

総 説

GaN系LEDの概要と最新動向

Brief Overview and Recent Trend of GaN Based Light Emitting Diode

上村俊也*

1. はじめに

20世紀には実現不可能、あるいは夢の発光ダイオード[LED]と言われていた青色発光LEDがGaN系化合物半導体によって実現し、この世に出回るようになってからはや8年以上の月日が流れ、今日では街中の至る所に、あるいは身の回りのあちらこちらにGaN系LEDを見ることが出来る。当初、青色発光のみであったGaN系発光素子であるが、現在では緑色領域から近紫外領域までのLEDがこのGaN系化合物半導体で実現されている。また、蛍光体との組み合わせにより実現した白色LED、そして今まさに実用化されようとしている短波長レーザー[LD]と、多種多様な発光素子が開発／実用化されている。

今日においても、産官学を問わず性能向上や用途開発あるいは新機能発現に向けた飽く無き追求が盛んになされ、世界中で頻繁に開催される関連conference、無数に創設されるベンチャー企業と、その波及効果、経済効果には目を見張るものがある。このようなめざましい発展を遂げたGaN系LEDについて、その概要と最新動向を紹介する。

2. GaN系LEDの概要

2-1. LEDの発光原理

まず始めにGaN系化合物半導体がどうして青色に光るのかを簡単に説明する。詳しくは専門書籍を参考にさせていただきたい。

電流を流す担い手（キャリア）がマイナスの電子であるn型半導体と、キャリアがプラスの正孔で

あるp型半導体を接合（pn接合）し電流が流れる方向に電圧をかける（順方向電圧）と、図1に示すように電子はp側へ、正孔はn側方向へ移動しpn接合部でぶつかって消滅する（再結合）。この際、電子の持っていたエネルギーと正孔の持っていたエネルギーの差に相当するエネルギーを光として放出する。

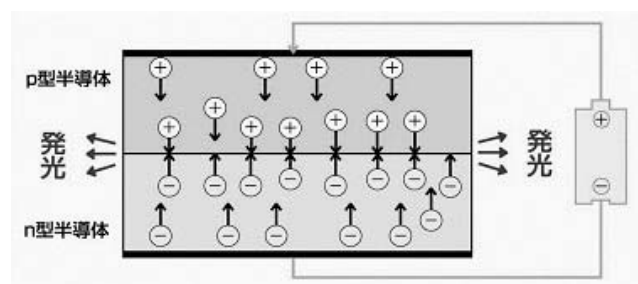


図1 pn接合時のキャリアの様子

従って電子の持つエネルギーと正孔の持つエネルギーの差（エネルギーバンドギャップ： E_g ）によって発光波長が決まることになる。参考として関係式を以下に示す。

$$\langle \text{発光波長 } \lambda [\text{nm}] = 1240 / E_g [\text{eV}] \rangle$$

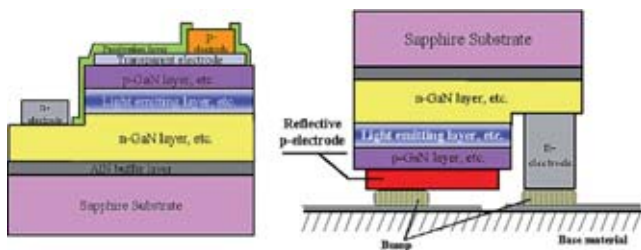
この E_g は物質固有の値であり、Ⅲ族窒化物半導体であるGaNは、同じⅢ族窒化物半導体であるInNやAlNとの混晶を作ることによって、原理的にはおよそ200nmから600nm（最近になってInNの E_g は1.0eV未満であるとの報告²⁾もあり、この場合には赤外発光LEDも可能ということになる）の発光波長を得ることが出来る。

* Toshiya Uemura オプトE事業部 第1技術部 第3技術室

2-2. 基本構造と特性

図2に現在、我々が量産化しているGaN系LED発光素子の断面構造図を示す。p型のGaN層とn型のGaN層を、発光層を介して積層した構造となっている。このようにp型層とn型層を直接接合せず、間に別の層を導入することにより、電子や正孔といったキャリアをこの層の中に集中させることができ、効率よく再結合（発光）させることが可能となる。更なる高効率化に向け世界に先駆け我々は、数原子層からなる井戸層と障壁層とを周期的に積層させた多重量子井戸構造（MQW構造）を発光層として採用した³⁾。今日ではGaN系発光素子の殆ど全てが発光層としてこのMQW構造を採用している。

発光層から放出された光は、図2(a)に示す一般的な構造（フェイスアップタイプ）をしたLED素子では、その殆どが透光性を有する薄膜p電極を通して外部に取り出される。図2(b)に示すフリップチップタイプのLED素子は、一般構造のLED素子では透光性p電極での光吸収による損失分があるため、サファイア基板側から光を取り出すように開発されたものであり、我々はいち早く1999年より量産化を実現している³⁾。

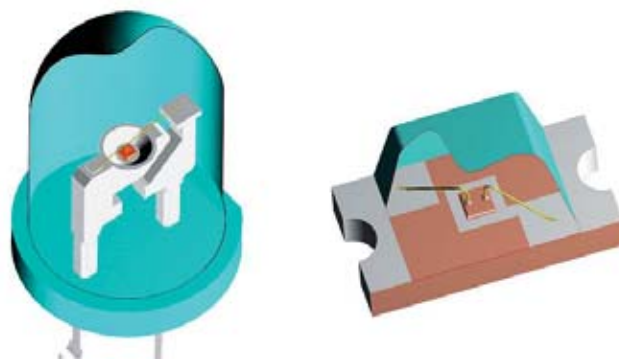


(a)フェイスアップタイプ (b)フリップチップタイプ

図2 LED素子の断面構造図

我々が身の回りや街中で見かけるGaN系LEDは、このような発光素子を図3に示すランプ成形体に組み込んだ形で用いられている（いずれもフェイスアップタイプのLED素子を組み込んだ図）。挿入実装タイプのランプは、一般的に砲弾型ランプと呼ばれており、ディスプレイパネルや交通信号等の比較的高光度が要求される場合に用いられ、一方、表面実装タイプのLEDランプはSMDと呼ばれ、携帯電話等の電子機器、各種インジケータ等の小型・小電力用途に用いられている。

図4に現在、我々が量産中の各色LEDの代表的



(a)挿入実装タイプ (b)表面実装タイプ

図3 LEDランプ

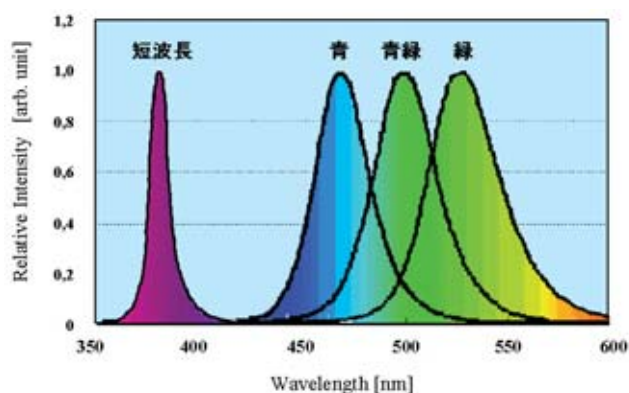


図4 各色LEDの発光スペクトル

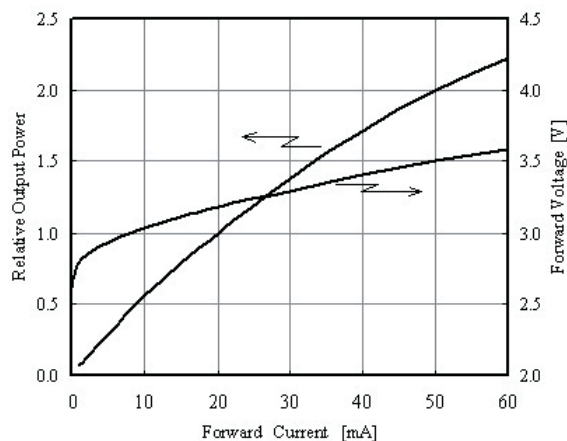


図5 青色LEDの電流-電圧-光出力特性

な発光スペクトルを示す。また代表的なLEDの特性である電流-電圧-光出力特性を青色LEDを例として図5に示す。LEDの特徴としては、①寿命が

長い, ②消費電力が少ない, ③発熱量が少ない, ④応答性が速い, ⑤環境に優しい, 等々数多くの長所があり, 色純度の高い固有の色を自発光するデバイスとして, 今もなお用途展開が図られている.

2-3. 白色LEDの紹介

高輝度の青色・緑色LEDが開発され, 従来からある赤色LEDと組み合わせることによって, 光の3原色を混色させた白色LEDが実現できるようになった. しかしながらこのタイプの白色LEDは, 各色のLED素子をひとつにパッケージングする(3色のLED素子を1つのランプに組み込む[3in1]) 必要があり, 現在では主に調色(各LEDの明るさを制御して任意の発光色を出す)を必要とする用途に使用されている.

1996年末に日亜化学工業㈱からLED素子を1個しか使用しない白色LEDが発表された⁴⁾. これは青色LEDの光を, YAGと呼ばれる蛍光体に照射することにより黄色の発光色を得て, これをLEDの発光色である青色と混色させることにより白色発光を実現するものである. 今日では, このように

補色関係にある2色(青+黄, 青緑+オレンジ)を混色させるタイプのもの, RGBの3原色の混色を基本とするタイプのもの, さらにはそれぞれのタイプに対しLED素子と蛍光体の組み合わせがいくつか考えられ, 多種多様な白色LEDが開発されている. 一方, 発光層にEu, Teといった発光中心となる希土類元素をドープ⁵⁾することによって, LED素子単独で白色発光を実現させる試みもなされている.

青色LEDと黄色系蛍光体を組み合わせた白色LED(以後, [B+Y白色LED])のランプ構造と発光スペクトルをそれぞれ図6, 図7に示す. 発光スペクトルを見ても分かるように, このタイプの白色LEDでは緑成分および赤成分の光が乏しいため, 色再現性(物体を照らした際に, どれくらいその物体の本来の色を再現するか)が不十分であるものの, 非常に効率が高いために現在では白色LEDを代表する存在となっている.

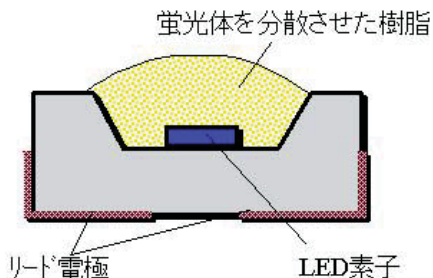


図6 白色LEDの構造

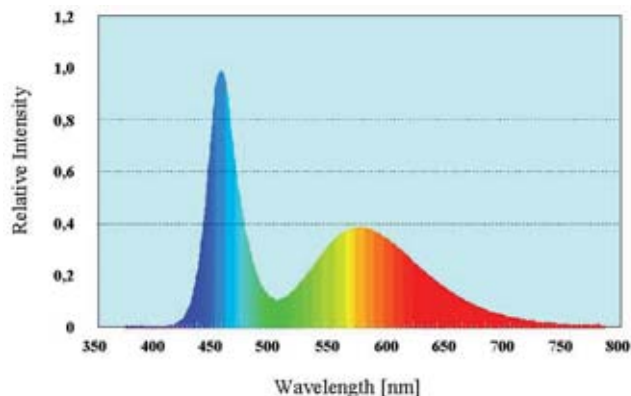


図7 青色LEDと黄色蛍光体を組み合わせた白色LEDの発光スペクトル例

表1 代表的な白色LEDの比較

		Type 1	Type 2	Type 3	Type x
組合せ	LED + 蛍光体	赤, 緑, 青 + なし	青 + 黄	短波長 + 赤, 緑, 青	? + ?
特徴	色再現性	△	△	x~△	○
	色安定性	△	△	○	○
	調色性	○	△	○	○
	明るさ	○	○	x	○
	コスト	x	○	○	○

表1に代表的な白色LED, 3タイプの特徴をまとめる. いずれのタイプも充分満足できる特性を有しているとは言えず, 比較的バランスの取れている[B+Y白色LED]でも, 上述した色再現性以外にも色安定性が劣る(使用電流, 環境温度, あるいは経時的に色度に変化する)といった欠点がある. この様子を図8に色度図で示す. では“Type x”を実現するにはどうすればよいか.

我々は, 発光波長380-400nmの短波長LED素子と特殊な数種類の蛍光体を組み合わせることにより, 非常に良好な特性を有した新規白色LED「TG TRUE WHITE HI」を開発することに成功した⁶⁾. 図9に発光スペクトルを示す. 蛍光体からの発光色のみで白色を実現しているため色安定性に優れ,

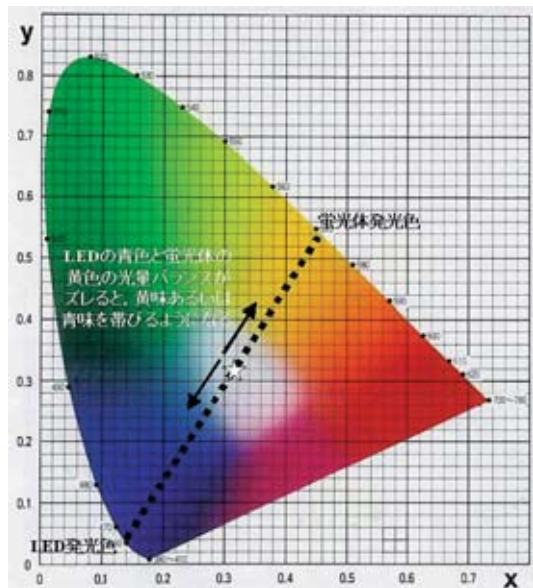


図8 CIE色度図上の[B+Y白色LED]

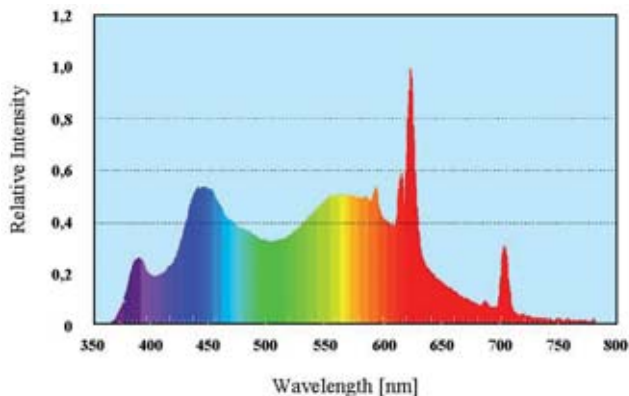


図9 TG TRUE WHITE HI の発光スペクトル例

短波長域から長波長域までブロードな発光を有するために良好な色再現性を発揮する。また、配合する数種類の蛍光体の配合比を変えることにより、任意の発光色を得ることも可能となる。

さらに、従来の[B+Y白色LED]で実際に使用の際にしばしば問題となっている、色度の視野角依存性（見る角度によって色目が変わる性質）についても「TG TRUE WHITE HI」では非常に良好な特性を有している。[B+Y白色LED]では、青色LEDの漏れ光と励起された蛍光体からの黄色光とのバランスによって色度が決まるが、あらゆる光路パスでこのバランスを一定に保つことができないため、見る角度によって色度が変化してしまう。これに対し「TG TRUE WHITE HI」では、色度は蛍光体の配合バランスによって一義的に決まるため、一定の色度を保つことが可能となる。

このように数々の優れた特徴を有している「TG TRUE WHITE HI」は、発光効率的にも[B+Y白色LED]に近いレベルを確保しており、我々はこの「TG TRUE WHITE HI」が将来の照明用光源として最も適した白色LEDであると考えている。

2-4. LEDの製造フロー

GaN系LEDの一般的な製造フローを図10に示す。GaN系半導体結晶を成長するための基板としては、一般的に2インチサイズのサファイア基板が用いられ、MOCVD（有機金属化学気相成長：Metal-Organic Chemical Vapor Deposition）法

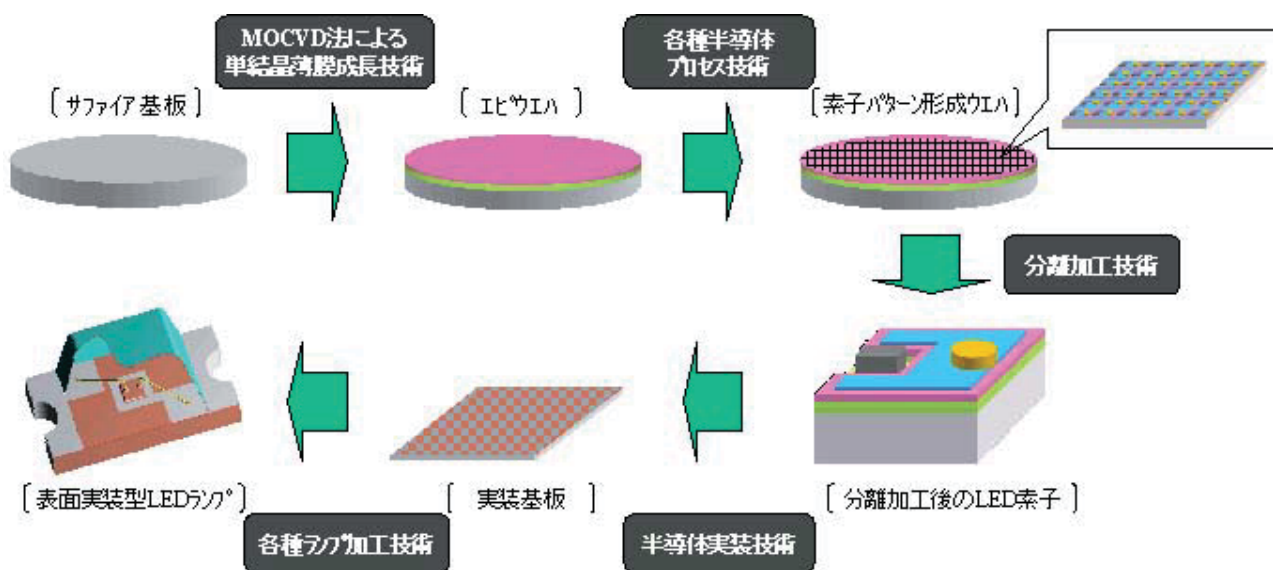


図10 GaN系LEDの製造工程フロー

により良質のGa₂N系半導体単結晶を何層にも成長、積層した後、PVD/CVDといった薄膜形成技術、各種ウェット/ドライ処理技術やリソグラフィ技術等の半導体プロセス技術を駆使することによって、最終的に300μm角程度のGa₂N系LED素子が集積されたウエハを得る。この後、分離加工技術により個々の素子に分割され、特性チェックがなされた後にランプ加工される。

ランプ加工工程ではLED素子を、湿式メッキ法等により配線パターンが形成済みの樹脂等の実装基板上に、また砲弾型ランプの場合はリードフレームと呼ばれる金属製部材上に搭載し、ワイヤーボンディング技術等を用いて電氣的導通を確保した後に樹脂モールドング工程を経て最終のランプ形態となる。

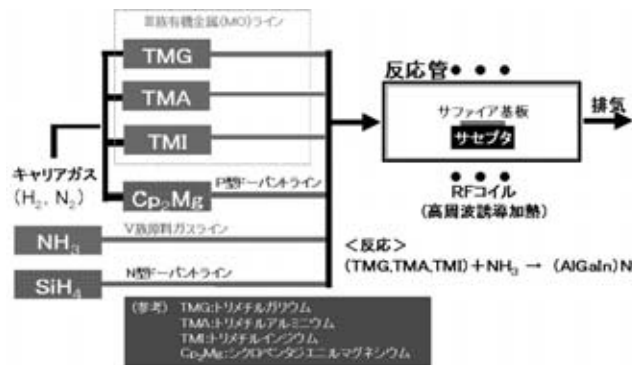


図 1 1 MOCVD法による結晶成長

全工程を通じて最終製品の特性に最も影響を及ぼす工程は、最初の結晶成長工程である。図 1 1 にMOCVDによる結晶成長の概要を示す。成長する結晶の品質は、成長温度、成長圧力、成長速度、ガス流量、ガス分圧等の成長条件に大きく左右される。どのような層構成にするか、といった層設計技術もさることながら、結晶成長工程はLEDの明るさ、駆動電圧、寿命、その他半導体特性等LED品質をつかさどる重要な工程と言える。

3. Ga₂N系LEDの最新動向

3-1. 開発トレンド

当初、世界を見渡してもGa₂N系LED素子の製造メーカーは2~3社しか存在しなかったが、今日でははるく10社を超えるまでになっており、熾烈な開発競争が繰り広げられている。また、白色

LEDも含めて、実用化当初に比べ飛躍的に明るさの向上が実現されているにも拘わらず、未だ技術的に特性向上が見込まれており、また一方では未解明の技術領域が多々あるため、産学官を問わず世界中で精力的な技術開発、研究開発が行われている。現在のGa₂N系LED素子全体の開発の方向性、大きな流れとしては、①高効率化、②大電流化、③短波長化、の3つに集約できると考えられる。

3-1-1. 高効率化

高効率化については言うまでもなく、未来永劫に渡って取り組まれる開発目標であり、3-2項で若干詳しく述べたいと思う。

3-1-2. 大電流化

近年、大電流を流すことができ、1個で大光量を得ることができるLEDランプ開発の動きが盛んである。通常の300μm角程度のLED素子を組み込んだランプの場合、最大30mA程度までの電流値により駆動させるが、この10倍以上の大電流をひとつのLED素子に通電する。LED素子サイズとしては専ら1mm角程度のものが開発、採用され、電流値としては350~500mAをターゲットとしている。駆動電圧は3.数Vであるので、1Wを超える電力が1mm角のエリアに投入されることになり、高発光効率のGa₂N系LEDと言えども、発光色にも依るが投入電力の概ね3/4程度は光に変換されず熱となってしまうため、LED素子は高熱を発生する熱源となる。LED素子はその基本特性として温度の上昇に伴い発光効率が低下するため、大量に発生する熱を如何に効率的に逃がしてやるか、といった放熱設計技術がキーテクノロジーとなる。そのためLED素子を熱伝導率が高く、熱容量を大きくした部材に実装する必要がある、ある程度のボリュームのある金属成形体の実装基材として用いられることが多い。

3-1-3. 短波長化

青色から始まったGa₂N系LEDは、すぐさま高輝度緑色LEDの開発を達成し、当初は長波長化の開発動向もあったものの、InNの混晶比が高くなると結晶性が悪化してしまうことが分かり、現在ではその動きは一段落ついた感がある。一方、短波長化の開発については、現状のレーザーの代用光源など新規用途展開が図れることもあり活発に行われている。最近では研究室レベルではあるが、

発光波長292nmのLED発光⁷⁾が確認されるまでになっている。

およそ380nmより短波長化する場合には、通常の可視域のLED素子構造のままでは実現不可能、あるいは低出力となってしまいうため、以下のような対応が取られている。

- ・発光層の変更

通常の可視域LEDで採用されているGaInNではなく、よりEgの大きなAlGaInあるいはAlGaInNを用いる。

- ・光吸収損失の回避

GaNやGaInN層が存在すると、自身で光を吸収してしまい外部に光を取り出せないため、AlGaIn層で全体層を構成する。あるいは下地層となるn型層を一旦は良質のGaN層で形成し、発光層以降を成長した後にサファイア基板も含めてn型GaN層を除去する⁸⁾、といったユニークな工法も検討されている。

- ・結晶欠陥の低減

短波長LED素子では結晶欠陥密度が出力あるいは寿命に大きく影響するため、低欠陥化が必須技術となっている。内容については次項で紹介する。



図12 開発トレンドの向かう先には

以上、3つの開発トレンドについて紹介してきたが、これらが目指す先に何があるかを改めて考えてみると、一般照明というキーワードが見えてくる。既にGaN系白色LEDの効率は白熱電球のそれ(15lm/W)を上回っており、圧倒的大光量を誇る一般照明の代表格である蛍光灯(効率は50lm/W以上)に取って代わっていくためには、更なる大幅

な高効率化と素子当たりの光量の飛躍的増加が必須条件となる。また、蛍光灯並の光源特性を持たせるためには蛍光体の発光色のみでの混色による白色化が必要であり、LED素子の効率を落とすことなく短波長化できれば励起光の高エネルギー化によって蛍光体の発光効率を大きく向上させ得る。ある意味、現在業界で何かと取り沙汰されている一般照明用光源のLED化の潮流が、LED素子開発のDriving Forceとなっている。

3-2. 高光度化技術動向

3-2-1. 内部量子効率の向上

内部量子効率とは、注入したキャリアのうち光に変換される割合を意味し、LEDの心臓部の発光効率と言うことができる。

【結晶欠陥の低減】

まず最初に、短波長化開発に伴い現在盛んに検討されている、結晶欠陥の低減方策について紹介する。GaNの結晶成長時、基板に用いるサファイア基板とGaN単結晶との間の格子定数差、熱膨張係数差に起因して、結晶の成長方向に伝搬する欠陥(貫通転位)が非常に高密度に発生する。一般的にその発生密度(転位密度)は 10^9cm^{-2} 以上と言われており、特に短波長のLEDやレーザーダイオードを開発する場合には致命傷となる。この転位密度を低減するための方法には大別すると2種類あり、それは転位を成長方向に貫通させないようにする方法と、転位自体を発生させないようにする方法である。前者では、パターンニング加工した基板を用い、直上の成長時に横方向への成長促進を図ることにより欠陥を成長界面近傍で横方向に曲げ、上方向に貫通する転位を低減させる⁹⁾¹⁰⁾。概ね 10^7cm^{-2} 以下の低転位が実現できるものの、実際に量産展開するに当たっては、成長面内で均一な品質を如何に実現させるかが鍵となる。後者の方法は、結晶欠陥密度の低いIII族窒化物系基板、または低欠陥のIII族窒化物系結晶層が既に成膜されている基板(テンプレート基板と言う)を用いる方法である。

元々、III族窒化物系では単結晶のバルク材料が存在しなかったために、サファイア基板を用いてヘテロエピタキシャル成長をしてきた訳であるが、転位の高密度発生の根源はこの異種基板の採用にあり、バルク基板の採用は当然の解決策となる。そのため種々の工法での開発・量産化検討が活発

に行われており、一部サンプルベースではあるが上市も始まっている¹¹⁾¹²⁾。一方、究極の基板であるバルク基板に対し、これを擬似的に実現させようと言うのがテンプレート基板¹³⁾である。いくつかのメーカーから製品化がなされているが、バルク基板程ではないにしてもそれなりのコスト高となり、コストアップ分と性能面での効果を勘案すると、その採用はレーザーや電子デバイス、UV LED等に限定されるものと考えられる。

[発光メカニズム]

結晶欠陥が非常に多いにも拘わらず、何故GaN系LED素子は高光度発光するのか。どうして急速に劣化しないのか。それまでの発光デバイスの常識からは想像し難い特性について製品化当初より議論がなされてきた。種々のメカニズムが提唱され現在も活発な研究がなされているが、未だ完成された理論形成にまでは至っていない。寿命特性や電極とのコンタクト特性など、LEDとしての諸特性を全て把握するためには、転位のみならず点欠陥の挙動、影響まで解明していく必要がある。特性向上目的のみならず学術的にも非常に興味深いこともあり、関連する大学、研究機関では一様にGaN系の物性研究に取り組んでいるようである。多くの機関から多種多様な報告がなされているが、当然のことながら評価対象ワークの成長条件、層構成等は異なっており、結果の普遍性をどう見極めていくかが重要となる。

GaN系の持つポテンシャルを最大限に引き出す

ためには、確立された発光メカニズムに基づく理想の層構成・構造設計をしていくことが必要である。GaN系発光素子の発光起源という根本的な領域であるため、本質的な部分での高光度化と言える。

[結晶成長技術]

製造フローの項で述べたように結晶成長は製造にとっても肝となる工程・技術であるが、高光度化開発の観点においても、その根幹をなす技術である。いくら良い層構成設計をしても、あるいは物性理論面での解明が進み理想的な層設計・層構造が描けたとしても、それを具現化できなくては高光度化には結びつかない。

成長させるための種々のパラメータ設定を検討する成長プロセス設計技術に重点が置かれがちであるが、高品質化を追求して行くには限界がある。結晶成長反応はCVDという化学反応を伴うため、その反応素過程を解析し、AlGaInN系にとっての理想の反応系を構築、これを具現化する成長装置を設計していくことが重要である。しかしながら非常に反応活性なガスを高温下で多用するため、気相中での反応は複雑この上なく、また成長温度は1000℃以上の高温下での析出反応となるため、その解析/検証技術を磨きながら結晶成長技術を培っていくことは極めて難易度が高い。

現在、市販のGaN系の専用成長装置としては、数種類しか存在しておらず、バルク基板同様、この分野での新規参入を目指すベンチャー事業も繰

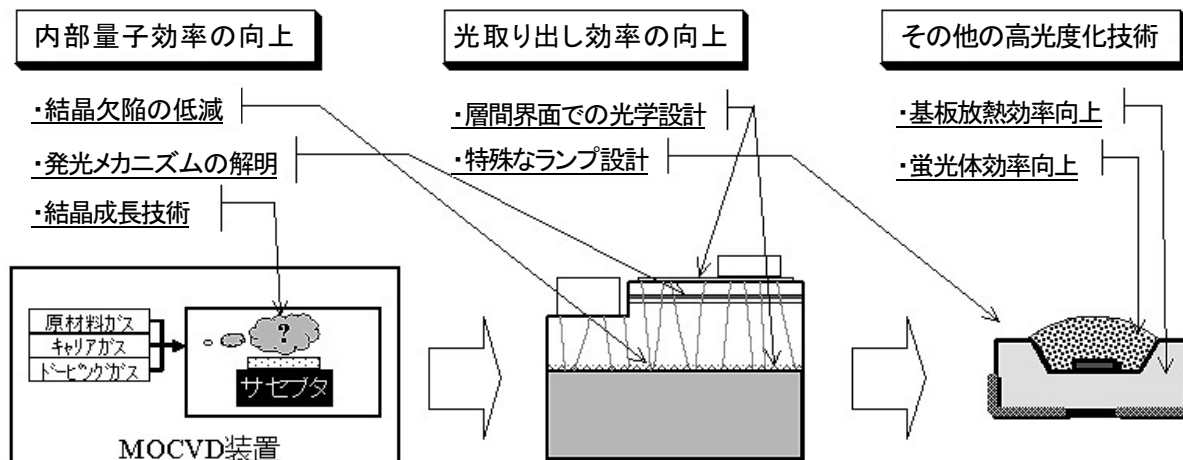


図 1 3 GaN系LEDの開発動向

り広げられようとしている。装置設計に対し各々独自のコンセプトを打ち出しているものの、理想の反応系が見えていない状況にあるため、素子製造メーカーの多くは複数種の装置導入を図った上で詳細な成長検討を実施後、要求を満たす装置メーカーのリピーターになっているようである。

一方、反応解析に主眼を置いた研究¹⁴⁾¹⁵⁾も一部ではあるが着手されている。発光素子という半導体分野だけあって残念ながら精力的に取り組まれている状況にはなく、シミュレーション的解析に基づく、あるいは装置メーカーを主導とした研究がなされている。

青色LED実現当初とは異なり種々の研究開発成果がオープンになっている環境の中、特性面での差別化を実現していくためには、上述したように地道な結晶成長反応機構の解明とそれに続く理想の反応設計の構築、それを具現化する装置設計により、GaN系発光素子としての結晶品質向上を図っていく必要があると考えられる。

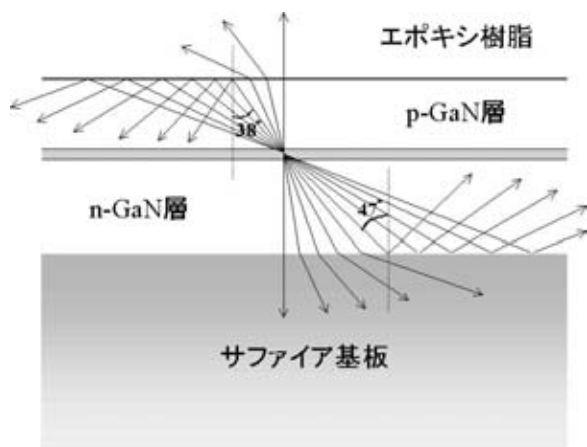


図14 層間界面での全反射

3-2-2. 光取り出し効率の向上

GaN系結晶は屈折率が高いために、LED素子結晶内部で発光した光のうち、外部に取り出されることなく結晶内部で迷走し、ついには吸収消失してしまう成分がかなり存在する。図14に示すように、例えばn-GaN層/サファイア基板界面での臨界角（臨界角以上の入射角で界面に入射した光は反射してしまう）は47°、p-GaN層/モールド材料であるエポキシ樹脂界面での臨界角は38°であり、何の工夫もしない一般的なLED素子の光取りし

効率は30~40%と言われている。つまり発光層で発光した光を全て取り出すことができれば、LEDの明るさは2倍以上になる。LED素子構造が固定化、定着してきたこともあり、ここ1~2年、この観点での開発検討が活発化している。対象部位として最も効果が期待できるのは、n-GaN層/サファイア基板界面、およびp-GaN層表面である。

n-GaN層/サファイア基板界面の代表的な手法は、界面加工により光学的な凹凸を作製¹⁶⁾するものである。この手法では上述したように結晶成長初期過程で横方向成長を促進させる必要があり、結晶欠陥の低減という効果も期待できる。また短波長化の項で述べたような、サファイア基板上に通常に成長した後にサファイア基板を除去してしまうプロセスも開発されている。独OSRAM Opto Semiconductors社では、通常の結晶成長後に反射性のpコンタクト電極を形成し、このpコンタクト電極上にバルクの担体を接合、その後にレーザーリフトオフ法によりサファイア基板を除去し、露出したn-GaN層にnコンタクト電極を形成する¹⁷⁾、という斬新な工法を開発している。一方、これまで触れなかったが米Cree社では、基板としてGaNと格子定数のフィッティングがよいSiC基板を用いてGaN系LED素子を製造しており、この場合、基板/n-GaN層間界面ではなく基板/モールドエポキシ樹脂間界面での臨界角が34°と非常に小さくなるため、基板の外形形状加工により取り出し効率の大幅な向上を実現している。

p-GaN層表面については、層自身の形状加工処理により電極/p-GaN間のコンタクト抵抗の悪化を招くため、大幅な利得を実現した素子は未だ製品化されていない。最も実現性が高い手法は、透光性の薄膜p電極の保護膜材料として、適切な特性を有する光学材料を採用することが考えられる。また最近では、p-GaN層表面にフォトニック結晶を応用することによって光取り出し効率を50%アップさせた報告¹⁸⁾もなされている。

一方、ランプ設計面での開発も一部で進められており、光学設計技術に基づく独自のランプ設計により大幅な利得を実現¹⁹⁾している例もある。ただしランプ設計で十分な効果を引き出すにはLEDランプの大型化が必至となるため、市場・用途が限定されてしまいがちである。しかしながら、現在、照明用光源向けとして大型の大電流ランプ開発が盛んであるし、また蛍光体分散レジンを使用

づく構造設計がなされているとは言えず、ランプ設計面からの一層の精力的な開発検討が望まれる。

3-2-3. その他の高光度化技術

開発トレンドの項で挙げた大電流化も高光度化技術に含まれるが、素子サイズを大型化し大電流仕様とすることによって高光度を実現するというのは効率の向上にはならない。しかし素子に対する熱負荷を低減することにより発光効率を高める、あるいはより高電流で使用できるようにする、というのは高光度化技術の範疇に入ると考えられる。大型素子ばかりではなく通常サイズの素子についても、実装基板に熱伝導性の良好な材料²⁰⁾を採用することにより、高光度化を図る試みもなされている。特に表面実装型のランプでは通常、実装基板に樹脂製材料が用いられており、ランプ市場全体の砲弾ランプからSMDランプを志向するトレンドと相まって、ランプ設計での放熱効率向上による高光度化開発検討は、この先加速していく可能性がある。

白色ランプの流動に伴い、蛍光体開発が脚光を浴びるようになってきた。これまで、どちらかという斜陽的な分野であった蛍光体産業であるが、現在では世界中で蛍光体に特化したconferenceが開催され、大勢のLED業界関係者が参集するまでになっている。白色ランプにとって蛍光体の効率アップはダイレクトにランプの高光度化につながるため、LED素子の効率アップと同等に重要視されている。量子ドット蛍光体²¹⁾という、最近流行りのナノテクノロジーを用いた研究開発もなされている。

その他の高光度化技術として特にカテゴリー分類するものは見当たらないが、当然のことながらLED製造メーカーでは、日々の地道な細部にわたる開発検討が繰り返されている。

3-3. 市場展望

実用化以来、順調に推移してきたGaN系LED市場は、現在ではLED市場全体を席卷するにまで至っている。ここ数年の市場の牽引役は携帯電話であり、2001年については携帯電話市場の落ち込みにより伸びが鈍化したものの翌年以降持ち直し、今後も堅調に推移していくものと予測されている。

図15に米Strategies Limited社による2007年までの市場規模予測を示す。InGaN系赤色LEDを含めた高輝度LED市場全体での予測となってい

るが、内訳としてはGaN系LEDが7割程度(2002年までの実績ベース)を占めているものである。近年のGaN系LEDの価格破壊には目を見張るところがあり、赤色LED並に近づくのもそう遠くはないはずであり、数量ベースでの伸び率は相当たるものと考えられる。実際、身の回りを見渡しても電化製品のインジケータ、街中で見かけるディスプレイ・サインボード等、GaN系LEDの採用が急速に広がっている。また我々の自動車産業を見ても、新型車では車内のあちらこちらにLEDが採用されており、環境にやさしいGaN系LEDを採用するこうした動きはさらに活発化していくものと考えられる。

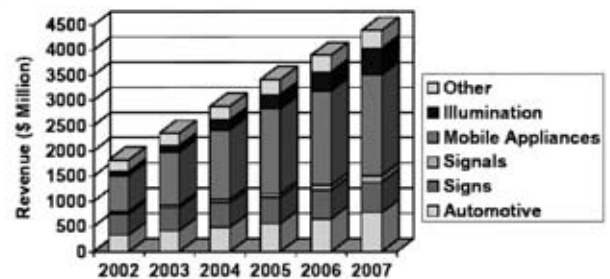


図15 高輝度LED Market Forecast
(出典: Strategies In Light 2003)

携帯電話について言えば、カラー液晶画面のバックライトとして白色LEDが用いられており、インジケータやボタン部イルミネーションとしても数多く適用されている。国内では既にほぼ全ての機種でこのように多用されているものの、海外に目を向けるとまだまだ大きな市場が待ち構えている。ただ、カラー液晶画面については、現在、同じ自発光素子である有機ELの開発が盛んで、既に具体的な採用検討が始まっており、その動向が気になるところである。

一方、現時点では見出されていない新たな市場が開拓される可能性もある。特に短波長発光のLEDは、これまでの水銀灯にはない小型、軽量、Hgレス、特定波長のみを発光できる、といった数々の利点を有しており、医療分野での応用、各種センシング技術への応用、蛍光物質・光触媒の励起光源等々、UV光源としての潜在市場は計り知れない。また他の機能デバイスとの複合デバイスの創造により機能の集積化、高付加価値化が図られれば、全く新規の未開拓市場が切り開かれてい

く可能性もある。

期待される照明市場であるが、少なくともここ数年の間はそれほど大きな市場は見込まれていない。照明市場に確実に参入していくためには、効率面 (lm/W) もさることながら、当然、コスト (lm/円) 的な面でもある程度の折り合いがつかなければならないし、さらに、5年先以降についても、照明市場で開花していくためには様々な課題が山積している。ただ、こうしたハードルを乗り越えて照明市場への展開が本格化すれば、その市場規模は莫大なものとなり、将来的にはGaN系LED全体で数兆円規模を優に超えるマーケットにまで成長すると見込まれている。

3-4. 次世代照明用光源に向けて

次世代照明用光源として何かと持てはやされている白色LEDであるが、ごく最近になってようやく関連conference, seminarや雑誌等でシビアな意見が飛び交うようになってきた。ここではそうした実際のところ、現実をまとめてみたいと思う。

一般的な照明用光源の発光効率と寿命を表2に示す。白色LEDの発光効率は、研究室レベルでは50lm/Wを超えるところまで来ているが、量産性を加味した実用レベルとしては20~30lm/W程度であり、まだまだ一般照明用光源の代表格である蛍光灯とは比較対象にならないレベルではある。しかしながら確かに白熱電球やハロゲンランプの効率を上回っており、寿命としてもLEDの方が勝っているため、これまでのGaN系LEDの光度アップの歴史を考慮すると、一般照明光源への適用を期待する声上がるのも頷ける。では仮に発光効率が今の3倍になれば蛍光灯に取って代わっていくことができるのであろうか。

[寿命]

LEDの寿命は半永久的、という言葉をよく耳にするが、これはLED素子の寿命のことを表現しているものであり、モールド樹脂を始めとする使用部材の劣化を考慮するとLEDランプとしてはせいぜい数万時間レベル、それも一般的な単色LEDの場合である。照明用光源として期待されている短波長LED素子を用いた白色LEDでは、発光する光のエネルギーが高いために周囲の部材の劣化が激しく、数万時間の寿命を確保するには特別なランプ設計が必須となる。また、実は寿命の定義も照明業界とLED業界では異なっており、照明分野

では初期光度の70%に達する時間で定義するのに対して、LED業界では50%の時間を寿命時間とするのが通例であり、この大きな差が受け入れられるかといった問題もある。さらに、学会・論文等で発表される寿命時間は、チャンピオンではないにしても選び抜かれたデータであり、具体的な数字を明言するのは難しいが、Mass Productionというフェーズで蛍光灯並の10,000時間という寿命を達成することは非常にハードルが高いことには違いない。

表2 一般照明光源の特性

光源の種類	効率[lm/W]	寿命[hr]
白熱電球 	15	1,000
ハロゲン電球 	20	2,000
蛍光灯 	50~80	10,000
HIDランプ 	100	10,000
白色LED 	20~30	?

[色度バラツキ]

一般照明光源の色度バラツキは色温度にして±50K程度と、人の目で見ても違いが分からない程度しかなく、図16に色度図中に色温度を示すように、この±50Kという数字は白色LEDにとっては驚異的な数字である。この色バラツキの問題にしろ上述した寿命の問題にしろ、これまでのLED業界の常識を遙かに超えるレベルでの、品質の安定化・均一化を達成していく必要がある。

[コスト]

GaN系LEDの価格が将来下がると言えども、やはり蛍光灯と比べてしまうと大きなギャップがある。街の量販店に行けば蛍光灯は数100円程度で購入できるが、その明るさとは言う“1klm”を上回るのである。灯体・灯器の値段まで含めれば10,000円を超えることもあろうが、蛍光灯を交換する度に灯体・灯器まで交換する人は居ないはずである。仮に1W級の大電流白色LEDが効率

100lm/Wまで到達したとしても、1klmの光量を得るには10個必要となり、蛍光灯と同等のコストパフォーマンスとするためには、数10円/個という低価格となる。一般論としてのLEDの特徴である長寿命を加味して、メンテナンス費用まで含めた試算もなされているが、先に寿命のところでも述べたように、少なくとも蛍光灯を対象とした場合にはこの効果は期待できない。

明メーカーと半導体メーカーとのJVによる半導体照明メーカーの設立がなされており、このように関連メーカー間で密接なアライアンスを組んでいくことも重要と考えられる。また一方、近年クローズアップされている環境問題、あるいは補助金制度等の何らかの国の支援、といった外部環境の後押しを伴えば、急速に照明光源のLED化が加速する可能性もある。

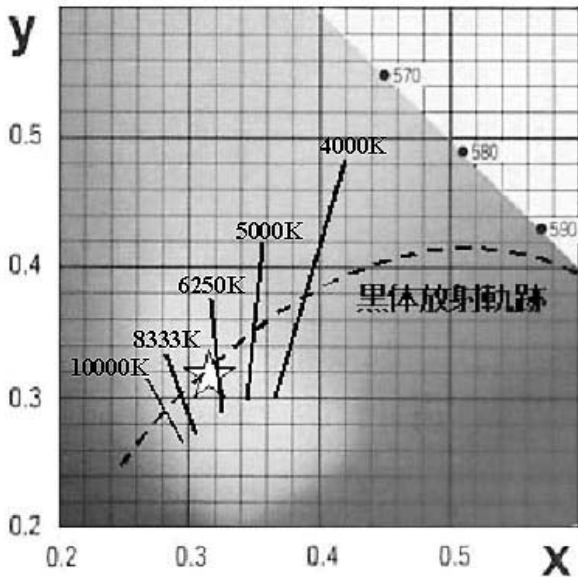


図16 色度図中に見る色温度

以上のように、一般照明分野に広く投入できるようになるまでには、明るさ以外にも超えなければならない高いハードルがいくつも存在している。確かに白熱電球やハロゲンランプ、あるいは特殊照明の市場ではLED化が徐々に進行していく可能性もあるが、着実に浸透させていくためにはLED照明全体をシステム設計していく必要がある。電気・光学的諸特性は無論であるが、形状、取り付け方に至るまで既存品とは全く異なる設計となることが想定され、また逆に言えばLEDだから具現化できる、LEDにしかできないデザイン、といったユーザー側にとってのLED照明のうれしさを前面に押し出すことができれば、種々のハードルの高さが低くなるはずである。米では既に数年前から Lumileds Lighting社 (Philips Lighting社と Agilent Technologies社のJV)、GELcore社 (GE Lighting社と EMCORE社のJV) といった大手照

4. おわりに

今後もより一層の発展が見込まれているGa_N系LED市場であるが、この他にもレーザー、電子デバイス等、Ga_N系化合物半導体に期待されているデバイスは数多く存在する。これら他のデバイスについてもLED同様に広く実用化されていくためには、あるいは現有する他のデバイスを凌駕していくためには、LED内部量子効率の向上のところで述べた結晶欠陥の低減化技術、特性発現の機構解明・理論構築をしていく技術、そしてより一層の育成・発展が望まれる結晶成長技術、これら3点は共通のキーテクノロジーとなるものと考えられる。また当面の目標である照明光源に向けては、上記3つの技術以外にも蛍光体関連技術やランプ設計に関わる各種技術分野でのブレークスルーが必須となってくる。

LEDを始めとするGa_N系化合物を応用した半導体デバイス技術・市場は、このように技術的にも、また製品開発というフェーズにおいても、画一的な単独遂行では成し得難い一大巨大分野となりつつある。躍進するこの波に乗り遅れず技術・市場を牽引していくためには、関連企業とのアライアンスも視野に入れながら多角的な技術取り組みを図り、これらを有機的に連携させながら開発推進していくことが肝要と考えられる。

参考文献

- 1) H.Amano, N.Sawaki I.Akasaki, and Y.Toyoda: Appl. Phys. Lett. 48(1986)353
- 2) T.Matsuoka, M.Nakao, H.Okamoto, H.Harima and E.Kurimoto: Jpn. J. Appl. Phys. 42(2003)2288
- 3) M.Koike, T.Uemura, M.Asai, K.Sawazaki, N.Kaneyama, T.Osio, A.Hirano, H.Kato, S.Yamasaki, Y.Tezen, S.Nagai, S.Iwayama, and A.Kojima: Proc. SPIE 3938(2000)24
- 4) S.Nakamura and G.Fasol: "The Blue Laser Diode" (Springer)1997
- 5) A.J.Steckl, J.C.Heikenfeld, D.-S. Lee, M.J.Garter, C.Baker, Y.Wang and R.Jones: IEEE Journal of selected topics in quantum electronics 8(2002)749
- 6) T.Uemura, N.Shibata, H.Yamaguchi and T.Yasukawa: Proc.SPIE 4996(2003)95
- 7) A.Hanlon, P.M.Pattison, J.F.Kaeding, R.Sharma, P.Fini and S.Nakamura: Jpn. J. Appl. Phys. 42(2003)L628
- 8) D.Morita, M.Sana, M.Yamamoto, T.Murakami, S.Nagahama and T.Mukai: Jpn. J. Appl. Phys. 41(2002)L1434
- 9) A.Usui, H.Sunakawa, A.Sakai and A.Yamaguchi, Jpn. J. Appl. Phys.41(2002)L1434
- 10) O.-H.Nam, M.D.Bremser, T.S.Zheleva and R.F.Davis: Appl. Phys. Lett. 71(1997)2638
- 11) K.Motoki, T.Okahisa, S.Nakahata, N.Matsumoto, H.Kimura, H.Kasai, K.Takemota, K.Uematsu, M.Ueno, Y.Kumagai, A.Koukitu and H.Seki: J. Crystal Growth 237-239(2002)912
- 12) V.A.Sukhoveyev, V.A.Ivantsov, I.P.Nikitina, A.I.Babanin, A.Y.Polyakov, A.V.Govorkov, N.B.Smirnov, M.G.Milvidskii and V.Dmitriev: J. Nitride Semicond. Res.5S1(2000)W6.6.
- 13) 田中,柴田,三宅,平松,江川,神保他: 電子情報通信学会技報 SDM2002-14(2002-05)
- 14) J.Sun, J.M.Redwing and T.F.Kuech: Phys. Stat. Sol. (a)176(1999)693
- 15) O.Makino, K.Nakamura, A.Tachibana, H.Tokunaga, N.Akutsu and K.Matsumoto: Appl. Surface Science 159-160(2000)374
- 16) K.Tadatomo, H.Okagawa, Y.Ohuchi, T.Tsunekawa, Y.Imada, M.Kata and T.Taguchi: Jpn. J. Appl. Phys. 40(2001)L583
- 17) V.Harle, B.Hahn, A.Weimar, D.Eisert, S.Bader, A.Plossl and F.Eberhard: Proc.SPIE 4996(2003)133
- 18) K.Orita, S.Tamura, T.Takizawa, T.Ueda, M.Yuri, S.Takigawa and D.Ueda: *International Conference on Solid State Devices and Materials, Tokyo*, F-8-3(2003)
- 19) 玉井,細川,松本,山下: 電子情報通信学会 ソサイエティ大会(2000)C-3-121
- 20) Lamina Ceramics: Microw. J. 45(2002-12)104
- 21) H.Peng, H.Song, J.Wang, S.Lu, X.Kong and J.Zhang: J. Chem. Phys. 118(2003)3277