

次世代車載ヘッドランプ用光源デバイス

Optical Light Devices for Next-Generation Automotive Headlamp

山中 一彦
Kazuhiko Yamanaka

森本 廉
Kiyoshi Morimoto

加藤 亮
Ryo Kato

左文字 克哉
Katsuya Samonji

大屋 満明
Mitsuaki Oya

奥山 浩二郎
Kojiro Okuyama

要 旨

車載ヘッドランプの遠方視認安全性と小型・薄型化を両立するために、光源デバイスの高輝度化が鍵となる。今回、現在用いられている極性c面LED（発光ダイオード）に対し、非極性面であるm面を結晶成長面としてLEDを作製することにより発光密度を 0.6 W/mm^2 から 2.5 W/mm^2 に向上した。既存LEDのドループ現象を克服するとともに、m面に適したテクスチャ構造形成法を確立し、光取り出し効率も向上した。その結果、チップサイズ 0.45 mm 角の小型化と高光出力化を実現した。さらなる微小発光点を形成するためレーザ励起型光源モジュールの開発に取り組んだ。InGaN（Indium-Gallium Nitride）青紫色レーザの高光出力・高効率化とともに、レーザの高光密度下でも変換効率の高い青色蛍光体を開発した。これらを用いてレーザ白色光源モジュールを構成し、従来光源では到達できなかった輝度 200 cd/mm^2 を達成した。

Abstract

Increasing the luminance of light source devices is the key to realizing automotive headlamps that guarantee both safety with longer distance visibility and a smaller/thinner module. In this work, the emission power density is improved to 2.5 W/mm^2 from 0.6 W/mm^2 by fabricating an LED (Light Emitting Diode) grown on the non-polar m-plane of a Gallium Nitride (GaN) crystal as opposed to the conventional c-plane LEDs. We overcame the droop phenomenon of conventional LEDs, and established a method to form a texture structure suitable for the m-plane giving improved light extraction efficiency. The result was an LED with a die size of $0.45 \times 0.45 \text{ mm}^2$ and with increased optical output power. To realize a smaller emission spot, we developed a high-efficiency blue phosphor under high light density together with a high power/efficiency Indium-Gallium Nitride (InGaN) blue-violet laser diode. A white light source module with these elements achieved a high luminance of 200 cd/mm^2 never reached by conventional sources.

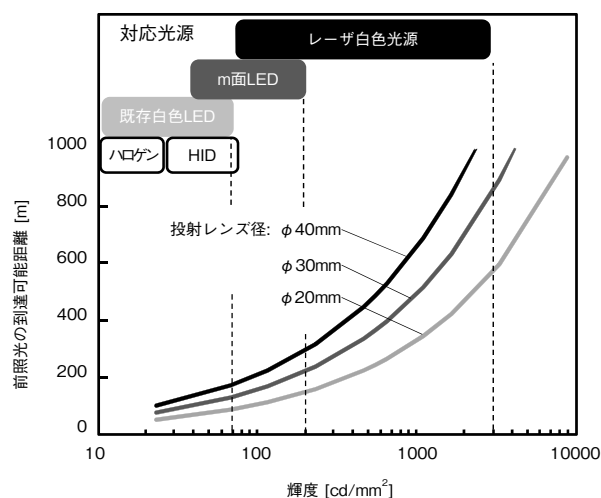
1. はじめに

車載ヘッドランプは、夜間の前方視認性を確保するための基幹灯具である。特に夜間は視認性が低下するので、遠方の照度を確保することが安全上の必須要件である。このヘッドランプの近傍に、運転支援用のセンサやカメラなどが搭載されていくようになると、ヘッドランプの小型化ニーズが高まり、小型の投影レンズでも遠方に投光できる白色光源が必要になる。

このようななか、ハロゲンランプやHID（High Intensity Discharge）ランプなどの管球光源に替えて、発光ダイオード（LED）や半導体レーザなどの半導体光源デバイスをヘッドランプに導入する検討が進んでいる[1-3]。半導体光源デバイスは、管球光源に比べて寿命が長く、点灯起動が早いという利点をもつ。さらに大きな特長として、従来の管球光源では到達不可能な高輝度を実現することができ、視認性向上に役立つという点が挙げられる。

第1図に白色光源の輝度と前照光の到達距離の関係を示す。光の到達距離は光源の輝度向上につれて増加する。例えば、 $\phi 40 \text{ mm}$ の投射レンズを用いて 200 m 先を照度 3 lx で照らすためには、輝度 70 cd/mm^2 以上の光源が必要と

なる。つまり光源の輝度向上が直接遠方照度の確保に寄与する。また、ヘッドランプの小型化によって投射レンズが小径化されていくと、ますます輝度向上の重要性が高まることがわかる。



第1図 光源の輝度と前照光の到達可能距離の関係（当社試算）
Fig. 1 Reachable distance of headlamp as a function of luminance

現在ヘッドランプに搭載されている白色LEDはHIDと同等の輝度である。筆者らは、これらを凌駕(りょうが)する輝度をもつ半導体光源デバイスの開発を進めている。そのアプローチとしてGaN (Gallium Nitride) の非極性結晶面、いわゆるm面を結晶成長面としたLED (以下、m面LEDと記す) の開発と、InGaN (Indium-Gallium Nitride) 青紫色半導体レーザに新規蛍光体を組み合わせたレーザ白色光源モジュールの開発に取り組んでいる。

m面LEDの狙いは、既存の白色LEDがもつ結晶物性上の弱点を克服して、輝度を向上しようとするものである。GaNの結晶構造に異方性があることに着目し、キャリア注入効率を阻害する内部分極が原理的に発生しない非極性結晶面 (m面) を利用している。この効果により、既存の白色LEDと同じ構造で倍以上の輝度を実現できる。

一方、半導体レーザに蛍光体を組み合わせたレーザ白色光源モジュールのアプローチは、半導体レーザの小発光点および光ビームの高い指向性を活用したものである。光導波路の端面は数 μm ～数10 μm の大きさであり、ここから放射される光ビームを蛍光体に効率良く集光させることによって、既存デバイスよりも1桁高い輝度を実現できる可能性がある。

第2図に、今回開発した2種類の半導体光源デバイスと既存白色LEDの概略図と輝度性能を比較したものを示す。以下、m面LEDについては第2章で、半導体レーザと蛍光体を組み合わせたレーザ白色光源モジュールについては第3章で、それぞれ詳細に述べる。

	既存白色LED	m面LEDを用いた白色LED	レーザ白色光源モジュール
概略図	<p>白色光 蛍光体 サイズ ~1 mm角 励起光 LED 発光部 ~1 mm角</p>	<p>白色光 蛍光体 サイズ ~0.5 mm角 励起光 LED 発光部 ~0.5 mm角</p>	<p>白色光 蛍光体 サイズ >0.1 mm角 励起光 レンズ レーザ 発光部 ~30 μm \times 1 μm 光導波路</p>
輝度	~70 cd/mm ²	~200 cd/mm ²	~3000 cd/mm ²

第2図 光源の構造と輝度の比較

Fig. 2 Comparison of structure and luminance of white light source

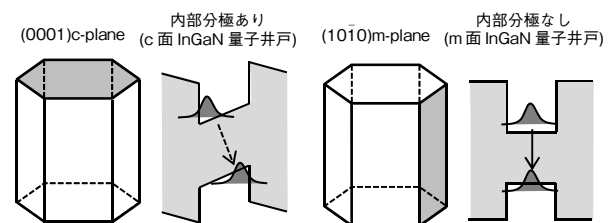
2. m面LED

GaNはウルツ鉱型の結晶構造をしており、結晶面方位により異なる性質を示す。既存のLEDは、サファイア(0001)面などを利用し、窒化物のc面を結晶成長面とし、n型GaN層、InGaN量子井戸層、p型GaN層を積層して作製する (以下、c面LEDと記す)。これに対し筆者らは、m

面が結晶成長面であるGaN基板を用意し、その上に量子井戸を作製するm面LEDの開発に取り組んでいる。

2.1 m面LEDによるドループ改善

LEDにおいて、注入された電流はInGaN量子井戸層において光に変換されて放射される。高出力の光を放射するためには、注入電流密度が大きい状態においても電流-光変換効率が高いことが必要である。しかし第3図に示すように、c面LEDではInGaN量子井戸層で生じる内部分極によってキャリアが空間的に分離する。この状態では、キャリア再結合確率を高くできない。そこでInGaN量子井戸層の層厚を小さくし空間的な分離を抑えようとすると、今度はキャリアがオーバーフローしやすくなる。このためc面LEDの電流-光変換効率は、10 A/cm² (チップサイズ1 mm角で0.1 Aに相当) 以下の低い電流密度において極大となり、それ以上では低下する(ドループ現象)。この結果、高光出力化、高輝度化が難しくなっている。



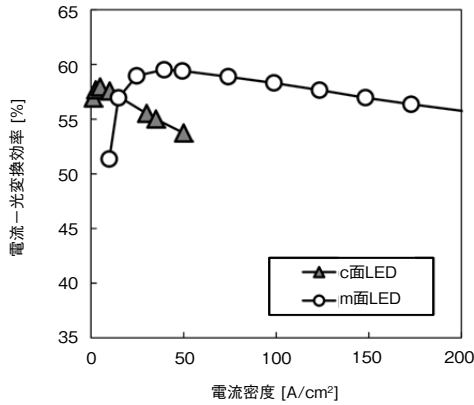
第3図 GaN面方位とInGaN量子井戸層のバンド模式図

Fig. 3 Schematic of GaN surface plane and band figure of InGaN quantum well layer

一方でm面では第3図に示すように、InGaN量子井戸層で内部分極が生じないため、10 nmを上回る厚いInGaN量子井戸層を形成してもキャリアの空間的な分離は発生しない。この結果、ドループ現象が改善する。第4図に、c面LEDとm面LEDの電流-光変換効率を比較したものを示す。このときm面LEDは、InGaN量子井戸層厚15 nmで発光波長405 nmの構造とした。一方、c面LEDは、井戸層厚7 nmで発光波長397 nmのものをを用いた[4]。

c面LEDの井戸層厚7 nmは比較的厚い設定であるが、5 A/cm²以上では変換効率が急激に低下する。一方でm面LEDの変換効率は、50 A/cm²程度まで上昇し、その後の低下量も緩やかである。ここでチップサイズ1 mm角のc面LEDと、チップサイズ0.45 mm角のm面LEDの特性を、単位面積当たりの光出力である発光密度で比較する。同じ0.35 A駆動時に、c面LEDが0.6 W/mm²であるのに対し、m面LEDでは2.5 W/mm²であった。このように、非極性面を利用したLEDにより、従来よりも発光密度を大幅に向

上することができる。この結果、より小さな蛍光体から高光出力の白色光を放射させることができるようになり、白色LEDの輝度を向上させることができる。



第4図 m面LEDとc面LEDにおけるドループ現象の比較
Fig. 4 Comparison of efficiency droop of m-plane GaN LED with that of c-plane GaN LED

2.2 m面LEDの光取り出しの改善

m面LEDをより高効率にするための主な技術課題は、

- (1) InGaN結晶品質向上
- (2) p型コンタクト抵抗低減
- (3) 出射面の光取り出し効率向上

である。(1)(2)については既報であるため[5]、本稿では特に(3)の取り組みについて詳細に説明する。

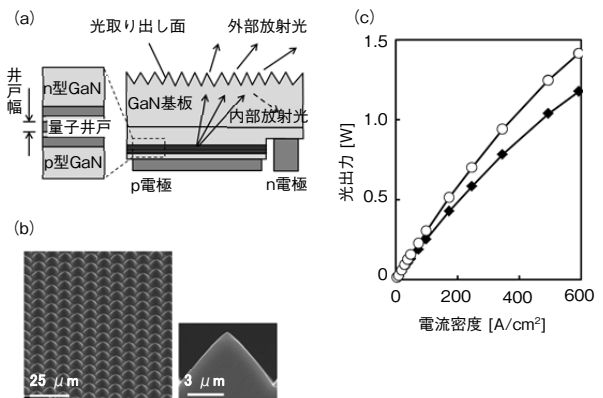
第5図(a)はLEDの特性評価に用いたフリップチップ型のLED構造を示したものである。InGaN量子井戸層で発生した光はLEDの光取り出し面から外部へ放射される。このとき発生した光が光取り出し面に入射する角度は0から90度の全角度であるため、入射角度によらず光取り出し面の反射率を低減させる技術が求められる。

c面LEDでは、結晶面を利用した異方性ウェットエッチングを用いて光取り出し面にランダムな六角錐(すい)形のテクスチャを形成し、光取り出し効率を向上させている。一方、m面LEDは面方位が異なるため上記エッチング方法が使えない。そこで筆者らはフォトリソグラフィによるパターニングとドライエッチングを用いたテクスチャ形成手法の開発に取り組んだ。まず光線追跡シミュレーションを用いてテクスチャの最適構造を検討した。この結果、底辺10 μm/高さ5 μmのコーン状にすることで光取り出し効率を20%向上できることを確認した。しかしコーン状のテクスチャ形成は通常ドライエッチングでは困難である。そこで筆者らはパターニング後のレジストにベーキングを行うことでレジスト形状を半球型に制御し、このレジストにドライエッチングを施すこと

で第5図(b)に示すテクスチャを形成することに成功した。

上記テクスチャ形成技術を用いてm面LEDを試作し、特性評価を行った。このときm面LEDの構造はInGaN量子井戸層厚15 nm、チップサイズ0.45 mm角であり、発光波長は405 nmであるものを用いた。また樹脂による封止は施していない。第5図(c)に示すように、テクスチャを形成することで光出力が約20%向上し、電流密度600 A/cm²において1.4 Wの光出力を得た。

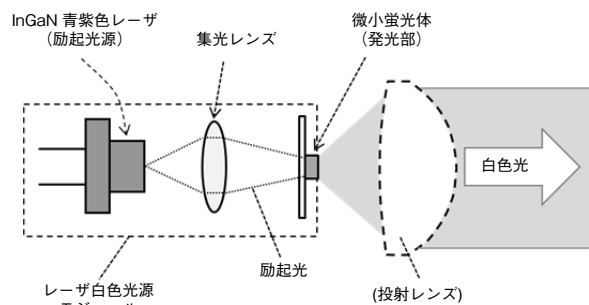
このように主な技術課題を解決したm面LEDを用いれば、チップサイズ縮小によって白色LEDの飛躍的な高輝度化を実現することができる。今後は蛍光体と組み合わせることで、光束、輝度の評価を進める。



第5図 m面LEDの光取り出し改善
Fig. 5 Improvement of light extraction efficiency of m-plane GaN LED

3. レーザ白色光源モジュールの開発

InGaN青紫色レーザーと微小蛍光体とを組み合わせたレーザー白色光源モジュールの構成を第6図に示す。レーザーを用いることでLEDよりも高光密度で蛍光体に光を照射



第6図 レーザ白色光源モジュールの模式的な構成図
Fig. 6 Schematic of laser white light source module

することができ、高輝度な白色光源を実現することができる。

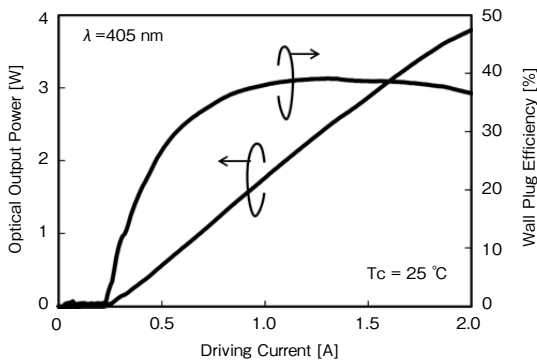
InGaN青紫色レーザから射出された励起光は、集光レンズにより微小蛍光体に集光され、微小蛍光体が発光部となり白色光を放射する。このとき、(1) InGaN青紫色レーザから高光出力のレーザ光を効率良く射出させることと(2) 微小蛍光体においてレーザ光を効率良く白色光に変換することが必要である。筆者らは、(1)(2)の課題について、それぞれ取り組みを行った。

3.1 高光出力青紫色半導体レーザ光源技術

半導体レーザはLEDよりも1桁以上光密度の高い励起光源を実現することが可能である。筆者らは、光密度が高く、かつ光出力も大きい励起光源を実現するため、1Wを超える高光出力InGaN青紫色レーザの開発を進めている。

半導体レーザは光導波路で光増幅を行うことで、指向性の強い射出光を放射する。このとき光導波路幅を狭くすると電力-光変換効率は高くなるが、熱集中による熱飽和が発生し高光出力化が難しい。一方、光導波路幅を広くすると熱集中が緩和されるが変換効率が低下してしまう。今回、InGaN青紫色レーザの射出部の光導波路幅を30μm以下とし、高い変換効率と高光出力化を両立させた。パッケージは従来のφ5.6mmTO-CANタイプからφ9mmTO-CANタイプに変更し、放熱性を向上させ自己発熱による熱飽和を抑制した。

第7図にInGaN青紫色レーザの駆動電流-光出力特性を示す。2Aまでの駆動電流に対して、熱飽和することなく、3W以上の光出力が得られている。また、電力-光変換効率も最大39%の高い効率を達成した。このときレーザのエミッタ幅はLEDよりも十分小さく、また半値幅で25°以下の射出光を放射させることができる。このため、励起光をレンズにより蛍光体にLEDよりも十分小さく集



第7図 InGaN青紫色レーザの光学特性
Fig. 7 Optical characteristics of InGaN blue-violet laser

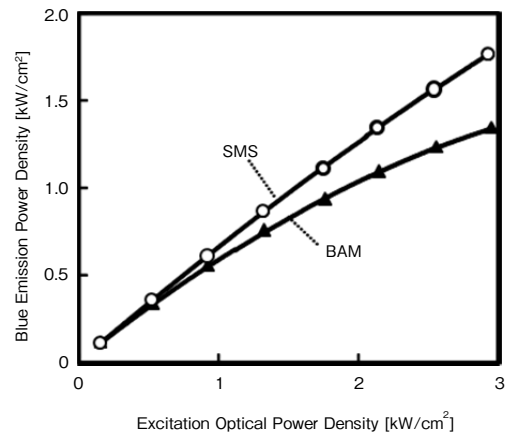
光させることができる。

3.2 高効率蛍光体技術

レーザ白色光源モジュールの蛍光体としては、青紫色光から白色光を生成するため、青色蛍光体と黄色蛍光体を組み合わせることを検討した。青紫色光を青色光に変換できる青色蛍光体としてBaMgAl₁₀O₁₇:Eu²⁺ (BAM) 蛍光体が知られる。BAM蛍光体は、青紫色光の吸収率を高めるため、発光中心元素であるEuの濃度は30%~40%の高い値に設定される。このようなBAM蛍光体を用いてレーザ白色光源モジュールを構成したところ、励起光密度1kW/cm²以上で、発光効率が急速に低下した。一般的に発光中心元素の濃度が高い場合、発光中心元素が近接するため濃度消光を生じやすくなる。高光励起下においては蛍光分布が広がるため、Eu濃度が高い蛍光体材料において輝度飽和が起こりやすくなると推察している。

これに対して筆者らは、蛍光体材料としてSr₃MgSi₂O₈:Eu²⁺ (SMS) 蛍光体に着目した。この蛍光体のホストは結晶構造が緻密なメルウィナイト構造を取り、Eu濃度を1%~3%と低くしても青紫色光の吸収率が高く、Eu同士の距離を近接しにくくできる。この特長を活かして、レーザ励起用蛍光体として、焼成プロセス、粒径やEu濃度などを最適化し、高光密度の励起でも輝度飽和耐性を発揮するよう材料改質を行った[6]。

第8図に、得られたSMSおよびBAM蛍光体を用いて、励起光強度と青色光出力の関係を比較した結果を示す。BAM蛍光体に比べてSMS蛍光体の青色光出力が有意に高く、蛍光放射密度が最大1.7kW/cm²を実現した。さらに、SMS蛍光体では励起光密度3kW/cm²まで照射しても線形性の高い光出力特性が得られており、輝度飽和耐性



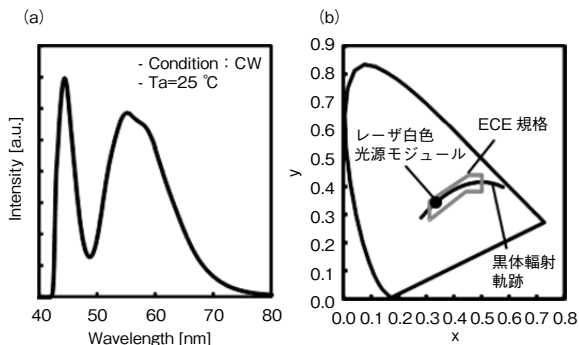
第8図 青色蛍光体の光変換特性比較
Fig. 8 Comparison of optical conversion characteristics of blue phosphors

に優れていることがわかった。

3.3 レーザ蛍光体光源技術

今回新たに開発したInGaN青紫色レーザと青色蛍光体を用いてレーザ白色光源モジュールを試作し評価した。SMS青色蛍光体と黄色蛍光体とは、透明基板上でパターニングを行い積層することで直径0.6 mmの微小蛍光体を形成した。集光レンズはガラスレンズを用いて、レーザ光が微小蛍光体よりも一回り小さく入射するように構成した。

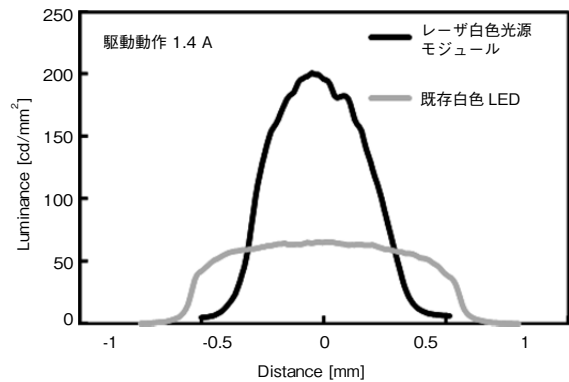
第9図 (a) は、プロジェクションレンズで投射したレーザ白色光源モジュールの射出光のスペクトルである。白色光をすべて蛍光体から放射された光で構成できていることがわかる。白色光の色温度は約5300 Kであり、第9図 (b) には、今回試作したレーザ白色光源モジュールの色度座標を示す。ヘッドランプに必要なECE (Economic Commission for Europe) 規格内の白色光が得られている [7]。



第9図 レーザ白色光源モジュールの (a)スペクトル特性 (b)色度座標

Fig. 9 (a) Spectrum and (b) chromaticity coordinate of laser white light source module

さらに第10図に、微小蛍光体面における輝度分布を測定した結果を示す。輝度としては既存の白色LEDよりも高い200 cd/mm²が得られた。これらの結果は、レーザ白色光源モジュールが車載ヘッドランプに適した高輝度の光源に適用できることを示す。



第10図 レーザ白色光源モジュールと既存白色LEDの輝度分布比較

Fig. 10 Luminance distribution of laser white light source module and conventional white LED

4. まとめ

筆者らは、車載ヘッドランプ向けに新しい半導体光源を提案した。LEDについては、GaNの結晶面の特長を活かしたm面LEDにより、従来LEDよりも小さなチップサイズで高光出力化が可能であることを示した。この技術を小サイズ蛍光体と組み合わせることで高輝度な白色LEDが実現できる。また、半導体レーザと蛍光体を用いた白色光源については、InGaN青紫色レーザに青色・黄色蛍光体を組み合わせたレーザ白色光源モジュールを提案した。レーザの高出力化と、高光密度下でも変換効率の高い青色蛍光体の実現により、レーザ白色光源モジュールは輝度として最大200 cd/mm²を得た。今後は、蛍光体の放熱特性改善などによりさらなる高輝度化を目指すとともに、車載光源用途への導入を検討する。

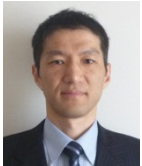
参考文献

- [1] 佐々木勝, “LEDを用いた自動車用ヘッドランプ,” *Optronics*, no. 261, pp. 115-119, 2003.
- [2] S. Groetsch et al., “Novel Chip Size LEDs in a combined High / Low Beam headlamp demonstrator based on a single reflector optic,” *Proceedings of 10th International Symposium on Automotive Lighting*, pp. 196-205, 2013.
- [3] A. Hanafi et al., “A new efficient, compact vehicular illumination system using high-power semiconductor laser diode”. *Proceedings of 10th International Symposium on Automotive Lighting*, pp. 168-179, 2013.
- [4] 勝野弘 他, “快適なLED照明空間を演出する高出力近紫外光LED,” *東芝レビュー*, vol. 66, no. 7, pp. 42-45, 2011.
- [5] 横川俊哉 他, “高出力非極性m面GaN-LED,” *パナソニック技報*, vol. 58, no. 1, pp. 13-17, 2012.
- [6] K. Morimoto et al., “A 30 W pure blue emission with NUV

laser-diode-pumped phosphor for high-brightness projectors,”
SID Symposium Digest of Technical Papers, vol. 44, Issue 1, pp.
832–835, 2013.

[7] 日本工業規格 JIS D 5500

執筆者紹介



山中 一彦 Kazuhiko Yamanaka
パナソニック セミコンダクターソリューションズ (株) 半導体ビジネスユニット
Semiconductor Business Unit,
Panasonic Semiconductor Solutions Co., Ltd.



加藤 亮 Ryo Kato
パナソニック セミコンダクターソリューションズ (株) 半導体ビジネスユニット
Semiconductor Business Unit,
Panasonic Semiconductor Solutions Co., Ltd.
理学博士



大屋 満明 Mitsuaki Oya
パナソニック セミコンダクターソリューションズ (株) 半導体ビジネスユニット
Semiconductor Business Unit,
Panasonic Semiconductor Solutions Co., Ltd.
理学博士



森本 廉 Kiyoshi Morimoto
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 技術本部
Engineering Div.,
Automotive & Industrial Systems Company



左文字克哉 Katsuya Samonji
パナソニック セミコンダクターソリューションズ (株) 半導体ビジネスユニット
Semiconductor Business Unit,
Panasonic Semiconductor Solutions Co., Ltd.
工学博士



奥山 浩二郎 Kojiro Okuyama
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 技術本部
Engineering Div.,
Automotive & Industrial Systems Company