

# 照明用LEDの低コスト化と高出力化を実現する GaN-on-Si技術

GaN-on-Si Technologies for LED Lighting Achieving Reduced Cost and Increased Output Power

布上 真也

■ NUNOUE Shinya

窒化ガリウム (GaN) をシリコン (Si) 基板上に形成する GaN-on-Si 技術は、発光ダイオード (LED) の低コスト化技術として期待されている。

東芝は、8インチSi基板を用いた GaN-on-Si 技術を開発し、サファイア基板を用いる従来のLEDと同等の特性を持つ高出力青色LEDの作製を可能にした。当社はまた、GaN-on-Si技術を用いたLED特性のいっそうの向上に向けて、窒化ケイ素 (SiN) 中間層を用いる独自の低転位化技術を開発し、照明用LEDとして要求される高温での外部量子効率向上を実現できることを示した。更に、マルチジャンクションLEDを開発し、照明用LEDの光束を高密度化できることを示した。従来のCOB (Chip-on-Board) 実装に代わる高出力LEDとして期待される。

GaN-on-Si technologies, in which a gallium nitride (GaN) layer is epitaxially grown on a silicon (Si) substrate instead of a sapphire substrate, have been attracting attention as a means of realizing low-cost white light-emitting diodes (LEDs).

Toshiba has developed GaN-on-Si technologies for blue LEDs as a light source for white LEDs using 8-inch Si wafers, and achieved high-power blue LEDs with emission characteristics equivalent to those fabricated using the sapphire-based process. In order to improve the efficiency of GaN-on-Si-based blue LEDs, we have developed a novel technology using silicon nitride (SiN) multiple-modulation interlayers to reduce threading dislocation densities (TDDs) in the GaN thin film. This TDD reduction technology makes it possible to improve external quantum efficiency at the high temperature required for white LED lighting. We have also developed a multijunction type high-voltage LED for LED lighting with large luminous flux based on a thin-film flip-chip LED (MJTF-LED) with high power and high luminous efficacy.

## 1 まえがき

白色LEDには、低消費電力かつ長寿命で、また水銀などの有害物質を使用しないといった特長があり、白色LED照明による白熱電球の置換えが急速に進んできた。白色LEDの製品化初期は、発光効率は数十lm/W程度で、LED素子1個当たりの光束は数lm程度であったが、その後、白色LEDの発光効率の向上を中心に特性の改善が進められた。当初、白色LEDの性能向上及びコスト低減は、Haitzらにより提唱された法則<sup>1)</sup>に従って進んだ。これによれば、白色LEDの効率は、2020年には200lm/Wに到達すると予想されていた。しかし、2005年以降、Haitzの法則を上回るスピードで発光効率の向上が進み、現在では既に200lm/Wクラスの白色LEDが製品化されている。

現在、白色LED照明の応用範囲が広がって蛍光灯の置換えが進み、LEDを用いたベースライトが広く用いられるようになってきている。今後の白色LEDの応用としては、高光束や色の質が要求される照明分野が期待されており、LED素子の低コスト化に加え高出力化に向けた開発が活発になっている。

東芝は、8インチSi基板上に高品質のLED素子を形成する GaN-on-Si 技術を開発し、Siプロセス技術を基盤とした先端

プロセス技術を用いて、低コストで高光束のLED素子の作製を可能にした。

ここでは、2章で当社がGaN-on-Si技術により作製したLED素子の概要、3章でGaNの低転位化技術について述べ、更に4章でGaN-on-Si技術を適用した高光束の照明用LEDの事例について述べる。

## 2 8インチSi基板によるLEDの開発

白色LEDの励起用光源である青色LEDは、有機金属原料を用いる化学気相成長 (MOCVD) 法によりGaN系半導体薄膜をサファイア基板上に結晶成長させることで作製されてきた。GaN系LEDの製品化初期にはサファイア基板のサイズは2インチが主流であったが、現在では3~4インチが主流となっている。6インチ化の動きもあるが、まだ基板の価格が高いこと、及び基板の反りや結晶成長中に発生する割れの制御などの技術的困難さのため、一部の企業を除いてサファイア基板の大口径化は進んでいない。

当社が開発したGaN-on-Si技術では、8インチSi基板を用いている。GaN結晶成長に用いられる基板材料の性質を表1に示す。Si基板を用いることの利点は、従来GaN系半導体の

表1. GaN の結晶成長用基板の特性比較

Comparison of characteristics of substrates for GaN epitaxial growth

項目	Si	サファイア	SiC	GaN
GaNとの格子定数差 (%)	-17.0	15.0	3.5	0.0
GaNとの熱膨張係数差 (%)	54.0	-34.0	29.0	0.0
熱伝導率 (W/(cm·K))	1.5	0.2	4.9	1.3
GaNの転位密度 (/cm <sup>2</sup> )	~10 <sup>9</sup>	~10 <sup>8</sup>	5×10 <sup>6</sup>	~10 <sup>5</sup>
入手可能なウェーハ直径 (インチ)	12	6	4	2~4
基板の価格	低	高	高	極めて高

SiC: 炭化ケイ素

結晶成長に用いられる基板材料に比べ12インチまでの大口径基板が低価格で入手可能であるという点である。更に大口径の基板を用いることで最先端のSiプロセス技術やプロセス装置を使えるようになり、LED量産プロセスの低コスト化も期待できる。現在、数社がGaN-on-Si技術を用いてLED素子の量産を行っているが、Si基板サイズは6インチにとどまっており、8インチSi基板での量産化に向けて開発が進められている。当社はこうしたなかで、8インチSi基板を用いたLEDを可能にした<sup>(2)</sup>。

## 2.1 Si基板上へのGaN結晶成長技術

表1に示したように、Si基板ではGaN結晶との格子定数差-17%、熱膨張係数差54%と、他の基板に比べてGaN結晶との差が大きい。基板材料と成長する結晶の格子定数差は結晶成長において格子不整合による転位や欠陥を誘発し、熱膨張係数差はクラックを誘発する。実際に高温でGaN薄膜の結晶を成長させた後に室温まで冷却する過程で、熱膨張係数の不一致によりGaN薄膜に引張り応力が誘起されるためクラックが発生しやすい。高品位なGaN薄膜を得るためには、クラックを抑制するための応力制御層や転位を低減するための成長モード制御層などを形成する必要がある。応力制御層の構造としては、窒化アルミニウムガリウム (AlGaIn) / 窒化アルミニウム (AlN) 中間層を形成する構造や、AlN/GaN薄膜の超格子層を挿入する構造、SiNマスク層とAlN中間層を挿入する構造、低温AlN層を挿入する構造など様々な構造が試みられている。

## 2.2 Si基板上LEDの作製

当社は、AlGaIn系バッファ層を開発し、図1(a)に示す8インチでクラックのないLEDの作製を可能にした<sup>(3)</sup>。

LED素子の構造には、図1(b)及び(c)に示すようにGaN-on-Si技術と整合性の良い、Thin-Film構造を採用した。結晶成長用のSi基板は波長450nmの青色光を吸収する。このため、Thin-Film構造では、結晶成長したLED薄膜の表面側に高反射p電極を形成後、Si支持基板を接合し、その後、LED薄膜裏面側の結晶成長用Si基板をエッチングにより剥離除去し、光出射面が形成される。活性層の発光でSi支持基板側に出

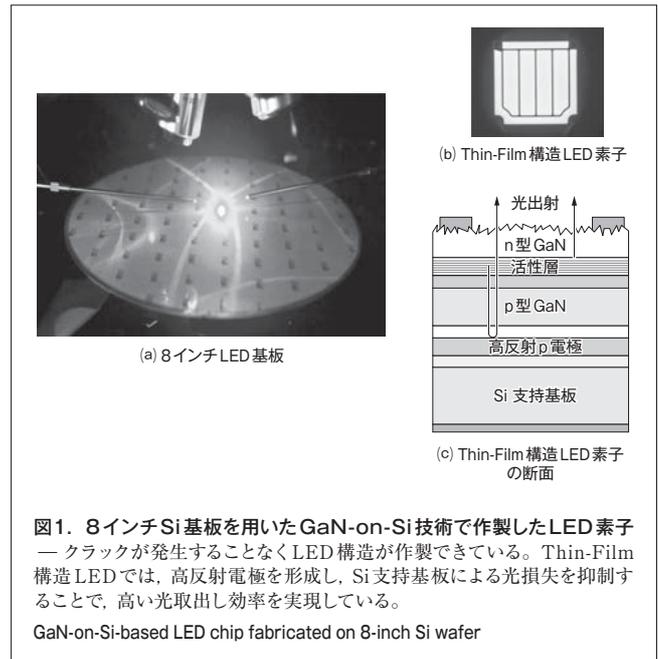


図1. 8インチSi基板を用いたGaN-on-Si技術で作製したLED素子—クラックが発生することなくLED構造が作製できている。Thin-Film構造LEDでは、高反射電極を形成し、Si支持基板による光損失を抑制することで、高い光取出し効率を実現している。

GaN-on-Si-based LED chip fabricated on 8-inch Si wafer

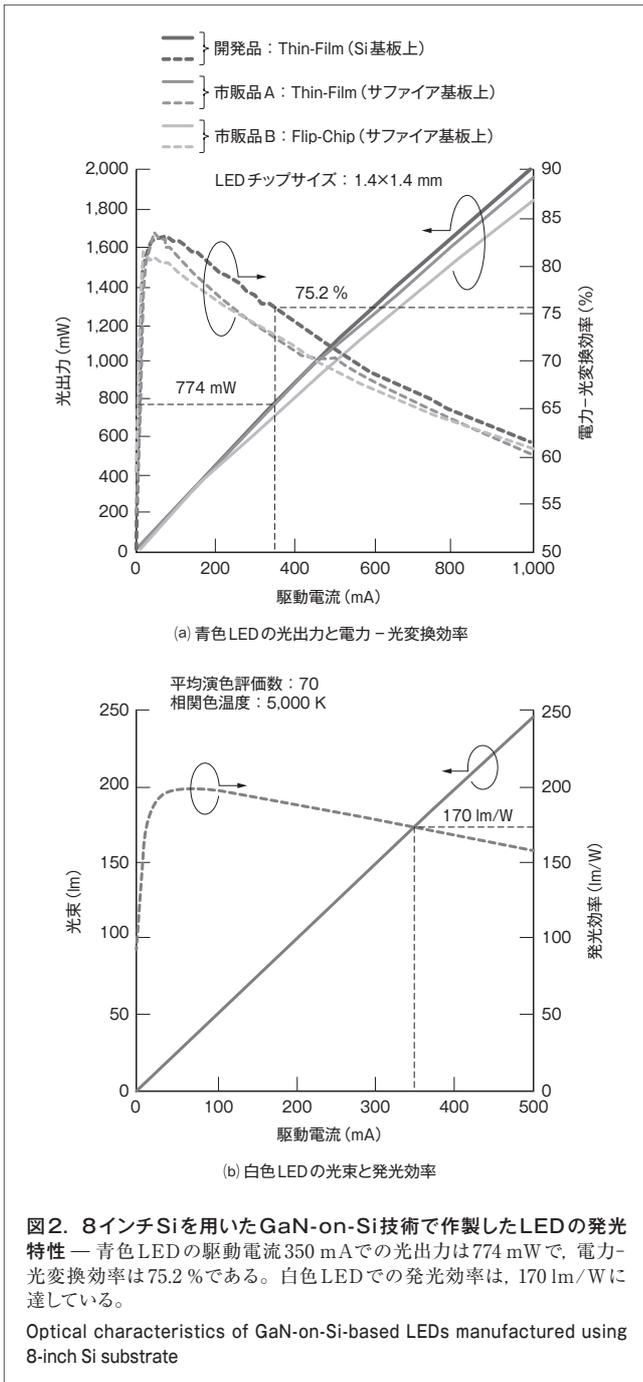
射した光は、高反射p電極で反射し、素子表面側から出射することでSi支持基板による光損失を抑制し、高い光取出し効率を実現している。

Thin-Film構造の青色LED素子の発光特性を図2に示す。駆動電流350mAでの光出力は774mWであり、また電力-光変換効率は75.2%で、従来の基板上に作製された市販LEDと同等の光出力と発光効率を得られている。この青色LEDを用いた白色LEDの効率は図2(b)に示すように170lm/Wで、市販の照明用LEDと同等の特性を得られている。

## 3 Si基板上GaNの低転位化技術

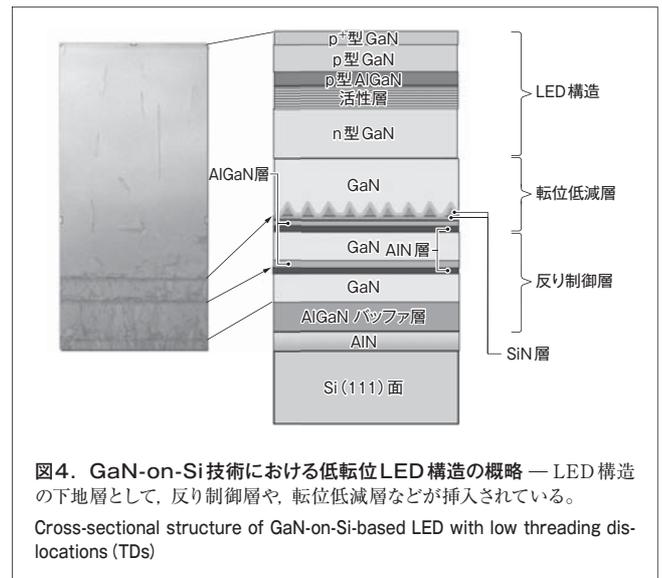
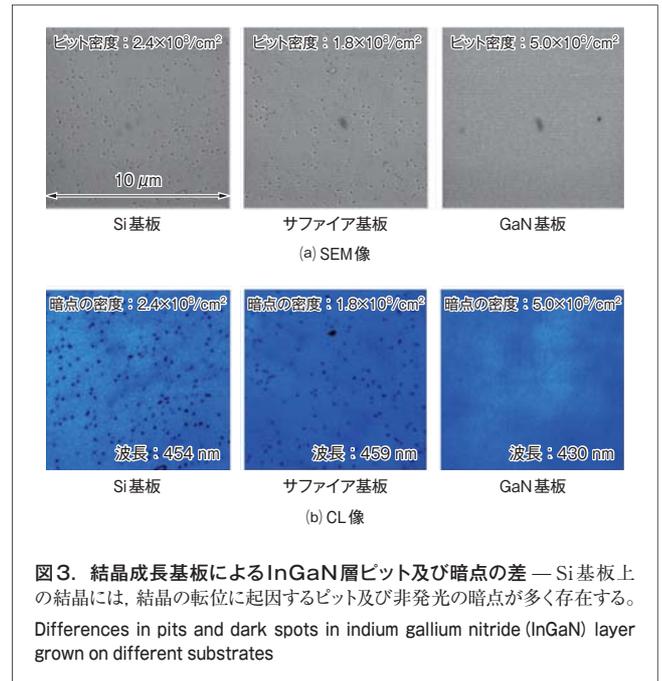
サファイア基板上LEDを超える特性を実現するための、低転位化技術について述べる。

既に述べたようにSi基板とGaN層間には-17%の格子定数差があり、Si基板上のGaN層には、10<sup>9</sup>/cm<sup>2</sup>程度の高密度な転位が誘発される。Si、サファイア、及びGaN基板上にGaN下地層と窒化インジウムガリウム (InGaIn) 活性層を形成した試料表面の走査型電子顕微鏡 (SEM) 像とカソードルミネッセンス (CL) 像を図3に示す。Si基板上に形成したInGaIn層表面のSEM像には、高密度のピットが観察される。これは、転位に起因するピットであり、CL像では非発光の暗点として観察される。転位密度の大きいSi基板上では、高密度の暗点が存在するが、サファイア基板及びGaN基板では非発光の暗点の密度が小さい。これは、サファイア基板やGaN基板上に形成されたGaN層とInGaIn層中の転位密度が、Si基板上に比べて小さいためである。転位は、ショックレーリードホール型の非発光再結合中心として働くことが知られており<sup>(4)</sup>、LEDの内部量子効率低下



の原因となる。GaN-on-Si技術によるLED構造の結晶成長で転位密度の低減は重要な課題である。

当社は、GaN-on-Si技術による結晶成長で独自の低転位化技術を開発した<sup>(3)</sup>。図4に示すように結晶成長中の基板の反り制御層にAlGaIn/AIn中間層を挿入し圧縮応力を蓄積させることで基板が凸状に反るように制御した。また、転位低減層には、AlN、AlGaIn、及びSiN層より成る中間層を挿入した。SiN中間層上へのGaN層の成長過程を図5に示す。成長初期は3次元成長が促進され島状のGaNが形成される。更にGaNが厚く成長し平坦(へいたん)な表面が得られる過程



において、SiN中間層による転位のマスク効果及び転位の伝搬方向が屈曲し変化することで転位どうしが合体して消滅し、転位密度が低減される。この技術により、Si基板上にサファイア基板上のGaN層と同等の低転位密度である $1.6 \times 10^8 / \text{cm}^2$ のGaN層が形成可能となった。

SiN中間層を用いて低転位化したLEDの発光特性を図6に示す。図6(a)に示すように、SiN中間層を挿入しない転位密度の大きい場合に比べ、転位密度を低減することで外部量子効率 $\eta_{\text{ext}}$ は25℃の場合及び85℃の場合ともに上昇する。この効果は、低電流密度領域で顕著である。また、光出力の温度消光(25℃と85℃における光出力の比)の転位密度依存性を図6(b)に示す。転位密度が低いほど温度消光は抑制され、転位密度

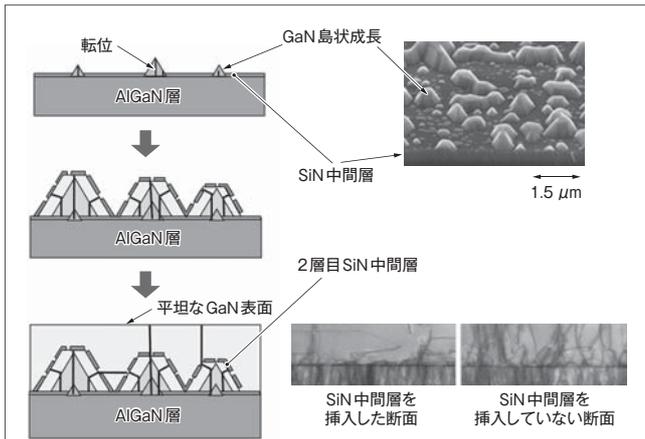
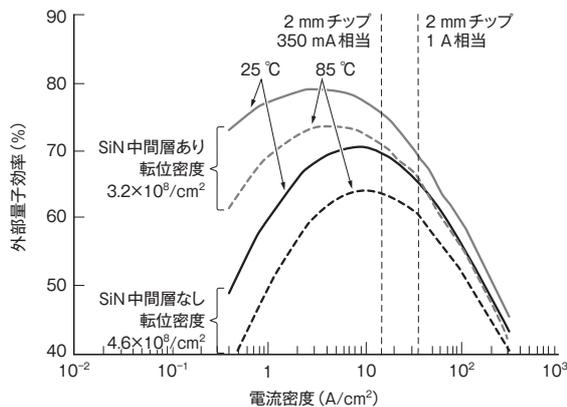
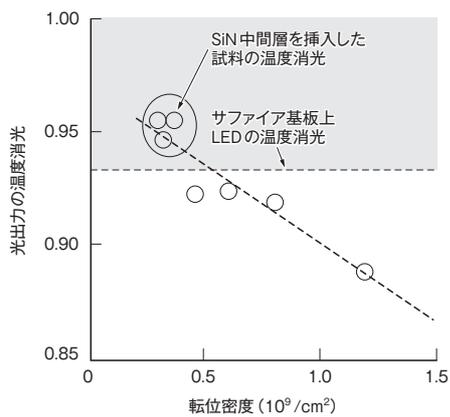


図5. SiN中間層の挿入による転位密度の低減メカニズム — SiN中間層上にGaInが成長する初期過程において、3次元成長により島状のGaInが形成される。その後平坦なGaInが成長する過程で、転位どうしが合体し消滅する。

Mechanism of TDD reduction by inserting multiple SiN interlayers



(a) LEDの外部量子効率の温度依存性



(b) 光出力の温度消光の転位密度依存性

図6. SiN中間層を挿入した低転位化によるLEDの発光特性の変化 — 低転位化により、LEDの外部量子効率が向上するとともに温度特性も改善される。3×10<sup>9</sup>/cm<sup>2</sup>以下まで低転位化することで、サファイア基板上のLEDと同等以上の温度特性が得られる。

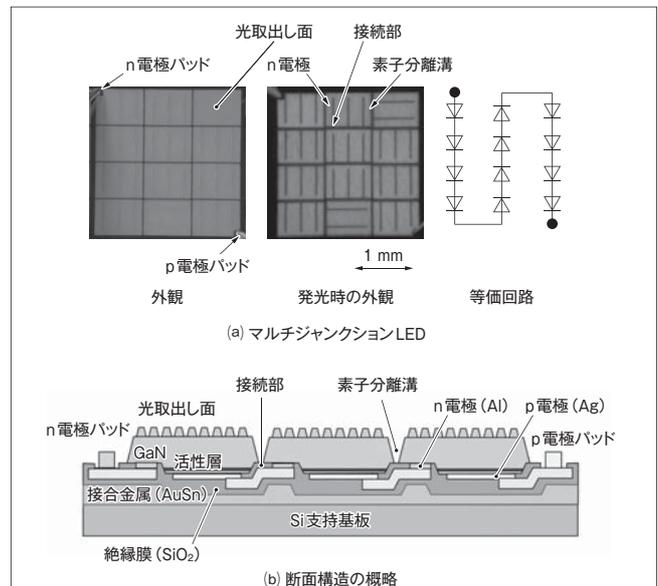
Improvement of temperature characteristics of external quantum efficiency by TDD reduction

が3×10<sup>8</sup>/cm<sup>2</sup>以下ではサファイア基板上に作製したLEDと同等以上の95%が得られる。これらの現象は、転位がショックレーリードホール型非発光再結合成分であり、大きな温度依存性を持っていることに起因している<sup>(5)</sup>。GaN-on-Si技術においてLED層の転位密度を3×10<sup>8</sup>/cm<sup>2</sup>以下まで低減することで、サファイア基板のLEDと同等以上の発光効率と温度特性が実現できる。

#### 4 GaN-on-Si技術による照明用高光束LED

LED照明の応用拡大に伴い、LEDの高光束化に対する要求が強くなっている。高効率のLED素子を多数個実装するChip-on-Board (COB) 実装や、LED素子の大型化により駆動電流を大電流化し高光束化する方法などが主流となっている。

ここでは、GaN-on-Si技術に適した新たな高光束LEDの一例として、マルチジャンクション型の高電圧LEDを図7に示す<sup>(6)</sup>。このLED素子は複数のセル領域に分割されており、セル数と同数のpn接合が形成され、各セルは電極配線パターンにより直列接続されている。Thin-Film構造をベースとした素子構造で、電極や素子接続配線は、素子裏面に埋め込まれた構造である。素子表面に光出力の妨げとなるような配線がないため高い光取出し効率が期待できる。セル数が1, 4, 及び9個のLED素子(以下、それぞれ1ジャンクション、4ジャンクション、及び9ジャンクションと呼ぶ)の電圧-電流特性を図8(a)に示す。同一の電力では、セル数を増加することで動作電圧は高



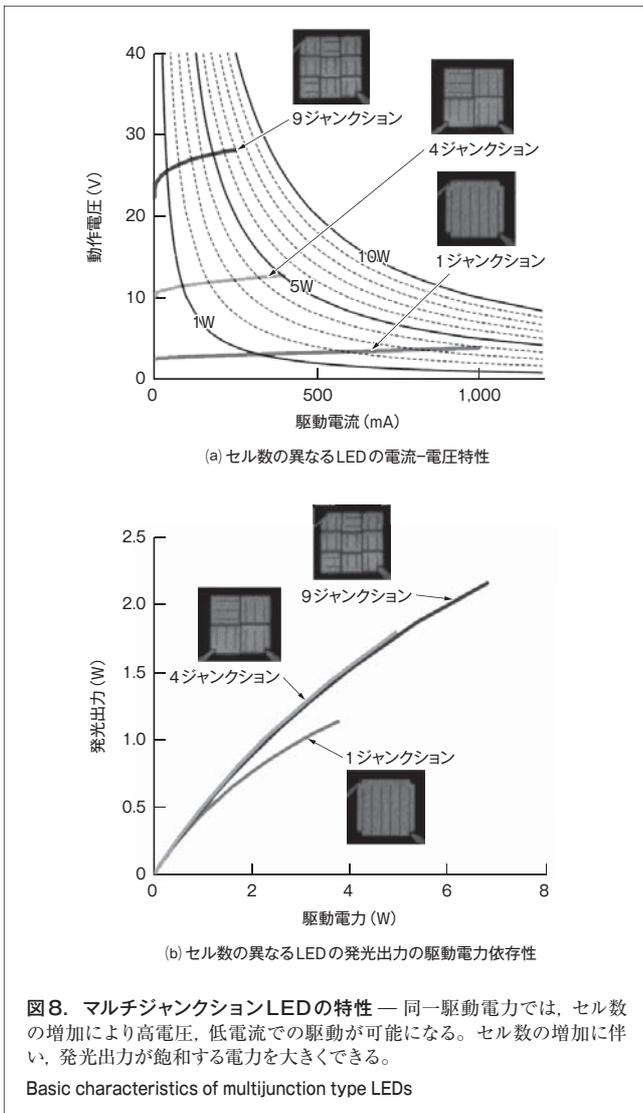
Ag: 銀 AuSn: 金すず合金 SiO<sub>2</sub>: 二酸化ケイ素

図7. GaN-on-Si技術を用いたマルチジャンクションLED — LED素子中に複数のpn接合のセル領域が形成されており、各セルが直列に接続されている。

Multijunction type high-voltage LED using GaN-on-Si technologies

くなり、駆動電流は小さくなる。また、図8(b)に示すようにセル数を増加することで、駆動電力に対し発光強度は飽和せず増加する。また、セル数を増加し、小電流駆動のLED素子では、面内への均一な電流注入が可能であるため発光効率の上昇も期待できる。セル数9個のLED素子で動作電圧28.0V、電流150mAで光束449lmが得られた。

LED照明の灯具設計において、LEDの動作電圧を電源の効率が高い電圧に合わせることでLED照明灯具の総合効率を高くすることが可能である。また、COBのような複数素子の高密度実装では、素子間の距離が近すぎると近接素子どうしが光取出しを妨害するため、発光効率が低下するという問題がある。図7のマルチジャンクションLEDは、近接素子の影響を受けないため、光束の高密度化が可能であり、今後のLED素子の高光束化において、COBに代わる素子として期待できる。



(注1) LED素子に大電流を注入すると発光効率が低下する現象。

## 5 あとがき

8インチSi基板を用いたGaN-on-Si技術によるLEDの作製を可能にした。LEDの特性は、既に市販のサファイア基板上に作製されたLEDと同等レベルに達している。GaN-on-Si結晶成長技術における転位密度の低減による結晶性の改善により、サファイア基板上LED以上の特性が期待される。

また、小出力の白色LEDでは、理論限界に近い効率が得られているものの、高出力LEDについては、効率ドループ現象<sup>(注1)</sup>の理解や対策などLED特性の向上に向けた課題が明らかになっている。GaN-on-Si技術による効率ドループ抑制技術の開発などGaN-on-Si技術の深耕により、サファイア基板の代替技術としてだけでなく、新たな付加価値を提供するLED素子の実現が期待される。

## 文 献

- (1) Haitz, R. ; Tsao, J. Y. Solid-state lighting: 'The case' 10 years after and future prospects. Phys. Stat. Sol. (a). **208**, 1, 2011. p.17-29.
- (2) Nunoue, S. "High performance LED for the solid-state lighting using GaN on Si technology". LED JAPAN, Strategies in Light. Yokohama, 2014-10, ICS Convention Design and Penn Well Corp. 2014, S4P1.
- (3) Nunoue, S. et al. "LED manufacturing issues concerning gallium nitride-on-silicon (GaN-on-Si) technology and wafer scale up challenges". 2013 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM). Washington, DC, USA, 2013-12, IEEE. 2013, p.13.2.1-13.2.4.
- (4) Dai, Q. et al. Internal quantum efficiency and nonradiative recombination coefficient of GaInN/GaN multiple quantum wells with different dislocation densities. Appl. Phys. Lett. **94**, 11, 2009, p.111109-1-111109-3
- (5) Meyaard, D. S. et al. On the temperature dependence of electron leakage from the active region of GaInN/GaN light-emitting diodes. Appl. Phys. Lett. **99**, 4, 2011, p.041112-1-041112-3.
- (6) Tajima, J. et al. "Fabrication of Multi-Junction LEDs for High-Power Drive Using GaN-on-Si Technologies". 11th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-11). Beijing, China, 2015-08, Peking University, etc. 2015, MoO06.



布上 真也 NUNOUE Shinya, Ph.D.

研究開発統括部 研究開発センター技監、博士(工学)。  
化合物半導体の発光デバイスの開発に従事。応用物理学会  
会員。

Corporate Research & Development Center