

2002年武田賞 選考理由書

ー情報・電子系応用分野における
テクノアントレプレナーシップに富む工学知の創造と活用ー

授賞業績: 青色発光半導体デバイスの開発 ー半導体で光三原色の完成ー

受賞者: 赤崎 勇 (名城大学)、天野 浩 (名城大学)
中村修二 (カリフォルニア大学サンタバーバラ校)

〈アルファベット順に記載〉

賞金の2分の1を等分して赤崎と天野に、2分の1を中村に贈る。

＜選考理由＞

この業績は光の三原色の中で唯一欠けていた青色の発光半導体デバイスを実現したもので、青色発光ダイオードおよび青色レーザダイオードの開発という優れた成果をもたらした。

発光デバイスは、様々な形で人々の生活の中で利用されてきた。青色発光ダイオードの実用化により、半導体による光の三原色が揃い、屋外でも鮮明な大型フルカラーディスプレイが実現した。また視認性が良く、低消費電力で、長寿命の発光ダイオードを使った交通信号機が使われ始めている。青色発光ダイオードと蛍光体を一体化した、白色発光ダイオードが開発され、携帯電話機のバックライト用光源として普及している。この白色発光ダイオードは、低消費電力で、長寿命の一般照明用光源としても利用されることが期待されている。

青色レーザダイオードの開発により、光ディスクの記録密度が従来に比べ 6 倍以上に向上する。次世代 DVD などが製品化され、高画質のビデオ映像の記録、編集、保存、持ち運びが容易なものとなる。また 3 色のレーザダイオードを組み合わせた投影型ディスプレイ装置などの可能性が生まれた。

青色発光半導体デバイスの実現には、解決すべき多くの課題があった。赤崎と天野のグループ、および中村がそれぞれユニークな方法ですべてを解決した。

赤崎は多くの研究者がセレン化亜鉛を選ぶなか、窒化ガリウムの可能性を確信し、研究を始めた。赤崎と天野は、サファイア基板上にバッファ層として窒化アルミニウムを低温で成長させ、その上に均一で膜質の良い窒化ガリウム薄膜を得た。次いで p 型不純物を添加した窒化ガリウム薄膜に電子線照射を行い、導電性の良い p 型層を得た。この技術を用い、1989 年に pn 接合型青色発光ダイオードの試作に成功した。青色レーザダイオードについては、単色性

の鋭い、強い発光を確認し、1995 年 11 月に発表した。

一方、中村も当時少数派であった窒化ガリウムを選択し、ツーフロー方式という新しい方法による成膜装置を独自に開発し、膜質の良い窒化ガリウム薄膜を得た。そして窒化ガリウム薄膜を、水素を含まない雰囲気で加熱処理することにより、導電性に優れた p 型層を得ることができた。1993 年に、インジウムを加えた窒化ガリウム層を使用したダブルヘテロ構造の高輝度青色発光ダイオードを開発した。青色レーザダイオードについては、数十層から成る窒化インジウムガリウム多重量子井戸構造およびブロッキング層等を採用してレーザ発振に成功し、1996 年 1 月に発表した。以上の成果を基に、青色発光ダイオードは 1993 年、青色レーザダイオードは 1999 年にそれぞれ世界で初めて製品化された。

赤崎と天野、および中村は、困難な課題に挑戦し、独創的なアプローチにより青色発光半導体デバイスの製品化に成功し、人々に富と豊かさ・幸福をもたらしている。工学知とテクノアントレクレナークに富んだこの業績に武田賞を贈る。

＜業績とその創造性＞

1. 情報化社会における発光半導体デバイスの役割

急速に発展している情報化社会において、大量のデジタル情報が家庭やオフィスで日常的に使われるようになり、生活者に様々な価値をもたらしている。デジタル情報の表示および記録のキーデバイスとして発光半導体デバイスが利用されている。発光半導体デバイスとは発光ダイオード(LED)およびレーザダイオード(LD)を総称したものであり、それぞれ目的に応じて利用されている。

赤色、緑色の発光半導体デバイスは1970年代に製品化された。LEDは、多くの電気製品の表示ランプや電光表示板などに用いられている。また赤色LDは光ファイバ通信用デバイスや光記録装置における光ピックアップとして広く利用されている。

青色発光半導体デバイスが開発されれば、三原色が半導体デバイスで揃うことになり、鮮明なフルカラー表示などの応用が広がる。また青色LDは短波長であり、細い光線を得ることができ、高密度記録が可能な大容量光ディスクなどへの応用が期待される。このような応用のための青色発光半導体デバイスの開発が強く望まれていた。

2. 発光半導体デバイス

2.1. 発光ダイオード(LED)

LEDは直接遷移型のバンド構造を持つ化合物半導体材料のpn接合を使った素子であり、注入された電子と正孔が、pn接合界面近傍で再結合して、光を放出するものである。また発光効率を高くするため、バンドギャップの大きいp型およびn型層で発光層を挟み込むダブルヘテロ接合型が広く用いられている。放出される光の波長は、各材料固有のバンドギャップにより決まり、赤外から緑色までは、砒化ガリウム系とリン化ガリウム系の材料が用いられる。1970年代にはこれらの材料を使用したLEDが実用化され、各種表示デバイス用に広く用いられてきた。

2.2. レーザダイオード(LD)

初期のLDは、LEDと同じ化合物半導体材料でpn接合発光層を形成するホモ接合を使って、レーザ発振をさせていた。しかし発振条件を満たすためには、大きな注入電流を必要とするため、低温におけるパルス発振のみが可能であった。レーザ発振を起こさせるには、pn接合に注入する電子と正孔の濃度を高めることにより、伝導帯と価電子帯との間に反転分布を形成する必要がある。この状態で、半導体の端面に対向する反射鏡を設けて共振器を形成することにより、誘導放出による位相の揃ったコヒーレントな光を放出するレーザ発振が起きる。高効率でかつ安定した室温連続レーザ発振を得るためには、LEDと同様のダブルヘテロ接合型が広く用いられている。赤色、赤外LDは光ファイバ通信用デバイスとして、赤色LDはそのほかに

DVDなど光高密度記録の書き込み、読み出し用デバイスとして、1980年代に実用化されている。

2.3. 青色発光半導体デバイス

青色発光半導体デバイス用材料としては、バンドギャップの大きさから、炭化シリコン(SiC)、セレン化亜鉛(ZnSe)、そして窒化ガリウム(GaN)の3種類が考えられた。その中で炭化シリコンは間接遷移型の半導体であり、発光デバイスとしては不適であると考えられた。セレン化亜鉛が青色発光デバイスに適していると考えられ、1970年代から多くの研究者が開発に取り組んだ。LED、LDのいずれも実験室レベルでの試作に成功したが、電極部分の金属が発光部分に拡散する問題点などを解決することができず寿命が短いため、製品化できなかった。

1970年代から窒化ガリウムが、もう一つの材料として研究されていた。しかしながら、格子定数が16%違うサファイア基板を使わざるを得ず、均一な窒化ガリウム薄膜を得ることができなかった。また不均一ながらn型薄膜は得られたが、p型薄膜は実現できなかった。このような状況で窒化ガリウム研究者の多くは、窒化ガリウムを使った発光デバイスの実現は困難であると判断し、研究を断念していった。

3. 赤崎と天野による窒化ガリウム青色発光半導体デバイスの開発

3.1. 窒化ガリウムの選択

赤崎勇は1970年代に窒化ガリウムによる青色発光半導体デバイスの研究を行った。成膜方法としてはそれまで用いられていたハイドライド気相成長法(HVPE法)に加え、個々の分子を正確に付着させることのできる分子線エピタキシャル法(MBE法)を採用して、窒化ガリウム単結晶薄膜を得た。1981年、HVPE法を用い、MIS(Metal-Insulator-Semiconductor)構造で0.12%の発光効率を得たにとどまった¹⁾。均一な薄膜を得ることができず、またp型層もできなかった。このようにマクロに見れば決して良いとはいえない結晶においても、普通では見過ごされるような微小な部分で均一な薄膜が形成されており、強く発光していることに注目し、他の研究者が窒化ガリウムの開発研究を断念するなか、窒化ガリウムによる発光デバイスの可能性を確信した。1981年から名古屋大学に移り、窒化ガリウムの開発を継続した。1982年、天野浩が赤崎研究室に加わり、研究に参加することになった。

3.2. 均一な薄膜の形成

赤崎は、従来の窒化ガリウム成膜法としてのHVPE法およびMBE法に問題があることを以前から認識していた。すなわちHVPE法では成膜速度は大きい、薄膜の結晶性が悪いことが問題であった。他方MBE法では成膜速度が低いこと、および、超高真空中で成膜するために、蒸気圧が極めて高い窒素が抜けやすく、化学量論的組成になりにくいことが問題であった。そこで1984年、化学量論的組成の実現が可能で、単一温度領域で成膜速度が適当な有機金属

化合物気相成長法(MOCVD法)を採用することにした。基板としてはMOCVD法での成長温度である1,000℃以上の成膜温度に耐え、窒化ガリウムと結晶対称性の似たサファイアを選択した。しかしながら窒化ガリウムは16%の格子定数の差があり、均一なヘテロエピタキシャル膜を成長させることが困難であることが予想された。

窒化ガリウムに適したMOCVD装置は当時なかったので、赤崎と天野は自ら装置設計と製作を行った。新規に製作したMOCVD装置を用い、基板温度、反応真空度、反応ガス流量、添加不活性ガス流量、成膜時間等々さまざまな条件の組み合わせで実験を繰り返し、成膜条件の最適化を試みた。2年間で約1,500回を越える成膜実験を行ったが、均一な窒化ガリウム薄膜は得られなかった。

赤崎と天野はそれまで行った成膜実験を詳細に検討し、均一な窒化ガリウム薄膜を得る方策として、サファイア基板と窒化ガリウムの間に、低温で中間バッファ層を形成することを着想した。バッファ層の候補材料として窒化ガリウム、窒化アルミニウム、炭化シリコンおよび酸化亜鉛を考えていた。1986年窒化アルミニウムをバッファ層として、その上に均一な窒化ガリウム薄膜を得ることに成功した²⁾。この窒化ガリウム薄膜は、欠陥の少ない良質の薄膜であることがフォトルミネッセンス、X線回折、ホール効果測定、透過電子顕微鏡観察等、すべての評価から確認された。ホール効果測定によれば、室温での移動度は従来の $50\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ から $450\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 程度に増大した³⁾。さらに、シリコンをドーピングすることにより、均一な膜厚で導電性の良いn型薄膜を得ることに成功した⁴⁾。

以上のように、低温バッファ層の採用は、新しい着想と、数限りない回数の実験により実現に成功したものであり、大きなブレイクスルーであった。

3.3. p型層の形成

窒化ガリウム薄膜は通常、化学量論的に窒素が不足した状態で存在し、n型となる。これにアクセプタとなるべき不純物を添加してもp型が得られず、これが窒化ガリウムを発光デバイスに利用するための大きな障害となっていた。赤崎と天野は当初亜鉛をアクセプタ不純物として用い、窒化ガリウム薄膜のp型化を試みたが、成功しなかった。その後アクセプタ不純物として電子親和力がより大きいマグネシウムを用いたが、やはりp型薄膜は得られなかった。1988年、天野は別の実験でアクセプタとなるべき不純物をドーブした窒化ガリウム薄膜のカソードルミネッセンスを測定している時に、電子線の照射を続けてゆくと、カソードルミネッセンスの発光強度が徐々に大きくなるという現象を発見した。この事実から電子線照射によってアクセプタをドーブした窒化ガリウム薄膜の電気的、光学的性質が変化したのではないかと考えるに至った⁵⁾。この認識に基づき、マグネシウムをドーブした窒化ガリウム薄膜に10kVの電子線を照射した。その電気特性を測定した結果、固有抵抗が $35\ \Omega\text{cm}$ と5桁減少しており、ホール効果の測定から、はっきりとp型であることを1989年に確認できた。そのときの正孔移動度は $8\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ であった。同時にpn接合を製作し、電流－電圧特性においてpn接合を示す順方向での電流立ち上がり、発光を観測した⁶⁾。この電子線照射によるp型層形成方法は、これまでいかなる方法に

よっても得られなかった窒化ガリウムのp型化を成功させたもので、画期的な成果であり、先の低温バッファ層と共に青色発光半導体デバイス開発の突破口を開いた。

3.4. 発光ダイオード(LED)の開発

赤崎と天野は科学技術振興事業団の助成を受けた豊田合成株式会社の要請により、青色LEDの製品化を1987年から指導し、上記の技術を基に、1992年、窒化ガリウムで発光効率1%の高輝度青色LEDの試作に成功した。そして豊田合成は、1995年に青色LEDを製品化した。

3.5. レーザダイオード(LD)の開発

赤崎と天野はレーザ発振研究にも挑戦していたが、1990年、低温バッファ層上に形成した均一なn型窒化ガリウム薄膜を用い、波長337nmの窒素レーザを照射することにより、高密度の電子正孔対を形成し、室温において単色性の高い374nmの誘導放出を観測した⁷⁾。その後pn接合多重量子井戸構造のデバイスを製作し、パワー密度を低減させ、レーザ発振に必要とされる電流近くで、半値幅が3nmの強力な発光を観測し、これを1995年11月発行の論文誌 *Japanese Journal of Applied Physics* において報告した⁸⁾。また波長405nmでのレーザ発振の成功は、1996年6月に報告されている⁹⁾。

4. 中村による窒化ガリウム青色発光半導体デバイス開発

4.1. 窒化ガリウム材料の選択

中村修二は、1988年、日亜化学工業株式会社において、社長の下を直接取り付けるという異例な形で、青色発光半導体デバイスの開発を開始した。材料に何をを用いるかが重要な問題であったが、中村は多くの研究者が研究しているセレン化亜鉛の場合は、製品化に成功しても技術発明が分散することになり、独占的な技術の確保が困難であると考えた。窒化ガリウムに付随する技術的な問題は、従来の考えに固執しないことにより必ず解決できるという確信に支えられ、あえて少数派の窒化ガリウムを選択した。

4.2. 均一な薄膜の形成

前述の通り、窒化ガリウム薄膜の製作には、基板としてサファイアを用い、成膜方法としてはMOCVD法を使う方法が知られていた。中村も当初は既存の装置を導入して実験を開始したが、均一な薄膜は得られなかった。この問題について赤崎と天野は低温バッファ層を導入することで解決していたが、中村は従来の成膜方法そのものに問題があると考えた。これまでの成膜方法ではガリウム化合物、窒素ガスおよび関連原料ガスを基板表面に平行に、層流として供給する方法が論理的にあっていると考えられていた。しかし、この方法によって得られる窒化ガリウム薄膜は均一でなく、化学量論的に窒素が少なかった。中村は原料ガスの流し方について従来とは異なる様々な方法を考え、短期間に装置の改造とそれに対応した薄膜のデー

タを取る実験を500回以上行った。

最終的には、層流にこだわらず、ガリウム化合物を含む原料ガスを基板に水平に、そして窒素および水素ガスを基板に垂直な方向から送り込む方法が最適であるとの結論に達した。この方法をツーフロー方式と名づけ、1991年、均一な窒化ガリウム薄膜を得た¹⁰⁾。この方法によって得られた均一な窒化ガリウム薄膜のホール効果から求めた電子の移動度は、従来得られていた $90\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ から $200\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ に向上した。さらに、低温バッファ層の上に、ツーフロー方式による窒化ガリウム薄膜を形成したものでは、 $500\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ の値を示し、発光デバイス用薄膜として満足すべき特性を示した。さらに1992年に、ツーフロー方式によって、発光波長の最適化と発光効率の向上に必要な、高品質窒化インジウムガリウム三元混晶薄膜の成長にも成功した¹¹⁾。

中村は低温バッファ層材料についても検討を行い、窒化アルミニウムではなく窒化ガリウムでも可能であることを見出した¹²⁾。低温バッファ層に窒化ガリウムが利用できることは、その上にデバイス用窒化ガリウムを形成するため、原料ガスの切り替えの必要がないという利点があり、量産技術として重要な成果である。

4.3. p型層の形成

p型層の形成方法について、中村は、前述の電子線照射による方法は量産に適さないと考え、新たな方法を検討した。アクセプタ不純物であるマグネシウムを添加し、熱を使ったアニールの効果によってp型化させる試みは既になされていたが、成功していなかった。中村は改めてその問題を検討し、熱の効果を発揮させるには、その他の条件が重要であると考え、水素を含まない雰囲気中で熱処理することにより、添加したマグネシウムが活性化し、p型となることを見出した。その理由として水素原子がアクセプタ不純物と結合しているというモデルを提案しp型化の機構を解明した¹³⁾。この水素を含まない雰囲気中で熱処理した窒化ガリウム薄膜は固有抵抗が5桁以上小さく、 $2\ \Omega\text{cm}$ となり、1992年、ホール効果測定による正孔の移動度が $10\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ の良好なp型層を得ることに成功した¹⁴⁾。

4.4. 発光ダイオード(LED)の開発

上記の技術により、1991年にはpnホモ接合型で発光効率0.18%、1992年にはダブルヘテロ構造で発光効率0.22%の青色LEDを製作した。そして1993年に上記の窒化インジウムガリウムを発光層にしたダブルヘテロ構造で発光効率2.7%の青色LEDを製作した¹⁵⁾。これらの成果を基に、日亜化学工業は、1993年、青色LEDを世界で初めて製品化した。その後、発光層に窒化インジウムガリウム量子井戸構造を採用し、発光効率9.2%の高輝度青色LEDを開発している¹⁶⁾。

また中村は、詳細に窒化インジウムガリウム発光層の研究をした。通常格子欠陥が、 10^3 個/ cm^2 以下にならないと青色発光ダイオードの寿命は長続きしないと考えられていた。この窒化ガリウム薄膜には約 10^{10} 個/ cm^2 の多くの格子欠陥が存在したにもかかわらず寿命は10万時

間以上である。その理由は次のように考えられている。窒化ガリウムにインジウムを添加すると、インジウム原子の分布が一樣ではなく、極くわずかの組成変動を生じ、その結果として結晶内電子ポテンシャルが一樣でなく局在化する。電圧印加により注入された電子は、この局在化したポテンシャル近傍にとどまることになり、格子欠陥に捕捉されることなく再結合して発光するからである。このようなポテンシャルの局在状態の存在は、これまでいかなる単結晶材料においても知られていないものであり、インジウム、ガリウム、窒素の三元系材料で初めて確認された。この構造を意識的に設計、製作する結晶不均一場の研究が始まっている。

4.5. レーザダイオード(LD)の開発

中村は、開発した窒化ガリウム青色LEDをベースに窒化インジウムガリウム多重量子井戸構造および光閉じ込め層によって、窒化ガリウム青色LDを製作し、高出力パルス発振に成功して、その成果を論文誌*Japanese Journal of Applied Physics*1996年1月号に発表した¹⁷⁾。この論文は世界中の開発者の注目するところとなり、引用件数が、1997年で160件に達した。

このレーザ発振成功のポイントは、発光層に20周期の窒化インジウムガリウムの多重量子井戸構造、およびブロッキング層に窒化アルミニウムガリウムを採用したこと等である。さらに中村はクラッド層にGa_{0.5}N_{0.5}/AlGa_{0.5}N_{0.5}超格子構造を採用して室温連続発振にも成功した¹⁸⁾。

青色LDの場合は、LEDの場合に比べて、注入される電子の数が多いため、長寿命化を実現するには、格子欠陥をさらに減少させる必要があった。1998年、その対策としてELOG (Epitaxial Lateral Over Growth) 法¹⁹⁾を用いて、欠陥を 10^{10} 個/cm²から 10^7 個/cm²に減少させ、室温での290時間の連続発振を行い、予測寿命が1万時間であると推定した。そして1999年、日亜化学工業において、青色LDの製品化が世界で初めてなされた²⁰⁾。

5. 波及効果

青色発光半導体デバイスである青色LEDと青色LDが揃って開発され、これまでの赤色と緑色発光半導体デバイスとあわせて、半導体による光の三原色が揃うこととなり、様々な用途での利用が可能となった。

窒化ガリウム材料はインジウム添加量を変えることによって、紫外領域から、青、緑さらに黄までの発光デバイス用材料としても使われるようになった。特に窒化ガリウムを用いた緑色LEDはこれまでの黄緑色リン化ガリウムLEDよりも、色が純粋な緑で、かつ発光効率が高く、すでに実用化されている。

青色LDの開発により、次世代大容量光ディスク規格の一つである「Blu-ray Disc」が日韓欧9社によって2002年2月に発表された。デジタル放送やブロードバンドの普及により、大量のデジタルコンテンツが家庭、オフィスで利用されるが、12cmのディスクに従来の5.7倍の記録密度である27ギガバイトの記録が可能となり、デジタルハイビジョン映像が2時間、通常テレビ映像では13時間の記録が可能となる。更に上記規格のほかに、ディスクの両面利用あるいはディス

クサイズの変更を含む技術の組み合わせにより、1枚のディスクで50ギガバイトあるいは100ギガバイトの記録が可能となり、複数のディスクを搭載することで1テラバイト以上の情報を記録、保存することが可能となる。また3色のLDを組み合わせた投影型大型ディスプレイ装置などの可能性が生まれた。

青色LEDの開発により、昼間でも鮮明な、大型フルカラーディスプレイが製品化され、市街地の屋外ディスプレイとして使われている。

また、LEDの信号機への普及が始まっているが、これはいくつかの利点を有している。第一は視認性が良いこと、つまり、これまでの電球による信号表示では、西日が当たった場合、反射光で赤と青のどちらが点灯しているか分らなくなることがあったが、西日が当たっても見えやすくなった。第二には電球の寿命は半年から1年であったが、8年と長くなる。第三に消費電力が電球の4分の1になる。米国カリフォルニア州では23万機の歩行者用信号機がLEDに置き換わっている。日本国内では、車両用信号機が100万機、歩行者用信号機が77万機、あわせて177万機が稼動しており、現在約8千基がLEDに変更されている。全国の歩行者信号機をLEDに変更することにより、電力使用量が削減され、年間約11万トンの二酸化炭素の発生を抑制できることになる²¹⁾。

白色LEDは青色LEDと黄色蛍光体を一体化したものと、青、緑、赤の3種のLEDを一体化したものの2種類があるが、いずれも青色LEDの開発により実現したものである²²⁾。この白色LEDは数年後には発光効率が50%となり、白熱電球の5倍、蛍光灯と同等の効率が実現される見通しである。白色LEDの寿命は白熱電球および蛍光灯の約1年に対し、8年以上が確認されており、住宅用のみならず、あらゆる生活空間における照明として利用され、消費電力が少ないことによる電力消費の削減と長寿命化による廃棄物の減少が期待されている。白色LED照明は、形状を平板、曲面、球等任意の形状とすることが可能であり、赤、緑、青3色のそれぞれの明るさを変えることができ、蛍光灯における昼白色から電球によるオレンジ色、さらには個人の好みに合わせて、色調が自由に換えられる理想の照明となり、豊かな生活環境の実現に寄与する。

青色LEDおよび白色LEDをあわせて、2001年に900億円、2006年では2300億円の市場があるといわれている²³⁾。白色LEDが白熱電球および蛍光灯に替わって生活空間照明に使われるようになれば、1兆円を越える市場が期待できる。また、青色LDは次世代大容量光ディスクの普及と共に市場が増大し、数百億円以上の市場となる²⁴⁾。

6. 結論

青色LEDの開発により、半導体による光の三原色が完成し、鮮明なフルカラーディスプレイ、信号機への利用が可能となった。また青色LDの開発により高密度光記録が可能となった。さらに白熱電球、あるいは蛍光灯にかわる一般照明用光源としての白色LEDの利用は、発光効率の向上による使用電力の削減および製品長寿命化による廃棄物の減少に寄与することが

期待されている。

赤崎と天野、および中村は、これまで開発が極めて困難であるといわれた青色発光半導体デバイス実現のための課題を、独創的なアプローチにより解決し、製品化を実現し、人々に富と豊かさ・幸福をもたらした。工学知とテクノアントレクレーナシップに富んだこの業績に武田賞を贈る。

参考文献

- 1) Ohki, Y., Toyoda, Y., Kobayasi, H., and Akasaki, I., "Fabrication and properties of a practical blue-emitting GaN," *Inst. Phys. Conf. Ser.* **63**, 479 (1981).
- 2) Amano, H., Sawaki, N., Akasaki, I., and Toyoda, Y., "Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer," *Appl. Phys. Lett.* **48**, 353 (1986).
- 3) Akasaki, I., Amano, H., Koide, Y., Hiramatsu, K., Sawaki, N., "Effects of AlN buffer layer on crystallographic structure and on electrical and optical properties of GaN and $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ ($0 < x \leq 0.4$) films grown on sapphire substrate by MOVPE," *J. Crystal Growth* **98**, 209 (1989).
- 4) Amano, H. and Akasaki, I., "Fabrication and properties of GaN p-n junction LED", *Mat. Res. Soc. Extended Abstract (EA-21)* 165 (1990).
- 5) Amano, H., Akasaki, I., Kozawa, T., Hiramatsu, K., Sawaki, N., Ikeda, K., and Ishii, Y., "Electron Beam Effects on Blue Luminescence of Zinc-Doped GaN," *J. Lumin.* **40&41**, 121 (1988).
- 6) Amano, H., Kito, M., Hiramatsu, K., and Akasaki, I., "P-Type conduction in Mg-Doped GaN Treated with Low-Energy Electron Beam Irradiation(LEEBI)," *Jpn. J. Appl. Phys.* **28**, L2112 (1989).
- 7) Amano, H., Asahi, T., and Akasaki, I., "Stimulated Emission Near Ultraviolet at Room Temperature from a GaN Film Grown on Sapphire by MOVPE Using an AlN Buffer Layer," *Jpn. J. Appl. Phys.* **29**, L205 (1990).
- 8) Akasaki, I., Amano, H., Sota, S., Sakai, H., Tanaka, T., and Koike, M., "Stimulated Emission by Current Injection from an AlGaIn/GaN/GaInN Quantum Well Device," *Jpn. J. Appl. Phys.* **34**, L1517 (1995).
- 9) Akasaki, I., Sota, S., Sakai, H., Tanaka, T., Koike, M., and Amano, H., "Shortest wavelength semiconductor laser diode" *Electron. Lett.* **32**, 1105 (1996).
- 10) Nakamura, S. *et al.*, "Novel metalorganic chemical vapor deposition system for GaN growth," *Appl. Phys. Lett.* **58**, 2021 (1991).
- 11) Nakamura, S. and Mukai, T., "High-Quality InGaIn Films Grown on GaN Films," *Jpn. J. Appl. Phys.* **31**, L1457 (1992).
- 12) Nakamura, S. "GaN Growth Using Buffer Layer" *Jpn. J. Appl. Phys.* **30**, L1705 (1991).
- 13) Nakamura, S. *et al.*, "Thermal Annealing Effects on P-Type Mg-Doped GaN Films," *Jpn. J. Appl. Phys.* **31**, L139 (1992).
- 14) Nakamura, S. *et al.*, "Hole Compensation Mechanism of p-type GaN Films," *Jpn. J. Appl. Phys.* **31**, 1258 (1992).

- 15) Nakamura, S. *et al.*, “Candela-Class High-Brightness InGaN/AlGaN Double-Heterostructure Blue-Light-Emitting Diodes,” *Appl. Phys. Lett.* **64**, 1687 (1994).
- 16) Nakamura, S. *et al.*, “High-power InGaN single-quantum-well-structure blue and violet light-emitting diodes,” *Appl. Phys. Lett.* **67**, 1868 (1995).
- 17) Nakamura, S. *et al.*, “InGaN-Based Multi-Quantum-Well-Structure Laser Diodes,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **35**, L74 (1996).
- 18) Nakamura, S. *et al.*, “Room-temperature continuous-wave operation of InGaN multi-quantum-well structure laser diodes,” *Appl. Phys. Lett.* **69**, 4056 (1996).
- 19) Usui, A. *et al.*, “Thick GaN Epitaxial Growth with Low Dislocation Density by Hydride Vapor Phase Epitaxy,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **36**, L899 (1997).
- 20) Nakamura, S., “Current Status and Future Prospects of InGaN-Based Laser Diodes,” *JSAP International* **1**, 5 (2000).
- 21) http://www.energy.ca.gov/releases/2002_releases/2002-03-14_led_signals.html
朝日新聞 2002年7月8日記事.
- 22) 田口常正, “白色LEDと照明システム,” *O plus E* p10, Aug. (2000).
- 23) <http://www.compoundsemiconductor.net/magazine/article/8/4/6/2>
- 24) <http://e-solution.nkk.co.jp/kankyo-q/q1-5.html>
<http://it.nikkei.co.jp/it/archive/chokoku/2001032505715p8.cfm>
SRI report.

2002 年武田賞

情報・電子系応用分野

受賞者の略歴

赤崎 勇

1952 年 京都大学理学部卒業

1964 年 名古屋大学、工学博士号取得

1952 年 神戸工業株式会社(現富士通株式会社)入社 1959 年 名古屋大学助教授

1964 年 松下電器産業株式会社 入社、東京研究所 勤務

1981 年 名古屋大学教授

1992 年ー現在 名城大学教授

主な表彰

1995 年 化合物半導体国際シンポジウム賞

1995 年 Heinrich Welker Gold Medal

1996 年 天野、中村とともに米国 IEEE/LEOS エンジニアリングアチーブメント賞

1997 年 紫綬褒章

1998 年 Laudise Prize(結晶成長学国際機構)

1998 年 中村とともにC&C賞

1998 年 中村とともに IEEE Jack A. Morton Award

1998 年 天野、中村とともに英国ランク賞

1999 年 Solid State Science & Technology Award (Electrochemical Society)

1999 年 仏モンペリエ大学より Honoris Causa(名誉博士号)

2000 年 東レ科学技術賞

2001 年 中村とともに朝日賞

2001 年 スウェーデンのリンチェピング大学より Honoris Causa (名誉博士号)

2002 年 第2回応用物理学会業績賞

2002 年 藤原賞

その他にも多くの賞に輝いている。

天野 浩

1983 年 名古屋大学工学部電子工学科卒業
1988 年 名古屋大学大学院博士課程終了、同大学助手
1989 年 名古屋大学、工学博士学位取得
1992 年 名城大学工学部講師
1998 年 名城大学助教授
2002 年 名城大学教授

主な表彰

1994 年 オプトエレクトロニクス会議特別賞
1996 年 赤崎、中村とともに米国 IEEE/LEOS エンジニアリングアチーブメント賞
1998 年 応用物理学会賞C(会誌賞)
1998 年 赤崎、中村とともに英国ランク賞
2001 年 丸文学術賞

中村 修二

1977 年 徳島大学工学部電子工学科卒業
1979 年 徳島大学、修士課程卒業
1994 年 徳島大学、工学博士学位取得
1979～1999 年 日亜化学工業株式会社
2000 年～現在 カリフォルニア大学サンタバーバラ校教授

主な表彰

1996 年 仁科記念賞(Nishina Memorial Award)
1996 年 赤崎、天野とともに米国 IEEE/LEOS エンジニアリングアチーブメント賞
1997 年 MRS Medal Award
1997 年 大河内記念賞(Okochi Memorial Award)
1998 年 赤崎とともにC&C賞
1998 年 赤崎、天野とともに英国ランク賞
1998 年 赤崎とともに IEEE Jack A. Morton Award
2000 年 本田賞
2000 年 Carl Zeis Research Award
2001 年 赤崎とともに朝日賞 2001 年 OSA Nick Holonyak, Jr. Award
2001 年 IEEE Quantum Electronics Award
2002 年 Benjamin Franklin Medal Award in Engineering
その他にも多くの賞に輝いている。

図1 青色LEDおよびLDの技術進化

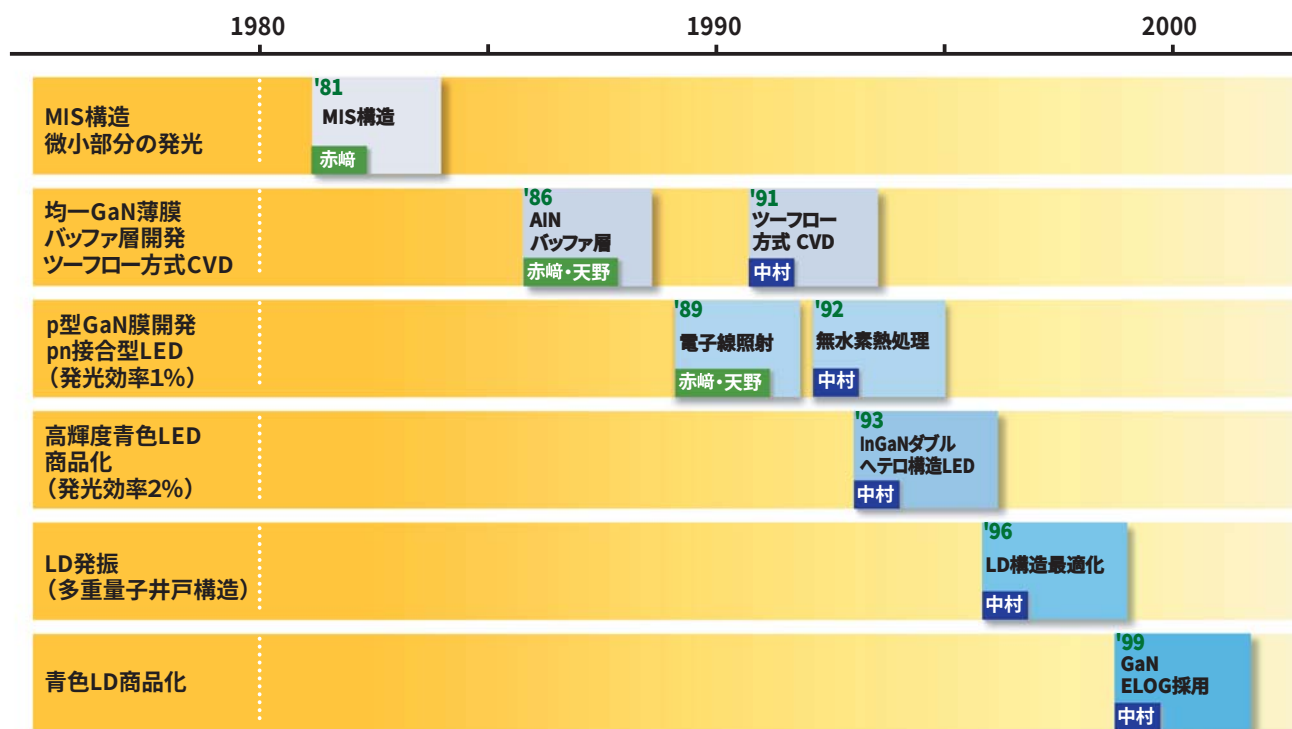


図2 青色LDの構造

