ますます緑色領域へと近づく窒化物ダイオード光源

ジェフ・ヘクト

レーザダイオードのスペクトルにおけるグリーンギャップは、ダイオードプロジェクタに必要な520～535nmの帯域で照射するように設計された、新世代の窒化インジウムガリウム（InGaN）系光源によって埋められつつある。この新しい技術によって、SSL（solid state lighting:固体照明）用の新しい緑色LEDも実現されている。

窒化物半導体の最近の進歩によって、ダイオード光源のスペクトルにおける重大な問題であるグリーンギャップが埋められつつある。実験室レベルでは、最大536.6nmまでの波長で連続波（CW: continuous wave）を発振する窒化物レーザダイオードが実証されている。その波長は、ピコプロジェクタの緑色光源として魅力的だが、人間の視感度が最も高い550nmよりはまだ短い。その一方で、緑色の窒化物LEDの進歩によって、SSLやその他の応用分野における新しい選択肢が実現されつつある。

緑色ダイオードは、1990年代に青色レーザダイオード向けに開発されたGaN技術に基づいている。インジウムを添加すると、GaNのバンドギャップが小さくなり、発振はより長い波長へとシフトするが、インジウム（In）原子はガリウム（Ga）原子よりも大きいため、添加しすぎると欠陥が生じる。この問題によって、長波長のInGaNダイオードの開発は488nmまでで数年間行き詰まっていたが、約28%のインジウムを含む良好なInGaNを成長させる方法が開発者らによって発見された。これは520nmの波長に対応する。現在では商用版が提供されており、その後も進歩が続いている。住友電気工業の半導体技術研究所とソニーの先端マテリアル研究所のチームは2012年7月、532.1nmまでの波長における100mWを超える連続波出力を実証し、緑色領域へのさらなるシフトを達成した。それよりも出力は低いものの、最大で536.6nmでの発振が確認されている。InGaN LEDも、さらに長い波長へと進化しており、緑色レーザダイオードと同様に、新しい応用分野の可能性を開拓しつつある。

色覚とプロジェクタ

緑色光は、人間の視覚スペクトルの中心にあるため、色の認識において重要である。レーザプロジェクタの色範囲、つまり「色域」はレーザ波長の間

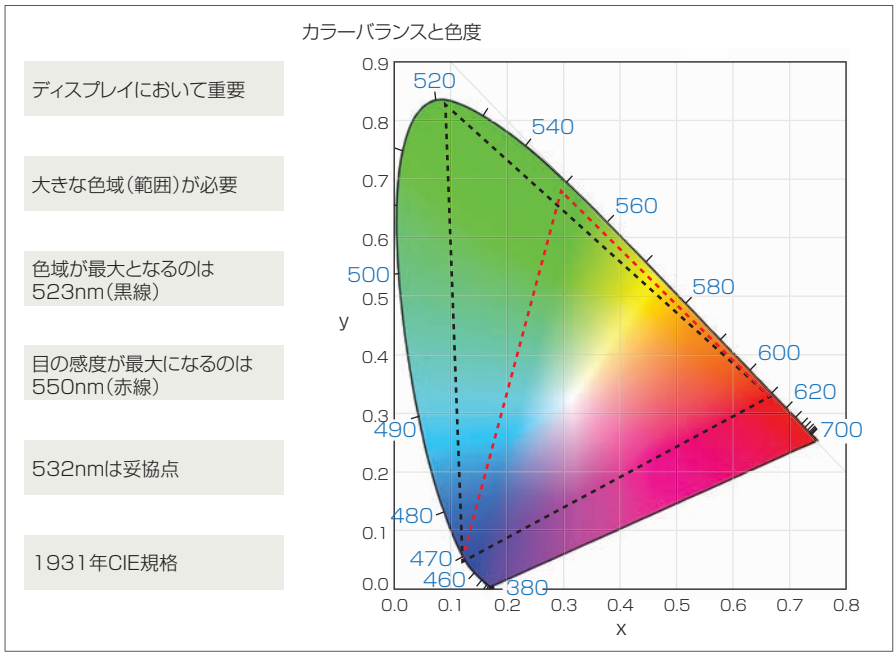


図1　3色レーザプロジェクタから得られる色域（WikipediaのUser: PARに掲載された画像を改変）。

隔に依存する。色域は、**図1**の色度グラフにおいて3つのレーザ波長の間を結ぶ線で囲まれた領域によって表される。グラフからわかるように、色域は、緑色の選択に大きく依存し、赤と青の波長にはほとんど影響されない。通常は520～535nmで発振する緑色光源が、最良の色域を実現すると考えられている。周波数を2倍にしたネオジムレーザはその範囲に該当するが、開発者らにはダイオードの方が好まれている。ダイオードの方が小型で効率が高く、直接変調が可能で、コヒーレンスが低いためにスペックルが低減されるからである。

ディスプレイにおいて問題を複雑にしているのは、目の感度が最大になる波長が550nmだという点である。つまり、開発者は、550nm光源でより高い効率を実現するか、より短い波長でできる限り優れた色を実現するかというトレードオフを強いられることになる。

窒化物ダイオードの材料の問題

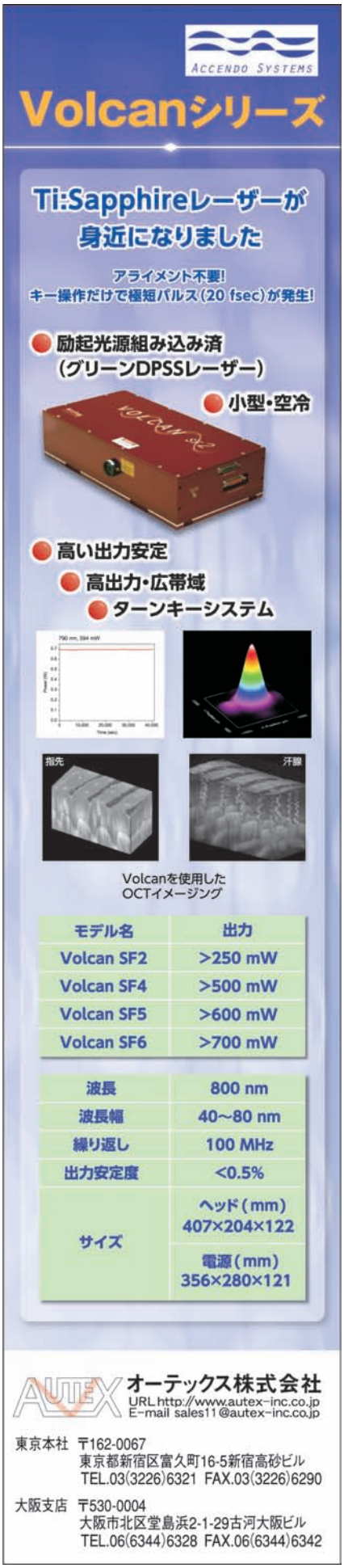
約515nmまでの波長で発振するInGaNレーザは、GaN基板の六角形のc面で形成される。c面構造は極性が高く、電界によって電子と正孔が隔離される。そのため、バンドギャップが小さくなり、同じ濃度のインジウムによって、より長い波長での発振が可能になる。ただしこの極性場では、再結合率とレーザ発振効率が低下してしまう。六方晶系構造の側面にあたる長方形のm面は非極性だが、この面でのダイオードの作製は非常に困難であるため、緑色レーザの実現に向けた研究はほとんど行われていない。

長波長の緑色レーザの実現を目指す一部の開発者らは、**図2**に示すようにc面と結晶軸の両方と45°の角度をなす半極性面で構造を成長させるという、代替案に取り組んでいる。半極性基板上でのダイオード成長は比較的容易で、極性基板上よりも効率が高い。電子と正孔の距離が近いためである。しかし、極性面で成長させたダイオードと同じ波長を実現するには、インジウムを数％多く添加する必要があり、それによって欠陥の問題が増大する。その詳細については、優れたチュートリアルが最近発表されている[(1)]。

極性面と半極性面のどちらを使用する方法にも「大きな課題が存在するが、それらの課題は解決できるものである」と、独オスラム・オプト・セミコンダクターズ社（OSRAM Opto Semiconductors）で半導体開発担当ディレクタを務めるウーヴェ・シュトラウス氏（Uwe Strauss）は述べる。「現時点ではまだ、どちらの方法が最高の製品を生成するかは見極められていない」と同氏は述べ、基板コストが製品コストにおける重要な要素であると指摘している[(2)]。

530nmを超える波長での発振

住友電工とソニーは2012年夏、半極性{20$\bar{2}$1}のGaN基板上でダイオードを成長させることによって530nmの壁を超えた。両社はこの基板によって、均一なInGaN量子井戸の成長が促進されることを発見した。ハイドライド気相成長（HVPE：hydride vapor phase epitaxy）法によって成長させたその半極性GaN基板は、貫通転位が表面積1cm^{2}あたり100万個未満で、抵抗率は十分に低いためにオーミック接触層を背面に配置することができる。作製されたレーザは、基板上に厚さ2～3nmの複数の量子井戸があり、構造には2μmのリッジ導波路がエッチングされている。また、へき開されたミラーファセットが500μmのキャビティを形成しており、その一端は50％の反射膜



によって覆われている。

両社はこの構造を用いて、525～536.6nmで発振する連続波InGaNレーザを開発した。出力は波長が短いほど高く、525.1nmでの167mWから、532.1nmでは106mWにまで低下した。532.1nmが、出力が100mWを超えた波長の最大値であった。535.7nmでの出力は75mWだったが、発振が確認された波長の最高記録となった536.6nmにおけるレーザの出力測定値については公表されていない[3]。

論文の筆頭執筆者である住友電工の高木慎平氏は、「スロープ効率を改善したことが、高い出力電力を達成した主要な要因だった」と電子メールに記している。しきい値電圧は4.7Vとこれまでの緑色レーザの6.4Vよりもかなり低く、ウォールプラグ効率は7.0～8.9%であると同氏らは発表した。

527～530nmで発振する半極性緑色レーザの寿命に関する関連論文では、さらに喜ばしい結果が報告されている。ソニーと住友電工のチームは、1000時間稼働させた結果から、50mWのレーザの寿命は5000時間を超えるはずだと推測した[4]。しかし、両社はこれらの結果の発表時に、製品化に向けた計画については何も述べなかった。

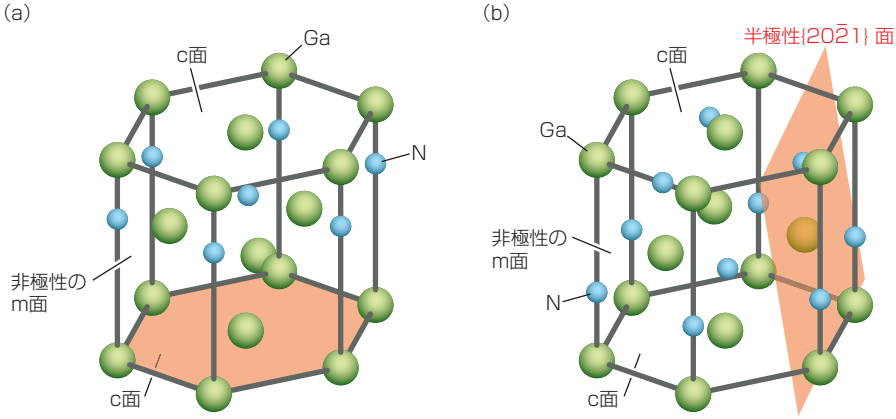


図2　InGaN結晶の面:(a)有極性で六角形のc面と、(b)住友電工とソニーのレーザで使用された半極性{20$\bar{2}$1}面(提供:ソニー)。

製品開発と応用分野

極性面で成長させたダイオードでは、この実験室での記録に匹敵する出力は達成できないが、パッケージ版はそれに近い性能を実現している。オスラム社は2012年7月、International Symposium on Semiconductor Light-Emitting Devices(半導体発光デバイスに関する国際シンポジウム)において、TO-38パッケージに収容された極性InGaNレーザダイオードによって、520nmで100mWを超えるシングルモード出力が得られたと発表した[5]。スロープ効率は0.65W/Aに達し、しきい値電流は約50mAだった。

TO-38パッケージを採用する商用のシングルモード緑色ダイオードがまもなく提供されると、オスラム社の民生レーザ担当ディレクタを務めるトーマス・ドバーティン氏(Thomas Dobbertin)は述べている。同パッケージは、フライングスポット型のピコプロジェクタ向

高輝度の黄色LEDを生成する新しいプラズマプロセス

黄色は、半導体光源では実現が難しいスペクトル領域であるため、スペクトルのその領域が着目されることはこれまでなかった。そんな中、カナダのミーグロー社(Meaglow)という小規模企業が2012年夏、新しいプラズマベースの成長プロセスを、黄色領域にバンドギャップを持つInGaN混合物に対して実験した。

「p-n接合部を非常にシンプルなものにして、何か得るものがあれば幸運だと思った」とミーグロー社の創設者であるスコット・ブッチャー氏(Scott Butcher)は述べている。その構造には、量子井戸がなく、その他の最適化も施されていない。同氏は、写真に示す高輝度の黄色発光を発見して、非常に驚いた。現在、この結果を解明するための取り組みが行われている。詳細についてはhttp://bit.ly/Ts53T3を参照してほしい。

図A　中央にあるミーグロー社の窒化LEDが高輝度の黄色の光を放射している。一部の光は金属線やその他の器具で反射している。かすかな青色の部分は、GaN接合部からの発光である(提供:ミーグロー社)。

黄色光源を求める声はそれほど大きくないが、黄色レーザは医療に使用されており、黄色LEDは固体照明の色を改善できる可能性がある。予期されていなかったこの明るい光は、新しい可能性を照らすことになるかもしれない。

けにライトエンジン内に密接して収容できるようにエッジが平らにされる。30mW版で510～530nm、50mW版で515～530 nmで発振する見込みである。オスラム社がこの範囲の波長を重視するのは、この範囲の波長によって、同社が主要な市場であると考えるプロジェクタの色域が大きくなるためだが、同社は他の応用分野に向けて、それよりも長い波長にも取り組んでいる。

緑色の窒化物LED

極性InGaNでは電子と正孔が隔離されているため、バンドギャップはやや間接的なものとなり、キャリアの隔離によって小さくなる。そのため、LEDは、インジウム量が同じであるレーザダイオードと比較して、より長い波長においてより低いエネルギー遷移で発振するとシュトラウス氏は述べる。つまり実用的には、極性LEDは、より長い波長において極性レーザよりも実現しやすいことになる。米カリフォルニア大学サンタバーバラ校（University of California at Santa Barbara）の教授で米ソラー社（Soraa）の共同創設者であるスティーブ・デンバーズ教授（Steve DenBaars）は、窒化物レーザとLEDの両方に取り組んでおり、半極性と非極性の両方のInGaNから緑色LEDを作製したと発表している。

緑色LEDは、光強度の低いピコプロジェクタに使用されているが、これが採用される大きな市場は、調整可能なRGB照明になりそうである。従来の固体照明では、単一の高輝度の青色LEDによって、可視スペクトルの残りの部分を埋める蛍光体を励起するが、装飾照明に対しては、広い範囲の色を生成するように調整可能な赤、緑、青のLEDを個別に用意するという代替手法がある。その1例がボーイング787ドリームライナーというジェット機の機内照明で、乗客にくつろぎの空間を提供するために色構成を変化させることができる。

NASAは、別の目的で国際宇宙ステーションにRGB照明を設置する計画である。つまり、宇宙飛行士がよりよく眠れるようにするためだ。宇宙では自然な概日リズムが損なわれるため、照明を昼間は青に近い構成にして宇宙飛行士らの注意を喚起し、夜間は赤に近い構成にして緊張をほぐせるようにしたいとNASAは考えている[6]。この発想は、十分な睡眠時間が取れないことの多い現代社会において、多様な別の用途にも適用できる可能性がある。

今後の展望

緑色レーザダイオードは急速に進化している。米パワーテクノロジー社（Power Technology）のウォルター・バージェス氏（Walter Burgess）は、緑色ダイオードが既に、人間の可視性が重要となるシステムにおいてOEM用途に適用されていると報告している。その1例が屋外での指示（ポインティング）である。ここでは、赤色レーザダイオードを使用すると、昼間はレーザスポットが見えない。周波数2倍化ネオジムよりも緑色ダイオードを選択する理由となるのは、「サイズ、重量、出力のすべてである」と同氏は述べている。

同社は現在、510nmまたは520nmの公称波長で最大50mWを出力するパッケージモジュールを提供している。520nmの方は非常に高い価格設定となっている。バージェス氏によると、同氏の顧客からは、日中の視感度が最大となる550nmに近い、さらに長い波長を求める声が挙がっているという。

その目標はまだ遠いが、この分野には多大な関心が寄せられている。競争は非常に激しく、研究内容を記者に明かしたくはないと考える緑色の窒化物レーザの開発者もいる。日立製作所の中央研究所は、室温においてBeZnCdSeレーザダイオードからの536nmでの50mWの連続波発振を達成した。しかし、II-VI族化合物の寿命が深刻な問題となっている[7]。また、急に浮上した研究報告で、今後の行方が不確定ではあるが、新しいプロセスによるInGaNからの高輝度の黄色発光が実証されている（別掲記事「高輝度の黄色LEDを生成する新しいプラズマプロセス」を参照）。

参考文献

(1) D. Sizov, R. Bhat, and C.-E. Zah, "Gallium Indium Nitride-Based Green Lasers," J. Lightwave Technol., 30, 679?699（Mar. 1, 2012）.

(2) U. Strauss et al., "Pros and cons of green InGaN laser on c-plane GaN," physica status solidi（b）, 248, 652?657（March 2011）; doi:10.1002/pssb.201046299.

(3) S. Takagi et al., "High-Power（over 100mW）Green Laser Diodes on Semipolar f20_21g GaN Substrates Operating at Wavelengths beyond 530nm," Appl. Phys. Expr., 5, 082102（2012）; http://dx.doi.org/10.1143/APEX.5.082102.

(4) K. Yanashima et al., "Long-Lifetime True Green Laser Diodes with Output Power over 50mW above 525nm Grown on Semipolar f20_21g GaN Substrates," Appl. Phys. Expr., 5, 082103（2012）; http://dx.doi.org/10.1143/APEX.5.082103.

(5) U. Strauss et al., "More optical output power of visible nitride laser diodes," 9th Intl. Symp. on Semicon. Light Emitting Devices—Program & Abstract, paper O3A00, Berlin, Germany（July 22?27, 2012）; http://issled2012.org/complete.pdf.

(6) G.C. Brainard et al., "Solid-state lighting for the International Space Station: Tests of visual performance and melatonin regulation," Acta Astronautica（2012）; http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2012.04.019.

(7) S. Fujisaki et al., "High-Power Continuous-Wave Operation of BeZnCdSe Single-Quantum-Well Green Laser Diodes," Appl. Phys. Expr., 5, 062101（2012）; doi:10.1143/APEX.5.062101.

LFWJ