

1 実験条件

実験日時 2010（平成 22）年 6 月 14 日木曜日 午後 1 時～午後 4 時

天気 晴れ

気圧・気温・湿度 省略

2 実験の目的

半導体デバイスの基礎である pn 接合および金属－半導体接合の理解と、半導体ダイオードの特性の測定・評価を行うことを目的とする。また、その応用デバイスである発光ダイオードの構造と動作原理を理解し、実験で光学特性を評価する。加えて、近年半導体デバイスの材料として注目されている SiC・GaN 等のワイドギャップ半導体についても考察する。

3 実験の原理

3.1 pn 接合と金属－半導体接合

3.1.1 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を考える。

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

3.1.2 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）

- 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

伝導電流密度 J [A/m^2] は

$$J = J_s \left[\exp \left(\frac{qV}{k_B T} \right) - 1 \right] \quad (2)$$

ただし

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

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

3.1.3 金属-半導体 (M/S) 接合の理想整流接触

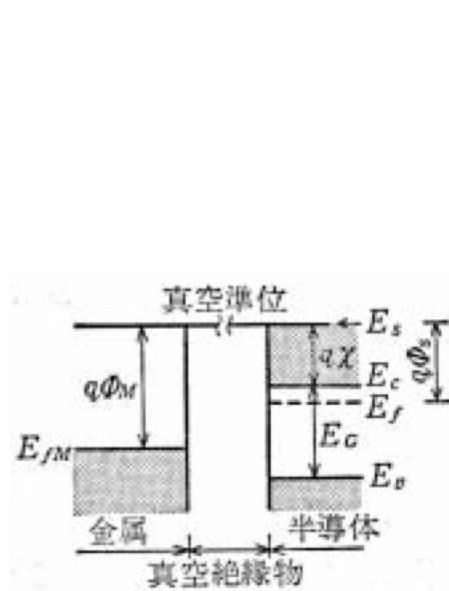


図3 ショットキー接合の模式図

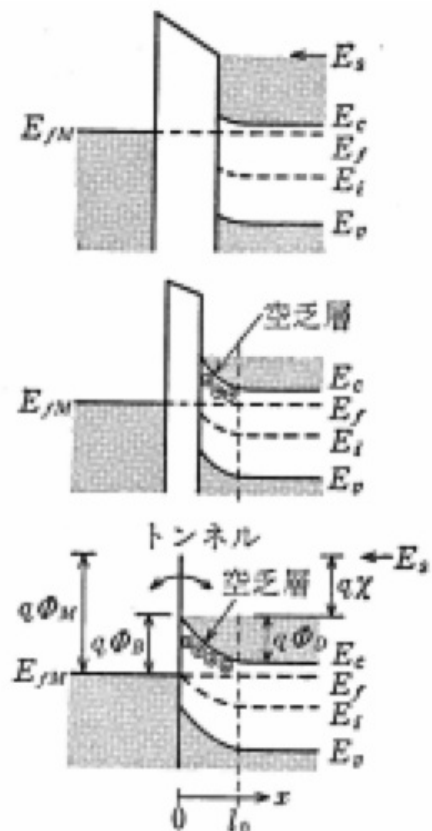


図4 ショットキー接合の障壁

半導体と金属の接合 (図3)

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

- (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 : 電子親和力とすると、金属と半導体 ($\Phi_M > \Phi_S$ 、n 型半導体) を近づける (図 4)

↓

- 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 : $q\Phi_B$ 、ただし Φ_B : ショットキー障壁高さ

$$\Phi_D = \Phi_M - \Phi_S = q\Phi_B - (E_c - E_f)/q \quad (4)$$

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

- (b) 整流作用順方向電圧 $V(>0)$ 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

逆方向電圧 $V(<0)$ 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

- (c) 空乏層容量

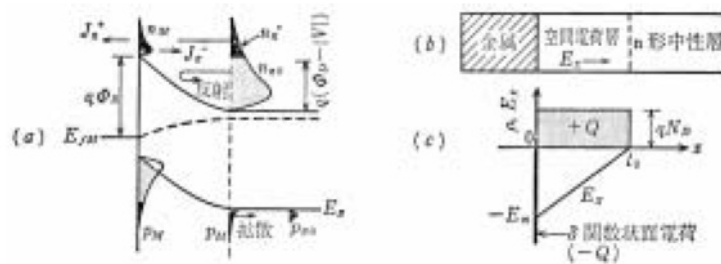


図 5 電荷密度分布

図 5 に空乏層付近の電荷密度分布を示す。

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

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)

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

順方向バイアス電圧：V

$$\Phi_D - V = \frac{1}{2} E_m l_0 = \frac{1}{2} \frac{q N_D}{\epsilon} l_0^2 \quad (7)$$

空間電荷表面密度 Q [C/cm²]

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

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

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

3.1.4 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=l₀ における、障壁を越えるエネルギーを持つ電子の密度

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

$$n_M = N_c \exp(-q\Phi_B/k_B T) = n_{n0} \exp(-q\Phi_D/k_B T) \quad (12)$$

無バイアス電圧： $n'_n = n_M$

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

$|J_n^+|$ ：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：

$$n'_n = n_{n0} \exp\{-q(\Phi_D - V)/k_B T\} \quad (14)$$

電流 J_n

$$J_n = J_n^+ + J_n^- = K n_{n0} \exp(-q\Phi_B/k_B T) [\exp(qV/k_B T) - 1] \quad (15)$$

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

これは pn 接合の電圧依存の式 (2) と同じ式である。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 106~107V/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。

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

ただし A*：リチャードソン・ダッシュマン定数であり、

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

具体的には SiC で 194[A/K² · m²] である。

漏れ電流などがある場合、n：理想因子を用いて

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

と表される。

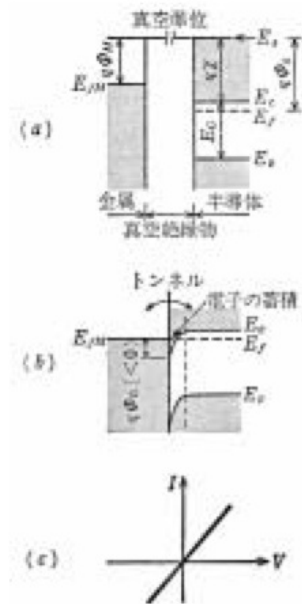


図6 ショットキー障壁付近のエネルギーバンド図

表1 Φ_M と Φ_S の大小関係による半導体接触特性の分類

	$\Phi_M > \Phi_S$	$\Phi_M < \Phi_S$
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

3.1.5 金属－半導体オーミック接触

表1より、金属と半導体との仕事関数の大小関係： $\Phi_M < \Phi_S$ のときオーミック接触
金属－半導体界面の電子に対する障壁がなくなる。

3.2 発光ダイオード (LED)

3.2.1 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、フォトン（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、効率よくフォトン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。

放出されるフォトンエネルギーは、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 などに基づい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。

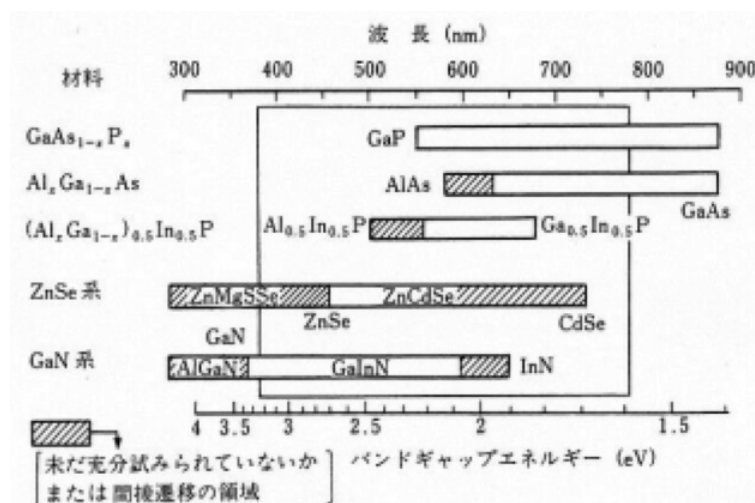


図 7 可視光発光素子の材料と開発状況

3.2.2 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の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 (ブレイクスルー) 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 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 InGaInN / AlGaInN ダブルヘテロ構造青色 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 AlGaInN の n 型、p

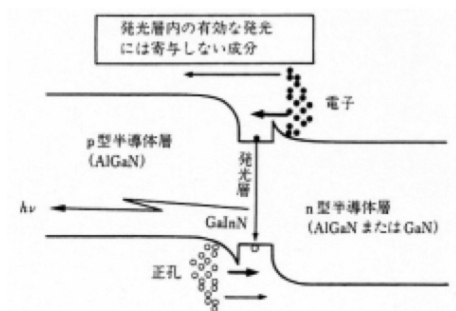


図 8 発光層を挟んだ p 型半導体層および n 型半導体層のダブルヘテロ接合構造

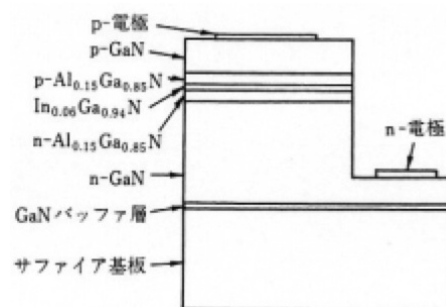


図 9 InGaIn / AlGaIn ダブルヘテロ構造青色 LED

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 InGaIn 発光層に不純物をドーブし、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ブは行わず、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 対発光タイプのものは 70nm 程度になる。

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わ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、InGaIn 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。

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

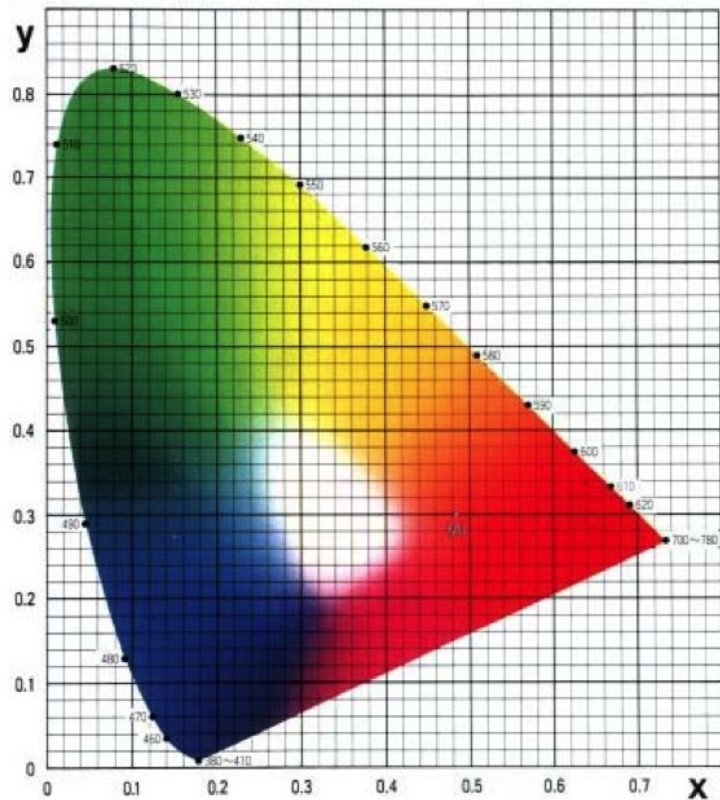


図 10 XY 表色系色度図 (JIS Z8110) 閉曲線上の数字は nm 単位で表した波長を示す

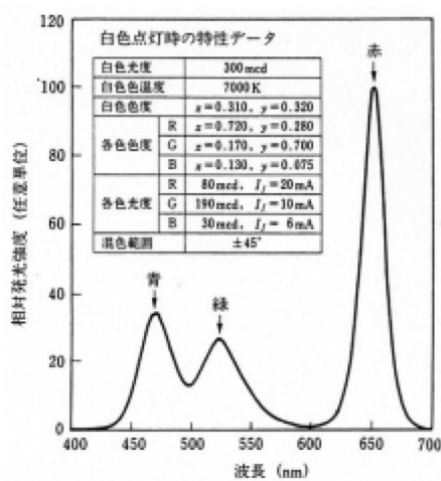


図 11 3 原色同時発光方式の白色光のスペクトル

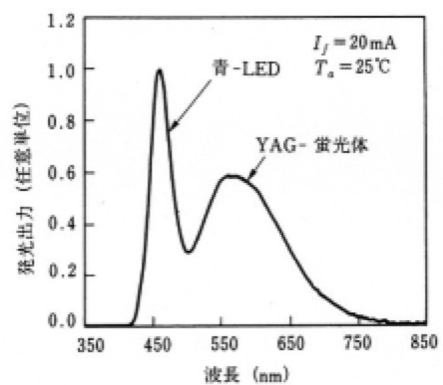


図 12 GaN 系青色 LED-YAG 蛍光体方式の白色 LED の発光スペクトル

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、色の再現性などを高める研究が進められている。

4 使用器具及び装置

- SiC ダイオード
- 青色 LED
- 白色 LED
- デジタルマルチメーター
- 直流電圧源
- 小型ファイバ光学分光器
- コンピュータ
- 半田ごて・半田・固定抵抗・電池ボックス・単 3 電池 3 本・ユニバーサル基板
- 配線
- 筆記用具・グラフ用紙・実験レジュメ・実験ノート・カメラ

5 実験結果

- 1 SiC ダイオードについて電流-電圧特性を測定したところ表 2 のようになった。
これをもとに、電流密度 J を $J[A/m^2] = I[A]/S[m^2]$ 、ただし $S = 1 \times 10^{-7}[m^2]$ で求め、電圧 V に対する電流密度 J の片対数プロットを行ったものを図 13 に示す。グラフより、電圧が 80V 以上のある程度高い領域では、直線になっていることが確認できた。
- 2 SiC ダイオードについて容量-電圧特性を測定したところ、表 3 のようになった。
これをもとに、単位面積当たりの容量 C を $C[F/m^2] = C'[F]/S[m^2]$ 、ただし $S = 1 \times 10^{-7}[m^2]$ で求め、電圧 V に対する容量 $\frac{1}{C^2}$ のプロットを行ったものを図 14 に示す。グラフより、電圧が 1000mV 以上の領域では特性が直線になることが確認できた。
- 3 実験には、豊田合成（株）製の GaN 系青色 LED (TG ブルー $\phi 5$) を用いた。型番は E1L51-3B0A2-02、最大許容損失は 120mW、最大順方向電流は 30mA、最大逆方向電圧は 5V であった。実験回路を図 15 に、発光スペクトルの測定図を図 16 に示す。LED に 20mA 流すように電流制限抵抗を決めると、LED での電圧降下が 3.6V であることに注意して、

$$R = \frac{4.5 - 3.6}{0.02} = 45\Omega \quad (20)$$

回路では、この計算結果よりも 10% 大きな 51 Ω 抵抗を使用した。ハンダ付けで各素子を基板に実装したあと電源を入れると青色 LED が点灯したことを確認した。

表 2 実験 1：電流-電圧特性

電圧V[mV]	電流I[A]	電流密度J[A/m ²]
-160	-4.104E-07	-4.104E+00
-150	-4.085E-07	-4.085E+00
-140	-4.066E-07	-4.066E+00
-130	-4.044E-07	-4.044E+00
-120	-4.016E-07	-4.016E+00
-110	-3.985E-07	-3.985E+00
-100	-3.996E-07	-3.996E+00
-90	-3.889E-04	-3.889E+03
-80	-3.820E-07	-3.820E+00
-70	-3.726E-07	-3.726E+00
-60	-3.580E-07	-3.580E+00
-50	-3.394E-07	-3.394E+00
-40	-3.095E-07	-3.095E+00
-30	-2.693E-07	-2.693E+00
-20	-2.143E-07	-2.143E+00
-10	-1.243E-07	-1.243E+00
0	-6.000E-09	-6.000E-02
10	1.600E-07	1.600E+00
20	4.370E-07	4.370E+00
30	7.970E-07	7.970E+00
40	1.300E-06	1.300E+01
50	2.120E-06	2.120E+01
60	3.160E-06	3.160E+01
70	4.640E-06	4.640E+01
80	6.850E-06	6.850E+01
90	9.560E-06	9.560E+01
100	1.352E-05	1.352E+02
110	1.806E-05	1.806E+02
120	2.364E-05	2.364E+02
130	3.111E-05	3.111E+02
140	3.910E-05	3.910E+02
150	4.807E-05	4.807E+02
160	5.912E-05	5.912E+02

表 3 実験 2：接合容量-電圧特性

電圧V[mV]	接合容量C(実測値)[F]	接合容量C(単位面積当たり)[F/m ²]	1/C ² [m ⁴ /F ²]
0	2.157E-10	2.157E-03	2.149E+05
200	2.148E-10	2.148E-03	2.167E+05
400	2.155E-10	2.155E-03	2.153E+05
600	2.156E-10	2.156E-03	2.151E+05
800	2.155E-10	2.155E-03	2.153E+05
1000	1.223E-10	1.223E-03	6.686E+05
1200	1.149E-10	1.149E-03	7.575E+05
1400	1.087E-10	1.087E-03	8.463E+05
1600	1.035E-10	1.035E-03	9.335E+05
1800	9.88E-11	9.880E-04	1.024E+06
2000	9.47E-11	9.470E-04	1.115E+06
2200	9.13E-11	9.130E-04	1.200E+06
2400	8.81E-11	8.810E-04	1.288E+06
2600	8.52E-11	8.520E-04	1.378E+06
2800	8.26E-11	8.260E-04	1.466E+06
3000	8.01E-11	8.010E-04	1.559E+06

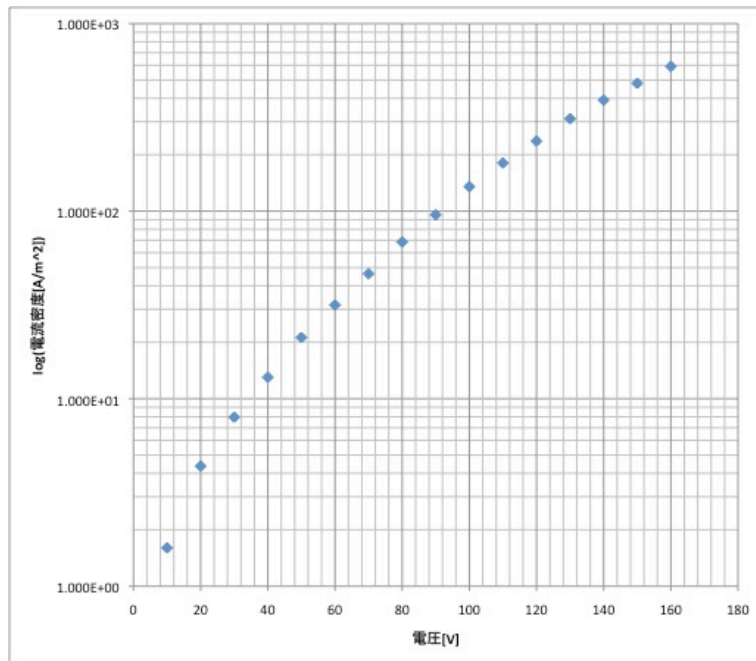


図 13 実験 1：電流密度-電圧特性

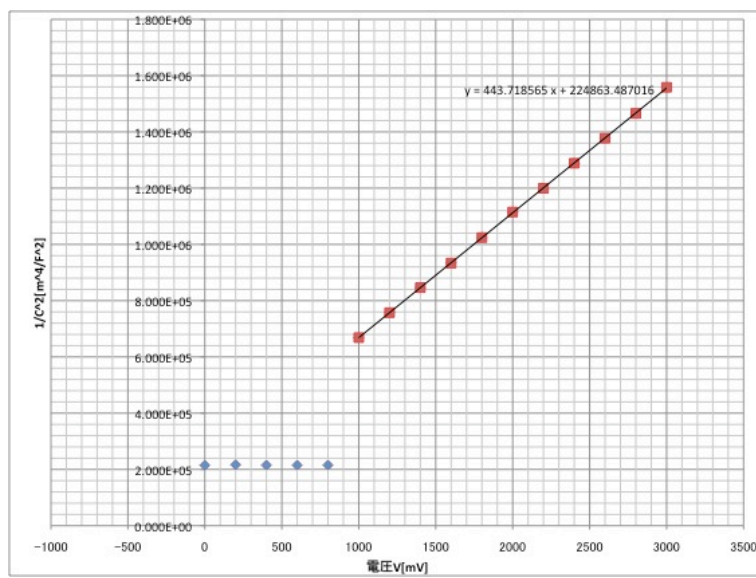


図 14 実験 2：接合容量-電圧特性

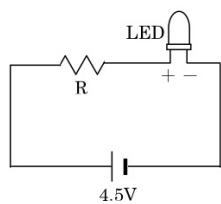


図 15 実験 3：実験回路

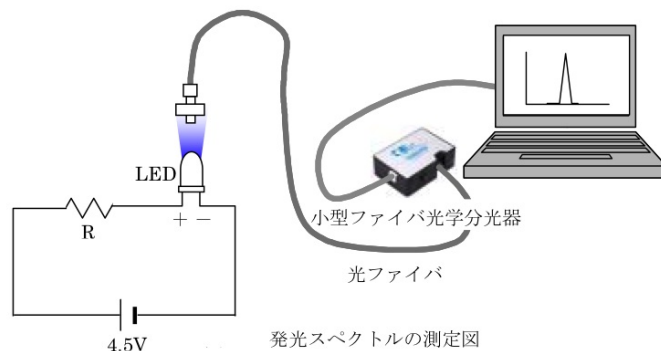
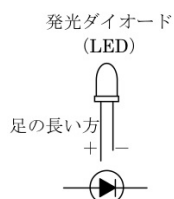


図 16 実験 3：測定図

- 4 実験 3 で点灯させた LED の光のスペクトルを分析したところ、図 17 のようになった。

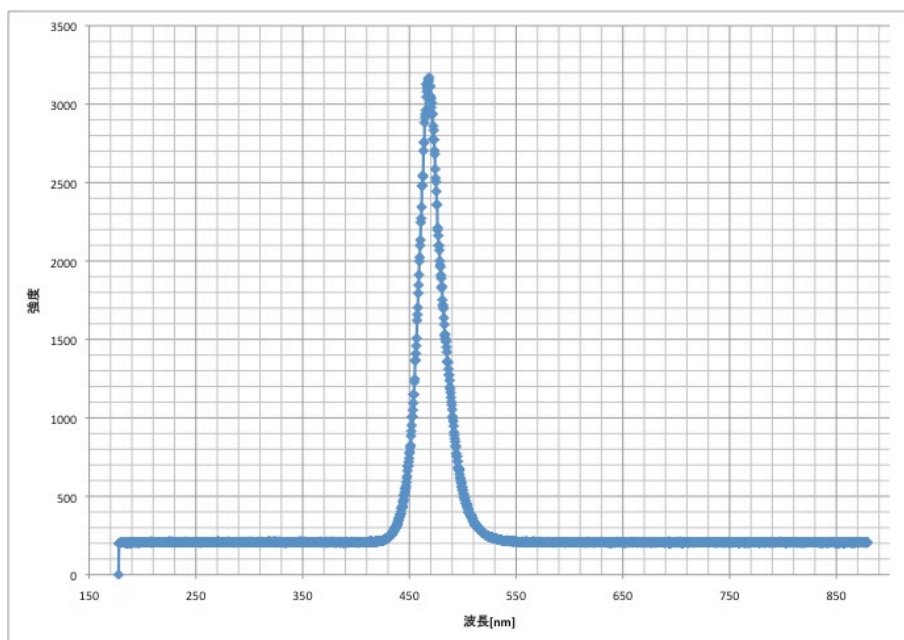


図 17 実験 4：青色 LED のスペクトル

- 5 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、白色光を点灯させたところ、図 18 のスペクトルが得られた。

6 検討

- i) 式 (16) において、 $\exp(\frac{qV}{k_B T}) \gg 1$ として両辺対数をとって変形すると

$$\ln J_n = \ln J_{n0} + \frac{q}{k_B T} V \quad (21)$$

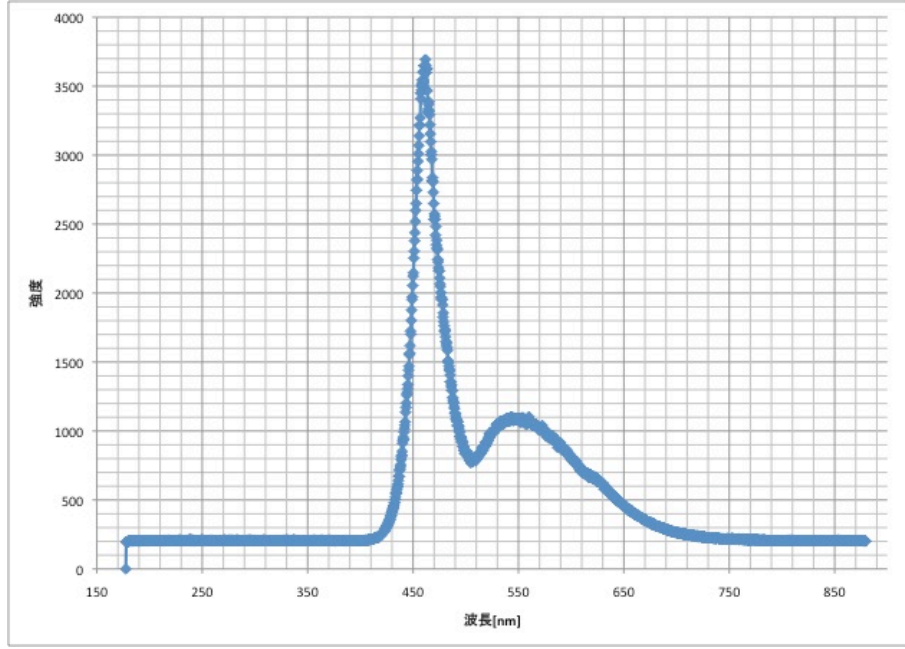


図 18 実験 5：白色 LED のスペクトル

この直線が図 13 に対応する。図より y 切片を読み取ると、 $J_{n0} = 5.5[A/m^2]$ であった。室温を 300K と仮定し、 J_{n0} の値を式 (17) に代入すると、ショットキー障壁の高さ Φ_B は

$$\Phi_B = -\frac{k_B T}{q} \ln \frac{J_{n0}}{A * T^2} = -\frac{1.38 \times 10^{-23} \times 300}{1.6 \times 10^{-19}} \ln \frac{5.5}{194 \times 300^2 \times 10^4} = 0.625[V] = 625[mV] \quad (22)$$

となる。一方漏れ電流がある場合の理想因子 n 値を求めるために式 (19) を変形して、 $V=100mV$ の時の J_{n0} の値 1.352×10^2 を代入すると、

$$n = \frac{qV}{k_B T \ln(\frac{J_n}{J_{n0}} + 1)} = \frac{1.60 \times 10^{-19} \times 0.1}{1.38 \times 10^{-23} \times 300 \ln(1.352 \times 10^2 / 5.5 + 1)} = 1.19 \quad (23)$$

となる。n は一般に 1 から 1.1 の間をとる値であるので、実験で得られた値は大きすぎると考えられる。これは図 13 から読み取った切片 J_{n0} の値に誤差が含まれているためだと考えられる。また半導体素子の温度 T が電流が流れたことで上昇したことも理由として挙げられる。

- ii) 図 14 で得られた直線は式 (10) に対応する。よって直線の傾きおよび x 切片を読み取ると、傾きは $4.44 \times 10^5[m^4/F^2V]$ 、x 切片は 507[mV] であった。よって拡散電位 Φ_D および不純物濃度 N_D は SiC の比誘電率を 9.66 とすると

$$\Phi_D = 507[mV] \quad (24)$$

$$N_D = \frac{2}{q\epsilon \times 4.44 \times 10^5} = \frac{2}{1.6 \times 10^{-19} \times 9.66 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 4.44 \times 10^5} = 3.29 \times 10^{23}[m^{-3}] = 3.29 \times 10^{17}[cm^{-3}] \quad (25)$$

と求められる。

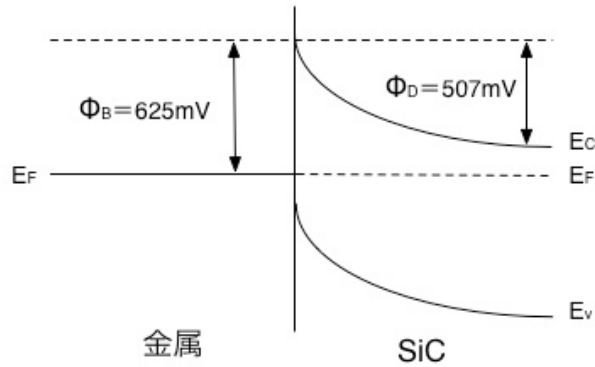


図 19 検討 (iii)：ショットキー接合のエネルギーバンド図

- ii) 検討 (i) (ii) よりエネルギーバンド図を描くと図 19 のようになった。
- iv) 図 17 から最大波長は 469nm、半値幅は 24.5nm と読みとれた。最大波長のエネルギーは

$$E = h\nu = h\frac{c}{\lambda} = 6.62 \times 10^{34} \times \frac{3.0 \times 10^8}{469 \times 10^{-9}} = 4.23 \times 10^{-19} [J] = 2.65 [eV] \quad (26)$$

となった。GaN のバンドギャップは理論上 3.4eV であるので、実験値はこれよりも小さいことが分かる。この理由としては、実験で用いた青色 LED がダブルヘテロ接合構造をとっているためと考えられる。実験原理の 3.2.2 節で述べたように、GaN 系の LED 素子開発においては、バンドギャップの小さい材料を大きい材料で挟み込む構造をとっている。バンドギャップの制御には In をドーピングする方法がとられているので、実験で用いた LED でも、図 8 と同じように発光層のみ元々のバンドギャップよりも小さくなって、電子・正孔の再結合が効率的になっていると考えられる。

- v) 実験から得られたスペクトル図 18 と、実験原理の章で触れた図 11・12 を比較すると、後者のスペクトルに近いことが分かった。すなわち、実験で用いた白色 LED は GaN 系青色 LED-YAG 蛍光体方式の白色 LED であると考えられる。実際、図 18 では青色を示す波長 460nm 付近に鋭いピークと、黄色を示す波長 550nm 付近に幅広いスペクトルが確認できる。

YAG 蛍光体方式の LED は、従来の 3 原色同時発光方式に比べて点灯させる LED の数が 1 つで済むため、省スペース・省電力・省メンテナンス化に貢献していると考えられる。また素子の数が少ないためコストも削減できるのも利点であると考えられる。一方欠点としては、青色と黄色の蛍光体の光の重ね合わせで白色を作っているため、その光のもとで見た物の見栄えは青白く、3 原色方式に劣っている。よって照明機器に使うには不適であると考えられる。

今後の LED の展望としては、省エネルギーで導入コストの安く、なおかつ照明として利用した際の見栄えの良いものが求められてくると考えられる。現在実用化されている LED にはそれぞれ欠点があるが、それを埋め合わせるような LED が開発されれば、電球・蛍光灯が大きなシェアを占める照明業界を大きく塗り替えることになるかと推測される。1 つの改良策としては、現在の蛍光体方式の LED で使われている YAG 蛍光体を他の蛍光体に置き換えることがある。発光スペクトルの偏りが人間の視覚で捉えたときに浮き彫りになるので、光をまんべんなく発する蛍光体を作れば、3 原色方式に近い演色性の高い実用的な LED が開発できると考えられる。

7 結論

1. pn 接合ダイオードは p 型半導体と n 型半導体の間に生じた空乏層の電位障壁により、整流作用を示す。これにより順方向電流は良く流し、逆方向電流はほとんど流れない性質を示す。
2. 一方金属-半導体の接合からなるショットキー接合は、金属と半導体の仕事関数の大小によって整流作用の有無が変化する。金属の仕事関数の方が大きい場合、順方向電圧をかければ半導体中の電子・正孔が障壁を越えて流れる。この時の電流は印加電圧の指数関数乗に比例する。また接合容量は印加電圧の $-1/2$ 乗に比例する。
3. LED は伝導体内の電子と価電子帯内の正孔との再結合の際に生じるエネルギーを光子として取り出し光エネルギーを得る物である。発光層のバンドギャップを制御することにより任意の波長の光を取り出すことができるようになっている。近年 SiC や GaN などのワイドギャップ半導体の研究によって短波長の光を得ることができるようになっており、特に青色 LED の発明は白色光を得るために不可欠な技術革命であった。今後は照明機器などでの利用も期待されている一方、実用化に向けて課題も残されている。

8 謝辞

最後になったが、実験に協力してくれた班員の 5 人と、丁寧に指導して下さいった先生方・TA の方々に感謝申し上げたい。

9 参考文献

- 実験テキスト「B4 半導体ダイオードデバイスの基礎実験」
- 「大阪大学物理学実験 2008」大阪大学物理教育研究会編 学術図書出版社 第 2 版第 1 刷 第 2 編
- 「半導体デバイス工学」谷口研二・宇野重康共著 昭晃堂 初版第 8 刷
- 「半導体工学」白藤純嗣著 共立出版 初版 7 刷
- 「電子物性入門」浜口智尋著 丸善株式会社 第 18 刷
- 「物理定数表 Physical Constants」<http://www.mogami.com/paper/physical-constants.html>
- 「炭化ケイ素 (SiC), 光学結晶」<http://www.neutron.co.jp/crystal/2/SiC.html>
- 「Wikipedia」<http://ja.wikipedia.org/>
- 「 \LaTeX 2 ϵ 美文書作成入門 改訂第 4 版」奥村晴彦著 技術評論社 第 4 版第 6 刷

以上