

2014年4月10日

京都大学

浜松ホトニクス株式会社

ワット級高出力フォトニック結晶レーザー：世界に先駆けて実現 世界初、面発光型レーザーにより高ビーム品質でワット級の高出力化を達成

京都大学（大学院工学研究科電子工学専攻教授、光・電子理工学教育研究センター長、野田 進）と浜松ホトニクス株式会社（本社 浜松市中区、代表取締役社長、^{ひるま} ^{あきら} 晝馬 明）らのグループは、次世代型半導体レーザー光源とも言うべき、フォトニック結晶⁽¹⁾レーザー素子の開発を進め、狭放射角（ $<3^\circ$ ）を維持したまま、光出力 1.5 ワットというワット級の室温連続動作に世界で初めて成功しました。さらに、このレーザーを用いたレンズフリーでの直接照射による燃焼デモンストレーションなど、高輝度・高出力動作の有用性を実証しました。このような高ビーム品質かつワット級動作の実現は、ものづくり日本を支える光製造への応用に向けた重要な礎となる成果であるとともに、波長変換、光励起、バイオ、分析などの幅広い分野へも応用の裾野が広がる成果と言えます。

本研究成果は、英国の学術誌 Nature Photonics 誌の電子版に 4 月 14 日（日本時間）に出版され、誌上では 5 月号に掲載されます。なお、本研究の一部は、独立行政法人科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業 ACCEL プログラム、文部科学省最先端の光の創成を旨としたネットワーク研究拠点プログラム等などの支援を受けました。

■ 開発の背景と意義

半導体レーザーは、これまで、波長域の拡大や高速化といった、波長軸、時間軸での性能向上により、特に情報通信・光記憶分野において広く使われ、社会に大きく貢献してきました。今後の光技術は、情報通信や光記憶のみならず、製造技術（ものづくり）、医療技術・生命科学への展開が期待されますが、このような応用においては、従来の半導体レーザーでは十分になされていないパワー（光出力）を軸とした研究開発が肝要です。特に、材料加工（3次元加工含む）を含むレーザーを用いた製造技術、すなわち光製造の需要は極めて大きいと言えます。

一般に、半導体レーザーの光出力は、その光出射面積に比例して最大値が決まります。しかしながら、従来型の半導体レーザーでは、図1に示すように、光出射面積を大きくすると、励起電流の増加とともに、光出射端におけるレーザー光の波面が変形して出力ビームの形が著しく劣化し、いくら集光しても光スポットが大きくならざるを得ず、この結果、光製造には不向きとなるといった問題が生じます。

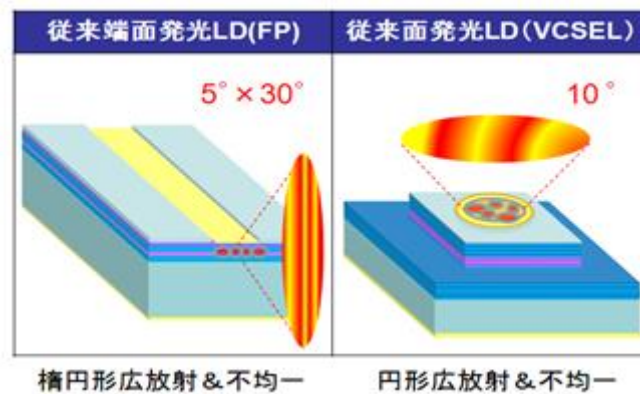


図1 従来型の半導体レーザー(LD)において、出射面積を大きくしたときの課題。左に示した端面発光 LD および右に示した面発光 LD(VCSEL と略される)においても、光出力の増大とともに、出射端面におけるレーザー光の波面が乱れ、いくら光出力が大きくなっても、出力ビームの形状が劣化するため、集光時に光スポットが大きくなり、光加工（製造）には不向きとなります。

そのため、パワーを必要とする各種の金属・材料加工などの製造技術用途では、大がかりな気体レーザー（CO₂レーザー）や、複数の半導体レーザーで励起した固体レーザーやファイバーレーザーが主に用いられています。図2は、各種のレーザー光を用いた光製造の現状を纏めたものですが、金属加工などの成熟分野においては、我が国の炭酸ガスレーザーが優位に立っていますが、精密切断、溶接、マーキングといった発展分野では、海外のファイバーレーザー等が大きく市場を伸ばしており、我が国の相対地位が揺らいでいるのが現状です。ここで、もし、小型・安価・低消費電力動作という高いポテンシャルをもつ半導

体レーザー単体で、大面積の出射面積においても波面の乱れを最小限に抑え、高出力化・高光密度化を実現することが出来れば、我が国の光製造を一変させ、海外勢に押されつつある光製造業の起死回生の一手となる可能性を秘めています。



図 2 レーザー加工応用分野における技術シェアを示した図。金属切断等の成熟分野において日本は炭酸ガスレーザー等により、技術的な優位性を持っていますが、現在発展が著しい精密切断、溶接、マーキング等の分野においては、ファイバーレーザーにより海外が優勢となっています。

1999 年に、京都大学の野田教授のグループは、フォトニック結晶と呼ばれる人工的な光ナノ構造を用いることで、ビーム品質の劣化を最小限に抑え、半導体レーザーの高出力化が可能になりうるという基本概念を提案するとともに、その基本実証に成功し、新たな可能性・機能性を次々と実現してきました。この間、多くの企業との産学連携研究により、高出力で高ビーム品質、単一スペクトル、高機能性を同時に実現する、「フォトニック結晶レーザー」の具現化と実用化に向けた取り組みを積極的に進めてきました。

その中でも、京都大学と浜松ホトニクスは、2007 年度より実用化を見据えたフォトニック結晶レーザーの連携開発に取り組んで来ました。その結果として、光出力 200mW (0.2W) のフォトニック結晶レーザーの実用化が、間もなく始まることを、発表させて頂きました (2013 年 9 月のプレス発表参照)。今回、デバイス構造および作製のさらなる高度化を推進することにより、ワット級の光出力をもつフォトニック結晶レーザーの実現に、世界に先駆けて成功しました。今回の研究成果では、光出力が 1.5W (CW⁽²⁾) で、ビーム広がり角が 3° 以内という優れたレーザー特性を達成し、レンズフリーによる集光なしの直接照射により紙の燃焼のデモンストレーションが出来るまでの高密度動作に成功しました。以下、本デバイスの構造、原理、特性について説明します。

■フォトニック結晶レーザーの構造・原理

デバイスは、図 3(a)に示すように、活性層と呼ばれる光増幅層の直下に、同図(b)に示すような、3 角形状の格子点を光の波長 (λ) の周期 ($a=\lambda$) で並べたフォトニック結晶を集積した構造をもちます。3 角形状の格子点は、言わば、微小な鏡として動作し、面内の 4 方向に伝搬する光がこの微小鏡により、反射・回折を繰り返し (同図(c))、フォトニック結晶面内に定在波を形成します。これにより、2次元の大面积に渡って、安定な共振作用を生み出すこととなります。(実際には、フォトニック結晶内部では、光波はブロッホ波で表され、フォトニックバンド構造のある特異点 (Γ_2 点と呼ばれる) において、 $2\pi/a$ の波数をもつ基本波および、その整数倍の波数をもつ複数の高次の波が、フォトニック結晶のもつ様々な回折効果により互いに結合し、定在波状態を形成することとなります。)

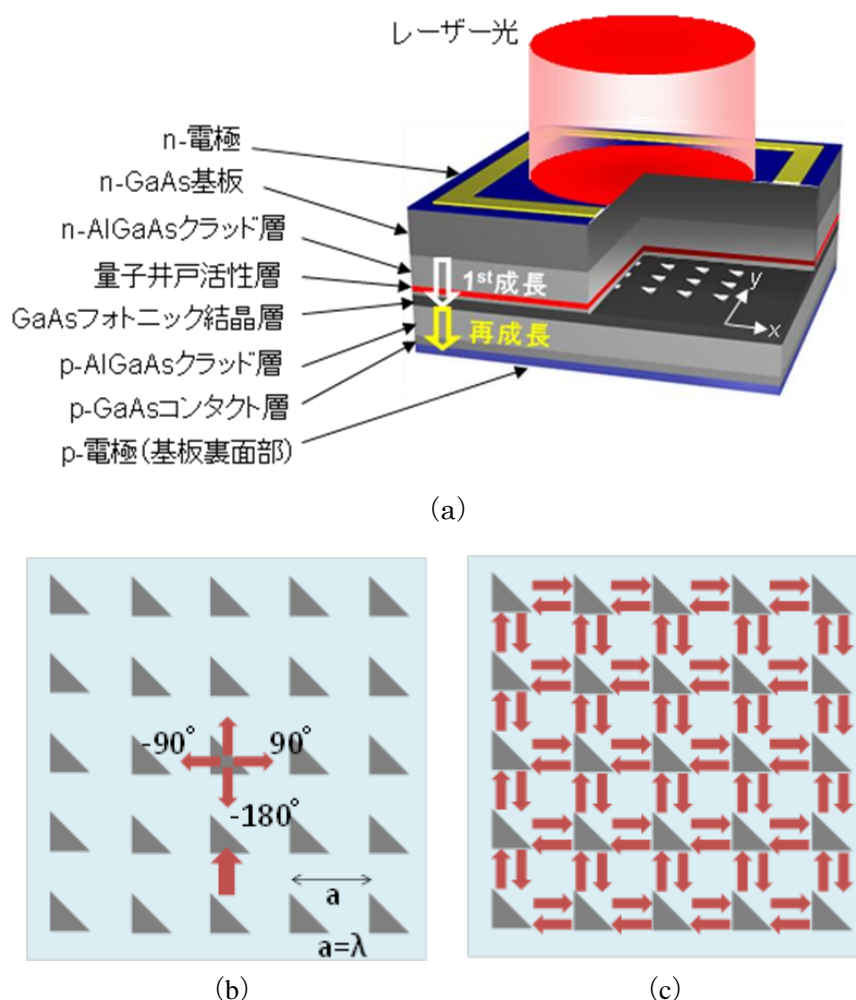


図 3. (a)フォトニック結晶レーザーの構造模式図。活性層と呼ばれる光増幅層の直下に、フォトニック結晶を集積した構造となっている。(b)(c)デバイス構造に埋め込まれたフォトニック結晶の構造。3 角形状の格子点を光の波長の周期で並べた構造をもちます。

こうして形成されたフォトニック結晶の大面積共振作用を利用することで、（電流注入により活性層に光増幅作用を生じさせると）レーザー発振が生じることになります。発振したレーザー光は、同じくフォトニック結晶のもつ面上方への回折効果により、外部へと放出されることになり、面発光出力が得られることになります。今回、特に、図 3(b)(c)に示した直角 3 角形の格子点構造を導入することが、レーザー発振に必要な電流を小さく保ちつつ、面発光出力を増大する上で、極めて有効であることを見出しました。

■ 有機金属気相成長法（MOCVD）によるフォトニック結晶構造の形成

図4(a)には、微細加工により、活性層近傍に形成した直角3角形の格子点形状の電子顕微鏡写真が示されています。同図(b)は、その後、有機金属気相成長法と呼ばれる結晶成長技術により、直角3角形のフォトニック結晶をデバイス内部に埋め込んだ後の断面電子顕微鏡写真を示しています（図(b)の写真では、結晶成長は、下方へ向かって行われていることとなります。）興味深いことに、結晶内部に空洞を残したままで、結晶成長が非常にきれいに行われていることが分かりました。この空洞は、構造解析から、直角3角形の基本構造の大枠を残しつつ、上下方向にも非対称性が導入されていることが分かりました。詳細な理論解析から、この結晶成長時に生じる空洞の上下非対称形状が、高出力化にとって好ましいことが分かりました。さらに、フォトニック結晶により上下方向に回折されるレーザー一射出光の内、裏面方向に出射した光を、図3(a)に示したp電極により、効率的に反射することで光出力をさらに増大する工夫をも施しました。

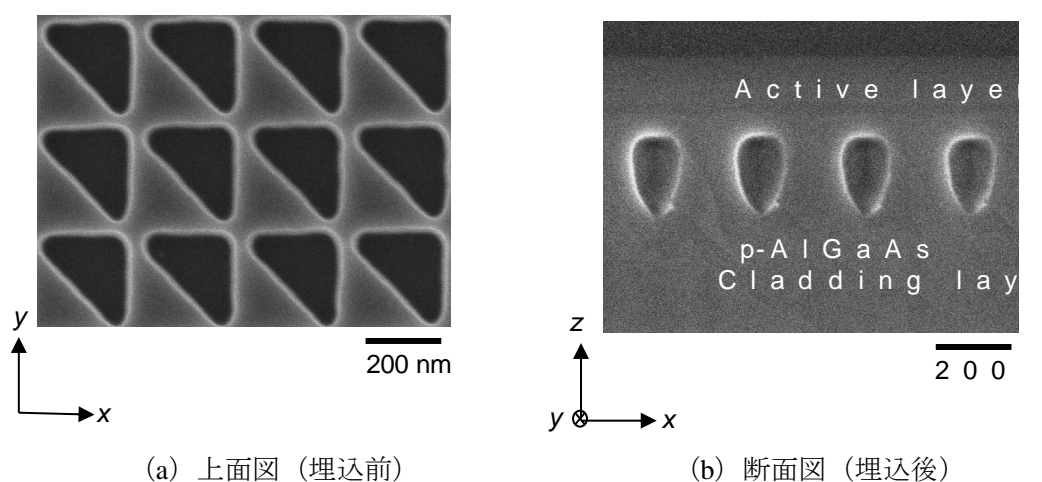


図 4. (a)微細加工により形成した直角 3 角形の基本格子構造をもつフォトニック結晶構造の電子顕微鏡写真。(b)有機金属気相成長法により結晶内部に埋め込まれた空洞フォトニック結晶構造。

■フォトニック結晶レーザーのレーザー発振特性

図 5(a)(b)に、室温連続動作における光出力特性と、発振後のスペクトル特性を示します。同図に示すように、1.5 W というワット級の光出力を得ることに成功しました。スペクトル特性から単一波長で動作していることも分かりました。また、図 6 には駆動電流 1.2 A における遠視野像を示しますが、ビーム広がり角は 1° 程度の狭い角度を示していることが分かります。電流値を更に増やすことで僅かながらビーム広がり角の増大がみられますが、それでも 3° 以下という極めて狭放射角の動作が得られることが分かりました。(なお、光出力 0.5 W 程度までは、レーザーのビーム品質の指標となる M^2 (エムスクエア)⁽³⁾ が 1.0 という特に高いビーム品質が得られることも分かりました。)

本レーザーでは、このような狭放射角の高輝度特性を生かすことで、レンズフリーの光学系を構築出来るという重要な特長をもちます。その一例として室温連続動作において、フォトニック結晶レーザーから出射したレーザー光を、ターゲットとなる紙へ、レンズを介さずに直接照射した様子を図 7 に示します。レーザー光を照射した直後に、紙の燃焼が確認されました。これは、従来の半導体レーザーでは極めて困難であり、本素子が高輝度であること、レンズフリーあるいは単純光学系での応用が可能となることを示しています。この特長を活かすことで、低コストでロバストなシステムの光源として、フォトニック結晶レーザーが好適となることを示しています。

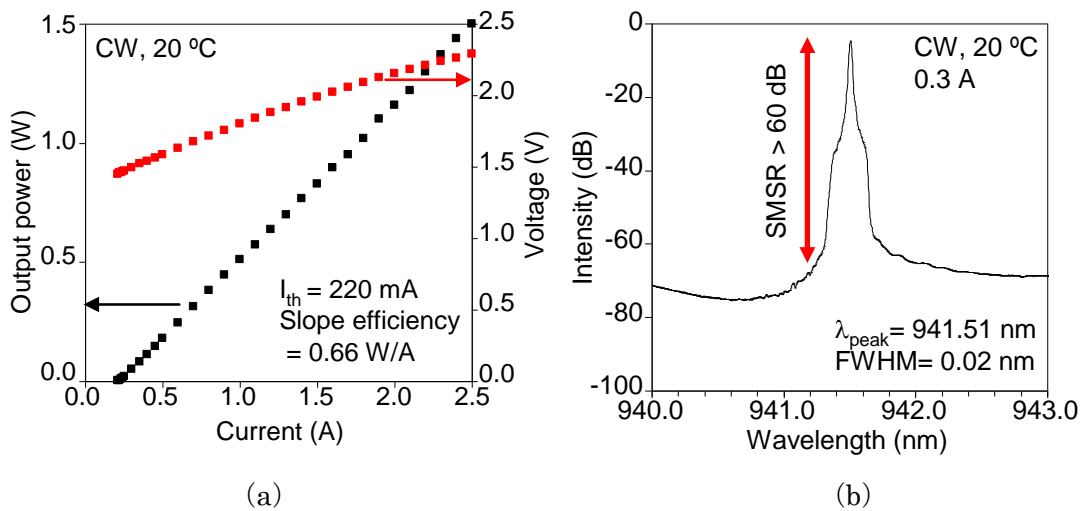


図 5. フォトニック結晶レーザーの発振特性：(a)電流—光出力特性および電流—電圧特性。ワット級の光出力が連続動作で得られていることが分かります。(b)スペクトル特性(線幅 0.02 nm 以下(測定限界))。

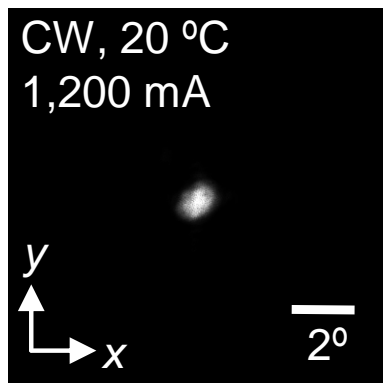


図 6 室温連続駆動における遠視野像。
駆動電流 1.2 A においてビーム広がり角
1° 程度と極めて狭いことが分かります。

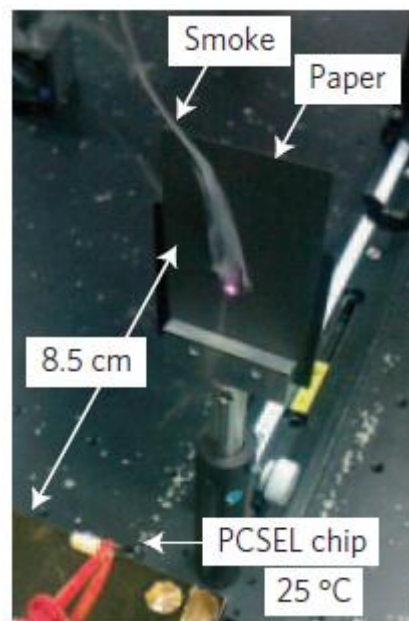


図 7 レーザーからの出射光を紙に直
接照射した様子。直ちに燃焼する様子
が見られました。

■ 研究成果の展望

今回のフォトニック結晶レーザーのワット級光出力の実現は、直接レーザー加工を始めとした光製造分野応用への礎となる研究成果であると考えられます。今後、本研究結果を基にしたさらなる高出力化により、現在ファイバーレーザーが用いられている金属の切断、溶接応用への置き換えが可能となり、さらには車体の金属加工などの広範なものづくり現場への応用展開が可能になると考えられます。

フォトニック結晶レーザーには、光製造分野以外にも図 8 に示した様な、ディスプレイに用いられる波長変換用基本波光源、バイオ・医療・分析分野に用いられる高解像度レーザー顕微鏡等の多くの応用が考えられます。同時に、狭放射ビームを活かしたレンズフリーの応用可能性も現れ、省コスト、高安定化につながります。以上のことから、フォトニック結晶レーザーは様々な分野への波及効果をもたらすと考えられ、半導体レーザーそのものにも大きな革命をもたらすことが期待されます。



図 8 フォトニック結晶レーザーの技術応用。フォトニック結晶レーザーの応用は、光製造以外においても波長変換、光励起、バイオ・分析など様々な分野への波及効果が考えられます。

<用語解説>

1. フォトニック結晶

光波長程度の寸法で、2次元のおよび3次元の周期的な屈折率分布をもつ光ナノ構造。様々な光制御機能をもたせることが可能。

2. CW

連続的に電流を流し、常に光出力が得られる状態を意味する。

3. M^2 (エムスクエア)

レーザーのビーム品質を表す指標。理想的なガウスビームでは1となるが、実際のレーザービームでは1より大きくなり、1に近いほどビーム品質が良いとされる。レンズで集光する場合の集光径に比例し、 M^2 が1であれば回折限界の微小スポットに集光が可能となる。また、 M^2 が1となる時、単一モード発振していることを示唆する。