

LED チップ開発の最新動向（生産技術開発）

牧 弘昭^{*1}， 稲澤良平^{*1}， 澤崎勝久^{*1}

Latest Trend of LED Chip Development (Production Engineering Development)

Hiroaki Maki^{*1}， Ryohei Inazawa^{*1}， Katsuhisa Sawazaki^{*1}

要旨

LED はスマートフォンやタブレット PC の液晶用バックライト， また大型ディスプレイや屋内外照明の光源など多くの製品に普及し， 生活に必要不可欠なものにまで成長している。これらの製品を実現するために用途に応じ様々な特性が求められている。その中には電池を長持ちさせるための消費電力削減や， 写真や動画をきれいに自然な色合いで表現するための光の品質（高精細化）への要求がある。我々はそのニーズに応えるため， より安定したモノ造りを実現するための生産技術開発を進めてきた。

今回 LED チップの生産技術開発として， 波長のばらつきを抑えるための狭波長化生産技術， ならびに安定した明るさを得るための DBR 成膜生産技術の事例を報告する。

Abstract

LEDs are used in many products that are necessary for our daily life. For example, LEDs are used in liquid crystal display backlights of smart phones and tablet PCs, as well as light sources for large displays and general lighting. These products require LEDs with various characteristics depending on the application. These requirements include lower power consumption for longer battery life, and quality of light (high resolution) for the expression of natural colors in photographs and animations. We have made progress in the production engineering development that will help to achieve more stable high volume production to satisfy these requirements.

Here, two examples of production engineering development are reported. First is production engineering to reduce variations of wavelength, and second is DBR film deposition technology to obtain stable brightness.

1. はじめに

近年， LED はスマートフォンやタブレット PC の液晶用バックライト， また大型ディスプレイや屋内外照明の光源など多くの製品に普及し， 生活に必要不可欠なものにまで成長している。

現在， 市場のニーズとして特に高発光効率ならびに低価格化が強まっている。2020 年までに発光効率は 22% 向上， 価格は 65% 削減と市場予想されており， 今後も LED の効率向上・低コスト化が市場から求め続けられるのは必至である。¹⁾

これらの製品を実現するために用途に応じ様々な特性が求められている。その中には， 電池を長持ちさせるための消費電力削減や， 画像や動画を自然な色合いで表現できるための光の品質（高精

細化）への要求がある。我々はそのニーズを受け， 新規工法を開発し， 安定したモノ造りと併せて生産性向上， 低コスト化を実現した LED チップ生産技術開発を進めてきた。

2. LED チップ工程について

市場ニーズに対し， 我々は品質とコストが両立できる生産技術開発を進めてきた。

2011 年には基板の大口径化を導入し， 研磨・切断方法および， 基板面内の結晶膜均一化を行った。その結果人員・物量生産性を大幅に向上させ， 生産性向上など低コスト化を実現することができた。

またニーズである高効率チップを安定して造るために， 設備の改造・見直しおよび新規工法開発を継続的に実施してきた。

*1 オプト E 生産準備部 パッケージ生技室

ここでLEDチップ工程について簡単に説明する。工程の流れを以下図-1に示す。

- a) PSS 工程：
（PSS：Patterned Sapphire Substrate）
サファイア基板に表面凹凸加工を設けることで、LED 内部で発光した光を効率良く外部に出す構造を形成させる。
- b) 結晶成長工程：
サファイア基板にアンモニアガス（V 族材料）と有機金属（Ⅲ族材料）を化学反応させ、LED 結晶を成膜する。
- c) 電極形成工程：
結晶成長層の上に電極を形成し、LED 素子として電気を通して発光させる機能を付加する。
- d) 研磨・DBR 成膜・切断工程：
（DBR：Distributed Bragg Reflector）
電極を形成した基板を薄く研磨し裏面に反射膜を成膜し、1つ1つのチップに分割する。
- e) 検査・配列工程：
分割したチップの電気・光学特性を行い、特性別にシートに配列する。

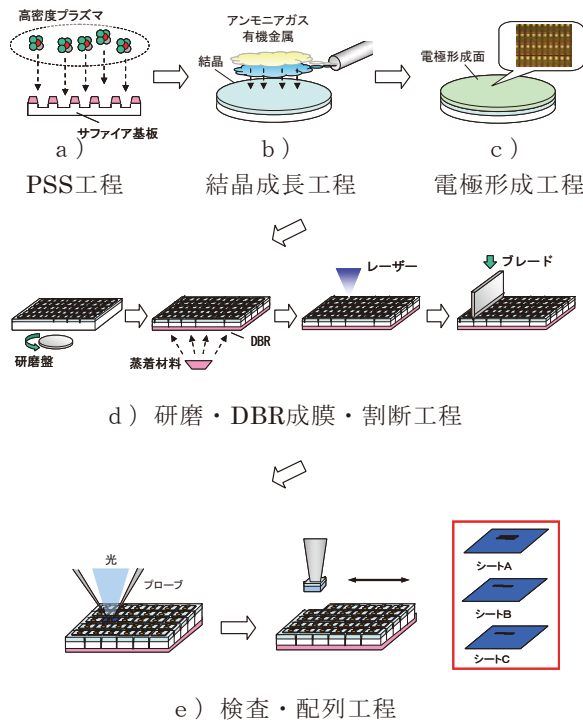


図-1 LEDチップ工程の流れ

モノ造りの上で、a)～d)工程を中心に生産技術開発を進めてきた。

今回はその中で、波長のばらつきを抑えるための狭波長化生産技術（b：結晶成長工程）、ならびに安定した明るさを得るためのチップ裏面DBR成膜生産技術（d：DBR成膜工程）の2事例を報告する。

3. 狭波長化生産技術

3-1. 光の品質への要求

スマートフォンやタブレットPCの液晶バックライトでは、自然な色合いで表現できるよう光の色合いへの要求がある。

液晶バックライトの光源として使用される白色LEDは、青色のLEDに黄色の蛍光体を用いており、蛍光体の開発と青色LEDの高い生産技術力で、太陽光に近い色合いとなる高い演色性を達成してきた。

演色性は、蛍光体の特性と青色LEDの波長によって決まり、蛍光体に合わせた適切な波長の青色LEDを組み合わせることで、高い演色性が得られる。そのため、青色LEDへは、適切な波長を精度高く造り込む生産技術が求められる。

しかし青色LEDは、わずかな製造条件・環境の差で波長が変化してしまうため、基板面内で均一な波長を造り込むには、高い生産技術力の開発が必要であった。

本報告では、均一な波長を造り込むための青色LEDチップの生産技術開発の事例を報告する。

3-2. 発光原理と波長

LEDは、図-2で示すようにエネルギー単位の高い伝導帯の電子と、エネルギー単位の低い価電子帯の正孔が再結合することで発光する。

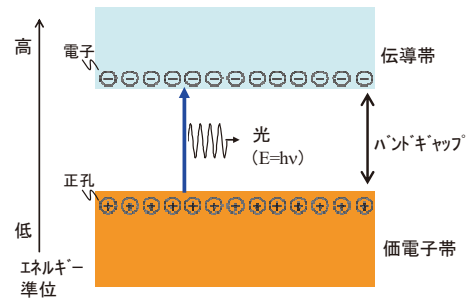


図-2 発光原理

伝導帯と価電子帯の間のエネルギー帯をバンドギャップといい、このバンドギャップで再結合エネルギーが決まり、式①により波長が決まる²⁾。青色LEDではInNとGaNの混晶であるInGaNを用いており、In/Gaの比率によって、バンドギャップが決まる。つまり、LEDにおいて波長を均一に造り込むためには、バンドギャップを決めるIn/Gaの比率を精度よく造り込むことが必要となる。

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \quad \dots \text{式①}$$

E ：エネルギー
 h ：プランク定数
 ν ：振動数
 c ：光の速さ
 λ ：波長

3-3. 結晶成長

青色 LED の製造工程は、2 項で示した図-1 のとおりで、波長は結晶成長工程で造り込まれる。結晶成長工程では、MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) 法を用いてサファイア基板の上にエピタキシャル成長させることにより、InGaN などの結晶を成長させる。

MOCVD 法によるエピタキシャル成長は、図-3 に示すように熱源となるサセプタからサファイア基板に熱を与えて、そこに Ga や In を含む有機金属とアンモニアガスを供給することで、基板の上に結晶が成膜される。

ここで、発光層である InGaN の成膜において生産技術上の難しさがある。InGaN の In/Ga の比は、図-4 に示すように温度が高くなると In

の比率が低くなり、温度が低くなると In の比率が高くなる。つまり、InGaN の成膜温度によって、In/Ga の比率、バンドギャップ、波長が変わってしまう。

GaN 系のエピタキシャル成長は、800 ~ 1000°C と高温で成膜される。その中で数°C の温度差が波長に影響するため、非常に高い精度が必要になる。

LED チップの製造工程では、1 枚の基板に数万個の LED チップを製造するため、基板面内で適切な温度から外れると In/Ga の比が変わり、最適な波長から外れてしまうチップが製造される。そのため、基板面内で均一な波長を造り込むためには、基板面内を最適な温度に制御する必要がある。

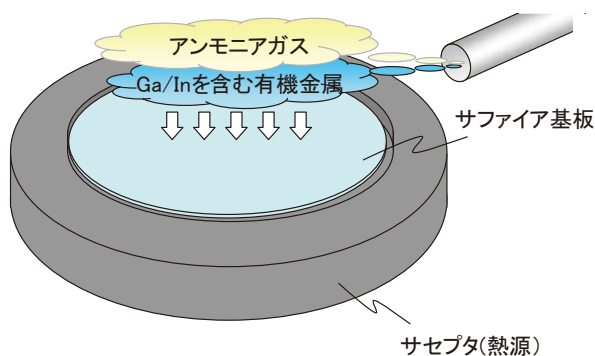


図-3 結晶成長概略図

3-4. 基板温度制御技術

サファイア基板に熱を伝えるサセプタは、カーボンを主な材料としており、基板を保持する部分の形状設計においては、熱膨張係数差を考慮する必要がある。このことから、図-5 で示すように、基板とサセプタの壁面に高温時でも接触しないよう十分なクリアランス (図-5 の d 部) を設けている。しかし、このクリアランスが伝熱に影響し、サセプタの壁面から基板までの距離により熱が十分に与えられない問題があった。

温度	低 ← → 高
Ga/In 比	
バンドギャップ	
波長	長い ← → 短い

図-4 成長温度と波長の関係

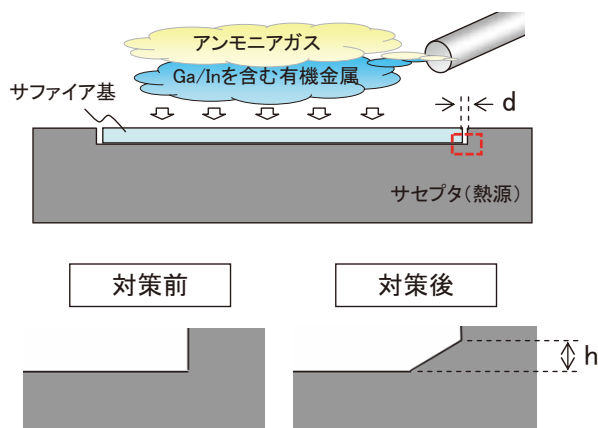


図-5 基板温度制御技術の概略図

そこで、側面からの熱の供給不足を補うために図-5 に示すように壁面近傍の底を上げることで必要な熱量を与えられないか伝熱シミュレーションにて検討した。その結果、図-6 と図-7 に示すようにサセプタ壁面から離れることで不足する熱量と壁面近傍の底を上げることで得られる熱量を導き、サセプタの形状を設計することができた。

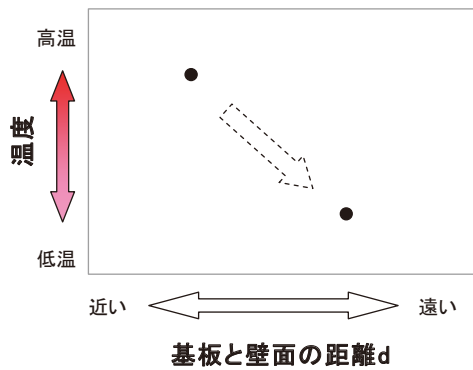


図-6 伝熱シミュレーション結果（壁面側）

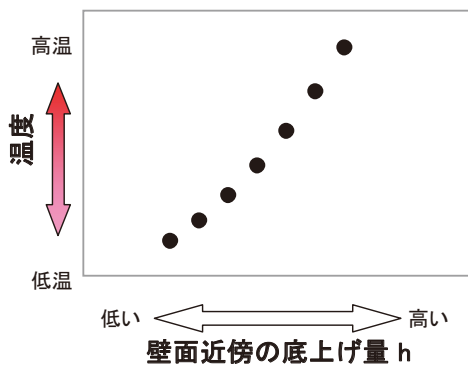


図-7 伝熱シミュレーション結果（底面側）

3-5. 狭波長化生産技術による効果

伝熱シミュレーションで得られた結果を元にサセプタを製作し成膜を実施した。その結果、基板外周部分の伝熱状態が変わり、基板外周部分の波長差はなくなり、基板面内の波長を均一にできることが確認できた。対策前と比較すると基板外周部分の波長外れエリアが低減され、有効なエリアが増えたことで、生産性を1.12倍にすることができた（図-8）。

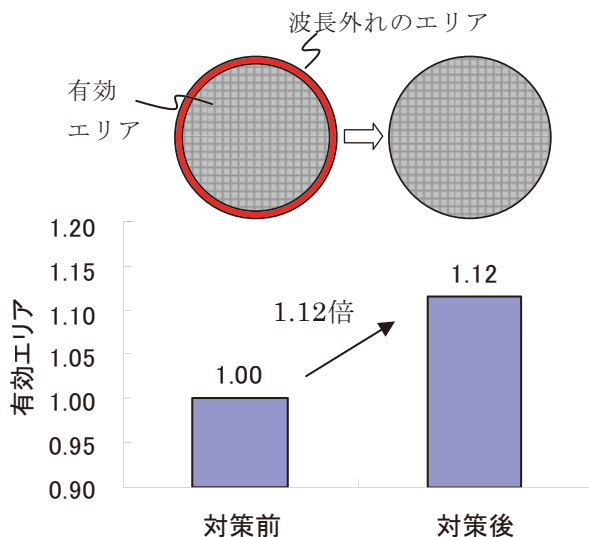


図-8 狭波長化技術による効果

4. チップ裏面 DBR 成膜生産技術

4-1. チップ光取出し向上について

LED チップの発光効率改善は現在市場ニーズとして求められており、今後も引き続き要求されることは必至である。これまで GaN 発光層からの光取出し効率向上をねらい、PSS の導入、透明電極の薄膜化、金属電極の狭配線化等の技術を導入し効率の改善を行ってきた。

2014 年より LED チップの発光効率をさらに向上するため、チップ裏面への DBR 膜を形成するための生産技術開発を行った。本報告では DBR 成膜制御技術について報告を行う（図-9）。

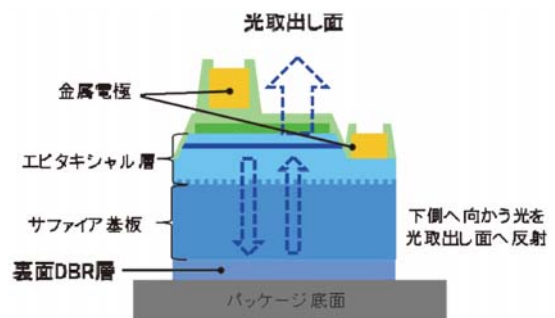


図-9 LED チップ構造と裏面 DBR

4-2. DBR 成膜時の重要点

DBR は図-10 に示すように、低屈折率層と高屈折率層を基板に対して交互に積層することで、入射する光の干渉効果を利用し非常に少ない損失で目的の波長の光を反射することができる反射膜である³⁾。

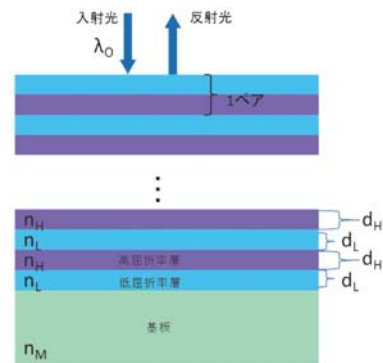


図-10 DBR 構造

特定の波長 λ_0 に対して高い反射率を示す DBR 膜を設計する場合、光の干渉効果を利用する為に各誘電体層の光学膜厚 $n \times d$ は

$$nd = \frac{\lambda_0}{4} \quad \dots \text{式②}$$

(n : 層の屈折率 d : 層の物理膜厚)

を満たすような膜厚設計を行う。一般にその反射

率 R は十分な積層数がある場合,

$$R \cong 1 - 4 \cdot \left(\frac{n_M}{n_H^2} \right) \cdot \left(\frac{n_L}{n_H} \right)^p \quad \dots \text{式③}$$

n_M : 基板の屈折率

n_L : 低屈折率誘電体層の屈折率

n_H : 高屈折率誘電体層の屈折率

p : 積層構造のペア数

の関係が成り立つことが知られている。³⁾ 高い反射率を得るためには、屈折率 n_L と n_H の差を大きくすることや成膜ペア数を増加させるなど、材料選定や成膜条件の最適化を行うことが一般的である。図-11 に DBR 膜反射率 (波長依存) の例を示す。

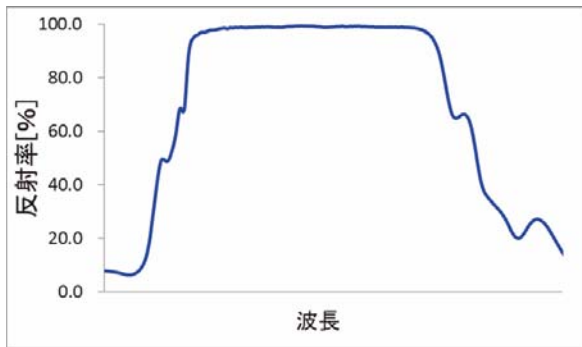


図-11 DBR 反射特性 (波長依存) の例

また DBR 膜は前述の通り光の干渉効果を利用した反射膜であり、膜面に対して入射角度に依存した反射特性を示す。これは式②の前提となっている膜面反射での反射光が強めあう条件 (式④) が、反射光 A / B の光路差が $\cos \theta$ に依存するためである⁴⁾。

$$2nd \cos \theta = (m + \frac{1}{2})\lambda \quad \dots \text{式④}$$

図-12 は入射角度に対する DBR 膜の反射特性のシミュレーション例である。単一の波長に対して設計した DBR 膜は破線のように膜面に対する垂直入射付近で高い反射率を示すような反射特性を示す。積層する光学膜厚を適切に設定することで実線に示すように広角度の入射光に対しても高い反射率を示すような反射特性に改善することができる。

光学膜厚設計によって膜の反射特性を変化させることができるのは DBR 膜の大きな特長である。しかしながらその目的の反射特性を得るためには前述の通り各層の光学膜厚 $n \times d$ を設計値通りに成膜を行うことが重要となる。

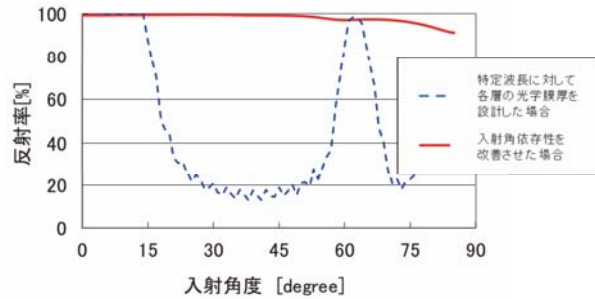


図-12 DBR 反射特性シミュレーション (入射角度依存)

4-3. DBR 成膜制御技術

前述の通り、DBR においては 2 種類以上の屈折率の異なる誘電体膜を積層する必要がある。誘電体各層の成膜方法としてはスパッタ・CVD (Chemical Vapor Deposition)・蒸着等が挙げられるが、弊社では蒸着の一種である IAD (Ion-beam Assisted Deposition) を採用している。蒸着機構を図-13 に示す。

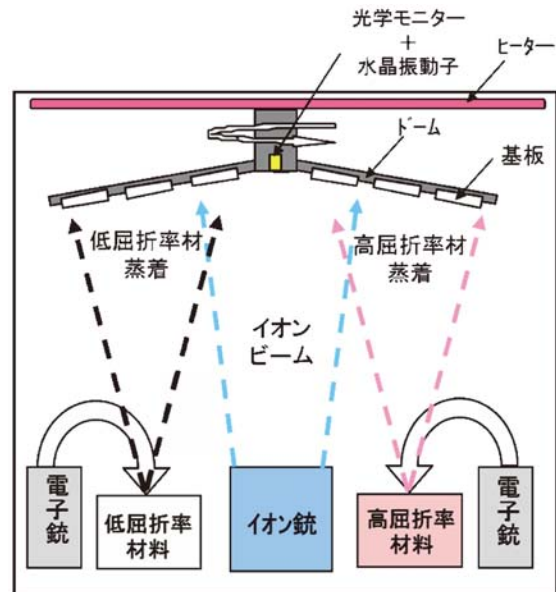


図-13 IAD による DBR 膜蒸着機構

IAD は従来の真空蒸着と装置構成が共通する部分が多い。特徴としてソースガスをチャンバー内でプラズマ化し、引出し電極で加速されたイオンを基板表面に照射することで膜の光学的特性や機械的特性を向上・安定化させることができる。

一般的な真空蒸着機ではその成膜終点の検出には水晶振動子型の膜厚計を用いることが多い。これは応答速度が速く、蒸発源 (抵抗加熱や電子線電源) の出力コントロールに向いているため、一般に広く採用されていると考えられる。水晶振動子型の膜厚計ではセンサーに付着する蒸発物質の重量から成膜膜厚を推定しているため、物理膜厚 d を制御し成膜終点を検出することになる。4-

2項で示した通り、DBR膜において目的の反射特性を得るためには光学膜厚 $n \cdot d$ を設計値通り再現良く成膜する必要がある。

しかし水晶振動子型の膜厚計による終点検出機構では、何かしらの外的要因、例えば成膜室内の残留ガスや蒸着レートのバラツキなどで屈折率 n が変動してしまった場合、物理膜厚 d が安定していたとしても目的の反射特性を得ることが難しくなってしまう。

上記問題の解決のため、光学膜厚を代替指標で監視・制御する機構（光学モニター）が搭載されている設備にて開発を行った。設備の機構を図-14に示す。

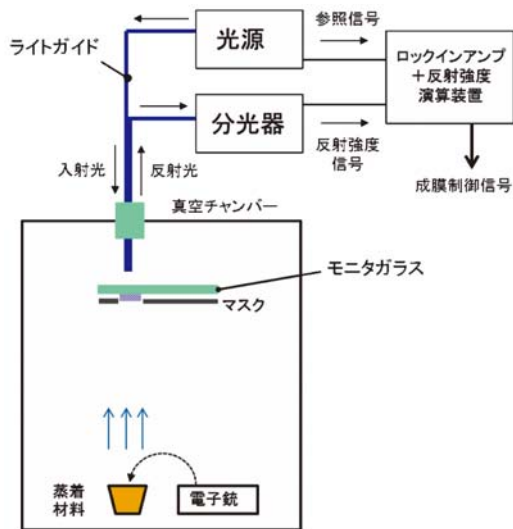


図-14 光学モニター機構

製品基板が配置されるドーム中央部に図-14の光学系が配置されている。基板にDBR成膜を行う間、モニタガラスに対しても基板同様に誘電体層が成膜される。これによりモニタガラスと誘電体層の屈折率差が発生するため反射光が分光器側へ戻ることになる。この反射光を増幅し、反射強度を成膜中常に監視している。このモニタガラスからの反射強度 R_M は成膜量に依存し、その成膜量に応じてサインカーブのように変化する（図-15）。

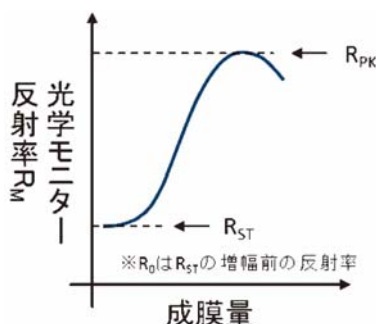


図-15 光学モニター反射率推移イメージ

例えば光学モニター側の制御波長を λ_c としたとき、その反射率のピーク強度を R_{PK} 、成膜開始時の強度を R_{ST} 、増幅前のモニタガラスの反射強度を R_0 とすると $nd = \lambda_c/4$ が成立するピーク強度 R に対しては

$$R = R_0 \cdot \frac{2R_{PK} - (1 + R_0)R_{ST}}{(1 - 2R_0)(1 + R_0)R_{ST} + 2R_0^2 R_{PK}} \dots \text{式⑤}$$

の関係が成立する⁵⁾。つまり、あらかじめ目的の光学膜厚を得るために制御波長を設定し、その反射強度を算出しておくことで、モニタガラスの反射強度変化を代替指標として光学成膜制御・終点検出を行うことができる。この制御方法により目的の反射特性が得られているかどうかを確認するため、目的の反射特性と実際のできばえの差を図-16に示すように比較した。反射率80%となる波長差を波長ズレ量 Δ として示した。

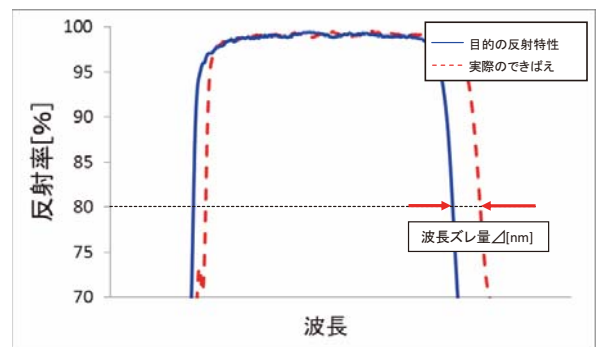


図-16 DBR反射特性の設計値とのズレ量評価

図-17は従来型的水晶振動子で膜厚制御を行った場合と光学モニターにて膜厚制御を行った場合双方の設計値との波長ズレ量を比較したものである。

波長ズレ量が少なければ本来の設計した光学膜厚に近い出来栄で成膜制御できていることになる。今回、水晶振動子制御と比較し、光学モニター制御による成膜を行うことでその波長ズレ量を

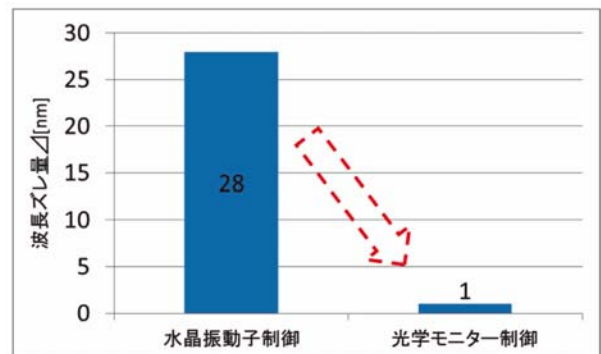


図-17 制御方式の違いによる波長ズレ量の変化

1/28 にまで抑えることが可能となった。実際の生産現場においては、目的の反射特性が得られる波長と実際のできばえ波長のズレ量 Δ を成膜バッチ毎に測定・評価を行い、設計中心に対して適切に補正をかけることで常に目的の反射特性を得られるような仕組みを取り入れている。

以上により青色 LED の光をあらゆる角度に対して高い反射率で反射させる光学膜厚設計と、その特性を高い精度で再現させる成膜制御技術により、製品品質の安定化および高い歩留まりへと貢献することができた。

5. おわりに

本報告では、狭波長化生産技術とチップ裏面 DBR 成膜生産技術を用い、LED チップの特性安定化ならびに生産性向上を実現した技術について報告した。

今後も LED の効率向上・低コスト化が求め続けられることが予想される。お客様に求められる製品を安定的に造ることができるよう LED の生産技術開発を推進していきたい。

参考文献

- 1) 米国エネルギー省 発行情報 (2015)
- 2) S.M. ジー, 半導体デバイス-基礎理論とプロセス技術, 産業図書
- 3) 杉浦宗男, 誘電体多層膜ミラーの発展, OPTRONICS (2013) No.10 (p.80-84)
- 4) 大津元一, 田所利康, 光学入門, 朝倉書店
- 5) 小椋山 光信, 光学薄膜の基礎理論, オプトロニクス社

著 者



牧 弘昭



稲澤良平



澤崎勝久