

低炭素社会の実現に向けた  
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく  
イノベーション政策立案のための提案書

技術開発編

**GaN 系半導体デバイスの技術開発課題と  
その新しい応用の展望 (Vol.3)**

—市場規模と省エネルギー効果—

平成 31 年 2 月

**Technological Issues and Future Prospects of GaN and  
Related Semiconductor Devices(Vol.3):**

**Market Size and Energy Saving Effect**

Strategy for Technology Development

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action  
toward Low Carbon Societies

国立研究開発法人科学技術振興機構  
低炭素社会戦略センター

## 概要

窒化ガリウム (GaN) は直接遷移型半導体で広いバンドギャップを持つため、高効率の発光ダイオード (LED) やレーザーダイオード (LD) の形成が可能であり高効率発光デバイス材料として期待されている。電子デバイス用途でも高周波用途に加えて、バンドギャップの大きさから、大きな絶縁耐圧が推定され、パワーデバイス用途に期待されている。もっとも、GaN 基板の製造困難などの技術的課題から、まだ開発初期段階である。

本報告では電子デバイスおよび光学デバイスの将来市場について考察するとともに、これらの中での GaN 市場について調査し、その市場規模と用途別省エネルギー効果について検討した。

その結果、以下の結果が得られた。(1)光学デバイス市場における GaN 系 LED の省エネルギー効果は照明用途を中心に、200TWh 程度ときわめて大きいですが、大部分の用途で既存の市販 LED で十分である。(2)次世代半導体としてのレーザーや高輝度 LED は、大きな新規市場を作り上げる可能性があるものの、新分野のために省エネルギー効果の推算是困難である。(3)パワーデバイス市場では GaN 素子はその特性からインバータなどによる省エネルギー貢献のポテンシャルが 120TWh 程度と大きい。(4)価格/性能指数が低いことが最も重要である。炭化ケイ素 (SiC) や Si 系半導体と競合するため、GaN 素子が省エネルギーに貢献する程度に普及するためには、性能向上とともにコストダウンの必要性が高い。

GaN 素子の定量的なポテンシャル評価は今後の課題である。

## Summary

GaN attracts attention as a material for high performance optical device because it is possible to form a light emitting diode (LED) and a laser diode (LD) with high efficiency taking advantage of being a direct transition type semiconductor and having a wide band gap. In the electronic device market, in addition to the high frequency application, GaN devices are expected for power device applications because a large dielectric breakdown voltage is presumed due to the wide band gap. But GaN devices are still in their early stages of development due to some technical problems including difficulty of preparing good substrates.

This report considers the future market of electronic devices and optical devices, investigates the GaN market among them, and the energy saving effect.

As a result, the following results were obtained. (1) The energy saving effect of GaN-based LEDs in the optical device market is huge mainly in lighting applications(200TWh), but already commercialized LEDs are sufficient for most applications. (2) Lasers and high-brightness LEDs as next-generation semiconductors are likely to make a big new market, but it is difficult to estimate the energy saving effect for new fields. (3) In the power device market, the potential of GaN device to contribute to saving energy by inverters is large (120TWh) from its physical properties. (4) However, since cost performance is important and it competes with SiC and Si-based semiconductors in the market, much work should be done for improvement in performance as well as cost reduction for the GaN devices to be accepted in the market to contribute to saving energy.

Quantitative potential evaluation of GaN devices is a future task.

## 目次

### 概要

1. GaN 系半導体デバイスの応用分野概観 .....	1
2. 光学デバイス市場 .....	1
2.1 概観 .....	1
2.2 レーザー・高輝度 LED 市場 .....	1
2.3 ディスプレイ市場 .....	3
2.4 自動車関連市場 .....	5
2.5 材料加工市場 .....	6
2.6 照明市場 .....	9
2.7 市場まとめ .....	9
2.8 省エネルギー効果 .....	10
3. 電子デバイス .....	12
3.1 概観 .....	12
3.2 民生機器 .....	14
3.3 情報機器 .....	14
3.4 車載機器 .....	15
3.5 電力用途 .....	16
3.6 市場まとめ .....	16
3.7 省エネルギー効果 .....	16
4. まとめ .....	17
4.1 発光素子 .....	17
4.2 パワー半導体 .....	17
5. 政策立案のための提案 .....	17
参考文献 .....	18

## 1. GaN 系半導体デバイスの応用分野概観

前報[1]で詳細に説明したように、窒化ガリウム (GaN) は 3.4eV のバンドギャップを持ち、そこからの発光は紫外光となる。この GaN の結晶格子の一部を他の元素で置換することで、窒化インジウムガリウム (InGaN) および窒化インジウムガリウムアルミニウム (InGaAlN) まで、組成の変化に応じて連続的にバンドギャップを変化させ、窒化インジウム (InN) の 0.7~0.8eV から、窒化アルミニウム (AlN) の 6.2eV まで制御できる。このため非常に広い波長領域で発光が可能となる。

また、直接遷移型半導体であり、これに加えて量子井戸構造の作成により、高効率の発光ダイオード (LED) やレーザーダイオード (LD) の形成が可能である。

現在の汎用 LED は GaN/サファイア基板の構造であり、サファイア基板が低コストで入手可能である点からも圧倒的なコスト競争力がある。これに対してレーザーや高輝度 LED では GaN 基板が必要とされている。

電子デバイス用途でも前報で述べたとおり、高周波用途では、HEMT デバイスにより高電子移動度が達成され、すでに実用化が始まっていることはよく知られている。またバンドギャップの大きさから、大きな絶縁耐圧が推定され、パワーデバイス用途に期待があるが、GaN 基板の製造困難などから、まだ開発初期段階である。

どちらの応用についても、基板関連技術 (低コストで良質な GaN 単結晶基板の供給または他材料基板の使いこなし) と、デバイス作成におけるエピタキシャル工程の生産性向上が、実用化課題と言われている。

本報では電子デバイスおよび光デバイスの将来市場について考察するとともに、これらの中の GaN 市場について調査し、その市場規模 (推定生産量) とこれらによる省エネルギー効果について検討したので報告する。

## 2. 光学デバイス市場

### 2.1 概観

GaN 素子は高効率かつ幅広い波長領域の発光が可能のため、発光デバイスとして研究開発がなされてきた。発光デバイスとしては前述のように LED とレーザーがある。特に青色発光素子としてサファイア基板上の GaN LED が開発され、これが世界の照明市場に広がっていることはよく知られている。このような汎用 LED については既に技術的完成度が高く、もはや基礎研究の対象とはならないと考えるので、本報告の対象外とする。

以上から、GaN 基板を利用しないと製造が困難なレーザーダイオードと高輝度 LED を今回の検討の中心とする。これら 2 つは、高輝度点光源という特性を活かす点で応用分野も自動車用ヘッドライトとか、ディスプレイのように重複すると考えられる。製造コストはレーザーダイオードの検討から高輝度 LED も類推可能と考えたので、特に取り上げないが、必要があれば言及する。

### 2.2 レーザー・高輝度 LED 市場

現在の市場については、高輝度 LED についてはないと考えられるので、レーザーについてのみ示す。将来市場についてはレーザーと高輝度 LED について示す。

#### (1) 現在のレーザー市場

統計によって異なるが現状で約 1 兆円/年。年率 5%程度で拡大[2] (図 1)。用途別では材料加工、通信、リソグラフィなどが主用途 (図 2)。

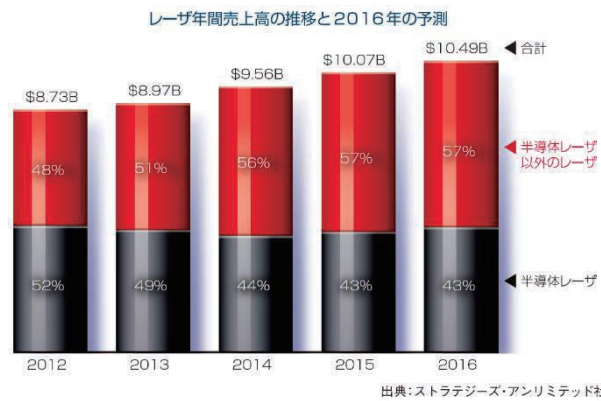


図 1 レーザー年間売上高の推移[2]

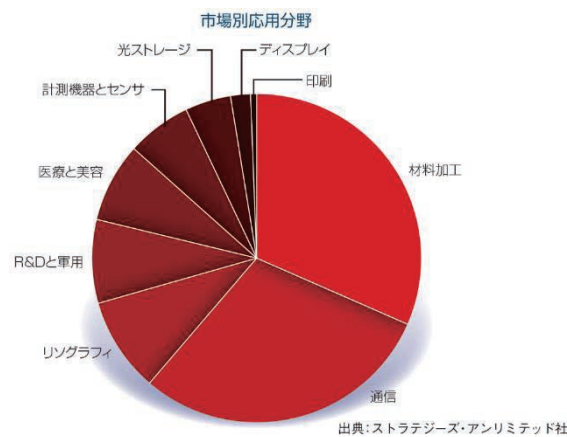


図 2 市場別応用分野[2]

(2) 通信用

石英ファイバーの透過率と波長の関係で赤外域レーザーが用いられる。この分野は通信量の増大とともに増加している (約 30 億ドル: 2014 年)。GaN はあまり関連しない[3]。

(3) 材料加工分野[3,4]

マーキング、微細加工 (リソグラフィ)、マクロ加工 (金属切断など) が 3 大用途。堅調に増加している。

マーキング用は CO<sub>2</sub>、ファイバーレーザー、リソグラフィ用は短波長のエキシマレーザーで半導体の景気の影響を受けるが、全体として成長している。

マクロ加工は溶接、液晶用ガラス基板切断、金属切断などで、特に金属加工では赤外では吸収率が低いため、青色、緑色の大出力レーザーが用いられる。

(4) その他

センサ、ディスプレイ用などがある。

### 2.3 ディスプレイ市場

レーザーは単色性が高く色純度も高いので、演色性（色の再現性）が高くなり、表示用途への大きな可能性があると考えられる。しかし、現状手に入る RGB レーザーを用いた場合、波長領域が狭すぎるため、演色性指標（CRI）は 47 程度にとどまり、一般照明に必要な 90 を得ようとする（現在は実現されていない）黄色レーザーが必要とされている。また、現在は緑色発光素子などにも開発の余地がある[5,6]（図 3）。

高輝度 LED は GaN 基板を利用したもので、汎用 LED（GaN on SiC を含む）とレーザーの中間に位置すると考えられ、汎用 LED のハイエンド部分やレーザーの一部と競合すると考えられる。

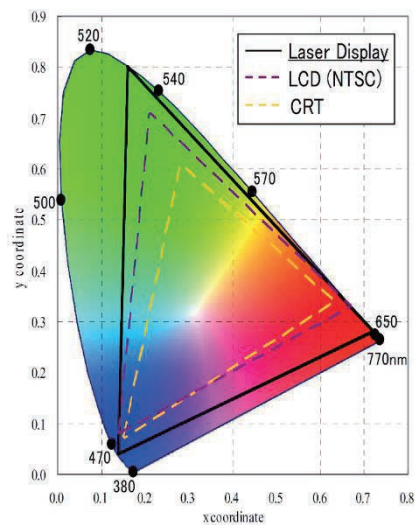


図 3 レーザーディスプレイの色再現性[6]

#### (1) ヘッドマウントディスプレイ（図 4）

目の水晶体を利用して網膜に直接結像させるもので、メガネ装着者であっても鮮明な映像を見ることができる、低輝度であってもコントラストの高い映像を提示できるなどのメリットがある[5,7]。



出典) <http://www.brotner.co.jp/news/2010/airscounter/index.htm>

<http://www.philemb.com/review/article/201202/14/446.html>

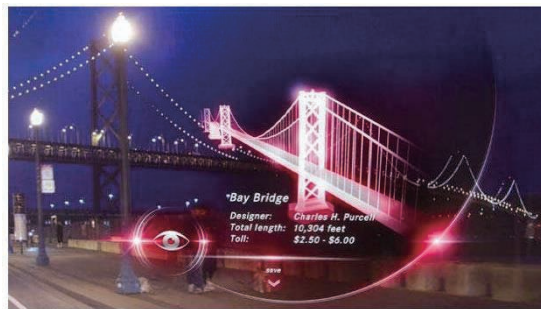
図 4 ヘッドマウントディスプレイ

(上 ; ブラザー工業 AirScouter、下 ; エプソン MOVERIO) [7]

## (2) ヘッドアップディスプレイ (図 5)

自動車を運転中に、スピードメーターやタコメータを見ようとすれば、必然的に前方から手元へ視線を動かすことになる。計器類を見ている間は、どうしても前から目が離れる。この対策とされるのがヘッドアップディスプレイである。

LED が主体と思われるが、レーザー光によるヘッドアップディスプレイは、航空機や車のフロントガラスにレーザーを照射し、計器類や警告を視認性良く表示することができる[5,7]。



出所) <http://www.coolhunting.com/tech/mercedes-dicc.php>

図 5 ヘッドアップディスプレイ (メルセデスベンツのイメージ) [7]

## (3) ピコプロジェクタ (図 6)

プロジェクタの新たな使われ方として、携帯用のものが生まれかけている。1人から2、3人程度が同時に画像を見ることを目的とした小型のプロジェクタで、ピコプロジェクタなどと呼ばれている。デジタルカメラ、携帯電話、携帯情報端末など、他のデジタル機器の中に機能として取り込まれるものと考えられている。価格などの点から主に LED が使用されるが、高輝度が必要な用途には高輝度 LED が、またレーザー素子は焦点合わせが不要で演色性が高く高輝度という特徴があるので、価格にもよるが、一部は LED を置き換える可能性がある[5,7]。



出所) サムスン電子発表資料

図 6 ピコプロジェクタ[7]

## (4) 市場規模予測

これらの市場は表 1 および表 2 のように推測される。表 1 は富士経済の市場調査資料をもとに LCS の推計も合わせたディスプレイ分野の市場規模予測である[3]。具体的には製品ごとの 2015～2020 年の変化率を 2025～2030 年も継続するとして推計した。半導体レーザーの市場はピコプロジェクタの市場に大きく依存し、9,300 億円から 3 兆 5,000 億円の間になると考えられる。

高輝度 LED は価格によるが、既存 LED の一部市場を、特にレーザーと競合しながら占めると考えられる。

表1 ディスプレイ分野市場規模

分野	2015年 (千台) [3]	2030年 (千台)	現在価格 (千円)
ヘッドマウントディスプレイ	230	5,600	141
ヘッドアップディスプレイ	1,830	19,400	27
シネマプロジェクタ	15	15	5,000

いわゆるピコプロジェクタは、携帯電話以外にも、表2のように専用プロジェクタやノートパソコン、デジタルカメラなどにも組み込まれると考えられる。

表2 ピコプロジェクタ市場推定

	2015年 (千台)	2030年 (千台)
ピコプロジェクタ (NEDO 推定) [7]	0	1,052,000
携帯電話契約数 (LCS 推定)	7,900,000	10,300,000
推定ピコプロジェクタ内蔵数	0	1,030,000
内、半導体レーザー (LCS 推定)	0	206,000

もっとも、組み込み品が増加する結果、専用プロジェクタは大きなシェアをとるとは考えにくく、デジタルカメラやビデオも今後単体での増加は考えにくい。

台数的にも携帯電話契約数が80~100億台(4年で新機種に更新するとして20~25億台/年)と圧倒的に多いことから、携帯電話の一定数にプロジェクタが組み込まれるとしてピコプロジェクタの全体推計数としても大きな間違いとはならないと考える。

光源としては現在、将来ともLEDが主流と思われるが、小型化、高輝度化の流れから、現在は無いものの2030年時点で一定数(20%程度)は高輝度LEDやレーザーが使用されると考えられる。3原色を光源とするとして、青と緑にGaN系を用いるので2素子/台となる。したがって約4億素子が用いられる。

ヘッドマウントディスプレイ、ヘッドアップディスプレイについてもそれらの10%はレーザーが利用されるとすれば、250万台/年となり、500万素子/年程度と推測される。

## 2.4 自動車関連市場

自動車用レーザー市場はヘッドライト用途と、自動運転用途の2つが挙げられる。まずヘッドライト用途としてレーザーは、

- ① LED照明よりも発光効率が高い
- ② LED照明と比較して明るい

という特徴がある。また点光源のため平行光線が得られ、遠距離まで直線的に照射可能なため、自動車ヘッドライトへの応用が検討されている。反面、高価なことと、高輝度でコヒーレントな光のため、位相をずらしたり、ビームの上下動制御を行うなど、集光した場合の安全対策などが必要であること、寿命の信頼性の問題などがある。さらに高輝度LEDの効率が40%に達するのに対し、レーザーは37~38%である点も課題といわれている。

通常のLEDランプがすでに実用化され、費用対効果も優れていることから、今後主流になると予想される。高輝度LEDやレーザーは主流ではなく、一部高級車に採用されると考えられる。

また新興国を中心に安価な自動車が増加すると予想されることから、低価格なハロゲンランプも相当数残ると予想される。



レーザーレーダーは現在ヒ化ガリウム (GaAs) もしくはリン化インジウム (InP) 基板を用いた近赤外レーザー (940~1,300nm) が検討されており、今後自動運転用途に急速に普及が見込まれる。もっとも、コストアップ要因となり、全ての自動車に装備されるかは不透明であること、また同用途はミリ波レーダーとの競合もあるので、予測は難しい。ここでは 2030 年に全自動車の 10%がレーザーレーダーを装備するとした。この用途には GaN の必要性はあまりないとする。

表 3 に富士経済の市場調査資料[8]をもとに LCS の推計も合わせた自動車用レーザー・高輝度 LED の台数の市場予測を示す。現時点で市場はほぼないが、2030 年の時点では自動車台数 1 億 2,000 万台/年の内、LED は 3,400 万台、レーザーは 200 万台、400 万素子 (上向きビームのみ) 程度と推定される。金額ベースでは、ヘッドライト市場 5,000 億円の内 LED が 2,700 億円程度、レーザー・高輝度 LED が 600 億円程度と予想する。

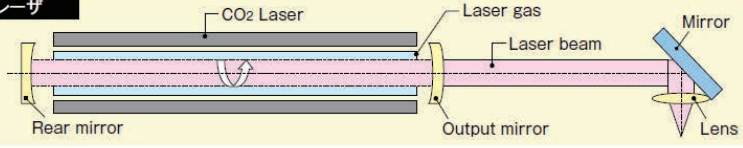
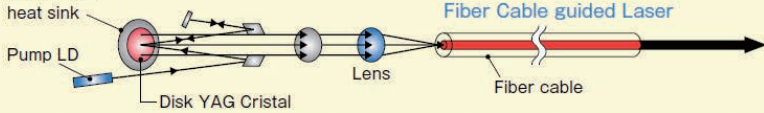
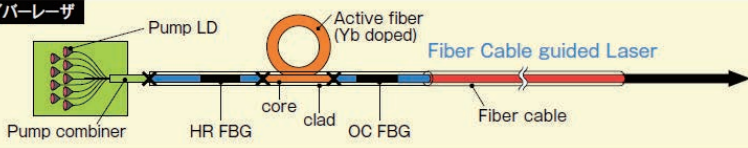
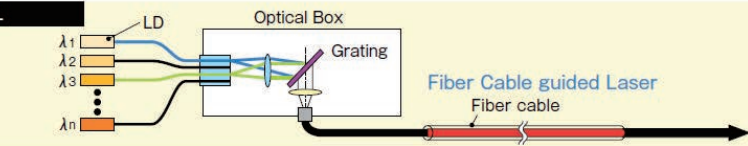
表 3 自動車用ヘッドライト市場規模

	2015 年[8] (千台)	2030 年 (千台)	現在価格 (千円/台)
自動車台数	88,330	120,000	
ハロゲン	77,000	84,000	1.6~3.8
HID	7,730	0	10~13
LED	3,600	34,000	13~20
レーザー・高輝度 LED	0	2,000	500~800
レーザーレーダー	2,400	12,000	7~10
合計	90,730	132,000	

## 2.5 材料加工市場

競合技術としてはウォータージェット、ガス、プラズマなどの切断方法、アーク溶接などがあげられる。レーザーは他の方法に比較してコストが高いものの、熱影響が少ない、切断幅が微小、パワー密度が高く切断速度が大きい、消耗品が少ない、切断部の酸化が少ない、デジタル技術との相性が良いなどの特性がある[4]。

主なレーザー源として図 7 のように、CO<sub>2</sub> レーザー、ファイバーレーザー (主流)、ディスクレーザー、DDL といわれる直接レーザーダイオードのレーザーがある。GaN は主に DDL に関連すると考えられる。

基本構成	光品質 (mm·mrad)	エネルギー 変換効率
<b>CO<sub>2</sub>レーザー</b> 	8~9	10%
<b>ディスクレーザー</b> 	2~4	20~25%
<b>ファイバーレーザー</b> 	0.8~2	30~35%
<b>DDL</b> 	8~9	40%

「ものづくり技術戦略ロードマップ検討委員会報告」2008年8月18日の資料より一部引用

図7 加工用レーザーの種類[4]

図8に示したようにCO<sub>2</sub>レーザーや従来の固体レーザーは変換効率が低く、これらはファイバーレーザーやディスクレーザーに置き換えられつつある。さらにDDLを利用する形式は極めて変換効率が高い。もっともDDLは現状では光の品質が低く、集光が不十分であるため、エネルギー密度を上げる場合に不利である。

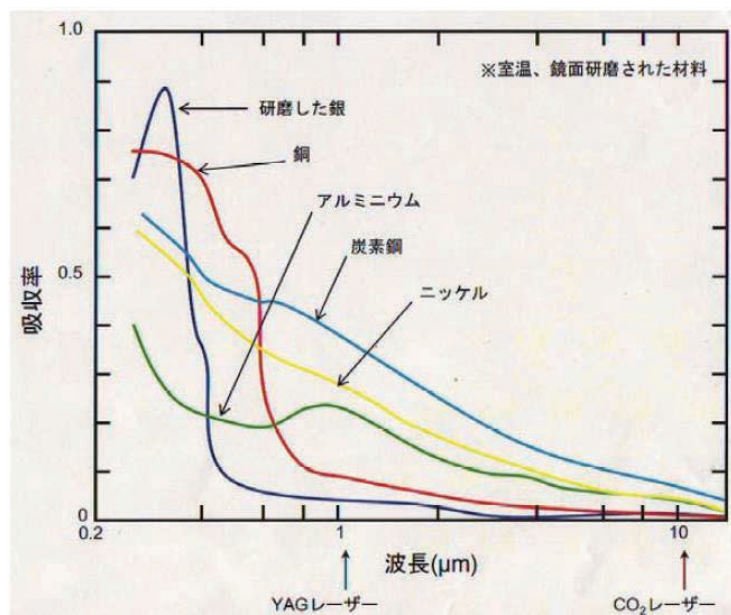


図8 物質の光吸収率の波長依存性[6]

また、波長からは、赤外域の反射率が高い金属、端面加工精度が問題になるディスプレイ用ガラス、CFRP などには青色、緑色レーザーが使用される。加工速度を上げるためには大出力が必要であり、また 3D プリンティングも金属用については有望と思われる。

もっとも大多数の用途では赤外域のレーザーが有用に用いられるので、緑、青色での参入分野は限定的と推定される。ただし今後大出力が必要になると効率の点から GaN ベースの長波長レーザーの開発が期待されるかもしれない。

表 4 に富士経済の市場調査資料をもとに LCS の推計も合わせた加工用レーザーの台数の市場予測を示す[3]。ここも DDL の性能が改善されると発振器不要で装置が簡素化され、高効率という利点があり、この予測よりもはるかに大きな市場を占める可能性もある。

表 4 加工用レーザー市場 (台/年)

	2015 年[3]	2030 年
板金切断	9,920	13,000
CO <sub>2</sub> レーザー	3,750	200
ファイバーレーザー	5,150	11,000
DDL	20	500
ディスクレーザー	1,000	2,000
溶接	6,460	9,000
固体レーザー	2,100	1,000
ディスクレーザー	2,000	4,000
ファイバーレーザー	1,360	3,000
その他	1,000	1,000
マーキング	52,510	91,000
CO <sub>2</sub> レーザー	15,000	6,000
ファイバーレーザー	26,500	77,000
固体レーザー	10,000	6,000
その他レーザー	1,010	2,000
はんだ付け	180	400
DDL	180	400
3D プリンタ	200,000	2,860,000
半導体レーザー	2,700	19,000
ファイバーレーザー	590	3,000
固体レーザー (DPSS)	100	700
レーザー以外	196,500	2,840,000
合計	269,070	2,974,000

GaN 系半導体レーザーは DDL と固体レーザー (DPSS) の励起源の一部に使用され、その市場規模はここでは示さないが、現段階では市場はなく、2030 年で全レーザー加工機市場 1 兆 4,000 億円の内、600 億円から 1,000 億円、5,000~10,000 台と推定される。LD 素子数は 1 台あたり 1,000 素子と仮定すると、500~1,000 万素子と推定される。

## 2.6 照明市場[3]

照明分野は現在 13 兆円/年 (2015 年) という大きな市場であり、年率 2.2%程度で拡大して 2030 年には 20 兆円に達すると予想されている。この分野はさらに一般照明、道路灯、投光器に分けられる。

ここで用いられている照明機器は価格、効率、寿命の点から圧倒的に LED と考えられる。その中で、表 5 のように、投光器や道路灯、舞台照明用、一般照明などで、特に高演色性が要求されたり、遠距離まで光の減衰が少ない必要がある用途の一部や、照明と情報通信の機能を併せ持つような特殊な用途ではレーザーも用いられると考えられる。

現在は高輝度 LED やレーザーの市場はないが、2030 年の市場規模は 900 億円 (0.5%) 程度、素子数で 2 百万台/年程度と予想する。高輝度 LED は半導体レーザーと市場を分け合うと推測している。この用途は 3 原色を用いることから、3 素子/台。このうち、緑と青の 2 素子が GaN 系であるから必要素子数は 400 万素子/年程度と推定される。

表 5 照明市場

分類	2015 年[3] (千台)	2030 年 (千台)	現在価格[3] (千円)
一般照明	1,102,000	1,586,000	7
半導体レーザー	0	1,000	—
LED	405,000	1,269,000	8
蛍光灯その他	697,000	316,000	6
道路灯・トンネル灯	2,800	12,400	484
半導体レーザー	0	50	—
LED	2,700	12,250	484
その他	100	100	480
投光器	29,300	54,100	128
半導体レーザー	0	100	—
LED	20,510	51,000	128
その他	8,790	3,000	128
舞台・スタジオ用照明	2,600	4,700	258
半導体レーザー	0	100	—
LED	650	3,800	500
ハロゲン	1,600	720	180
その他	350	80	163
合計	1,136,700	1,657,200	

## 2.7 市場まとめ

短波長で青、緑色発光があることから、照明、ディスプレイ、自動車、材料加工用途への展開が期待される。下表はレーザーと高輝度 LED が採用される可能性のある市場の現在の規模、および 2030 年の推定規模をまとめたものである。資料は富士キメラ総研の調査資料[3]を基本として、NEDO 報告書[7]なども考慮し、2030 年については LCS で推計した。

表 6 分野別市場規模

分野	2015 年 (百万円)	2025 年 (百万円)	2030 年 (百万円)
照明	12,955,000	16,027,000	19,580,000
光ストレージ	1,654,000	1,054,000	863,000
材料加工	1,136,300	2,200,380	2,373,000
リソグラフィ	776,380	827,600	855,000
自動車	481,000	594,000	613,000
医療・美容	378,500	509,500	598,000
計測・分析	223,600	237,700	245,000
ディスプレイ	164,940	3,813,090	3,852,500
光通信	138,430	860,250	2,141,000
合計	17,908,150	26,123,520	31,120,500

ディスプレイ市場はピコプロジェクトの採用数に大きく依存すると推定される。また 2030 年に必要とされる推定 GaN 素子数をまとめると表 7 のようになる。

表 7 必要 GaN 素子数

	百万素子/年
ディスプレイ	405
自動車	4
材料加工	10
照明	4

## 2.8 省エネルギー効果

### (1) ディスプレイ

ディスプレイ用途は金額的にもきわめて大きな市場ではあるが、すでにブラウン管からフラットパネル TV にほとんど移行済みである上、液晶 TV のバックライトはより高効率の LED になっている。このため、バックライトの省エネルギー効果は、今後大きくは見込めない。

今後、有機 EL やマイクロ LED など、液晶に変わる表示技術も広がる可能性があるが、液晶と比較してどの程度省エネルギー効果が見込めるかははっきりしていない。さらに、省エネルギーの進展に伴って大画面化が進行しているため、1 台当たりの消費エネルギーとしてはあまり低下しないと思われる。ピコプロジェクトなど新規応用はモバイル利用や自動車運転などの便利さのための新規なディスプレイ用途であり、既存品を代替して省エネルギーを図るというものではないので、省エネルギー効果の推定は困難である。

### (2) 自動車用

LED・レーザーによる省エネ効果が最も大きいと考えられる分野は、現行のハロゲンランプからの置き換えの自動車用のヘッドライト市場と考える。2030 年の予測自動車市場 12,000 万台/年の内、従来タイプの LED が 3,400 万台、レーザー・高効率の LED が 200 万台を占めるとする。自動車の平均使用年数を 6 年間として、従来タイプの LED 車が 20,400 万台、レーザー・高効率の LED 車が 1,200 万台、合計 21,600 万台として効果を推定する。

車両 1 台当たりの消費電力 (左右ロービームの合計) は、ハロゲンヘッドランプの 120W に対

して、第1世代のLEDヘッドランプでは100Wであったものが、2013年に製品化した第4世代では40Wにまで低減された(図9)。さらに、将来は30W以下の実現が見込まれている。一台当たり120Wが30Wになるとして90W削減、平均年間点灯時間500時間として、45kWhの節減となる。21,600万台では、エネルギーとして570GWh(年間354,000tのCO<sub>2</sub>削減)の節減となる。別の推計では、CO<sub>2</sub>低減効果は走行1km当たり2g程度が見込めるため、年間走行距離10,000kmの場合では、その内ヘッドランプ点灯時間を1/3とすると年間6.6kgの低減となる[9]。これから21,600万台によるCO<sub>2</sub>低減効果は約1,500,000t/年となる。

以上からGaN系LEDランプによるCO<sub>2</sub>削減効果は35~150万t/年程度と見込まれるが、そのうち次世代LEDによる寄与はシェアと効率差を勘案しても、この1%程度と見込まれる。

### (3) 材料加工市場

半導体レーザーは、エネルギー変換効率が約50%と固体レーザーの5%以下に比べて極めて高く、ファイバーレーザーの励起光源などにも用いられる。しかし材料加工で特によく用いられる波長領域は赤外域であるため、緑-青色のGaNによる寄与は金属加工などの一部に限定され、前述のように2030年で1万台、1,000万素子程度の導入量とすると、1素子1W程度として変換効率差を45%、稼働時間1,000h/年とすると、4,500MWh/年程度の省電力となる。

### (4) 照明市場

表8に各種光源別の効率を示す。現在家庭用蛍光灯で100~110lm/W程度が平均であり、LEDは110~130lm/Wと言われている。市場として最も大きい一般照明市場では、蛍光灯をLEDで置き換える場合、10~20%程度の省エネ効果が見込まれる。

表8 各種光源別効率

光源	発光効率	エネルギー	備考	データ 出典
	(lm/W)	変換効率		
白熱電球(100W)	16~18	2.3~2.6%		*
ハロゲンランプ	20	2.9%		*
撮影・投映用ランプ	—	5.1%		*
熱陰極型蛍光管	110	16.1%		**
擬似白色(青黄色系)LED	30~100	4.4~14.6%	249lm/W程度まで開発中	*
擬似白色パワーLED	20~80	2.9~11.7%	100lm/W程度まで開発中	*
高演色性白色LED	20~30	2.9~4.4%		*
RGB白色LED	20~24	2.9~3.5%		*
LED理論値	260~300	38.1~43.9%		*
高圧水銀ランプ	55	8.00%		**
高圧蛍光水銀ランプ	40~50	5.9~7.3%		*
キセノンランプ	25~35	3.7~5.1%		*
メタルハライドランプ	115	16.9%		**
高圧ナトリウムランプ	125	18.4%		**
緑色単色光源(555nm)	683.002	100%		*

\* 「発光効率」『フリー百科事典 ウィキペディア日本語版』(https://ja.wikipedia.org/wiki/発光効率) 閲覧日: 2017.9.19

\*\* 経済産業省 照明器具等判断基準ワーキンググループ 第1回総合資源エネルギー調査会 省エネルギー基準部会 明器具等判断基準小委員会 資料6(社団法人日本電球工業会調査データ利用)  
 (http://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene\_shinene/sho\_energy/shomei\_kigu/pdf/g70614b06j.pdf) 閲覧日: 2017.9.19

世界の照明に消費される電力は年間 2PWh ともいわれているので、蛍光灯から汎用 LED への代替のみを考慮して 10%の省エネルギー効果としても 200TWh と極めて大きなものになる。もっとも、この用途にはサファイア基板を用いた汎用 LED ですでに十分であり、これをさらに GaN 基板を使用した素子に置き換える必要性は乏しいため、新規 GaN 素子としては、省エネ効果にあまり寄与しないと考える。

投光器、舞台・スタジオ照明のような分野ではハロゲンランプからの高輝度 LED、レーザーへの転換で 120W/台、160×3=480 万台、2,000 時間/年使用として、115MWh の 4/5 程度、約 90MWh の省エネルギー効果は見込まれる。

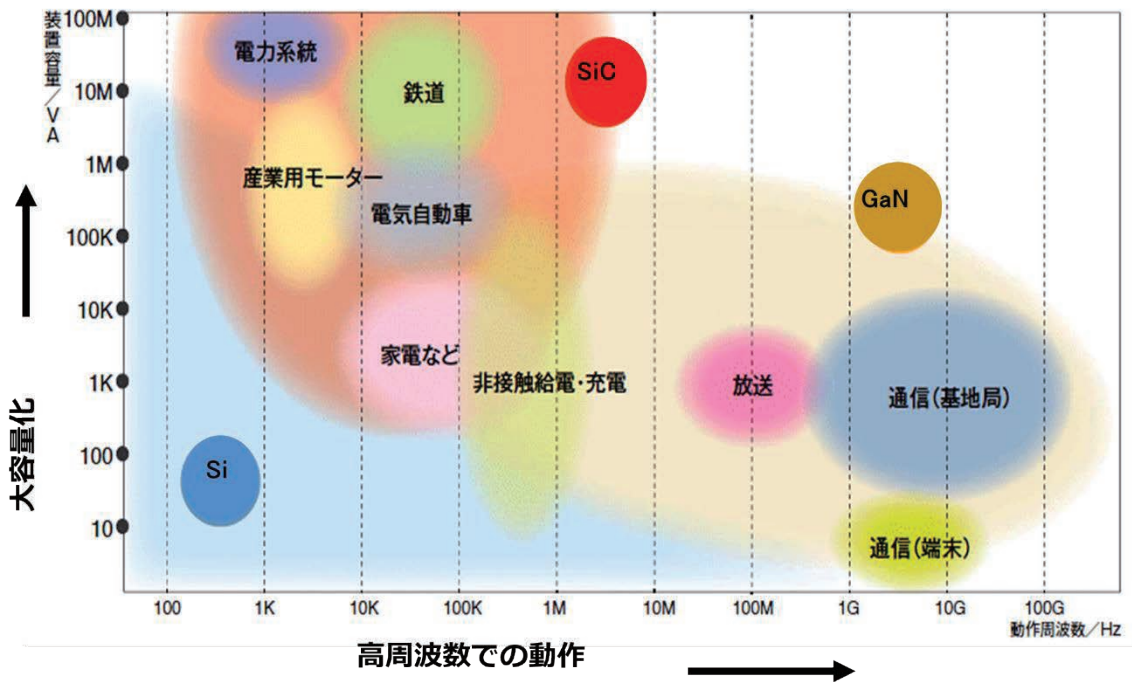
表 9 各種照明のエネルギー消費量[7]

		原油換算万 kL			
		国内		世界	
		2020 年	2030 年	2020 年	2030 年
照明	HID ランプ	24.4	51.2	192	404
	ネオン管	46	25.6	341	190
	自動車用ヘッドライト	1.3	3.7	15.2	51.6
ディスプレイ	汎用プロジェクタ	2.1	12.5	21	146
	シネマ用プロジェクタ	1.7	2.9	16.8	34
	ピコプロジェクタ	1.4	3.1	14.3	35.8
	レーザーTV	14	11.7	310	3,494
	レーザーPC	6.3	26.2	139.5	781.5
植物工場	植物工場（拡大ケース）	1.2	9.2	11.6	92.3
合 計		98.4	146.1	1,061.4	5,229.2

### 3. 電子デバイス

#### 3.1 概観

GaN 系半導体の電子デバイス応用としては、前述のように、高周波デバイスとパワーデバイスが挙げられる。もっとも、パワーを制御するデバイスをパワーデバイスと呼ぶので、その動作領域が高周波であれば、高周波デバイスかつパワーデバイスということになり、両者の領域がはっきりと区別できるわけではない。そのため本報告では、高周波デバイスといった場合には低電力高周波用途、パワーデバイスといった場合には、周波数によらず大電力用途の意味で用いる。



出典：NEDO ウェブページ ([http://www.nedo.go.jp/tokushu/interview48\\_2.html](http://www.nedo.go.jp/tokushu/interview48_2.html) 閲覧日：2016年10月)

図9 半導体素子の周波数と容量マップ

なお、低周波のパワー用途ではシリコン系半導体がその地位を確立しているといつて良く、前報[1]でも述べたように HEMT 素子を利用した高周波低電力素子（通信用）については、技術的に完成され、すでに実用化されているので、今回は検討対象外とする。

そこで実用化が期待されるパワーデバイス用途としての GaN 素子を実験の検討対象とする。GaN 素子としては現在 GaN/Si 基板、GaN/SiC 基板、GaN/GaN 基板が知られている。

表 10 パワーデバイス市場

パワーデバイス市場 (百万円)	2016年	2020年	2025年	2030年
民生機器分野	947,230	973,000	1,008,200	1,063,000
情報通信機器分野	492,100	544,200	588,300	650,300
自動車	409,800	490,400	647,900	945,000
電鉄車両	43,100	50,000	64,000	102,000
新エネルギー	73,700	95,750	148,000	267,100
産業機器	457,800	538,300	653,500	858,600
合計	2,423,730	2,691,650	3,109,900	3,886,000

パワーデバイス全体の市場は約 2 兆 4 千億円（2016 年）、3 兆 9 千億円（2030 年）と推定される[8]。これらは用途から大別すると、民生機器分野、情報通信機器分野、自動車分野、エネルギー分野、産業分野に分けられる。この大部分は Si 系デバイスである。

次世代半導体の有望分野としては、高速、耐圧、小型化という特徴が生かされる情報通信機器分野、エネルギー分野、自動車分野、民生機器分野と思われる。表 11 は株式会社富士経済の調査[8]をもとに、2020～2030 年については LCS が推計したものである。



売上高は 14 億円 (2016) から、2025 年には 500 億円、2030 年には 1,700 億円と考えられる。これらについて解説する。

表 11 GaN パワーデバイス市場

GaN パワーデバイス市場 (百万円)	2016 年	2020 年	2025 年	2030 年
民生機器分野	180	2,000	7,000	24,500
情報通信機器分野	950	5,000	10,000	20,000
自動車	0	2,000	11,000	60,500
電鉄車両	0	0	0	0
新エネルギー	300	5,000	13,000	33,800
産業機器	0	500	4,000	32,000
合 計	1,430	14,500	45,000	170,800

### 3.2 民生機器

2016 年で 9,500 億円程度、2030 年には 1 兆円程度の市場が推定される。GaN については 2 億円 (2016 年) から、2030 年には 70~250 億円程度に増大すると予測される。

#### (1) AC アダプタ

高周波動作することによって周辺部品の小型化が可能となり、パソコンやテレビの AC アダプタがコンパクトになる。

#### (2) インバータ

同様に小型化が要求される家電の電源回路、LED 駆動用回路などのインバータにも採用されると期待される。

#### (3) 課題

従来から Si 系半導体が応用されていた分野であり、小型化によるメリットとコストとの比較になる。コストダウンが最重要課題と考えられる。

### 3.3 情報機器

2016 年で 5,000 億円程度、2030 年には 6,500 億円程度の市場が推定される。情報機器の電源回路での直流電圧変換などが主要分野。次世代半導体は、2015 年の SiC : 68 億円、GaN : 5 億円から 2030 年には SiC : 300~500 億円、GaN : 100~200 億円と売り上げ増大が予測されている。具体的な素子としては下記があげられている。

#### (1) 低電圧 DC-DC コンバータ

PC など多くの電子機器の電源回路に用いられている。直流電源電圧を CPU やメモリーの動作電圧に変換する。また GaN は Si と違い、1 段で電源電圧から動作電圧まで下げることができる。とされる。

求められる特性としては、低損失化と高周波動作である。

Si 系デバイスでは 2MHz 以上の高効率な DC-DC コンバータの実現は難しいとされている。

引田らは GaN トランジスタにおいてゲートインジェクショントランジスタ (GIT) を開発してノーマリオフかつ損失の低減ができることを見出した[10]。

## (2) インバータ

従来品は Si の IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) と Si-FRD (Fast Recovery Diode) をペアにしているが、現状の変換効率は 90%程度とされ、スイッチング損失が大きく、さらに変換効率が出力により変動するなどが課題と言われている。GaN はスイッチング速度の高速化が可能なことからスイッチング損失の低減が可能である。

価格的には 200V、8.5A クラスで 260 円前後、50A クラスで 550 円といわれている。

## (3) 通信用 HEMT 増幅器

通信機能の多様化、情報量の増大が進んでおり、増幅器の高出力化、高効率化、高周波化への要望がある。現在は GaAs 系 HEMT から、高出力、高効率の観点から GaN/SiC が着目されている。例えば X 帯 (8~12GHz) において GaAs-HEMT の出力は 30W であるが、GaN-HEMT では 55W であり、また効率も 10%以上高いとされている。

## (4) 課題

高周波化、低損失化、電流コラプス減少対策、ノーマリオフのためのデバイス構造の検討、GaN/Si、GaN/SiC のヘテロエピタキシャル技術の向上、低コスト高品質 GaN 基板の開発など。

## 3.4 車載機器

ハイブリッドや電気自動車で、電池の電圧を例えば 600V に昇圧するためにコンバータ、さらに DC-AC 変換するためにインバータが必要とされる。これらのデバイスの低損失化、高温動作の要求が強い。

次世代半導体は、2015 年の SiC : 24 億円、GaN : 0 億円から、2030 年には SiC:300~800 億円、GaN : 100~600 億円と売り上げ増大が予測されている。具体的な素子としては下記があげられる。

### (1) 大電力モジュール

#### A. DC-DC コンバータ

300V の電池電圧を 650V にまで昇圧。動作周波数をあげることによって、小型化、軽量化が可能。

#### B. DC-AC インバータ

直流を 3 相交流に変換。1 個のモーターにトランジスタが 6 個必要になる。モーター 4 個で 24 個のトランジスタが必要になり、これらの変換ロス低減が長距離走行につながる。

#### C. AC-DC コンバータ

ジェネレータで発電された交流を直流に変換する素子 (HV) で、ハイブリッド自動車の回生電力回路、電気自動車の交流充電には必須の素子。

### (2) 中・小電力モジュール

3~5kWh の電動エアコン用など。車載電池の電圧を AC に変換してモーターを駆動する。DC-DC コンバータと DC-AC インバータが利用される。

### (3) 課題

縦型デバイスは基板の問題などから、性能および信頼性に課題がある。横型デバイスではノーマリオフ動作 (閾値 3V 以上) と電流コラプスの原因の解明、電界緩和構造などの対策。

ノーマリオフの場合には絶縁膜に絶えず電圧がかかるため、特性の劣化がおきないような絶縁膜の材料、製造プロセスの検討が必要。

大電力モジュールについては、特に損失の低減が課題。損失の内訳は定常損失とスイッチング

損失とからなることから、インバータへの要求としては低抵抗化、DC-DC コンバータでは高周波化の要求が強い。要求性能としては、①低抵抗化、②高温動作 (200°C)、③耐圧 (600V~1,200V)、④応答速度 (100kHz) があげられる。中小電力モジュールについてはさらに小型化の要請がある。

### 3.5 電力用途

電力用途向けには特に高耐圧と低オン抵抗が求められる。

次世代半導体は、2016 年の SiC : 57 億円、GaN : 3 億円から、2030 年には SiC が 400~1,100 億円、GaN が 130~340 億円と売り上げ増大が予測されている。具体的な素子としては電力変換用 3kV-GaN ダイオード (大電流密度が必要なため、基板利用効率が高い縦型が有利) と 6kV 超耐圧トランジスタなどが挙げられる。

大電力用デバイスでは、大電流密度が可能で基板利用効率が高い縦型構造が有利であるため、転位や極性反転区などの欠陥が少ない GaN 自立結晶基板が必要になる。またエピタキシャル結晶成長時には、低キャリア濃度の高精度な制御が必要である。

超高耐圧素子で、Si 基板を用いた場合、GaN の耐圧は GaN の膜厚に依存するが、耐圧を増大すると GaN 膜厚が厚くなる。そうすると下部の電界シールド効果が弱まり電流コラプス抑制効果が低減するというトレードオフが問題点としてある。また、Si 基板上での GaN エピタキシャル技術が量産技術として使えるかも問題と言われる。これらの問題を克服して安価高品質大口径な Si 基板が生かせる利用ができるかが課題である。

このほかに基板としてサファイアを用いて、最終的に剥離する技術、SiC や GaN 基板を利用する技術などが検討されている。

### 3.6 市場まとめ

パワーデバイスの定義は 1W 以上の出力 (JEITA) とあるが、必ずしもこれで統一されているわけではなく、調査機関による差が大きいと言われている。また、パソコン CPU 電源のような小電力のものから、系統電力の変圧やメガソーラーの AD 変換などの大電力まで様々である。

この分野でも Si 半導体が主流であり、大電力系では SiC が導入されつつある。GaN はこれらに比べて絶縁耐圧や高周波特性に優れ、GaN/Si 基板を利用する省電力高周波用途は今後拡大が予想される。しかし、大電力系は縦型素子の必要があり、安価な基板がないために高コストであるという問題がある。このため、当面の応用分野は特に高効率を狙うところなどに限られる。

今後 GaN 素子が広く使われるためにはコストダウンが必須であり、そのためには高品質安価な GaN 単結晶基板の実現か、Si 基板を使いこなす技術 (熱膨張係数差や格子不整合を克服する技術) の開発が望まれる。

またエピタキシャル結晶成長技術の改良による GaN 単結晶基板のコストダウンも必要と考えられている。

### 3.7 省エネルギー効果

パワーデバイス市場では、Si 系素子、SiC 系素子、GaN 系素子が激しく競合している。出力が変動する用途では、オンオフスイッチをインバータに置き換えると、消費電力節減効果は 30~40%に上るといわれ、現在インバータの導入が進んでいる。この Si 系インバータ素子を SiC または GaN 素子に置き換えた場合には 10%程度の変換効率の向上が認められると言われている。

国内産業部門ではその年間エネルギー消費 8,497PJ (2015 年) の内 2,377PJ (660TWh、年間消費電力 994.1TWh の約 70%) は電力消費であり、それらの内 70%程度 (460TWh) すなわち年間消費電力の 50%程度は出力可変機器や電圧変換などのためにインバータの導入効果があると言われている。これは膨大な省エネルギー効果をもたらすが、Si 系半導体が主流であり、ついで SiC、GaN 素子となる。インバータの 10%が GaN として Si より 10%変換効率が向上すると、4.6TWh

程度の節電効果があることになる。将来的に電力需要は年率 1.3~1.7% (GDP スライド) 程度で拡大すると予想されているので、今後の開発の進展で GaN 素子のコストダウンが進めば、競争力も向上して、より大きな市場を形成することも考えられる。

本報告での予測では 2030 年における GaN 素子の導入量は 6 億個程度である。仮に平均消費電力を 100W、8,000 時間/年、10%の効率向上が得られるとすると、電力節減効果は 48TWh/年となる。ポテンシャルとして考えると、世界の電力消費は約 24,000TWh (2017 年) であるから、国内と同様にその消費電力の約 50%程度がインバータの導入効果がある (12,000TWh) とし、その 10% が次世代半導体で効率向上が可能とすると、1,200TWh/年の節減効果が期待できる。

## 4. まとめ

### 4.1 発光素子

既述のように GaN 素子は高効率光源としてすでに社会に広く浸透している。このため照明光源としては次世代半導体としての高輝度 LED との境界はあいまいにならざるを得ない。

ディスプレイにおいて液晶のバックライトはすでに LED が採用されているため、液晶ディスプレイ分野における次世代半導体の効果はあまり大きなものとはいえない。また、ヘッドマウントディスプレイやヘッドアップディスプレイやピコプロジェクタは新しいディスプレイを提供するもので、社会的な影響は大きいと考えるが、省エネルギーに対する効果は、比較対象がないために考えることは難しい。

自動車分野のヘッドライトでも既存 LED でほとんどの用途は十分と考えられる。

照明分野において GaN の LED が省エネルギーに果たしている役割とその効果は、既述のように 200TWh というきわめて大きなものだが、これも既存 LED で十分であり、高輝度半導体やレーザーの応用は特殊な分野に限られ、大きな省エネルギー効果はない。

結局、現在の素子が GaN の特性を生かして達成すべき高効率をほぼ達成しているので、次世代半導体素子がこの分野で省エネルギーに寄与できる余地は少ないと考える。

### 4.2 パワー半導体

パワーデバイス市場では前述のようにシリコンが主役であるが、電気自動車や自然エネルギーの普及に伴い、直交変換や電圧変換のための交耐圧高効率素子が必要とされ、SiC、GaN などが導入され始めている。コストとの兼ね合いがあるために明確ではないが、インバータの 10%が GaN 素子として、120TWh 程度の省エネルギー効果が見込める。

GaN 素子については、初めて実用化して以降、日本の研究は世界をリードしてきたといっている。パワー半導体としては SiC 素子が先行していることから、SiC にも注目して一定の注力が必要であり、さらに日本の先行性を守る省エネルギー技術という観点からも GaN は注力してよい材料と考える。

## 5. 政策立案のための提案

記述のように光学デバイス市場における GaN 系 LED の省エネルギー効果は、照明用途を中心にきわめて大きいですが、大部分の用途において既存の汎用 LED で十分である。もちろん次世代半導体の大幅なコストダウンが達成されれば、これら汎用品を置き換えることも考えられる。次世代半導体としてのレーザーや高輝度 LED は、大きな新規市場を作り上げる可能性が大きいものの、新分野のために省エネルギー効果の推算是現状では困難である。また市場に普及するためには性能向上とコストダウンが必要である。

パワーデバイス市場では GaN 素子はインバータなどによる省エネルギーのポテンシャルが大

きい。SiC や Si 系半導体と競合する部分が多いため、価格/性能指数が低いことが最も重要である。GaN 素子は材料物性からのポテンシャルはあるものの、省エネルギーに貢献する程度に普及するためにはまだ高価格であり、性能向上とともにコストダウンの必要性が高い。

現在開発中の GaN 素子は Si 基板、SiC 基板、GaN 基板などの上に作成され、それぞれ性能、価格で一長一短があるが、いずれも市場に普及するという観点からは高コストであり、性能的にも改良の余地が大きい。これら素子の将来的な可能性評価は今後の課題である。また、実用化への共通課題として基板に関連する問題の解決と低コストかつ結晶ひずみを抑えたヘテロエピタキシャル技術の開発が必要と考えられる。

## 参考文献

- [1] 低炭素社会の実現に向けた技術および経済・社会の定量的シナリオに基づくイノベーション政策立案のための提案書, 技術開発編, “GaN 系半導体デバイスの技術開発課題とその新しい応用の展望 (Vol.2) -GaN 結晶と基板製造コスト-”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, LCS-FY2017-PP-11, 2018 年 2 月.
- [2] ゲイル・オーバートン他, “2016 年版レーザー市場予測“, Laser Focus World Japan 2016.3, 2016.
- [3] 富士キメラ総研, “2016 高効率レーザー関連市場総調査“, 2016.
- [4] 迫宏, “エネルギー変換効率から見たレーザー技術動向“, Sheetmetal ましん&そふと 2015.4, 12-15, 2015.
- [5] 山本和久, “可視光半導体レーザーがもたらす照明の未来“, LED 照明シンポジウム 2017.9, 東京, 2017.
- [6] 財団法人機械システム振興協会, “産業用次世代レーザー応用・開発に関する調査研究報告書“, 20-R-7, 2009 年 3 月.
- [7] 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), “省エネルギー効果が期待される半導体レーザー応用技術に関する検討 報告書“, 2012 年 3 月.
- [8] 富士経済, “2017 年版次世代パワーデバイス&パワエレ関連機器市場の現状と将来展望“, 2017.
- [9] 佐々木勝, “ヘッドランプの技術の動向及び安全・環境問題“, JAMAGAZINE (日本自動車工業会), 47, 8-13, 2013.
- [10] 引田正洋他, “GaN パワーデバイス“, パナソニック技法, 55(2), 21-25, 2009.

---

低炭素社会の実現に向けた  
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく  
イノベーション政策立案のための提案書

技術開発編

**GaN 系半導体デバイスの技術開発課題と  
その新しい応用の展望 (Vol.3)**  
—市場規模と省エネルギー効果—

平成 31 年 2 月

**Technological Issues and Future Prospects of GaN and  
Related Semiconductor Devices(Vol.3):  
Market Size and Energy Saving Effect**  
Strategy for Technology Development,  
Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action  
toward Low Carbon Societies,  
Center for Low Carbon Society Strategy,  
Japan Science and Technology Agency,  
2019.2

国立研究開発法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター

---

**本提案書に関するお問い合わせ先**

- 提案内容について・・・低炭素社会戦略センター 主任研究員 三枝 邦夫 (Kunio SAEGUSA)
- 低炭素社会戦略センターの取り組みについて・・・低炭素社会戦略センター 企画運営室

〒102-8666 東京都千代田区四番町5-3 サイエンスプラザ4階  
TEL : 03-6272-9270 FAX : 03-6272-9273 E-mail : lcs@jst.go.jp  
<https://www.jst.go.jp/lcs/>

© 2019 JST/LCS

許可無く複写・複製することを禁じます。  
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

---