

快適なLED照明空間を演出する高出力近紫外光LED

High-Power Near-UV LED for Realization of Next-Generation LED Lighting Systems

勝野 弘 金子 桂 櫛部 光弘

■ KATSUNO Hiroshi ■ KANEKO Kei ■ KUSHIBE Mitsuhiro

近紫外光発光ダイオード(LED)を励起光源として用いた白色LEDは、演色性が高いことで知られているが、電流増大による効率低下が少ない特長を生かして、高出力かつ高輝度な固体照明の実現も期待できる。

東芝は、高温成長窒化アルミニウム(AIN)バッファ層を用いた低欠陥結晶成長技術と電流均一性に優れた素子構造を採用して、可視光LED並みの効率を持つ近紫外光LEDを作製し、高出力特性を調べた。その結果、量子井戸の構造によって高電流領域における効率低下を抑制できることがわかり、窒化ガリウムインジウム(GaN)発光層を用いた従来のLEDでは実現できなかった高出力特性を達成した。

White light-emitting diodes (LEDs) using a near-ultraviolet (UV) LED as an excitation source are a focus of high expectations as a light source with not only high color rendering performance but also high power due to their characteristic of low efficiency degradation with increasing current.

Toshiba has developed a near-UV LED that holds promise as a key device for next-generation LED lighting systems. The new LED achieves similar efficiency to that of regular visible LEDs through the application of a high-quality gallium nitride (GaN) growth technique using high-temperature-grown aluminum nitride (AlN) as a buffer layer and a chip structure with superior current uniformity. Experiments on a prototype of the near-UV LED confirmed that it achieves higher power characteristics compared with conventional gallium indium nitride (GaInN)-based LEDs due to optimization of the quantum well structures.

1 まえがき

白色LEDの市場は、携帯電話や薄型テレビのバックライトから照明機器へと急速な広がりを見せ始めており、省エネへの機運からも、一部では既存照明の代替が進められている。白色LEDを使った固体照明(以下、LED照明と呼ぶ)は、高速応答、長寿命、水銀レスなど、固体光源ならではの長足を備えており、既存の照明機器の代替だけでなく、照明システムそのものを変えるポテンシャルを備えている。

LED照明に使われる白色LEDには、高効率特性だけでなく、照明機器の小型・軽量化、低コスト化に向けた高出力特性も強く求められており、光の色合いの自然さを示す演色性への要求も出てきている。これらの特性は、快適なLED照明空間を実現するのに不可欠であると考えている。

白色を作る方式は図1に示すように大きく二つあり、もっとも使われているのは青色LEDと黄色蛍光体を組み合わせた方式である。青色と黄色の補色の関係を利用して人の目に白く見せており、演色性を低く抑えることで白色としての発光効率を大きくできるのが特長である。しかし、高出力化には、青色LEDが抱えている電流増大による発光効率が急激に低下する問題(以下、Droop現象と呼ぶ)が課題となっている。演色性を高めるため、赤色蛍光体を追加した方式もあり、特に赤色の成分が多い電球色を出す場合に用いられている。いっそうの

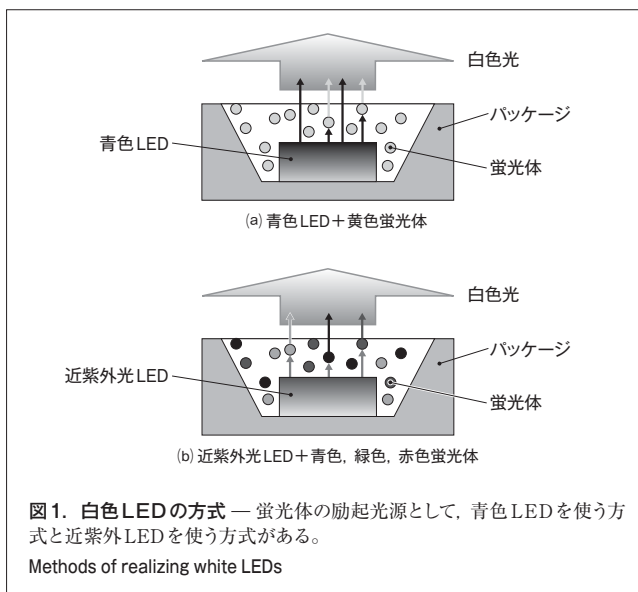


図1. 白色LEDの方式 — 蛍光体の励起光源として、青色LEDを使う方式と近紫外LEDを使う方式がある。

Methods of realizing white LEDs

高演色型白色LEDとして、図1(b)のように近紫外光LEDを励起光源として、青色、緑色、赤色蛍光体をそれぞれ励起することで白色光を出す方式がある。近紫外光LEDは、Droop現象が小さいとされている⁽¹⁾。しかし、結晶欠陥の影響を受けやすく⁽²⁾、発光効率が低いため、Droop現象については十分に検討されていない。

東芝は、高品質な窒化ガリウム(GaN)を成長させることが

できる高温成長 AlN バッファ層を核とした結晶成長技術と、成長基板を除去して作製する放熱性及び電流均一性に優れた上下通電の素子構造（以下、Thin Film 型 LED と呼ぶ）を採用して、近紫外光 LED の光出力の電流依存性を調べ、高出力特性を検証した。

2 低欠陥結晶成長技術

一般に青色 LED は、サファイア基板上に有機金属気相成長法を用いて作製する。基板と GaN の格子不整合が結晶成長上問題となるため、500 °C 程度の低温で約 10 nm 程度堆積させた GaN や AlN をバッファ層として用いることで、応力解放によって生じるひび割れ（クラック）のない GaN 層を成長させることができる。

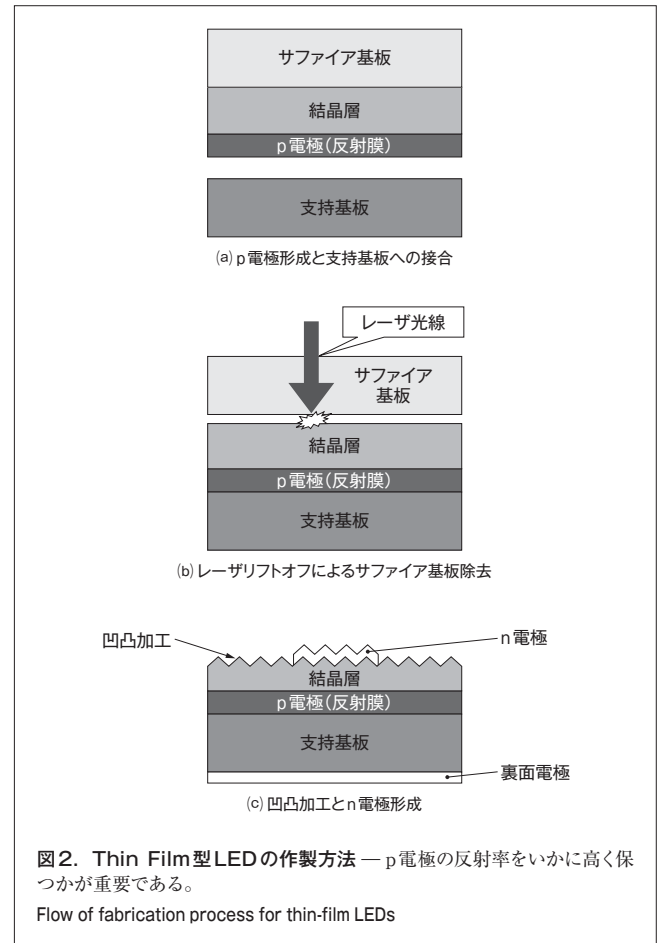
このようにして成長させた GaN 層は結晶欠陥が多いものの、その上に積層させる GaInN を発光層とする青色 LED は結晶欠陥の影響を受けにくいと、発光効率を高めやすい⁽²⁾。低温成長バッファ層を用いる前述の方法を用いて、GaInN 発光層のインジウム (In) 組成を低くすれば近紫外光 LED となるが、In 組成の低い発光層は結晶欠陥の影響を受けやすいため、これだけでは発光効率が大幅に低下してしまう。

当社は、1,300 °C 程度の高温で成長させた単結晶 AlN バッファ層を用いて、その上に成長させた GaN 層の結晶欠陥を一桁低減させることに成功しており、この低欠陥結晶成長技術を用いた近紫外光 LED を開発している⁽³⁾。

この技術を用いて、サファイア基板上にシリコン (Si) を添加（不純物、例えば Si を添加することをドーピングと呼ぶ）した n（電子）型 GaN と発光層、マグネシウム (Mg) ドーピングの p（正孔）型窒化アルミニウム ガリウム (AlGaIn) 電子障壁層、Mg ドーピングの p 型 GaN コンタクト層を順に積層して LED 構造を作製している。LED 構造は、390 nm 前後で発光する GaInN 単一量子井戸と窒化アルミニウム ガリウム インジウム (AlGaInN) 障壁層から成る発光層を、n 型 GaN と p 型 AlGaIn 電子障壁層で挟んだダブルヘテロ構造となっている。発光層の井戸は、井戸の組成や高さの設計自由度の確保と、多重量子井戸構造における井戸間のキャリア濃度分布変動の影響の回避とを狙って、単一量子井戸としている。発光波長が短いため、井戸の In 組成は青色 LED の 1/3 程度となっている。十分な井戸の深さを確保するため、障壁層はアルミニウム (Al) を含む四元混晶 (AlGaInN) とした。

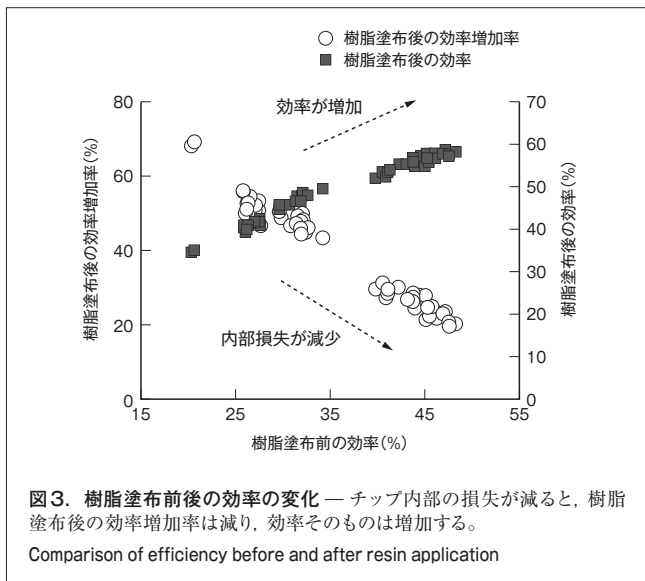
3 Thin Film 型 LED

高出力動作に向けて、素子構造として放熱性と電流均一性に優れた Thin Film 型 LED を採用した。その作製方法を図 2 に示す。まず、図 2(a) のように、発光層を含む結晶層に銀



(Ag) から成る p 電極を形成したウエーハと接着層として金すず (AuSn) はんだを形成した支持基板を 280 °C 程度で加圧しながら溶融接合する。その際、残留熱応力を抑えるため、支持基板にはサファイア基板と線膨張係数が近いゲルマニウム (Ge) 基板を用いた。次に、図 2(b) のように、レーザーリフトオフ法を用いてサファイア基板を除去する。これは、フッ化クリプトン (KrF) エキシマレーザ 248 nm やイットリウム パナデート (YVO₄) : ネオジウム (Nd) 固体レーザ四倍波 266 nm など、GaN の禁制帯幅よりも短い波長を備えるレーザ光線をサファイア基板側から照射することで、GaN バッファ層のサファイア基板側の界面をガリウム (Ga) 金属と窒素 (N) に分解して、サファイア基板を除去する方法である。そして、図 2(c) のように、露出した結晶層表面に、水酸化カリウム (KOH) アルカリ溶液で異方性エッチングすることで凹凸構造を形成し、その上と支持基板側にそれぞれ n 電極と裏面電極を形成する。素子の大きさは 1 mm 角とした。

この構造は、主な発熱源である発光層が比較的薄い (<< 1 μm) p 型半導体層を介して支持基板へ全面にわたり接触しているため、放熱性及び放熱の均一性に優れている。また、n 型 GaN の抵抗率が比較的低いため、n 電極を結晶層表面に細線状に張り巡らすことで、発光層に電流を均一に流しやすく



できる。これらの特長から、Thin Film型LEDは高電流動作に適している。

p電極材料や凹凸構造を変えた場合の外部量子効率(発光層に注入する電子数に対するLED外部に放射される光子数の割合、以下、効率と呼ぶ)について、Si樹脂(以下、樹脂と呼ぶ)を半球状に塗布する前の効率に対する塗布後の効率と効率増加率の依存性を図3に示す。

動作電流は発熱の影響を抑えるため20 mAとした。樹脂(屈折率 $n=1.4$)を塗布することによって、結晶層($n=2.5$)と空気($n=1$)の屈折率差によって結晶層内部に閉じ込められていた光を減らすことができるため、効率が上がる。また、発光した光は、p電極と結晶層表面の間で反射を繰り返すうちに結晶層表面から取り出されるか、又は、p電極などのチップ内部の損失で失われる。p電極の反射率改善で発光光の吸収を抑えたり、結晶層表面の凹凸構造を変えることで結晶層に閉じ込められる光を減らしたりすることで、前記損失を減らすことができる。そのため、樹脂塗布前の効率が高いほど、効率増加率が低下しつつ、塗布後の効率を上げることになると予想される。

図3から、樹脂塗布前の効率が上がるほど効率増加率が下がりつつ、塗布後の効率が上がっていることから、p電極の反射率向上や凹凸構造の改善によって、チップ内部の損失が減ったことがわかる。樹脂塗布後の効率は50%を大きく超えており、従来の“暗い近紫外光LED”の概念を打ち破る結果が得られた。

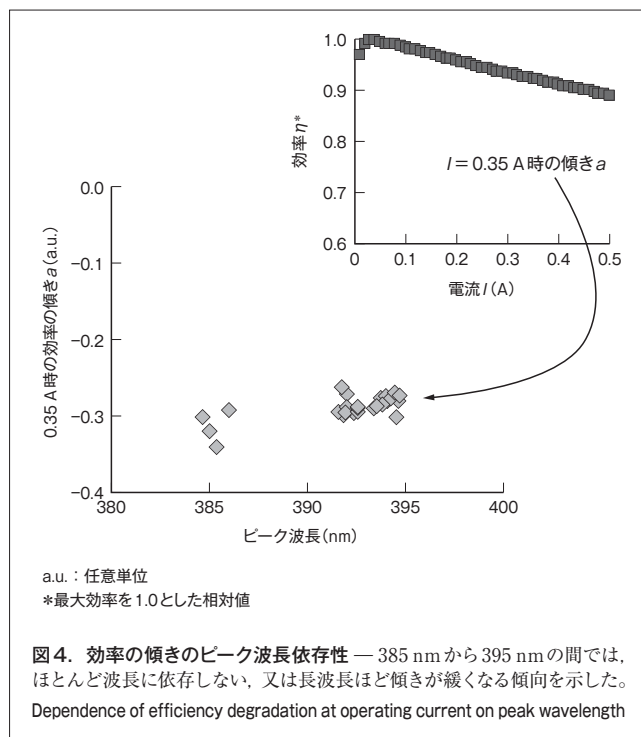
4 近紫外光LEDの高出力特性

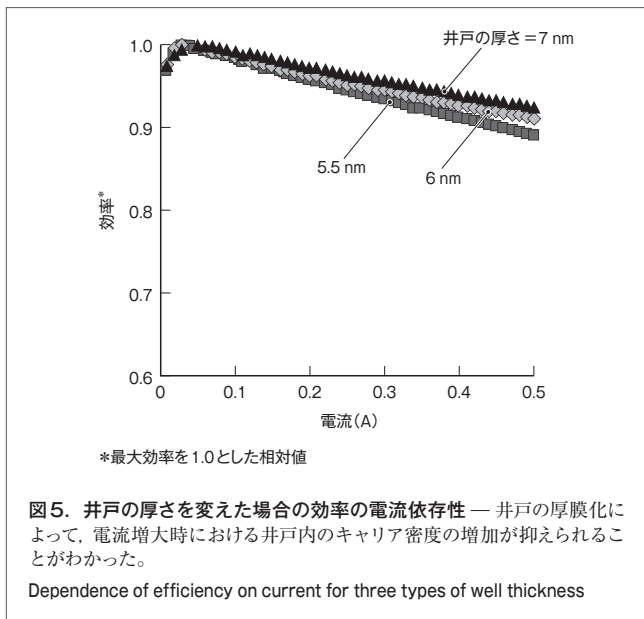
作製した近紫外光LEDを用いて、単一量子井戸のIn組成と厚さで決まるピーク波長と効率の電流依存性との関係を調

べ、高出力特性を評価した。光出力の測定は室温で行い、発熱の影響を抑えるためにパルス幅を0.5 ms又は2 μ s、(パルス周期はそれぞれ50 ms, 200 μ s)としたパルス測定で行った。

385 nmから395 nmまでピーク波長を変えた各LEDについて、挿入図のように動作電流 $I=0.35$ Aにおける効率 η の傾き a ($a=d\eta/dI$, $I=0.35$ Aとする)を求めて、ピーク波長依存性を調べた結果を図4に示す。挿入図のように、効率は、青色LEDで見られるような急激な低下は観測されず、0.1 A以上ではほぼ線形に減少している。そのため、ここでは高出力特性として0.35 A動作時における効率のふるまいに着目した。図4に示すように、効率の傾きはほとんど波長に依存しない、又は長波長ほど緩くなる傾向を示した。長波長化すると禁制帯幅が狭くなるため、実効的な井戸が深くなり、電流注入によるキャリアのオーバフローが抑えられ、高電流動作時の効率低下を抑えられたと考えている。

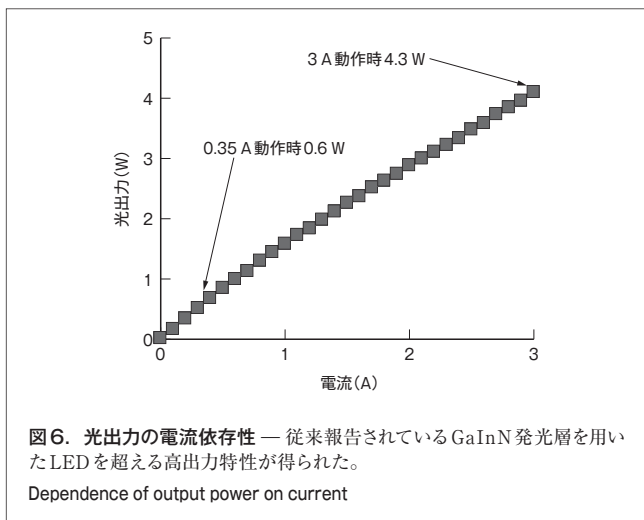
井戸のキャリア密度低減による高電流領域の効率低下の抑制を検証するため、単一量子井戸の厚さを5.5 nmから7 nmまで変化させたLEDを作製し、効率の電流依存性を調べた。その結果を図5に示す。効率は最大値で規格化している。GaInN量子井戸はGaNと格子不整合が大きい厚膜化が難しく、通常青色LEDでは5 nm以下に抑えている。厚くすることによって井戸の結晶品質が劣化すると、井戸周辺に非発光再結合センターが増えることで低電流領域の効率が下がると予想される。図5を見ると、厚さによらず低電流領域のふるまいにほとんど差がないことから、ここで述べた低欠陥結晶成長技術を用いて作製した近紫外光LEDは7 nmでも発光効率に





影響を与えるような結晶品質の劣化は起きていないことがわかった。0.1 A 以降の高電流領域における効率の低下は、井戸の厚さが厚いほど抑えられていた。井戸の厚膜化によって、電流増大時での井戸内のキャリア密度増加が抑制できたためと考えている。

井戸の厚さ7 nm、ピーク波長397 nmにおける近紫外光LEDの光出力の電流依存性を図6に示す。いずれの電流領域でも急激な効率低下は見られず、0.35 A 動作時における光出力及び効率、それぞれ0.6 W、55%だった。効率低下は抑制されているものの、いっそうの大電流動作には改善の余地がある。3 A 動作時には4.3 Wの光出力が得られており、従来報告されているGaInN発光層を用いたLED⁽⁴⁾を超える高出力特性^(注1)が得られた。



(注1) 2011年3月現在、当社調べ。

5 あとがき

高出力白色LEDの実現に向けて、AlNバッファ層を核とした低欠陥結晶成長技術と電流均一性に優れたThin Film型LED構造を用いた近紫外光LEDについて、単一量子井戸の構造が効率の電流依存性に与える影響を調べ、大電流領域での効率低下を抑制したLED特性を確認した。

今回開発した技術は、青色LEDが抱える高出力化への課題を根本から解決する可能性を秘めている。当社は今後とも、電流増大による効率低下の解明を進め、高輝度LED照明に向けた開発を加速していく。

文献

- (1) Baeumler, M. et al. Thermal and non-thermal saturation effects in the output characteristic of UV-to-violet emitting (AlGaIn) N LEDs. *Physica Status Solidi (a)*. **204**, 4, 2007, p.1018-1024.
- (2) Hirayama, H. Quaternary InAlGaIn-based high-efficiency ultraviolet light-emitting diodes. *Journal of Applied Physics*. **97**, 9, 2005, p.091101-1-091101-19.
- (3) Ohba, Y. et al. Highly Efficient InGaIn-Based 383-nm Ultraviolet Light-Emitting Diodes Fabricated on Sapphire Substrate Using High-Temperature-Grown AlN Buffer. *Applied Physics Express*. **1**, 10, 2008, p.101101-1-101101-3.
- (4) Ansgar, L. et al. High-Power and High-Efficiency InGaIn-Based Light Emitters. *IEEE Transactions on Electron Devices*. **57**, 1, 2010, p.79-87.



勝野 弘 KATSUNO Hiroshi

研究開発センター 電子デバイスラボラトリー研究主務。
化合物半導体を用いた光デバイスの研究・開発に従事。応用物理学协会会员。
Electron Devices Lab.



金子 桂 KANEKO Kei

研究開発センター 電子デバイスラボラトリー研究主務。
化合物半導体を用いた光デバイスの研究・開発に従事。応用物理学协会会员。
Electron Devices Lab.



櫛部 光弘 KUSHIBE Mitsuhiro

研究開発センター 電子デバイスラボラトリー研究主幹。
化合物半導体を用いた光デバイスの研究・開発に従事。応用物理学协会会员。
Electron Devices Lab.