解説

Review

化合物半導体白色 LED 照明技術による “21 世紀のあかり”

田口常正*

"The 21st Century Light" Based on White LED Lighting Technology of Compound Semiconductor

Tsunemasa Taguchi

Synopsis

This article describes the recent development of high-brightness white light-emitting diodes (LEDs) due to tremendous technological breakthroughs on the epitaxial growth and LED process of III-V compound semiconductors. Since the LEDs can offer advantageous properties such as high brightness, reliability, lower power consumption and long lifetime, it is suggested that the biggest potential application for LEDs will be general lighting. A national program underway in Japan has already proposed that white LEDs system will be considered as the general lighting technology of the 21st century owing to an electric power energy consumption.

The technology of white LEDs which is connected with the $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ blue LED coated with a YAG : Ce phosphor, has improved the white LED efficiencies to approximately 30 lm/W. We have reported a maximum luminous efficacy of about 40 lm/W using 700 LEDs lighting source at electric power of 5 W. It has been expected that extremely high-brightness white LEDs can significantly replace standard incandescent bulbs. We have also demonstrated an energy saving type street lamp linked with a photovoltaic solar cell using a 10 Cd-class white LEDs array lighting source. An alternative method of making a color conversion white LEDs is provided to produce a true white which can be achieved using three colors from red, green, and blue phosphors excited by ultraviolet (UV) LEDs. In the future, as the efficiency of blue and UV LEDs will be improved, the white LED lamps may replace conventional light bulbs or fluorescent lamps in many applications.

1. はじめに

可視光発光ダイオード (Light-emitting diode : LED) は、これまでに情報・通信機器を始めとする電子装置の表示・画像用光源として実用化されているが、ここ数年の間に III-V 族と II-VI 族化合物半導体の結晶成長・デバイス・プロセス技術および、ナノテクノロジー物性評価技術の飛躍的な進歩により、高効率赤色・アンバー色そして青色・紫外 LED の実用化への道が切り開かれた^{1)~3)}。LED の光放射は半導体固有の性質によるもので、熱や放電の光ではない。したがって、LED 照明器具は、通常の白熱電球と違って手で触っても熱くなく安全、更に寿命が長いので廃

棄の発生も少なく、水銀などの有害な物質は含まれていないので、地球環境に優しい光源として期待できる。

1997 年に開催された国連気候変動枠組条約第三回締約国会議 (COP3) において、2010 年までに我が国における温室効果ガス排出量の 1990 年比 6%削減が求められ、我が国の産業、民生、運輸部門における省エネルギーの推進が喫緊の課題となっている^{4),5)}。民生用のエネルギー消費量の約 20%を占める照明の省エネルギー技術開発は極めて重要であり、この要請に答えるために、1998 年 8 月に新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) による国家プロジェクト「高効率電光変換化合物半導体開発」(「21 世紀のあかり」計画) が開始された^{6),7)}。有色および白色

2000 年 8 月 14 日受付

* 山口大学 工学部 工博 (Dr., Eng., Faculty of Engineering, University of Yamaguchi)

LED を用いて、省エネルギー型照明光源を実用化するため、通産省とその関連機関が世界に先駆けて提唱した研究開発プロジェクトである^{7),8)}。LED 照明の将来性に着目して欧米各国でも「21 世紀のあかり」に追随するプロジェクト案が続々と発表されている。最近、アメリカではインターネットビジネスの次にくる新産業として、化合物半導体 LED 照明（例えば Semiconductor Lighting または Solid State Lighting という名称がついている）が有力視されている⁹⁾。

本解説では、半導体照明技術の実用化に最も有望な化合物半導体である III-V 族窒化物系（InGaN など）および、リン系（AlInGaP）LED の現状と課題を中心に、白色 LED 照明分野の技術の将来展望について述べる。

2. ワイドギャップ化合物半導体と発光ダイオードの開発

LED は、半導体の p-n 接合に順方向電流を流すと発光する素子であり、光の閉じ込めと電流狭窄を行うため、通常はダブルヘテロ（DH）接合、および量子井戸（QW）構造を用いる。可視光 LED の開発の歴史はまだ新しく、約 35 年程度である。ゼネラル・エレクトリック（GE）社が GaAsP で 1962 年赤色 LED を商品化したのが始まりであると考えられている^{1),2)}。初期の LED の明るさは、0.1lm/W と通常の電球の 150 分の 1 程度であった。しかしながら、その後、Fig.1 に示すように約 10 年ごとに約 1 桁の割合で発光効率が向上している^{2),10)}。最近、窒化物半導体（InGaN 混晶）を活性（発光）層とした量子井戸構造で、10 カンデラ以上の青色、緑色 LED が開発され^{3),11)}、赤色 LED の光度を凌ぐものが製品化されている。さらに、最近、AlInGaP 赤色およびアンバー LED で外部量子効率 50% を

超えるものが開発された¹²⁾。InGaN 緑色、青色 LED も、やがてはこの値に近づくものと考えられている。

Fig.1 の右側のスケールは、他の照明光源の効率を比較のためプロットしたものである。AlInGaP、InGaN 系の素子では、すでに 30W のハロゲン電球の発光効率を上回り、40W の蛍光灯のそれを超える所まで近づいている^{2),12)}。

1993 年に InGaN 混晶半導体を用いたカンデラ級の青色、緑色 LED が商品化されたが、半導体物性物理学の常識では説明できない重要課題が残ったままになっている^{13) ~ 15)}。普通、LED、LD（半導体レーザー）などの発光素子は欠陥が多くあると発光のキラー（非発光、非輻射）中心となってしまう、発光効率の低下につながり実用化の障害となる¹⁵⁾。GaN をベースにした InGaN/GaN QW LED は Fig.2 に示すように、 $10^8 \sim 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 程度の高密度の非発光中心の密度が含まれている。一方、商品化されている GaAs 系の LED では約 10^3 cm^{-2} である。

Fig. 2. Relationship between luminescence efficiency of LEDs and defect density (or EPD).

InGaN 系半導体を用いた青色・緑色 LED では、このよ

Fig. 1. Progress in the luminous efficacy (lm/W) of LEDs and lighting sources.

うに多くの欠陥密度が含まれているにも関わらず、なぜ高効率で発光するのか明かにされていない。

一般に、窒化物発光デバイスの活性層には InGaN 三元混晶が用いられており、これまでに高効率発光の起源を明らかにするために、In がおよぼす特異な性質に注目した次の 3 つのモデルが提案されている^{14),16)}。

- (1) InGaN 活性層に存在する非常にミクロな In 高濃度領域 (量子ドット、量子ディスク、量子ワイヤー) にキャリアが捕獲される。
- (2) InGaN 活性層における In 組成の不均一によって生じるコヒーレント・ポテンシャル揺らぎにキャリアが局在する。
- (3) 電子と格子系との強い相互作用 (LO フォノンによるフレリッヒ相互作用) によって、電子がポーラロン状態となり格子に捕獲される。

これらのモデルは、いずれもキャリアの空間的な局在または捕獲が高効率発光に寄与するというものである。しかし、その起源については議論がなされているが、今だ結論には至っていない。また、高効率発光に寄与するものではないが、InGaN 発光層における圧縮歪により発生する圧電電界が発光機構に大きく影響することも指摘されている。GaN 中の貫通転位位置においてダークスポット (暗点) が観測されることから、転位は非発光再結合中心として働くものと考えられている。渡辺の報告によると¹⁷⁾、

- (1) 貫通転位は従来の III-V 族化合物半導体同様に非発光再結合中心となる。
- (2) 発光デバイスにおいて注入されたキャリアは上述したいずれかのモデルにより空間的に局在する。
- (3) キャリアの空間的局在により、非発光中心に到達する確率が低くなり、貫通転位の寄与が小さく、高効率発光を呈する。

という物理モデルが全般的な理解となっているものと考えられる。

著者の研究室はこれまで (3) のモデルを提案した。高効率発光機構として励起 (または電流注入) された電子が格子系と強い相互作用を及ぼして外因性自己束縛状態を作る “ポーラロン” トラッピングモデルを世界で初めて提案し、実験・理論的研究を遂行している^{18),19)}。

Fig.3 は InGaN 混晶エピ膜における発光の時間分解スペクトルと 2 つの発光の寿命の温度依存性を示す。深い局在準位にもかかわらず 2 準位間のキャリアの緩和と再結合時間が非常に短いことが特徴的であり局在励起子の発光で

Fig. 3. Time-resolved photoluminescence spectra of an $\text{In}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{N}$ epitaxial layer and temperature dependence of lifetime at each photon energy.

Fig. 4. Time-resolved photoluminescence spectra of a blue single-quantum well (SQW) LED at -6 V.

はないと考えられる。Fig.4 の青色 LED におけるフォトルミネッセンス (PL) 特性の逆バイアス時間分解スペクトルである。LED においても 2 つの発光帯が明瞭に観測される。発光機構としては局在励起子より、電子が関与した再結合遷移を考えている。現在、提唱されているモデルは Fig.5 に示す 2 準位モデルであり、高効率発光の機構が説明できるものと考えられる¹⁷⁾。

Fig. 5. A configurational coordinate model including two recombination channels.

3. 白色 LED 光源技術の進展と課題

LED を用いて白色を得るには表 1 に示すように 3 つの方法がある^{20) ~ 22)}： 赤色・緑色・青色 (RGB) の 3 個の LED を同時に点灯させる方法、青緑色とアンバー色の 2 個の LED を同時点灯、青色や紫外の光を放射する LED を励起用光源として用い、蛍光体を励起することによって白色を得る方法である。しかし、前者 2 つの方式 (これをマルチ・チップ型と呼ぶ) では各 LED の駆動電圧や発光出力の違いがあり、さらに温度特性や素子寿命にも違いがあるなど実用化に向けての課題は多い。さらに価格は現在、1 個約 5000 円程度であり照明光源を商品化する

のは現時点では不可能である。

一方、後者の方式 (ワン・チップ型と呼ぶ) は素子が 1 種類ですみ、駆動回路の設計が大変容易になる。この白色 LED は InGaN 青色 LED チップがステム上に配置されており、LED チップの周囲には YAG:Ce³⁺ 蛍光体が塗布してある。この YAG 蛍光体の層内で青色光の一部は吸収されて蛍光体を励起し、一部は通りぬけて青色光のままで外部へ放射される。このようにして 460nm にピークを持つ青色 LED の発光、および 555nm にピークをもつ蛍光体の黄色の発光が合わさること (補色関係にある) により色度 (0.31, 0.32)、色温度 6500K、平均演色評価数 Ra = 85 の白色光が得られる。表 2 に白色 LED の電気的光学的特性を示す²³⁾。

表 2 白色 LED の電気的光学的特性

発光出力	~10mW
外部量子効率	> 20%
発光効率	> 20lm/W
色度座標値	(0.31, 0.32)
色温度	6500K
平均注色指数	Ra = 85
応答時定数	120ns
寿命	> 20000hr

Fig.6 には 41 個の LED を用いた電球ソケット装着タイプのものを示す。これは従来の白熱電球のソケットにさしこめばそのまま使えるように回路を内臓したものである。AC100V、120Hz 駆動時の発光スペクトルを Fig.7 に示す。直流順方向の発光スペクトル特性と一致する。消費電力は約 1W であった。光源にも冷却装置を付けていない。電球ソケット挿入タイプでは発光面から 30cm の距離で照度は約 1200 lx であった。LED 光の指向性を活かすことで製品のニーズが明確になり、様々な新分野 (舞台用照明、手術用照明、航空機用照明など) への応用が切り開ける^{24),25)}。

Fig.8 は 10 カンデラ (Cd) 級砲弾型 LED700 個を集積化した LED 照明光源であり、指向性の高い投光器と類似したものとなった。照度は発光面で約 23000lx、発光面から

表 1 LED と蛍光材料による演色性の高い白色光の発生方式

方 式	励起源	発光材料および発光特性	発光原理
ワン・チップ型	青色 LED	InGaN / YAG:Ce InGaN / ZnS 系	青色光で YAG 蛍光体 (黄色発光) を励起
	紫外 LED	InGaN / R, G, B ZnS ベース蛍光体	蛍光ランプと同様で紫外光で蛍光体を励起
マルチ・チップ型	青色 LED, 黄緑 LED	InGaN, GaP AlInGaP	補色関係の 2 色をひとつのパッケージに実装
	青 LED, 緑 LED 赤 LED	InGaN, AlInGaP AlGaAs	3 原色の LED をひとつのパッケージに実装

Fig. 6. A 41 LEDs lighting source (a screw type).

Fig. 7. Electroluminescence spectrum at room temperature under the AC operation.

Fig. 8. A 10 Cd white LED lighting source (an array type).

30cm のところで約 10000lx であった²⁴⁾。発光面積と得ら

れた照度, またその消費電力より, 総合発光効率 η は 29.4lm/W となった。InGaN 系白色 LED は低電流においても発光効率が高く, 現在, トップデータとして最高約 39lm/W である。

白色 LED を 700 個配列した LED 光源を 2 基用いて太陽電池パネル (電力 109W) により昼充電を行い, 夜間に点灯を行う省エネルギー型照明用外灯を試作した²⁶⁾。Fig.9 は 2 灯を点灯することにより 3m の直下で約 600lx (消費

Fig. 9. Energy-saving type white LED street lamp linked with a solar battery system.

電力 56W) と非常に明るい白色 LED 照明用光源が作製可能である。無電源で保守が簡単であることから夜間照明としては最適である。LED は熱を出さないといわれているが, p-n 接合に流れる電流密度は数 $10\text{A}/\text{cm}^2$ にも達し, 約 40% は熱となる。エポキシ樹脂で覆われているため, 放熱が悪くリード線を通して発熱する。放熱が悪い場合は, 発熱温度は 100℃ 以上にもなる。この照明器具が温度上昇と共に色度値 (x, y) が色度図上で大きくずれて演色性が悪くなることを示している。100℃ を超えると白色 LED は青味を帯びてくるので, 50℃ 以内に抑えないといけない²⁴⁾。

4. 海外の動向と“21 世紀のあかり”計画の果たす役割

最近, 世界の大手 3 大照明メーカは半導体メーカと協同で新しく半導体照明メーカを設立し, (LumLeds (Philips / Agilent), GELcore (GEL / Emcore), Osram Opto (Osram /

Infineon))LED 照明分野の基礎・応用と実用化研究に参入している。特に、アメリカにおいて“21世紀のあかり”計画と類似の研究計画が LumiLeds と Sandia のグループを中心に“White paper”が政府に提案されている。2020年までに LED を用いて 200lm/W を達成する目標が掲げられ、10年間で約 500 億円の概算要求が行われている^{8),9)}。

一方、ヨーロッパでは EU 連合諸国により AlInGaP, InGaN を中心としたマルチカラー“Rainbow”プロジェクトが、さらに、台湾でも“白色 LED 照明国家プロジェクト”の準備が進められている。

したがって、世界をリードする本プロジェクト⁶⁾では、現在の蛍光灯を上回るエネルギー効率を有する LED 照明用光源をいち早く実用化するために、化合物半導体を用いた新しい LED 照明システムを構築することと、LED 照明の国際規格の取り決めに積極的に推進することである。学術的には、InGaAlN をベースとした窒化物化合物半導体と、その量子ナノ構造の物性評価を精密に行い指針を適格に示すことである。高効率青色・紫外 LED と、白色光を効率よく放射する蛍光体の組合せにより約 120lm/W のエネルギー効率を有する光源デバイスを実現する。

特に、“21世紀のあかり”計画^{7),17)}では、世界のこの分野の先導的役目を果たすため、以下の4項目の基礎と応用研究のプログラムを推進し、高効率白色 LED 実現に向けて技術革新を行っている。

化合物半導体光材料とその量子ナノ構造における発光機構の解明

化合物半導体結晶基板の開発

化合物半導体結晶成長プロセスの開発と青色・紫外 LED の高効率化の検討

白色 LED 光源と蛍光体材料の開発および照明システムへの応用

4 項目の研究テーマの中で、特に のバルク GaN 単結晶基板の成長(高压溶液法, 低压気相法, 化学反応法など)およびその成長技術に関しては国内外で注目を浴びている。高い転位密度にもかかわらず発光効率が高い理由については、すでに述べたように、いくつかの発光機構が提案されているが、In の濃度が高いことが高発光効率の要因となっている。実際、発光波長を短波長化するために In 濃度を下げると、発光効率が激減することが知られている。この理由としては、In 濃度が下がるとキャリアの拡散長が長くなり、転位が非発光中心として作用するためと考えられる。以上のことから、高効率・高出力の紫外発光 LED を実現するためには、非発光中心として作用する転位の密度を低減させる必要がある。そのためには、良質のバルク GaN 単結晶を用いたホモエピタキシャル成長が有効である^{17),27)}。実際、井上らは高压溶液成長(HP-SG: High-Pressure Solution Growth)法によりバルク GaN 単結晶を成長させ、転位密度が 10^5cm^{-2} 以下の高品質の単結晶を得ている。ホモエピタキシャル膜を用いて作製した LED では、サファイヤ基板上的ヘテロエピタキシャル膜を用いて作製した LED と比較して、約 6 倍の発光効率を得られている。以上の理由から、高品質のバルク GaN 単結晶の開発は、高効率・高出力の紫外発光 LED の実現に不可欠と考えられる²⁷⁾。

Fig. 10. Approach for achieving the high-brightness phosphor-based white LED.

従って、Fig.10 に示すように青色・紫外 LED の効率を改善する物理機構の解明が重要である。LED の効率 $\eta_{LED} = \eta_v \cdot \eta_{in} \cdot \eta_{ext}$ (一般に、Wall plug efficiency と呼ぶ) は以下の式により表される：電圧効率 $\eta_v = v/eV_{0p}$ ，内部量子効率 $\eta_i = N_{rad}/N_{in}$ ，光取り出し効率 $\eta_{ext} = N_{out}/N_{rad}$ ，ここで N_{rad} ：輻射再結合の光子数， N_{in} ：注入キャリア数， N_{out} ：外部へ放射される光子数。青色 LED の η_{LED} がさらに改善されることにより AlInGaP のフォトン・リサイクリング層との組合せにより 300lm/W が得られる理論予測もなされている²⁸⁾。

5．白色 LED 照明の応用と市場

白色 LED 照明装置が将来実用化されるか否かは、どのような製品規格で価格はどの程度かという問題になる。今後、国際レベルで標準化が行われてゆくものと想定されるが、価格は LED の単価によって決まる。LED 照明光源は蛍光灯と異なり点灯回路がシンプルでインバータ回路と鉄芯型（または電子型）安定器が不要である。また、LED の寿命は蛍光灯の10倍あるので保守の費用も不要である。40W の蛍光灯の発光効率約 60lm/W を 40lm/W の白色 LED で置換えるとすると、数 lm の光束で同じあかるさを得るには約 500 個程度の LED を必要とする。5 年以内に、も

し、1 個の LED 単価が 5 ～ 10 円程度でできることが望ましく、世界の LED メーカーの国際競争力とパテントなどの問題解決に関する新しい世界基準の策定が必要となるかもしれない。

また、省エネルギー効果については、日本中の公共施設、会社、工場などで使用されている白熱電球、蛍光灯の消費電力を、将来 LED 照明器具で置換えるとどの位の節電になるか見積もってみよう。日本では蛍光灯の使用が多いので大型ビルにおける蛍光灯の数が全部で 1 万 5 千セットあるとする。通常、蛍光灯は 2 本で 1 セットなので、蛍光灯ランプの総数は 30000 本である。40W の蛍光灯ランプを使用すると使用電力は、1200kW となる。この 2 割を代替すると、240kW の節電となる。LED 照明器具は蛍光灯器具の半分の消費電力と考えられるので、480kW の節電になる。もし、ビルの数が 5 千から 1 万棟あれば、全体での節電効果は 240 ～ 480 万 kW にもなる。

さらに、白熱電球、ネオン・サイン放電管を置換えると、発電所 1 基分が完全に不要になる。そして年間約 100 万 kl の原油が節約できることになり、CO₂ ガスの排出量を減らすことができ、地球温暖化と地球クリーン化に大いに貢献することになるだろう。

LED の特徴を活かすと現状では表 3 に示すような用途

表 3 照明器具の応用と市場性（山田照明の上田による）¹⁷⁾

LED の特徴	照明器具のコンセプト	市場用途
1 指向性のある光	反射板不要，器具効率が高い	局部照射器具（スポットライト）
2 回路・ランプ組合せ自由	ランプ数，色，ビーム角の組合せ自由	用途別配光器具 最小電力で適正照度
3 発熱量が少ない	器具が薄くできる	ダウンライトの薄型化（天井施工の不用）
4 長寿命	メンテナンスフリー	省メンテナンスによる保守の軽減
5 軽い	動く機器への搭載	自動車，エレベータ，新幹線，飛行機等への搭載
6 低温に強い	低温器具への採用	寒冷地，冷凍庫等への検討

表 4 照明用 LED の応用に対する将来予測（日本電球工業会の河本による）²⁹⁾

期待される LED の照明の用途	将来の予測期待度	適用度向上のための要解決点・関連のコメントなど
1. 一般照明		効率向上，単位電力の増大
2. 道路照明		効率向上，配光改良
3. タスク照明		効率向上，演色性向上
4. アクセント照明		照度が低い．ディスプレイに近い．
5. (劇場の) 階段灯		必要照度が低い．
6. フラッシュライト		ディスプレイに近い．
7. 誘導灯		ディスプレイに近い．
8. 交通信号灯		現在既に普及しつつある．
9. 自動車電装用		低電圧で LED の適合性大．
10. 自動車前照灯		単位電力の増大，配光改良
11. 液晶バックライト		ディスプレイに近い．

：大 ：中 ：小

が開ける¹⁷⁾。また、表4に示すように、現在、日本電球工業会²⁹⁾を中心として照明用LEDの将来予測がまとめられている。そして、2010年頃までに、発光効率 50 lm/W以上で 1m 当りのコストとして約 \$ 0.01 (約 1 円)/lm が期待できるものと予想されている。

6. まとめ

1993年にカンデラ級の InGaN ベース青色 LED が商品化されるまでは、青色・紫外 LED の実現は半導体研究者の大きな夢であった。筆者は、1983年に ZnS をベースとした青色・紫外 LED の研究に着手し、青色 LED の実現と紫外 LED と蛍光体による白色 LED 照明システムの実用化を目標に約 20 年間ワイドギャップ II-VI 族および窒化物 III-V 族化合物半導体結晶成長・物性評価・デバイスシステム開発を行ってきた。InGaN 系化合物半導体のすばらしいデバイス特性に魅了され、化合物半導体技術を用いた“21 世紀のあかり”の実現に向けて、学術研究のフロントを開拓してきた。

冒頭でも述べたように、最近では、欧米をはじめとする先進諸国におけるエネルギー問題解決のために国家レベルで半導体照明の実用化が真剣に議論されるようになってきた。今後、照明用白色 LED 開発に関しては、国際的な研究協力が必要となり、地球規模での取り組みが進められなければならない。特に、InGaN, ZnS に代表されるワイドギャップ化合物半導体の結晶成長と光物性に関しては学術的未知の部分が多く、産業界は高品位化合物半導体の材料開発と基礎物性研究に対して大学・国研の優れた研究室と連携して、研究費の集中投資を行い世界のリーダー・シップをとる必要がある。これから、10 年間で、100lm/W を超える高効率白色 LED が実現されるか否かは、窒化物化合物半導体の高品質量子構造の作製と発光中心の制御および高効率蛍光体開発にかかっていると言っても過言ではない。

翻って、照明は古代のたいまつからロウソク、白熱電球と“あかり”の文化であり、同時に人間の精神的な癒しの文化でもあった。したがって、人間の生理・心理的效果が入り込むため、感性工学的な研究が必要である。さらに、照明・インテリアデザインを含む様々な分野の研究者・技術者の協力も必要である。21 世紀に向けて第 4 の光源として化合物半導体 LED 照明用装置が普及し、エジソンの電球発明以来約 120 年間続いていた管球式照明がこれから変わって行くことは明かである。照明用 LED のさらなる技術革新により、21 世紀の前半には、照明文化の新創出

のみならず、これまでの生活レベルを維持しながら省エネルギー効果、環境保全と安全な高齢化福祉生活に向けた新しい社会システムが構築できるものと期待される。

謝辞

本解説に記述された内容の一部は、MITI/NEDO/JRCM 国家プロジェクト“高効率電光変換化合物半導体開発”(21 世紀のあかり)計画の一環として行われた。アジレントテクノロジー研究所の渡辺智氏、ジャパンエナジーの井上孝行氏には種々御討論いただき感謝致します。また、共同研究を進めている日亜化学工業(株)小川英治社長に感謝致します。本稿をまとめていただいた小橋克哉技官、西村倫宇秘書にお礼申し上げる。

(文 献)

- 1) A. A. Bergh and P. J. Dean: “Light-emitting diodes”(1976), [Clarendon Press]
- 2) M. G. Craford: “国際フォーラム・映像の明日をひらく青色発光”; “Visible LED Technology”: Past, Present and Future Potential (1996) 47
- 3) S. Nakamura and G. Fasol: “The blue laser diode”, [Springer, 1997]
- 4) 読売新聞 1997 年 8 月 29 日, 日本経済新聞 1998 年 8 月 22 日, 朝日新聞 1998 年 9 月 1 日
- 5) 研究開発基本計画策定「高効率電光変換化合物半導体開発(21 世紀のあかり計画)基本計画」, 通産省公報 平成 10 年 4 月 7 日 34
- 6) 高効率電光変換化合物半導体開発「21 世紀のあかり」プロジェクトパンフレット 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO) 1999 年 3 月発行
- 7) 高効率電光変換化合物半導体「提案書」財団法人金属系材料研究開発センター「21 世紀のあかり研究体」ホームページ <http://www.mocn.ne.jp/check1/21c1light/b-21c1light.html>
- 8) 田口常正: 月刊ディスプレイ, 1(2000) 23, 田口常正: 月刊ディスプレイ, 3(2000) 1, 田口常正: 機械の研究, 52(2000) 357
- 9) A. Bergh: Compound Semiconductor, 6(2000), No.2
- 10) 山田範秀: 応用物理学会誌, 68(1999) 139
- 11) 宮崎和人: 照明学会誌, 81(1997) 558
- 12) M. R. Krames et al.: Appl. Phys. Lett., 75(1999), 2365
- 13) 田口常正: “青色・紫外発光デバイス材料の最近の進展

- と将来展望に関する調査報告書”(平成10年4月,金属系材料研究開発センター),5
- 14 J. Watanabe, M. S. Minsky, N. Yamada, T. Takeuchi, R. Schneider, C. Sasaki, M. Iwata, Y. Yamada and T. Taguchi: Proc. Int. Workshop on. Nitrides Semiconductor, to be published, (2000)
 - 15 J. D. Lester, F. A. Ponce, M. G. Craford and D. A. Steigerwald: Appl. Phys. Lett., 66 (1995), 1249
 - 16 H. Kudo, R. Zheng, H. Ishibashi, Y. Yamada and T. Taguchi: Phys., Status Solids, 55 (1999), 238
 - 17 高効率電光変換化合物半導体「開発 21世紀のあかり計画」成果報告書(平成11年度),平成12年3月,財団法人金属系材料研究開発センター
 - 18 H. Kudo, H. Ishibashi, R. Zheng, Y. Yamada, T. Taguchi, S. Nakamura and G. Shinomiya: J. of Luminescence, 87-89 (2000), H. Kudo, H. Ishibashi, R. Zheng, Y. Yamada and T. Taguchi. Appl. Phys. Lett., 76 (2000), 1546
 - 19 R. Zheng, T. Taguchi and M. Matsuura, J. Appl. Phys. 87 (2000), 2526
 - 20 奥野保男:“ダイオード”(1993)[産業図書館]
 - 21 向井孝志,中村修二:応用物理学会誌,68(1999),152
 - 22 田口常正:電気学会研究会資料,光応用・視覚研究会,(電気学会)(1998),13
 - 23 板東完治:電球工業会報, No.429(2000),19
 - 24 田村哲志,瀬戸本龍海,田口常正,電気学会論文誌A, 120(2000),244
 - 25 T. Tamura, T. Setomoto and T. Taguchi: J. of Luminescence, 87-89 (2000), 1180
 - 26 田口常正:日本学術振興会 光電相互変換第125委員会 第108回研究会資料(2000,5,25),1,田口常正,Opto plus E 22(2000),1028
 - 27 井上孝行,関 洋二,小田 修,倉井 聡,山田陽一,田口常正,日本結晶成長学会誌,27(2000),54.
 - 28 X. Guo, J. W. Graff, and E. F. Schubert: LEDM Technical Digest, IEDM-99(1999), 100
 - 29 河本太郎:電球工業会報, No.430(2000),9.