

## LED チップ開発の最新動向

中田尚幸<sup>\*1</sup>, 荒添直棋<sup>\*2</sup>, 篠田大輔<sup>\*3</sup>

### Latest Trend of LED Chip Development

Naoyuki Nakada<sup>\*1</sup>, Naoki Arazoe<sup>\*2</sup>, Daisuke Shinoda<sup>\*3</sup>

#### 要旨

本稿では、特殊照明用途に使用する LED チップ開発の最新動向を報告する。高効率化と光源サイズの小型化という市場要求を満たすために、高電流密度での LED 性能を向上させることは重要な課題である。一般的に、高電流領域の性能低下は、デバイスの自己発熱効果に起因する。この問題を解決するための開発事例として、温度特性の改善事例と放熱特性に優れたフリップチップ (FC) 構造の開発事例を紹介する。

#### Abstract

In this article, we described recent developments in LED lighting using for large areas. To satisfy the strong market demand such as high efficiency and small size, improving LED performance in high current density is crucial issue. Generally, performance degradation in high current region is caused by self-heating effect of the device. To resolve this significant issue, we achieved excellent temperature characteristics and high heat radiation with FC structure.

## 1. はじめに

1996年に青色LEDと黄色の蛍光体を組み合わせた現在の主流である白色LEDが実用化され、以降めざましい技術開発によって発光効率 (lm/W) は飛躍的な向上を続けている。発光効率の向上に伴い、LED市場は信号や交通案内等の表示機器、液晶用バックライト、照明分野と急拡大を続け、直近では発光効率200lm/Wを視野にいった製品も実用化段階に入っている。これは蛍光灯の発光効率の約2倍、低圧ナトリウムランプ (180lm/W) を超えて既存光源技術で最大の発光効率を実現することであり、蛍光灯のLED化代替スピードの加速やヘッドライト、投光器等の特殊照明用途への更なる市場拡大が見込まれている。

特殊照明用途の開発ニーズとして単位面積当たりの明るさ向上があげられる。これを実現するには光源面積の小型化・高出力化のための高電流投入が必要である。しかしながらLEDチップは高電流化やそれに伴うチップ自身の発熱により発光効率が低下する性質があり、この改善が必須課題

となっている。本報告では上記課題に対する開発事例として、2項で温度特性改善事例を、3項で大電流領域での放熱性に優れたフリップチップ (FC) 開発事例を紹介する。

## 2. 温度特性改善

### 2-1. LEDの効率

白熱電球の代替としてLEDを用いた電球型照明が広く普及している。外観や発光の色目は良く似ているが、その特性は大きく異なる。この違いは発光原理に依るものであり、白熱電球はタングステン等でできたフィラメントに電流を流して加熱することによって光を発する黒体放射に良く似たものであるのに対し、LED電球は半導体で構成された発光ダイオード内部でプラスの電荷を持った電子とマイナスの電荷を持ったホールが結合する際に発するエネルギーが光として放出されるものであるという違いである。このため、白熱電球は太陽光に似た発光スペクトルを示すのに対し、LED電球は半導体材料に起因した特定の波長で強度が強い発光スペクトルを示す。発光原理の違いから温度に対する特性も大きく異なる。白熱電球はフィラメントを加熱することで発光するため、周囲の温度が低い場合は加熱するために多くのエネルギー (入力電力) が必要となり効率 (電

\*1 オプトE事業部 オプトE要素技術開発部

\*2 オプトE事業部 照明・H/Lユニット

\*3 オプトE事業部 バックライトユニット

力効率)は悪くなる。逆に周囲温度が高い場合は加熱するためのエネルギーが少なくて済むため効率は良くなる。一方、LED 電球ではこの特性は逆転する。一般に半導体は周囲温度が低い場合は欠陥等に起因した準位が活性化しにくいいため効率は良くなる。逆に周囲温度が高い場合はこれらが活性化しやすくなるため効率は低下する。これらの概念図を図-1に示す。

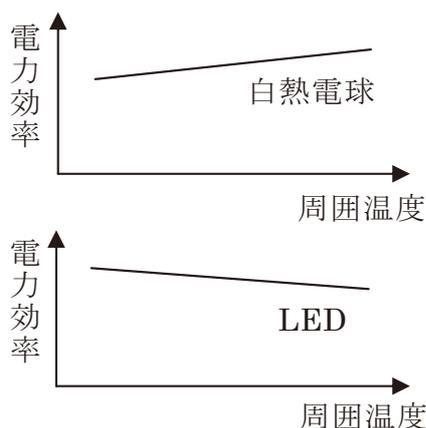


図-1 周囲温度と電力効率の概念図

LED 電球に用いられている窒化ガリウム (GaN) 系 LED でもこれと同様な特性を示す。入力電力の 10% 程度しか照明光として利用できない白熱電球に対し、入力電力の半分以上を光に変える GaN 系 LED でもその残りは最終的には熱エネルギーとして消費している。白熱電球では照明光以外に変換された熱や赤外線発光を利用して効率を高めることができるが、LED では変換された熱は効率を低下させる。このため、LED 電球では効率を低下させないように放熱するための様々な工夫が凝らされている。しかしその光源としての LED チップに対しては、より小さくより明るくという要求が強く、そのため小さなチップに多くの電流を流すことになる<sup>1)</sup>。電流を多く流すと効率が低下する現象は効率 droop と呼ばれ、これもまた効率の低下分は最終的には熱に変換されている。このようなことから、豊田合成では LED チップそのものの温度に対する効率低下を改善する技術開発を進めており、本項ではその改善事例を紹介する。

## 2-2 効率低下の要因

電流を増加させたときに効率が低下する効率 droop は、発光層内でキャリア密度が増加したことによる電子とホールとの再結合全体に占める発光再結合の割合の低下と、キャリアの発光層からの漏れによるものが要因であると考えられる<sup>2,3)</sup>。一方、温度上昇による効率低下は、欠陥等に起因し

た非発光再結合中心を介してキャリアが再結合するショックレー-リード-ホール (SRH) 再結合によるものと、発光層からのキャリアの漏れが要因として考えられる<sup>4)</sup>。LED 内のキャリアの再結合は経験則として ABC モデルでよく表される。これはキャリア密度を  $n$  とした時、再結合速度  $R$  は、

$$R = An + Bn^2 + Cn^3$$

で示されるというものである。ここで、 $A$ 、 $B$ 、 $C$  はそれぞれ SRH 再結合、発光再結合、オージェ再結合の各係数である。この式が表すように、SRH 再結合はキャリア密度が低い時に支配的であり、キャリア密度が増加すると再結合全体に占めるその割合は低下していく。通常の LED において、周囲温度を変化させた時の発光強度の変化を図-2に示す。図には室温での発光強度を 1 とした時の相対強度を縦軸とし、電流密度を 1.5、15、90 A/cm<sup>2</sup> とした時のそれぞれの温度に対する変化を示した。

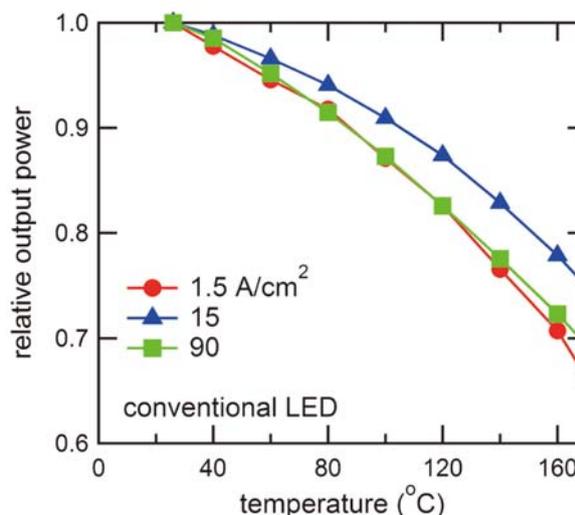


図-2 周囲温度と相対発光強度

図-2より、電流密度が 1.5 A/cm<sup>2</sup> と低い時、周囲温度を 120℃まで上昇させると発光強度は室温の 82% と 18% 低下することが分かる。しかし、ここから電流密度を上げるとこの低下率は小さくなっていく。同図に示すように、電流密度を 15 A/cm<sup>2</sup> まで上昇させるとその低下幅は 13% に留まる。ここでさらに電流密度を上げていくと、その低下率は大きくなっていく。電流密度を 90 A/cm<sup>2</sup> とした場合は、その低下幅は 18% となる。電流密度を変化させた時のそれぞれの電流密度での室温に対する 120℃時の相対発光強度の変化を図-3に示す。

図-3より、電流密度が 30 A/cm<sup>2</sup> より低い場合、電流密度が増加すると室温に対する 120℃時の相対発光強度が増加していく様子が分かる。これはこの電流密度領域では電流密度が高くなるほど再結合全体に占める SRH 再結合の割合が低下

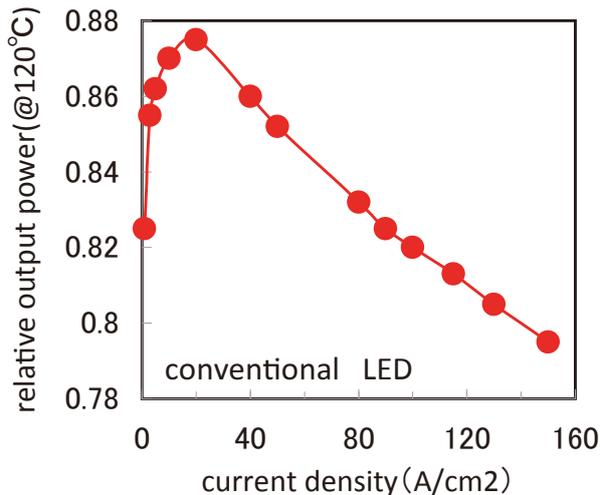


図-3 電流密度と相対発光強度

するためであると考えられる。このことから、このような低い電流密度で駆動する場合、転位密度を低減させるなどの対策が有効であると考えられる。一方、電流密度が  $30\text{A/cm}^2$  より高い場合、電流密度が増加すると室温に対する  $120^\circ\text{C}$  時の相対発光強度は低下していく様子が分かる。このことから、この電流密度領域では発光層からのキャリアの漏れが支配的であると考えられる。温度が上昇することにより再結合全体に占める発光再結合の割合が低下すると共に、熱エネルギーを得たキャリアが発光層（井戸層）を発光再結合しないで通過しやすくなっているためである。以上のことから、発光層に多重量子井戸構造を採る現在の LED 構造においては、井戸層にキャリアを留め発光再結合させることが、高電流密度領域での温度上昇による効率低下を抑制するのに有効であると考えられる。

本項では LED 構造に用いている超格子層の結晶成長条件を最適化することにより結晶表面の平坦性を向上させ、温度上昇による効率低下を抑制させた事例を紹介する。

### 2-3. 表面平坦性向上による温度特性改善

表面平坦性向上を狙い、結晶成長の条件を変更して超格子層で成長を止めたウエハを 3 種類作製した (sample A, B, C)。図-4 に原子間力顕微鏡 (AFM) にて測定した二乗平均面荒さ (RMS) を示す。サンプル A, B, C の順に表面 RMS の値が小さくなっており、結晶成長条件の最適化により超格子層における表面平坦性を向上できることが分かる。

次にこれら 3 種類の異なる結晶成長条件にて LED 構造を作製し、周囲温度に対する相対発光強度の変化を評価した。その結果を図-5 に示す。

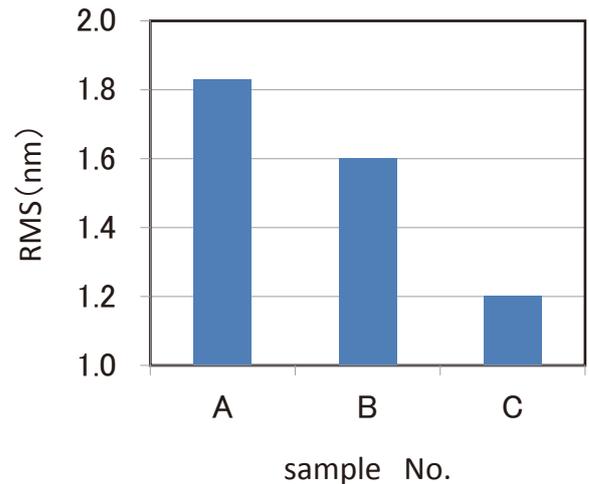


図-4 結晶成長条件を変更して作製した超格子層における表面 RMS 値

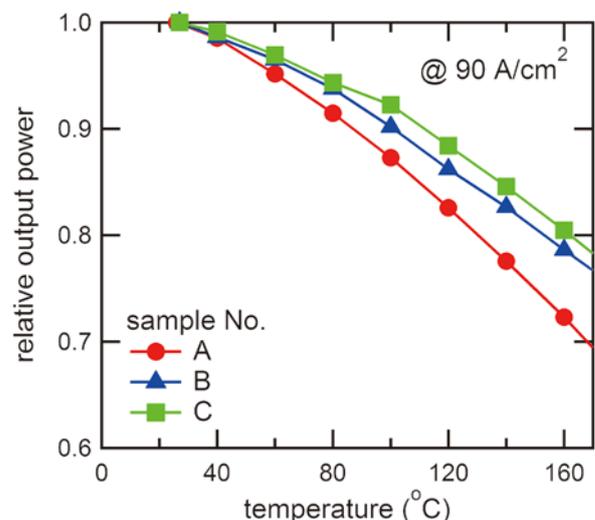


図-5 結晶成長条件を変えて作製した LED の相対発光強度の周囲温度依存性

図-5 より、サンプル A, B, C の順に温度上昇時の室温に対する発光強度の低下が小さくなっていることが分かる。サンプル A では  $120^\circ\text{C}$  時の室温に対する相対発光強度が 82% であるのに対し、サンプル C ではその値が 89% へと改善している。

図-6 に各サンプルの RMS 値と  $120^\circ\text{C}$  時の室温に対する相対発光強度の関係を示す。

図-6 から表面平坦性が小さくなるにつれて、温度上昇時の発光強度の低下が小さくなっていることが分かる。このことから、表面平坦性の向上が温度上昇時の発光強度の低下を抑制する要因であると考えられる。本サンプルにおいて、井戸層は GaInN で構成されているが、GaInN は In の局所的な偏析が生じやすい。表面平坦性が向上したことによりこの偏析がより小さくなり、偏析によって生じていた局所的な電場勾配が小さくなったと考えられる。局所的な電場勾配はキャリアの

集中の要因となり、温度の上昇により欠陥等を通じてトンネルしていく<sup>5)</sup>。本実験において周囲温度上昇時の発光強度の低下が抑制されたのはこのような現象が抑制されたためであると考えられる。

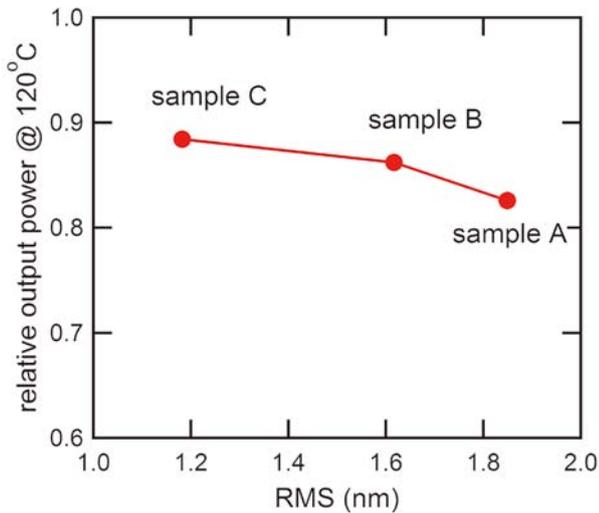


図-6 超格子層の表面 RMS と 120°C時の相対発光強度

### 3. フリップチップ開発

#### 3-1. LED チップの構造

LED チップは特性向上や用途に合わせて、様々な形状や構造が考案されているが、実装方法に着目すると大きく2種類に分類することができる。一つは、フェイスアップチップ (FU) と呼ばれるもので、もう一つはフリップチップ (FC) と呼ばれるものである。この二つの構造を図-7に示す。

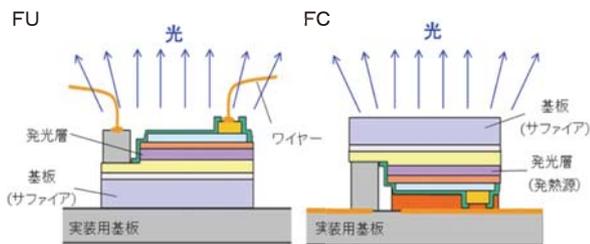


図-7 FU と FC の構造

FUはサファイア基板を実装用基板と接合するタイプで、電極に透明電極を用いることで、電極側から光を取り出すLEDチップである。この実装方法に対して、チップを上下逆にして電極を実装用基板と接合する実装方法をとるチップがFCである。これはサファイア基板が透明であることを利用して、サファイア基板側から光を取り出すLEDチップである。

#### 3-2. フリップチップの特長

FUとFCは上記のような構造上の違いから、主に表-1のような特長を持つ。

表-1 FUとFCの特長

	項目	FU	FC
①	実装しやすさ	有利	不利
②	実装 小スペース化	不利	有利
③	放熱性	不利	有利

##### ①実装しやすさ

FCでは実装用基板に接合するチップ面にp電極とn電極があり、このpとnが電気的につながらないように実装する必要があり実装難易度が高い。これに対して、FUでは実装用基板に接合するチップ面は絶縁物であるサファイア基板であり、チップ全面と実装用基板を接着すればよいのでFCより実装が容易であり、現在主流の構造になっている。

##### ②実装 小スペース化

FUでは電気的接続のためにワイヤーボンディングが必要であり、そのスペースが実装用基板に必要である。それに対して、FCでは実装用基板とチップを直接電気的に接続するために、ワイヤーが不要であり実装スペースを小さくできる。

##### ③放熱性

LEDチップは、電気的なエネルギーを光のエネルギーに変換するものだが、その際のロスにより発熱する。また、LEDチップは発光層の温度が上昇すると明るさが低下してしまう。そのため、放熱性が良いことが望まれる。LEDチップでは、発光層が発熱源となっている。FUにおいては、数百um厚のサファイア基板を通して熱を実装用基板に逃がす必要があるため熱がこもりやすい。一方、FCでは、数um厚の電極を通して熱を実装用基板に逃がせば良いため、放熱性はFUに比べて良い。同一電流密度でのチップ温度を比較したデータを図-8に、電流密度による明るさを比較したデータを図-9に示す。図-8からFC

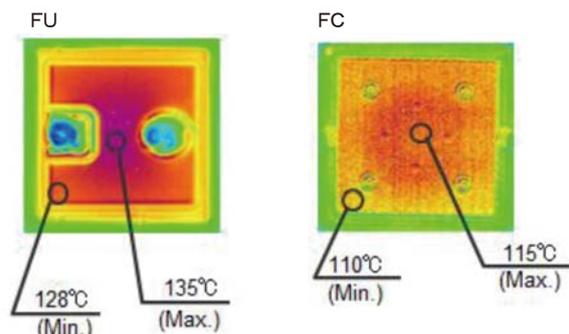


図-8 FU と FC のチップ温度比較

の方がFUよりもチップ温度が低いことが分かる。電流密度を上げるほどチップの発熱は大きくなるが、図-9から、放熱性の良いFCはFUほど効率 droop が起こらないことが分かる。

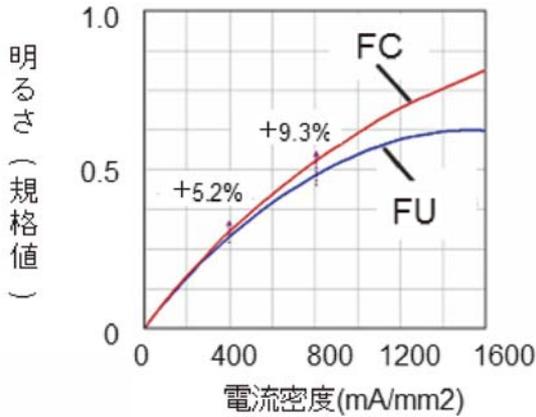


図-9 明るさの電流密度依存性

### 3-3. FCがターゲットとする市場

照明市場における配光制御の必要性と光束について、器具ごとの位置づけ概要を、図-10に示す。

LED化がまだ進んでいない領域として、ヘッドライトや投光器等の特殊照明があげられる。これらは、配光制御が必要で、高光束が求められる。器具において配光制御をするためには、チップを高密度実装し、発光面積を小さくすることによりレンズでの配光制御を容易にする必要がある。また、高光束であることも必要とされている。すなわち、下記2項目を実現する必要がある。

- 1) 小さいスペースにチップを高密度実装して発光面積を小さくする。
- 2) 放熱性をあげて、大電流を投入して大光束が得られるようにする。

3-2で述べたとおり、1) 2) の点でFUと比較してFCは優位であり、これは、実装上の欠点を補うに余りあると考えられる。

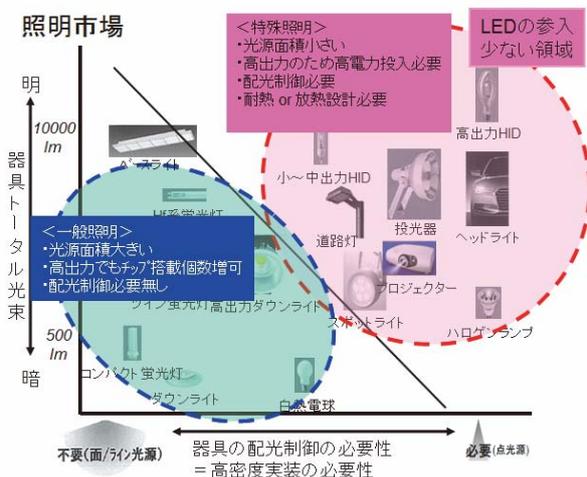


図-10 照明市場における器具の必要特性

従来は、特殊照明に必要な光束を与えられた実装スペース内で実現することは、FCであっても困難であった。しかしながら、LED技術の進歩によって発光効率向上が進み、近年キャッチアップすることが可能になってきている。

### 3-4. 明るさ向上のための技術

FCの特徴を活かし、特殊照明に必要な性能要求に応えるためには、明るさ向上が必要である。そのために開発した技術について説明する。LEDでは光は発光層で生まれるが、その際、四方八方に向かって光が進む。FCでは、この光をできるだけロスすることなく、サファイア基板面から取り出す必要があるが図-11に示すように、反射膜で光の吸収(ロス)が発生する。

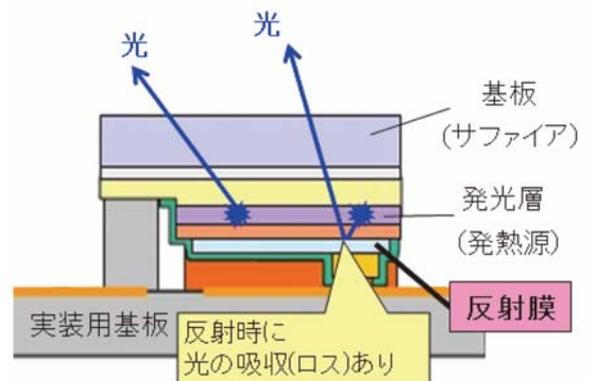


図-11 FC光取り出し

明るさを向上させるためには、反射膜に反射率のより高い材料を用いる必要がある。代表的な金属の反射率を図-12に示す。

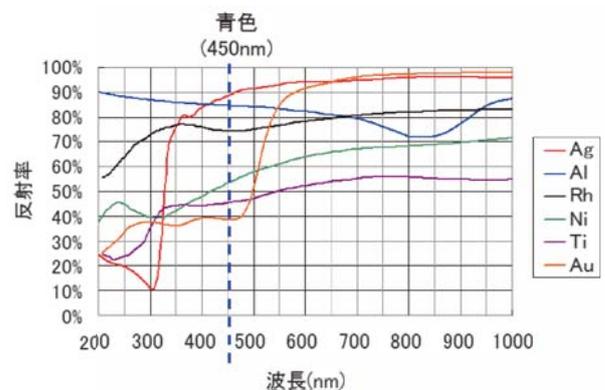


図-12 代表的な金属の反射率

反射膜としては、青色(450nm)での反射率が高いことが望ましく、最も反射率が高い金属がAgであり、次にAl, Rhと続く。従来、Alを反射膜として使用したFCは量産化してきており、今回Agを反射膜に使用することにより、更なる明るさの向上を図った。AlからAgへの変更に

よる効果を示したデータを図-13に示す。結果として、8%明るさを向上することができた。

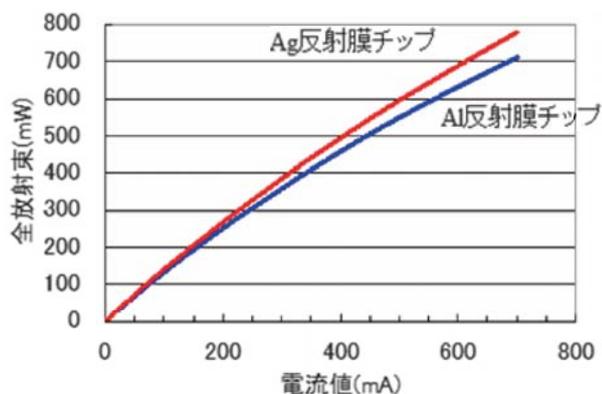


図-13 Ag 反射膜チップの全放射束

しかしながら、Ag はよく知られているとおりイオンマイグレーションしやすい金属である。そのため、明るさ向上を狙った Ag 反射膜導入時の背反事項として高温・高湿での耐久性能に課題があった。その対策方法として Ag を他の金属で覆い、水分から遮断することで耐久性能を確保することに成功した。高温・高湿試験の結果を図-14に示す。

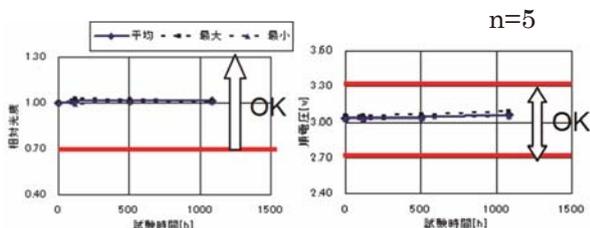


図-14 高温高湿試験結果

#### 4. 終わりに

本報告では特殊照明用途の開発ニーズを実現するための課題として LED チップの効率 droop をとりあげ、その開発事例を紹介してきた。温度・電流の使用環境による発光効率低下に対する改善余地はまだまだ大きい。本事例のような技術を 1 つ 1 つ積み上げていくことにより、実使用領域の発光効率を向上し、新たな LED 市場を切り開いていきたい。

#### 参考文献

- 1) 神谷真央, 豊田合成技報, 53, 15 (2011)
- 2) M.-H. Kim et al., Appl. Phys. Lett. 91 (2007) 183507
- 3) 天野 浩, 豊田合成技報, 53, 2 (2011)
- 4) D. S. Meyaard et al., Appl. Phys. Lett. 99 (2011) 041112
- 5) B. Monemar et al., Appl. Phys. Lett. 91 (2007) 181103

#### 著 者



中田尚幸

荒添直棋

篠田大輔