赤色半導体レーザーとプロジェクター応用

宮崎 滋樹, 大瀬 憲寛, 佐藤 典文, 今西 大介, 伊藤 哲, 平田 照二

ソニー(株) コアテクノロジー開発本部 (〒243-0014 神奈川県厚木市旭町4-14-1)

Red Semiconductor Lasers and Projection Display Applications

Shigeki MIYAZAKI, Norihiro OHSE, Norifumi SATO, Daisuke IMANISHI,

Satoshi ITO, and Shoji HIRATA

Core Technology Development Group, Sony Corporation, 4-14-1 Asahi-cho, Atsugi, Kanagawa 243-0014

(Received October 2, 2007)

Red high power semiconductor lasers are expected to be used for the light source of laser projection display systems. We have achieved 6.6 W CW operation of red semiconductor array lasers at a wavelength of 640 nm. The energy conversion efficiency is as high as 29.7 % at 25 °C and the degradation rate after 1000-hours is less than 10 %. The uniform near field pattern has been obtained by applying index-guided structure for broad-stripe laser. We have developed projection display systems including hybrid light sources of UHP lamp and red semiconductor lasers, which can emphasize red color gamut. Speckle noise is dramatically reduced by moving screen that consist of gently rotating diffusion sheet and fixed diffusion plate.

Key Words: Laser, Projector, Display, Light source

1. はじめに

現在, 半導体レーザーをディスプレイシステムへ応用する研究開発が注目されている. 半導体レーザーをディスプレイ光源として用いるメリットは,

- (1) 単色性が高く, 広い色域が得られる
 - (2) 集光性に優れ, 高い解像度や輝度が得られる
 - (3) 寿命が従来のランプに比べて長い
 - (4) エタンドューが小さいことや偏光性を活用して, 光の利用効率を改善できる
- ことにある.

とりわけ赤色半導体レーザーはDVDやバーコードリーダー, ポインター用途で主に開発が進められてきたが, ディスプレイとして最適な発振波長が得られるとともに, アレイ化による高出力化が大きく進展したことから, テレビジョンのような映像表示機器に使用できる可能性が高まった. ディスプレイに用いる赤色半導体レーザーの発振波長は色度と視感度の関係から決定され, 640 nm~650 nmが最適と考えられる. この波長を用いることで色域は従来のランプを用いるよりも大幅に拡大され, レーザーの光出力も適切な範囲に収まる.

赤色レーザーに要求される仕様は, 例えばスクリーンサイズ150インチで明るさ1000ルーメンのプロジェクションディスプレイを考えると下記ようになる.

(a) 波長: 640~650 nm

(b) 出力: 4 W~5 W

(c) 寿命: 10,000時間以上

(d) ビーム形状: Top-hat (Near Field Patternの強度分布が均一であること)

これにより, 従来は見ることでできなかった真紅の色調を含む映像を, 高い表示品位で表現することが可能になる. 加えて, 長寿命化や消費電力の低減といったメリットも得ることができる. 一方, レーザーをディスプレイに応用する際の課題としてはスペckルノイズと安全性が挙げられる.

2. 超高出力赤色半導体レーザー

2.1 構造

我々が開発した赤色半導体レーザーの構造をFig. 1に示す^{1,2)}. 図のように, ストライプ幅60 μm で共振器長700 μm のレーザー素子が, 400 μm のピッチで25個並んだアレイ構造となっている.

ストライプ幅の広いブロードエリア構造を採用した理由は光出力を稼ぐためである. これにより高出力時の端面の光密度を下げることで, COD (Catastrophic Optical Damage) に対して強いデバイスが得られる. さらに, アレイ化することによって光出力を積算することができ, 結果として超高出力レーザーを実現することが可能となる. ただし, 高出力化に伴い排熱量が増えるので, 熱対

Fig. 1 Schematic structure of red diode laser arrays.

策が非常に重要である³⁾。

レーザーの縦構造となるエピタキシャル層は減圧MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition)法を用いて成長した。活性層は厚さ12 nmの $\text{Ga}_{0.6}\text{In}_{0.4}\text{P}$ で形成された単一量子井戸とし、 AlGaInP のガイド層と AlInP のクラッド層を用いたSCH (Separated Confinement Heterostructure)構造としている。クラッド層の厚さは0.8 μm と非常に薄く、これにより高い排熱性能を実現している。

レーザーのストライプ構造はRidged Wave Guide構造のインデックスガイド構造とし、しきい電流値を下げ、導波ロスを少なくすることでエネルギー変換効率を高めた。また、レーザーの端面にはそれぞれ、フロント側に Al_2O_3 を、リア側に $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{a-Si}$ の多層膜を形成した。このように作製されたレーザーバーは SiC のサブマウントに接合された後、 Cu のヒートシンクに接合される。

2.2 特性

Fig. 2に開発したレーザーの光-電流特性を示す。 Cu ヒートシンクを25℃に温度制御した状態で、CW動作により6.6 W出力した場合の駆動電圧は2.14 V、電流は10.4 Aである。その時のスロープ効率は0.98 W/Aであり、29.7%という高い電気-光エネルギー変換効率を示している⁴⁾。発振波長は640.1 nm、遠視野像の半値幅は $\theta_{\parallel} = 10.5^\circ$ 、 $\theta_{\perp} = 36.6^\circ$ である。Fig. 3はレーザー光のビーム形状を水平方向にプロファイルした結果である。クラッド層の厚さを最適化したインデックスガイド構造により、矩形に近いトップハットな形状になっていることがわかる。

信頼性については、初期の光出力を6.6 Wとして25℃で定電流駆動のエージングを行った結果、Fig. 4に示すように1,000時間経過時点でも光出力の劣化率は10%以下であった。ディスプレイ用光源の一般的な寿命の定義である光出力5割低下までの時間を見積もると、予想される寿命は90,000時間を超える。これは、従来の超高圧水銀ランプ(UHPランプ)の寿命5,000時間を凌駕しており、ディスプレイ用の光源として十分な信頼性を持っている。

Fig. 2 Current-Light output characteristics of red diode laser arrays.

Fig. 3 Near field pattern of a red diode laser array.

3. 赤増感プロジェクター

近年、ディスプレイの薄型化と大型化が進展しているが、液晶やプラズマディスプレイと比較して、プロジェクションディスプレイは画面サイズの割に低消費電力であり、コストが低いなどの特長があり、課題だった画質も改善されつつある。プロジェクションディスプレイの光源としては、一般的にはUHPランプが使われる。しかしこれには赤の演色性が乏しく、寿命が短いという問題がある。そこでわれわれは、赤色半導体レーザーを従来のUHPランプの光路に組み合わせた「赤増感プロジェクター」の試作を行った。

3.1 構成

今回試作した赤増感プロジェクターの光学系をFig. 5に示す⁵⁾。ここで、点線で囲われた部分は従来の一般的な液晶プロジェクターと同様の構成である。UHPランプから出た光はダイクロイックミラーによってRed, Green, Blueに分離され、それぞれ液晶パネルによって変調された後、クロスプリズムにより再び合成されて、投射レンズよりスクリーンに投影される。しかし赤増感プロジェクターにおいては、ランプからの赤色光は利用せず、その代わりに赤色半導体レーザーからの光がRedの光路に導入される点異なる。

Fig. 4 Lifetime test results for 6.6 W red diode laser arrays.

Fig. 5 Optical unit diagram of red enhanced projection display.

その他の構成上の特徴としては、シリンドリカルレンズ1枚でフライアイレンズに照射していることが挙げられる。これはFig. 2の左上に示されるような、指向性の強いレーザーの放射特性を利用しているためである。また、光路にPS偏光コンバータは存在しない。これは、レーザーの偏光特性をそのまま利用しているからである。このように、レーザーの光学特性をうまく利用することで光学系を簡略化することができる。

もうひとつの特徴としてレーザーの冷却方法が挙げられる。従来の高出力レーザーは水冷が不可欠であったが、本構成においてはペルチェ素子とヒートシンクおよび冷却ファンからなる空冷を採用している。これは、今回用いたレーザーのエネルギー変換効率が高いことで実現が可能になった。

3.2 特性

Fig. 6の実線はUHPランプの発光スペクトルである。青と緑の波長には明確なピークがあるのに対して、赤の部分にはピークが見られない。これが、UHPランプを用いたプロジェクターで赤が十分に表現されない理由である。これに対して赤増感プロジェクターにおいては、破線で示された赤色レーザーのスペクトルが重畳されて、赤の成分を補い色域の拡大に貢献している。

試作した赤増感リアプロジェクターの u^*v^* 色度図をFig. 7に示す。現在のテレビ信号規格であるNTSC比で137%の

Fig. 6 Spectrum of ultra high pressure mercury lamp.

色域を再現可能である。次世代の新たな色の規格であるxvYCCを使用すれば、その性能が十分に発揮される⁶⁾。

Fig. 8は試作した赤増感リアプロジェクターの概観である。光源として100 WのUHPランプと4.8 Wの赤色半導体レーザーを2個使用しており、トータル光出力として50インチのスクリーン上でおよそ400ルーメンが得られている。コントラストやその他の性能は従来のプロジェクターと同様である。

3.3 スペックル対策

Fig. 9に示すように、スペックルとはスクリーンで拡散されたレーザー光が、斜線で示された領域において、ランダムな位相関係で重なり合った結果生じる不規則な粒状の干渉パターンである。この現象はコヒーレントな光源であるレーザー独自の問題であり、映像にノイズ感を与えると同時に、見かけ上の解像度の低下をもたらす。スペックルを除去する方法として、大別すると次の2つが考えられる。

①光源のコヒーレンシーを下げる(多光源化、多波長化、光路の多重化など)

②見かけのスペックルを低減する(時間積分)

従来、光学系の中でスペックルを解決しようと様々な方法が検討されてきたが、十分な効果と現実性のある解を得ることは難しかった。さらに、従来のUHPランプを用いたプロジェクターでも、スクリーン上でシンチレーションと呼ばれる不自然なざらざら感が問題になってお

Fig. 7 u^*v^* chromaticity of red enhanced rear projection display.

Fig. 8 Red enhanced rear projection display prototype.

Fig. 9 Speckle noise mechanism.

り、スクリーン自体で抜本的な対策を行う必要があると考えられる。

そこで今回の試作においては、スクリーンを緩やかに動かしてスペckルを時間的に変動させ、目の残像を利用した積分効果によりスペckルを見えなくする「揺動スクリーン方式」を導入した⁷⁾。ただし、スクリーンを単純に揺動するだけではスペckルも動いているように見えるだけで効果は小さく、Fig. 10のように、従来のスクリーンに1枚追加した拡散シートを揺動する方法を採用している。これによりスペckルの重畳が非常に効果的になり、時間積分によるスペckル相殺効果が大きく改善した。

拡散シートの揺動は同調した2個のステッピングモーターを用い、振幅が1 mmで周期が2 Hz程度の回転運動を行っている。これにより、スペckルノイズをほぼ視認できないレベルにまで低減することができた。Fig. 11はリアプロジェクターに揺動スクリーンを導入した場合の、揺動周期と振幅に対するスペckルコントラストの関係を測定した結果である。振幅1 mm、周期2 Hz程度で揺動の効果は飽和することがわかる⁽⁸⁾。ここでスペckルコントラストとは、CCDカメラを用いてスクリーンを細かく分割した輝度分布を求め、その偏差を平均輝度で規格化したものである。目視による官能評価の結果から、スペckルコントラストは5%以下であれば許容できるという結果が得られており、今回の試作機ではほぼそれに近い値が得られている。さらに、従来のプロジェクターで問題になっていたシンチレーションも、ほとんど視認で

Fig. 10 Schematic view of moving screen.

Fig. 11 Relationship between moving frequency and speckle contrast.

きないレベルにまで低減された。

3.4 安全性

赤増感プロジェクターはレーザー光を集光しておらず、拡散して使用しているために危険性はそれほど高くない。しかし、安全規格(JIS C6802)上は劇場などで上映する以外、監視や特別な防護設計が無い場合はクラス2以下であることが要求される。レーザーのクラス分けをするためには被曝放出限界(AEL)を算出する必要がある。AELは波長、放出持続時間および視角などをパラメータとする係数と関係式で規定される。赤増感プロジェクターにおいてはFig. 12に示すように、Apparent Source(LCDパネル)から100 mm離れた距離にレンズ(肉眼)を置いて、直径7 mmのアパーチャ(瞳孔)を通してディテクタ(網膜)に到達する光エネルギーに相当する。

フロントプロジェクターの場合、投影レンズを出射する際のレーザーのエネルギー密度が比較的高いので、視いた場合に目の集光機能で網膜にダメージを与えないように配慮する必要がある。クラス2以下であることを条件にAELを見積もると、投影レンズを出射した際の赤色レーザーのエネルギー密度はおおよそ1.74 mW/mm²以下であることが必要である。投影レンズ出射直後での画面サイズが対角1.2インチ程度とすると、約700 mWのレーザー出力が許容されることとなり、これを用いて色温度10,000 Kの白色光を合成すると約500 lmの光束が得られる。つまり、

Fig. 12 AEL (Accessible Emission Limit) measurement standard.

赤増感プロジェクターで全白500lmくらいのものであればクラス2の安全規格に入る。

リアプロジェクターの場合は筐体で囲われているために安全性は高まる。レーザー光はスクリーン透過後にAEL以下であれば良いと考えられ、エネルギー密度は投影レンズ出射時よりも約3桁小さくなるために、スクリーン輝度を上げてても十分安全規格に収めることができる。

4. 今後の展望

液晶やプラズマなどの薄型ディスプレイが主流となり、価格が低下して大画面化も進み中で、効率という観点からプロジェクターの存在意義が見直される可能性がある。プロジェクターは液晶やプラズマと比較して2/3～1/3程度の消費電力ですむためである。レーザーは効率においても理想的な特性を持っており、エタンドューが小さいために光の利用効率を上げることができる。エタンドューとはFig. 13に示すように、光束の断面積と立体角の積で表される物理量であり、光源やライトバルブおよび投射光学系などで各々固有の不変量である。光学系の結合効率率は理論的にエタンドューの比で表され、例えば光源のエタンドュー($E1$)とライトバルブのエタンドュー($E2$)を考えると、光の利用効率を最大にするためには $E2 \geq E1$ でなければならない。Fig. 14は各光学部品のエタンドューを比較したものであるが、レーザーは光の利用効率を極限まで高くすることが可能であり、他の光学部品を小型化することも容易である。

最終的には3色ともレーザー光源を使用するのが目標であるが、安全性の問題以外にも、現時点で緑のレーザーはSHGタイプのものしかなく、コストや信頼性など課題はまだ多い。その点において、赤増感プロジェクターという選択肢は現実的であり、得られる効果も大きいと考えられる。

本報告においてはレーザーを従来のプロジェクターの光源として使用する場合について述べたが、GLV(Grating Light Valve)を用いた新しいタイプのプロジェクター(GxL)も開発されており、これにも超高出力赤色半導体レーザーが使用されている⁹⁾。GxLは画質の高さからプロフェッショナル用途として期待されており、今後の展開が注目される。

Fig. 13 Schematic view of etendue.

	UHP	Laser	LED	LCD panel
Devise
Dimensions	Arc length 1.2mm	Luminous point 0.001mm ²	Emission area 1mm ²	Panel size 0.87inch
Etendue [mm ² str]	≒7	≒0.001	≒10	≒20

Fig. 14 Comparison of etendue between light sources.

5. まとめ

超高出力赤色半導体レーザーを開発し、25℃で発振波長640.1nm、出力6.6W、電気-光エネルギー変換効率29.7%、長期信頼性数万時間という特性を得た。この赤色半導体レーザーとランプを組み合わせるハイブリッド光源を構成し、赤増感プロジェクターを試作した。その結果、広色域で低消費電力かつ比較的低コストな大型ディスプレイの可能性を確認できた。さらに、スペックルの問題は揺動スクリーンを使用することで解決が可能であり、安全性についても赤色レーザーだけの場合にクラス2の規格をクリアできる要件を明らかにした。

参考文献

- 1) D. Imanishi, Y. Sato, K. Naganuma, S. Ito, and S. Hirata: IEEE International Semiconductor Laser Conference Digest, Shimane, 2004 (IEEE, America 2004) p.49.
- 2) D. Imanishi, Y. Sato, K. Naganuma, S. Ito, and S. Hirata: Electron. Lett. **41** (2005) 1172.
- 3) J. J. Huddle, L. C. Chow, S. Lei, A. Marcos, D. P. Rini, S. J. Lindauer, M. Bass, and P. J. Delfyett: Sixteenth IEEE SEMI-THERM Symposium (2000) p.154.
- 4) D. Imanishi, Y. Takiguchi, K. Wakabayashi, H. Nakajima, K. Naganuma, S. Ito, and S. Hirata: CLEO/Europe 2007 Conference Digest (2007) CB14-5-THU.
- 5) 大瀬 憲寛, 伊藤 哲, 今西 大介, 佐藤 典文, 平田 照二: 電気学会研究会資料(光・量子デバイス研究会) OQD-06-43 (2006) 33.
- 6) 中枝 武広: 映像情報メディア学会誌 **60** (2006) 36.
- 7) 大瀬 憲寛, 伊藤 哲, 今西 大介, 佐藤 典文, 平田 照二: 第67回応用物理学学会学術講演会予講集 29a-V-1 (2006) p.1050.
- 8) 大瀬 憲寛, 伊藤 哲, 今西 大介, 佐藤 典文, 平田 照二: 第54回応用物理学関係連合講演会予講集 27a-K-1 (2007) p.1050.
- 9) 田口 歩: 応用物理 **76** (2007) 174.