

卒業研究報告

題 目

半導体 - 金属コンタクトの研究

- TLM法によるコンタクト抵抗の測定 -

指 導 教 員

成 沢 忠

報 告 者

渥 美 貴 久

平成 13 年 2 月 9 日

高知工科大学 電子・光システム工学科

本卒業論文の目的

A GaInP系半導体の p-n 接合に金属電極を蒸着して発光ダイオード (LED) を試作した。素子を本研究では数種類の金属と上記の LED の p 型電極用半導体である p⁺-GaAs とのコンタクト抵抗を TLM 法によって測定し、その結果について考察する。

目次

1	はじめに	
1-1	発光ダイオードについて	- 3 -
1-2	発光ダイオードの原理	- 4 -
1-3	電極材料の選択について	- 5 -
2-1	本実験で使用した金属と半導体	- 10 -
2-2	実験の説明	- 11 -
2-3	TLM 法について	- 13 -
3-1	実験による測定結果	- 19 -
3-2	計算結果	- 24 -
4	考察	- 25 -
5	まとめ	- 25 -

はじめに

動機

半導体デバイス製造の工程には、大切な技術が数多く存在するが、その中でも半導体と金属のコンタクトの重要性を薄膜成長からアニール後のコンタクト抵抗を測定するまでを体験し、その精密性やそれぞれの工程の必要性・大切さを LED を通して学び、今後の半導体製造に携わる者として注意点や重要度の認識をするために本研究を行う。

1 - 1 発光ダイオードについて

1960 年代始めにアメリカのベル電話研究所において、化合物半導体の一つである GaP に不純物として Zn と O を加えると、きわめて強い赤色の発光が得られることが見つけられた。それ以来、研究が進められ様々な色の発光が得られることがわかり、次々と開発が進められ数多くの化合物半導体の発光ダイオードを製造することが可能になった。そして、現在ではバンドギャップの大きな GaN や SiC などの開発も行われ、赤色から青色まで色が揃うようになり表示用に用いたり様々なものに応用されている。その例として、現在市販されている発光ダイオードの一部を下表に示す。

表 1

市販されている主な発光ダイオードの材料、発光色、発光ピーク波長の一部

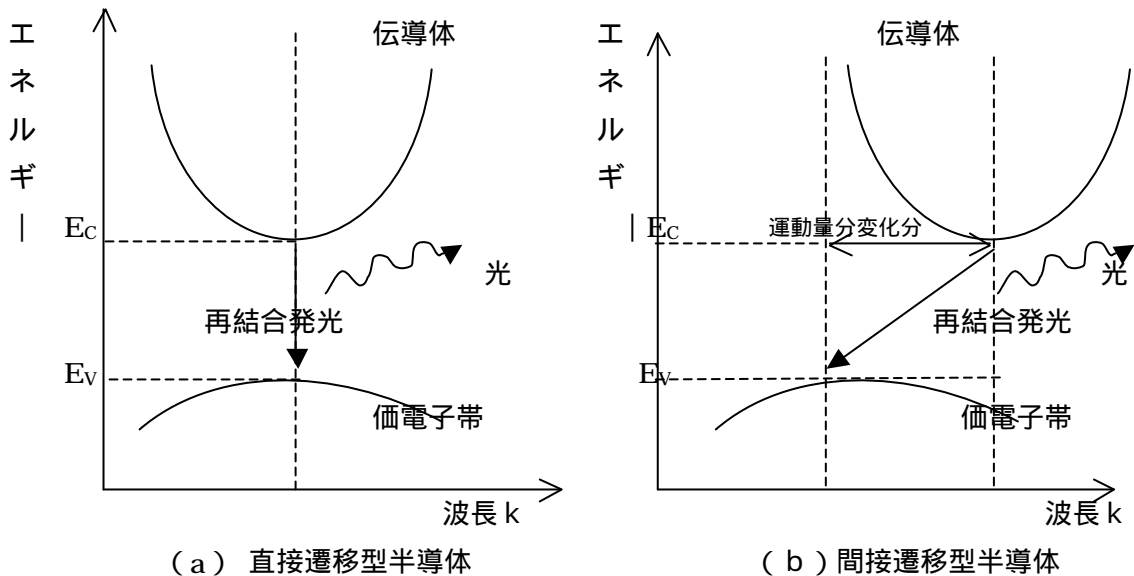
半導体材料	発光色	発光ピーク波長(nm)
GaP	赤色	700
AlGaAs	赤色	660
GaAsP	赤色	610
GaAsP	橙色	635
GaAsP	黄色	585
GaP:N	緑色	565
GaAs:N	緑色	555
SiC:Al,N	青色	470
InGaN	青色	450

1 - 2 発光ダイオードの原理

本研究では、発光ダイオードの製造から行うので、発光ダイオードの発光原理について、ここで少し述べる。まず、はじめに半導体のエネルギー構造を模式的に表わすと図1のようになる。半導体では電子が伝導帯を移動し正孔が価電子帯を移動することによって電荷の伝播が行われる。そして、図1に示すように伝導帯のエネルギー最小の谷と価電子帯のエネルギー最大の谷とが、ある禁制帯のエネルギー（バンドギャップ：例 GaAs 1.428eV）だけ離れて存在している。その場合、図1 - (a)のように伝導帯の谷と価電子帯の谷が、波数k軸で同じ点にあるような場合と、図1 - (b)にあるように異なった点にある場合とがある。GaAs、InSb、InAsなどの化合物半導体は、図1のタイプであり直接遷移型半導体という。そして、図1 - (b)のタイプには、Si、Ge、GaPなどが存在し間接遷移型半導体という。

このような半導体になんらかの方法で、伝導帯中の電子と価電子帯の正孔の平衡状態を崩すことにより、その不均衡な状態を平衡な状態に戻すために、電子と正孔が再結合を起こし、その際に発生するエネルギーが光として放出されるという現象が起こる。これが発光ダイオードによる光をでるメカニズムである。その時、伝導帯の底のエネルギー E_c と価電子帯の頂上のエネルギー E_v との差、 $h\nu = E_c - E_v$ が光が放出される際のエネルギーとなる。この場合はエネルギー保存の法則が成り立ち、同様に運動量 $p = \hbar \cdot k$ も成り立たなくてはなりません。光の運動量はほとんど0と考えてもよいので、直接遷移型半導体はエネルギー保存も運動量保存も同時に成立しますが、間接遷移型半導体で運動量の保存が満たされるためには、光以外に何かの関与が必要でフォノンがこの役目を果たす。

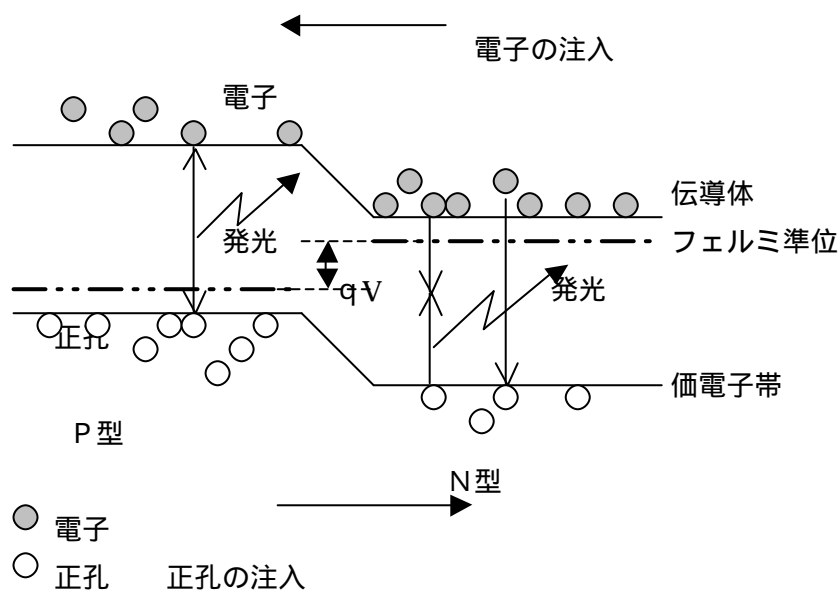
そのために、間接遷移型半導体は光の放出を起こす確率が低下するので、そのため発光効率が低下する。



直接遷移型および間接遷移型半導体のエネルギー帯構造と再結合による発光

図1

上でも説明したように半導体では、外部から電圧 V を順方向に印加することにより、障壁が下がり電子や正孔が障壁を越える確率が非常に大きくなるために、図2のように電子が n 層から p 層へ、正孔が p 層から n 層へと空乏層を乗り越え注入される。すると平衡状態が崩れ、電子・正孔の再結合が起こり光が放出され、この時バンドギャップの大きさに依存して放出される光の色が決定される。



順方向電圧 V を加えたときの $p-n$ 接合のエネルギーバンド構造とダイオードの動作原理図

図2

電極材料の選択について

半導体と金属

半導体に対する電極材料は、目的に応じて様々な単体金属から合金まで、その都度最適の金属を選択する必要がある。その要求条件は、金属と半導体との必要特性だけでなく、製造法、製造後の使用条件・用途など様々な点から選択される必要がある。

特に、現在の LSI などでは小型高性能化しており、それにより半導体と金属のコンタクト技術も形状の微細化、集密度が要求されている。このように、非常に正確性の要求されるようになれば、半導体と整合性など様々な視点から電極金属を選択する必要性が出てくる。

上に示したような理由により電極材料について、どのような点に重点を置いて電極材料を選ぶべきかを述べる。

- ・電気伝導性の優れたものを選ぶ
- ・半導体との電気的コンタクト性
- ・製造後の変化が少ないもの
- ・加工性が良いこと

電気伝導性の優れたものを選ぶ

金属は一般的には固有抵抗は小さく電気伝導性が良いものが多いが、これらの伝導率の広範囲に分布する電気伝導を選ぶが、それだけでなく過酷な条件に用いられる金属やその他、化学的性質に着目することもあり、電気抵抗が低いものだけが優れた電極材料というわけではない。

表2 金属の固有抵抗率

金属名	金属の固有抵抗率(cm)
A g	1.59×10^{-4}
A u	2.35×10^{-4}
P t	9.8×10^{-4}
A l	2.65×10^{-4}
W	5.6×10^{-4}
C u	1.67×10^{-4}

半導体との電気的コンタクト性

この実験の目的でもある半導体基板と金属材料との電気的特性、つまり低いコンタクト抵抗の金属を選択する必要がある。これには、Au-Znのように半導体の不純物濃度をあげるために単一金属を使用するだけではない。そして、高いコンタクト抵抗が発生する理由には、酸化膜のような絶縁性の介在物が存在するような場合、もう一つに半導体と金属の仕事関数の差などにより形成されるコンタクト障壁の存在があげられる。この仕事関数についての影響は後で述べる。

製造後の変化が少ないもの

製造した半導体デバイスが、金属が酸化しやすく、その後に影響を及ぼすようなものであれば、その金属の使用を避ける必要がある。しかし、LSI のアルミ配線などアルミニウムの酸化しやすさを利用して、アルミ配線後コーティングとしてアルミニウムが酸化した Al_2O_3 を利用する場合もある。よって、どのような用途に金属を使用するかによって選択する必要がある。しかし、極端な場合には基板との乖離やストレスマイグレーション現象を起こしやすいものもあるので注意が必要である。

表3 金属の酸化程度

反応	程度	金属名
酸化しやすさ	高	Al, Ta
	↑	Ga, Zr, Cr, In, Si, Ti
		W, Mo
	↓	Cd, Ni, Cu
		Ag
低	Au, Pt, Pd	

加工性が良いこと

現在のデバイスプロセスでは微細加工が必要であり、そのため加工性の悪い電極であれば、どれほど電気的特性が優れた材料であっても使用される機会が少なくなる可能性がある。電極では形状が非常に重要な要因であるので、電極の整形不良というのは、一般的に製造デバイスの歩留まりを支配する主要原因の一つとして問題になっている。

先に述べたように金属と半導体の整合性を仕事関数の点から述べる。

仕事関数とは、半導体の結晶表面から、真空中へ電子が遊離されるのに必要な仕事で、真空電位とフェルミレベルとの差で表される。

半導体の伝導極性の差によって、エネルギーバンド図の形は、見かけ上異なったものになるが、ここでは一般的なエネルギーバンド図を図3、図4に示す。

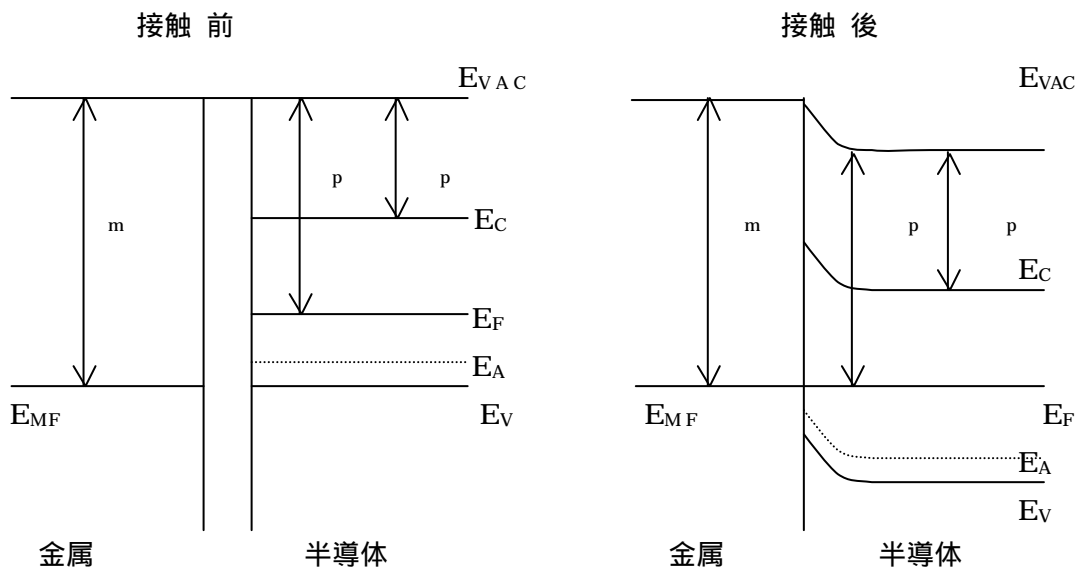
まず、金属の仕事関数 ϕ_m が p 型半導体の仕事関数 ϕ_p よりも大きいと仮定した場合

次に、金属の仕事関数 ϕ_m が p 型半導体の仕事関数 ϕ_p よりも小さいと仮定した場合

左図はコンタクト前のもの

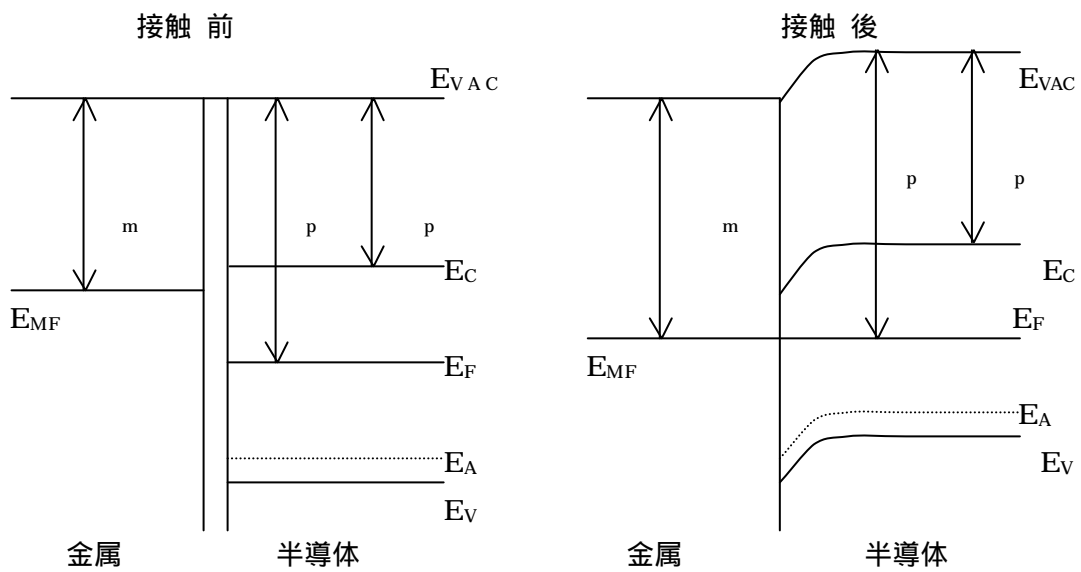
右図はコンタクト後のもの

とします。



$m > p$ のときの p 型半導体と金属のコンタクト

図 3



$m < p$ のときの p 型半導体と金属のコンタクト

図 4

- | | | | |
|-------------|----------|------------|-----------|
| E_{VAC} : | 真空準位 | E_{MF} : | 金属のフェルミ準位 |
| E_C : | 伝導帯 | E_V : | 価電子帯 |
| E_A : | アクセプタレベル | E_F : | フェルミ準位 |
| p : | p 型仕事関数 | m : | 金属の仕事関数 |
| χ : | 電子親和力 | | |

図3、図4の半導体と金属を接触させることによる状態の変化から説明します。まず、半導体と金属のコンタクトでは金属のエネルギー準位のうける見かけ上の影響は小さいので、その変化は省略し半導体のフェルミ準位が金属の準位と一致するように各エネルギー準位の形を変形させて、電荷の平衡状態に対応させたものです。金属の仕事関数 ϕ_m が p 型半導体の仕事関数 ϕ_p よりも大きいと仮定した場合には、半導体側では接触の界面近くの正孔の流出に伴って境界面でのエネルギー準位の上方への曲がりを生じる。それとは、反対に金属の仕事関数 ϕ_m が p 型半導体の仕事関数 ϕ_p よりも小さいと仮定した場合には、金属から半導体に正孔が流れ込むために境界面でのエネルギー準位は下方へと曲がる。この曲がり方は、半導体の伝導性のためではなく、仕事関数の大小関係に大きく依存する。そして、この曲がり方が電子や正孔の障壁となり、キャリアの流れやすさ・流れにくさに大きく関係する。

表4 金属の仕事関数

金属	仕事関数(eV)
Au	4.70
Ag	4.31
Ti	3.96
Pt	5.48

今回の実験に使用した p 型電極接触面である GaAs について

GaAs はシリコン半導体と比較して、GaAs 中を移動する電子の速度が約 5 倍速く、したがって高速動作が期待できる。また、シリコン半導体よりも低電圧・低消費電力が可能です。GaAs と金属の接触は容易に成長形成させることができる。

障壁の高さも高い

バンドギャップ 1.42eV

バンドギャップの下から 1/3 程度のところに表面準位が多くあるために、金属の仕事関数によらず、ほぼ 0.8eV 程度の障壁の高さが得られる。したがってどの金属でも十分な整流性がえられ、使われる金属の種類はつくりやすさ、加工性、熱的安定性などによって選ばれる。

2 実験方法

2 - 1 本実験で使用した金属と半導体

Au-Zn 5% }
 Au } 今回使用した電極材料
 Ag }

まず第一に本来使用される Au-Zn は、熱処理後に Zn の拡散を期待した電極材料である。Au は不純物 Zn が混入されていない電極材料 Au-Zn との比較（不純物を加えることによる影響を調べる）のための選択。しかも、Au は酸化しにくく伝導性に優れている金属である。Ag も酸化しにくく伝導性に優れおり、Au との比較するための金属として選択した。

今回使用した半導体は、商品としてレーザとして使用されている物を発光ダイオード（LED）として使用したものである。

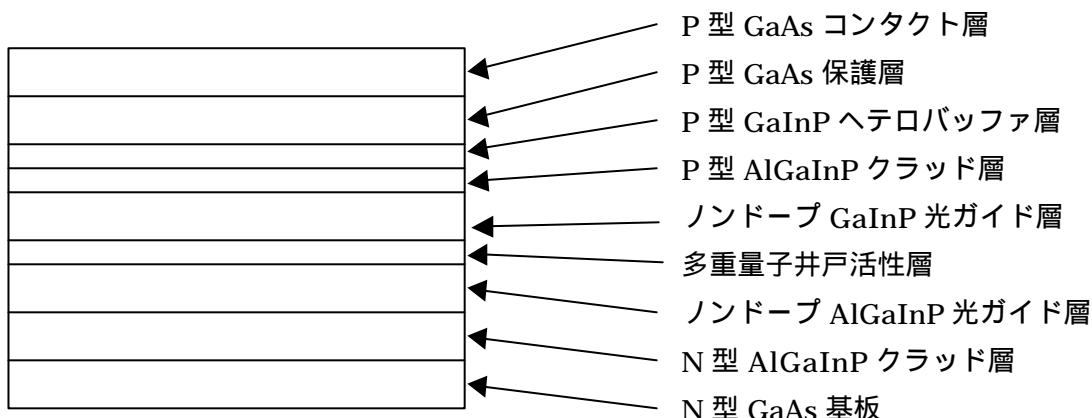


図5 今回使用した半導体

表5 今回使用した半導体の各層の厚さ

	薄膜 ()	濃度 (/ c m ⁻³)
P 型 GaAs コンタクト層	1000	1×10^{19}
P 型 GaAs 保護層	2200	3×10^{18}
P 型 GaInP ヘテロバッファ層	500	3×10^{18}
P 型 AlGaInP クラッド層	11000	1×10^{18}
ノンドーブ GaInP 光ガイド層	100	
多重量子井戸活性層	4 well 活性層 53 バリア層 50	
ノンドーブ AlGaInP 光ガイド層	100	
N 型 AlGaInP クラッド層	11000	1×10^{18}

本来この半導体はレーザを製作するためのものであり、各層は下に説明するような用途のために層である。

GaAs コンタクト層	金属電極との接触層
GaAs 保護層	熱処理の
GaInP ヘテロバッファ層	格子定数や熱膨張係数の異なる物質をスムーズに接合することを助けるための層
AlGaInP クラッド層	光を外側に漏れないように屈折率の差を利用して内側に光閉じ込めるための層
ノンドープ GaInP 光ガイド層	光が閉じ込められている層
多重量子井戸活性層	電子と正孔が再結合し光を放出する層

2 - 2 実験の説明

ここで実験方法と実験条件について説明する。まず、この実験では、上に示すように赤色を発光する AlGaInP 系の半導体に Au - Zn, Au, Ag の 3 種類の金属を成長させる。そして、それぞれのコンタクト抵抗を TLM 法を用いて測定した後、それらにアニール処理を施し、それがコンタクト抵抗にどのような変化をもたらすかを測定し考察する。

まず、細長く切り出されたウェーハに、図 6 のように A、B、C のように金属を蒸着させる。コンタクト抵抗の測定に用いる TLM 法では、わかりやすくするために電流の流れを矢印 \rightarrow だけの 1 次元で考えるためにウェーハ

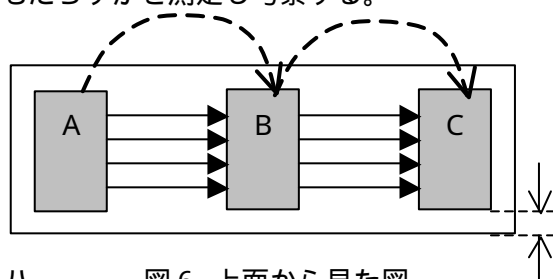


図 6 上面から見た図

を細長く作成した。これは矢印 \rightarrow のように流れる電流を防ぐためである。ウェーハを細長くすることにより矢印 \rightarrow だけを考えればよくなる。そして、矢印で \rightarrow 示すように金属を端から端まで蒸着していないのは、ウェーハが薄いために表面で流れる電流が側面を通じて裏側へと流れるのを防ぐために設けている。

今回このような蒸着をするためにアルミ薄を利用しマスクを作成した。今回、金属を蒸着する場合、1 度使ったマスクを 2 度目に使用することは困難であったために、その都度マスクを作成したために形状にバラツキがある。

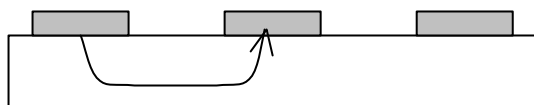


図 7 側面図

本研究では わかりやすくするために、図 7 に示すような電流は考慮に入れていない。

金属蒸着

右図の装置を使用し金属 Au-Zn、Au、Ag を蒸着した。

真空蒸着装置の使用条件
排気時間 10 時間以上
80A の電流で金属を飛ばす

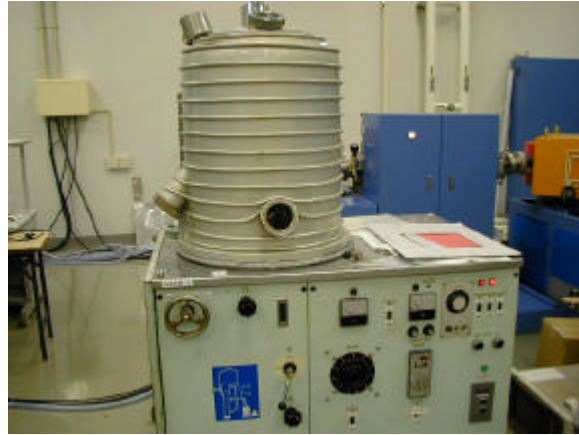


写真1 蒸着装置

真空装置内を真空にする事により、半導体に成長させたい金属以外の酸素やその他不純物を混入させないようにするために高真空にする。

アニール処理

アニールには右写真の酸化炉を使用

アニール条件
右の写真2の装置を使用し、窒素雰囲気中
で1気圧、温度450 30分

しかし、この装置の冷却時間が非常に
かかる。150 程度まで冷却するのに
4時間程度必要。

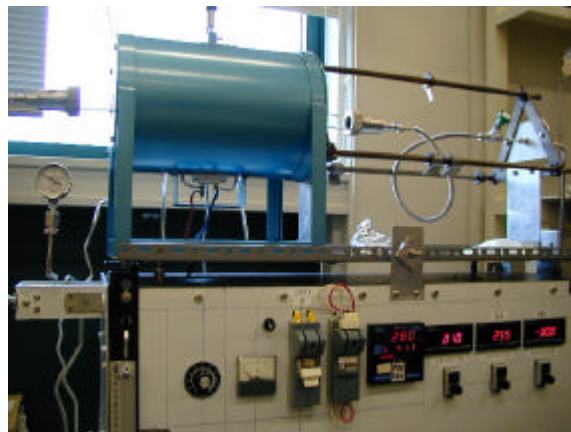


写真2 酸化炉

アニール処理を施す事により Au-Zn 電極の Zn が、半導体中に拡散することによって半導体の不純物濃度を高くする効果がある。それに加えアニールによりキャリアの偏りを無くし、電荷の円滑な再結合を促すために行う処理

2 - 3 TLM 法について

TLM 法とは Transmission Line Model の略であり、図 1 に示すような薄膜状サンプルのコンタクト抵抗を評価するのに用いられる最もポピュラーな方法として Shockley によって提案された測定法であり、その名の通り電極とその直下の半導体層を図 8 に示すようないわゆる伝送線回路と等価と考える方法である。伝送線の理論を用いる事により、図 8 のコンタクトの x 方向の任意の場所における電圧および電流は x = 0 での電圧および電流を用いて次式のように表すことができる。

$$v(x) = v(0) \cosh(x/L_t) - i(0) Z \sinh(x/L_t)$$

$$i(x) = i(0) \cosh(x/L_t) - v(0) Z \sinh(x/L_t)$$

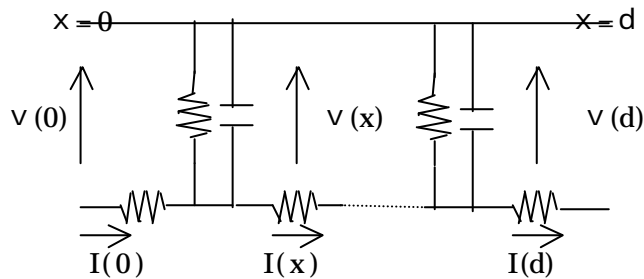


図 8 TLM 法の等価回路

上式の Z は伝送線の特性インピーダンス、 L_t は伝搬長と呼ばれ、伝送線であるコンタクト部分の x 方向の電圧および電流の変化の程度の目安を与える量であり、電流は事実上、電極内の x 方向の距離 L_t の範囲で流れているとみなすことができる。

そして、TLM の測定は DC 電流を用いて測定を行うので、その場合、上図の等価回路に示したコンデンサは考慮しなくてよいことになる。

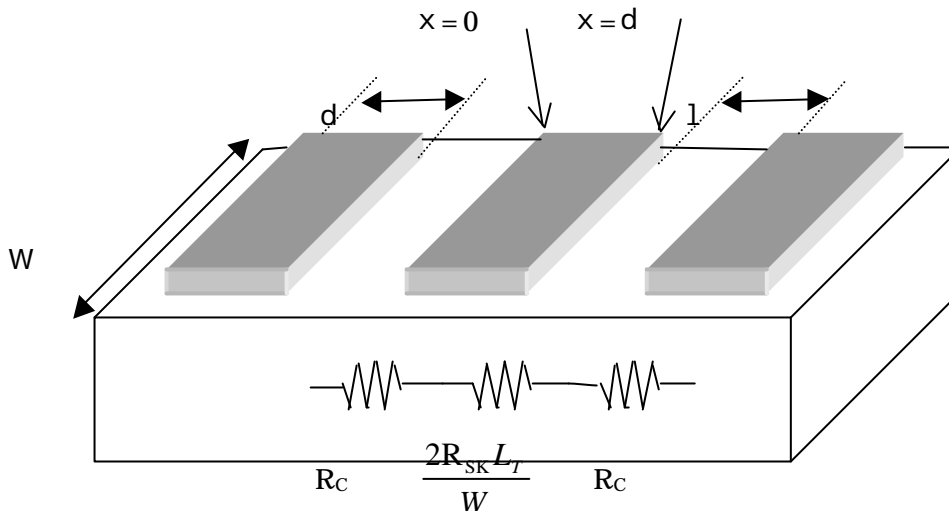


図 9 TLM 法のため製作した半導体

伝搬長 L_t について

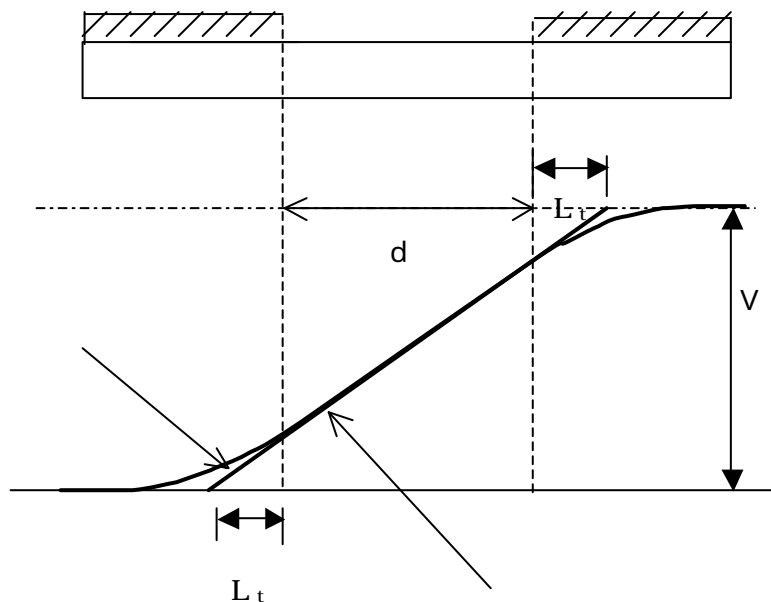


図 10 伝搬長と電圧の関係

伝搬長は上図に示すように2つの電極間の電位差を測定するとTLM法では のような直線の仮定を前提としている。しかし、実際は のように電極直下では曲線となり、そして、上図に示すように L_t を定義する。この伝搬長 L_t の距離だけ金属直下に入り込み金属電極と半導体のコンタクト抵抗に影響を与えている。

半導体のオーミックコンタクトの性能を定量的に示す金属と半導体のコンタクト抵抗 (R_c) や固有コンタクト抵抗 c (cm^2) を測定するのに用いられる方法として Transmission Line Model (TLM) が、一般的に用いられていることは先に述べたが、次にその測定法について少し説明する。まず、半導体に金属を (幅= W , 長さ= d) の2つのコンタクトを距離 L だけ離し、距離の異なる電極間の $I-V$ を測定し抵抗 R を導き出す事により、横軸 L , 縦軸トータル抵抗 R_T の関数として測定結果の値をグラフにとる事により、図 11 の示すように R_T 軸と直線との交点が $2R_c$ となる。 R_T と L の方程式が transfer length L_t からコンタクト抵抗 R_c を導き出すこともできる。そして、 L_t は図 1 で示されるように L 曲線と交点の $R_T=0$ より表される。

通常の金属と半導体の組み合わせでは、 $R_{SH} = R_{SK}$ とみなして良く、 $L = 2L_t$

R_{SH} : 電極直下以外の半導体層のシート抵抗

R_{SK} : 電極直下の半導体層のシート抵抗

である。そして、 $d \gg L_t$ という条件であれば、 $c = R_{SH} \cdot L_t^2$ が成立する。

先に示したように距離の異なった電極間の I-V 測定から求めた抵抗をプロットすることにより図 1 1 のようになる。(グラフ 4 ~ 6、グラフ 10 ~ 12 に実測値)

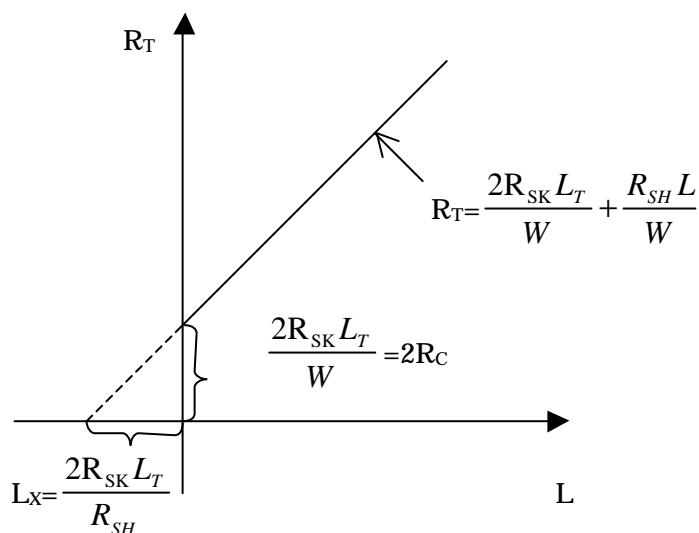


図 1 1 電極間の距離と抵抗の関係

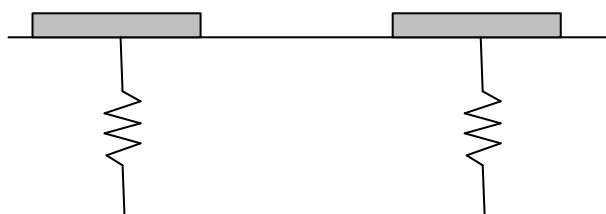


図 1 2

図 1 1 $R_T = \frac{2R_{SK}L_T}{W} + \frac{R_{SH}L}{W}$ の y 切片 $\frac{2R_{SK}L_T}{W} = 2R_C$ は 図 1 2 のような 2 つの抵抗値となる。

しかし、電極直下以外の半導体層のシート抵抗 R_{SH} が変化する場合があり、それは一部の半導体と金属の間で、たとえば n-GaAs 上の Au-Ge Ni があり $R_{SH} = R_{SK}$ 条件が成立しなくなるのがわかっている。その変化はアニールなどのプロセスによって金属と半導体の界面に引き起こされる変化であり、 R_{SH} と R_{SK} を等しいとみなせなくなる ($R_{SH} \neq R_{SK}$)。このように この界面の変化があった場合には、エンド抵抗と呼ばれる抵抗を測定することによって、変化した電極直下の半導体層のシート抵抗 R_{SK} を補正することができる。しかし、本研究では近似としてアニール後もシート抵抗には、変化がないものとして実験を進めていく。

TLM法を用いて測定した抵抗を図11に示すように、異なる距離ごとに抵抗値を横軸（距離） 縦軸（抵抗）で取っていくと、図11に当てはめることができる。

これらから、定量的に固有コンタクト抵抗を導き出すことができる。

2つの金属接触のトータル抵抗は

$$R_T = 2R_C + \frac{R_{SH} \cdot l}{W} \quad (1)$$

R_C は次のように表される

$$R_C = \frac{2R_{SK} L_t}{W} \quad (2)$$

$$L_t = \sqrt{\frac{c}{R_{SK}}} \quad (3)$$

上の(3)式を説明する

図に示したように金属と半導体との抵抗 R_C は、金属電極の下に入り込んでいる（影響を受けている）ために、伝搬長 L_t と電極幅 W による面積 $L_t \times W$ に寄与するよって、コンタクト抵抗 c (cm^2)は金属と半導体との抵抗 R_C に伝搬長 L_t と電極幅 W による面積 $L_t \times W$ を掛けたものとして求められる。

よって、

$$\begin{aligned} c &= R_C \times L_t \times W \\ &= \frac{2R_{SK} L_t}{W} \times L_t \times W \\ &= R_{SH} \times L_t^2 \end{aligned}$$

のように示される。

R_{SH} 電極直下以外の半導体層のシート抵抗

R_{SK} 電極直下の半導体層のシート抵抗

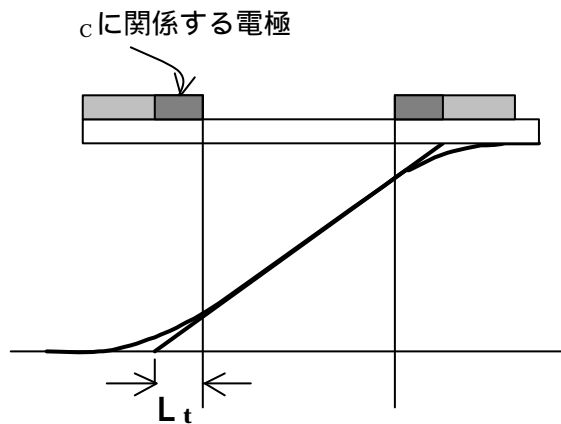


図12 (a)

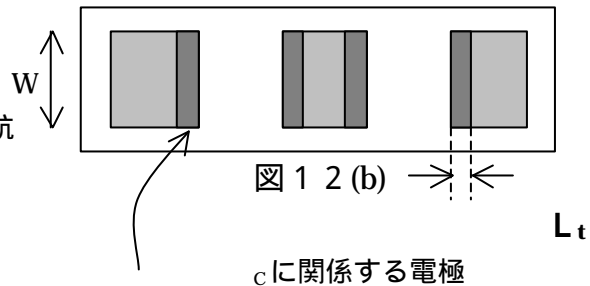


図12 (b)

写真3の右写真のように針を作製した半導体の
 金属電極にプローブし、距離 L_1 , L_2 , L_3
 のように異なった距離の I-V 測定を行う。

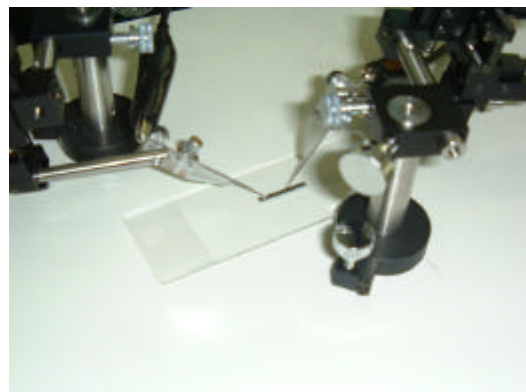


写真3 測定中

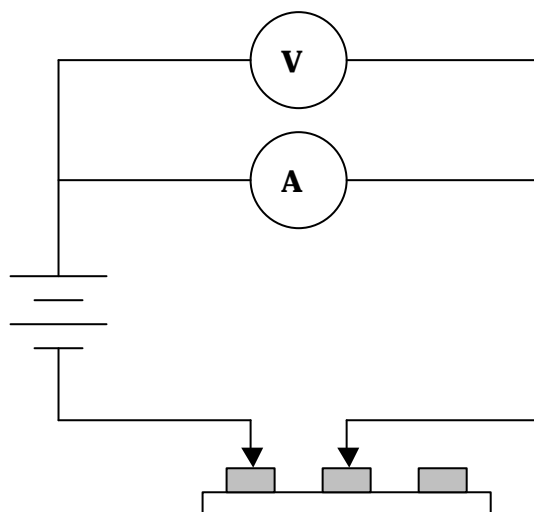


図12 回路図

図12に示すように回路を組み、写真3
 のように作製した半導体に針をプローブ
 をして I-V 測定をした。

測定に用いた器材

電源 KENWOOD PR18-1.2A

電圧計 KENWOOD DL 711

電流計 FLUKE 867B

顕微鏡 Nikon SMZ-U

I-V 測定より選られたデータより抵抗 R を上に示したように横軸 L 縦軸 R で距離 d_1 、 d_2 ……と数値をとると、それらの R 点を結ぶ直線と縦軸 R との交点がコンタクト抵抗 R_c である。取られた抵抗 R を正確に近似するために、ここでは1次の最小2乗法を用いて近似する。

最小 2 乗法について

最小 2 乗法とは $y = ax + b$ を仮定し、測定値とこの直線との誤差の 2 乗和が最小になるように、測定値を仮定した式で近似する。

$$S = \sum_{n=1}^N (y_n - (b + ax_n))^2$$

$$\frac{\partial S}{\partial a_0} = 2 \sum_{n=1}^N (b + ax_n - y_n)x_n$$

$$\frac{\partial S}{\partial a_1} = 2 \sum_{n=1}^N (a_0 + a_1x_n - y_n)x_n$$

S を最小とする条件は、 $\frac{\partial S}{\partial a_0} = 0$, $\frac{\partial S}{\partial a_1} = 0$ である。

S を最小とする係数 a_0 a_1 は、係数 a_0 a_1 の 2 元連立 1 次方程式を解いて得られる。上記の連立方程式を解くと

$$a = \frac{\sum y_i \cdot \sum x_i^2 - \sum x_i \cdot \sum y_i x_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

$$b = \frac{N \sum y_i x_i - \sum x_i \cdot \sum y_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

となる。

本研究では、グラフ 4 , 5 , 6、10、11、12 に近似として最小 2 乗法を使用している。

実験による測定結果

ここでは TLM 法により測定した I - V 測定とそれより求められた抵抗を示す。

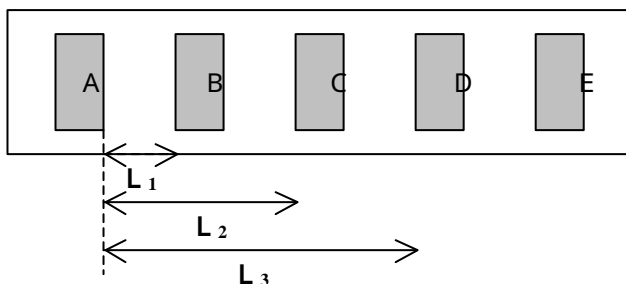


図 1 3

図 1 3 に示すように電極 A を起点として、それぞれの電極間の I-V 測定をする。AB 間の距離を L_1 、AC 間の距離を L_2 ……のように $L_1 < L_2 < L_3 < L_4 < L_5$ と距離が長くなる。

グラフ 1, 2, 3 アニール前の I-V 測定

グラフ 4, 5, 6 アニール前の抵抗

グラフ 7, 8, 9 アニール後の I-V 測定

グラフ 10, 11, 12 アニール後の抵抗

表 6 に今回作製した半導体に蒸着した金属電極のスケールを示す

表 6 金属電極のスケール

金属名	W (mm)	L (mm)	d (mm)
Au Zn	0.7 mm	2 mm	0.8 mm
Au	1.5 mm	1.5 mm	1 mm
Ag	1.4 ~ 2.0 mm	1.5 mm	1 mm

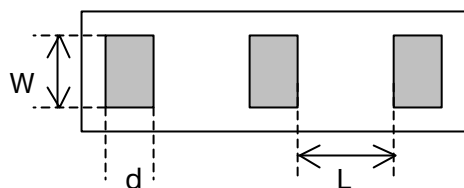
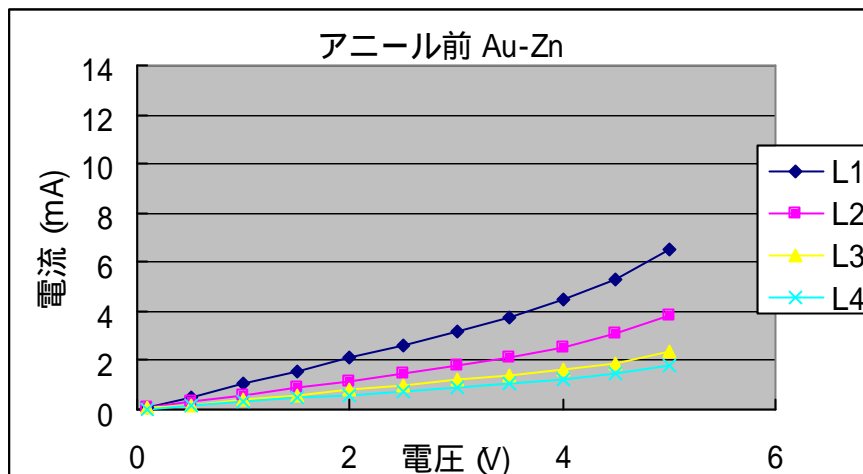
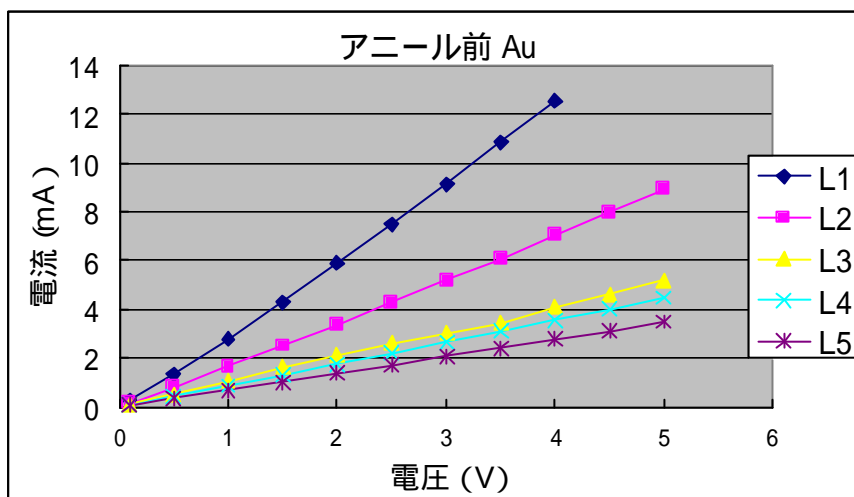


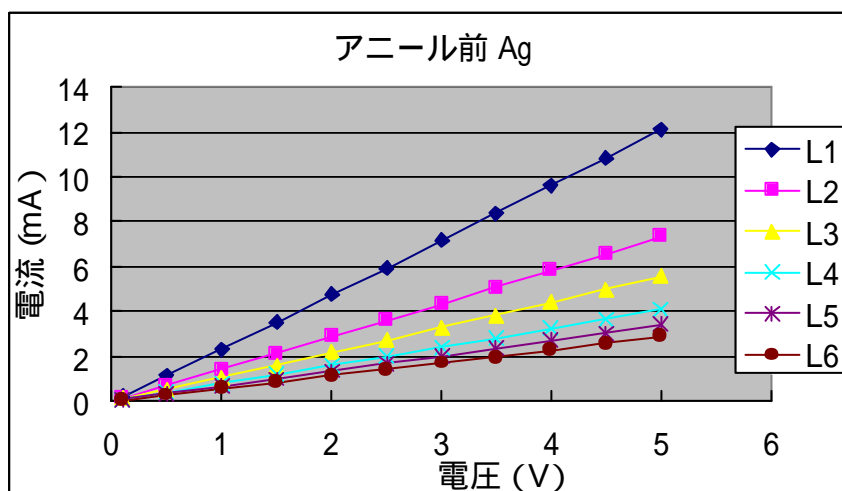
図 1 4 金属電極のスケール



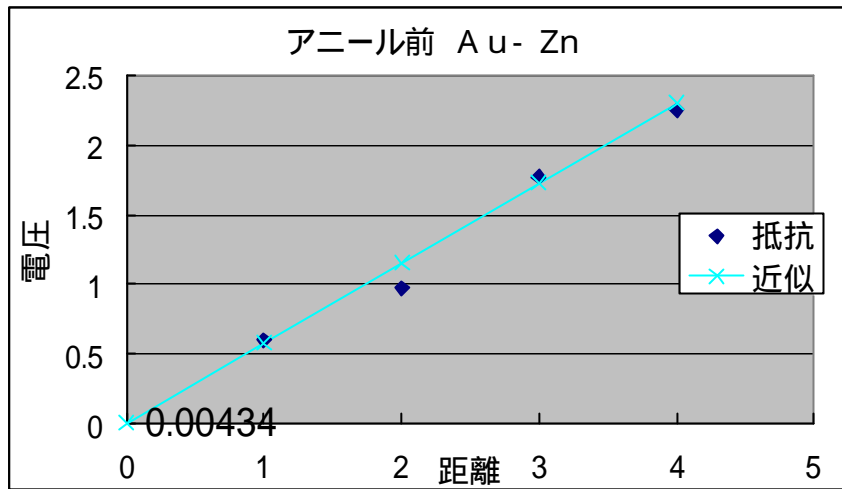
グラフ1 アニール前の Au-Zn の V-I 値



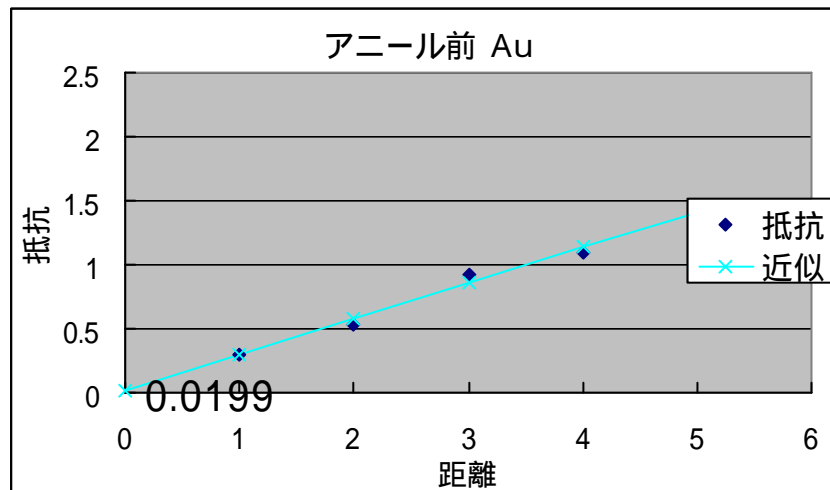
グラフ2 アニール前の Au V-I 値



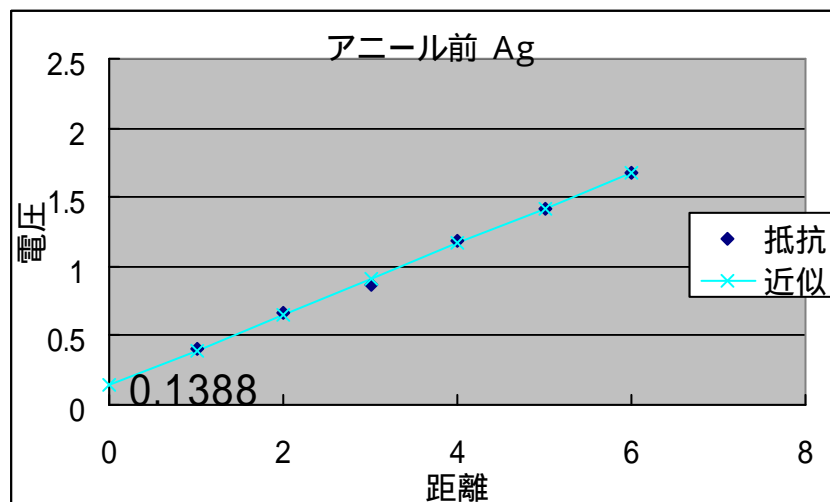
グラフ3 アニール前の Ag の V-I 値



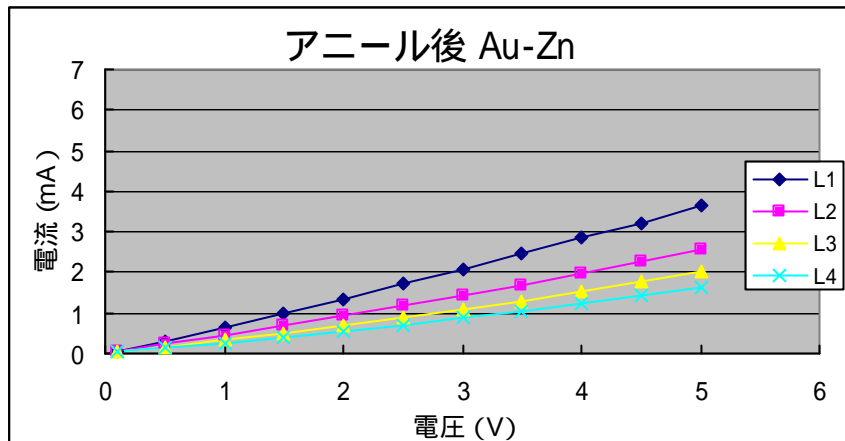
グラフ4 アニール前 Au-Zn 抵抗



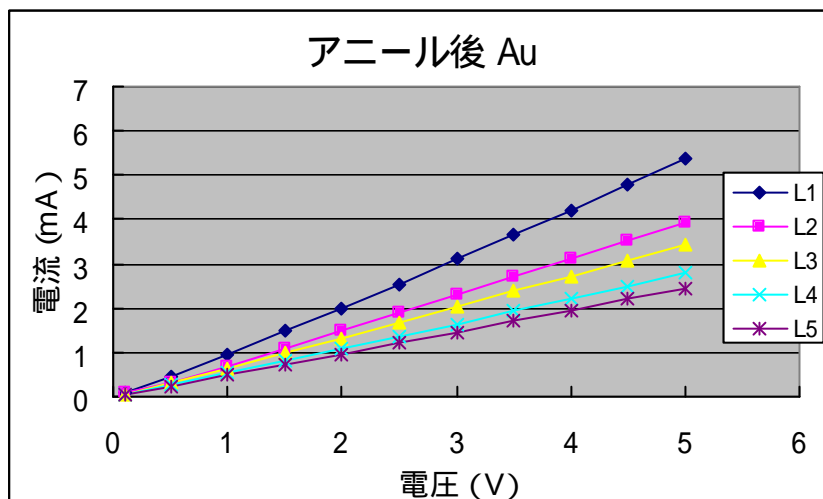
グラフ5 アニール前 Au 抵抗



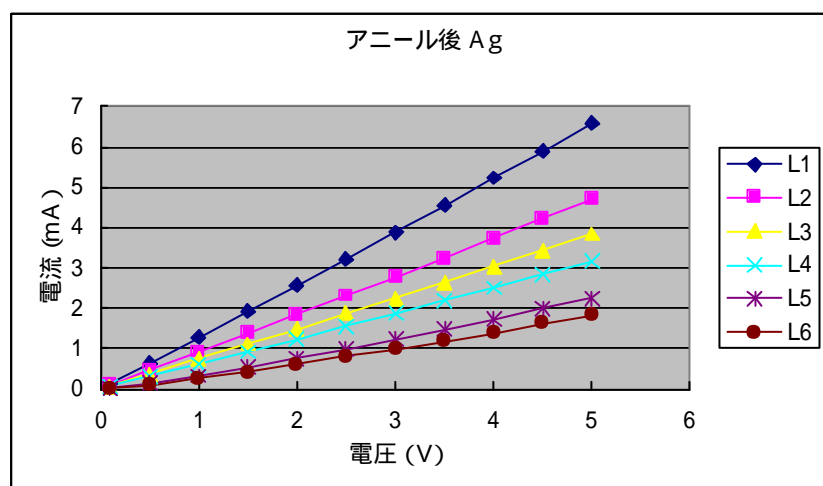
グラフ6 アニール前 Ag 抵抗



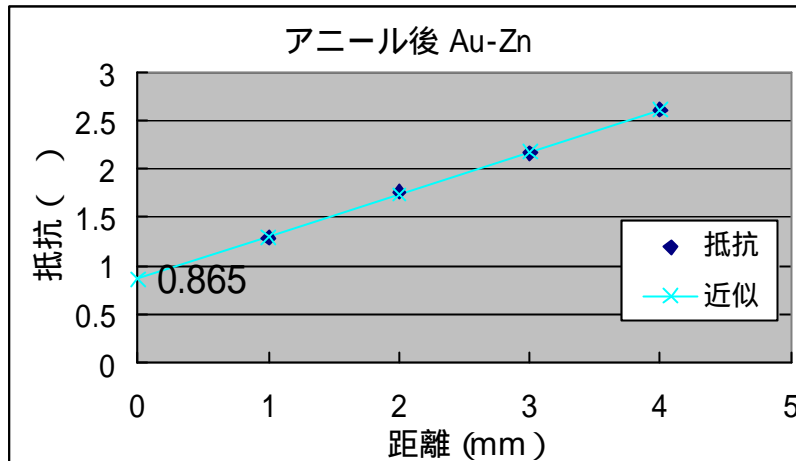
グラフ7 アニール後の Au-Zn の V-I 値



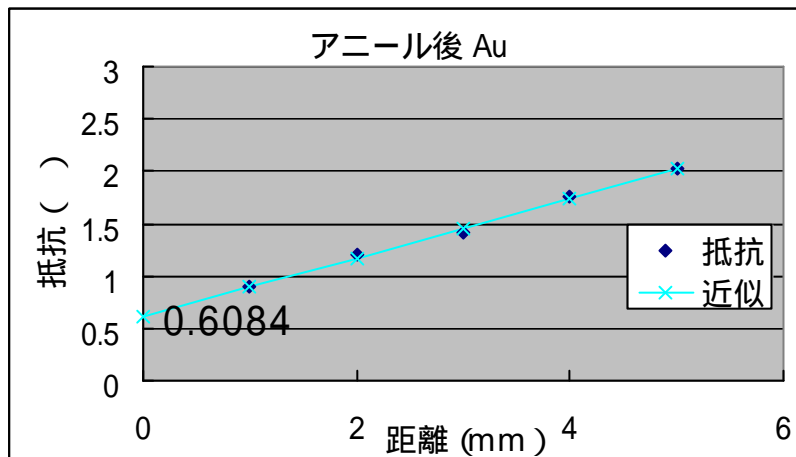
グラフ8 アニール前の Au の V-I 値



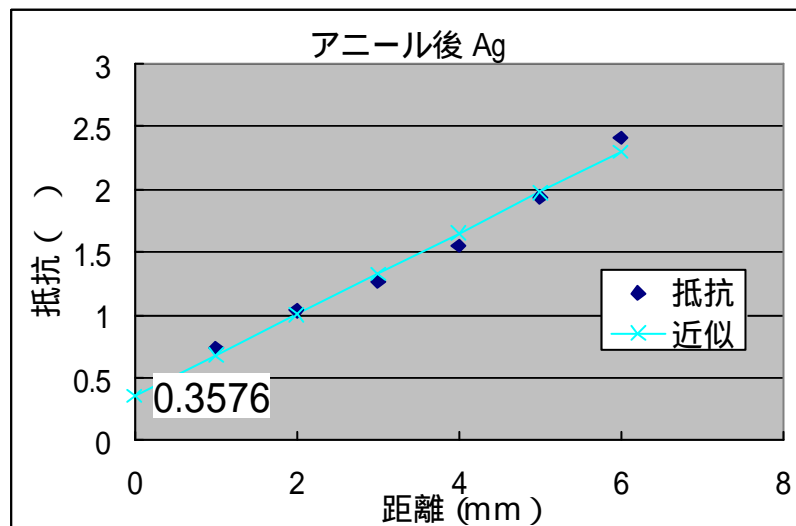
グラフ9 アニール前の Ag の V-I 値



グラフ 10 アニール後 Au-Zn 抵抗



グラフ 11 アニール後 Au 抵抗



グラフ 12 アニール後 Ag 抵抗

測定したグラフを順に説明する。アニール前の I-V 値は、距離の短い L_1 が一番抵抗が小さく、距離が長くなるにつれて抵抗が大きくなり電流が小さくなり、すべての測定値に対してオーミックコンタクトとなっている。

次に I-V 値より抵抗 R を求めて、それを距離ごとにプロットした値を最小 2 乗法により $y=ax+b$ の一次直線で近似したグラフである。2 点により I-V 測定をしているので、縦軸抵抗 R との交点が 2 つの半導体と金属のコンタクト抵抗 (c_m) を合計した数値として測定したグラフからわかる。このグラフからは、 $Au-Zn < Au < Ag$ となり理想的な値を示していることがわかる。

アニール処理後の I-V 測定を見てみると、こちらもアニール前と同様オーミックコンタクトとなっており問題はないが、I-V 値からとった抵抗の近似直線を見ると $Au-Zn > Au > Ag$ となり、アニール処理により Au-Zn の Zn の拡散などの現象が見られず非常におかしな結果になっている。

3 - 2 計算結果

$$c = R_c (L_t \times W)$$

この式に測定した値を代入すると

アニール前

$$Au-Zn \quad c = 0.00434 \times 7.54 \times 10^{-3} \times 0.7 = 2.29 \times 10^{-4} \text{ (cm}^2 \text{)}$$

$$Au \quad c = 0.0199 \times 7.15 \times 10^{-2} \times 1.5 = 2.29 \times 10^{-3} \text{ (cm}^2 \text{)}$$

$$Ag \quad c = 0.138 \times 5.41 \times 10^{-1} \times 1.5 = 0.113 \text{ (cm}^2 \text{)}$$

アニール後

$$Au-Zn \quad c = 0.865 \times 1.98 \times 0.7 = 1.20 \text{ (cm}^2 \text{)}$$

$$Au \quad c = 0.0199 \times 7.15 \times 10^{-2} \times 1.5 = 0.213 \text{ (cm}^2 \text{)}$$

$$Ag \quad c = 0.138 \times 5.41 \times 10^{-1} \times 1.5 = 11.2 \text{ (cm}^2 \text{)}$$

4 . 考察

今回の実験の予想は、Au-Zn が p 型不純物 Zn を含んでいるためにアニール処理の後には手
コンタクト抵抗が小さくなり、今回選んだ 3 種類の金属の中で最も小さくなるはずであ
ったが、今回の実験では理想的な結果が導き出せなかったため、そのことについて少しま
とめる。アニール前に比べてアニール後のコンタクト抵抗が高くなった問題は、炉の中に酸
素が含まれるなど、何らかの問題があり半導体表面が酸化した可能性があったためだと考
える。もう一つの予想と反した結果が出た原因として考えられるのは、半導体に蒸着した
電極材料の形体が金属によって不揃いになっていたことが上げられる。それは、作成した
発光ダイオードの電極の発効効率を例にとるとわかる。作成した発光ダイオードは、p 型
に Au-Zn、Au、Ag n 型に Au-Ge を蒸着しましたが、電極 Au-Zn (直径約 0.5mm) と
Ag (直径約 1 mm) のサイズを比べると電極 Ag が大きく、本来なら Au-Zn の発光が大き
くなければならないが、光パワーを測定すると Au-Zn ($0.53 \mu\text{W}$) Ag ($34.34 \mu\text{W}$) と
なり理想とは反対の結果になっている。電極に関する理由としてあげられるのは、電極間
の長さが 3 種類の金属で一定でないことも影響を及ぼしている。Ag の場合電極間が短く、
電極直下以外のシート抵抗の影響を無視して良い程度の抵抗しかなく、金属と半導体のコ
ンタクト抵抗よりも大量の電流が流れた可能性がある。しかし、現在 確認されている優れ
たコンタクト抵抗値は 10^{-6} (cm^2) であるので、電極形状の不揃いを考えれば電極
Au-Zn で 2.29×10^{-4} (cm^2) は非常に良い結果が得られた。

5 . まとめ

本研究では、コンタクト抵抗を測定する TLM 法を理解し、実際にその測定法を用いてコ
ンタクト抵抗を測定することに重点を置いた研究であった。

現在、ワイドバンドギャップの半導体材料の GaN やダイヤモンドを用いた半導体デバイ
スは、紫外光の発光や過酷な条件での動作が可能になるので更なる微細化を実現する可能
性がある。しかし、それらの半導体材料と整合性の良い金属電極が発見されていない問題
がある。半導体デバイスは、デバイスに電流を流して初めてデバイスとしての性能を発揮
するものである。

半導体デバイスの金属電極は、個々のデバイスが小さくなりつつある現在、極めて重要
な問題となっている。そこで、本研究では TLM 法による金属電極のコンタクト抵抗測
定を行い、その測定法をよく理解し p⁺ GaAs でのコンタクト抵抗の測定に成功した。
熱処理の温度が高過ぎたせい、金属電極の形状の不揃いのせい、明確ではないが、測
定結果が必ずしも全て初期に考えたとおりの結果にはならなかった。

しかし、この研究を通して半導体デバイスの製造に対する精密さの重要性を身をもって体
験した。

謝辞

本論文を結ぶにあたり、御指導並びに多大な有益なる御助言を賜りました成沢忠教授に心より感謝の意を表します。

本卒業論文の発表という機会を与えて頂いた、電子・光システム工学科の先生方に感謝の意を表します。

本研究の遂行に様々な形でご協力していただいた電子・エレクトロニクスコースの院生諸氏ならびに、ともに本研究を行った岡田光司氏に感謝の意を表します。

参考文献)

化合物半導体デバイス入門 倍風館 生駒 英明

半導体コンタクトの科学と技術 サイエンスフォーラム 小野 員正

Obtaining the specific Contact Resistance from Transmission Line Model Measurement

G.L REEVES and HARRION

IEEE electron device letters vol.ed1-3 NO5 MAY1982

Models For Contacts TO Planar Devices

H. H. BERGER

Solid-State Electronics, 1972 vol15

..