

B4. 半導体ダイオードデバイスの基礎実験

1. 実験の目的

本実験では、各種半導体デバイスの基本構成要素である pn 接合、及び金属-半導体接合の基本的原理を理解することを目的とする。半導体ダイオードの電流 - 電圧特性、及び接合容量 - 電圧特性を測定しその電気的特性を評価するとともに、その応用デバイスである発光ダイオード(light emitting diode, LED)素子の構造と動作原理を理解し、ディスプレイや白色光源に応用されている青・紫色の短波長 LED と白色 LED の光学特性の評価を行う。また、本実験では最近注目されている SiC、GaN 等のワイドギャップ半導体を測定試料とし、デバイス設計において非常に重要である半導体デバイスの動作機構について学ぶ。

2. pn 接合と金属 半導体接合

2.1 pn 接合と整流特性

結晶的には連続している、n 型と p 型不純物領域が接した領域

pn 界面 (接合の境界)

- 多数キャリア (n 型不純物領域では、電子) が、相対する領域に向かい拡散する
- 不純物密度が急激に変化しており、電荷中性条件は破綻している



外部印加電圧により、pn 領域の電位を制御できる

整流特性

- 電圧の印加方向によって電流に大きな差が現れる
- 動作の本質は電位障壁である

2.2 階段接合の整流作用

(a) 空間電荷層の形成

接合

- n 型中の電子、p 型中の正孔は相対する領域に向かって拡散する (図 1-a)
- 界面付近で再結合が起こり (電荷中性条件が破綻) ドナーイオンとアクセプタイオンが残る



- 空乏層 (キャリアが枯渇している) の形成
- フェルミ準位 E_f が同じ高さになった所 (図 1-b) でキャリア拡散が停止 (平衡状態)

拡散電位

E_{cn} と E_{cp} とのエネルギー差に相当した電位差 ϕ_D

$$\phi_D = \phi_n - \phi_p \quad (1)$$

接合を作った直後

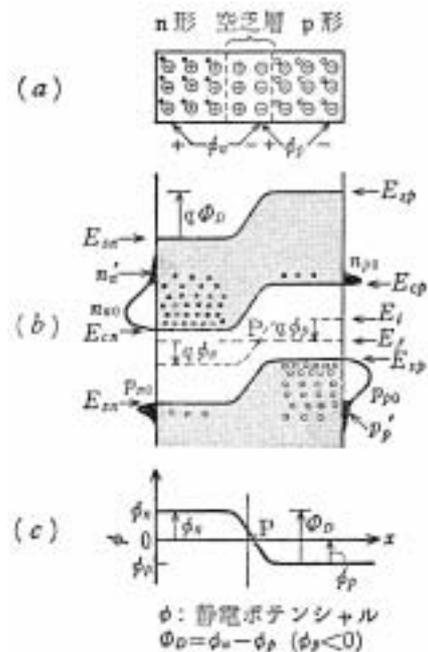


図 1

- 電子は、n 型から p 型の方へと容易に拡散
- 同時に ϕ_D の障壁を形成
- 次第に、この障壁を越える電子数が減少

p 型へ拡散できる n 型伝導体中の電子数は、図 1(b)の陰影部分の面積に相当した n_n' に相当する ($n_{p0} = n_n'$)

(b) 整流作用

整流特性

電圧の印加方向によって電流値が大きく異なる特徴的性質を示す

順方向電圧 $V(>0)$ の印加 (図 2 右上)

- $\phi_D - |V|$ の電圧が、空乏層に加わる
- n 型領域から p 型領域へ多量の電子の拡散が、逆方向に多量の正孔が拡散

↓
順方向電流

逆方向電圧 $V(<0)$ の印加 (図 2 左上)

- $\phi_D + |V|$ の電圧が、空乏層に加わる
- n 型領域からの電子および p 型領域からの正孔の拡散は平衡時よりも更に減少
- 少数キャリア (p 型領域の電子、n 型領域の正孔) は拡散し続ける

↓
逆方向電流

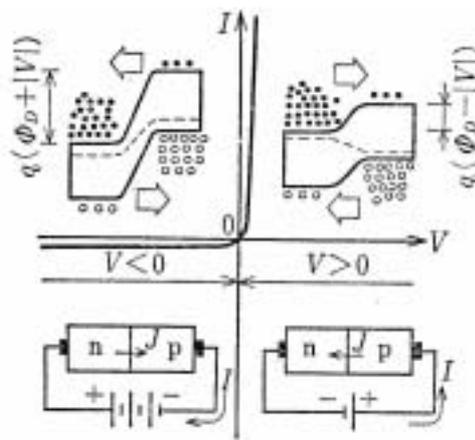


図 2

伝導電流密度 J [A/m^2]

$$J = J_s [\exp(qV/kT) - 1] \quad (2)$$

ここに

$$J_s = -q \left(\frac{D_n}{L_n} n_{p0} + \frac{D_p}{L_p} p_{n0} \right) \quad (3)$$

n_{n0} 、 p_{n0} : n 型領域中の平衡時の電子、正孔密度
 n_{p0} 、 p_{p0} : p 型領域中の平衡時の電子、正孔密度
 D : 拡散係数
 L_n 、 L_p : 電子および正孔の拡散長

2.5 金属 - 半導体 (M/S) 接合の理想整流接触

半導体と金属の接合

ショットキー障壁接触 : 整流作用

オーミック接触 : 整流作用の生じない

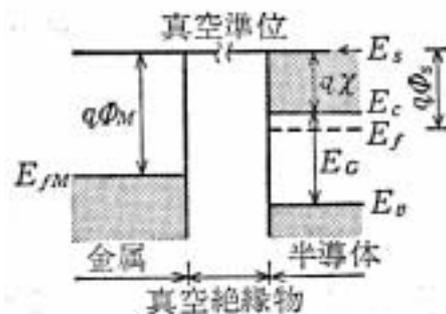


図 3

(a) 障壁の形成

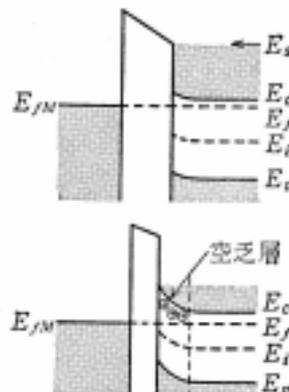
E_s : 真空準位、 E_f : フェルミ準位
 Φ : 仕事関数、 χ : 電子親和力

金属と半導体 ($\Phi_M > \Phi_S$, n型半導体) を近付ける

- 半導体から金属の方へ電子が流れ込む
- 半導体が正に帯電
- 伝導帯の底 E_c が曲がる (接触電位差 ϕ_D)
- 空乏層が $x=0$ から l_0 まで広がる
- 電子への障壁
 金属→半導体: $q\phi_D$ 、半導体→金属: $q\phi_B$
 ϕ_B : ショットキー障壁高さ

$$\phi_D = \Phi_M - \Phi_S = q\phi_B - (E_C - E_f)/q \quad (4)$$

$$\phi_B = \Phi_M - \chi \quad (5)$$



(c) 整流作用

順方向電圧 (>0)の印加

- 障壁 ϕ_B は不変
- 半導体の伝導電子、正孔に対する障壁は $\phi_D - |V|$ に低下
 ↓
 電子、正孔電流が増加

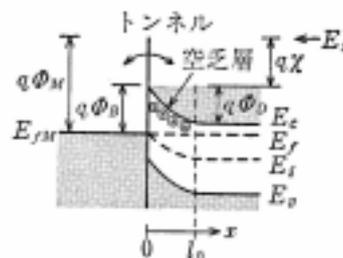


図 4

逆方向電圧 (<0)の印加

- 障壁 ϕ_B は不変
- 半導体の伝導電子、正孔に対する障壁は $\phi_D + |V|$ に増加
 ↓
 電流はほとんど流れない

(d) 空乏層容量

空間電荷層: 半導体側へ広がる
 空間電荷密度は方形分布
 負の電荷: 金属表面にデルタ関数状に蓄積

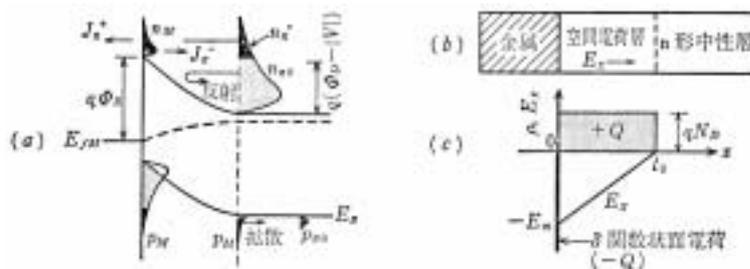


図 5

ガウスの定理 (最大電界: E_m , n 型半導体の不純物密度: N_D)

$$E_m = \frac{qN_D l_0}{\varepsilon} \quad (6)$$

順方向バイアス電圧:

$$\Phi_D - V = \frac{1}{2} E_m l_0 = \frac{1}{2} \cdot \frac{qN_D l_0^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

空間電荷表面密度 Q [C/cm²]

$$Q = qN_D l_0 = \sqrt{2q\varepsilon N_D (\Phi_D - V)} \quad (8)$$

空乏層容量 C

$$C = \frac{dQ}{d(-V)} = \sqrt{\frac{q\varepsilon N_D}{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\Phi_D - V}} \quad [\text{F/cm}^2] \quad (9)$$

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2}{q\varepsilon N_D} \cdot (\Phi_D - V) \quad (10)$$

2.6 理想金属 - 半導体整流接触の電圧電流特性

(a) 電圧依存性

n_M : $x=+0$ における電子密度

n_n' : $x=l_0$ における、障壁を越えるエネルギーを持つ電子の密度

$$n = N_C \exp[-(E_c - E_f)/kT], \quad N_C = 2(2\pi m_n kT/h^2)^{3/2} \quad (11)$$

$$n_M = N_C \exp(-q\Phi_B/kT) = n_{n0} \exp(-q\Phi_D/kT) \quad (12)$$

無バイアス電圧 $\rightarrow n_n' = n_M$

$$|J_n^+| = |J_n^-| = K n_{n0} \exp(-q\Phi_D/kT) \quad (13)$$

J_n^- : 金属から半導体への電子流による電流

J_n^+ : 半導体から金属への電子流による電流

K : 比例定数

バイアス電圧 V

$$n_n' = n_{n0} \exp(-q(\Phi_D - V)/kT) \quad (14)$$

電流 J_n

$$J_n = J_n^+ + J_n^- = K n_{n0} \exp(-q\Phi_D/kT) \cdot [\exp(qV/kT) - 1] \quad (15)$$

$$J_n = J_{n0} [\exp(qV/kT) - 1] \quad (16)$$

pn 接合の電圧依存の式(2)と同じ式

しかし、pn 接合では、電流値を決定していたのは中性領域中の拡散効果であったが、金属半導体接触では、電流値を決めているのは空乏層領域と金属・半導体界面の電位障壁である

空乏層内の電界の強さが $10^6 \sim 10^7$ V/m の範囲にある Ge、Si、GaAs のショットキー障壁接触の電子電流は、熱電子放出理論で近似的に与えても良い

$$J_{n0} = A^* T^2 \exp(-q \Phi_B / kT) \quad (17)$$

A^* : リチャードソン・ダッシュマン定数

$$A^* = 4\pi q m_n k^2 / h^3 = 1.20 \times 10^6 (m_n/m) [A/K^2 \cdot m^2] \quad (18)$$

Si : 120 [A/K²·cm²], SiC : 194 [A/K²·cm²],
ダイヤモンド : 90 [A/K²·cm²]

漏れ電流などがある場合、

$$J_n = J_{n0} [\exp(qV/nkT) - 1] \quad (19)$$

n : 理想因子

4.3 金属 - 半導体オーミック接触

金属と半導体との仕事関数の大小関係 : $\Phi_M < \Phi_S$

オーミック接触

金属 - 半導体界面に、電子に対する障壁がない

	$\Phi_M > \Phi_S$	$\Phi_M < \Phi_S$
n 型	整流特性	オーミック特性
p 型	オーミック特性	整流特性

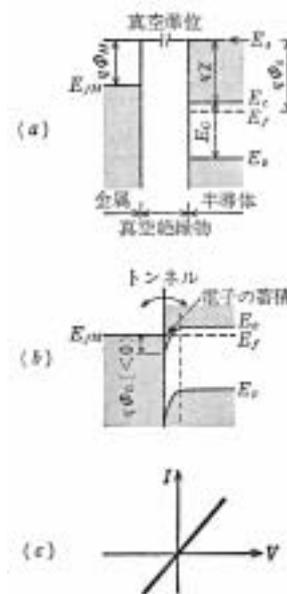


図 6

3. 発光ダイオード (LED)

3.1 構造と動作原理

半導体の pn 接合に順方向バイアスを加えると、電子は p 側に、正孔は n 側に注入される (過剰少数キャリアの注入)。便宜上、ここでは p 側の伝導帯内の電子について述べる (n 側の正孔についても、同様の議論が成り立つ)。少数キャリアの寿命程度の平均的な時間が経つと、伝導帯内の電子は価電子帯内の正孔と再結合する。この再結合の際に、電子 - 正孔系のエネルギーは、光子 (光子) あるいはフォノン (格子振動) の形で放出される。多くの直接遷移型の半導体では、効率よく光子を取り出すことができる。この方法により、**直流電流のエネルギーから光エネルギーへの変換**が可能となる。この原理を利用した発光素子を発光ダイオード (light emitting diode, LED) とよぶ。

放出される光子エネルギーは、バンド間のエネルギーにほぼ等しいことから、バンドギャップエネルギーの異なる半導体を用いることで、様々な波長の光を発する素子が作製できる。人間の目に見える可視光線の波長は、ほぼ 380nm から 780nm くらいまでである。図 7 に、光の波長に対する可視光発光素子の半導体材料の開発状況を示す。長い間、GaAs、GaP などを基にした赤から緑色の発光素子のみが実用化していたが、GaN 系半導体の技術革新により、今日では短波長の青・紫色の半導体も製品として登場するようになった。

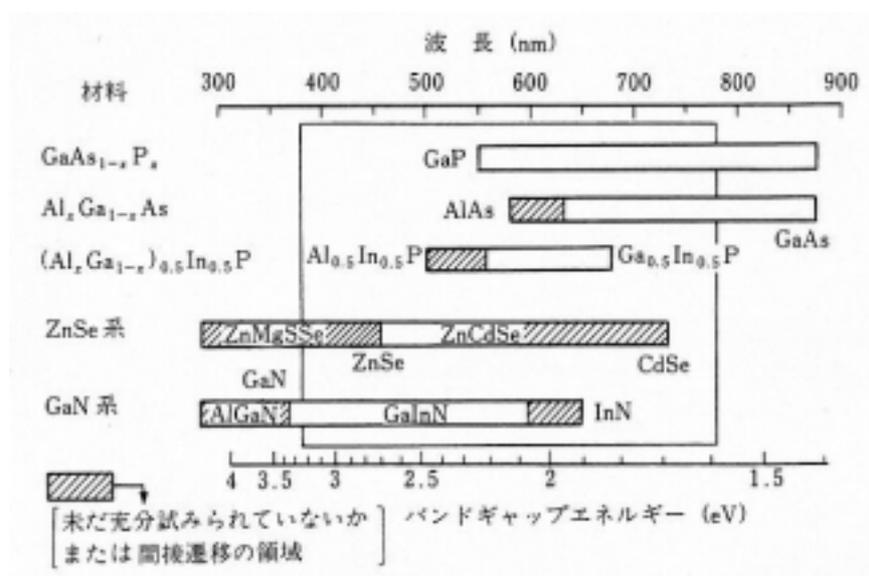


図 7 可視光発光素子の材料と開発状況

3.2 短波長 LED の現状と、白色 LED 照明への応用

半導体中の伝導帯と価電子帯の間に非輻射再結合準位、すなわち欠陥準位が形成された場合、前述してきた帯間再結合発光が大きく妨げられることになる。この準位の形成は、作製する半導体結晶の品質に大きく左右されている。赤色 LED に用いられる III-V 族半導体の AlGaAs 、緑色 LED の GaP は、それぞれ融液から成長させた GaAs 、 GaP 結晶を素子基板として利用することができるため、基板上に作製した LED 素子は高品質で欠陥準位が少なく、それぞれの色を効率良く発生させることができる。

一方、青色 LED として期待される GaN は単結晶基板の作製が困難なことから、格子定数の近いサファイア (Al_2O_3) が基板として利用されてきた。しかしながら、現実には格子定数不整合から生じる欠陥が大きな問題となり、青色発光素子の実用化を阻む主要因となっていた。このような中、サファイア基板上に**低温堆積緩衝層（低温バッファ層）**とよばれる非晶質性中間層を形成させることで、その上に成長する GaN 薄膜の品質が飛躍的に向上するという事実が見いだされた。この革新的な技術（ブレークスルー）を背景に GaN 系 LED の素子開発が加速し、 p 型化の成功、高効率発光のための**ダブルヘテロ接合構造（2重ヘテロ接合構造、DH 構造）**などの技術開発を経て、90 年代に青色 LED が製品化されるに至った。

バンドギャップの小さい材料（発光層）を大きな材料で挟む構造をダブルヘテロ接合構造とよび、図 8 に GaInN を発光層にした例を示す。ここでは、 n 型から注入された電子と p 型から注入された正孔が、エネルギー障壁によって発光層内に閉じこめられ、効率良く発光に寄与する。さらに、両側の層においては、発生した光の自己吸収が少なく、一種の窓として機能するため、効率よく光が取り出せるといった特徴を持つ。

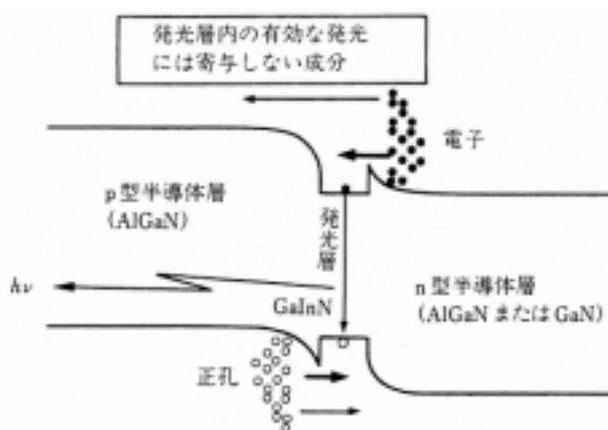


図 8 発光層を挟んだ p 型半導体層および n 型半導体層のダブルヘテロ接合構造

図 9 に、1993 年に日亜化学工業（株）の中村らによって報告された $\text{InGaN}/\text{AlGaIn}$ ダブルヘテロ接合構造青色 LED のチップ構造を示す。この構造は、最下層のサファイア基板から有機金属気相成長法（MOCVD 法）によって、薄膜を堆積して作製する。発光層として

In_{0.06}Ga_{0.94}N 層を設け、その両側に AlGa_N の n 型、p 型のダブルヘテロ構造を作製している。n 型の作製には Si が添加され、p 型の作製には Mg を添加した後に、熱的アニーリングが施されている。サファイア基板は導電性がないため、多層膜を形成した後に右端の部分を除去し、n 側の電極を取り付けている。この LED チップをリードフレーム上にマウント・接続した後に、透明のエポキシ樹脂で周囲を封止して LED 素子が完成する。

青色 LED は発光機構によって、2 通りのタイプに分けられる。一つは InGa_N 発光層に不純物をドーピングし、バンドギャップ中に不純物準位を形成し、これを介してキャリアを再結合させる **D-A 対 (ドナーアクセプタペア) 発光** で、もうひとつは不純物のドーピングは行わず、伝導帯の電子と価電子帯の正孔を直接再結合させる **バンド間発光 (帯間発光)** である。この両方のタイプが製造されているが、バンド間発光タイプの方が発光スペクトルの幅が鋭く、発光効率も高いなど特性的には優れた点が多い。バンド間発光のものはスペクトルの半値幅が 30nm 程度、D-A 対発光タイプのもは 70nm 程度になる。

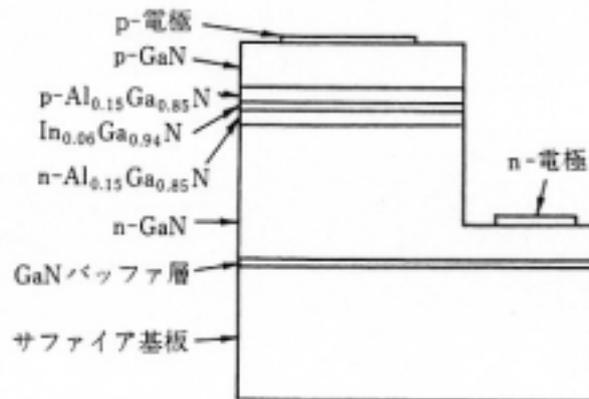


図 9 InGa_N / AlGa_N ダブルヘテロ構造青色 LED

青色 LED は、その発光色そのものを利用した青色照明、信号機等への応用だけでなく、光の 3 原色の一つとしての重要な意味を有する。図 10 は色度図とよばれるもので、馬蹄形の曲線は単色光の刺激を表すスペクトル軌跡で、数字は nm 単位で表した波長である (図 3 の波長と対応)。その両端 380nm (x=0.1741, y=0.0050) と 780nm (x=0.7347, y=0.2653) の点を結ぶ線分を純紫軌跡とよぶ。この色度図の頂点に位置する赤・緑・青の 3 原色を適当な比率で加法混色することで、実在のあらゆる色度を表現できるため、フルカラーディスプレイへの応用が可能となる。さらに、色度図の中心に位置する白色を出す発光素子は、白熱電球や蛍光灯に置き換わる新しい光源として注目されている。半導体材料で構成される白色 LED は、ガラス管タイプの光源の単なる置き換えではなく、小型・軽量化、消費電力の低減、長寿命・高信頼性の点で優れていることから、画期的な光源と言われており、照明革命の引き金とみなされている。

LED を用いて白色光を得るために、いくつかの方式が提案されている。一つは赤・緑・

青(RGB) または青緑色と黄橙色の2、3種類のLEDを同時に点灯させる方法である。もう一つは、青色や紫外の光を放射するLEDを励起光源として用い、蛍光体を光らせる方法である。一般的に、3原色LEDの開発の延長として白色が位置づけられているため、前者のRGB同時点灯が主流と考えられがちである。しかしながら、この方式では各LEDの駆動電圧や発光出力に違いがあり、更に温度特性や素子寿命にも違いがあるなど、実用化に向けて多くの課題を残している。市場に流通している白色LEDは、InGaNの青色LEDとCeを添加したYAGの黄色蛍光体を組み合わせたものが多い。

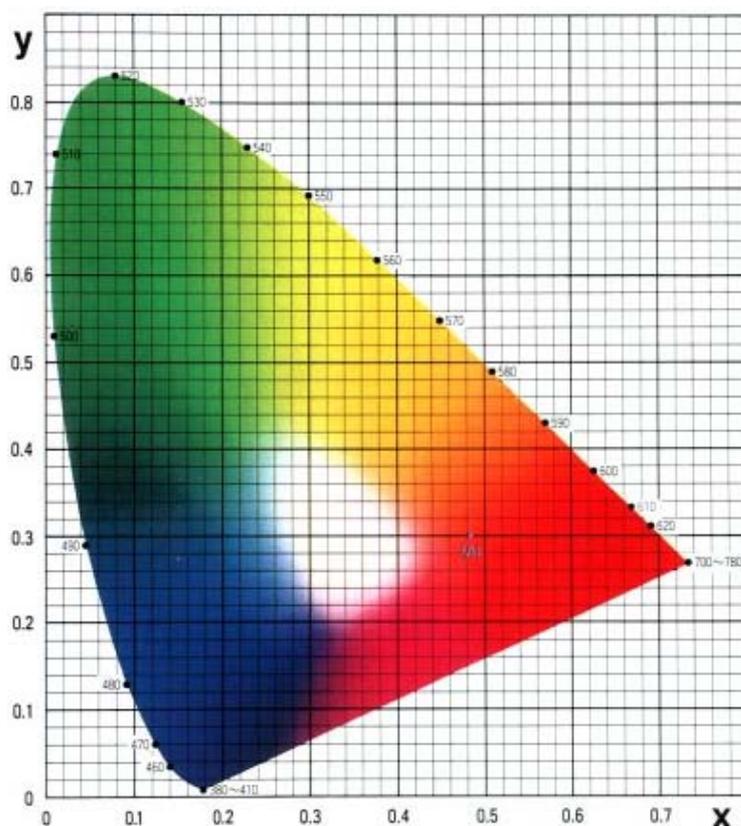


図 10 X Y 表色系色度図 (JIS Z8110)

閉曲線上の数字は nm 単位で表した波長を示す。

これらの白色光源は、見た目では発光方式の判定が困難であるが、発光スペクトルの測定によって、その発光方式を推定することができる。図 11 に 3 原色 LED 同時発光方式の白色光源のスペクトルを示す。この方式は、3 つの波長に強い発光強度が得られるのが特徴である。

一方、図 12 は、InGaN 系の青色 LED と黄色の蛍光体 ($Y_3Al_5O_{12}:Ce$, YAG:Ce) を用いた白色 LED のスペクトルである。白色 LED の構造は、従来の青色 LED の発光源のチップ表面に蛍光体が薄くコーティングされているものである。スペクトルの特徴としては、青色 LED の光の半値幅 (スペクトル幅) が狭く、蛍光体の光は 570nm をピークとするブ

ロードなスペクトルとなっている。両者の足し合わせによって、青から緑、赤の各成分を含むものとなり、白色光が得られる。

ここで述べた白色 LED、特に後者の黄色蛍光体を組み合わせた LED は、車載照明、液晶バックライトなどの分野で実用化されており、最近では白熱電球、ハロゲン電球をしのぐ光源効率をもつものも誕生し始めている。また、新しい発光方式の白色 LED も登場し始め、色の再現性を高める研究が進められている。白色 LED は、今後より身近な照明光源として普及するので、本実験を通して動作原理、開発状況について理解を深めて欲しい。

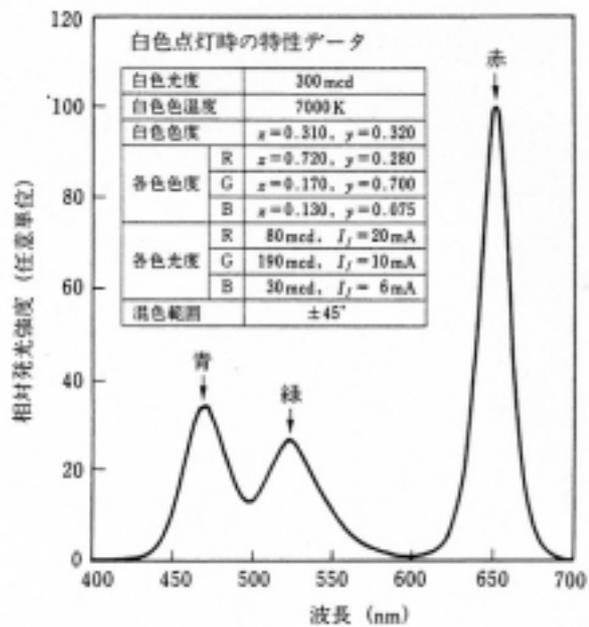


図 11 3 原色同時発光方式の白色光のスペクトル

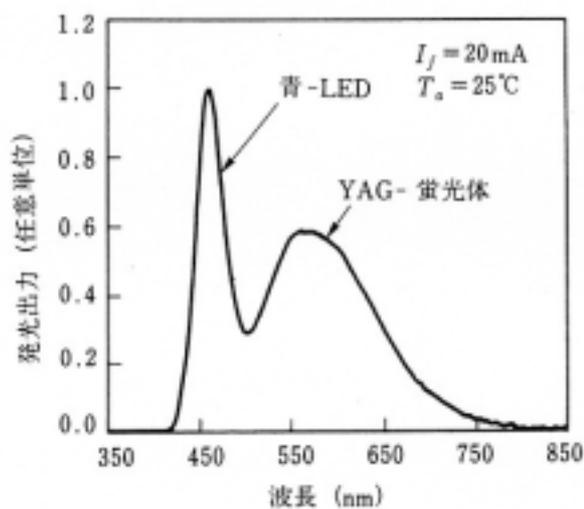


図 12 GaN 系青色 LED - YAG 蛍光体方式の白色 LED の発光スペクトル

4 実験

4.1 電流 - 電圧特性

SiC について電流-電圧特性を測定し、電圧(V)に対する電流密度(J)の片対数プロットを行う。図 13 に特性の 1 例を示す。順方向特性の直線性を確認する。

測定範囲

	測定電圧	電圧間隔
SiC	-160 ~ 160 mV	10 mV

*素子面積 : $1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$

[注意事項]

ダイオードの接続向きを間違えないように注意する。また、電圧変更時には operate から standby 状態に切り替えること。

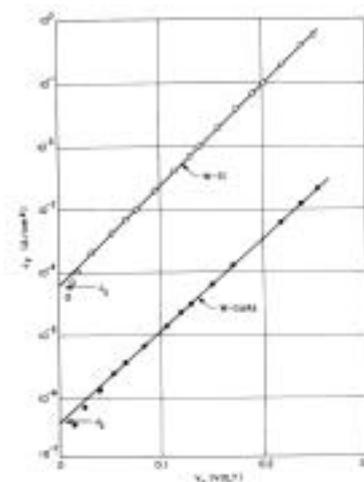


図 13

4.2 接合容量の測定

SiC について容量-電圧特性を測定し、電圧(V)に対する容量($1/C^2$)のプロットを行う。図 14 に特性の 1 例を示す。特性の直線性を確認する。

測定範囲

	測定電圧	電圧間隔
SiC	0 ~ 3000 mV	200 mV

*素子面積 : $1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$

[注意事項]

ダイオードの接続向きを間違えないように注意する。

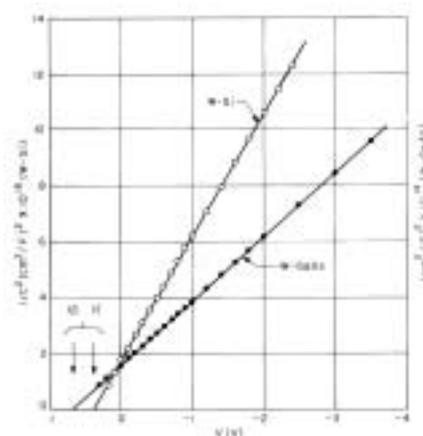


図 14

4.3 青色 LED の発光

実験には、次の仕様の豊田合成(株)製の GaN 系青色 LED (TG ブルー 5)を用いる。

Item	Value
型番	E1L51-3B0A2-02
最大許容損失	120mW
最大順方向電流	30mA
最大逆方向電圧	5V

LED に最大順方向以上の電流を流すと焼損の原因となるため、図 15 に示すように LED と直列に電流制限抵抗を接続する必要がある。一般的に、乾電池のように電圧が一定の場合には安価な抵抗を、電圧が変動する場合には定電流ダイオード (CRD) を使用する。ここでは、LED の定格から電流制限抵抗値を決定し、図 9 の回路を組む。制限抵抗の計算は、

$$\text{抵抗値 (} \Omega \text{)} = (\text{電源電圧} - \text{LED 電圧}) \div \text{電流}$$

より抵抗値を求め、この計算結果より 10~20% 大きな抵抗を接続する。

下記注意事項を把握した上で電池を除いた回路を配線し、担当教員の確認の得た後に電池を取り付け、青色 LED を点灯させる。

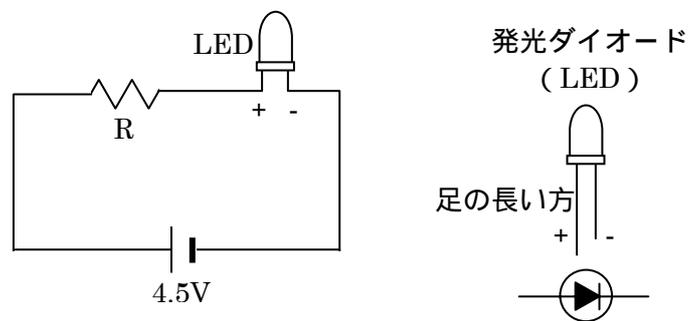


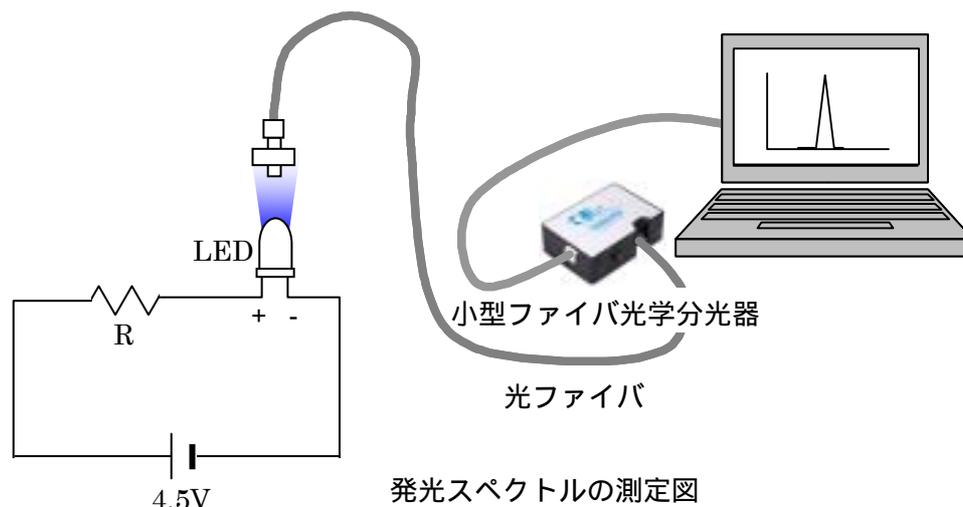
図 15 LED 基本回路

[注意事項]

- ・ 半田コテは高温になるため、火傷や火事の原因となります。取扱には十分注意を払うこと。
- ・ LED は静電気に弱いので、半田付けの前にコテ先をアースすること。また、熱にも弱いので、40W コテ (350 以下) の場合で、5 秒以内、1 回で行うこと。
- ・ LED は極性を有しているので、図 8 の極性を確認の上配線すること。

4.4 青色 LED のスペクトル測定

4.3 で発光させた LED の光を、小型ファイバ光学分光器 (Ocean Optics Inc. 製 USB2000) を用いてスペクトル分析する。光の取り込みは、図 16 に示すように光ファイバを用いる。この時、光ファイバを折り曲げないように、注意すること。ファイバ分光器の使用法については、指導教員の指示に従うこと。



4.5 白色 LED のスペクトル測定

チップ型の GaN 系白色 LED 素子を、レギュレータ IC (LM317LZ) を用いた 20mA 定電流 LED テスター (創造科学 (有) 製、CR-01) にセットし、白色光を点灯させる。4.4 と同様に発光スペクトルの測定を行う。

4.6 検討事項

- i) 電流 - 電圧特性から、ショットキー障壁高さ、 n 値を求めよ。
- ii) 容量 - 電圧特性から、素子の拡散電位、及び不純物濃度を求めよ。
- iii) 測定した SiC ショットキーダイオードのバンドダイアグラム (ゼロ電圧状態) を示せ。
- iv) 青色発光素子の発光スペクトルから、強度が最大となる波長および半値幅 (Full Width at Half Maximum) を求めよ。次に、その波長の光エネルギーを eV 単位で表現し、GaN のバンドギャップエネルギーと比較してその違い、また発光方式について考察せよ。特に、異なっている理由 (意図や手法) などについて考えること。
- v) 白色 LED の発光スペクトルから発光方式を推定し、その特徴、長所と短所について述べよ。さらに、将来開発されるであろう新方式の白色 LED について、自由に自分の見解を述べよ。

参考文献

1. S.M.ジュー著 南日、川辺、長谷川訳「半導体デバイス -基礎理論とプロセス技術 -」
2. 犬石嘉雄、浜川圭弘、白藤純嗣著「半導体物性 I、II」
3. 古川静二郎著「半導体デバイス」
4. 赤崎勇編著「青色発光デバイスの魅力」工業調査会
5. 白藤純嗣著「半導体工学」共立出版
6. 板東完治・楠瀬健 応用物理 第 71 巻, 第 12 号, p.1518, (2002)
7. 田口常正 電子情報通信学会論文誌 C Vol.J84-C, No.11, p.1040 (2001)
8. 創造科学 (有) オーディオ Q 事業部 Web サイト <http://www.audio-q.com>