

LEDが拓く 光の未来

第四の灯りとも呼ばれているLED。1907年にその現象が発見され、1993年の青色LEDの商品化以後、LEDは新しい光源として、携帯電話や液晶ディスプレイのバックライトに利用された。近年、LED照明は、高効率・長寿命の照明として市場の拡大が予測されている。照明分野のほかにも多彩な分野で利用されているLEDは、通信や次世代半導体分野においても、次世代の材料として注目を集めている。

2012年の春に開業を目指す東京スカイツリー®には約2000台の照明が取り付けられる予定で、そのすべてをLED照明にすることを目指している。日替わりで隅田川の水をモチーフとした淡いブルーと美意識を示す江戸紫をテーマカラーにしたライトアップが行われ、地上634mの電波塔を照らす計画だ。写真はイメージ。

(画像提供:東武鉄道(株)・東武タワースカイツリー(株))

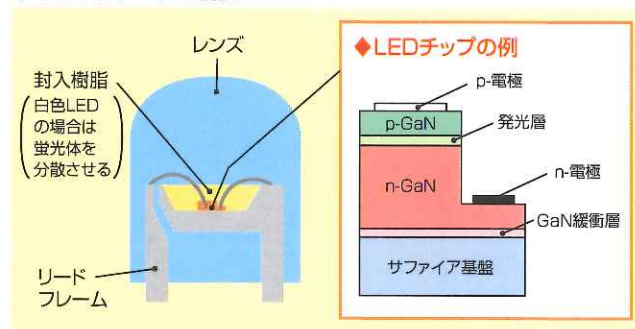
多彩な分野で応用が進む LED 光源

現在、幅広い分野で光源として利用されているLEDは、さまざまな特長を持つ光源である。高効率で長寿命、環境に有害な物質を含まないことから、環境負荷の低減に適した光源である。赤外線や紫外線が少なく必要な波長の光を取り出すことが可能で、調光や点滅が自在に行える点も重要である。実用上の優位点としては、衝撃に強い、防水構造が容易、低温でも発光効率が低下しない、小型化が可能なことなどが挙げられよう。

近年、とくに注目されているのが、LEDの照明としての利用である。LEDは高効率・長寿命であることからランニングコストが低く、次世代の照明として市場の拡大が期待されている。例えば60形の白熱電球の消費電力は約54Wで、寿命は1,000時間といわれているが、LED電球の消費電力は約7.5Wで、寿命は40,000時間といわれている。1日5時間点灯したとして、約20年間は交換の必要がないことになる。LED照明は白熱電球や電球形蛍光灯と比較すると高価ではあるが、効率と寿命を考慮すれば、トータルコストでは十分にメリットがあることは明らかである。さらに、LED照明には、蛍光灯で使用している水銀を使用していないことも、環境負荷の低減からはメリットといえるだろう。

また、高輝度LEDや青色LEDの開発により、液晶テレビのバックライトへのLEDの採用が進んでいる。液晶テレビはプラズマテレビと異なり、液晶自体は発光しないため、液晶パネルの背

◆LEDパッケージの構造



◆ランニングコストの比較

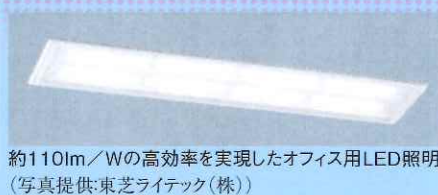
	白熱電球	電球形蛍光灯	LED電球
価格	168円	1,890円	5,000円
寿命	1,000時間 (約200日)	6,000時間 (約3年)	40,000時間 (約20年)
消費電力	54W	12W	7.5W
効率	10%	25%	32%
電気代	47,520円	10,560円	6,600円
トータルコスト	54,240円	23,790円	11,600円

点灯時間:1日5時間として計算、電力料金:0.022円/Whr

照明

既存の白熱電球や電球形蛍光灯と置き換えることが可能な製品で

は、高効率の製品や、白熱電球に似たフィラメントの形状をLEDで再現した製品などが市場に投入され、多様な照明ニーズに応えている。直管蛍光灯のLED照明への置き換えでは市場の拡大が期待されている。



約110lm/Wの高効率を実現したオフィス用LED照明
(写真提供:東芝ライテック(株))



LEDをフィラメント状に搭載したLED電球
(写真提供:ウシオライティング(株))

道路交通

信号のほか、街路灯やトンネル内の照明にもLED照明が利用され始めている。信号機の反射板に日光があたることによって生じる「疑似発光」が起これないが、電球面が発熱しないために雪や氷が付着すると溶けにくいという課題もある。



道路信号機(都内LED信号第1号)

輸送

振動に強いLED照明は、自動車のヘッドライトや鉄道の車内照明などでの応用が期待されている。LED照明は自動車で現在主流であるハロゲンやキセノン照明よりも高価なため、現在は高級車を中心に搭載が進んでいる。鉄道では2005年から大規模な導入が始まっている。また、船舶では自動車運搬専用船で試験搭載が始められた。

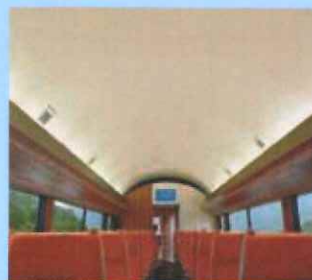
(写真協力:トヨタ自動車(株))



自動車ヘッドライト



自動車計器パネル



室内照明に国内で初めてLED照明が大規模採用された鉄道車両
(写真提供:小田急電鉄(株))

面から小型の蛍光管を使用して光をあてる必要がある。このバックライトにLEDを使用すると、薄型化・小型化が容易になるほか、瞬時に点灯する、明度調整がしやすい、インバーターが不要、長寿命、水銀の不使用など、さまざまなメリットがある。最近では低価格帯の液晶テレビでもLEDの採用が進んでおり、また韓国や台湾のメーカーの伸長も著しい。我が国のメーカーは、より高画質を実現するなどして、アジアメーカーの台頭に対抗している。

携帯電話や液晶テレビなど液晶ディスプレイのバックライト光源として利用されてきたLED光源であるが、近年はその特長を生かして幅広い分野で利用されるようになってきた。一般向けの照明分野では、現在、家庭にある既存の照明器具に取り付けることのできるタイプが市販されているが、今後はオフィス向けのLED照明の普及が期待されている。2010年10月には日本電球工業会が直管型LEDランプの規格を策定し、大手メーカーが相次いで市場に参入してきている。また、屋外の照明やライトアップ用の光源としての利用も進んでいる。LEDを単なる照明ではなく、ビルのデザインとして利用している例もある。

振動に強く、長寿命でメンテナンスが不要であるLEDは、自動車のヘッドランプや鉄道の車内照明などへも応用が進んでいる。

また、LED照明は展示物の温度を上げる赤外線や褪色などの原因になる紫外線の少ない光を作ることができるため、美術館や博物館などの展示品の照明としても注目され、すでに多くの美術館や博物館で導入されている。照明の性能をあらわす指標のひとつに、自然光にどれだけ近いかを示す「演色性」があるが、美術館や博物館で用いられるLED照明には、通常よりも高い演色性を持つLEDが使用されている。

また、冷蔵庫内用照明としても、LED照明は注目されている。これは、LED照明が発する光には赤外線が少ないため、放射による放熱がなく、庫内に保存している食品などの温度を上げることがないためである。さらにLED照明は温度が低い方が高効率であるため、低温が要求される場所の照明には適している。そのため保冷倉庫やコンビニエンスストアの冷蔵庫などへの応用が期待されている。

近年、LED照明を利用した植物工場が実現しているが、照射する光の波長が植物の成長に影響を与えることが分かってきており、初期に成長を促す赤外線を照射し、収穫直前にビタミンCを増やす紫外線の照射量を増やすなどして、効率的な植物栽培が可能になっている。また漁業においては、漁船の集魚灯

農業・漁業

従来までリーフレタスなどが栽培されてきたが、多光量型のLEDユニットが開発されたことにより、マメ類、穀類、イモ類などの栽培の可能性が広がっている。また、照射する光の波長によって、植物

の成長を促進したり、ビタミンCなどの機能性物質の合成を促進したりできるなど、効率的な栽培を実現できる。漁業分野では集魚灯への応用が検討されており、渡り鳥に影響を与えるといわれる「光害」の減少や燃料コストを数十分の一まで削減するなどの大きな効果が期待されている。

●植物育成 多様な光質を作ることができるLED照明により、植物の育成に最適な光を照射することが可能になる。(写真提供:ウシオライティング(株))



赤色LED照明と青色LED照明を組み合わせて、穀類などの栽培用に最適な光を作り出す(左)。右は非点灯状態。



光合成を促進させる赤色光(上)や、葉や茎など組織形成作用に効果のある青色光(下)を自由にコントロールできる。



2000年に世界で初めてLEDを利用した集魚灯(イカ釣り漁船)による実証実験が行われた。(写真提供:香川大学 岡本研正教授)

電子機器・情報機器

プロジェクターやプリンター、携帯電話をはじめとした電子機器には比較的早い時期からLEDの利用が進んでいる。LED光源の採用によってプロジェクターは携帯電話やデジタルカメラに搭載できるまでに小型化が進み、新しい映像表示機器として関心が高まっている。



RGBにY(黄色)を加えた4原色薄型テレビ(写真提供:シャープ(株))

展示ケース

褪色の原因となる紫外線や、展示物の温度上昇の原因となる赤外線をほとんど出さないLED照明は、美術館や博物館の展示ケースの照明として注目されている。また、店舗ショーケースなどへの普及も期待されている。



美術館の展示ケースの照明は高い演色性が要求される。(写真提供:根津美術館 ©藤塚光政)

にLED照明を利用し、照明費用の削減が試みられている。

そのほか、応答性のよいLED照明によって、可視光通信の実用化が進められている。室内などの比較的狭い空間での利用が想定されているが、普及が進む無線LANのように電波干渉を考慮する必要がないなど、多くの特長をもった新しい通信技術である。

白色光を実現するために

照明用の光源としてLEDが目玉されたのは、白色光を作り出すために必要な青色LEDが日本で開発された1993年以降である。白色光を実現する方法には3つの代表的な方法がある。1つ目は、光の三原色であるR(赤)G(緑)B(青)の光を出すLEDを使用する方法である。この場合、青色LEDの存在が不可欠となる。残りの2つの方法では、LEDのほかに蛍光体を使用する。紫外LEDを使用する方式では、紫外線をRGBの三色の光を出す蛍光体に照射することで白色光を実現するものだ。3つ目は青色LEDと黄色の光を発する蛍光体を用いる方式だ。青色と黄色は補色の関係にあり、これらが混ざることにより白色

に見えるようになる。この仕組みは洗濯洗剤でも利用されており、洗濯物の黄ばみを消すために、青色の光を発する蛍光染料が利用されている。

蛍光体が発する蛍光は、蛍光体に照射される励起光の波長よりも長波長になる。すなわち、励起光よりも蛍光のエネルギーの方が低くなる。そのため、LEDが発する励起光は、求める波長よりも短波長の光である必要が生じる。蛍光体を用いるにしろ、直接LEDで青色光をつくるにしろ、白色光を実現するためには短波長の光を発するLEDが不可欠であった。しかし、現実のLEDの開発は長波長側から進んでいった。最初に製品化されたLEDは赤外LEDで発光波長は870nmであった。

半導体の性質には、価電子帯と伝導帯のエネルギーの差(バンドギャップ)が大きな影響を持つが、LEDにおいては、バンドギャップと発光波長に相関があり、バンドギャップが大きいほど短波長の光を発光する。しかし、バンドギャップの大きな青色LEDを製造するためには、欠陥が少なく、微細な構造を制御する必要があり、極めて困難であった。しかし、サファイア基盤上に緩衝層を設けることで高品質のGaN層を成長させる技術が開発され、1993年には青色LEDが商品化された。

赤色、緑色のLEDは既に開発されていたので、青色LEDを

建築

LED照明はより演出効果の高い照明としても利用されている。ビルの外装にテント状の膜とLED照明を組み合わせることで、さまざまな模様を浮かび上がらせるシステムが実用化されている。



LED照明によってカラフルな外観を変化させることができる。
(写真提供: (株)ユニクロ)

加えた三原色方式の白色LEDが開発されたが、それぞれの物理特性が異なるため、電圧や温度制御が難しいという課題があった。そこで1種類のLEDから白色光を実現する方法として、前述の蛍光体を用いる方法が開発されたのである。

現在、多く用いられている方式は青色LEDに黄色を発する蛍光体を組み合わせる方式である。演色性では、紫外LEDとRGBを発する蛍光体の組み合わせが勝っているが、すべての光が蛍光体を介するため、明るさの向上が課題になっている。

青色LED実現の次にある技術的課題

青色LEDの実現には2つの技術開発が必要であった。サファイア基盤上に欠陥のないGaN半導体層を成長させる技術と、GaN半導体層の膜厚を制御する技術である。透明で高温と腐食環境に耐えるサファイア基盤は、GaN系半導体と格子定数の差が大きく、当初は良質な半導体層を形成することが難しかった。これを解決したのが、サファイア基盤とn型GaN半導体層との間に緩衝層を設ける方法である。低温でAlNなどのアモルファス層を生成し、その後に結晶化することで、緩衝層を形成し、サファイア基盤とGaN系半導体の格子定数の違いを吸収させるものである。

緩衝層上でGaN系半導体結晶を成長させる技術としては、OMVPE法(有機金属気相成長法、MOCVD法とも表記される)の存在が大きい。基本的な原理はCVD法と同様であるが、大きく異なる点は原料物質に金属錯体を用いることと、高真空ではなくキャリアガスによって原料ガスを基盤まで運ぶ点である。この方法では従来までの単結晶薄膜製造技術で使用していた結晶成長の速いハロゲン化合物を使用しないので、ナノオーダーの膜厚制御が可能になった。

このようにして青色LEDの製造が実用化されたのであるが、LED照明が普及するためには、さらに克服すべき課題が存在

色の見え方の指標「表色系」

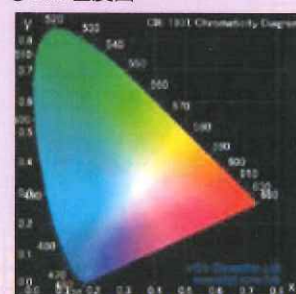
色を客観的にあらわすための指標として、色相、彩度、明度の3つの尺度がある。これらを三次元で表現したものには「マンセル色立体」などがある。

色の見え方には個人差があり、色を数学的に表現するために、国際照明委員会(CIE)が1931年に表色系を発表して以来、さまざまなシステムが提案されている。現在、工業的には数学的に厳密なCIE色度図が用いられている。これは、RGBを換算して、二次元の色空間によって色をあらわす方法である。CIE色度図において、実際に存在する色をプロットすると歪んだ半円形をかたちづくる。半円形の輪郭に当たる部分が単色の光で、中央部分は白色になる。

液晶テレビなど、RGBで色をあらわす場合には、色度図上の3点を結んだ三角形が液晶テレビなどの色再現の範囲を示すことになる。豊かな色再現性を実現するためには、この三角形の面積をいかにして広くするかが重要になる。最近では、RGBだけでなくそのほかの色を使用することで、色再現性の拡大が進められている。

例えば、RGBに黄色を加えた4原色パネルはすでに商品化されている。また、デザインや医療分野ではさらに微妙な色合いを表現できる5原色パネルの研究が行われている。

●CIE 色度図



する。ひとつはいっそうの高出力化・高効率化である。現在は複数のLEDを構成してひとつの光源としているが、より高輝度のLEDチップの開発が待たれている。もうひとつの課題は色度のばらつきの低減である。また、高出力化に伴う温度上昇に耐えることのできる放熱設計や、封止剤や蛍光体などの材料開発も重要である。

高効率のLED照明とはいえ、その効率は100%ではなく、光に変換されなかったエネルギーは熱として放出される。前述のように、熱エネルギーが赤外線として放出されないため、LED照明では放熱設計が重要なノウハウになる。

また、LEDチップを保護するためにシリコンやエポキシ樹脂などで封止する必要がある。高輝度LEDでは、封止材にいっそうの耐光性、耐熱性やガスの不透過性などが要求されている。

さらに、LEDチップそのものの高効率化や、蛍光体の高効率化も重要な課題である。

次世代のLED材料としても注目を集める鉄シリサイド

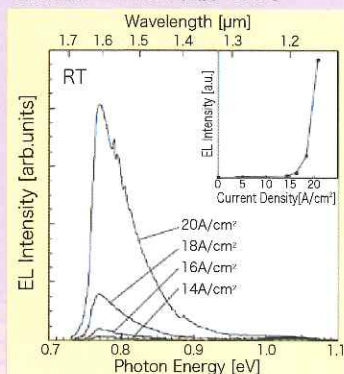
現在、LEDに使用されているGaAsやInPなどの化合物半導体には、AsやInなどの資源寿命が短期間で環境負荷の大きな元素が含まれている。そこで資源量が豊富かつ環境負荷の小さな元素から構成される「環境半導体」に注目が集まっている。中でも、LEDやレーザーダイオード、太陽電池や熱電素子など多方面での応用が期待されている鉄シリサイド半導体の研究が進められている。

鉄シリサイドには、3種類あり、 α 相(Fe_2Si_5)、 β 相(FeSi_2)、 ε 相(FeSi)が知られており、このうち1.5 μm 付近に大きな光感度を持つ β - FeSi_2 は、高い光起電力性や熱電気電力性を持つことから、次世代の電子デバイス材料として期待されている。

β - FeSi_2 が期待される理由のひとつに、Si基盤上へのエピタキシャル成長が可能な半導体である点を挙げることができる。現在の金属配線ではICの微細化による高密度化の限界が見えている。そこで、Si基盤上に発光・受光素子を作成し、光配線による高速化が検討されている。1.6 μm の室温発光が可能な β - FeSi_2 は、Si基盤上の発光デバイス材料として、大きな注目を集めている。しかし、実用レベルまで効率を高める必要があるなど、解決すべき課題も多い。

2010年9月に開催された秋季第71回応用物理学関係連合学術講演会では、 β - FeSi_2 の電子構造解析、電気特性の最新の進展状況や、赤外吸収・赤外光源の開発といった新たな知見、アイデアが活発に発表されている。当初は耐熱・耐腐食材料として研究されてきた β - FeSi_2 は、新しい材料「環境半導体」として、今後の研究の進展が期待される。

●鉄シリサイドの室温での発光スペクトル
LEDの室温ELスペクトル。発光に必要な注入電流密度が20A/cm²程度のLED。



(出典) 半導体鉄シリサイドを用いた室温動作赤外発光ダイオードの作製科学研究費補助金(基盤研究(B)(2))研究成果報告書; 平成12-14年度
著者: 末益崇研究代表

LED性能のカギを握る蛍光体の開発

照明用LEDで重要な役割を担う物質として蛍光体が挙げられる。LEDチップから放射された光は、蛍光体によってさまざまな波長の光に変換される。蛍光体は、LEDチップを封止する樹脂に混ぜられて使用されている。

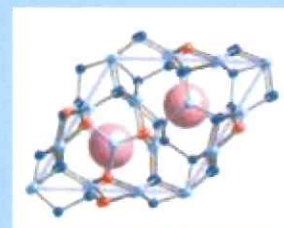
従来、主流であった青色LEDと黄色の蛍光体(YAG)を組み合わせた白色光では、緑色と赤色が不足したスペクトルであった。このため、三原色が必要な液晶テレビなどのバックライト光源には不相当との指摘があった。そこで注目されているのが、我が国で開発された新しい蛍光体である。(独)物質・材料研究機構が開発したCaAlSiN₃赤色蛍光体と β サイアロン緑色蛍光体である。これらの蛍光体と青色LEDを用いることにより、強い三原色の光から構成されるLED光源が実現できる。

サイアロン蛍光体はエンジン部品や耐熱材料として実績のある窒化ケイ素関連物質であり、高出力化が進み、より高温での発光効率が求められている蛍光体に適した材料である。希土類元素(Eu、Ce)を発光中心とするサイアロン蛍光体のもうひとつの特長は青色光で励起されて、緑、黄、赤などさまざまな色を発光する点である。白色LEDは用途毎に必要な波長が異なっている。例えば、液晶テレビなどでは三原色のスペクトルが強い方が色純度の高いRGBを取り出すことができる。これとは逆に照

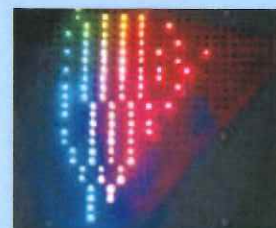
◆サイアロン蛍光体の開発



サイアロン蛍光体



サイアロン蛍光体の結晶構造



サイアロン蛍光体を使用した中間色LED

明用途では太陽のスペクトルに近い波長分布が求められる。異なるサイアロン蛍光体を混合することによって、望みの波長分布を自在に作ることができるようになるのである。従来まではYAG蛍光体が主流であったが、より自由な演色設計が可能なサイアロン蛍光体には大きな注目が集まっている。

照明市場の世界市場規模は約8兆円と推定されている。LED照明市場は、LEDチップの開発をはじめとして、蛍光体材料や封止材などの素材技術でアドバンテージを持つ我が国が、グローバル市場で大きく活躍する好機といえるだろう。