

卒業研究報告

題目

発光ダイオードの試作研究

指導教官

成沢 忠

報告者

岡田 光司

平成 13 年 2 月 9 日

高知工科大学 電子・光システム工学科

目次

1.はじめに	2
2.研究内容	2
3.基礎となる理論	3
発光原理	3
エネルギーバンド構造	4
発光ダイオード(LED)	4
p-n 接合	5
ホモ接合	5
シングルヘテロ接合	5
ダブルヘテロ接合	6
可視光の種類	7
アニール	8
4.発光ダイオードの応用	9
LED 式電球	9
交通信号機への応用	10
5.実験方法	11
6.実験結果	14
7.考察	22
8.まとめ	23
9.謝辞	23
10.参考文献	23

1.はじめに

発光ダイオードは半導体の p-n 接合に順方向電流を流すことにより電氣的エネルギーを直接光エネルギーに変換することができる半導体素子である。

半導体からの可視光の電場発光は 1923 年に SiC で観測されたのが最初であり、族半導体では 1955 年に GaP が最初である。その後 1962 年 GaAs の赤外発光と GaP の赤色発光で高い発光効率が観測されて以来急速に開発が進められた。1968 年には GaP、GaAs の赤色発光ダイオードがアメリカで商品化され続いて GaP、さらに AlAs、GaAs 発光ダイオードが市場に現れた。これらの材料を中心に可視発光ダイオードの多色化と高輝度化が進み、各種表示ランプ、数字表示装置などに利用されている。

2.研究の内容

AlGaInP 系半導体の p-n 接合に金属電極を蒸着し発光ダイオードを試作した。金属電極を蒸着したままの状態の発光ダイオードと、アニール処理を施した後の発光ダイオードを用いて I-V、光パワーの測定を行いアニールの変化および市販品との比較考察する。

3.基礎となる原理

発光原理

エネルギー順位の低い価電子帯から、何らかのエネルギーを得て、エネルギー準位が高い伝導帯に電子が励起する。すると今までいたエネルギー準位が低い価電子帯の電子が抜けた後にホール（正孔）が形成される。発光はエネルギー準位が高い伝導帯にある電子がエネルギー準位の低い価電子帯に遷移しホールと再結合したときに伝導帯のエネルギー E_e と価電子帯のエネルギー E_h の差であるバンドギャップ E_g 程度のエネルギーを光として放出する。

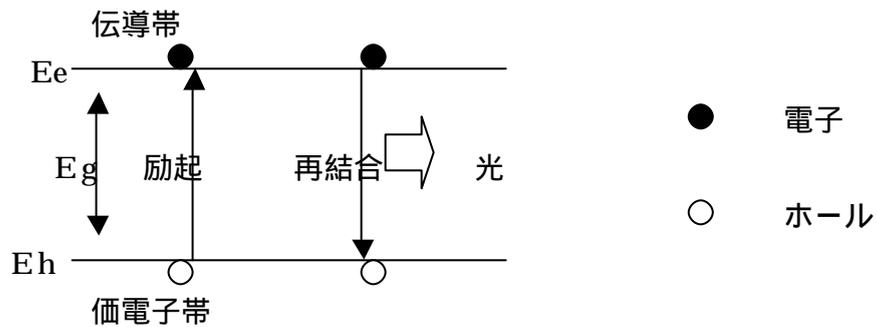


図1 ルミネセンスの原理

放出するエネルギーは、発光の振動数を ν 、プランク定数 $h=6.626 \times 10^{-34}$ とすると、
 $E_g = h \nu$ [eV]
で表すことができる。
また、発光した光の波長 λ は、
 $\lambda = 1240/E_g$ [nm]
で表すことができる。

エネルギーバンド構造

エネルギーバンド構造には直接遷移型と間接遷移型がある。下図のように直接遷移型は価電子帯の頂上と伝導帯の最も深い底の位置が横にずれていない構造をしている。一方、間接遷移型は価電子帯の頂上と伝導帯の最も深い底の位置が横にずれている構造をもっている。

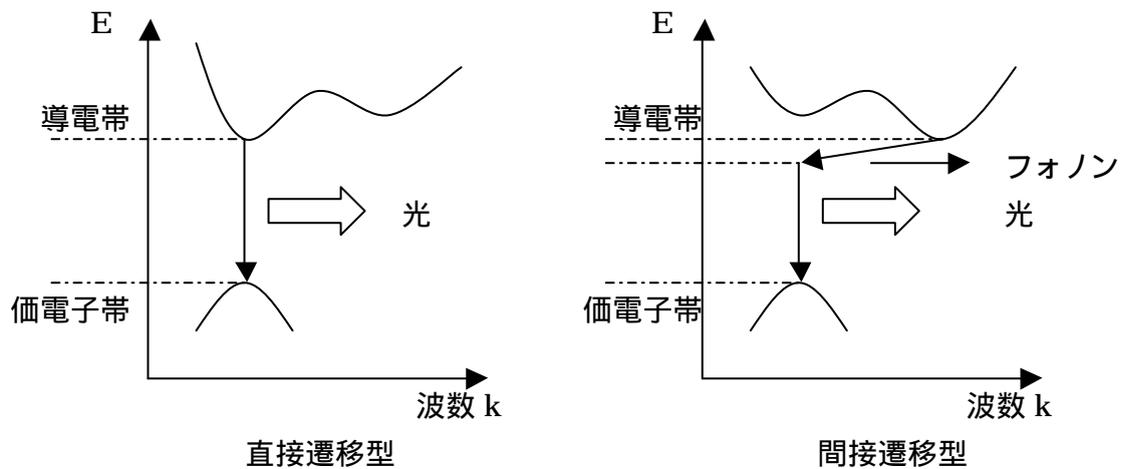


図2 エネルギーバンド構造

発光は導電帯からの電子の垂直遷移のよって行われるため構造は直接遷移型の方が有効である。これに対して間接遷移型は水平方向の遷移も行われるため、発光以外の熱や音としてエネルギー(フォノン)が発生するので発光させることを目的としている発光ダイオードには、効率が悪く間接遷移型の構造は不適當である。

発光ダイオード (LED : Light Emitting Diode)

発光ダイオードの発光原理はルミネセンスと同じく伝導帯に励起した電子が価電子帯に遷移し、ホール(正孔)と再結合して発光する。

発光ダイオードのp-n接合には、はじめは同じ種類の半導体を用いたホモ接合が採用されたが、発光効率が上がらなかったため電子とホールの拡散を阻止するための構造が考えられた。異なる半導体2種類を使って造られた構造がヘテロ接合(シングルヘテロ接合)であり、さらに発光層をそれよりも大きなバンドギャップを持つ半導体で挟み込んだ構造を持つものがダブルヘテロ接合である。

p-n 接合

ホモ接合(Homo Junction)

同じ種類の半導体結晶を使用して p-n 接合を作製したものをホモ接合と呼ぶ。この構造は、同じ材料で p-n 接合を作製したため p 型側からは電子が n 型側へ、n 型側からはホールが p 型側へ移動する。その後に電子が遷移し再結合するため相手側のホールの数が少ないため発光効率が上がらないことが欠点である。

すべての発光ダイオードはこのホモ接合構造から始まりそして高輝度化の実現のためヘテロ接合が導入された。

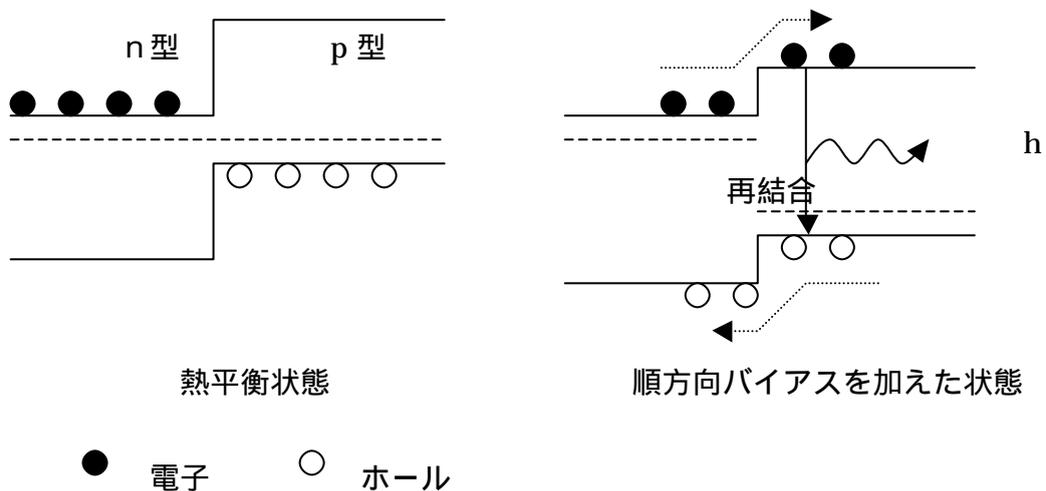


図3 ホモ接合での発光原理

シングルヘテロ接合(Single Hetero Junction)

この接合方法は、バンドギャップの異なる半導体で p-n 接合を造ることによってヘテロ接合を一つ形成することによって、n 型層の高い障壁を作り出すことができた。作り出した障壁によってホールの n 型側への移動を防ぎ再結合しやすく、発光効率の向上をねらった構造である。

シングルヘテロ接合を用いることによってホールは高い障壁に遮られ再結合にふさわしい形を作ることができた。しかし電子においては、ホールのように障壁を利用することで再結合の効率を上げる構造を造ることができなかったため、シングルヘテロ接合をもちいた発光ダイオードの発光の効率は必ずしも良いものとはいえないものである。

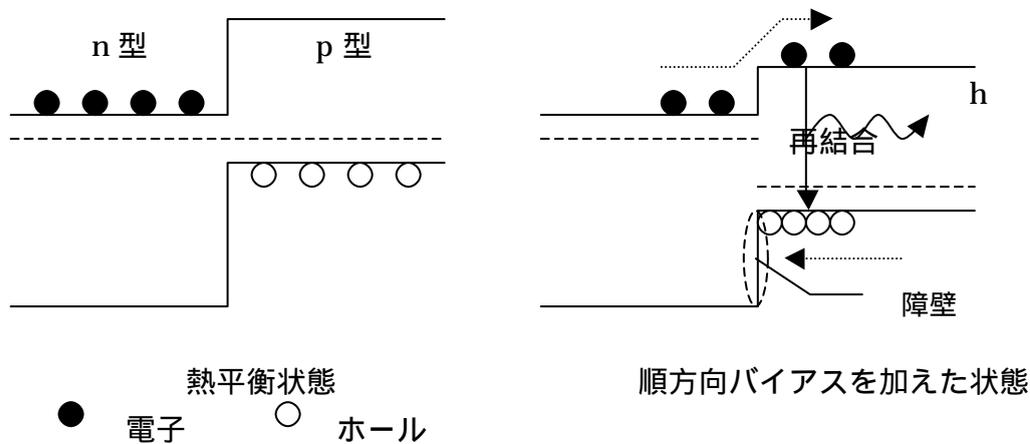


図4 シングルヘテロ接合での発光原理

ダブルヘテロ接合(Double Hetero Junction)

バンドギャップの小さい発光層（活性層）をバンドギャップの大きな p 型、n 型それぞれの半導体で挟み込んだ構造をしている。

p-n間に順方向バイアスを加えることで p 型層から中央層の方向にホールが移動する。しかし n 型の高い障壁があるためそれ以上進むことができずに発光層にホールがたまる。n 型層からは電子が中央の発光層方向へ移動する。これも p 型層の障壁が高く発光層に電子がたまる。こうして中央の発光層に電子とホールがたまるため、再結合効率が高くなり発光ダイオードの発光効率が高くなる。

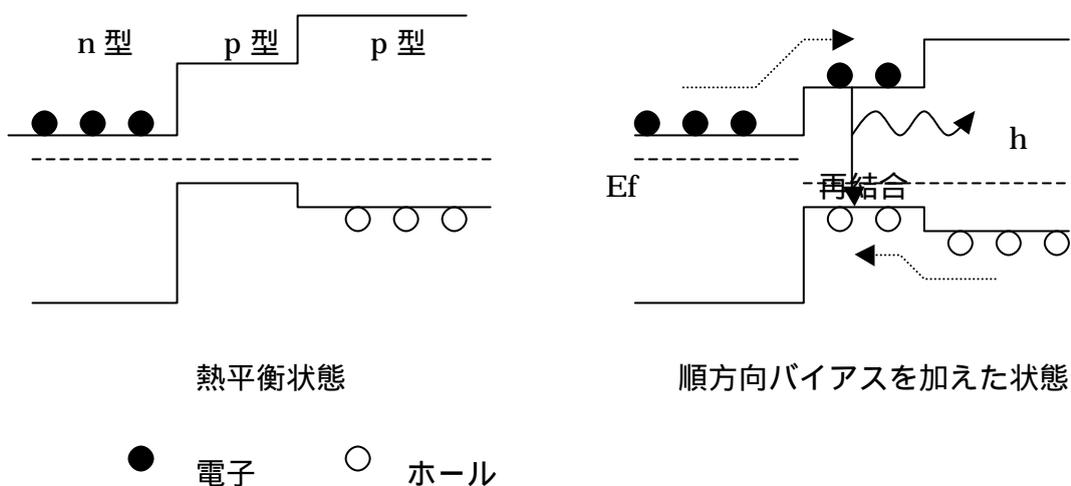


図5 ダブルヘテロ接合での発光原理

可視光の種類

人間の目が色として判別できる光の波長範囲はごくわずかな範囲でありこの光を可視光という。各色と波長の関係は図6に示す。

発光色	発光波長[nm]	バンドギャップ[eV]
赤	630 ~ 760	1.96 ~ 1.63
橙	590 ~ 630	2.10 ~ 1.96
黄	560 ~ 590	2.21 ~ 1.96
緑	490 ~ 560	2.53 ~ 2.21
青	450 ~ 490	2.75 ~ 2.53
紫	380 ~ 450	3.26 ~ 2.75

図6 発光色別にみた発光波長とバンドギャップ

可視光の色は波長の長いものから順に赤、橙、黄、緑、青、紫であり波長が短くなるにつれてバンドギャップが大きくなる。バンドギャップ E_g [eV]は半導体の各結晶固有のものでありここでおもな - 族半導体結晶の格子定数、バンドギャップ、バンド構造、発光色を図7に示す。

	格子定数[Å]	バンドギャップ E_g [eV]	バンド構造	発光色
AlAs	5.66	2.16	間接	黄
AlSb	6.13	1.60	間接	赤
GaP	5.45	2.24	間接	緑
GaAs	5.65	1.35	直接	赤
GaSb	6.09	0.67	直接	赤
InP	5.86	1.35	直接	赤
InAs	6.05	0.35	直接	赤
InSb	6.47	0.17	直接	赤

図7 - 族半導体結晶特性

アニール

アニールとは、残留応力・内部ひずみの除去、結晶欠陥の低減、均一化などを目的とした固体材料の熱処理のことである。高温から急冷するのではなくゆっくり冷やすのが特徴である。

今回の研究でのアニールは、蒸着した金属柱に含まれる n 型不純物である Ge と p 型の不純物である Zn を半導体 GaAs 中に拡散させ、金属電極と半導体との接触抵抗を下げる目的でアニールを行った。

下の写真は今回の研究で使用したアニール装置である。

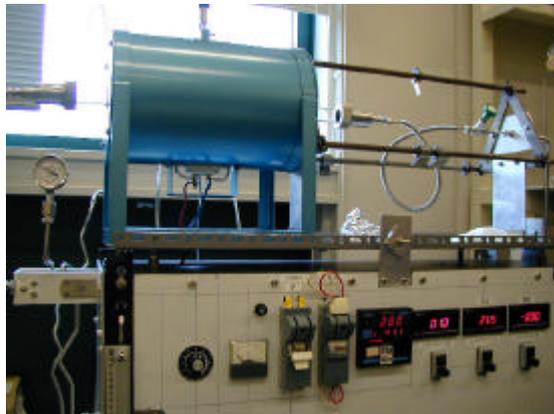


写真1 アニール装置

4.発光ダイオードの応用

固体発光デバイスである発光ダイオードは、小型軽量、高効率（低消費電力で動作可能）、長寿命、低コストといった特長がある。特に AlGaInP、AlGaAs など高い発光効率が得られる直接遷移型のバンドギャップを持つ材料の開発により赤色、緑色の高輝度化が実現された。それにより家電機器のパイロットランプや数字文字表示などの屋内の各種ディスプレイはもとより自動車のランプや道路情報板、信号機、大型ディスプレイなど屋外の表示デバイスとしても広く用いられるようになった。

近年までは、青色発光ダイオードを作製することができなかったが近年、InGaN 系材料による青色発光ダイオードの作製、そして高輝度化が進み、赤色、緑色、の高輝度発光ダイオードとの組み合わせによるフルカラーディスプレイが開発された。

LED 式電球

屋外用情報表示板の光源としては複数個の発光ダイオードをガラスでとじ、電球と同じ様な構造をとり使用される。

主な利用先としては、交通信号機、路肩表示灯、視線誘導灯、車両用灯具などがあり、このように様々さ場所に利用されている発光ダイオード式電球の特長は

- 1 . 半導体素子であるため長寿命である。
- 2 . 熱的発光や放電的な発光ではないため、余熱時間が不要である。そのため点灯、消灯速度が早い。
- 3 . 光量変換効率が高いため、消費電力が少ない。
- 4 . 電球と違いフィラメントがないため、耐衝撃性に優れている。
- 5 . 発光源である発光ダイオード素子が小さいため小型化、薄型化に適しており軽量である。
- 6 . 発光スペクトルの半値幅が狭いため視認性の良い。

などがあるため、屋外では従来の電球と同じように使用されている。

屋内利用でも、視認性がよく、長寿命であれば家電製品に発光ダイオードを電球と置き換えることができる。

交通信号機への応用

交通信号機に最初に利用された発光ダイオードは赤色であり、続いて緑色であった。近年、InGaN 系材料による青色発光ダイオードの高輝度化が進み、赤色、緑色、の高輝度発光ダイオードとの組み合わせによるフルカラーディスプレイが開発された。これによって信号機にも青色発光ダイオードが導入され、発光ダイオードが使われた交通信号機が誕生した。

交通信号機に発光ダイオードを利用することでの利点は以下の通りである。

- 1 . 消費電力が少ない。
- 2 . 長寿命である。
- 3 . 重量化軽減できる。
- 4 . 発光ダイオードが一部故障しても信号機全体が消灯状態にならない。
- 5 . 発光スペクトルがシャープなので視認性がよい。

などがある。基本的には発光ダイオード自体の特長であるが、それに加えて重要なのは信号機の信頼性の向上、視認性に優れていることである。

各色の信号機が軽量である発光ダイオードを多数集積する構造を持っているため総重量としては以前の電球の者よりも軽量であり、発光ダイオードが多数集まって点灯するためその中で一部破損しても信号機が消えることがないため信頼性が向上し、従来の電球のものより雨や曇りなどで視界が悪くても視認することができる。その結果従来の電球型交通信号から、発光ダイオードを採用した信号に変わりつつある。

5.実験方法

AlGaInP系半導体のp-n接合のp形側n型側それぞれに真空蒸着装置(写真2)を用い金属電極を蒸着し発光ダイオードを作製する。

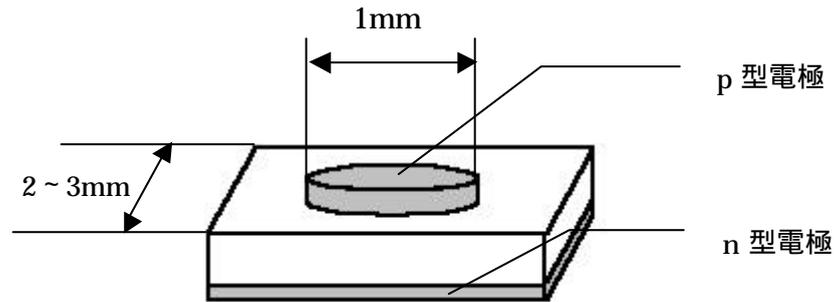


図8 作製した発光ダイオード

その組み合わせは以下の通りである。

1. p型電極: AuZn (Zn 5%) n型電極: AuGe (Ge 5%)
2. p型電極: Au n型電極: AuGe
3. p型電極: Ag n型電極: AuGe

以上の組み合わせで金属電極を蒸着させそれぞれ測定する。

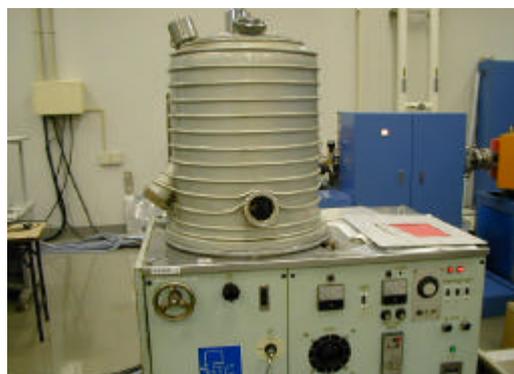


写真2 真空蒸着装置

実験で使用した AlGaInP 半導体ウェーハは下図のような構造をしている。

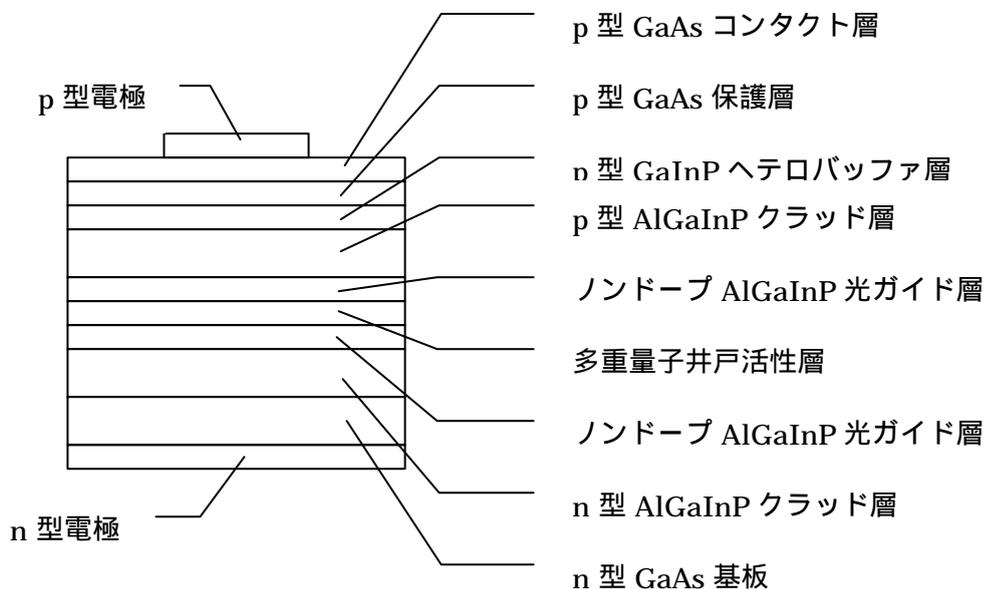


図9 AlGaInP 系半導体構造

半導体で光を発生させるため p-n 接合を利用しキャリアを注入する。発光をより効率よくするためにダブルヘテロ接合を利用し発光させる。

またこの半導体結晶にはクラッド層が多重量子井戸活性層を挟み込む構造を持っているため、端面発光デバイスとしては、活性層で発光した光を減衰させることなく取り出すことができる。逆に表面発光デバイス(LED)としては表面には光がでてきにくい構造である。

作製した発光ダイオードの p-n 電極間に電圧をかけ電圧と電流の変化を測定し、発光ダイオードの光パワーを光パワーメーターで測定する。その後作製した発光ダイオードを窒素雰囲気中で 450 の温度で 30 分間、大気圧中でアニールする。アニール後 I-V 測定と光パワーの測定を行い前後での I-V の変化と光パワーの変化を比較する。測定回路図を図 10 に示す。

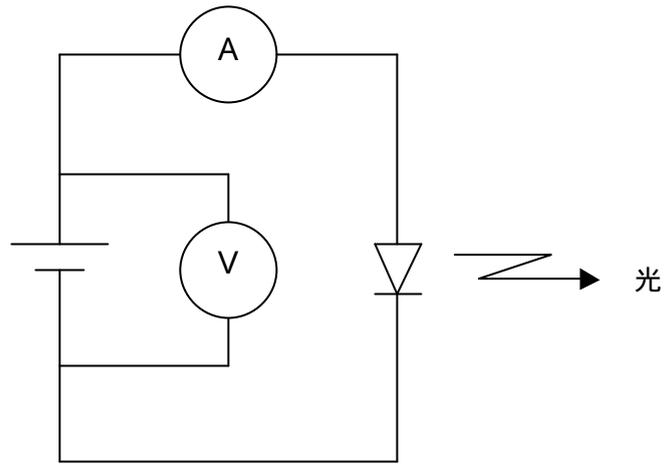


図 1 0 測定回路図

光パワーメーター

光パワーメーターは図 1 1 のブロック図で示した様な回路を持ち、センサ・ダイオードに光が当たると電流が流れる。この電流は光パワーに比例しているため電流値を測定することによって光パワーを求めることができる。

入力信号を I-V 変換し、4¹/₂ 桁 AD コンバータでデジタル値に変換し、CPU に取り込む。

CPU では、受け取った信号を波長補正、リニア値を dBm に変換などの加工処理を行う。加工した信号は、LCD Driver にディスプレイ情報として転送され、ディスプレイに表示する。

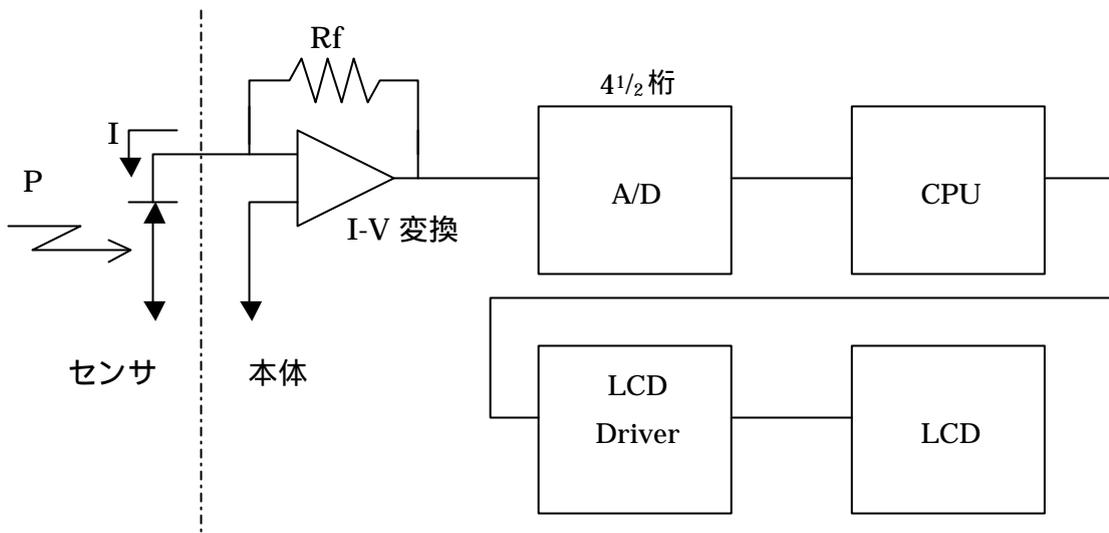


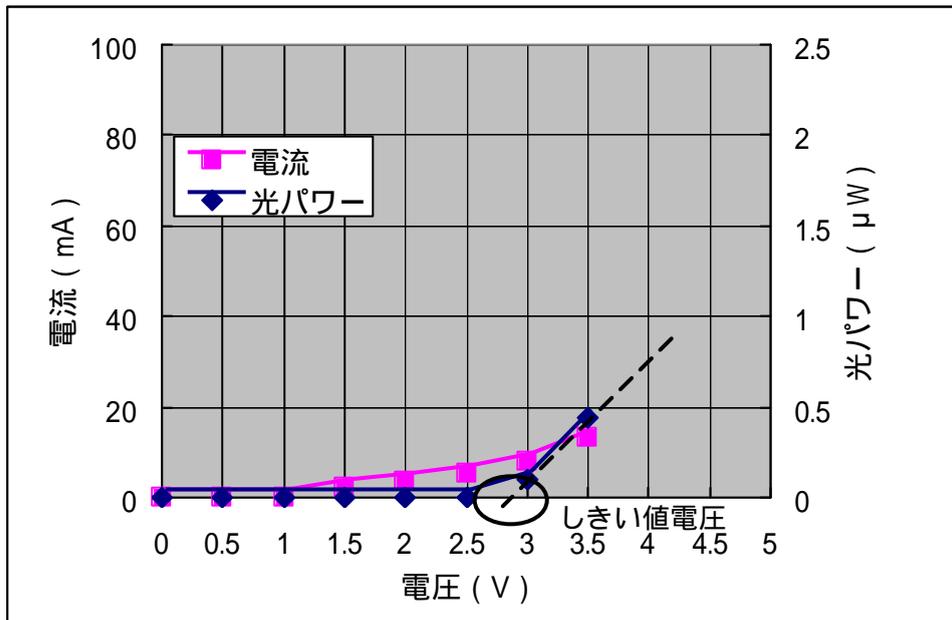
図 1 1 光パワーメーターブロック図

6.実験結果

試作品発光ダイオードの測定

AlGaInP 系半導体ウェーハに p 型 n 型それぞれに金属電極をつけ I-V 測定、光パワーの測定を行った。

p 型電極には AuZn を使用



グラフ 1 AuZn 使用発光ダイオード アニール前 I-V、V-P 測定

発光ダイオードの I-V 測定のグラフのしきい値電圧の値に注目した。

しきい値電圧とは、光パワーのグラフが電圧を加えていくことで起き上がり、直線的になったときの接線と電圧軸との切片の値をいう。

ここではグラフが起き上がり始めてから 2 点しかとれなかったため強引ではあるがしきい値電圧を求める。

グラフ 1 中の、の座標から接線の方程式を求め、しきい値電圧を求める。

$$(3.5 \quad 0.43)$$

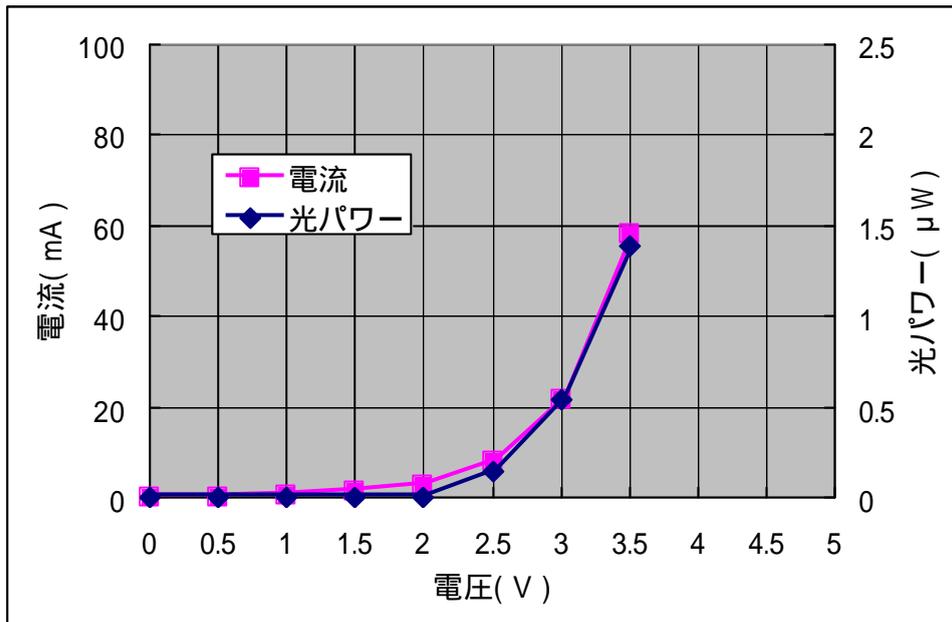
$$(3.0 \quad 0.10) \text{ より}$$

接線の方程式は

$$y=0.66x-1.88$$

となり、電圧軸との切片であるしきい値電圧は

2.88[V]である。

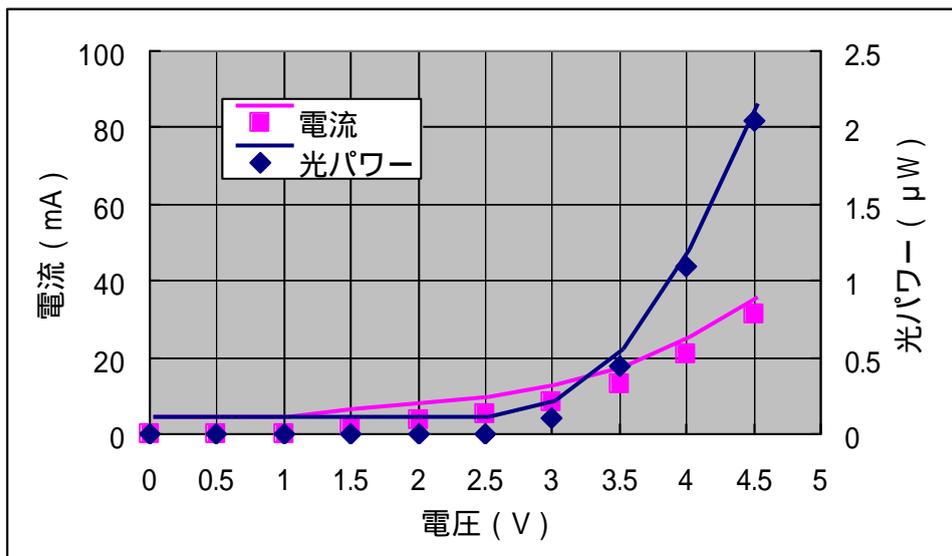


グラフ2 AuZn 使用発光ダイオード アニール後 I-V、V-P 測定

アニール前は 2.88[V]だったしきい値電圧はアニール処理することで光パワーのグラフの傾きは急になり、しきい値電圧を 2.68[V]に低下させることができた。

ここでしきい値電圧の変化が小さいのは、アニール前のしきい値電圧の取り方が強引であったための結果である。

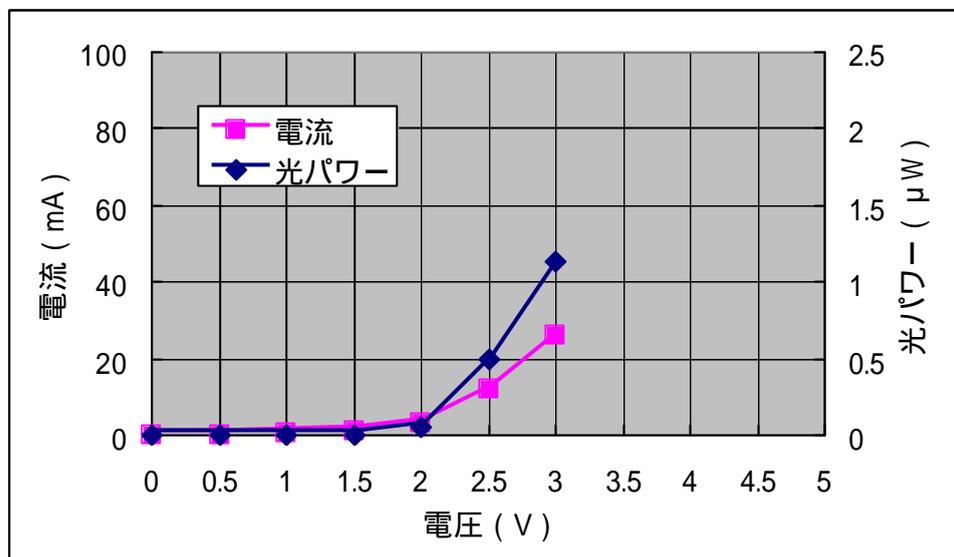
金属電極に Au のみを使用して測定する。グラフは以下の通り。



グラフ3 Au 使用発光ダイオード アニール前 I-V、V-P 測定

しきい値電圧は 3.42[V]と AuZn のものよりも高い値となった。

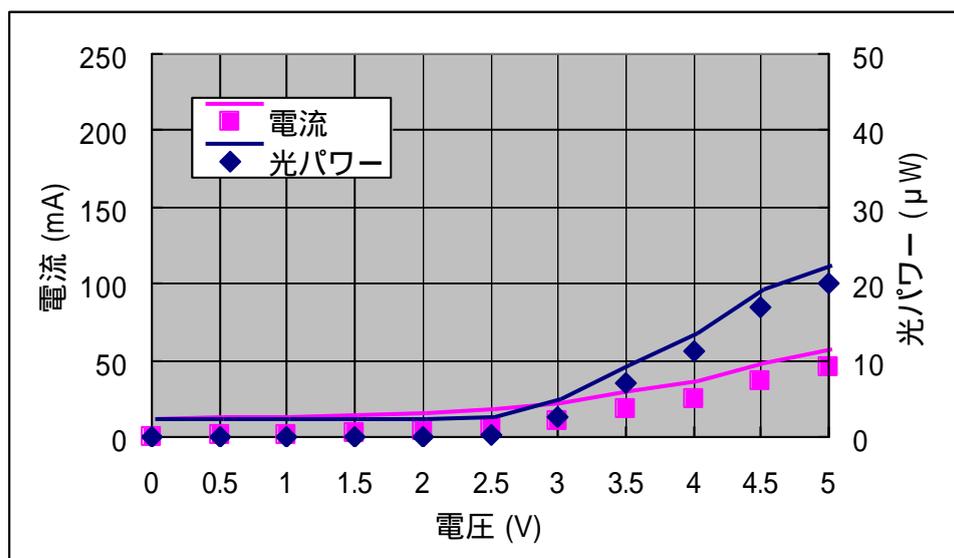
アニール処理を行ったものは以下の通りである。



グラフ 4 Au 使用発光ダイオード アニール後 I-V、V-P 測定

アニール処理を行うことで光パワーのグラフの立ち上がりが早くなり、低電圧で動作が可能となったことがわかる。しきい値電圧は 2.11[V]とアニールを行うことで約 1.31[V]の低下がみられ、電流と光パワーのグラフの傾きが急になっている。

つぎに電極に Ag を使用したもので測定した。



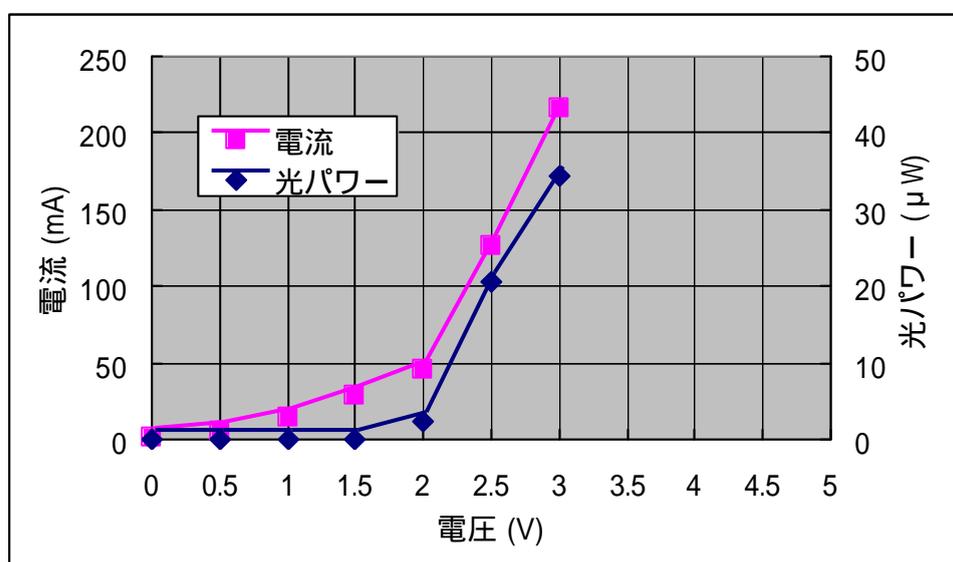
グラフ5 Ag 使用発光ダイオード アニール前 I-V、V-P 測定

しきい値電圧は、2.69[V]であった。

Ag を使用した発光ダイオードは、電極 AuZn を使用しアニール処理を施した発光ダイオードのしきい値電圧と同程度であった。

電極に Ag を使用したものは、アニール処理を行っていないにもかかわらず、光パワーの値が AuZn を使用したものや Au を使用したものよりも 10 倍以上高い値となっている。

Ag を使用し、アニール処理を行った結果は以下の通りである。

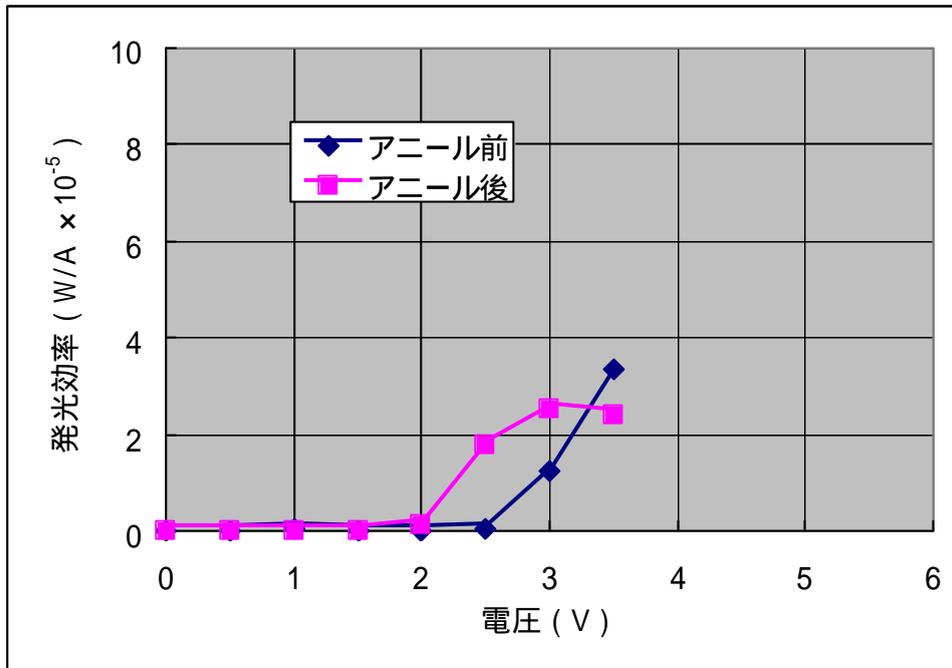


グラフ6 Ag 使用発光ダイオード アニール後 I-V、V-P 測定

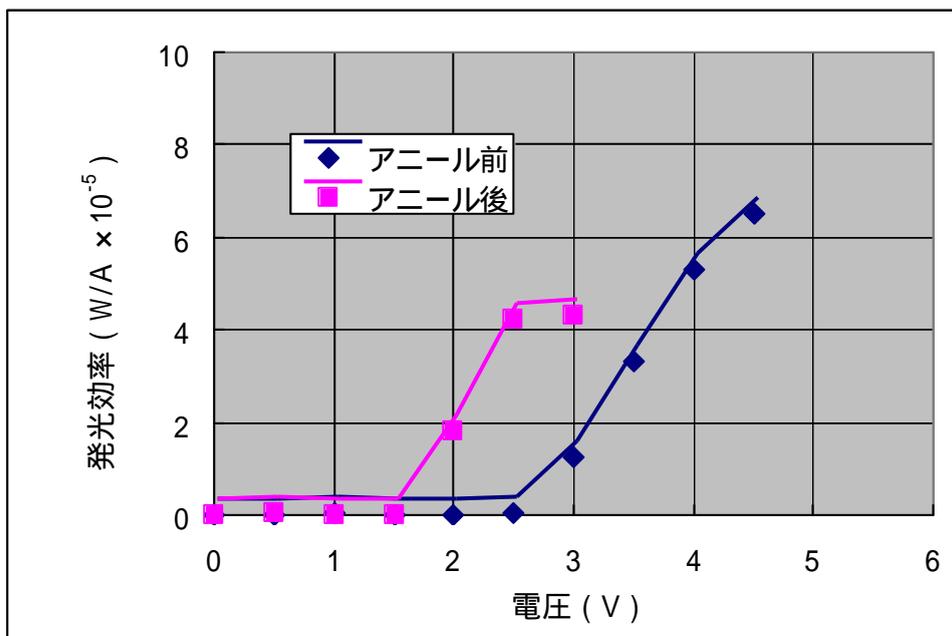
アニール前でも他のものより低かったしきい値電圧の値は、よりいっそう低くなり 1.92[V]であった。

他の電極のものより電流の流れが急であり、アニールすることで電流も光パワーの値も 10 倍以上高い値である。

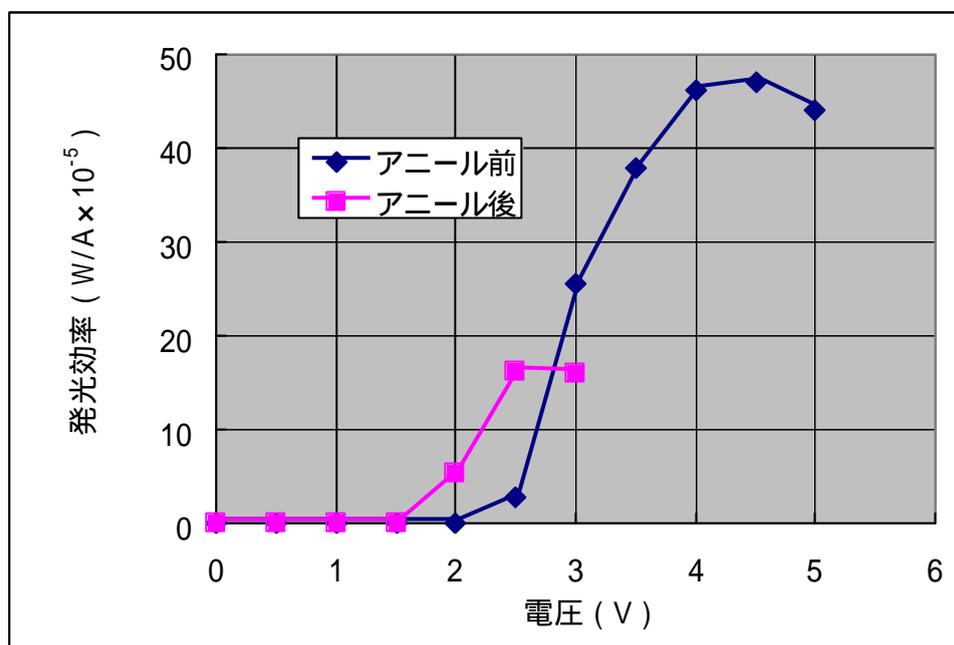
試作した発光ダイオードの発光効率を考える。(発光効率は、単位電流あたりの光パワーをいう)



グラフ7 試作発光ダイオード (AuZn) の発光効率



グラフ8 試作発光ダイオード (Au) の発光効率



グラフ9 試作発光ダイオード (Ag) の発光効率

3種類の金属電極を用いての発光ダイオードの発光効率はどれもアニール処理後はグラフが左により、アニール処理前より低電圧で発光が可能であることがわかる。

しかし、アニール処理を行っても発光効率の向上はみられず、同程度もしくは以前より低く Ag を使用したものは、確かにグラフは左により以前より効率の良い部分はあるものの、効率は極端に悪くなっている。

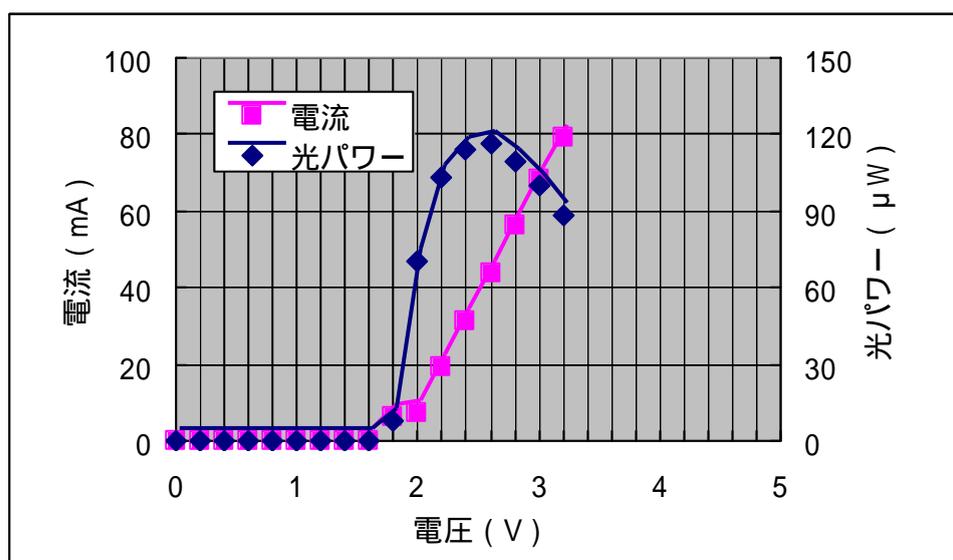
市販品発光ダイオードの測定

発光ダイオードは下の写真のものを使用した。



SHARP 製品 型名 GL5PR8

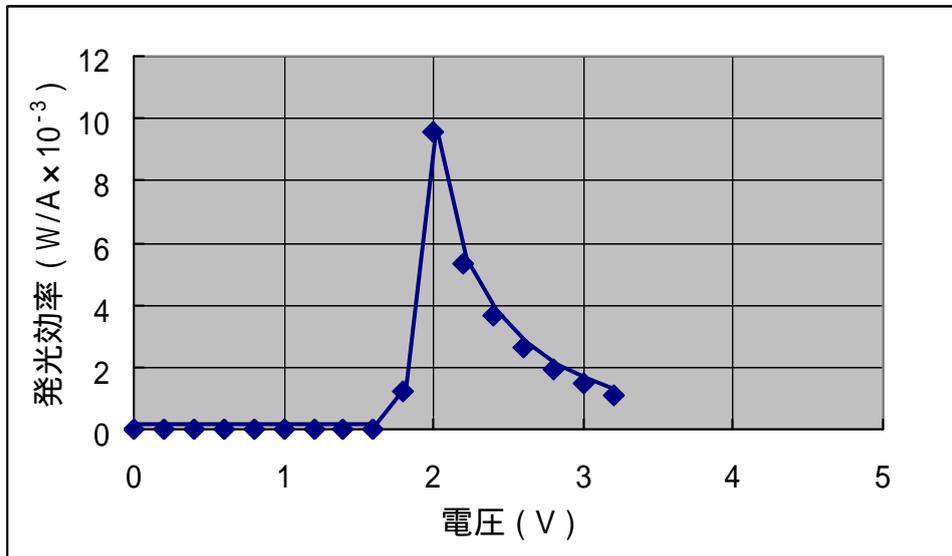
市販品の I-V、V-P 測定結果は以下の通りである。



グラフ 10 市販品発光ダイオード I-V、V-P 測定

市販品の発光ダイオードのしきい値電圧は低く、1.77[V]であり、光パワーは試作したもの比べるとAuZn使用発光ダイオードとAu使用発光ダイオードでは100倍以上高く、もっとも検出した光パワーが高かったAg使用のもの6倍くらい高い値であった。

発光効率を比較すると、



グラフ 1 1 市販品発光ダイオードの発光効率

市販品の発光ダイオードは、試作した物と比べると2桁ほど発光効率が高くグラフの形も試作した物が右上がりにグラフが傾きいちばん効率のいい状態を迎えそれから横ばい状態に近く緩やかに低下していくのに対して、市販品は、発光効率のピークを迎えるとすぐに効率が落ちていることがわかる。

7. 考察

実験結果（しきい値電圧の変化）を表にまとめると次のようになる。

	アニール前	アニール後
試作品 AuZn	2.88 [V]	2.68 [V]
試作品 Au	3.22 [V]	2.11 [V]
試作品 Ag	2.71 [V]	1.92 [V]
市販品		1.77 [V]

図 1 1 アニール前後でのしきい値電圧の変化

アニール前でいちばんしきい値が低かったのは p 型電極に Ag を使用した発光ダイオードであった。他の 2 種類の金属電極使用のものよりしきい値電圧が低く 2.71V であった。アニール後のしきい値電圧は 1.92V とアニールの前後で約 0.79V の低下がみられた。

p 型電極に AuZn を使用した発光ダイオードは、アニール前のしきい値が 2.88V で、アニール後が 2.68V であった。アニールの前後では 0.20V 程度しかしきい値電圧の低下がみられなかったのは、アニール前のしきい値電圧を強引にとったための結果である。

p 型電極に Au を使用したものは、アニール前では 3.22V、アニール後 2.11V とアニールの前後で 1.11V ものしきい値電圧の低下がみられた。

一方市販品の発光ダイオードはしきい値電圧が 1.77V と作製したものよりも低く、発光効率の高かった。

8.まとめ

発光ダイオードを試作し、発光させることができた。

試作したすべての発光ダイオードをアニール処理することでしきい値電圧の低下がみられ、発光効率向上に有効であることがわかった。しかし、市販品と比べるとしきい値電圧は高く、発光効率は低いことがわかった。

研究当初は一般に使用されている AuZn を電極として使用したものが発光には有効であると思われたが、Ag を電極とした方がよりよく電流が流れ、強い発光を示した。

9.謝辞

研究を行うに当たり高知工科大学教授である成沢忠教授をはじめ、大学院生の高橋秀和氏には多くの貴重なアドバイスをいただきました。深く感謝します。また、自分の研究があるにもかかわらず本研究に協力してくれた渥美貴久君に感謝する。

10.参考文献

発光ダイオード / 奥野保男 / 産業図書株式会社 / 1993

光エレクトロニクスの基礎 / 宮尾亘 平田仁 / 日本理工出版会株式会社 / 1999

光エレクトロニクス / 上林利男 貴堂靖昭 / 森北出版株式会社 / 1992