

# 第1章

## 可視発光ダイオード

### 1.1 概説

1960年代後半に、赤色から実用化された可視発光ダイオード(可視LED)は、長寿命、低消費電力、小型、低駆動電圧などの特長によって、小型電球の置き換えとして広く使用されるようになりました。また、からの特長は、トランジスタやICによる直接駆動を容易にさせ、各種電子機器の発展とともに、LEDはパイロット・ランプ、数字表示を始めとする表示目的のマン・マシン・インターフェース・デバイスとしてなくてはならないものとなりました。

近年になり青色が実用化されるとRGB3原色によるフルカラー表示が可能となり、また、青色と蛍光体を使った白色LEDも実用化され、フルカラー電光表示板、携帯電話のカメラ用フラッシュ光源、カラー液晶のバック・ライトなど、優れた演色性が要求される分野にも用途を拡大しています。さらに、一般照明を睨んだLEDの高輝度化、高効率化の検討が精力的に行われており、今後、従来から使われていたあらゆる光源の置き換え用として、また、新たな用途を提案する新規発光デバイスとして、需要拡大が期待されています。

#### コラムA 放射束(Radiant Flux)<sup>1)</sup>

光は放射であるから、その量は1秒間に光の通過しているある面積を通るエネルギーの量で示し、単位はジュール/秒(W)を用います。これは通過するエネルギーの絶対値を表したもので波長により感度が変わる肉眼で感じる光の強さを表したものではありません。このように絶対的な光エネルギー量をベースに表した測定量を放射束と呼びます。

## 1.2 可視発光ダイオードの動作原理

発光ダイオード(LED: Light Emitting Diode)はpn接合をもつ半導体でできており、p側からn側へ電流を流すことにより効率良く発光します。

発光波長(色)は半導体の材料、構造、不純物などにより決まり、また発光出力は一般的にはpn接合に流れる電流に比例します。図1-1に示すように、発光ダイオードのp側から

### コラムB 青色、白色、紫外、RGBの展開

1960年代後半に赤色LEDが商品化されてから約30年後に青色LEDが開発されたことで可視光の全領域の光を固体半導体で表現することが可能になったことは、ソリッド・ステート光源として画期的な展開が図れました。さらにLEDから出る光エネルギーを使って蛍光体を励起することで白色および中間色光を作り出す技術が生まれた事も半導体業界だけでなく蛍光体を扱う化学薬品業界にとっても大きな夢を膨らませる機会を与えました。また、赤外発光のLEDは、リモコン用途などで長い歴史がありましたが、近年は紫外域のLEDが開発されたことで単なる認識光源としてのLEDから機能素子としてのLED用途へと活躍の場が急速に広がりつつあります。新たな用途の構想として以下のようなものがあげられます。

紫外LEDと酸化チタン触媒を組み合わせた連続脱臭装置

任意の波長のLEDを使用した植物育成および成長抑制光源

任意の波長のLEDを使用した魚介類の成長支援および選択的漁獲光源

昆虫の飛散を抑制する可視光照明

R(赤), G(緑), B(青)のLEDを個別にコントロールすることによる演出型照明

R, G, Bの個別駆動を利用した色変化によるファジー・インジケータ

液晶シャッタとR, G, B個別駆動のLEDバックライトを組み合わせたフルカラー・ディスプレイTV

医療用照明光源(UV+蛍光体)内視鏡、腹腔鏡、光治療器、手術用照明光源など

紫外LEDを用いた冷蔵庫内の製氷機のカビ発生防止装置

これらの用途は、自然界に存在する光や色と異なった波長分布特性をもつLEDの特徴をうまく生かした用途です。

n側へ電流を流し込むと、p側電極からホール(正孔)が、またn側電極から電子が注入され、ホールはp層を、電子はn層を移動(拡散)し、pn接合に達します。ホールおよび電子のエネルギーがある値(拡散電圧 $V_D$ )以上であれば、ホールはpn接合を乗り越えn層へこぼれ出し、そこに多数ある電子と再結合して発光します。電子も同様にpn接合を乗り越えp層へこぼれ出し、そこに多数あるホールと再結合して発光します。p層とn層の発光の割合は発光ダイオードの材料、構造、不純物により決まります。

発光ダイオードは電球などと異なり、  
 連続5万時間以上の点灯が可能  
 低消費電力

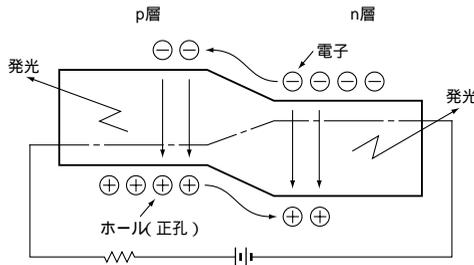


図1-1 発光ダイオードの発光原理



写真1-1 赤色発光ダイオード

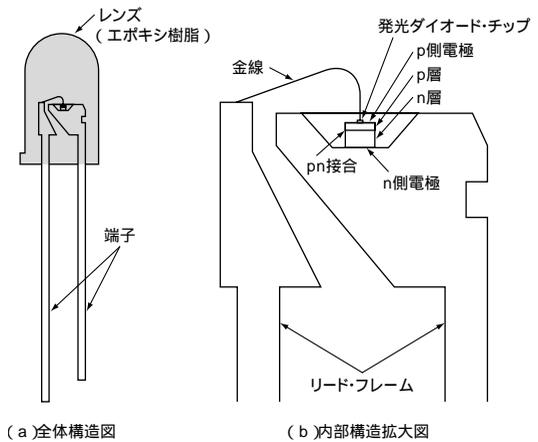


図1-2 発光ダイオードの構造

## コラムC 白色発光のLED

LEDで白色を発光させる方法としては、次の3種の方式が実用化されています。

3原色であるR(赤), G(緑), B(青)の各LEDチップをパッケージする方法。

青紫色LEDチップでR(赤), G(緑), B(青)発光の蛍光体を励起する方法。

青色LEDチップとそれによって励起される黄色蛍光体をパッケージする方法。

は3原色のLEDを光源とするため、各々のLEDの明るさを調整することにより白のみならず幅の広い色を再現することができます。とは蛍光灯と同様の発光原理を用いるもので、パッケージされた蛍光体により発光色は固定されるものです。この中で、はLEDの青色と蛍光体で発光した黄色の合成で白色に見せるもので赤色の光成分が含まれておらず、擬似白色LEDとも呼ばれていますが、現状では、もっとも発光効率が良いという特長を持ちます。は蛍光体発光であるも、3原色の蛍光体発光を光源とし、赤色の成分ももつため再現性が良く、また、励起するLED光が視感度に影響しにくい波長であることから、LEDの光量のバラツキによる色ずれが起き難いという長所もあります。

図1-Aにこれらの3方式の白色発光原理を示す色度図と、スペクトル特性を示します。

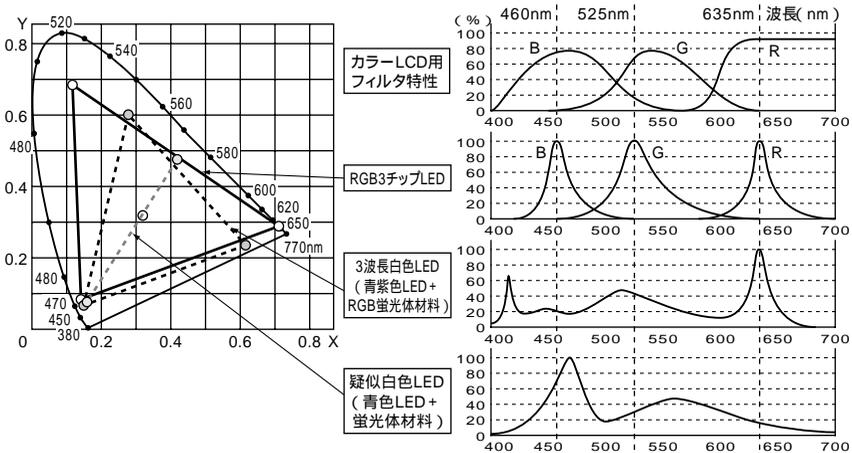


図1-A 色度図とLEDのタイプ別スペクトル特性

発熱が微少

赤外から紫外までの発光が可能

などの特長があります。近年、青色LEDが実用化されたことにより、光の3原色(R(赤)、G(緑)、B(青))のすべてが揃い、フルカラー・ディスプレイや交通信号などの用途が急速に広まりました。さらに、電球に代わる照明分野への用途拡大が始まっています。写真1-1に具体的な発光ダイオード・ランプを示し、その構造を図1-2に説明しています。

## 1.3 可視発光ダイオードの構造

### (1) 発光素子に使われる化合物半導体

発光素子の材料として実用的に見て重要なものは、主に元素の周期律表で Ⅲ 族と Ⅴ 族の元素の化合した化合物半導体です。次におもに使われる化合物半導体を紹介します。

#### コラムD 光束(Luminous Flux)<sup>1)</sup>

放射束がエネルギーの絶対値で光の量(コラムA参照)を表したものであるのに対して、光束は視感度特性をもった目で見たときの視感に基づいて\*放射量を表した値で、単位はルーメン(lm)で示します。

$$v = K_m V_e \dots\dots\dots(1-A)$$

$v$  : 光束(lm)

$e$  : 放射束(W)

$K_m$  : 波長555nmで683(lm/W)

$V$  : 比視感度曲線の光源波長での縦軸の値

光が単色光ではなく分布をもつ場合は、

$$v = K_m \int_0^{\infty} V(\lambda) \alpha(\lambda) d\lambda \dots\dots\dots(1-B)$$

ただし、

$v$  : 光源から出る全波長の全光束

$V(\lambda)$  : 光源から出る波長  $\lambda$  の比視感度

$\alpha(\lambda)$  : 光源から出る波長  $\lambda$  の放射束

\* このように視感度に基づいて光の強さを表した各種の量を測光量という。

GaAs

GaAsは -V属化合物半導体のなかではもっともよく研究され、性質がよくわかっており、かつ結晶ももっとも良いものが得られており、現在は赤外発光素子材料として使用されています。

GaP

GaPは間接遷移型の半導体ですが、低電流 / 高効率で発光し、かつ赤色から黄緑色までの発光が可能な材料です。

**コラムE 光に関する用語と単位<sup>(1)</sup>**

- ▶ **1カンデラ(cd)**: 白金の融点2042Kにおける黒体放射の輝度を60sb = 60cd/cm<sup>2</sup>として定めた値、そして、その温度の黒体の1cm<sup>2</sup>の光度の1/60が1cd
- ▶ **1ルーメン(lm)**: 1cdの光源から単位立体角当たりに発散する光束
- ▶ **1ルクス(lx)**: 1lx = 1lm/m<sup>2</sup>
- ▶ **1スチルブ(sb)**: 1sb = 1cd/cm<sup>2</sup>、英米ではスチルブの代わりにフット・ランバート(fL)を用いることがある

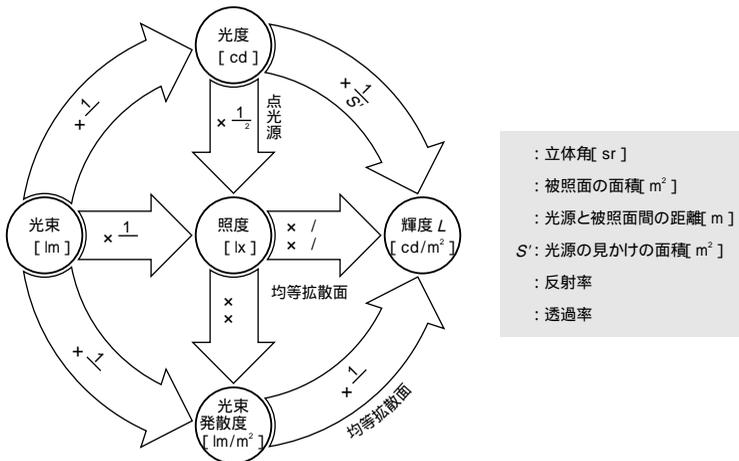


図1-B 光の単位の相互関連<sup>(33)</sup>

GaAsP

GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>( xは混晶化で、材料中のAsとPの割合を表し、両方で1になる )はGaAsとGaPの混晶で、気相エピタキシャル法により良質の結晶が比較的容易に量産されています。発光色は黄色、オレンジ色があります。

AlGaAs

高輝度赤色の材料として用いられている材料です。GaAsとAlAsとの混晶で半導体レーザー用としても使用されています。

$$1\text{fl} = \frac{1}{\text{cd/ft}^2} = 0.000343 \text{ cd/cm}^2 = 0.000343 \text{ sb}$$

これらの測光量と定義および単位を表1-Aに、互いの関連を図1-Bに示します。

表1-A 放射量と測光量の比較表<sup>(16)</sup>

放 射 量					測 光 量				
量の名称	量記号	定 義 式	単位の名称	単位記号	量の名称	量記号	定 義 式	単位の名称	単位記号
放射エネルギー	$Q_e$		ジュール	J	光 量	$Q_v$	$Q_v = \int \phi_v dt$	ルーメン秒	lm·s
放射束	$\phi_e$	$\phi_e = dQ_e/dt$	ワット	W	光 束	$\phi_v$	$\phi_v = K_m \phi_e(\lambda) \phi(\lambda)$ $K_m$ : 最大視感度 : 波長 $\phi(\lambda)$ : 標準視感度	ルーメン	lm
放射強度	$I_e$	$I_e = d\phi_e/d\Omega$	ワット毎ステラジアン	W/sr	光 度	$I_v$	$I_v = d\phi_v/d\Omega$	カンデラ	cd
放射輝度	$B_e$	$B_e = dI_e/(dA \cos \theta)$ $= d^2\phi_e/dA (dA \cos \theta)$	ワット毎ステラジアン毎平方メートル	W/(sr·m <sup>2</sup> )	輝 度	$B_v$	$B_v = dI_v/(dA \cos \theta)$ $= d^2\phi_v/dA (dA \cos \theta)$ 均等拡散のとき $B_v = M_v/l$	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
放射照度	$E_e$	$E_e = d\phi_e/dA$	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	照 度	$E_v$	$E_v = d\phi_v/dA$	ルクス	lx
放射発散度	$M_e$	$M_e = d\phi_e/dA$	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	光 束 発 散 度	$M_v$	$M_v = d\phi_v/dA$ 均等拡散のとき $M_v = B_v$	ルーメン毎平方メートル (ラドルクス)	lm/m <sup>2</sup> (rlx)

AlGaInP

近年、気相成長技術の発達により光度が向上したため、使用量が急速に増えている材料です。AlとGaの混晶比を変えることにより赤色から緑色までの発光が可能です。

InGaN

InGaNも近年、高い光度のLEDが得られ、急速に使用量が増えつつあります。InとGaの混晶比を変えることにより黄色から紫外までの発光が可能です。

表1-1に、各種材料を用いた代表的な発光ダイオードの光学的、電気的特性の一例を示します。

図1-3に、AlGaInP系LEDの断面構造図を示します。(a)は通常の構造、(b)は電極直下に無効電流を流さないように電流阻止層を設けた構造、(c)は発光部を制限して電流密度を増加して高輝度を得る構造です。(b)、(c)はエピタキシャル結晶成長を中断して一度基板をリアクタから取り出し、加工後、再度リアクタへ基板を入れて成長します。

次に、図1-4に、青色、緑色の高輝度発光が得られるInGaN系LEDの断面構造図を示します。(a)は、サファイア基板を用いた構造、(b)はSiC基板を用いた構造です。光取り出

表1-1 発光材料と発光色

チップ材料		接合形成法	発光色	ピーク 発光波長 [ nm ]	外部発光 効率 [ % ]	光度 [ mcd ]	駆動 電流 [ mA ]	駆動 電圧 [ V ]	禁制 帯幅 [ eV ]
発光層	基板								
GaP ( Zn , O )	GaP	液相成長	赤	700	~ 4	40	5	2	2.26
Ga <sub>0.65</sub> Al <sub>0.35</sub> As ( DDH )	GaAlAs	液相成長	赤	660	~ 15	5 000	20	1.9	1.9
Ga <sub>0.65</sub> Al <sub>0.35</sub> As ( DH )	GaAs	液相成長	赤	660	~ 7	2 500	20	1.9	1.9
Ga <sub>0.65</sub> Al <sub>0.35</sub> As ( SH )	GaAs	液相成長	赤	660	~ 3	1 200	20	1.8	1.9
GaAs <sub>0.35</sub> P <sub>0.65</sub>	GaP	気相成長拡散	赤	635	0.6	600	20	2	1.95
GaAs <sub>0.15</sub> P <sub>0.85</sub>	GaP	気相成長拡散	黄	585	0.2	600	20	2	2.1
( Al <sub>0.05</sub> Ga <sub>0.95</sub> ) <sub>0.5</sub> In <sub>0.5</sub> P	GaAs	気相成長 MOCVD *1	赤	647	~ 8	6 000	20	2.1	1.92
( Al <sub>0.20</sub> Ga <sub>0.80</sub> ) <sub>0.5</sub> In <sub>0.5</sub> P	GaAs	気相成長 MOCVD *1	サンセット オレンジ	609	~ 4.5	10 000	20	2.1	2.04
( Al <sub>0.30</sub> Ga <sub>0.70</sub> ) <sub>0.5</sub> In <sub>0.5</sub> P	GaAs	気相成長 MOCVD *1	黄	591	~ 3	8 000	20	2.1	2.1
( Al <sub>0.45</sub> Ga <sub>0.55</sub> ) <sub>0.5</sub> In <sub>0.5</sub> P	GaAs	気相成長 MOCVD *1	緑	560	~ 0.2	1 000	20	2.1	2.2
GaP ( N )	GaP	液相成長	緑	565	0.2	1 000	20	2	2.26
In <sub>0.45</sub> Ga <sub>0.55</sub> N	サファイア, SiC	気相成長 MOCVD *1	緑	520	~ 3	10 000	20	3.5	2.38
In <sub>0.2</sub> Ga <sub>0.8</sub> N	サファイア, SiC	気相成長 MOCVD *1	青	465	~ 4	3 000	20	3.6	2.67
In <sub>0.10</sub> Ga <sub>0.90</sub> N	サファイア, SiC	気相成長 MOCVD *1	青紫	405	~ 8	-	20	3.7	3.06

\* 1 MOCVD : 有機金属化学気相成長法

し効率を上げるため、それぞれの基板において、発光層と基板を逆さにした構造も考案されています。サファイア基板やSiC基板はInGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>基板と格子整合しないため、発光特性が優れた高品質結晶を成長するにはバッファ層などの結晶成長方法にいろいろ工夫が必要です。

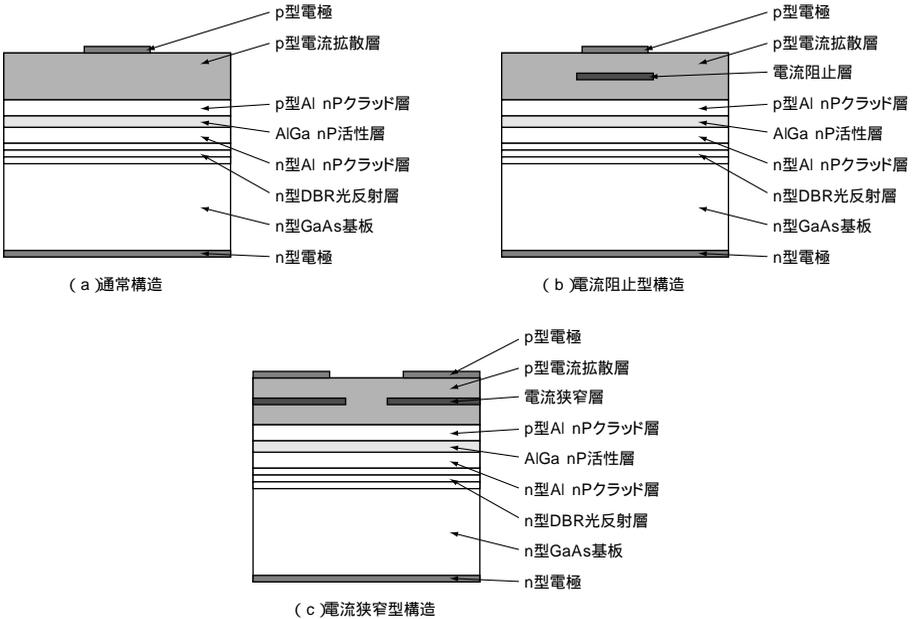


図1-3 AlGaInP系高輝度LEDの構造例

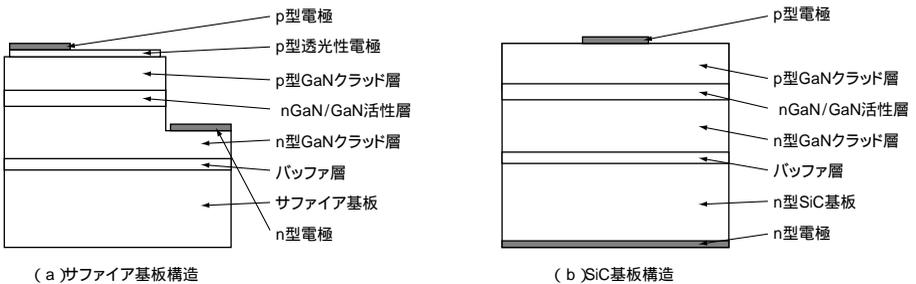


図1-4 InGa<sub>N</sub>系高輝度LED構造の例

## 1.4 可視発光ダイオードの製造方法

発光ダイオード(LED)の製造プロセスは大きく分けて、発光ダイオード・チップを製造するプロセスと、そのチップをパッケージにアセンブリするパッケージ・プロセス(アセンブリ・プロセス)からなっています(図1-5)。

典型的なGaP系LEDのチップ生産プロセスを図1-6に示します。他のLEDチップもそれぞれ材料に適した製造方法をとっていますが、基本的には(i)GaAs, GaP, サファイアなどの半導体基板上にn型, p型の半導体層をエピタキシャル結晶成長して発光層を形成してそのエピタキシャル成長したウェハに電極を形成するウェハ・プロセスと, (ii)そのウェハを0.2mm角から1mm角程度のLEDチップに分割するチップ・プロセスにより製造されます。(iii)その後LEDチップをフレームやプリント基板にダイ・ボンド, ワイヤ・ボンド, 樹脂モールドするパッケージング・プロセスを通してデバイスの完成品となります。

### (1) ウェハ・プロセス(結晶成長技術)<sup>(2)</sup>

LEDに用いられる結晶成長方法には、大きく分けて、液相エピタキシャル成長法(LPE法: Liquid Phase Epitaxy)と気相エピタキシャル成長法(VPE法: Vapor Phase Epitaxy)があります。

#### 気相エピタキシャル成長法

LEDなどの材料となる 族化合物半導体を気相でエピタキシャル成長させる主な方法として、ハイドライド(水素化物)または、クロライド(塩化物)の化学輸送反応を利用した気相エピタキシャル成長法(Vapor Phase Epitaxy: VPE)、有機金属を原料に用い

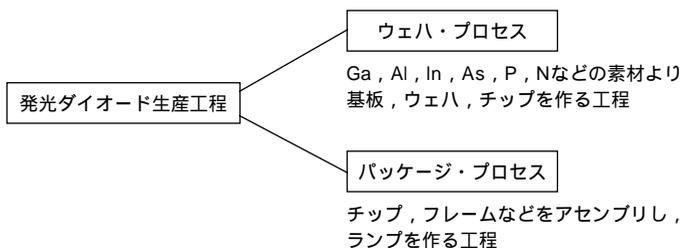


図1-5 発光ダイオード(LED)の生産工程

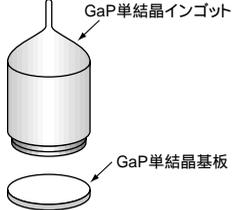
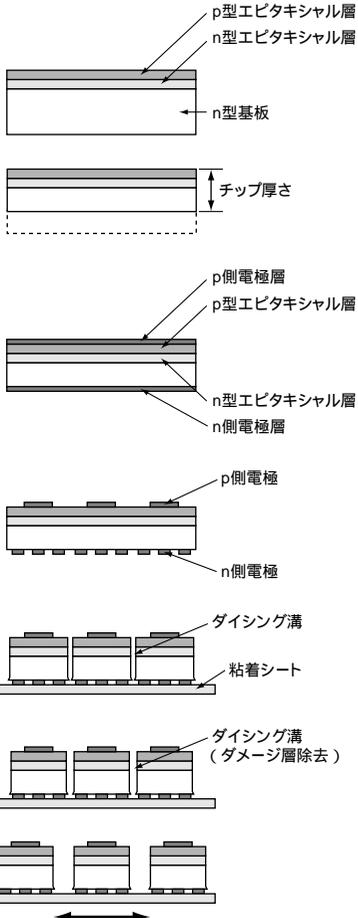
プロセス・要素技術	概要図
<p><b>GaP単結晶育成</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ GaP単結晶育成技術</li> <li>・ GaP単結晶評価技術</li> </ul> <p><b>単結晶基板の作成</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ GaP単結晶スライス技術</li> </ul>	 <p>GaP単結晶インゴット</p> <p>GaP単結晶基板</p>
<p><b>液相エピタキシャル成長</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 液相エピタキシャル成長技術</li> <li>・ エピタキシャル成長評価技術</li> </ul> <p><b>ラップ・ポリッシュ</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ GaPウェハ研削技術</li> <li>・ GaPウェハ研磨技術</li> </ul> <p><b>電極材料形成</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 真空蒸着技術</li> <li>・ スパッタリング技術</li> </ul> <p><b>電極形成</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ フォトリソグラフィ技術</li> <li>・ 金属膜エッチング技術</li> </ul> <p><b>ダイシング</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ GaPウェハ・ダイシング技術</li> </ul> <p><b>ダイシング後処理</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ ダイシング・ダメージ除去技術</li> </ul> <p><b>シート拡大</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ GaPウェハ・チップ化技術</li> </ul>	 <p>p型エピタキシャル層</p> <p>n型エピタキシャル層</p> <p>n型基板</p> <p>チップ厚さ</p> <p>p側電極層</p> <p>p型エピタキシャル層</p> <p>n型エピタキシャル層</p> <p>n側電極層</p> <p>p側電極</p> <p>n側電極</p> <p>ダイシング溝</p> <p>粘着シート</p> <p>ダイシング溝 (ダメージ層除去)</p>

図1-6 LEDチップ作製のプロセス・フローの例 (GaP系LED)

る有機金属気相エピタキシャル成長法 (Metal Organic Vapor Phase Epitaxy : MOVPE , または , Metal Organic Chemical Vapor Deposition : MOCVDとも呼ばれます) , 超高真空中で成長を行う分子線エピタキシャル成長法 (Molecular Beam Epitaxy : MBE) の三つがあります。では、次にLEDで使われるおもなウェハ・プロセスの概要を説明します。

### 液相エピタキシャル成長法(LPE法)

液相エピタキシャル成長法は、過飽和状態の融液を単結晶基板と接触させることにより、基板と同一の結晶方位を持った単結晶を成長させる方法です。GaP系、GaAlAs系の可視LEDやGaAs系の赤外LEDはすべてこの液相成長法によって作成されており、LEDの発展を支えてきた大きな要素技術です。液相成長法は、熱平衡状態に近い状態での結晶成長であり、MOCVDやMBEに比べて非発光再結合中心となる欠陥の少ない結晶が得られます。

液相成長法には、各種の方法がありますが、もっとも良く用いられているスライド・ポート方式を図1-7に示します。GaAs成長の場合、グラファイト製のポートおよびスライダにウェハ(GaAs基板)およびGa融液(GaにGaAs多結晶とドーパントを加えたもの)をセットします。これを電気炉内でいったん昇温し、GaにGaAs多結晶とドーパントを溶かし込んだ後、降温しながら、スライダを移動し、過飽和状態のGa融液を順次GaAs基板上に被せ、エピタキシャル成長をさせます。

### ハイドライド気相成長法

気相成長法としては、もっとも成熟した技術の一つで現在では三元系LEDであるGaAsP系ウェハの成長に使用されています。この方法は、III族原料にAsH<sub>3</sub>、PH<sub>3</sub>のような水素化物を用いることからハイドライド気相成長法と呼ばれています。気相エピタキシャル成長炉は図1-8のような構造をしていて、水素気流中でGaの塩化物(GaCl<sub>x</sub>など)とIII族元素の水素化物(AsH<sub>3</sub>、PH<sub>3</sub>)を炉内に導入し、熱分解して発生するGa、As、PをGaAsまたはGaP結晶基板上に堆積させ、GaAsPの単結晶を成長させる方法です<sup>(3)</sup>。

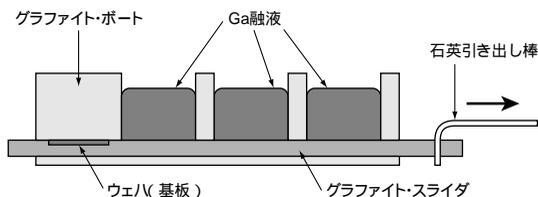


図1-7 スライド・ポート方式<sup>(3)</sup>

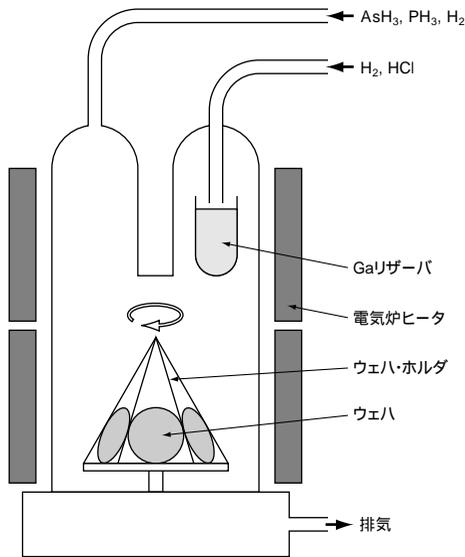


図1-8 気相エピタキシャル成長炉の概要<sup>(4)</sup>

### コラムF 光度と輝度<sup>(1)</sup>

▶ **光度**(単位: cd): 光源から出る単位立体角当たりの光束密度

$$I = d \nu / d \quad [\text{cd}] \quad \dots\dots\dots (1-C)$$

$d \nu$ : 微小立体角  $d$  の中に放散される光束

不均等点光源の場合は、方向により変わります。均等点光源の場合に全立体角は4 ステラジアンなので、光度を  $I_\nu$ 、全光束を  $\nu$  とすれば、次の式が成り立ちます。

$$\nu = 4 I_\nu \quad [\text{cd}] \quad \dots\dots\dots (1-D)$$

▶ **輝度**(単位:  $\text{cd}/\text{m}^2 (= \text{nt}), \text{sb}$ ): 光源をある方向から見た場合、その方向への光度をその方向から見た光源の見掛けの面積で割った値

$$B_\nu = I_\nu / (S \cos \theta) = (I_\nu / A) \frac{1}{\cos \theta} \quad [\text{cd}/\text{m}^2] \quad \dots\dots\dots (1-E)$$

$A$ : 光源の面積       $\theta$ : 光源の法線方向からの角度

輝度の単位は  $\text{cd}/\text{m}^2$  で、これをニト(nt)とも呼びます。またスチルブ( $\text{sb}$ ) =  $\text{cd}/\text{cm}^2$  も使われます。

## MOCVD法(Metal Organic Chemical Vapor Deposition)

AlGaInP結晶は直接遷移型の半導体であり、AlとGaの混晶比を変えることで、赤色から橙、黄色、緑色までの任意の発光色の高輝度LEDが作られます。InGaN結晶も直接遷移型の半導体であり、InとGaの混晶比を変えることで、紫外から青色、緑色、黄色までの任意の発光色の高輝度LEDが作られます。これらの結晶系は液相エピタキシャル成長法では作ることができず、MOCVD結晶成長法が用いられます。MOCVD結晶成長法の特長を以下に示します。

- ・液相成長では得られない結晶を作ることができる
- ・簡単に結晶の組成を変えることができる
- ・成長層の層厚を精密に制御できる
- ・数nm厚の薄い成長層を均一に多層に成長できる
- ・急峻な界面が得られる
- ・ $10^{16} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の広い範囲でドーピング濃度を精密に制御できる

これらの特長を生かし、活性層を多重量子井戸構造として発光効率の向上を図ったり、基板と活性層との間に、DBR(Distributed Bragg Reflector)光反射層を形成して基板に吸収される光を反射して光取り出し効率を高めたりすることができます。DBR光反射層は、1/2波長に相当する膜厚の組成の異なる半導体層を交互に積層して結晶成長した半導体多層膜で、二つの層の屈折率差が大きいほど、また、層数が多いほど高い反射率が得られます。

MOCVD装置の一例を図1-9に示します。

AlGaInP系LEDではAl, Ga, Inの族元素の原料としてそれぞれトリメチル・アルミニウム(TMAI), トリメチル・ガリウム(TMGa), トリメチル・インジウム(TMIn)の有機金属が用いられます。TMAI, TMGaは室温では液体であり、ステンレスの容器に入れ、-20 から40 程度の範囲で一定温度に保ちます。キャリア・ガスの水素を有機金属を通して飽和蒸気圧分の有機金属をリアクタに供給します。一方、TMInは室温では固体であるため、種々の供給法が提案されています。また、族元素のPの原料としてはホスフィン $\text{PH}_3$ を使用します。ホスフィンは通常、高圧のガスボンベに充填されます。ホスフィンは特殊高圧ガスに属し、有毒であるため、MOCVD装置は十分な安全装置が付加されています。基板はGaAs基板を用います。n型ドーパントはSi( $\text{SiH}_4$ ,  $\text{Si}_2\text{H}_6$ ), Se( $\text{H}_2\text{Se}$ ), Te( $\text{DETe}$ )などが用いられ、p型ドーパントはZn( $\text{DMZn}$ ,  $\text{DEZn}$ ), Mg( $\text{Cp}_2\text{Mg}$ )などが用いられます。

成長温度は700 近傍です。成長圧力は常圧、減圧の両方ともに成長可能ですが、30 ~

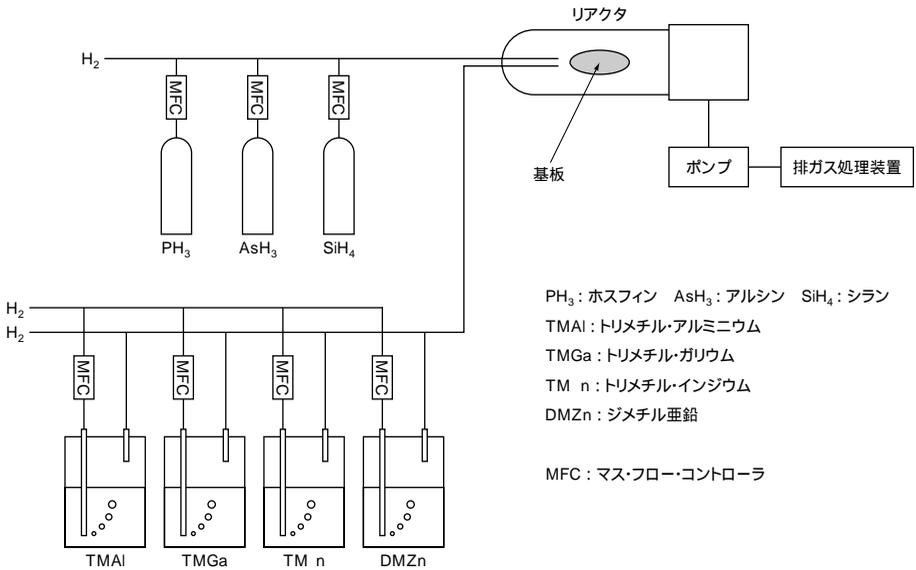


図1-9 MOCVD装置概略図 (AlGaInP系結晶成長の例)

100hPaの減圧での成長が一般的です。

青色，緑色発光のGaInN系LEDも基本的に図1-9と同様の装置で製造されます。族元素のNの原料としてはアンモニアNH<sub>3</sub>を使用し，通常高压のガスボンベとして充填されます。基板はサファイアまたはSiC，n型ドーパントはSi (SiH<sub>4</sub>，Si<sub>2</sub>H<sub>6</sub>)，p型ドーパントはMg (Cp<sub>2</sub>Mg)を使用します。

成長温度は1000～1100 (GaN層)，600～800 (InGaN層)で，キャリア・ガスは水素と窒素の両方，成長圧力は常温に近い圧力で成長させるのが一般的です。

(2) パッケージ・プロセス(アセンブリ・プロセス)

表面実装用チップLEDのパッケージ・プロセス

一般的なリード・タイプ砲弾型のLEDのパッケージ・プロセスを図1-10に示します。

また，プリント基板へ表面実装して使われるチップLEDのパッケージ・プロセスを図1-11に示します。

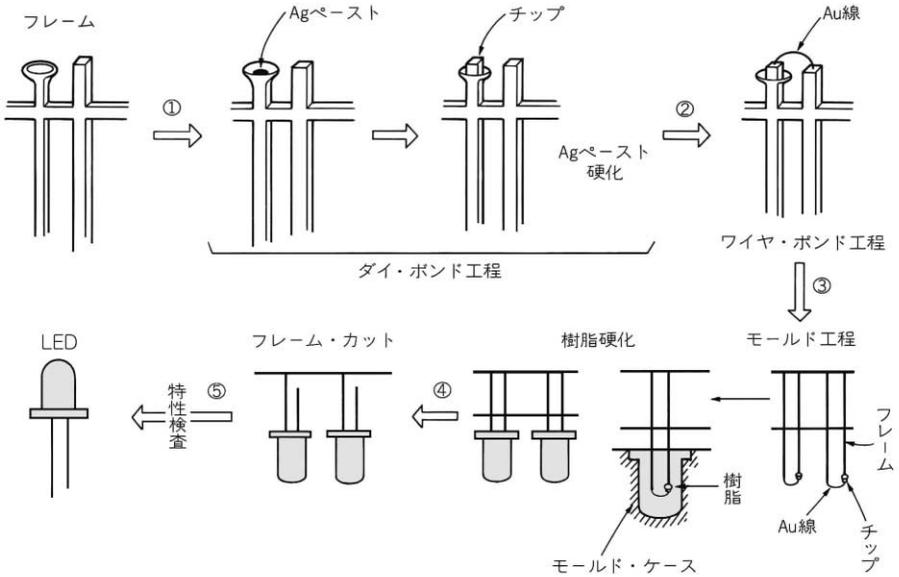


図1-10 リード・タイプ砲弾型LEDのパッケージ・プロセス

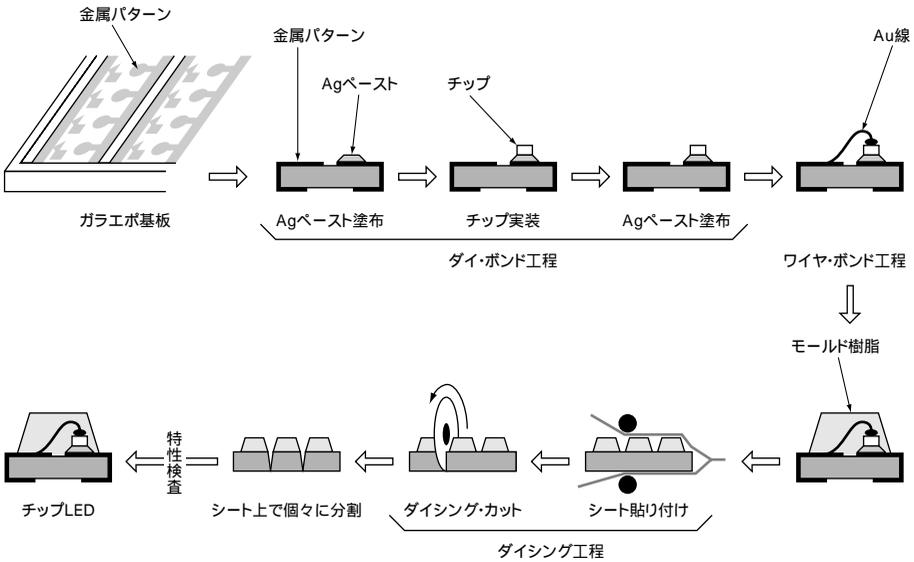


図1-11 チップLEDのパッケージ・プロセス

一例として、オール樹脂のリード・タイプ砲弾型LEDの作成方法を図1-10にしたがって説明します。

### ダイ・ボンド

フレームの先端(カップ部内)にAgペーストをぬります。そのペースト上にチップのn側を下にして乗せ、100以上のオープン内にてペーストを硬化させると、フレームとチップが機械的に固定され、また電気的にもつながったものが得られます。これで、n側はフレームにオーミック接続されました。

### ワイヤ・ボンド

p側の電極上にAuワイヤをつなぎ、次にそのAuワイヤをフレームのチップが乗っていないほうの先端につなぎます。

### 樹脂モールド

チップが乗ったカップ部と、チップとAuワイヤで結ばれたフレーム先端を、樹脂で満たされたモールド・ケースの中に入れます。当然この工程では、ランプの中に精度よくチップが位置するように工夫がされています。

このフレームが入った樹脂をモールド・ケース共オープンに入れ、高温にして硬化させます。その後モールド・ケースから樹脂をぬくとランプ形状ができ上がり、これをさらにオープン中で硬化させ、樹脂を安定なものにします。

### フレーム・カット

フレームの余分な部分をカットします。

### 特性検査

上記の工程まで終わったランプは、電気的・光学的特性をチェックされ、さらに余分なフレームを切り取り製品になります。

もちろん特性検査だけでなく、各工程で種々なチェック(例えば外観検査など)が行われ、高品質なランプができあがります。

LEDの応用として、アミューズメント機器、液晶パネルや一般照明などに使われていた電球の置き換えとして、高出力が要求される用途への展開が急速に進んでいますが、大電流駆動時に電流を増加させても発熱によって光出力の上昇が飽和してしまいます。これを克服するものとして図1-12に示すようなパッケージが実用化されています。リード・フレームからの放熱が最大となるようにリード・フレームや樹脂部を最適化したもので、カメラ付き携帯電話のフラッシュ・ライトやアミューズメント機器など多くの用途に使用されています。

## コラムG 視感度

人間の目は555nmの波長の光(緑色)に対する感度がもっとも良く、それより短い波長の光ほど、またそれより長い波長の光ほど感度が悪くなります。このような光に対する目の感度特性のことを視感度と呼びます。また、555nmの光に対する値を1としたときの視感度を比視感度と呼びます。比視感度曲線を図1-Cに、光の波長と視感度を表1-Bに示します。

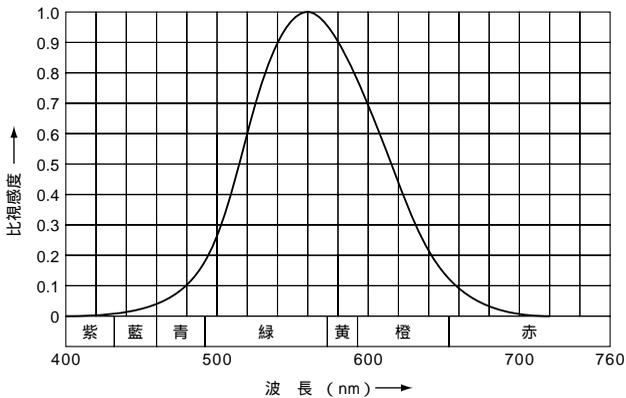


図1-C 比視感度曲線<sup>(1)</sup>

表1-B 光の波長と視感度<sup>(16)</sup>

波長 (nm)	視感度 (1m/W)	波長 (nm)	視感度 (1m/W)	波長 (nm)	視感度 (1m/W)
380	0.05	510	343.0	640	119.0
390	0.13	520	484.0	650	73.0
400	0.27	530	588.0	660	41.4
410	0.32	540	650.0	670	21.3
420	2.73	550	679.0	680	11.6
430	7.91	560	679.0	690	5.59
440	15.7	570	649.0	700	2.78
450	25.9	580	593.0	710	1.43
460	40.9	590	516.0	720	0.716
470	62.1	600	430.0	730	0.355
480	94.3	610	343.0	740	0.170
490	142.0	620	260.0	750	0.082
500	220.0	630	181.0	760	0.041

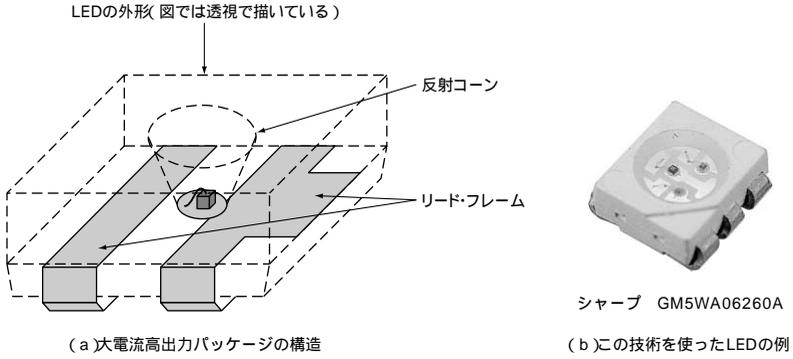


図1-12 大電流高出力パッケージ技術

## 1.5 可視発光ダイオードの特性

### (1) 絶対最大定格<sup>(1)</sup>

絶対最大定格としては、一般に次にかかげる各項が規定されます。

許容損失：周囲温度に対する低減曲線が付加されている

順電流：周囲温度に対する低減曲線が付加されている

尖頭順電流：パルス幅，デューティ比の規定があり，またデューティ比をパラメータとした相関曲線が規定されている

### コラムH 照度<sup>(1)</sup>

光に照らされた面の明るさ = 単位面積当たりに受ける光束

$$E_v = d_v / dA [lm/m^2] \dots\dots\dots (1-F)$$

$d_v$ ：微少面積  $dA$  中への光束

照度の単位は  $lm/m^2$ ，これをルクス (lx) と呼びます。

逆電圧

動作温度

保存温度

はんだ付け温度

絶対最大定格とは定められた条件(主として周囲温度)において、いかなる場合でも超えてはならない定格を意味します。したがって、使用に当たってはこの点についての配慮が必要です。これは、全半導体素子に共通の概念です。これらの点に留意し、定格内で使用すれば破壊することはありませんが、半導体本来の長寿命、高信頼性を十分発揮させるためには、定格値よりも低目の条件で使用するのが適当です。とくに ~ 項については定格値の60%未満とすることが一般的です。

## (2) 電流・電圧特性<sup>(1)</sup>

順方向は、ごく一般的なダイオード特性を持っています。つまり、立ち上がり点までは電圧を印加してもほとんど電流が流れず、電圧が立ち上がり点を超えるとオーム性の導通特性を示します。

立ち上がり点は結晶材料によって相違し、GaAsでは約1.0V、GaAsPおよびGaAlAsではおよそ1.5V(実際には混晶化によって多少異なる)、GaP(赤色)では1.8V、さらにGaP(緑色)では2.0V程度、InGaN(青色、緑色)では3.0Vを超える値となります。

また、電流が流れ始めると内部抵抗により電圧降下を生じます。この値は、推奨動作電流値においておよそ0.3~0.5V程度となります。

逆方向も一般のダイオードと変わりません。逆方向ブレイク・ダウン電圧は十数V~数十Vの値をもちますが、使用条件との関連から、通常3~4V程度の逆電圧における漏洩電流だけが規定されています。

発光ダイオードの電圧・電流特性の一例を、1-13に示します。

## (3) 周囲温度と許容動作電流<sup>(1)</sup>

ダイオードのpn接合に順電流を流すと、損失により接合部が発熱します。この熱は、LEDチップ周囲の封止樹脂と、LEDチップ 接着剤 リードの経路をたどって放散されますが、それぞれの部分およびその接触部はこの熱放散を妨げる熱抵抗をもっています。熱抵抗は発光ダイオードのデバイス形態、構造、大きさ、材質などによって定まる固有の値です。

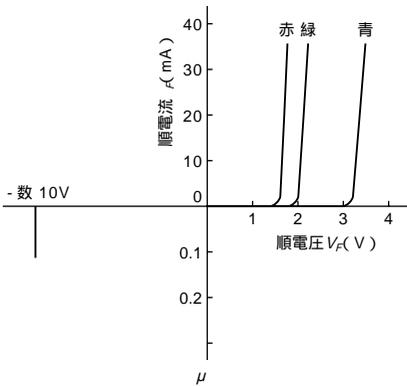


図1-13 発光ダイオードの電圧・電流特性

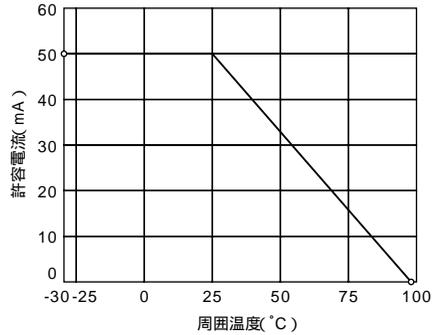


図1-14 周囲温度・許容電流特性

いま熱抵抗が  $R_{th}$  [ /W ] の発光ダイオード・デバイスが,  $P$  [ W ] の電力を消費して動作しているとすれば, そのときの接合部における温度上昇は  $R_{th}$  [ /W ]  $\times$   $P$  [ W ] =  $\Delta T$  [ ] であり, 周囲温度を  $T_a$  [ ] とすれば接合部温度  $T_j$  [ ] は,

$$T_j = T_a + \Delta T$$

となることがわかります. したがって, 接合部温度が絶対最大定格を越えないようにするためには, 周囲温度  $T_a$  が高くなるほど接合部温度上昇を低くおさえる必要があります. 言い換えればデバイスを動作させるとき, 周囲の温度が高いほど消費電力を小さく, つまり動作電流を下げなければならないこととなります. この関係をグラフにしたものが, 周囲温度・許容電流特性です. 一例を図1-14に示します.

#### (4) 発光光度・順電流特性

発光ダイオードは, 順方向電流を流すことにより発光します. 定格内の電流を流した場合, 光度はほぼ電流に比例します. 図1-15に一例を示します. ただし, 使用している発光材料により, その上昇の勾配は変わり, 直線性も変化します.

#### (5) 発光光度・周囲温度特性<sup>(1)</sup>

一般的に光度は図1-16に示すような温度依存性をもっています. これは, 発光再結合の確率が温度に依存するためです. それゆえ, 大きな電力を消費させて接合部温度が上昇

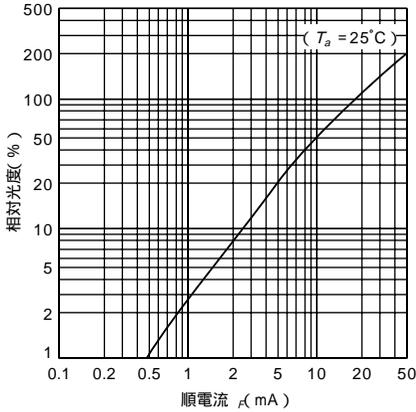


図1-15 光度・順電流特性

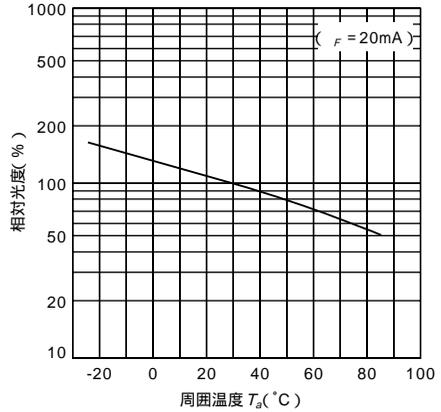


図1-16 光度・周囲温度特性

すれば、図1-16の特性にしたがって光度が低下するので、電流に対して光度が比例しなくなる熱的飽和現象を示します。これを避けるため、応答の速いダイオードでは平均電力を高めずに、高い光度が得られるようにパルス駆動を行っています。

### (6) 発光スペクトル

発光ダイオードの発光する光の波長は、立ち上がり電圧と同様に結晶の種類によって決まります。図1-17に、各種発光ダイオードの発光スペクトルを示します。近年、発光色は赤外から紫外までほぼカバーされ、多色化が進んでいます。スペクトルは単一ピークであり、発光ピークに対してほぼ対称形をなしています。

ピーク時の相対光度が50%になる波長の幅をスペクトル半値幅といい、 $\text{-}$ 族間化合物系の材料においては、通常30~50nm前後です。目に対しては、スペクトルの半値幅が広いほど色がぼやけるように感じ、刺激が少なくなりますが、半値幅が狭い場合はシャープな色彩に見えます。

### (7) 指向特性

発光ダイオードの光度は、樹脂レンズの形状および方向によって異なります。指向特性の例を図1-18に示します。図は、発光光度が最大となることを基準にした指向角による発光光度の相対値です。

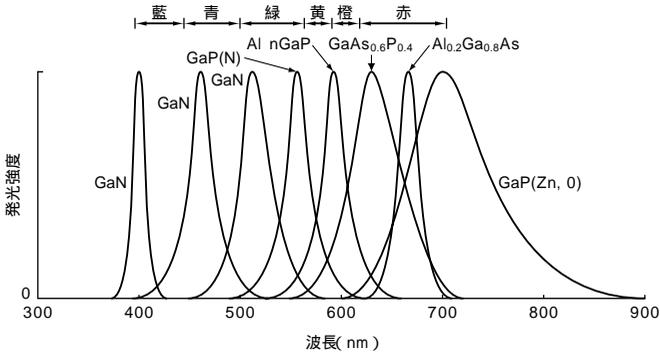


図1-17 発光ダイオードの発光スペクトル

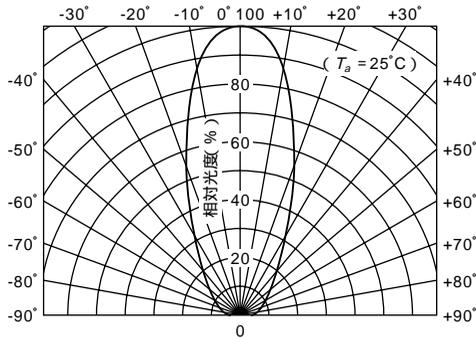


図1-18 指向特性

レンズ付きランプの場合、レンズとチップ位置の設計によって、同じ光度チップでもレンズ効果のある形状を採用し指向性を持たせると、正面方向での相対発光光度は強まります。相対発光光度がピーク値に対し50%になるところの光軸からのずれ角度を指向半値角といい、小さいほど指向性の鋭いことを表します。

### (8) 応答特性

発光ダイオードに電流を流し、発光するまでの時間を応答速度といいます。

一般の発光ダイオードの応答速度は1μs程度ですが、とくに通信用として10ns以下の高速LEDも開発されています。

## 1.6 可視発光ダイオードの基本的な使い方

LED(発光ダイオード)は、小型で少ない消費電流で十分な明るさを得ることができるので、電源ランプなどのインジケータ・ランプなどに広く使われています。

### (1) 可視発光ダイオードを発光させるには

LEDは、ダイオードの一種ですので、整流ダイオードと同じように電流が流れる方向は一方のみになります。+(プラス)側をアノード(A)、-(マイナス)側をカソード(K)と呼びます。逆方向には電流は流れませんが、順方向でも、ある一定の電圧を超えなければ電流は流れません。そして、超えた途端に大電流が流れる特性を持っています。この電圧を立ち上がり電圧または順方向電圧( $V_F$ )と呼んでいます。

この順方向電圧は、発光色によって異なっています(表1-2)。

したがって、LEDを発光させるためには、最低限、順方向電圧以上の電源電圧が必要になります。LEDを適切に光らせるために必要な順方向電流は品種によっても異なりますが、約20mAです。

#### 基本駆動回路

それでは例として、5Vの電源を使って図1-19のような回路でLEDを光らせるときに接続する抵抗値を求めてみましょう。この抵抗を入れないと電源電圧の少しの上昇で大電流が流れてしまい、LEDの明るさ変動やひどい場合はLEDの劣化を招きます。電源は5VですがLEDに電流が流れた状態では両端は $V_F$ を保っています。 $V_F = 2V$ のLEDの場合、電流制限抵抗 $R$ の両端電圧は、

$$5V - V_F = 5V - 2V = 3V$$

LEDに流したい電流は20mAなので、オームの法則から、

表1-2 LEDの順方向電圧

色	順方向電圧( $V_F$ )
赤・橙・黄緑	約1.8 ~ 2.1V
緑・青・白	約3.2 ~ 4.2V



図1-19 LEDの基本駆動回路

$$R = E / I = 3V \div 0.02A = 150$$

となります。

### 調光方法

用途によりLEDの明るさを調節することが必要になります。LEDの明るさを調節するには二つの方法があります。一つは電流値の調節による方法であり、もう一つはパルス幅変調によるものです。

#### 電流値による方法

LEDの明るさは、順方向電流値を変えることにより変化します。

図1-20は光度・順電流特性を示したものです。

#### パルス幅変調による方法

LEDにスイッチを設け、人間が感じることのできる速さ以上でスイッチングすることにより、消えることなく点灯しているように見えます。しかし、実際は電流が流れたり、止まったりの繰り返しのため、電流が流れている時間と止まっている時間を変えることにより明るさを変化させることができます。電流が流れている時間の長さに比例して明るくなります(図1-21)。

また、LEDは同じ製品であっても、順電圧・順電流特性は仕様の範囲内で変化します。したがって、同じ製品に同じ電圧をかけたとしても同じ電流が流れるわけではなく、流れる

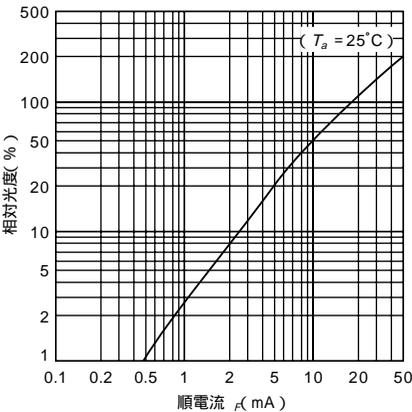


図1-20 光度・順電流特性



図1-21 パルス幅変調による明るさ調節