅)する回数が多くなり、共振器内の光強度が高くなる。共振器で増幅された光の一部は、部分的に光を透過する出力ミラーから共振器外に取り出され、これがレーザー出力として取り扱われる。このような働きから、出力ミラーは、出力結合鏡(アウトプットカップラー)とも呼ばれている。

共振条件を満たす光の波長は、その整数倍が共振器内の光路長(距離と屈折率の積)と等しく、一定の周波数間隔でレーザーが発振しており、このような発振モードの分布を縦モードという。これに対し、ビーム断面方向のモード分布のことを横モードと呼んでいる。ファブリ・ペロー型のレーザー共振器で生じる基本横モード(TEM₀₀モード)はガウスビームで、ビーム品質を示すパラメータである M^2 (エムスクエア) = 1 である。これに対し、高次の横モードが含まれた場合、レーザービームの強度分布はガウ

ス分布とは大きく異なり[16]、 M^2 の値は大きくなる。レーザービームの M^2 が1に近ければ、レンズを用いて回折限界に近いスポット径を得ることが可能であるが、 M^2 が大きくなるに従って集光特性が悪化する。そのため、レーザー加工などの高エネルギー密度を必要とする用途において M^2 は重要なパラメータである。図2では、平面ミラー2枚を用いた最も単純な共振器構成を例に挙げたが、共振器長に応じて、損失が小さくより安定性の高い球面凹面鏡等がしばしば用いられる[17]。また、ファブリ・ペロー共振器を用いたレーザー以外に、光を一方に周回させて閉じ込めるリング共振器レーザー[2]や、共振器構造を持たないランダムレーザー[18]、ウィスバリング・ギャラリモードを利用した微小共振器レーザー[19]なども存在する。

1.2.3 レーザーの発振条件

前述のように、共振条件にある光は反転分布媒質を往復するたびに誘導放出によって増幅されるが、弱い励起状態では共振器の損失が増幅による利得を上回り、光は減衰してしまう。励起を強くするにしたがって利得が大きくなり、損失を上回ったときにレーザーが発振する(発振しきい値)。利得係数 g 、利得媒質の長さを l 、利得媒質の誘導放出断面積 σ_{em} を用いると、 $gl = \sigma_{em}(N_2 - N_1)$ で表され、媒質を一往復した際の利得は、 $G = \exp(2gl)$ となる。図2に示したように、共振器損失が反射率 R_1, R_2 のミラーによるもののみと仮定した場合、レーザーの発振条件は、 $R_1 R_2 \exp(2gl) = 1$ となる。発振しきい値を超えると、レーザー出力は励起パワーに比例して増加し、励起に対するレーザー出力の増加率をスロープ効率という。レーザー出力を制限する要因や、レーザーの高効率化に求められる材料パラメータの解説は、次章以降に譲る。

1.2.4 Qスイッチング

レーザー動作には、一定の出力を連続して発振する連続波(CW)発振動作と、パルス状の出力を一定の時間間隔で発振するパルス発振動作がある。一般的なパルスレーザーでは、主に、Qスイッチング、モード同期、ゲインスイッチング、キャビティダンピングなどの手法でパルス化されており、ここでは特に馴染みの深いQスイッチング、並びにモード同期法について解説する。図3は、それぞれ同じ平均出力を有する連続波レーザーとパルスレーザーの出力の時間変化を示した概念図である。上述の手法でパルス化すると、短い時間にエネルギーを集中させることができる

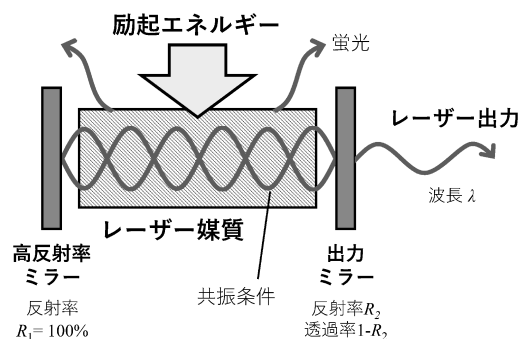


図2 レーザー発振器の概念図。

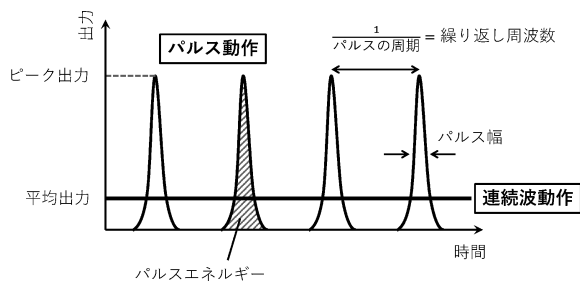


図3 連続波動作とパルス動作の出力の時間変化（双方で同じ平均出力を有する場合）。

ため、連続波動作と比較してピーク出力が圧倒的に高くなる。1つのパルスが持つエネルギー（出力の時間積分）のことをパルスエネルギーと呼び、パルスエネルギー（単位：J）＝平均出力（単位：W）／繰り返し周波数（単位：Hz）で計算できる。また、ピーク出力（単位：W）＝パルスエネルギー／パルス幅（単位：s）である。

Qスイッチングとは、レーザー共振器の光閉じ込め効率（Q値）を変調してレーザー出力を短パルス化する手法である（図4）。まず、レーザーが発振しないように共振器の損失を大きくした状態で媒質を励起することでエネルギーを反転分布として蓄積する。次に、共振器の損失を急激に小さくすると、誘導放出が促進し蓄積エネルギーが一気に短時間でレーザー出力として放出される。この手法によって、例えば、ナノ秒のパルス幅とミリジュール級のパルスエネルギーを安定的に得ることが可能になる。共振器損失を高速で変調するためのQスイッチ素子には、音響光学変調器や電気光学変調器、回転鏡などが用いられ、これらスイッチを能動的に駆動してQスイッチ発振動作を得ることを能動Qスイッチングと呼ぶ。それに対し、入射光強度が高くなると受動的に透明化する性質を持つ可飽和吸収体を、共振器中に入れてQスイッチパルスを生成することを、受動Qスイッチングという。Qスイッチレーザーでは、共振器長に比例してパルス幅が短くなるため、レーザー結晶と可飽和吸収体、共振器ミラーを一体化したコンパクトな受動Qスイッチ・マイクロチップレーザーが開発されており、1 nsを下回る短パルス化が達成されている[20]。

1.2.5 モード同期

Qスイッチレーザーよりも更に短いピコ秒、フェムト秒の時間幅のパルスを生成する手法として、モード同期法がある。1.2.2項でレーザーの縦モードについて説明したが、通常のレーザーでは、複数の縦モードがばらばらの位相関係で発振している。図5に示すように、共振器内の全ての縦モード同士の位相を揃えると（図の点線位置で位相が同

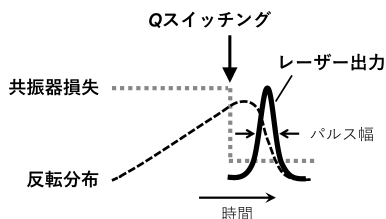


図4 Qスイッチ発振動作の概念図。

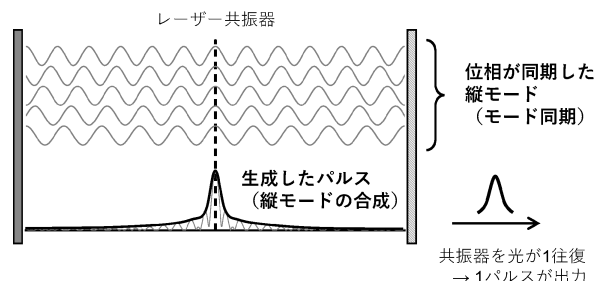


図5 モード同期の概念図。

期）、モードの合成によってパルスが生成され、これをモード同期という。モード同期状態では共振器中で1つの光パルスが存在しており、これが共振器を往復する度に部分反射ミラーから出力される。共振器内の光の周回時間に合わせて共振器損失や利得を変調し、全ての縦モードを同時に発振させることでモード同期が達成される。例えば、光路長が1.5 m（往復3 m）のファブリ・ペロー共振器の場合、モード同期パルスの繰り返し周波数は約100 MHzとなり、これに合わせて音響光学変調器などで能動的に変調する手法を強制モード同期という。それに対して、光強度が高くなると受動的に共振器損失が小さくなる可飽和吸収機構を設けることで、周回時間に合わせて変調する手法を受動モード同期という。

モード同期法における可飽和吸収機構には、共振器の周回時間よりも速い回復が求められ、半導体可飽和吸収ミラー（SESAM）などの可飽和吸収体やカーレンズ効果、非線形偏波回転などの非線形光学効果が用いられる。生成されたパルスのピーク付近のみで透過率が高くなるため、可飽和吸収体を通過するたびにパルス幅は短縮する。しかし、共振器中に分散媒質（波長で屈折率が大きく変わる物質）が有る場合、群速度分散によってパルス幅が伸びてしまい、位相同期も達成されない。そのため、負の分散特性を持つ材料を挿入したり、チャープミラーやプリズム等で分散を補償するのが一般的である。

モード同期パルスは、多数の縦モードを合成したものと述べたが、レーザー光に含まれる縦モードの数が多いほど、合成したパルスの時間幅は短くなる。また、光のスペクトル幅とパルス幅の間には不確定性の関係が成立し、スペクトル幅が広いほど理論的に生成可能な最短パルス幅（フーリエ限界パルス幅）は短くなる。例えば、中心波長800 nm、スペクトル幅200 nmのTi:sapphireレーザーを仮定した場合、フーリエ限界パルス幅は約5 fsとなる。一方、中心波長1064 nm、スペクトル幅0.5 nmのNd:YAGレーザーでは、フーリエ限界パルス幅は約3 psとなるため、フェムト秒パルスを得ることは不可能である。

1.3 レーザーの分類と特徴

1.3.1 レーザーの分類

代表的なレーザーの種類とその発振波長を図6に纏めた。現代のレーザーは、遠赤外線からX線までの発振波長、単一光子からペタワットまでの出力、アト秒から連続波までのパルス幅を網羅しており、多様性に富んでいる。以下、

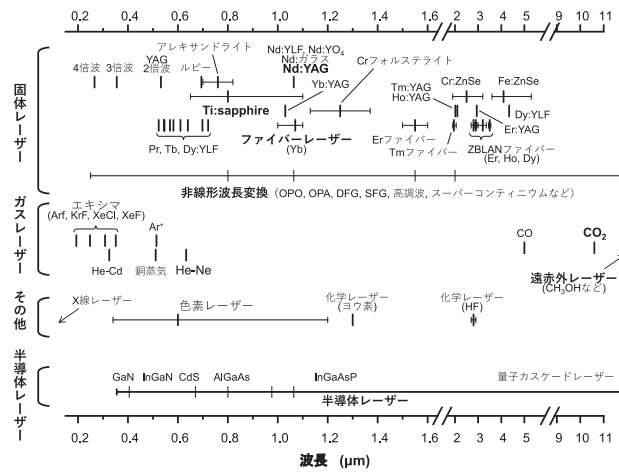


図6 代表的なレーザーの発振波長.

固体レーザーを中心に、ガスレーザー、半導体レーザーに大きく分類し、それぞれのカテゴリにおいて特に代表的なレーザーについて、発振器構成を例示しつつ特徴を解説する。

1.3.2 固体レーザー

固体レーザーは、利得媒質に固体材料を用いた主に光励起のレーザーであり、透明な結晶やガラス母材に、発光中心となる希土類金属もしくは遷移金属イオンをドープしたものが一般的である。近赤外波長のものが最もメジャーで、波長1μm近傍で発振するNd:YAG, Yb:YAG, Yb:ガラスファイバーレーザーや、波長800nmのTi:sapphireレーザーがよく知られており、小型で大出力を得ることができる。

・Nd:YAGレーザー

イットリウム・アルミニウム・ガーネット(Y₃Al₅O₁₂)にネオジム(Nd³⁺)を添加したNd:YAG結晶を媒質としたレーザーで、励起波長は808nm、発振波長は1064nmである。高出力固体レーザーとして最も普及しているレーザーで、CW動作でkW級出力のものや、ナノ秒Qスイッチ動作でジュール級のパルスエネルギーのものが製品化されている。非線形光学結晶を使った第2高調波:波長532nm, 第3高調波:355nm, 第4高調波:266nmの発生も可能であり、レーザー分光計測、プラズマ発生などの学術用途のほか、レーザー加工などの産業用途にも幅広く用いられている。Nd:YAGの第2高調波レーザーは、後述するTi:sapphireレーザーの励起光源としても知られている。

Nd:YAGレーザーの励起光源は、これまでは、安価で高出力なキセノンフラッシュランプがメジャーであったが、寿命が短く、スペクトルが広帯域なため吸収効率が低いという欠点を持つ。そのため、近年では、より長寿命かつ吸収波長で選択的に励起可能なLDが励起光源に選ばれつつある。図7は、単純な構成のLD励起、及びフラッシュランプ励起Nd:YAGレーザーの概念図である。主に、レーザービームと同軸方向に励起する端面励起方式と、ロッドの側面から励起光を入射する側面励起方式に分けられる。

高出力QスイッチNd:YAGパルスレーザーの構成の一例を図8に示す。励起光源のフラッシュランプ、及びYAG

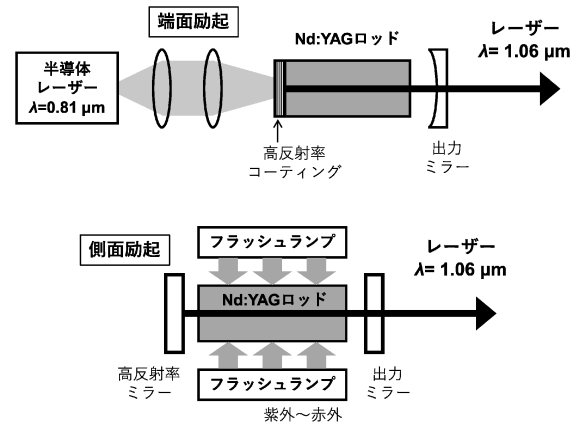


図7 LD及びランプ励起Nd:YAGレーザーの概念図.

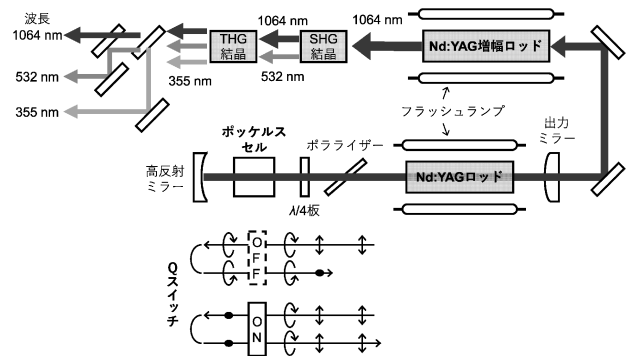


図8 QスイッチNd:YAGレーザーの構成の一例.

ロッドは、熱負荷を軽減するために循環水で冷却される。高反射ミラー/出力ミラー間がレーザー共振器(発振器)となっている。電気光学効果を利用したポッケルスセルと1/4波長板、ポラライザーを組み合わせることで高速なQスイッチとして機能する。スイッチング原理を理解するため、ポッケルスセルがONのとき、OFFのときの光の伝搬と偏光方向を図の下部に載せた。発振器のQスイッチパルスは、第二のNd:YAGロッドで増幅される。その後、温度制御された非線形光学結晶で第2, 第3高調波を発生して出力する。非線形結晶には、KTP, KDP, DKDP, LBO結晶などがよく用いられる。

著者の所属する核融合科学研究所においても、Nd:YAGレーザーが随所に用いられている。図9は、同研究所の安原亮氏がウイスコンシン大学と共同開発した、プラズマ計



図9 核融合科学研究所・安原氏の開発した高繰り返しで高出力なNd:YAGレーザーの外観.

測用の高繰り返しNd:YAGレーザーの外観である。20 kHzもの繰り返し周波数で、1 Jを超えるパルスエネルギーでの出力を実現した。大型ヘリカル装置 (LHD) におけるトムソン散乱計測は、従来 30 Hz の繰り返し周波数で行われていたが、このレーザーを導入することで、50 μs の時間分解でのプラズマ温度、密度計測が新たに可能になった[21]。

・Ti:sapphire レーザー

熱伝導に優れたサファイア (Al₂O₃) 結晶にチタン (Ti³⁺) をドープしたTi:sapphire結晶は、広い吸収・発光スペクトルを有する。波長514 nmのアルゴンイオン (Ar⁺) レーザーや 532 nm のNd:YAG レーザー等で励起し、中心波長は 800 nm のものが一般的だが、波長 660~1180 nm に亘って連続的に発振が可能である。利得帯域が極めて広いため、超短パルス化に適しており (1.2.5項参照)、フェムト秒時間分解分光、非線形光学、白色光発生、テラヘルツ波発生などの研究に用いられる。また、高いピーク出力に達することから、プラズマ発生やアブレーション加工にも実用化されている。固体レーザー特有の耐久性を有しながら、波長可変性にも優れており、近年は色素レーザーに代わる存在となっている。また、最近、光励起半導体レーザー (OPSL) を励起源としたTi:sapphire発振器も登場している。

図10は、カーレンズモード同期Ti:sapphireレーザー発振器の一例である。モード同期の原理は1.2.5項で述べた通りである。ここでは、可飽和吸収機構として非線形光学効果のひとつであるカーレンズ効果を採用している。凹面鏡対を用いたZ型 (もしくはX型) 配置にすることで、結晶におけるモード径を小さくすることができる。これにより、非線形性の高いTi:sapphire媒質内でカー効果が発現し、光強度が高いタイミングで屈折率が増加して光が収束する。このカーレンズ効果発現時のみ光が透過するように、共振器中にスリットを配置することで、モード同期が達成される。カー効果が誘起されると、局所的な屈折率増加 (位相速度低下) に伴ってパルス後方に位相が引き寄せられる (チャープする) 自己位相変調が生じる。ここに、前述した群速度分散の影響が加わると、パルス幅が著しく伸びるため、プリズム対による補償を試みている。屈折率が低い (速度が速い) ほど、第二のプリズム内をより長く通過するように配置することで、短いパルスを保つことができる。Ti:sapphire結晶は、反射損失を無くするため、プリュスター角にカットされており、プリュスター入射で生じた収差はZ型配置による収差で相殺できる。

モード同期 Ti:sapphire レーザー発振器で生成した繰り返し数 10~100 MHz のフェムト秒パルスは、図11のような再生増幅器で増幅し、kHz オーダーの繰り返し周波数で使

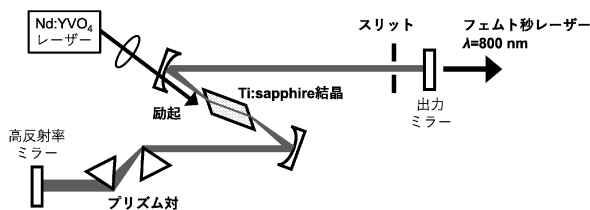


図10 カーレンズモード同期Ti:sapphireレーザーの構成。

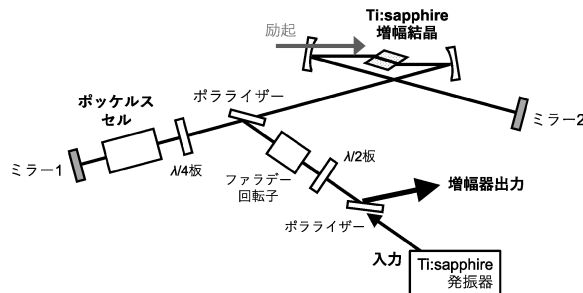


図11 再生増幅 Ti:sapphire レーザーの構成。

用されるのが一般的である。再生増幅器とは、増幅媒質を配置した共振器内で種光パルスを多数回往復させて、十分なエネルギーまで増幅したのち、共振器外に取り出す手法である。図中のミラー1と2が共振器のエンドミラーで、図8のQスイッチ機構と同様にして、ポッケルスセル、1/4波長板、ポラライザーの組み合わせが高速スイッチとして機能する。励起光源には、QスイッチNd:YAGレーザーなどが一般的に用いられる。この再生増幅器の前にパルス幅を ns 程度まで引き延ばすストレッチャーを設け、長いパルス幅 (低いピーク強度) のまま mJ まで増幅した後、再びパルス幅をフェムト秒に圧縮することで、媒質の破壊限界を超えた増幅が可能になる (チャープパルス増幅法[7])。

・ファイバーレーザー

一般的に「ファイバーレーザー」というと、イッテルビウム (Yb³⁺) 添加石英ガラス光ファイバーを媒質とした高出力レーザーのことを指す。励起波長は 900~980 nm で、波長 1030~1100 nm において発振可能である。励起用 LD の高出力化に伴って、ファイバーレーザーの出力も飛躍的に向上しており、連続波 10 kW を超えるものが製品化されている。ファイバーレーザーはビーム品質に優れるため、YAGレーザーやCO₂レーザーに代わる主要な産業加工用光源になりつつある。

Ybファイバーレーザー発振器の基本構成を図12に示した。数 100 W 出力の LD 複数台からの励起光を励起コンバイナー (もしくは WDM カップラー) で結合し、高出力励起する。Yb 添加した利得ファイバーの両端には、ファイバー・ブラッグ・グレーティング (FBG) と呼ばれるレーザー波長 1070 nm のみを反射するミラーがファイバー内に加工されており、これが共振器ミラーの役割を果たす。ファイバーレーザーは、小型・軽量化が容易で、バルク結晶と比較して比表面積が大きく放熱性に優れるため、熱負荷が低く、キロワット級の連続波出力をメンテナンスフリーで得ることができる。一方で、コア断面積の制限により光強度が比較的高くなるため、非線形光学効果が発現し

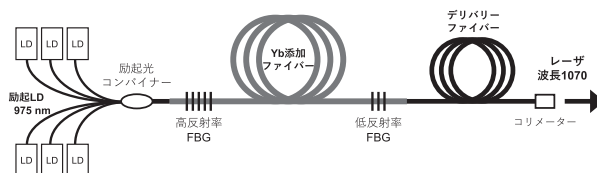


図12 Yb ファイバーレーザーの基本構成。

やすく、高パルスエネルギー動作には不向きである。しかし、非線形効果を利用したモード同期が容易であることから、ErやYbを活性元素としたnJ程度のパルスエネルギーのフェムト秒ファイバーレーザーが数多く研究されている。

今日の光ファイバー通信では、1.5 μm 波長帯の光信号が使われるが、伝送損失を補償するための増幅機構にエルビウムファイバー増幅器 (EDFA) が利用されている。これも図12の構成を基本としており、共振器FBGを持たず、LD励起したEr添加ファイバーの一端から1.5 μm 信号光を結合し、増幅した信号をもう一端から取り出すものである。

・中赤外固体レーザー

波長2 μm を超える中赤外レーザーの開拓、高出力化が激化している。2 μm 帯では、ツリウム (Tm^{3+}) やホルミウム (Ho^{3+}) を発光中心とした固体レーザーやファイバーレーザーが普及し始めており、kWに迫るものも報告されている[22]。3 μm 帯では、波長2940 nmのEr:YAGレーザーが医療分野に導入されているほか、30 W連続波出力のErフッ化物ファイバーレーザー[23]や10 Wに迫るEr系固体レーザー[24]が著者らによって開発された。波長3~5 μm は、分子の赤外吸収線が多数存在する「指紋領域」に当たり、大気中での減衰も小さいため、センシング用光源の発展が予想される波長領域である。

クロム (Cr^{2+}) や鉄 (Fe^{2+}) などの遷移金属を添加したカルコゲン化物固体レーザーは、中赤外域に広帯域な利得を有し、高出力化や短パルス化の研究が盛んである。Cr:ZnS/ZnSeレーザーは波長2~3 μm 、Fe:ZnS/ZnSeレーザーは波長4~5 μm で高出力発振可能で[25]、レーザー加工、リモートセンシング、高次高調波発生などの用途に有望である。

・可視光固体レーザー

近赤外波長が話題の中心であった固体レーザーだが、より長波長側の中赤外域への開拓が進むと同様に、より短波長側の可視域で直接発振する固体レーザーの研究も近年盛んになっている。プラセオジウム (Pr^{3+})、テルビウム (Tb^{3+})、ジスプロシウム (Dy^{3+}) などの希土類を活性元素に用いたフッ化物結晶は、青~赤に亘る可視域で発振可能である。特に、青色LD励起のPr:YLFレーザーは、青(波長約490 nm)、緑(520 nm)、橙(600 nm)、赤(640 nm、720 nm)に代表される複数波長において高効率で発振する[26]。従来、可視光固体レーザーは、主にYAGレーザーの高調波発生によって得られていたが、直接発振レーザーでは非線形波長変換を必要としないため、より高効率かつ高出力な可視レーザーの候補である。また、1段の波長変換(SHG)のみで紫外線レーザーが得られるため[27]、YAGの第3、第4高調波レーザーに代わる光源となるだろう。また、非常に小型かつロバストなシステムで狭線幅な紫外レーザー出力が得られるため、色素レーザーに代わる励起光源として、レーザー誘起蛍光(LIF)法などプラズマ診断への適用が将来期待される[28]。

1.3.3 ガスレーザー

ガスレーザーは、利得媒質にガス分子(原子)を用いた主に放電励起のレーザーである。分子の密度が低い

ため、大出力は得にくい。放電手法やガス圧などを最適化することで高出力化も可能である。励起状態のガス分子は無輻射緩和が遅いため、ガスレーザーのスペクトル線幅は一般的な固体レーザーよりもはるかに狭くなり、可干渉性に優れているのが特徴である。固体レーザーでは発振の難しい紫外~可視や、赤外波長域のレーザーが揃っている。

・He-Ne レーザー

出力こそ10 mW未満と低いが、様々な場面において馴染みの深いレーザーである。HeとNeの混合ガスを媒質としており、放電励起されたHe原子がNe原子と衝突することで、励起状態となったNe原子が発光中心となる。最もメジャーな発振波長は632.8 nmで、波長安定性が高く、コヒーレンスに優れているため、干渉計測、レーザー測長、レーザー顕微鏡、ホログラフィー再生光源など幅広い用途で用いられている。小型・軽量でビーム拡がり小さく、視認性にも優れるため、固体レーザー開発におけるアライメント用マーカーとして重宝される。

・Ar⁺レーザー

放電によってイオン化したアルゴンを媒質としており、10 Wを超える高出力発振が可能である。代表的な発振波長は、514.5 nmと488.0 nmで、干渉計測のほか、ラマン分光用途やTi:sapphireレーザーの励起光源として用いられる。大電力と冷却機構を要するため、比較的大型で高価である。同じく希ガスレーザーであるクリプトン(Kr^+)レーザーも同様の原理で発振し、赤色の高出力コヒーレント光を得ることができる。

・エキシマレーザー

励起状態の原子と基底状態の原子が結合した励起二量体(excimer)を媒質とするレーザーで、高圧の希ガスとハロゲンの混合気体を放電励起することで発振する。代表的なものでは、ArF、KrCl、KrF、XeCl、XeFレーザーが挙げられ、図6に示すように、波長150 nm~350 nmの深紫外領域においてサブジュール級の高出力パルスを発振する。フォトリソグラフィーを用いた半導体微細加工プロセスにおける露光光源として用いられており、社会的重要性の高いレーザーといえる。その他、パルスレーザー堆積法の光源や、レーシック手術にも利用される。

・炭酸ガスレーザー

炭酸ガス(CO_2)分子が発光中心であり、炭酸ガスにヘリウム、窒素を混合して封入したガス管を放電励起し、遠赤外領域で発振する。主要な発振波長は10.6 μm であるが、9.6 μm の発振線もよく知られている。連続波及びパルス動作で高出力発振が可能で、ガス圧や流量、媒質長さの最適化で、kW級の出力に達する。可視・近赤外レーザーと比較して材料吸収の大きな波長であるため、加工優位性が高い。そのため、様々な材料を対象とした加工用光源として産業応用されている。

著者の所属する核融合科学研究所では、炭酸ガスレーザーを光源に用いたレーザー干渉法によるプラズマ密度計測が為されている。同じく、同研究所で干渉計測用光源として採用されている遠赤外アルコールレーザー(詳細は後述)においても、炭酸ガスレーザーが励起源に用いられる。

・遠赤外線レーザー

ここで、核融合科学研究所において電子分布密度計測用レーザー干渉計に用いられている遠赤外メタノール(CH₃OH)レーザーについて紹介する[29]. 装置の概略を図13に示した. この遠赤外レーザーの発振波長は119 μmで、周波数は2.5 THzであり、テラヘルツレーザーともいえる. 干渉計利用のために双子型のレーザー構成となっており[28], それぞれの出力は約100 mWである. CH₃OHレーザーは、光での励起が一般的で、励起光源には出力約100 Wの連続波CO₂レーザーを使っている. このCO₂レーザーは、共振器の光軸方向に放電を起こす縦放電方式を採用しており、安定的な連続波発振動作が可能である. 更に大きな出力が要る場合は、より高いガス圧で、光軸に垂直方向に放電する横放電方式が取られることが多い. なお、CO₂管、CH₃OH管のいずれも循環水による冷却がなされている. CO₂レーザー共振器の回折格子ミラーを調整することで、CH₃OHの吸収が大きい9P(36)発振線にチューニングする. さらに、出力ミラーをピエゾステージ(図中①)で光軸方向に移動させ、共振器長を制御することで、CO₂レーザーの縦モード周波数(発振波長)をCH₃OH吸収線と一致させる. CH₃OHレーザー共振器の入力ミラーには、励起光結合のための空孔が開いているが、戻り光防止のためにミラー中心からわずかに位置が外れている. 出力ミラーには、シリコン基板上にドーナツ状の金がコーティングされたものを用いており、ミラー中心部で出力結合している. 双子型のいずれの出力ミラーも自動ステージ(図中②, ③)に接続されており、独立した共振器長調整が可能である. まず、プローブレーザーの出力をフィードバックし、プローブ共振器長を制御して、レーザー出力を安定化する. それと同時に、プローブ/ローカル光のヘテロダイン信号を取得し、ビート周波数のフィードバックによってローカル側共振器長を制御し、周波数を安定化している.

1.3.4 半導体レーザー

半導体レーザー(LD)は、固体の半導体結晶を媒質としているが、励起手法やエネルギー構造が通常の固体・ガスレーザーと大きく異なるため、分けて考えられる. 図14に典型的なダブルヘテロ構造のLDの構成図を示す. p型クラッド層/活性層/n型クラッド層の組み合わせは、例えば、AlGaAs/GaAs/AlGaAsなどがある. ここに電流を流すと、n型クラッド層の伝導帯の電子が、同時にp型クラッド層の価電子帯の正孔が、それぞれ活性層の伝導帯と価電

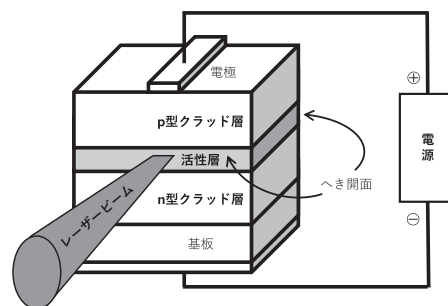


図14 ダブルヘテロ構造半導体レーザーの概略図.

子帯へと効率的に注入される. 活性層に生成された電子-正孔対が再結合することで、活性層からの発光が生じるが、これを誘導放出で増幅する点は、固体レーザーと同じである. 図14のような半導体結晶のへき開面を共振器ミラーとしたLDが一般的であるが、基板に対して垂直に出力される面発光レーザーも存在する.

一般的な固体・ガスレーザーと比較して、LDは、発振スペクトル幅が広く、ビーム品質が悪いものが多い. しかし、分布帰還型(DFB)の縦単一モードLDや、光励起半導体レーザー(OPSL)などのビーム品質に優れた単一横モードのLDも存在しており、用途や価格に応じた光源選択が可能である.

半導体の構成元素の組み合わせや比率を変えることで、発振波長を自由に選択できるのもLDの特徴である. 出力を問わなければ、紫外から中赤外に亘る全域で市販のLDが揃っている. さらに、量子カスケードレーザーなどの特殊形態のレーザーも含めると、遠赤外領域までを連続的に網羅できる. 紫外~近赤外の低出力LDは、固体レーザーと比較して小型かつ安価なため、ブルーレイなどの光学ドライブ、光ファイバー通信、レーザープリンターなど身近な装置に多数実装されている. Nd:YAG, Yb:YAG, Ybファイバー, Erファイバーレーザーに代表されるLD励起固体レーザーには、波長810 nm, 910 nm, 980 nm, 1480 nmのLDが主に使われており、アレイ化やスタック化技術によってキロワットを超えるものが入手できるようになった. このLD高出力化に伴って、固体レーザー出力も飛躍的に向上しており、LD技術の発展がレーザー分野全域に与える影響は計り知れない.

参考文献

- [1] W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering Sixth Revised and Updated Edition* (Springer Science + Business Media, Inc., New York, 2006).
- [2] 住村和彦, 西浦匡則: 解説 ファイバーレーザー - 基礎編 - (オプトロニクス社, 2011).
- [3] 西澤典彦: 光学 42, 438 (2013).
- [4] M.J. Weber, *Handbook of Laser Wavelengths* (CRC Press LLC., Boca Raton, 1999)
- [5] A. Ikesue *et al.*, J. Am. Ceram. Soc. 78, 1033 (1995).
- [6] 池末明生: レーザー研究 47, 420 (2019).
- [7] G. Mourou, Opt. Commun. 56, 219 (1985).
- [8] 小栗克弥: レーザー研究 45, 205 (2017).

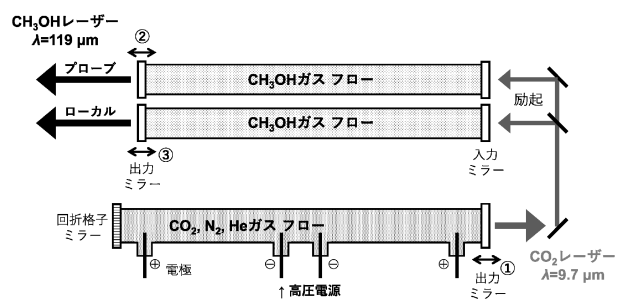
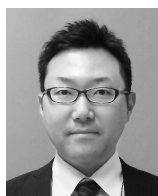


図13 干渉計測用遠赤外レーザーの概略図.

- [9] 美濃島薫：レーザー研究 **46**, 354 (2018).
- [10] 菅 博文 他：電気学会論文誌 C **125**, 187 (2005).
- [11] レーザー学会：レーザーハンドブック第2版（オーム社，2005），I編.
- [12] 霜田光一：レーザー研究 **29**, 28 (2001).
- [13] 霜田光一：レーザー研究 **38**, 10 (2010).
- [14] 霜田光一：光学 **34**, 634 (2005).
- [15] 日本学会議 提言「パワーレーザー技術と高エネルギー密度科学の量子的飛躍と産業創成」（2020）.
- [16] 黒澤 博：ゼロから始めるレーザーの教科書（オプトロニクス社，2017），第7章.
- [17] 多田邦雄 他：ヤリイヴェーイェー 光エレクトロニクス基礎編（丸善出版，2010），第4章.
- [18] 岡本 卓：光学 **43**, 211 (2014).
- [19] H. Uehara *et al.*, J. Opt. Soc. Am. B **28**, 2436 (2011).
- [20] T. Taira *et al.*, IEEE J. Quantum Electron. **46**, 277 (2010).
- [21] R. Yasuhara *et al.*, *Laser Aided Plasma Diagnostics* (Whitefish, September 2019).
- [22] T. Ehrenreich *et al.*, *SPIE Photonics West* (San Francisco, January 2010).
- [23] H. Uehara *et al.*, Opt. Lett. **44**, 4777 (2019).
- [24] R. Yasuhara *et al.*, Opt. Express **28**, 19000 (2020).
- [25] H. Uehara *et al.*, Opt. Lett. **45**, 2788 (2020).
- [26] G. Huber *et al.*, Opt. Lett. **39**, 3193 (2014).
- [27] R. Yasuhara *et al.*, Opt. Lett. **45**, 5558 (2020).
- [28] プラズマ・核融合学会：プラズマ診断の基礎と応用（コロナ社，2006），第5章.
- [29] 中山和也 他：プラズマ・核融合学会誌 **87**, 801 (2011).



うえ はら ひ より
上原日和

自然科学研究機構 核融合科学研究所 ヘリカル研究部 高温プラズマ物理研究系 助教。2012年，東京工業大学大学院理工学研究科・博士後期課程修了（博士（工学））。2012年～北海道大学電子科学研究所，2016年～大阪大学レーザー科学研究所を経て，2019年4月より現職。主に中赤外波長の高出力固体レーザー，ファイバーレーザーの開発を行っています。開発した光源を利用したレーザー加工やセンシングなどの応用研究や，半導体微細加工技術を駆使した新規光学デバイス開発にも興味が有ります。共同研究大歓迎です。