

高輝度LED、狙いは新興の自動車照明アプリケーション

ジィ・バードワジ、オレグ・シェキン

現在、輝度2億ニットに近づきつつある蛍光体変換LEDの目標アプリケーションは、低コストで集中照明を供給することにとどまらず、情報を伝達する動的ピクセル照明も可能である。

レーザーダイオードは、最初、スポット照明範囲の拡大として、自動車、軍および監視アプリケーションで採用された。しかしデジタル照明の普及がますます進むにつれて、集中照明だけでなく、情報を伝達するアプリケーションの需要が増加している。結果として、既存および新興アプリケーション向けにローコストLED技術の輝度向上が新たな焦点になっている。

数年前、生産されている最高輝度の蛍光体変換LED (pcLED) 光源は、最高1億 nits (MNitsは100万 nitsまたはメガ nits、1nit=1cd/m²) だった。現在、自動車ヘッドライトに導入されている商品の性能は、100MNits (図1)を

上回り、市場に出てくる最新の光源は200MNitsに近づいている。

輝度向上を促進するアプリケーションは、自動車ハイビーム距離拡張およびヘッドライト前景プロジェクションである。ハイビームレンジ拡張(HBRE)では>500MNitsが求められているが、一方前景プロジェクション(FGP)オーバーレイでは、100~200MNitsが必要である。pcLEDがこのような輝度要件を達成するとしても、より低いコスト、高効率、自動車動作温度で長寿命を提供する量産品が必要になる。ハイパワーレーザーダイオードの安全上の問題がない高輝度LEDは、材料とパッケージングの進歩によりこうした目標を

達成する可能性がある。

アプリケーションによる輝度目標

製品pcLEDは現在、輝度範囲は最高200MNitsである。これは最大の市場セグメントニーズを完全に満たしている。一般照明、ディスプレイバックライト、自動車の車内および外部フロント、信号およびリア照明がこのセグメントに含まれる。

自動車ヘッドライトのデジタル化を可能にしたのはLEDである、その結果、先進的ドライビングビーム(ADB)のようなまったく新しい機能が実現した。ADBでは、輝度数MNitsのピクセルLEDアレイが、道路に画像を結び、センサからのフィードバック(道路上あるいは近くの車輻、サイン、歩行者や他の障害物)に基づいて、個々のピクセルがスイッチを切ったり減光したりして、一連の機能を実現する。これに含まれる機能は、他の道路ユーザーへのギラつき低減、歩行者、サインおよび障害物を目立たせる能力、道路のカーブに車が近づいたときの動的ビームの操作である(図2)。

安全運転を拡大するために、pcLEDは、道路だけでなく、車線区分線あるいは警告など、FGPオーバーレイ情報も提供できる。FGPには、2つの明確なアプリケーションがある。1) 100MNitsを必要とするダイレクトLEDイメージ

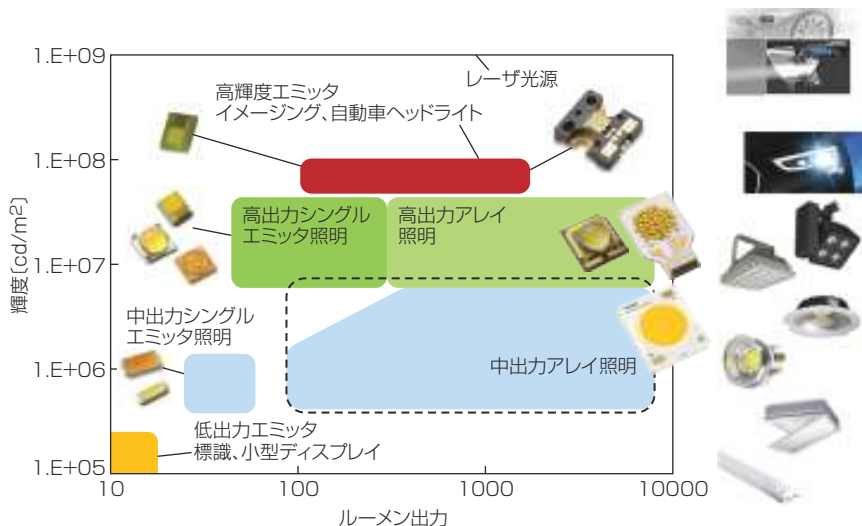


図1 蛍光体変換発光ダイオード(pcLED)とレーザーの輝度 vs. ルーメン出力を示している。

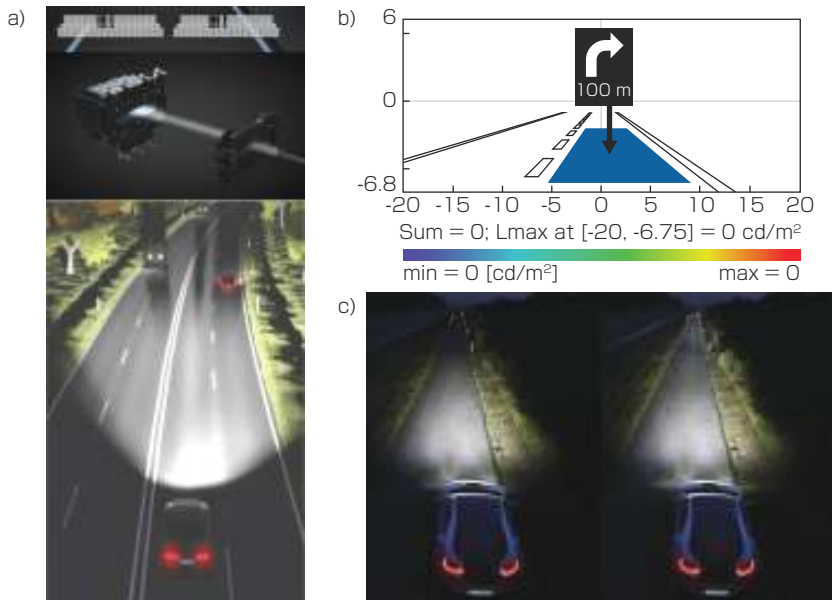


図2 ピクセルLEDは、ハイビームのチラつきを低減(a)し(画像提供:ダイムラー・ベンツ社)、警告サインなどの前景プロジェクション(FGP)オーバーレイ情報(b)を提供できる。(画像提供:ルミレッズ社)また、ハイビーム照射の範囲を拡大(c)できる。(画像提供:BMW社)

ング、および2) MEMSマイクロミラーアレイのLED照明、例えば100万ピクセル程度のテキサス・インスツルメンツ社のデジタル・マイクロミラー・デバイス(TI DMD)—これは200MNits程度を必要とする⁽¹⁾。

HBREアプリケーションは、高速ハイウェイドライビングをより重視している。ハイウェイの直線道路において車輻は法的限界である600mまでしか前方を照らすことができないが、細いスポットビームを生み出すために>500MNitsを必要とする。

性能目標として、要求の全範囲を満たすには、100、200、さらには500MNitsを達成するLEDが必要になる。つまり1mm²(遠距離ではランバーシアン放射パターンを、近距離では発光面にわたる均一輝度を想定)の発光領域(LEA)に最大1750lm/ダイとなる。1A/mm²で350lmのクラス最高のハイパワーLEDのベースライン性能であるなら、LEAルーメンで5倍増が必要になる。

輝度の課題

基本的に、輝度を増やすことは電流を増やすことである、したがってLEDにパワーを入れることである。LEDの電流密度が、しきい値おおよそ100mA/mm²以上に上昇すると、電流密度増加とともに非発光再結合が増し、「ドループ現象」として知られる継続的な効率低下を招く⁽²⁾。効率が下がっても、ネットルーメン出力はまだ増加している。

標準的市販「ポンプ」LEDは、動作範囲0.35~1.0Aの範囲に最適化した効率である(図3)。出力フラックスを5倍高めるには、電流密度を8倍に増やす必要がある、つまり1A/mm²から8A/mm²である。これは順電圧(Vf)に影響を与え、最大5Vに増加、電力変換効率(WPE)は20%をわずかに上回る程度に低下する。とはいえ、LEDの駆動は、実際このように厳しくなるのだろうか。それを見いだすために、設計者はまず、青色ポンプフラックスを白色に変換する蛍光体材料を検討する必要がある。

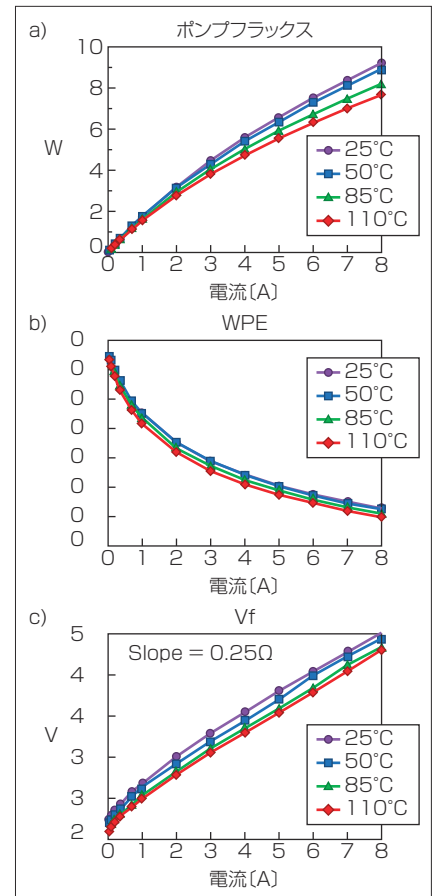


図3 発光ダイオード(LED)ポンプフラックス(a)、電力変換効率(WPE、b)、順電圧(Vf、c)を、温度と電流に対してプロット。

蛍光体の対価

蛍光体は光熱クエンチング(PTQ)を示す、ここではLEDのパワー密度を高くすることによる周辺温度上昇に伴い発光が低下する⁽³⁾。セラミック蛍光体は、高駆動電流に最適である。セラミックの活性材含有率低下、高い熱伝導性が、これらの材料ではPTQを大幅に低下させるからである。

自動車アプリケーションの色度と色品質要件を満たすために、セリウム(Ce)活性化アルミニウム(Al)ガーネットセラミックが使用されている⁽⁴⁾。アプリケーションの色要件のためにPTQは大幅に低下するが、セラミックガーネット蛍光体は、粉末バージョンの熱消光を保つ。温度>150°Cで、量子

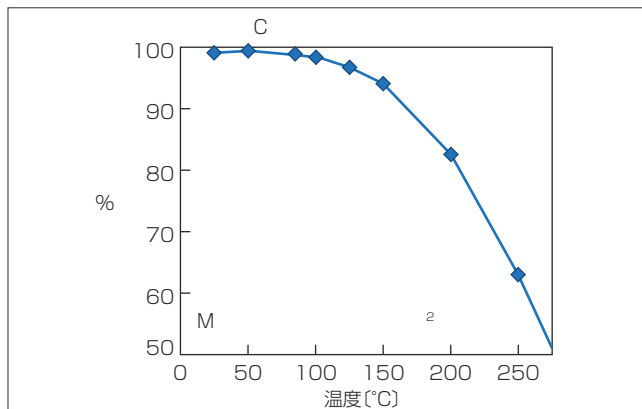


図4 蛍光体量子効率(QE)は、温度とポンプパワーに対してプロット。

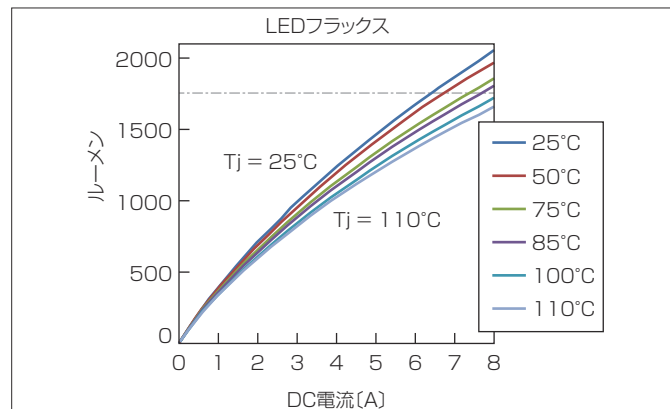


図5 発光ダイオード(LED)ルーメンは、フラックスの関数で増加する。

効率は急落する(図4)。このため、極端な熱負荷に対処するには、ダイとパッケージ能力を重視することになる。実際、500MNitsを狙って1750lmを達成するには、8Aで駆動し、 $<110^{\circ}\text{C}$ 温度 T_j を維持することが必要になる(図5)。

LEDを $8\text{A}/\text{mm}^2$ で駆動すると、エレクトロマイグレーションや電流集中を含む大きな課題がいくつか生ずる。エレクトロマイグレーションでは、高電流密度によりLED活性領域で原子移動を起こし、転位や点欠陥となり、これは熱を生むことで光出力を低減させる。したがって、金属と誘電体スタックの完全な再設計が必要になる。また、LEDコンタクトにおける電流集中は、非常に高い局所電流密度を示す。これにより局所的に高ドループが生ずるので、電流広がりを改善するためにコンタクトの再設計が必要になる⁽⁵⁾。

ルミレッズ社(Lumileds)の再設計されたLEDでは、電流広がりが、エレクトロマイグレーション耐性が改善されており、ドループは10%減少、一方、 $3\text{A}/\text{mm}^2$ 超連続動作で長期信頼性と安定性が維持されている。これにより同社は、 $1000\text{lm}/\text{mm}^2$ 、すなわち $>200\text{MNits}$ に迫ることになる。とはいえ、蛍光体変換レーザに対抗するには、コストを下げ、効率を改善する必要がある。

現在のハイパワー青色端面発光レーザは、効率約30%、これは相対的に非効率な光源である。熱マネージメントが強く求められ、さらなるコスト増となるからである。ルミレッズ社の200MNits LEDは、特にこの電流密度に最適化したエピタキシャルプロセスを利用して $3\text{A}/\text{mm}^2$ で動作するので、効率は $>40\%$ であり、すでに多くの高輝度アプリケーションの要求を満たしている。

新材料とパッケージデザイン

ルミレッズ社は、500MNits達成のために引き続き開発オプションを探求する。また、同社は、LEDは極端なパワー負荷に対処できるだけでなく、それが効率的にできなければならないと考えている。新しいダイとエピタキシー設計および、ポンプ波長の短波長化を利用してドループ低減の漸次的改善に加えて、同社は新しい材料やパッケージング法などの追加オプションを探っている。

セミポーラおよびノンポーラ窒化ガリウム(GaN)に移行することで、分極効果低減となる。これは、cプレーン配向では、極めて高い電流密度で量子井戸における基本的な電子ホール波動関数オーバーラップが生ずるからである⁽⁶⁾。

また、トンネル接合を有する根本的に新しいデバイス構造に移行することにより、LEDがスタックでき、同じ電流密度で輝度はほぼ2倍になる⁽⁷⁾。目標は、現在のLED構造で、 $8\text{A}/\text{mm}^2$ で効率40%達成である。新たなアプローチを使うことで、2021年までにLEDは500MNitsを達成すると同社は予測している。

参考文献

- (1) V. R. Bhakta and B. Ballard, "High resolution adaptive headlight using Texas Instruments DLP [copyright] technology," 2015 International Symposium on Automotive Lighting (ISAL) Proceedings, 483-494, Darmstadt, Germany (Sep. 2015).
- (2) V. Fiorentini and F. Bernardini, Phys. Rev. B, 60, 12, 8849 (1999).
- (3) O. B. Shchekin et al., Physica Status Solidi RRL, 10, 4, 310 (2016).
- (4) R. Mueller-Mach et al., Physica Status Solidi RRL, 3, 7-8, 215 (2009).
- (5) J. Bhardwaj et al., Physica Status Solidi A, 214, 8 (2017).
- (6) B. Leung et al., Appl. Phys. Lett., 104, 26, 262105 (2014).
- (7) S. Krishnamoorthy, F. Akyol, and S. Rajan, Appl. Phys. Lett., 105, 14, 141104 (2014).

著者紹介

ジィ・バードワジは最高技術責任者(CTO)、オレグ・シェキンは、LEDアーキテクチャの副社長、両者ともルミレッズ社。
e-mail: jy.bhardwaj@lumileds.com
URL: www.lumileds.com.