

より長波長の励起による Nd ドープ DPSS レーザの改良

イェルク・ニューカム、フロリアン・レンハート

より長い波長ウィンドウで発光する半導体レーザー励起モジュールにより、DPSS レーザの熱負荷の問題が劇的に軽減され、パワースケーリングが簡素化される。

Nd:YAGやNd:YVO₄といったネオジム(Nd)ドープの結晶は、商業的に成功を取めた最も初期の固体レーザーの1つだった。長年にわたり、そうしたレーザーの中の結晶利得媒質は、フラッシュランプによって光学的に励起されていた。これらのレーザーは、非常に効率が低かった。フラッシュランプが幅広い連続波長を生成するのに対し、Ndイオンは急峻なバンドとラインからなる吸収スペクトルを持つことが、その一因だった(図1)。その結果、励起光の大部分が熱として無駄に消費され、結晶を積極的に水冷する必要がある。その後、長寿命でパワースケーリング可能な半導体レーザーの成熟によって、LD励起固体(Diode Pumped Solid State: DPSS)レーザーの画期的な進歩がもたらされた。DPSSレーザーで

は、Ndの強吸収ピークに合わせて、波長808nmで発光するように設計された半導体レーザーが励起源として用いられる。

Qスイッチ方式である場合が多いDPSSレーザーの高い信頼性と長い寿命は、医療器具の製造から集積回路のパッケージングに至るまでの、増加の一途をたどるさまざまな産業用途を支えてきた。それらの用途では、最適化された微細加工を達成するために、近赤外基本波長の周波数2倍化や3倍化によって緑色出力やUV出力を生成することが、ますます多く行われるようになってきている。それらのDPSSレーザーのほとんどが端面励起型である。ファイバ結合の半導体レーザーを使用することにより、半導体レーザーをレーザー共振器から遠く離して配置することができる

ため、保守が簡素化され、レーザーヘッドの熱要件が緩和される。ファイバデリバリーにより、DPSSレーザーにおける励起と望ましいTEM₀₀モードの間の良好なモード重複も可能になる。

DPSSレーザーの熱問題

しかし結局は、レーザー結晶そのものの中で本質的に生成される熱が、より高い出力に加えてTEM₀₀ビームを必要とする用途を対象とした、端面励起型のDPSSレーザーの開発の制約となった(良好なビーム品質も、効率的な第2高調波発生[SHG]と第3高調波発生[THG]に必須である)。例えば、半導体レーザーと比べると、808nm励起のDPSSレーザーは、驚くほど効率が低い。その大きな理由の1つが、大きな量子欠陥である。量子欠陥とは、808nmの励起光子と1064nmのNd出力の間エネルギー差のことである(専門的に言えば、808nmの励起によってNdは、効率の低さで知られる四準位レーザーとして動作する)。また、利得結晶は効率の悪さ故に熱を持つが、水冷冷却を実施したとしても、結晶の大きさには排熱的な限界がある。加えて、加熱によって熱レンズ効果が結晶に生じ、レーザー出力の変化に伴ってその焦点特性が変化し、(図2)出力モード品質が低下する。このモード品質の低下は、SHG/THG結晶の波長変換効率の

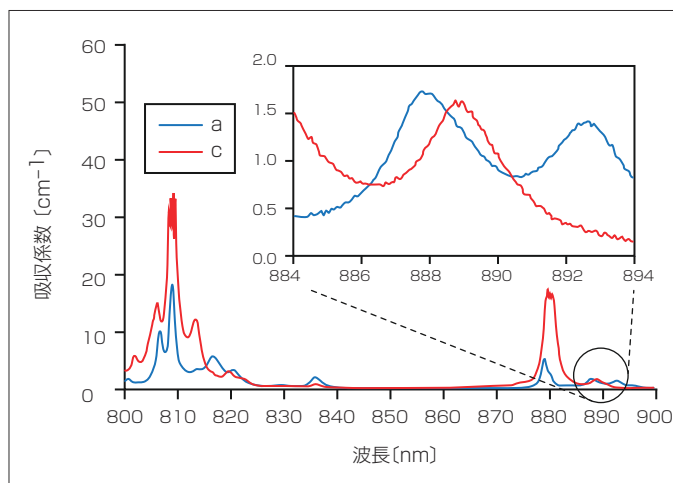


図1 Nd:YVO₄の近赤外吸収スペクトル。長年にわたり、レーザー設計者は808nmにおける強ピークでの励起のみを対象としてきた。結晶は通常、b軸に沿って励起される。グラフ内の2本の曲線は、それぞれa軸とc軸に偏光された光に対応している。

低下を招く。また、加工機として応用する場合、一部の切断、穴あけ、スクライビング加工で達成可能な精度とエッジ品質が悪くなる場合がある。

加熱は励起入力面付近で局所的に生じ、励起光は非常に強く吸収されてしまうために、結晶の奥深くまで浸透しない。この現象は、結晶を両端から励起することにより、複雑さと引き換えに部分的に緩和することができる。それでも、一般的なDPSSレーザで使用する結晶の長さはわずか8mm以下で、出力は限られ、許容できるビーム品質は1つの最適な出力レベルでしか得られない。この性能は、ますます多くの用途において、スループットと材料の厚みに悪影響を与える。

量子欠陥の低減、三準位の効率

高いビーム品質とともにさらに高い出力を求める市場需要を受け、原点に立ち返ってレーザの設計が行われるようになった。その取り組みから誕生したのが、図1に示されている、880nm付近の比較的弱い吸収ピークによってNdを励起することに基づくソリューションである。具体的には、878.6nm、885nm、888nmの3つの「新しい」波長でNdを励起する半導体レーザ励起モジュールが、現在提供されている。体積系ブラッググレーティング(Volume Bragg Grating: VBG)を、パッケージ化された半導体レーザモジュール内に組み込むことによって、波長がその都度目標値に維持されるため、半導体レーザの温度を正確に制御する必要はない。これらの長波長のすべてが、808nmという従来の励起波長に勝る複数のメリットを備え、特に888nmには、偏光関連のさらなる重要なメリットがある。

これらの長波長を使用することの1

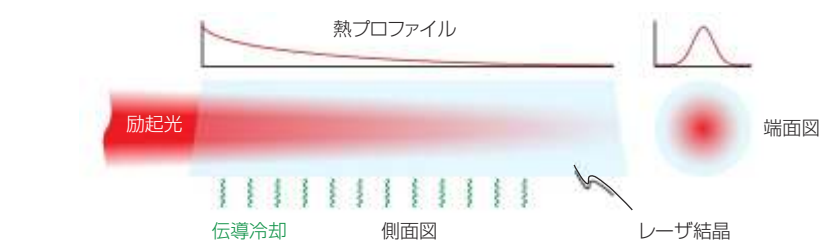


図2 端面励起は、高いモード品質を達成できるが、吸収光による熱レンズ効果が、高いビーム品質の達成を阻む要因になる可能性がある。

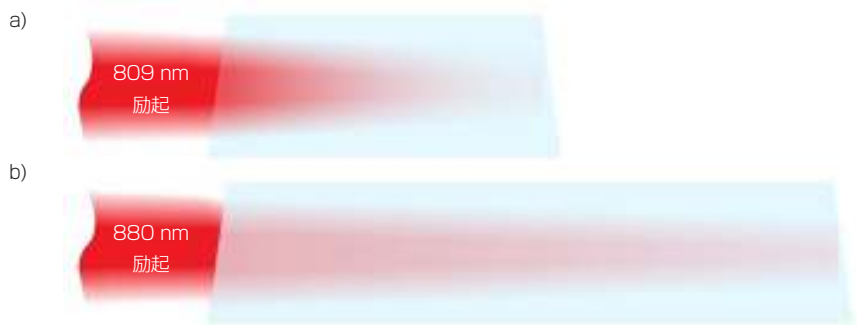


図3 Nd:YVO₄結晶に吸収された励起出力の拡散は、励起波長に依存する。(a)は、809nmで短い結晶を励起した場合の浅い侵入深さを示している。(b)は、880nmで長い結晶を励起した場合に、結晶の長さ全体にわたって吸収が生じている様子を示している。

つめのメリットは、808nm励起と比べて50%以上という、量子欠陥の大幅な低減が得られることである。その直接的な結果として、これに伴う望ましくない不要熱も、同じだけ減少する。また、DPSSレーザは、808nm励起による四準位よりも本質的に効率の高い、準三準位レーザとして動作するようになる。要するに、より少ない廃熱量で、より多くの励起出力がDPSS出力に変換されることになる。

吸収率の低下、励起体積の増加

直感に反するように見えるかもしれないが、880nmにおけるNd吸収ピークが808nmよりもはるかに低いことに起因する、重要な効率上のメリットがもう1つ存在する。吸収強度の低下により、利得結晶のはるかに奥深くまで励起光が浸透可能になることだ(図3)。これにより、励起体積が増加する。励起体積とは、吸収される光の体積のこ

とであり、すなわち、生成される不要熱の体積である。

従って、長波長励起によって発熱量は低下し、その熱はより大きな体積に拡散されるようになる。この組み合わせによって、より長い結晶(例えば30mm)の使用が可能になる。長い結晶は、高出力でも安全に励起でき、熱レンズ効果も抑えられるため、より広い出力範囲にわたって高いビーム品質が得られる。その最終結果として登場したのが、特に緑色とUV域における、新世代のQスイッチDPSSレーザである。これらのレーザは、多数の微細加工用途でさらに優れた効果を発揮するために必要な出力を備える。

888nmの最適励起波長

レーザ結晶は通常、さまざまな理由に基づき、b軸に沿って励起される。808nmと880nmで、a軸とc軸の吸収特性は大きく異なり、図1に示されて

いるように、光がc軸に沿って偏光される場合のほうが、かなり吸収率が高い。問題は、ファイバ供給の励起光が、本質的に非偏光であることだ。そのため、ファイバからの励起光を結晶内へと直接集光する場合は、結晶ドーピングや結晶長を、励起出力や目標とするDPSSレーザーの動作特性に合わせて、完全に最適化することができない。

結晶をa軸の吸収に対して最適化すると、半分の光は、結晶の奥深くまで浸透しすぎてしまう。逆に、結晶をc軸の吸収に対して最適化すると、半分の光は、十分に深くまで浸透しない。この難題を解決するために、ファイバからの光は通常、偏光ビームスプリッタキューブによって分割される。「誤った」偏光状態にある50%は、利得結晶の反対端に送られ、波長板によって偏光軸を90°回転させることにより、すべての励起出力が同じ強度で吸収されるようにする。この励起機構は、ファイバを動かすことによる偏光状態の変化に非常に敏感である。偏光状態が変わると、結晶における励起光の吸収度合いが大きく変化して、DPSSレーザーの出力が不安定になる恐れがある。

しかし888nmでは、図1に示されているように、a軸とc軸に沿った偏光に対する吸収特性が非常によく似ている。また、その小さな差は、Nd吸収スペクトルのこの部分では、波長によってほんの少ししか変化しない。その結果、励起光をファイバから直接結晶内に結合することが可能で、中継光学部品や波長板を使用する必要はなく、両端を励起するために必要な集光光学部品やダイクロイック光学部品も不要である。加えて、ファイバの動きに対する感度は大幅に低下し、無視することができる(コヒレント社は、888nmでのDPSSレーザーの励起に関する特許[

特許番号:8913644]を保有しているが、コヒレント社が提供する、これらの新しい波長で励起する各半導体レーザーモジュールには、ライセンスが自動的に含まれる)。

888nmにおける、小さな波長変化に対する吸収強度の依存性が低いという性質には、もう1つの非常に重要なメリットがある。厳格な温度制御を含む、励起源に対するアクティブな波長ロック機能が、安定したDPSS出力を得るためにもはや必須ではなくなることだ。これによって、レーザーが簡素化され、部品コストや組み立てコストが削減される。(VBGによるパッシブな波長安定化は、レーザーの性能向上のための効果がある。半導体レーザーの駆動電流の変化に伴う波長のずれが最小限に抑えられて、さらに広い性能範囲を得られる)これらの特性によって導かれる結果として、DPSSレーザーの出力は、888nmにおける半導体レーザー駆動電流に直線的に比例する。これは、変調や、出力の変更が必要となるさまざまな用途に対して、非常に貴重な性質である。

シングルエミッタ構造

コヒレント社は最近、「FACTOR」というファイバ結合の半導体レーザーモジュールの新しいファミリーを発表した。878.6nm、885nm、888nmの3つすべての新しい波長が選択できる。この製品ファミリーには、検討に値するいくつかの技術的側面がある。まず、シングルエミッタ方式に基づくことである。各モジュールに一連のシングルエミッタが含まれており、そのすべて

が共通の基板に搭載されており、すべてが1つの永久付着された出力ファイバに結合するように配置されている。なぜシングルエミッタなのかというと、既に説明したように、効率が長波長励起の主要なメリットであり、それは、出力とビーム品質の向上、線形の変調、コストの削減、カーボンフットプリントの削減による環境に優しい製造の実現につながる。熱的に隔離されたシングルエミッタの使用は、半導体レーザーの非常に効果的な冷却を可能にする。これによって、温度劣化や寿命の短縮を心配することなく、半導体レーザーをその最大出力近くで動作させることが可能になる。それは、必要なエミッタ総数の最小化につながり、DPSSレーザーメーカーの部品コストの削減につながる。また、シングルエミッタ出力は、ファイバへの結合が容易である。高度なファイバ結合コンセプトと組み合わせることによって、FACTORシリーズの新しいモジュールは、卓越した結合効率を実現し、DPSSレーザーの効率をさらに向上させる。

シングルエミッタ構造に基づくファイバ結合励起モジュールの製造に、課題がないわけではないが、コヒレント社は垂直統合によって、そのすべての課題を解決している。コヒレント社は、モジュールの組み立てとテストだけでなく、半導体レーザーの製造に使われるウエハやVBGフィルタ、デリバリファイバなど、すべての主要部品を社内開発している。これらの部品の製造を完全に制御下に置くことにより、高い性能に加えて高い信頼性と長い寿命を確保している。

著者紹介

イェルク・ニューカム (Joerg Neukum) は、独コヒレント社 (Coherent) の高出力半導体レーザー担当製品マーケティングディレクター、フロリアン・レンハート (Florian Lenhardt) は、同社製品ライスマネージャー。e-mail:joerg.neukum@coherent.com URL: coherent.com