レーザダイオード、可視光領域のほぼ全域に対応

ジョン・ウォレス

緑色、青色、赤色光を照射するレーザダイオードは単体で、または複数を組み合わせることによって、多様な用途に対して使用されている。ファイバ結合や波長安定化といった機能強化が加えられる場合が多い。

レーザダイオード（LD）は、世界で圧倒的に最も多く使用される種類のレーザで、光ファイバ通信や量産市場の分野で膨大な数が使用されている。可視光領域（一般的には400～700nmとされるが、人間の目は780nmまでの近赤外域を認識でき、強度が十分に高ければそれ以上も認識可能）で動作するレーザダイオードが、コンピュータのマウス、CD、DVD、ブルーレイの読み取り・記録装置、ローエンドのポインタといった一般的なデバイスにおいて使用されている。可視光LDは、科学や法医学などの分野を対象とするハイエンドの光源としても利用することができる。

最初に汎用用途に使われ出したのは赤色発光のLDで、1980年代に広く普及するようになった。代表的な例はCDプレーヤーである。今日の赤色発光LDは一般的に、AlGaInP（アルミニウムガリウムインジウムリン）をベースとし、可視光領域の端から最短で633nmのHeNe（ヘリウムネオン）レーザ線までの波長のものが提供されている。

GaN（窒化ガリウムアルミニウム）ベースのLDは、21世紀に入る頃に市場に登場し始め、LDで生成可能な色の範囲を大きく拡大した。これらのLDは、UV（紫外線）から500nm以上までの波長での照射が可能である。今日では、紫、青、または緑色光を照射するGaNベースの可視光LDを購入することができる。現時点では適切な半導体構造がないために、黄色や橙色で発光するLDは商用提供されていない。

小さなウィンドウ付きのCAN型パッケージに密封されているか、マルチエミッタバーとして構成されていることの多い可視光LDは、さまざまな構成で販売されている。ベアのLDや、複数のLDをバー状に配置した製品のほか、CAN型パッケージに収容される形で、シングルモードまたはマルチモードファイバのピグテール付きで、波長の安定化などが可能な堅牢なコンポーネントを構成するレーザモジュールとして、またはフォトニクスシステム全体の構成要素として、LDが提供されている。標準的なエッジ発光LDは、楕円錐状の拡散光を生成するため、直交方向で異なる形状に光線を拡大するコリメート光学部品が通常は必要になる。

可視光LDの製品や用途の数はとてつもなく多い。そのため本稿で紹介するのは、市場において絶えることなく選択肢を拡大し続ける製品のほんの一部にすぎない。

赤と緑と青の組み合わせ

赤、緑、青（RGB）で発光するLDを使用する最も顕著な利点の1つは、それらのレーザを組み合わせて、白色を含む、人間の目が認識可能な任意の色の光を生成でき、コンパクトで色域の広いレーザプロジェクターが実現できることである。

米パワーテクノロジー社（Power Technology）は、開発と商用化が行われる最新のLD波長である緑色を含む、UVからIR（赤外線）までの範囲の波長をもつLDとLDモジュールを製造している。同社で最大出力を誇る可視光LDは、1.6Wのマルチモード青色LDで、435～455nmの範囲の波長で提供されている。これに続く出力を持つ1.5Wの赤色発光LDは、663～677nmの範囲で提供されている（同社はこれよりも低出力のシングルモード可視光LDも提供している）。最長波長の緑色LDは、520nmで50mWを照射し、シングルモードである。

同社のLDモジュールは、すべてに丸い形状のコリメート光線を生成する光学部品が搭載されており、温度安定化、スペックル低減、長いコヒーレンス長（30m）といった、多様な機能を備える複数のバージョンが提供されている。スペックルを低減するバージョンには可動ディフューザが搭載されており、スペックルコントラストを1～10 msで2～3%にまで低減することができる。これは、干渉法、リソグラフィ、プロジェクションなどの用途に適した機能である。

レーザプロジェクションは、パワーテクノロジー社がかなり力を入れている分野である。同社は本年のフォトニクスウェスト（2月1～6日開催）で、プロジェクションレーザ「iLLUMINA」を発表した。

同社のセールスおよびエンジニアリング担当副社長を務めるウォルター・バージェス氏（Walter Burgess）によると、広い色域を実現するために特に選択された赤、緑、青のレーザ光源を搭載するという（**図1**）。「光源は一部半導体レーザをベースとしている。具体的には、GaNベースのLDでスペクトルの青色成分を生成し、AlGaInPベースのLDで赤色成分をカバーしている」と同氏は述べた。

図1　赤色発光LDと青色発光LDを搭載するRGBレーザプロジェクター「iLLUMINA」を用いて構成されたホームシアター。従来のプロジェクターよりも色域が広いこの製品は、映画館向けに規模拡大される予定である。（提供：パワーテクノロジー社）

このプロジェクターの現行版は、小さな画面サイズをターゲットとしているが、この次世代のiLLUMINAプロジェクターによって、まもなくより大きな画面に対応する予定だとバージェス氏は述べている。キセノンランプ搭載プロジェクターと比較した場合の利点としては、画面の輝度が高く、色域が広く、運用および保守コストが低く、動作条件が安全であることが挙げられる（キセノンランプは、有害なUV光線を生成し、1000℃を超える温度に達する）。

ファイバ結合で高出力を実現

高出力のLDとLDバーで知られる米ディラス・ダイオード・レーザ社（Dilas Diode Laser）は、多様な種類の青色および赤色発光LDを製造している。同社の副社長兼ゼネラルマネージャーを務めるスティーブ・パターソン氏（Steve Patterson）によると、シングルエミッタやバーの形状の赤色発光LD（635～689nm）や、ファイバコア径が100μm以上のファイバ結合パッケージなどを提供しているという。このような赤色レーザの応用分野としては、シネマプロジェクション、光線力学療法（PDT）、固体レーザやアルカリ蒸気レーザの励起などがある。

「赤色では、ディラス社で開発された定評のあるT-Bar（Tailored Bar）のコンセプトが採用されている」とパターソン氏は述べている。「638nmで50Wの偏光を、開口数（NA：Numerical Aperture）が0.22の400μmのファイバに結合するモジュールが製造されている。偏光合成を使用して、出力をさらに大きくしたり輝度を高くしたりして、200μmのファイバに結合することができる。得られたレーザ光源のビームパラメータ積（BPP：Beam-Parameter Product）を大きくすることによって、さらに出力を大きくすることができる」（パターソン氏）。

同社の青色LDは、200～400μmまたはそれ以上のコア径にファイバ結合され、波長は約450nmから405nmである。出力レベルは標準で10、25、40Wで、用途によっては200W以上にまで増加することができる。

「青色のスペクトル範囲では、シングルエミッタを採用し、サイドバイサイドで結合することによって、高いファイバ結合出力を実現している。このコンセプトに基づき、10Wと25Wの光線源が最近市場に投入された。このようなパッケージ型シングルエミッタ用にディラス社が開発したモジュール式合成のコンセプトにより、ファイバコアのサイズによっては出力を数百ワットにまで増加することができる」とパターソン氏は述べた。

多数の色を調整出力

多くの科学や産業の応用分野において、LDの光を外付けの電子部品や光学部品によって個々のニーズに適合するように制御することが求められる。独トプティカ・フォトニクス社（Toptica Photonics）の社長を務めるヴィルヘルム・ケンダース氏（Wilhelm Kaenders）は、「当社ではレーザダイオードそのものも提供しているが、『レーザダイオード』を『ダイオードレーザ』に転換することを目的として掲げている。つまり、光電子半導体サブコンポーネントを、電子的に実現された光学性能が成功の鍵を握るレーザツールへと転換する。コヒーレンスの追加や破壊、スペクトルの安定化、波長のアジリティの実現、ビーム品質の改善、レーザダイオードだけでは達成できない波長の達成によって、このツールを実現する」と述べる。

同氏は、トプティカ社が世界中からの多様なレーザダイオードを使用していることを明かした。その多くを、トプティカ社の関連会社である独イーグルヤード・フォトニクス社（Eagleyard Photonics）が供給している。「狭スペクトルであったり、単一周波数であったり、チューニング可能であったりする、単一空間モードのレーザダイオード（リッジ導波路のファブリペロー型

[FP：Fabry-Perot]）を扱っている」とケンダース氏は述べる。その多くに特殊なコーティングとパッケージが採用されており、トプティカ社では半導体光学アンプを使用して、空間ビーム品質を低下させることなく出力を数ワットレベルに増幅する場合があると同氏は付け加えた。

同社は、バイオフォトニクス、光データストレージ、半導体計測、レーザ冷却、シーディング、マスタリングといった多様な業界を対象に、画像処理、検出、マーキング、スキャン、テスト、検査用のコンパクトな産業および科学用途向け「ダイオードレーザ」システムを製造している。ケンダース氏は特に、「iChrome MLE」を紹介した。複数のレーザを内蔵する同モジュールは、405、445、488、515、640、690、780nmなどの波長のLDによって、3～4色を実現する（**図2**）。

シングルボックスのiChromeは、偏光を維持するファイバ出力、高度な受動的および能動的制御が可能な自動ファイバ結合、個々に制御可能なLD、完全なオン・オフ機能付き（オフ状態の光子がゼロ）の高速スイッチング、マイクロワット～ミリワットの出力レベルに対する高度なキャリブレーション、103を超える動的な出力設定範囲を持つ。デジタルまたはアナログのレーザ制御が可能で、能動的なスペックル制御や光フィードバック制御を備え、スペクトルクリーンアップフィルタも統合されている。

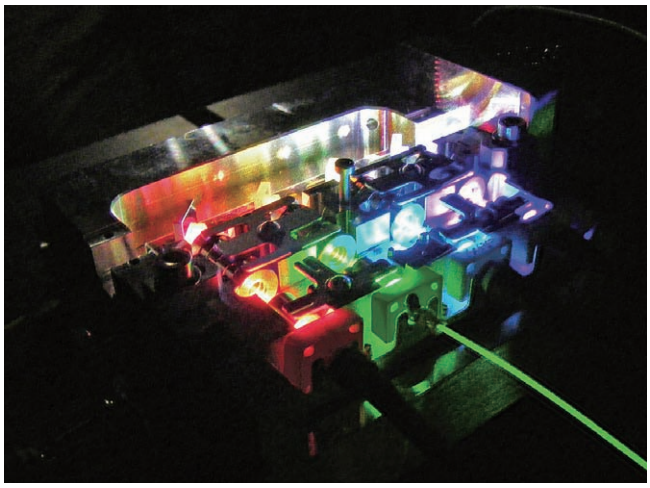

図2　偏光を維持するシングルモードファイバを通して、単一の「iChrome」ユニットでLDによる複数の色が照射される。（提供：トプティカ社）

可視光VCSELとアレイ

垂直共振器面発光レーザ（VCSEL：Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser）は、基本的な半導体ダイオードの形状はエッジ発光LDと同じだが、異なる構造を持つ。VCSELは基本的に、ウエハ上に作製された非常に薄いディスク型レーザで、上面が発光する。商用の電気励起のVCSELは、安価に製造することができ、自然な円形のビームを照射する。VCSELはアレイ状に配置することで、非常に高い出力を達成することもできる。

赤外線VCSELやアレイ（照明用の高出力アレイを含む）のメーカーとして最もよく知られている米プリンストン・オプトロニクス社（Princeton Optronics）は、赤色発光のVCSELやアレイも製造している（**図3**）。これらのデバイスは650～690nmの範囲の波長で照射し、出力レベルは数ミリワットから数十ワットまでにわたると、同社のCEOを務めるチュニ・ゴーシュ氏（Chuni Ghosh）は言う。

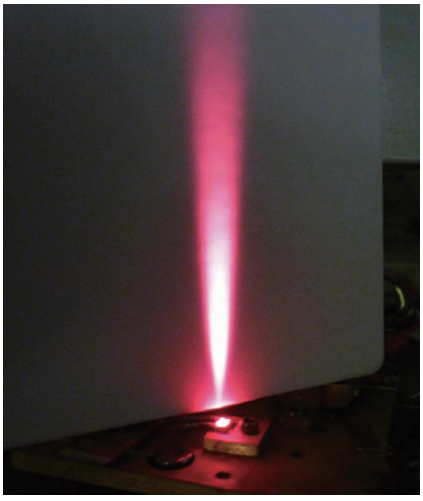

図3　赤色発光のVCSEL。これらのエミッタを組み合わせて、最大出力40 Wのアレイを構成することができる。（提供：プリンストン・オプトロニクス社）

「特にプリンストン・オプトロニクス社は、出力範囲が1～3mWのシングルVCSELデバイスと、650～688nmで光出力が10～40Wの高出力赤色VCSELアレイを開発している」とゴーシュ氏は述べた。「このようなアレイは、およそ100～1000個のシングルVCSELエミッタで構成される。エミッタは並列にすべて電気的に駆動される。アレイは熱伝導率の高いサブマウントに配置される。このようなアレイには、他の技術と比べて電力変換効率が高く、スペックルが低いという追加の利点もある」（ゴーシュ氏）。

赤色のVCSELやアレイの最も一般的な応用分野としては、医療、レーザプリンター、バーコードスキャナ、レーザベースのディスプレイなどがあるとゴーシュ氏は述べた。

マシンビジョンとライフサイエンス

米コヒレント社（Coherent）は、LDチップ、冷却システム、コリメートレンズ、ビーム調整光学部品、電源、制御電子回路で一般的に構成される可視光LD製品を製造している。LD以外のコンポーネントの目的は、ベアの状態のダイオードレーザから、高性能で再現性の高いレーザモジュールを構成する

ことである。シンプルなビームであるか、複雑な構造を持つかにかかわらず、出力安定性を高く、出力ノイズを低く、光学ノイズを低く、出力特性の均一性を高くすることを目的とする。ターンキーモジュールは、主にライフサイエンスとマシンビジョン（特に3D検査）という2つの成長著しい分野の用途向けに最適化されている。

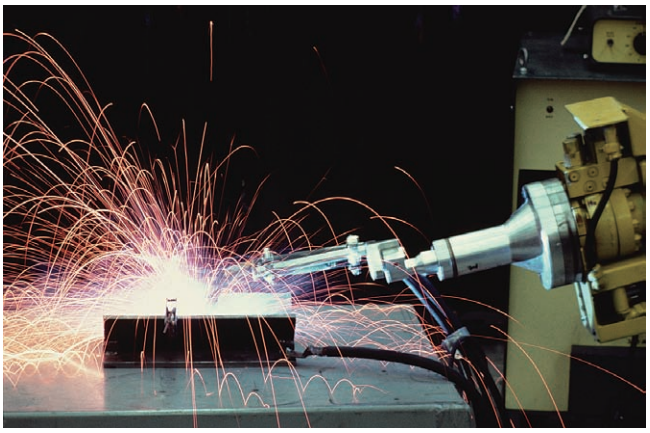

図4　赤色発光LDによって溶接線検査をインプロセス（リアルタイム）で行うマシンビジョンシステム（提供：コヒレント社）

コヒレント社のマシンビジョン担当製品ラインマネージャーを務めるウォレス・ラティマー氏（Wallace Latimer）によると、同社はマシンビジョン市場向けに、可視光領域全域（に加えて近紫外域と近赤外域）にわたる、数ミリワットから最大7Wまでの出力に対応するLD搭載モジュールを提供しているという（**図4**）。簡単なサイズ揃えや整列の用途に向けた非常にベーシックなラインプロジェクターから、高出力で均一性に優れた光線を生成するモジュールにいたるまで、多岐にわたる製品が提供されている。マシンビジョン向けのレーザ製品ファミリーには、特定の用途や顧客の要望に合わせて複雑なパターンやビーム形状を投影するモジュールもある。

例えば、「StingRay」シリーズの製品は、レーザヘッド（LDに加えて、コリメート、ライン生成、集光をそれぞれ行う光学部品を含む）と駆動電子回路で構成される。駆動電子回路は、独立したモジュールとするか、レーザヘッドに集積するかの選択肢がある。駆動回路（ドライバ）は、最大500kHzでのアナログおよびデジタル変調をサポートする。独立したスタンドアロンの駆動回路を選択すれば、95.1mmのレーザヘッド長を52.9mmにまで短くすることができる。

ラティマー氏によると、最大出力が200mW、出力ファン角度が1°～75°の範囲で450～830nmの波長に対応するという。ポインティング安定性は10μrad/℃未満、ラインの真直度は25mmで0.1%未満、ライン強度の不均一性は±5%と規定されている。量産用に特に設計されている新しい非球面のラインジェネレータを採用することで、このような性能が達成されている。レーザを軸外照射角度で使用する場合に生じる強度の偏りをなくす「動的ラインバランシング」が、すべてのStingRay製品でサポートされているとラティマー氏は言う。

一方、ライフサイエンスの分野をターゲットに、同社の「OBIS」レーザの一部にはLD（主に405、488、514、640nm）が搭載されている。これらの製品は高速な直接変調機能によって、顕微鏡検査における画像処理に対応する。小型であることと電気効率が高いことは、特にフローサイトメトリなどの分野で好都合だと、コヒレント社のマーケティング、OEMコンポーネント、計測器担当ディレクターを務めるマシアス・シュルゼ氏（Matthias Schulze）は述べる。この分野では、複数のレーザ波長を単一の計測器に組み込むことが、計測器の設計者やユーザーに求められる場合が多い。コヒレント社はこれに対応して、ビームコンバイナ「OBIS Galaxy」を発表している。OBIS Galaxyはシングルモードでシングルファイバの出力で、「プラグアンドプレイ」のマルチレーザ（すなわちマルチカラー）の合成を可能とする。

複数の種類の医療機器において最近、純粋な研究用途だけでなく臨床用途や、究極的にはポイントオブケア（POC：Point Of Care）に対応するものへと移行する傾向があり、コンパクトで非常に信頼性の高いOEMレーザ光源がこれまで以上に重要視されているとシュルゼ氏は言う。このようなレーザは、LEDベースの光源との競争に打ち勝つために、非常に費用対効果に優れている必要がある。LED光源の方が光源コストが低いためである（ただし、LED搭載システムの総システムコストは実際のところ、レーザよりも高くなる可能性があると同氏は指摘している）。コヒレント社はこれに対応して、本年のフォトニクスウェストで「BioRay」モジュールファミリーを発表した。これらの新モジュールは、急成長する小型POC機器市場の用途向けに、特にサイズが小さくコストが低いという特長を備える。

可視光レーザダイオードを提供する企業の全一覧については、Laser Focus World Buyers Guide（http://buyersguide.laserfocusworld.com/index.html）を参照してほしい。レーザおよび光源のベンダーは、その中のセクション（http://buyersguide.laserfocusworld.com/c/laser-sources-6632.html）で検索できる。

LFWJ