

短波長可視・紫外発光デバイス開発と 半導体ヘテロエピタキシー

天 野 浩

窒化物を用いた発光ダイオードおよびレーザーダイオードにおいて、事実上の標準となったこれまでの重要な技術を総括し、あわせてこれからの窒化物開発を展望する。

Keywords : nitride light emitting diode, visible short wavelength, ultraviolet

1. ま え が き

図1に示すように、発光ダイオード (Light Emitting Diode: LED) の中で特に可視高輝度 LED はこれまで順調に市場を拡大している。多くの経済的マイナス要因により、右肩上がりの話が少ない昨今、希少価値ともいえるだろう。

今から15年前まではLEDといえば赤色または緑色であり、主に表示用に用いられてきたが、青色LEDができて三原色がそろったことから、応用範囲は急速に広がった。現在、三原色のうちの青色LEDおよび高輝度緑色LED、さらに白色LEDはすべて、III族窒化物半導体 GaN を中心とする“窒化物”により構成されている。さらにデジタルビデオディスク (Digital Video Disk: DVD) の次の世代の光ディスク用光源である、波長 405 nm の紫色レーザー

ダイオード (Laser Diode: LD) も窒化物である。窒化物は、基礎から応用まで、日本のいくつかのグループが最も主要な貢献をした成功例の一つである。

本報告では、窒化物の製造、特にヘテロエピタキシーを中心に、窒化物研究の黎明期から発展の歴史を振り返り、さらに現在の研究課題を紹介し、将来を展望する。

2. 黎 明 期

最初に窒化ガリウム (Gallium Nitride: GaN) が人工的に生成されたのは、1932年 (昭和7年)¹⁾、単結晶成長が可能になったのは、それから37年後、今から30年以上も前の1969年²⁾である。

初めてサファイア上に成長された単結晶 GaN は、HCl と Ga を高温で反応させて生成される GaCl と NH₃ を原

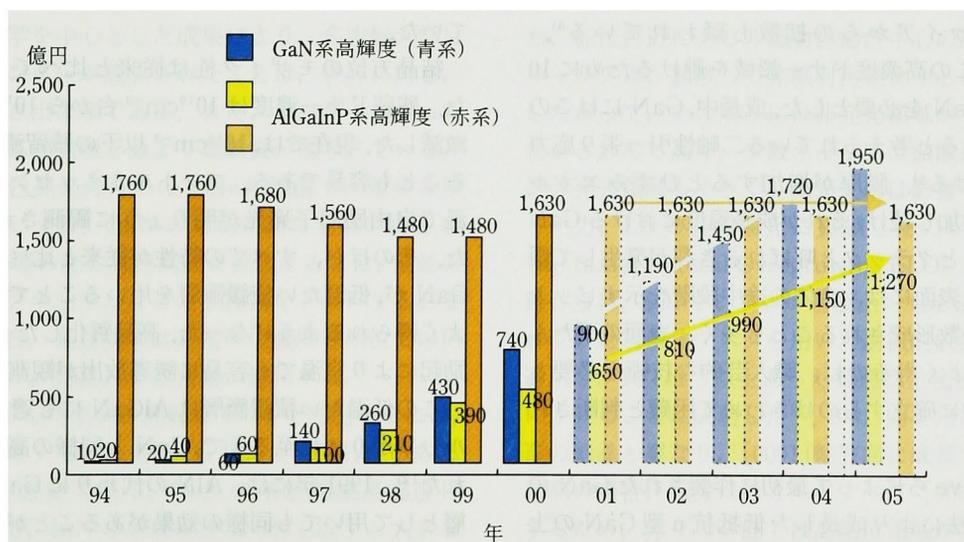


図1 全世界のLEDの市場(2001年以降は予測)。出典は High Brightness LED Market Review and Forecast-2001 (Strategies Unlimited, CA, USA, 2001)。低輝度LEDの市場は飽和傾向であるが、高輝度LED市場は今後も急速に拡大すると予想されている。

料にした気相成長 (Hydride Vapor Phase Epitaxy または Halogen Vapor Phase Epitaxy : HVPE) 法により作製された。以後、1980 年代前半までこの成長法が主に用いられ、10 年以上の間、窒化物の発光素子としての潜在能力を確認する基礎的な研究の成果がいくつか報告された。この時期の特筆すべき事項として、直接遷移型バンド構造の確認²⁾、低温における光励起レーザー発振³⁾、min 型青緑色 LED の実現⁴⁾ などがある。

成長温度での窒素の平衡蒸気圧がきわめて高く、当時から GaN のバルク結晶は作製が困難であったため、ほかの結晶を基板として用いざるを得なかった。その基板として、16%程度もの格子不整合があるにもかかわらずサファイアが主に用いられた。その理由は、サファイアが 1000°C 以上という高い成長温度、HCl という反応性の強いガスに対しても安定な単結晶であること、また、結晶構造が菱面体構造で比較的ウルツ鉱構造に近いことによる。

大きな格子不整合に起因して、GaN の成長初期には結晶成長核が発生する。核は大きな格子不整合を緩和するため、方位がランダムに少しずつ揺らぐ。いったん核が形成されると、表面付近で濃度こう配が生じ、核の個所は原料の吸い込み口となってどんどん大きくなって島状成長し、一方、その周りには新たな核が発生しにくくなる。したがって、島同士の合体は、かなり島が発達して成長が進んだ状態で起きるので、合体界面には結晶欠陥が発生する。この大きな結晶欠陥の発生は膜厚にして数 μm にまで及ぶ。この領域では、残留ドナー濃度が 10^{19}cm^{-3} 以上ときわめて高濃度に存在する。

残留ドナーの起源は、成長中に膜中に取り込まれる酸素などである。酸素の起源は、原料やキャリアガスのほか、基板であるサファイアからの拡散も疑われている⁵⁾。HVPE 法では、この高濃度ドナー領域を避けるために 10 μm 以上の厚膜 GaN を必要とした。成長中、GaN にはこの合体過程で発生すると考えられている二軸性引っ張り応力が常に加わり続ける⁶⁾。膜厚が増加するとひずみエネルギーは比例して増加し続け、それが成長温度における GaN の臨界点を超えるとクラックと呼ばれるき裂が発生して緩和する。また成長表面には、合体の途中段階を示すピットと呼ばれる穴が多数形成されることも多く、表面の平坦な GaN を再現性よく得るのは、職人芸的な技術を必要とし、これを工業的に確立するのはきわめて困難と判断された。

1971 年、Pankove らによって最初に作製された GaN の LED は、HVPE 法により成長した低抵抗 n 型 GaN の上に、さらに Zn を添加して高抵抗化した i 層を形成し、その上に電極を蒸着した金属-絶縁層-n 型半導体層 (metal-insulator-n-type semiconductor : min) 型であった⁴⁾。この min 構造では、i 層に高電界が加わる。さらに GaN 中で Zn がアクセプター型の青色発光準位として働くため、i-GaN : Zn に注入された電子が高電界により加速され、発光準位と衝突することにより青色発光すると考えられていた。

高輝度発光には、青色発光準位が高濃度に存在する必要があるが、限界があり、電子を高注入すると発光が飽和してしまう。動作電圧は i-GaN : Zn 層の厚みで決まり、低電圧動作には薄膜化する必要がある。すると、今度は発光準位に衝突して発光する電子の割合が減少してしまうため、発光強度が落ちる。

成長再現性の問題、および特にデバイス構造が min 型しかできない、すなわち p 型結晶ができないことが GaN の実用化を阻む大きな壁となった。日本の企業により、一部サンプル出荷⁷⁾まで行われたが、GaAs などのほかの化合物半導体と比較すると実用化への道程は遠いと考えられ、ごく一部を除いて同材料をあきらめる研究者がほとんどであった⁸⁾。

3. 開 花 期

現在、窒化物の LED、LD 作製の主流となっている有機金属化合物気相成長 (Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy : MOVPE) 法⁹⁾ は、1971 年、Manasevit らによって始められている。1985 年から 1996 年にかけて、この成長法を用いて、現在の窒化物デバイスの事実上の標準技術がほぼ確立している。

最初の標準技術は低温たい積緩衝層である。1985 年、筆者らは、基板全面を覆い、成長初期のランダムな核発生を制御し、かつ GaN のもつ自然配向性を利用しながら、しかもサファイアの結晶情報は伝達するというのもくろみで、GaN の成長前に低温で AlN を非常に薄く 50 nm 程度たい積した¹⁰⁾。従来の HVPE 法の GaN と異なり、得られた GaN 表面は見た目には完全に鏡面で、原子スケールでも平坦であり、原子ステップのステップフロー成長が実現していた。

結晶方位のモザイク性は従来と比べて 1/5 以下になった。残留ドナー濃度は 10^{19}cm^{-3} 台から 10^{17}cm^{-3} 台にまで激減した。現在では、 10^{15}cm^{-3} 以下の残留濃度の GaN を得ることも容易である。フォトルミネッセンス測定では、室温で自由励起子発光が明りょうに観測されるようになった。そのほか、すべての特性が従来と比べて格段に優れた GaN が、低温たい積緩衝層を用いることできわめて再現性よく得られるようになった。高品質化した GaN 膜では、光励起により室温でも容易に誘導放出が観測された¹¹⁾。

この低温たい積緩衝層は AlGaIn にも適用され、AlN モル分率が 0.4 に至るまで、GaN と同様の高品質化が確認された¹²⁾。1991 年には、AlN の代わりに GaN を低温たい積層として用いても同様の効果があることが示された¹³⁾。

伝導性制御において、n 型の伝導性制御に関する標準技術がシリコンドーピングである。二次イオン質量分析により、アンドープ結晶の自由電子濃度が GaN 膜中のシリコン濃度と強く相関することを突き止め、ガリウム原料について、シリコンなど不純物の少ない高純度のトリメチルガリウムが使用された。また酸素がドナーとして働くことがわかっていたので、窒素原料に関しては水分濃度のできる

限り少ないアンモニアを用いることとし、また成長炉はできるだけ空気中の酸素を取り込まないロードロックやグローブボックス構造とした。

これにより、故意に不純物をドーブしない場合には、 10^{15}cm^{-3} を切る程度にまで残留ドナー濃度は減少した。このように、高純度化した状態でシリコンをドーブすることにより、 10^{19}cm^{-3} に至るまで、シリコン原料の供給量に比例して幅広く自由電子濃度、あるいは抵抗率を制御することが可能になった¹⁴⁾。

p型に関する標準技術は、マグネシウムドーピングおよび脱水素化処理である。1989年、筆者らは、アクセプターとして亜鉛の代わりに、活性化エネルギーがより低いと考えられるマグネシウムを選びドーピングを行った¹⁵⁾。しかし、成長したままではやはり高抵抗であった。

当時、同グループは、GaN:Znのカソードルミネッセンスを評価中、青色発光強度が時間とともに増加する現象を発見していた¹⁶⁾。この処理法をGaN:Mgに適用し、同様にマグネシウムが関与する青色発光強度が増加することを確認した。そればかりでなく、電子線を照射した部分が低抵抗化していること、さらにホール効果を実施し、 10^{16}cm^{-3} 台のp型GaNが得られたことが確認された。このp型GaNとn型GaNのホモ接合により、初めてpn接合型青色・紫外LEDが実現した¹⁷⁾。その2年後1991年、中村らは、成長したままではGaN:Mgが高抵抗である理由が、ほかの半導体でも一部に報告されていたように、水素によるマグネシウムアクセプターのパッシベーションであることを確認し、単純で大量処理が可能な熱処理によってp型GaNが実現できることを実証した¹⁸⁾。

これら結晶成長技術の確立および伝導性制御技術の確立など、日本の大学を中心とした成果により、名古屋大学に赤崎記念研究センターが設立されたことは、世界に誇る、まさに記念すべき出来事である。また、リーダーであった赤崎勇氏には、応用物理学会より業績賞が贈られている。

青色発光や緑色発光のためのGaInN混晶も、重要な標準技術の一つといえる。GaNの禁制帯幅は室温で約3.43 eVであり、紫外域のため青色発光を実現するには、前述のように亜鉛やマグネシウムなどの不純物をドーブする必要がある。その場合、発光効率は発光準位濃度と準位での再結合速度で決まり、高注入では発光が飽和する。

赤色LEDなどと同水準の高輝度LEDを実現するには、禁制帯幅を制御する、すなわちInNとの混晶であるGaInN発光層が必要である。GaNの単結晶成長温度は 1000°C 以上、一方、InNの成長温度は 600°C 以下と大きな差がある。しかも、GaNの格子定数とInNの格子定数は、平均で約11%程度異なる。この大きな格子不整合による混合不安定性により、高品質で均質な混晶を作製するのはきわめて困難と当時は考えられていた。

このようないわば心理的な束縛にもかかわらず、長友ら¹⁹⁾や吉本ら²⁰⁾は果敢に挑戦し、GaInN混晶を得るのに成功している。さらに吉本らは、成長温度、およびIII族原

料に対するアンモニア供給量の比が重要であることを実証し、比較的品质の高いGaInNから強いフォトルミネッセンス発光を観測した²⁰⁾。

中村らは、低温緩衝層を用いて作製した高品質GaN上にGaInNを成長すると高効率発光が可能であることを見いだした²¹⁾。GaInN系多重量子井戸も重要な標準技術である。筆者らは、GaInN井戸層とGaN障壁層の多重量子井戸の発光効率が井戸層であるGaInN層の膜厚に強く依存し、6 nm以下と超薄膜化することにより、高効率発光が可能であることを突き止めた²²⁾。この主な原因は、窒化物系半導体の圧電性が強くかかっていることが、後に明らかにされている²³⁾。

GaAs系の化合物半導体と比べると、 10^9cm^{-2} 以上のきわめて高密度の転位密度が存在するにもかかわらず²⁴⁾、高効率LEDが実現しており、GaInN系の大きな特徴と考えられている。基板であるサファイアが透明であることは、光の取り出し効率の面で窒化物の大きなメリットの一つであるが、GaInN系可視短波長LEDにおいて転位密度が高くてもよく光るのは、それが主な理由ではない。

窒化物系には、主にらせん転位、刃状転位および混合転位がある。バーガーズベクトルが大きく、その周りの格子ひずみが大きいらせん転位および混合転位は、強い非輻射領域となる²⁵⁾。二つと比べて刃状転位の周りのひずみは小さいが、やはり非輻射領域となる²⁶⁾。これはGaNおよびAlGaInNでは顕著であるが、紫色から緑色領域のGaInNでは、転位に対して発光効率の変化が鈍感になる。少数キャリア拡散長はサブミクロン、あるいはそれ以下であり、ほかの化合物半導体と比較してけた違いに短いことが、GaInN系窒化物が転位に強い理由の一つである。すなわち、転位付近にある非輻射再結合中心の周りの励起されたキャリアは、拡散して非輻射再結合中心に吸い込まれる。したがって、その周りには非発光領域ができる。再結合割合がきわめて高く、少数キャリアの拡散長が短ければ、その非発光領域も小さく、発光効率は影響を受けにくい。

一方、LDの長寿命化に貢献したのが横方向成長技術(Epitaxial Lateral Overgrowth: ELO)である。1996年、碓井らは、SOIやシリコン基板上のGaAs成長²⁷⁾で用いられていた誘電体マスクを用いた選択的成長技術を窒化物に適用し、 10^9cm^{-2} 以上あった貫通転位密度を 10^7cm^{-2} 以下に下げること成功した²⁸⁾。(001)面を用いたせん亜鉛鋳構造の結晶と異なり、[0001]軸方向に成長するウルツ鋳構造結晶の場合、転位はほとんどすべて[0001]軸方向に伝搬するため、非マスク部では高転位領域が残存してしまう。

碓井ら²⁹⁾、および平松ら³⁰⁾は、成長方向中、成長方向に対して斜めに形成されたファセット部での、転位の自己応力場による横方向への応力印加現象に着目し、成長時に斜めファセットを形成することによって、転位の伝搬方向を横向きに変え、成長層上部への伝搬が抑制されることで、基板全面にわたって低転位化が可能であることを見いだした。

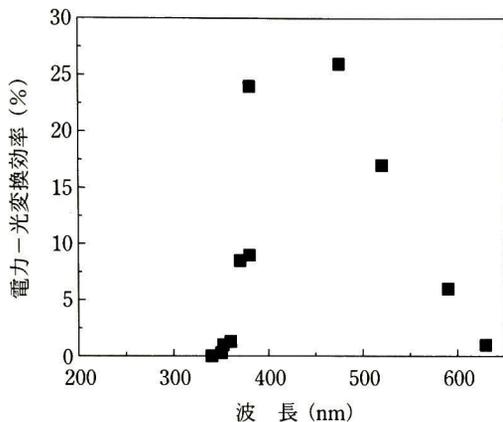


図2 窒化物 LED の標準動作 (20 mA DC) 時の発光ピーク波長と電力-光変換効率の様子^{34~41)}。(2002 年秋の応用物理学会にて、外部量子効率 6%、波長 365 nm の UV-LED に関する報告が日亜化学工業よりなされた)

4. 応用期

現在、日本で実用化している窒化物 LED および LD は、すべて前に述べた標準技術が用いられている。1993 年、中村らは GaInN に亜鉛または亜鉛およびシリコンをドーピングした GaInN:Zn、シリコン層を活性層としてダブルヘテロ構造を作製し、当時としては画期的な、軸上輝度 1 cd を超す青色 LED を実現させた³¹⁾。この LED は、当時としては画期的ではあったが、不純物を介しての発光であるため、スペクトル半値幅が広く、白みがあった青色であった。

中村らは、1995 年、GaInN 単一量子井戸を活性層とし、さらに電子の p 層への漏れを防ぐために p 型 AlGaIn 電子ブロック層を活性層上に設けることにより、半値幅が狭く、かつ高効率の青色 LED を作製した³²⁾。さらに同様の技術により、活性層中の InN モル分率を制御して高輝度純緑色 LED も実現した。また、青色 LED と黄色蛍光材料 YAG を組み合わせた白色 LED も市場に投入された。

1996 年には、26 もの井戸層を有する GaInN/GaInN 多重量子井戸を活性層とし、初めて紫色 LD が実現された³³⁾。現在までにその性能は急速に向上し、現在では窒化物 LED を用いた次世代光ディスクは、市場投入の秒読み段階である。

5. 展開・成熟に向けての課題

以上のように、窒化物は順調に市場を広げているが、そ

表1 ささまざまな白色 LED の原理と特徴。判断基準は、あくまで現状のデバイスの性能に基づくもの。

	電源	効率	演色性	文献
三原色 LED	△	○	◎	42
紫色(紫外)LED+青・緑・赤の蛍光体	◎	△	○	43
青色 LED+黄色蛍光体(YAG: Ce など)	◎	○	△	44

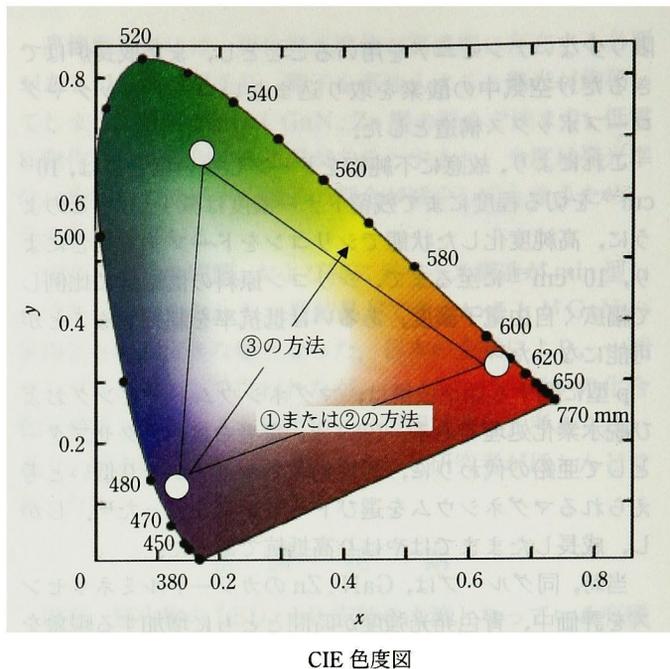


図3 色度図(Commission Internationale de l'Eclairage: CIE 図)と LED による白色発光の原理の説明。①三原色 LED, ②紫色または紫外 LED と三色蛍光体の組み合わせ, ③青色 LED と黄色蛍光体の組み合わせ。①または②の方法は、三原色発光体の色度図位置から中の部分を発色できる。③の方法は、青色と黄色の蛍光体により白色とするので、二つの色度図上の位置に対して、線上の部分のみ発色できる。

の潜在能力を考えると、まだ 100% 活用しているとはいえない。図 2 に、現在までに報告されている窒化物 LED の発光ピーク波長に対する、直流 20 mA という標準動作条件での電力-光変換効率 (Wall-plug efficiency) をまとめている^{34~41)}。青色領域および緑色領域では 20~25% に達しているが、AlGaInP 系赤色 LED と比べるといまだに 1/2~1/3 程度の効率である。窒化物 LED において効率を抑制している理由を明らかにする必要がある。

指示ランプ、ディスプレイ、液晶用バックライトなどでの応用にめどが立った現在、次の最も大きな目標は照明であろう。環境の点からいえば、数年で使い捨てが基本のガラス管を半永久寿命の半導体素子に置き換えるのは、それだけで意味がある。

しかし、省エネルギーの点からはエネルギー利用効率は高い必要があり、半導体照明はまだ十分な効率を達成していない。さらに、高度化が基本の社会において、人や商品ディスプレイにおける色による演出や、人の心理状態に合わせた高度な照明を実現するには、高い演色制御性が理想である。現在、最も普及が進んでいる照明器具である蛍光灯を代替するには、寿命のみならず、効率、演色性などの性能も凌駕する必要がある。

LED で白色を実現する方法を表 1 および図 3 にまとめた。現在までに、白色 LED は主に三つの方法が用いられている。すなわち、①青色 LED、緑色 LED、赤色 LED を組み合わせる方法⁴²⁾、②紫色 LED または紫外 LED を用いて青色、緑色、赤色の蛍光体を励起する方法⁴³⁾、③青色 LED

とその光により励起される黄色の蛍光体の光を組み合わせる方法⁴⁾である。図4に、それぞれの概略を示す。

①の方法は、三者の中で最も Wall-plug efficiency が高く、また各 LED への電流を制御することにより演色制御も可能である。ほかの二つと比べて電源が複雑であり、また最低3チップで1ユニットが構成されるため、面積が基本的には3倍以上になる。

②の方法は、電源は単純であり、また色温度は固定ではあるが蛍光体の量を制御することにより制御可能である。この方法の最も大きな問題は、ストークスシフトと呼ばれる、原理的な効率の限界である。すなわち、大きなエネルギーの光子を用いて小さなエネルギーの光子を生成する場合、1光子の入射に対し、生成される光子は一つであるため、変換効率は光子エネルギーの比を超えることができない。

蛍光体に関しては、蛍光灯で利用されている蛍光体は、波長は 300 nm 以下の深紫外線で励起するほうが光変換効率は高いが、ストークスシフトによる変換効率の低下は避けられない。また、図2に示したように、現状では窒化物でも深紫外の LED の効率は低い。

③は、窒化物で最も初めに用いられた LED の白色発光の方法である⁴⁾。②と同様、通常の LED と同じ電源を用いることができ、構造も単純で、現在最も普及が進んでいる。図3の色度図では、一直線上の色制御のみ可能である。

以上のように、現在ではいずれの方法も一長一短があり、さらなる性能向上が待たれる。

6. む す び

窒化物デバイスの研究を振り返りながら、今後、同材料がさらにステップアップするための現状の課題をまとめた。特に照明への応用は、環境保護の点からも大きな期待がかかるが、その実現にはまだ大きな技術的ブレークスルーが必要である。今後の発展に期待したい。

謝 辞

日ごろより議論していただいている名城大学の赤崎勇教授、および上山智助教授に感謝します。

文 献

- 1) W. C. Johnson, J. B. Parsons and M. C. Crew : J. Phys. Chem. Solids **36**, 2561 (1932).
- 2) H. P. Maruska and J. J. Tietjen : Appl. Phys. Lett. **15**, 327 (1969).
- 3) R. Dingle, K. L. Shaklee, R. F. Leheny and R. B. Zetterstrom : Appl. Phys. Lett. **19**, 5 (1971).
- 4) J. I. Pankove, E. A. Miller, D. Richman and J. E. Berkeyheiser : J. Lumin. **4**, 63 (1971).
- 5) C. Mavroidis, J. J. Harris, M. J. Kappers, N. Sharma, C. J. Humphreys and E. J. Thrush : Appl. Phys. Lett. **79**, 1121 (2001).
- 6) S. Hearne, E. Chason, J. Han, J. A. Floro, J. Figiel, J. Hunter, H. Amano and I. Tsong : Appl. Phys. Lett. **74**, 356 (1999).
- 7) Y. Ohki, Y. Toyoda, H. Kobayashi and I. Akasaki : Inst. Phys.

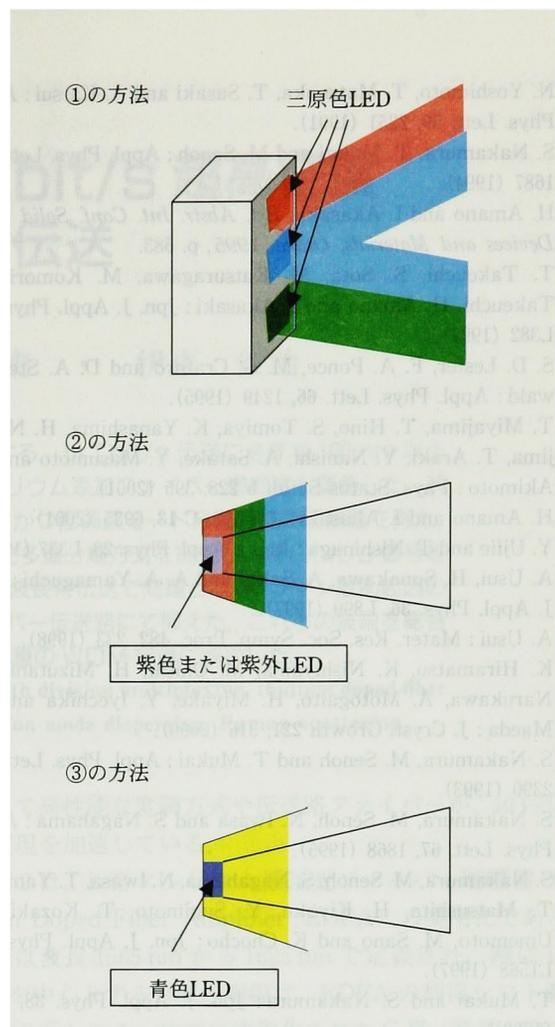


図4 白色LEDの三つの方法の原理図。①三原色のLEDを独立に発光させる白色LED、②紫色LEDまたは紫外LEDと、三色蛍光体の組み合わせによる白色LED、③青色LEDと黄色蛍光体の組み合わせによる白色LED。

- 8) Conf. Ser. **63**, 479 (1981).
- 9) I. Akasaki : Mater. Res. Soc. Symp. Proc. **482**, 3 (1998).
- 10) H. M. Manasevit, F. M. Erdmann and W. I. Simpson : J. Electrochem. Soc. **118**, 1864 (1971).
- 11) H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki and Y. Toyoda : Appl. Phys. Lett. **48**, 353 (1986).
- 12) H. Amano, T. Asahi and I. Akasaki : Jpn. J. Appl. Phys. **29**, L205 (1990).
- 13) Y. Koide, K. Itoh, N. Sawaki and I. Akasaki : Jpn. J. Appl. Phys. **27**, 1156 (1988).
- 14) S. Nakamura, M. Senoh and T. Mukai : Jpn. J. Appl. Phys. **30**, L1708 (1991).
- 15) H. Amano and I. Akasaki : Ext. Abstr. Material Research Society, p. 165 (1991).
- 16) H. Amano, M. Kitoh, K. Hiramatsu and I. Akasaki : J. Electrochem. Soc. **137**, 1639 (1990).
- 17) H. Amano, T. Kozawa, K. Hiramatsu, N. Sawaki, I. Akasaki, Y. Ishii and K. Ikeda : J. Lumin. **40/41**, 121 (1988).
- 18) H. Amano, M. Kito, K. Hiramatsu and I. Akasaki : Jpn. J. Appl. Phys. **28**, L2112 (1989).
- 19) S. Nakamura, N. Iwasa, M. Senoh and T. Mukai : Jpn. J. Appl. Phys. **31**, 1258 (1992).
- 20) T. Nagatomo, T. Kuboyama, H. Minamino and O. Omoto : Jpn. J. Appl. Phys. **28**, L1334 (1989).

- 20) N. Yoshimoto, T. Matsuoka, T. Sasaki and A. Katsui : Appl. Phys. Lett. **59**, 2251 (1991).
- 21) S. Nakamura, T. Mukai and M. Senoh : Appl. Phys. Lett. **64**, 1687 (1994).
- 22) H. Amano and I. Akasaki : *Ext. Abstr. Int. Conf. Solid State Devices and Materials, Osaka, 1995*, p. 683.
- 23) T. Takeuchi, S. Sota, M. Katsuragawa, M. Komori, H. Takeuchi, H. Amano and I. Akasaki : Jpn. J. Appl. Phys. **36**, L382 (1997).
- 24) S. D. Lester, F. A. Ponce, M. G. Crawford and D. A. Steigerwald : Appl. Phys. Lett. **66**, 1249 (1995).
- 25) T. Miyajima, T. Hino, S. Tomiya, K. Yanashima, H. Nakajima, T. Araki, Y. Nanishi, A. Satake, Y. Masumoto and K. Akimoto : Phys. Status Solidi **b 228**, 395 (2001).
- 26) H. Amano and I. Akasaki : J. Phys. **C 13**, 6935 (2001).
- 27) Y. Ujiie and T. Nishinaga : Jpn. J. Appl. Phys. **28**, L337 (1989).
- 28) A. Usui, H. Sunakawa, A. Sakai and A. A. Yamaguchi : Jpn. J. Appl. Phys. **36**, L899 (1997).
- 29) A. Usui : Mater. Res. Soc. Symp. Proc. **482**, 233 (1998).
- 30) K. Hiramatsu, K. Nishiyama, M. Onishi, H. Mizutani, M. Narukawa, A. Motogaito, H. Miyake, Y. Iyechika and T. Maeda : J. Cryst. Growth **221**, 316 (2000).
- 31) S. Nakamura, M. Senoh and T. Mukai : Appl. Phys. Lett. **62**, 2390 (1993).
- 32) S. Nakamura, M. Senoh, N. Iwasa and S. Nagahama : Appl. Phys. Lett. **67**, 1868 (1995).
- 33) S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, H. Kiyoku, Y. Sugimoto, T. Kozaki, H. Umemoto, M. Sano and K. Chocho : Jpn. J. Appl. Phys. **36**, L1568 (1997).
- 34) T. Mukai and S. Nakamura : Jpn. J. Appl. Phys. **38**, 5735 (1999).
- 35) K. Tadatomo, H. Okagawa, Y. Ohuchi, T. Tsunekawa, Y. Imada, M. Kato and T. Taguchi : Jpn. J. Appl. Phys. **40**, L583 (2001).
- 36) J. Han, M. Crawford, R. Shul and S. Hearne : Mater. Res. Soc. Symp. Proc. **537**, 7.7.1 (1999).
- 37) M. Khan, V. Adivarahan, J. P. Zhang, C. Chen, E. Kuokstis, A. Chitnis, M. Shatalov, J. W. Yang and G. Simin : Jpn. J. Appl. Phys. **40**, L1308 (2001).
- 38) T. Nishida and N. Kobayashi : Phys. Status Solidi **a 188**, 113 (2001).
- 39) S. Nagahama, N. Iwasa, M. Senoh, T. Matsushita, Y. Sugimoto, H. Kiyoku, T. Kozaki, M. Sano, H. Matsumura, H. Umemoto, K. Chocho, T. Yanamoto and T. Mukai : Phys. Status Solidi **a 188**, 1 (2001).
- 40) H. Hirayama, A. Kinoshita, A. Hirata and Y. Aoyagi : Phys. Status Solidi **a 188**, 83 (2001).
- 41) M. Iwaya, S. Terao, T. Sano, S. Takanami, T. Ukai, R. Nakamura, S. Kamiyama, H. Amano and I. Akasaki : Phys. Status Solidi **a 188**, 117 (2001).
- 42) M. Hashimoto, I. Akasaki and N. Sawaki : *Proc. 3rd Int. Display Research Conf., Kobe, 1983*.
- 43) D. A. Steigerwald, J. C. Bhat, D. Collins, R. M. Fletcher, M. O. Holcomb, M. J. Ludowise, P. S. Martin and S. L. Rudaz : IEEE J. Quantum Electron. **8**, 310 (2002).
- 44) S. Nakamura and G. Fasol : *The Blue Laser Diode*, p. 252 (Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg, 1997).

(2002年7月22日 受理)



あまの ひろし
天野 浩

1988年名古屋大学大学院工学研究科博士課程の後期課程を単位修得退学。89年工学博士の学位取得。88年名古屋大学工学部助手、92年名城大学理工学部講師、98年同助教授、2002年同教授、現在に至る。94年オプトエレクトロニクス会議特別賞、96年米国IEEE/LEOSエンジニアリングアチーブメント賞、98年応用物理学会賞C(会誌賞)、98年英国Rank賞、01年丸文賞受賞。卒業研究時より、一貫してIII族窒化物半導体の研究に従事。