

応用光学: 半導体における光学過程

1. 目的

分光技術を習得し、分光手法を用いて得られた測定結果から、半導体試料のバンドギャップエネルギーなどの種々の物質の光学特性を理解する。半導体における発光および吸収のメカニズムについて理解する。

II. 序論

Appendix で示している内容をまとめてください。完全にまとめ切れていないと、序論を記述できたとみなしません。

III-A. 実験(第1週目)

Si フォトダイオードの特性と GaAs 系あるいは GaAs_{1-x}P_x系フォトダイオードの特性

(1) 照度計を用いて、ハロゲンランプの電圧と光強度 P_L との関係を測定する。ハロゲンランプ光をレンズで集光して照度計センサーヘッドに対して入射させる。この際の入射光強度は、 $P_L = 0, 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0$ および 4.0 mW とする。

(2) 図 1 に示すように、ハロゲンランプ光をレンズで集光して、Si フォトダイオードに入射させる。各フォトダイオードの設置位置は、上記実験(1)で使用した照度計センサーヘッドの位置と同じとするこの際の電流-電圧特性を測定する。この際、ハロゲンランプ光の強度($P_L = 0, 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0$ および 4.0 mW)を変えて、電流-電圧特性を測定する。先の実験から得られたハロゲンランプの電圧と光強度との関係を用いて、ハロゲンランプの強度を調整せよ。

測定条件：印加電圧-100 から+500 mV 程度、電流 2.0 mA 以下とする。なお本実験では、開放端電圧および短絡電流を求める必要がある。この点を考慮して、データを細かくとるべきところを考えながら測定を行う。

あらかじめ電流電圧特性カーブの大まかな傾向を調べるために、行きなる細かい電圧ステップで測定するのではなく、大まかに電圧を振って、傾向を調べること。

GaAs 系あるいは GaAs_{1-x}P_x系フォトダイオードの電流電圧特性は、Si フォトダイオードと異なる。この点に注して、印加電圧を設定すること。

[課題 1]

光を照射していない場合および照射している場合の電流電圧特性を片対数グラフにプロットし、解析せよ。解析方法と考察/議論すべき詳細な内容は、ファイル Appendix に示したとおりである。

片対数グラフ用紙にプロットする場合(ダーク条件のみでよい)、電流の絶対値を用いること。方眼タイプのグラフ用紙にもデータをプロットし(この場合、電流の絶対値を取る必要はない)、開放端電圧および短絡電流を明確にするように図示する。

[課題 2]

Si フォトダイオードに光を照射することで、バイアス電圧が存在しなくても、光電流が生じていることを確認せよ。この電圧および電流の起因に対して図を用いて説明する。解析方法と考察/議論すべき詳細な内容は、ファイル Appendix に示したとおりである。

[課題 3]

短絡電流と開放端電圧を光強度の関数としてプロットする。この結果をもとに、短絡電流と開放端電圧および光強度との関係を論述する。解析方法と考察/議論すべき詳細な内容は、ファイル Appendix に示したとおりである。

[課題 4]

印加電圧と電力 $W = |I \times V|$ との関係の方眼紙にプロットし、電力 W_{\max} を示しなさい。最大電力におけるハロゲンランプの入射光強度に対する電力を求めなさい。解析方法と考察/議論すべき詳細な内容は、ファイル Appendix に示したとおりである。

III-B. 実験(第2週目)

Al_xGa_{1-x}As 系発光ダイオード(LED)の発光特性

- (1) ハロゲンランプを照射しない条件下で、2種類の Al_xGa_{1-x}As 系発光ダイオード(赤色 LED と赤外 LED)の電流-電圧特性を測定しなさい。測定条件は、電流値が 120 mA を超えない程度までとする。
- (2) Al_xGa_{1-x}As 系 LED の発光強度-電流特性を測定しなさい。発光強度の測定には、Si フォトダイオードを用いよ。発光ダイオードに流す電流は、120 mA 以下の範囲とする。Si フォトダイオードに接続する抵抗ボックスのレンジを 1 kΩ とする。
- (3) Al_xGa_{1-x}As 系発光ダイオードにおいて、図 2 に示される光学系を用いて電流注入発光スペクトルを測定せよ。発光ダイオードに流す電流は、20, 40, 60, 80, 100, および 120 mA とする。検出器には Si フォトダイオードを使用する。Si フォトダイオードに接続する抵抗は、5.1 MΩ の値のものとする。特に発光スペクトル測定の際には、スペクトルのピークおよび立ち上がり値を、詳細に測定する。ただしあらかじめ荒くスキャンを行い、大まかなスペクトル形状を見積もること。
可視赤色 LED と赤外 LED から得られた電流注入発光スペクトルを、各 LED ごとに一つの図面にまとめる。
測定の事前に He-Ne レーザー(波長 : 632.8 nm)を用いて、分光器の表示波長を校正しておく。波長校正の際、分光器のスリット幅は 0.1 mm とし、He-Ne レーザー、分光器に入射させる。測定の順番: 可視赤色 LED の測定を最初に行い、光軸を崩さずに赤外 LED の測定を行う。

[課題 5]

電流-電圧特性を片対数グラフにプロットし、解析しなさい。理想因子を求め、その値が理想値からずれる原因について考察しなさい。

片対数プロットを実施すると、電流-電圧特性が線形性から外れる領域がある。線形性から外れる理由について考察しなさい。

さらに赤色 LED と赤外 LED とで光電流の電圧に対する立ち上がり値、一オン電圧値、が異なる。この原因について考察しなさい。

解析方法と考察/議論すべき詳細な内容は、ファイル Appendix に示したとおりである。

[課題 6]

発光ダイオードの発光強度-電流特性において、電流が小さい場合と大きい場合では、発光強度の振る舞いが違う。このことについて説明しなさい。この際、現象をうまく説明できるグラフを描く。解析方法と考察/議論すべき詳細な内容は、ファイル Appendix に示したとおりである。

[課題 7]

発光スペクトルの横軸を光エネルギー(eV)でプロットする(提出するのは、この図面だけでよい)、2種類の $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 系発光ダイオードの形状を解析しなさい。有限温度では、発光バンドの形状 $I(\hbar\omega)$ は、次式に従う。

$$I(\hbar\omega) \propto \sqrt{\hbar\omega - E_g} \exp\left(-\frac{\hbar\omega - E_g}{k_B T}\right)$$

ここで $\hbar\omega$, E_g と T は、それぞれ光子エネルギー、バンドギャップエネルギー(基礎光学遷移エネルギー)および素子の温度 T である。

この式を用いて解析を行いなさい。ただし発光バンドの低エネルギー側の裾を上記式ではうまく再現できないことがある。フィッティング区間に注意して解析すること。

解析方法と考察/議論すべき詳細な内容は、ファイル Appendix に示したとおりである。

[課題 8]

発光バンドのピークシフトが観測される。この原因を説明しなさい。可視赤色 LED と赤外 LED とでは、発光バンドのピークシフト量が異なる。このことについても考えなさい。

解析方法と考察/議論すべき詳細な内容は、ファイル Appendix に示したとおりである。

[課題 9]

(今年度 FY2016 では変更されています)

LED の発光バンド幅が注入電流量によって変化する。この原因を模式的な図を用いて説明しなさい。課題 7 での解析結果と半導体工学 I で学習した内容(キーワード: バンド内におけるキャリア分布)がヒントとなります。

解析方法と考察/議論すべき詳細な内容は、ファイル Appendix に示したとおりである。

III-B. 実験(第3週目)

Si フォトダイオードおよび各発光ダイオードの光電流スペクトル特性

- (1) 図 3 に示すようにハロゲンランプを分光器に入射させ、Si フォトダイオードおよび 2 種類の $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 系発光ダイオードの光電流スペクトルを測定しなさい。Si フォトダイオードに接続する抵抗は $5.1 \text{ M}\Omega$ のものである。参考測定条件として前回(発光スペクトル測定)のデータを参考にすること。スペクトルのピークおよび立ち上がりを、詳細に測定する。

[課題 10]

光電流スペクトルの横軸をエネルギー eV 単位でプロットし(提出するのはこの図面)、各フォトダイオードおよび発光ダイオードのバンドギャップエネルギーを eV 単位で求めよ。各試料のバンドギャップエネルギーをグラフ中に矢印で記すこと。

解析方法と考察/議論すべき詳細な内容は、ファイル Appendix に示したとおりである。

[課題 11]

Si フォトダイオードの光電流スペクトル形状は $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 系 LED の光電流スペクトル形状と大きく異なる点がある。これを考察しなさい。

解析方法と考察/議論すべき詳細な内容は、ファイル Appendix に示したとおりである。

[課題 12]

2 種類の $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 系 LED のそれぞれに対して、光電流スペクトルと発光スペクトルを同じグラフでプロットし、光電流スペクトルと発光スペクトルを比較しなさい。

解析方法と考察/議論すべき詳細な内容は、ファイル Appendix に示したとおりである。

[課題 13]

光電流スペクトルからバンドギャップエネルギーの見積もる方法を、図を用いて説明しなさい。光電流スペクトルから求めたバンドギャップエネルギーと発光スペクトルから求めたバンドギャップエネルギーの値を比較しなさい。

解析方法と考察/議論すべき詳細な内容は、ファイル Appendix に示したとおりである。

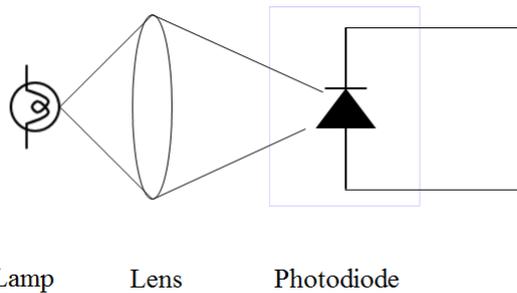


図 1: フォトダイオードの光起電力測定系の模式図。

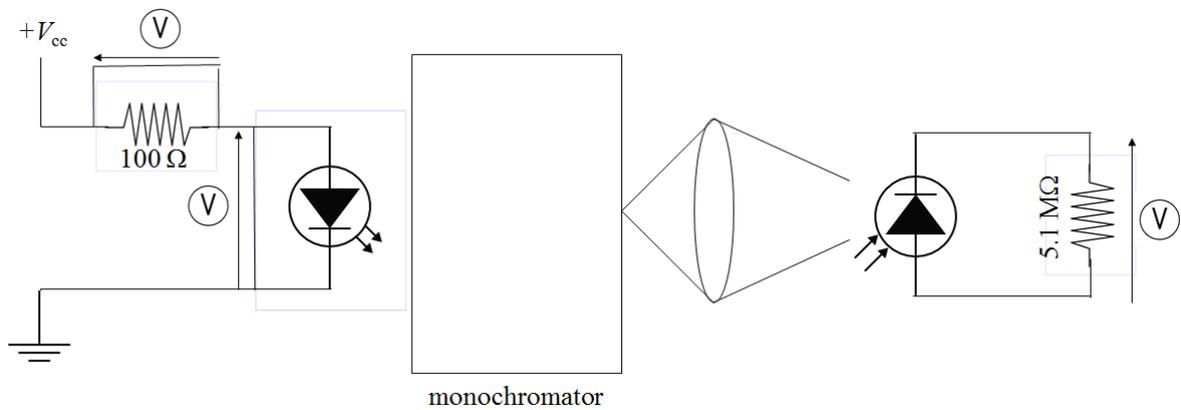


図 2: 各 LED の電流注入発光スペクトル測定系の模式図。

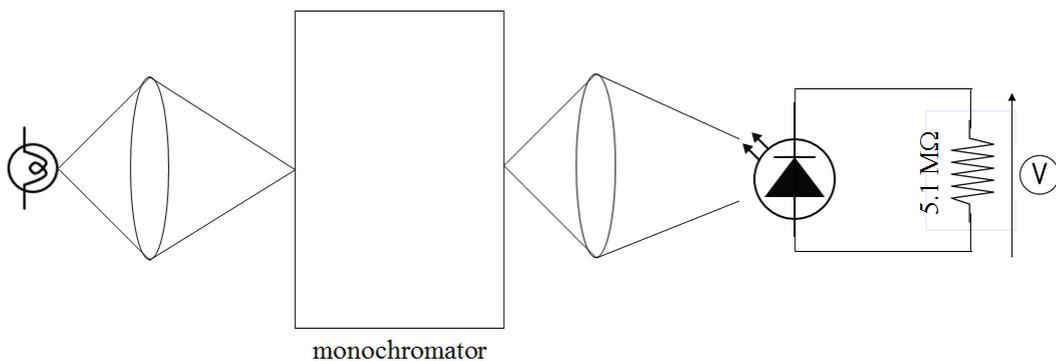


図 3: 発光励起スペクトルを測定するための系の模式図。

[参考文献]

1. 国府田隆夫・柗元宏、光物性測定技術、東京大学出版会、1983.
2. I. Plelant and J. Valenta, Luminescence Spectroscopy of Semiconductors, Oxford 2012.
3. 藤本品、光エレクトロニクス、森北出版社、2013.
4. 御子柴宣夫、半導体の物理、培風館、1982.
5. 花村榮一、固体物理学、裳華房、1986.
6. C. Kittel、固体物理学入門第6版、1988.
7. P.Y. Yu and M. Cardona, Fundamentals of Semiconductors, Springer-Verlag, 1999.
8. O. Madelung (Ed.), Semiconductors -Basic Data (Springer, Berlin 1996).
9. M. Zanbuto, Semiconductor Devices, McGraw Hill, 1989.
10. 東辻浩夫、半導体工学、培風館、1994.
11. 太田英二、坂田亮、半導体の電子物性工学、裳華房、2005.
12. 樋口英世、半導体デバイス入門、森北出版社、2010.
13. 工藤恵栄、光物性基礎、オーム社、1996.
14. 中山正昭、半導体の光物性、コロナ社、2013.
15. 花村榮一、固体物理学、裳華房、1986.
16. 松波弘之、吉本昌広、半導体デバイス、森北出版社、2000.
17. J. Signh, Semiconductor Devices, John Wiely & Suns, 200.1
18. J. Nelson, The Physics of Solar Cells, Imeprial College Press, 2003.
19. P. Wurfel, 太陽電池の物理(Physics of Solar Cells)、丸善出版(Wiely)、2010 (2009).
20. 市村正也、太陽電池入門、オーム社、2012.

その他:

大阪市立大学/学術情報センターには、市大蔵書検索(OPAC)という検索システムが存在します。このシステムは、学外以外、例えば自宅 PC でも使用することができます。上記参考文献以外にも、多数の蔵書があります。これらも参考にしてください。

URL: 大阪市立大学/学術情報センター/ライブラリーサービス

<http://libweb.media.osaka-cu.ac.jp/>