

卒業研究報告

題目

pn接合の Lifetime 評価

指導教員

河津 哲 教授

報告者

山根 優

平成 14 年 2 月 12 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. 原理・理論	・・・3
2.1 電子とバンド	・・・3
2.2 PN接合	・・・7
3. Lifetime 測定法	・・・10
3.1 測定原理	・・・10
3.2 測定回路図	・・・13
3.3 測定方法	・・・14
4. 試料説明	・・・15
4.1 ダイオードの原理	・・・15
4.2 ダイオードの種類	・・・18
4.2.1 シリコンダイオード	・・・18
4.2.2 ツェナーダイオード	・・・18
4.2.3 高速ダイオード	・・・18
5. Lifetime 実験結果	・・・19
5.1 Lifetime測定	・・・19
5.2 C-V測定	・・・21
5.3 耐圧と濃度の関係	・・・22
5.4 濃度と の関係	・・・23
5.5 通常のダイオードと高速ダイオードの比較	・・・24
6. 結論	・・・25
7. 謝辞	・・・26
8. 参考文献	・・・27
9. 付録	・・・28
9.1 Lifetime 測定結果(耐圧別)	・・・28
9.2 C - V測定結果(耐圧別)	・・・32

1. はじめに

エレクトロニクスは、通信工学分野だけでなく機械工学、工業工学、医学などあらゆる分野で必要不可欠なものになり、現在の高度科学技術社会を支える最も重要な学問分野の一つである。そのエレクトロニクスの中核に位置するのが電子回路である。

電子回路は、能動素子である真空管、トランジスタ、FETの発明とともに発展し、集積回路の出現によりその姿を大きく変えている。そのため、次々と出てくる新しい回路に目を奪われるが、より基本的回路の性質や回路の基本的な解析手法を十分理解していれば、新しい回路の出現に対しても適切に対処することができるし、新しい回路の考案にも役立つものと思われる。

そこで、電子回路について理解を深めるため今回卒業研究ではPN接合の Lifetime 評価をテーマとしてパルス回路作成と、計測技術の習得及び半導体の少数担体の Lifetime に対して基板不純物濃度とプロセス条件がどのように影響するのか調べることを目的とし検討する。

2. 原理・理論

金属中の電子の運動は、最外殻の電子軌道を飛び移っていくと考えると比較的容易に理解できる。しかし実際にはそのような描像は古典的な近似であって、正しくはない。金属では成功しているが、半導体の性質はこのような近似では説明できない。ここでは、半導体中での電子の振る舞いとバンド構造や、半導体の性質について説明する。

2.1 電子とバンド

結晶中の電子は、単なる粒子ではなく実際には量子として波動の性質を合わせ持つ。このため、規則的な原子の並びと干渉して、波として存在しやすい波長と存在しにくい波長がある。電子の波長は結晶中の電子の作る周期的なポテンシャルと干渉し、周期がずれると互いに打ち消しあってしまう。このため、結晶の周期に依存して、周期的に存在できない波長が現れる。一方、量子力学によれば粒子のエネルギー E と波長 λ の関係は

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

と表せる。このため、電子は特定のエネルギー状態はとれないことになる。

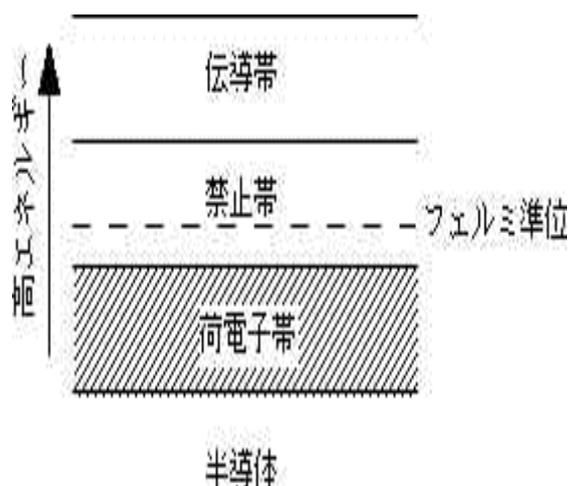


図 2.1 バンド構造

電子は低いエネルギー状態から順に状態（準位）を占めて行くが、電子が入れないエネルギー（禁止帯）があるので、下から順にバンド構造をとることになる。図 2.1 では上の方がマイナス電位（電子のエネルギーが高くなる）になっている。

電子の数は、結晶を構成する原子によって決まるが、下から順に準位を占めていって達する最高の準位をフェルミ準位と呼び、フェルミ準位が存在するバンドを伝導帯と呼ぶ。その下の電子が充満しているバンドを荷電子帯とよぶ。フェルミ準位が伝導体内にある場合は、少し電圧をかけると容易に電流が流れる。これが（導体）金属である。

しかしフェルミ準位が禁止帯内にある場合、通常電子が存在できるのは充満された荷電子帯内なので、少々電圧をかけても電子は流れない。このような状態の結晶物質を半導体と呼ぶ。半導体にわずかに電子の多い物質を混ぜ混むと、余った電子が伝導体内に入って容易に電流が流れるようになる。このような状態の半導体を negative carrier の n をとって n 型半導体と呼ぶ。

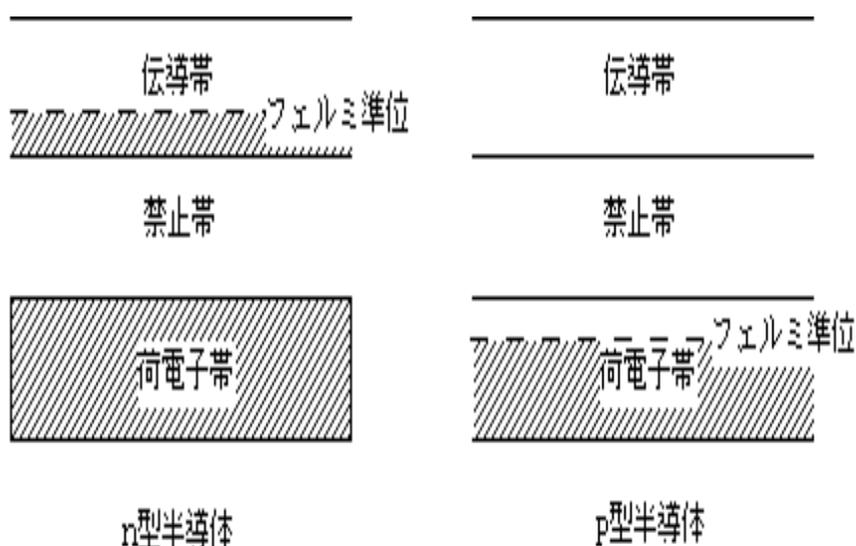


図 2.2 n 型半導体、 p 型半導体のバンド構造

一方、わずかに電子の少ない物質を混ぜると、荷電子帯に隙間ができてやはり電流が流れるようになる。このような状態では、電子の抜けた穴（ホール）が positive carrier として働くので、 p 型半導体と呼ばれる。

半導体は不純物を混ぜることで、その導電率を制御することができる。そしてこのバンド構造を利用して様々な機能を持つ素子を構成することができる。

ここで、半導体の中のキャリア密度について説明をする。半導体の中を自由に動き回る電子の密度を n 、正孔の密度を p とすると、 n と p の時間変化を表す微分方程式は、

$$\frac{dn}{dt} = g - rnp, \quad \frac{dp}{dt} = g - rnp \quad (2.2)$$

と表せる。 g は、単位時間、単位体積あたりに、価電子帯の電子が熱的に伝導帯に励起される数で、温度に強く依存する。 rnp は電子と正孔が会って消滅する数なので、電子と正孔の密度に比例する。また、 r は比例定数である。

一方、定常状態（変化のない状態、 $d/dt = 0$ ）では、

$$np = \frac{g}{r} \quad (2.3)$$

g も r も温度が一定ならば定数なので、 np は一定である。つまり、電子の密度と正孔の密度の積が一定になる。

また、不純物がドーピングされていない真性半導体では、

$$ni = pi \quad (2.4)$$

だから、

$$ni^2 = pi^2 = \frac{g}{r} \quad (2.5)$$

となるが、 n 型半導体では、

$$n_n p_n = \frac{g}{r} \quad (2.6)$$

となる。ここで、 n_n は n 型半導体中の電子密度、 p_n は n 型半導体中の正孔密度である。ドナーの密度を N_D とすると、

$$n_n = N_D \quad (2.7)$$

となり、式(2.7)より

$$P_n = \frac{N_i}{N_D} = \frac{P_i^2}{N_D} \quad (2.8)$$

が成り立ち、p型半導体ではアクセプタの密度を N_A とすると

$$P_p = N_A \quad (2.9)$$

となり、これより

$$n_p = n_i \frac{P_i}{N_A} = \frac{n_i^2}{N_A} \quad (2.10)$$

が成り立つ。

2.2 PN接合

図 2.3 上図のように、p 型半導体と、n 型半導体を接触させるとする。まず p と n の境界面での電子の動きを考えると、伝導帯の電子の密度は n 型半導体側が大きい。よって、境界付近の電子は n 型から p 型に拡散をしていくことになり、そのうちに p 型半導体の正孔と結合して消滅する。電子が出ていってしまった n 型半導体では残されたドナーが電子を失って正のイオンとして存在することになる。そして、p 型半導体でも正孔が n 型領域に拡散してゆき、後にマイナスイオンとなったアクセプタが残される。

もし、イオン化されたドナーとアクセプタが残っていなければ、電子と正孔の流れは密度差がある限り続き、ドナーイオンとアクセプタイオンは電気力によってその拡散を妨げる働きをする。結果、拡散と電気力が釣り合った状態が生まれる。

また、ドナーとアクセプタが作る電場を電子に対するポテンシャルで表すと、図 2.3 の下図になり、電子の拡散を妨げるポテンシャルの坂道ができている事がわかる。この釣り合い状態でのポテンシャルの差 V_0 を接触電位差と呼ぶが、坂道の部分の電子、正孔の密度は非常に小さく、イオンだけが存在することから、この部分は空乏層と呼ぶ。空乏層以外の n 型半導体部分を n 型領域、p 型半導体部分を p 型領域と呼ぶ。

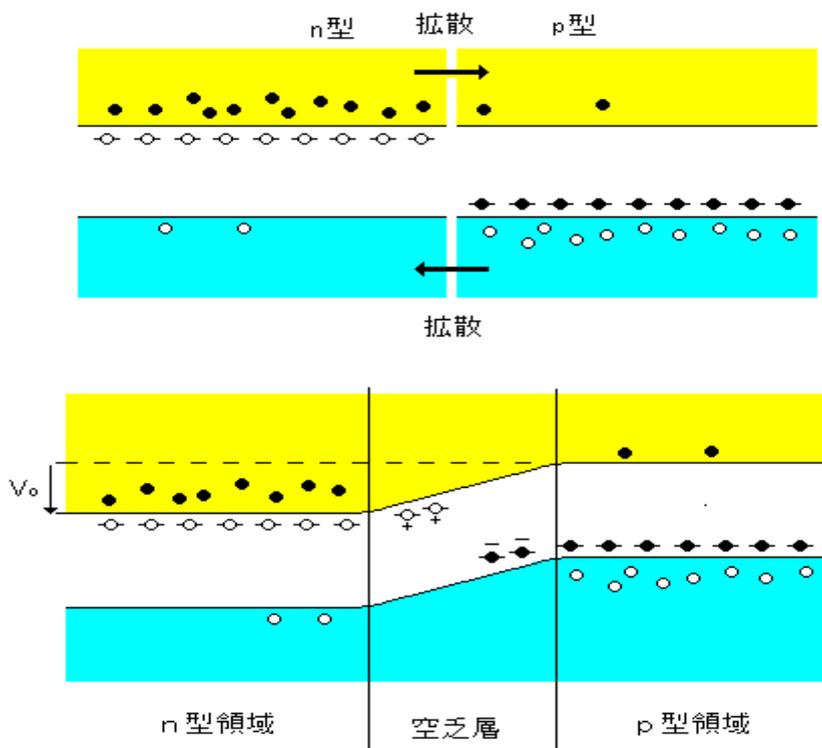


図 2.3 PN接合のエネルギーバンド図

次に、図 2.4 のように P N 接合に外部から電圧をかけた場合を考えて見ると、まず、p 型側をマイナス、n 型側をプラスにした場合（図の上側参照）、加えられた電圧は接触電位差に加えられる形になり、ポテンシャルの坂道は大きくなる。そのせいで、n 型領域から p 型領域に移動できる電子の数と、p 型領域から n 型領域に移動できる正孔の数は減ることになる。これが p → n 電流である。

また、p 型領域から n 型領域に移動する電子はポテンシャルが高くなっても関係なく、n 型領域から p 型領域に移動する正孔も同じである。これが n → p 電流である。

つまり、p 型側をマイナス、n 型側をプラスにした場合には結局 p → n 電流は減少し、n → p 電流が流れることになる。

しかし、この電流は n 型領域で熱的に価電子帯に励起される正孔と p 型領域で熱的に伝導帯に励起される電子に頼っている。これらの正孔と電子は温度によって励起される数が決まり、P N 接合に加えられる電圧には依存していないので、熱的に励起される正孔と電子の数は少数のためこの時に流れる電流も微小である。これを逆方向飽和電流 I_s と呼ぶ。

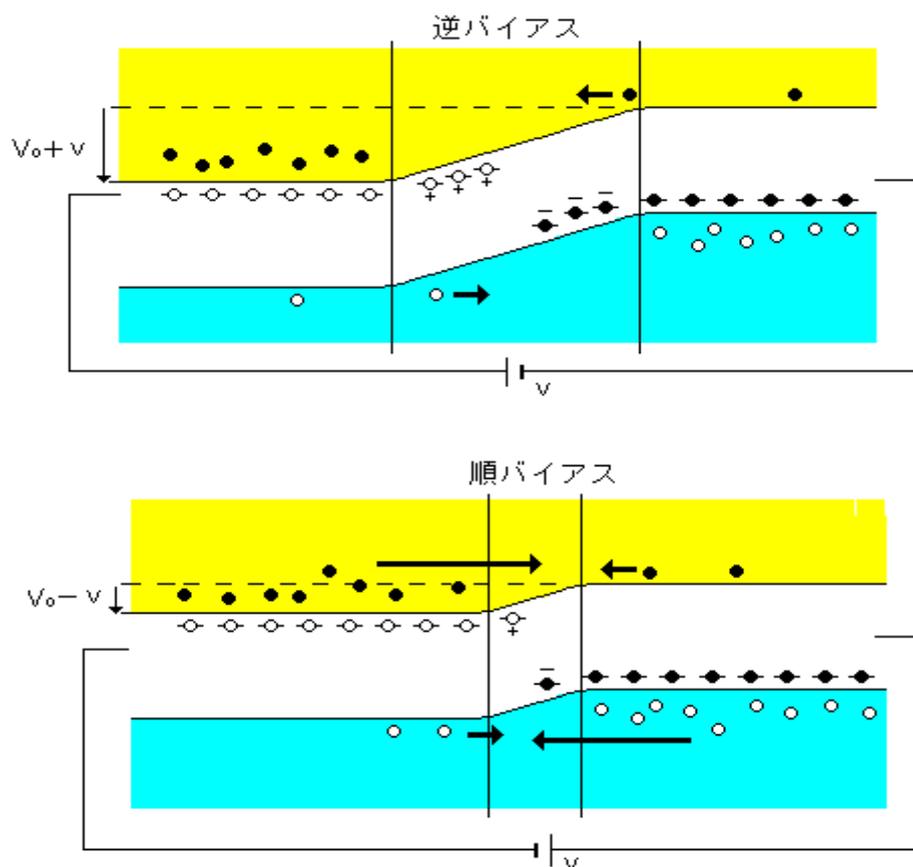


図 2.4 P N 接合の逆バイアスと順バイアス

今度は、n型側をマイナス、p型側をプラスにした場合（図 2.4 の下側参照）加えられた電圧は接触電位差を打ち消す形になるので、ポテンシャルの坂道は小さくなる。そのため、n型領域からp型領域に移動できる電子の数と、p型領域からn型領域に移動できる正孔の数は増えることになる。つまりp-n電流が増加する。

一方、p型領域からn型領域に移動する電子はポテンシャルが低くなっても関係なく、n型領域からp型領域に移動する正孔も同じなので、n-p電流は変化しない。

よって、p型側をマイナス、n型側をプラスにした場合にはp-n電流が流れることになる。この電流は、加えられた電圧に対して指数関数的に増加する。

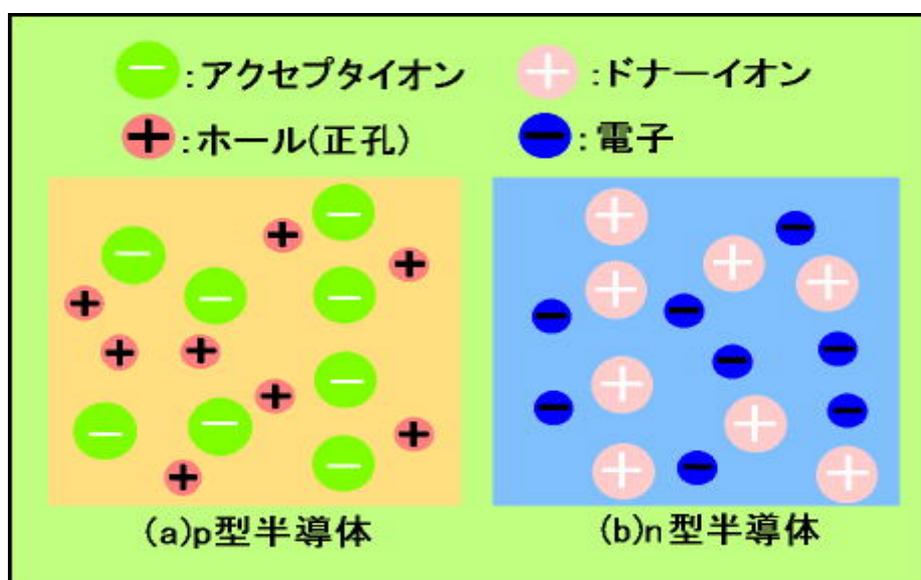


図 2.5 p型半導体とn型半導体

p型半導体とn型半導体はそれぞれ異なる多数キャリアを持つ半導体であるが、この二つを接合すると図 2.6 に示すように濃度勾配によるキャリアの拡散が起こり、p型半導体のホールがn型半導体の方へ、n型半導体の電子がp型半導体の方へと移動し、接合面付近で電子とホールは再結合を行う。

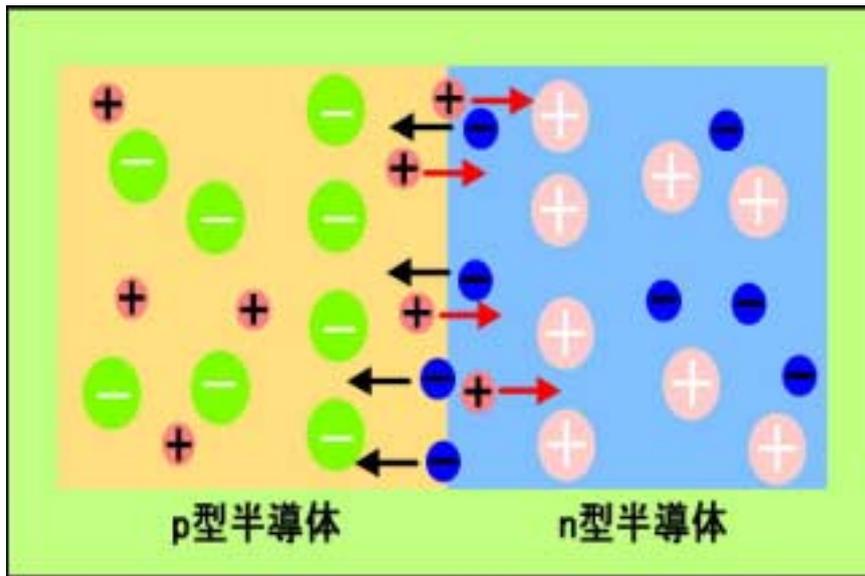


図 2.6 ホールと電子の拡散

キャリアの拡散及び再結合が進むに従い、接合面付近には図 2.7 に示すように、p 型半導体側にはアクセプタイオンが多く、n 型半導体側にはドナーイオンが多く存在するようになりこの両イオンの間に電界が生じる。この電界は、p 型半導体のホールが n 型半導体へ、n 型半導体の電子が p 型半導体へ拡散により移動するのを防ぐ向きになっているため、この電界が大きくなると最終的にキャリアの移動は完全になくなり平衡状態 (熱的平衡状態) に達する。このときの電界により接合面に生じた電圧は接触電位と呼ぶ。

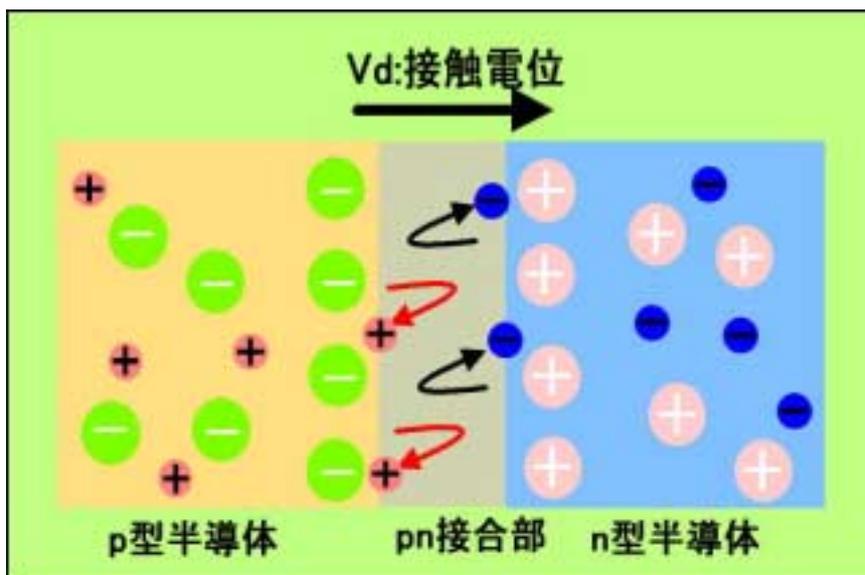


図 2.7 P N 接合の完成

3. Lifetime 測定法

3.1 測定原理

PN接合に図 3.1 (V_f) のような順方向パルスを印加すると、図 3.2 の左側のように少数キャリアが電子はN領域からP領域へ、正孔はその逆方向へ拡散で流れていく。

次に、PN接合に図 3.1 (V_r) のような逆方向パルスを印加すると、図 3.2 の右側のように拡散で流れていった少数キャリアがまた、拡散で戻ってくる。電子はP領域内で、正孔はN領域内で行き来している間に再結合する。これにより、このときの再結合 Lifetime を測定することができる。

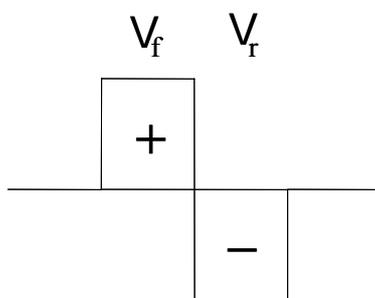


図 3.1 パルス電圧概略図

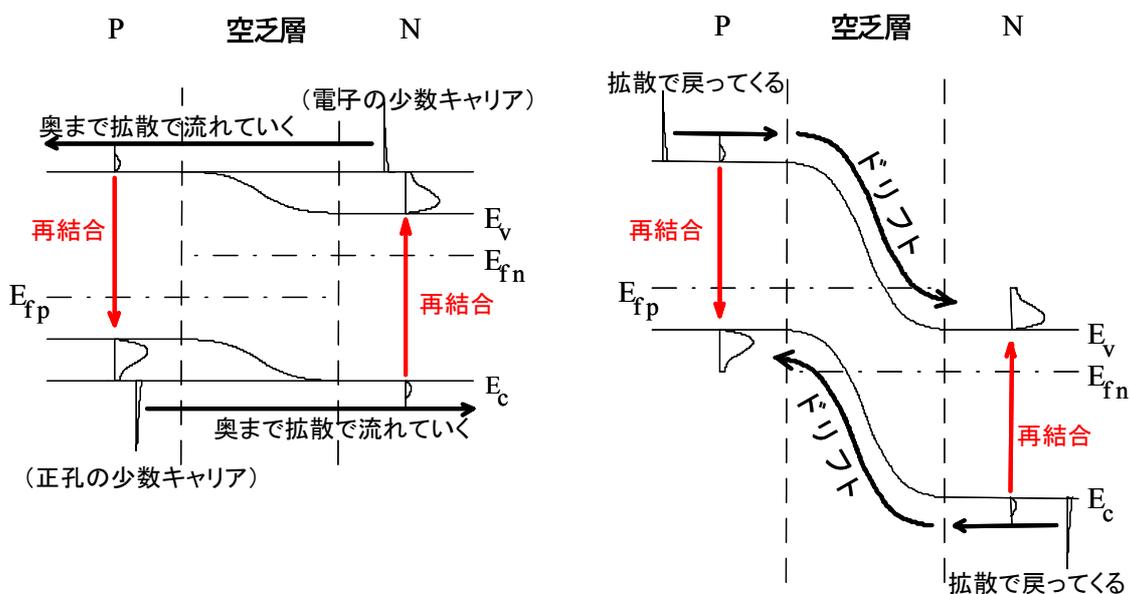


図 3.2 PN接合のエネルギーバンド図

この測定をするために作った回路の写真が図 3.1 である。回路についてはまた後で詳しく説明する。



図 3.1 測定回路写真

また、この測定を行うために構築したシステム全体写真が図 3.2 である。パルス電圧印加のために写真右側にある Function Generator を用いる。出力波形の表示測定にはオシロスコープを用いる。

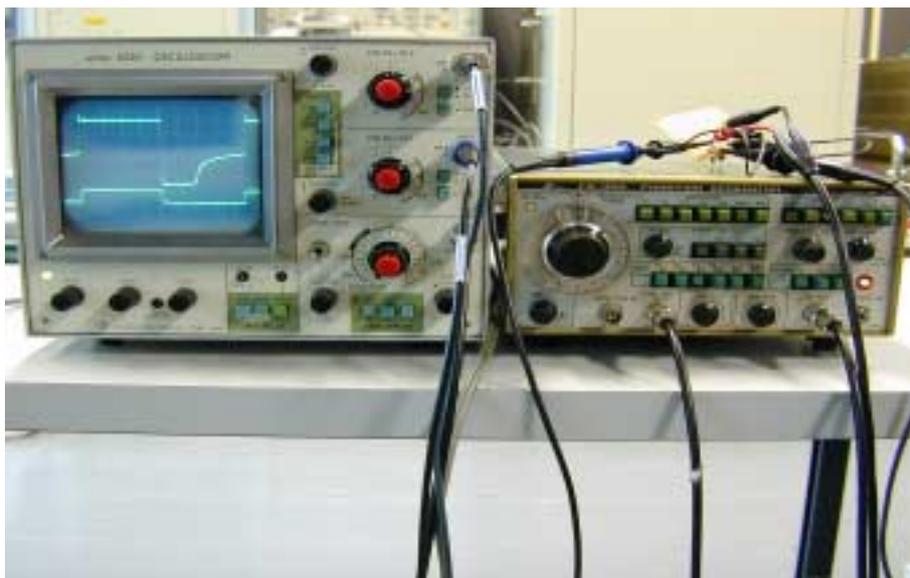


図 3.2 測定回路全体写真

3.2 測定回路図

ここで、測定回路図を説明する。図 3.3 は Lifetime 測定の基本的な回路で簡単な回路であるが、配線の長さや測定器の接地などの問題で図 3.4 のようなリングングが発生して測定値が読めないことが多い。

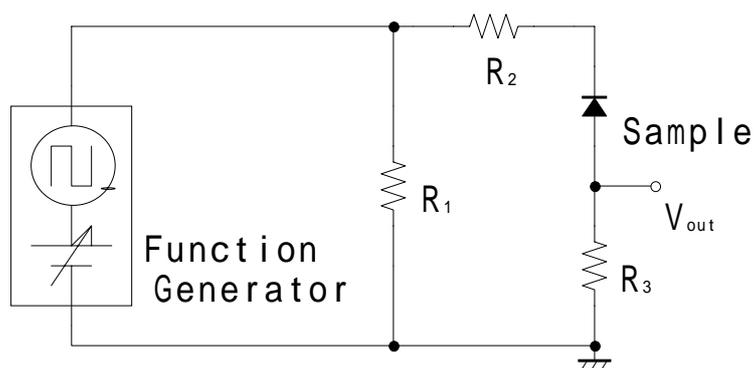


図 3.3 Lifetime 測定回路

(R_1 :50[Ω]、 R_2 :4.4 k[Ω]、 R_3 :100[Ω])

ここで、図 3.4 のようなリングングについて説明をする。リングングはパルス波形の歪を表す語術で、パルス前縁と後縁で定常値に対して振動する状態のことをいう。回路システムの特性根が虚軸に近く、発振しやすいような場合にリングングが大きく生じる。

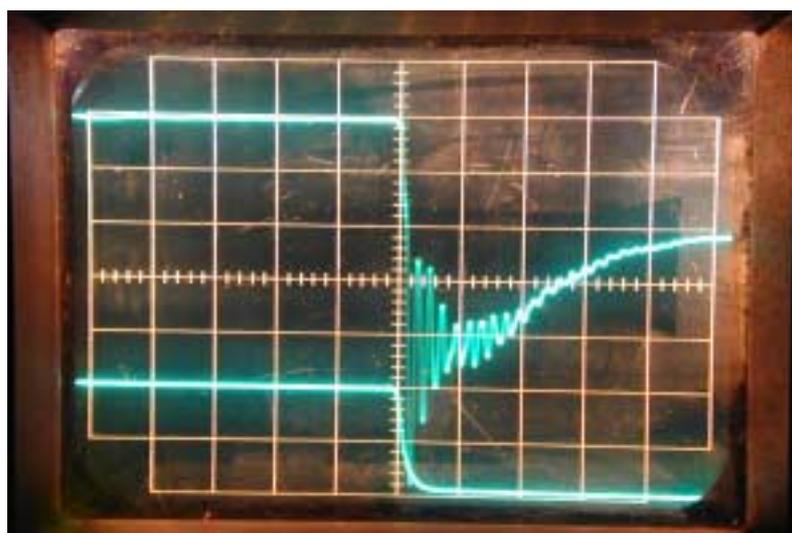


図 3.4 リングング発生写真

3.3 測定方法

このリングング問題や接地問題などの測定回路の手直しを行っていったとき様々な問題が発生した。この結果図 3.1 のようにいろいろと回路を作って行き最終的に図 3.5 のようにリングングを少なくすることに成功した。

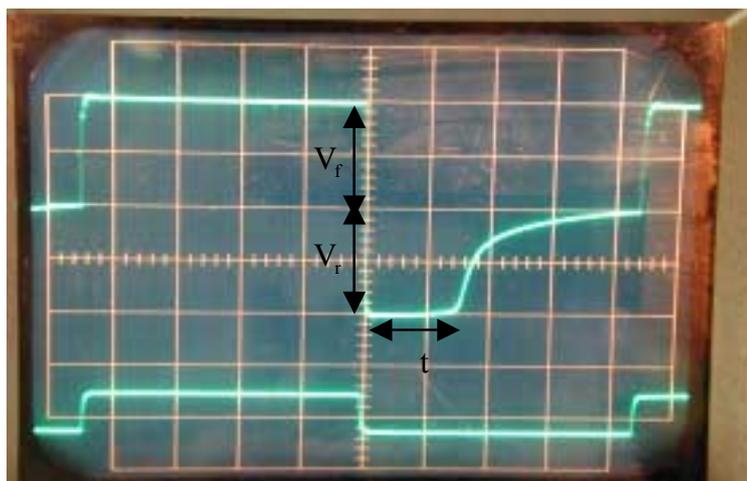


図 3.5 リングングを少なくした写真

測定方法は図 3.5 を使って説明する。図 3.5 の横軸 t は時間を表し、縦軸 V_f と V_r は電圧を表す。測定値として V_f と V_r の値を決めた時の t を読み取り Lifetime を測定する。この測定より読み取った t と τ の関係は次式で表される。

$$\operatorname{erf} \sqrt{\frac{t}{\tau}} = \frac{I_f}{I_f + I_r} \quad (3.1)$$

この式 (3.1) に V_f と V_r の測定結果を代入し、 t/τ をプログラムで実行し計算する。

また、誤差関数 $\operatorname{erf}(x)$ は

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp[-y^2] dy \quad (3.2)$$

式 (3.2) のように定義される関数である。

4. 試料説明

4.1 ダイオードの原理

p型半導体とn型半導体を接合させると、バンド構造が一致しないために電子の移動が起きる。このとき電子の最高準位であるフェルミ準位は必ず一致しなければならない。なぜなら、電子が流れてしまうためである。最終的にフェルミ準位が一致したpn接合においては、図2.3のようなバンドの曲がりが生じる。

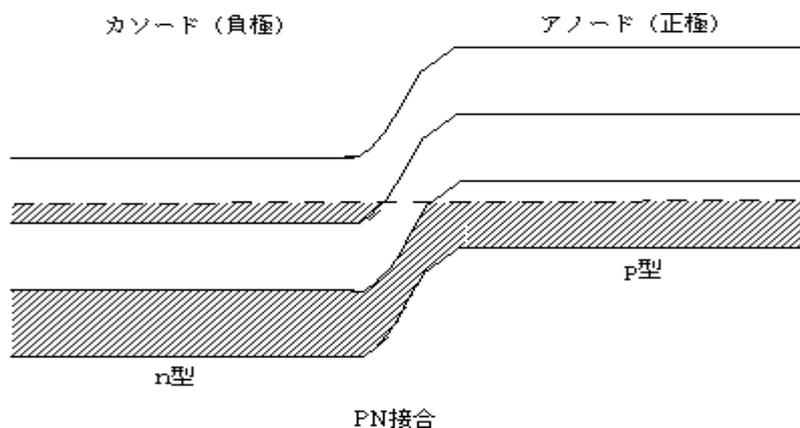


図 2.3 PN接合ダイオードのバンド構造

このときn型半導体に正、p型半導体に負の電位を印加(逆方向)すると、バンドのエネルギー差はますます大きくなって、電子は接合から追いやられ、空乏層が発達する。

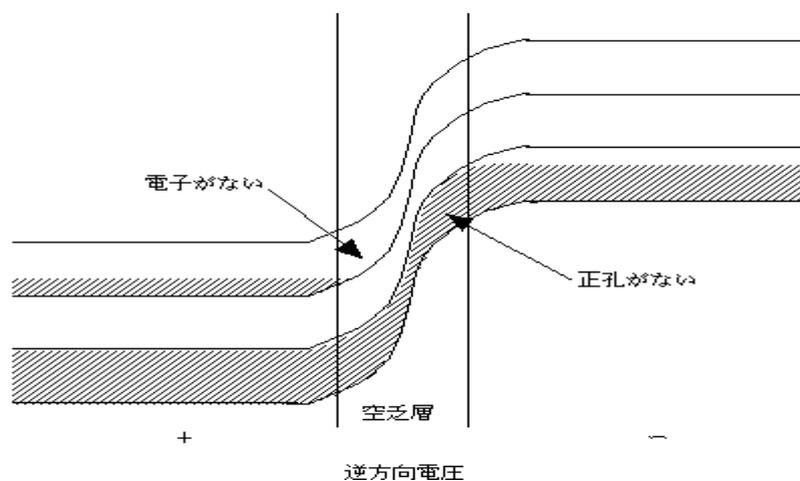


図 2.4 ダイオードの逆方向電圧

一方、逆に n に負、p に正の電圧を印加（順方向）すると、バンドのエネルギー差が小さくなり、n 型の伝導帯から p 型に向かって電子が流れ出す。

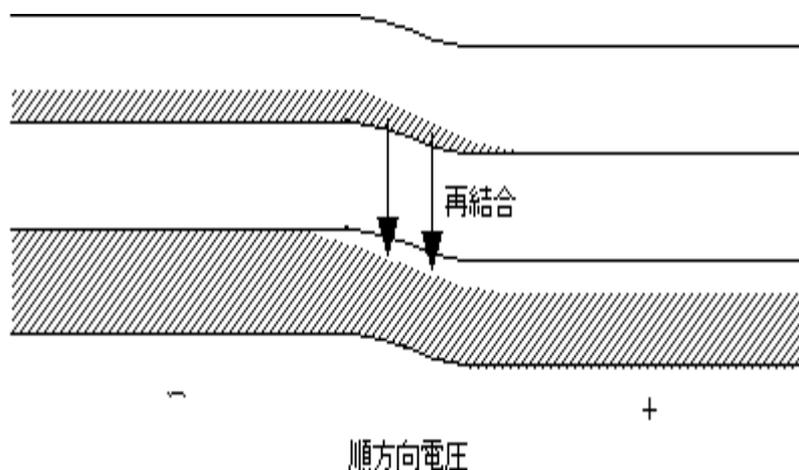


図 2.5 ダイオードの順方向電圧

つまり、p n 接合を持つ素子は一方向にのみ電流を流すことができる。このような素子をダイオードと呼ぶ。

ダイオードの素子は PN 接合と呼ばれる構造を持っている。(図 4.1 参照) p 型半導体からの端子をアノード、n 型半導体からの端子をカソードという。(図 4.2 参照)



図 4.1 ダイオードの模式図



図 4.2 ダイオードの図記号

アノードを (+)、カソードを (-) として、電流が流れるときの特性を順方向特性という。(図 4.3 左側参照)

逆に、アノードに (-)、カソードに (+) が印加されたとき、ダイオードに電流は

基本的に流れない。このときの特性を逆方向特性という。(図 4.3 右側参照)この効果が整流作用であり交流を直流に変換する働きのことである。

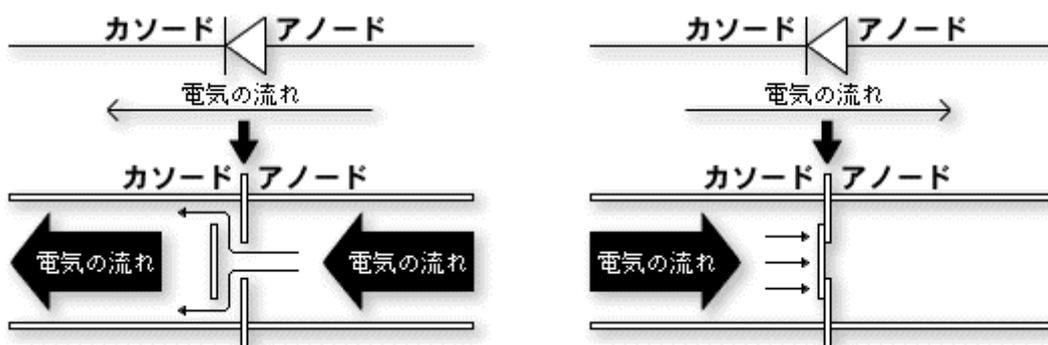


図 4.3 ダイオードの順方向と逆方向

また、ダイオードの静特性を図に示すと、図 4.4 のようになり、p n 接合に順方向電圧をかけても、すぐに電流は流れない。順方向ならどんな小さな電圧を加えても電流が流れるとは限らない。

順方向に加えた電圧がある値以上になったとき、はじめて流れ出す。これは、p n 接合の接合面に電位障壁という壁があるからである。その値のことをしきい値という。

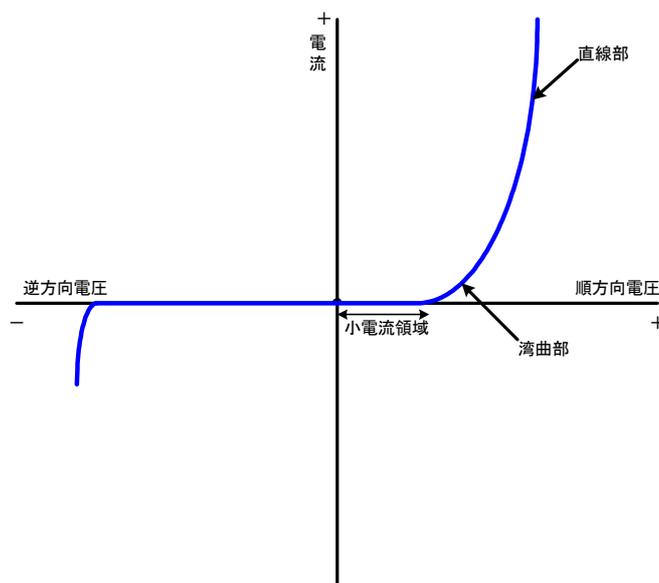


図 4.4 ダイオードの静特性

4.2 ダイオードの種類

半導体を利用したダイオードにはいろいろな構造のものがある。ここで、試料として用いたシリコンダイオード、ツェナーダイオード、高速ダイオードについて説明をする。

4.2.1 シリコンダイオード

最も一般的なダイオードがシリコンPN接合ダイオード (silicon pn junction diode) である。ダイオードの静特性は順方向特性と逆方向特性がある。p形側 (陽極) が正、n形側 (陰極) が負になるように電圧を加えたとき、順方向電圧がしきい値以上の電圧になると順方向電流が陽極から陰極へ流れる。しきい値は材料によって異なるが、シリコンでは約 0.6 [V] である。近似的には電流を直線で近似したときの値を使用し、シリコンでは約 0.7 [V] である。

4.2.2 ツェナーダイオード (定電圧ダイオード)

普通のPN接合ダイオードは逆バイアスにすると電流をほとんど流さないが、p型、n型半導体の不純物の量が多いダイオードは、逆バイアス電圧がある値に達すると逆方向電流が急激に増加する。これをツェナー現象と呼び、ダイオード自身もツェナーダイオードと呼ばれる。この電圧が非常に安定していることから基準電圧用として使われており、一定の電圧値を得るために用いられる。通常約 3 ~ 70[V] 用が入手できる。

また、逆方向電流が急激に増加する電圧を降伏電圧と呼ぶ。このダイオードを逆バイアスで用いると、電圧が降伏電圧よりも高くなろうとすると電流を流して、その電圧を降伏電圧に保とうとする。この現象を利用し定電圧回路に用いられる。しかし、不純物の濃度により降伏電圧は異なる。

4.2.3 高速ダイオード (整流ダイオード)

理想的なダイオードは、逆方向には電流が流れないことになっている。しかし実際のダイオードでは、ダイオードに掛かる電圧が順方向から逆方向に変化した際、一瞬だけ、逆電流が流れてしまうという特性を持つ。この逆電流が流れる期間をリカバリータイムといい、一般のダイオードでは数 μsec にもなる。この逆電流はパルス状の波形で幅広い周波数成分を持っており、かつ通常の整流用コンデンサ (電解コンデンサ) では取り除ききれない高い周波数である。しかし、高速ダイオードはリカバリータイムが短いため、その分、逆電流が流れる時間も短くなる。

5. 実験結果

5.1 Lifetime 測定

3章の測定回路、測定方法を使って、ツェナーダイオードの耐圧別（1～26[V]まで）にそれぞれ Lifetime 測定を行った。まず、 $V_f = V_r$ のときの Lifetime を測定したが、図 5.1 のようになり測定値がほとんど読み取れなかった。

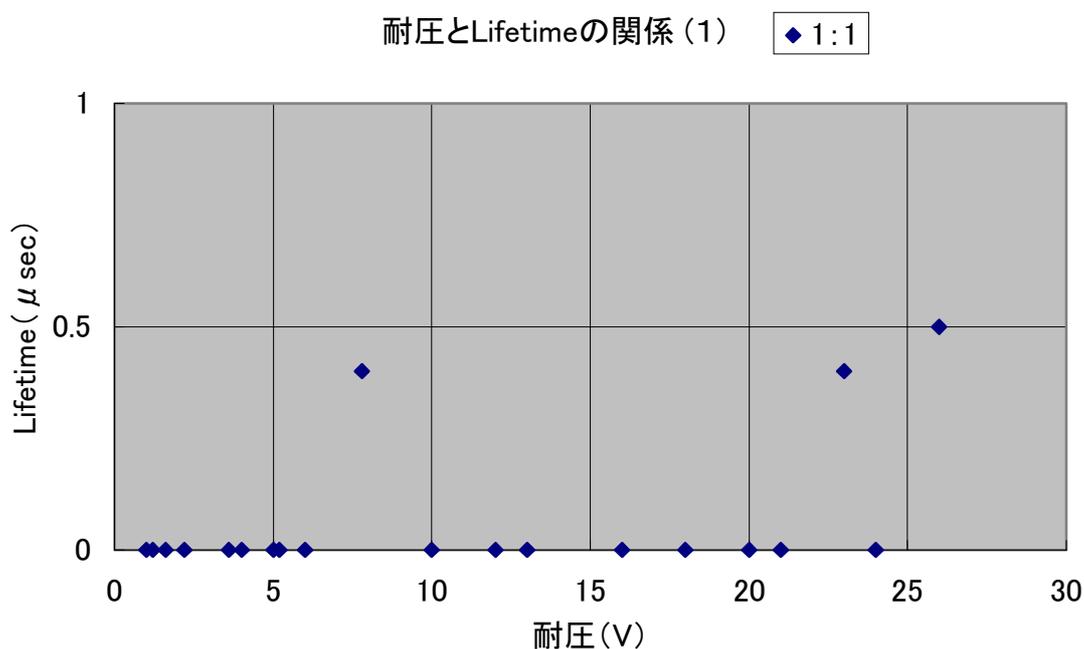


図 5.1 $V_f = V_r$ のとき

ここで、耐圧の小さな基板（濃度の濃い試料）では Lifetime が短くなると共に P N 接合の容量が大きくなる。したがって、容量を充放電する電流が見られるようになり、順方向に充電電流、逆方向には放電電流と少数単体が逆方向に戻ってくるのがプラスされているために、測定が非常に困難になる。

そこで、順方向電流を一定にしつつ順方向電流と逆方向電流の比率を変えた。(図 5.3) これより、充電電流がほとんど見られなくなり t を読み取ることができた。これは、逆方向電圧を小さくすることによって空乏層幅の変化を小さくし、これにより充放電電流を少なくすることができるというものである。

この結果、今後は 4 : 1 で測定を行った。

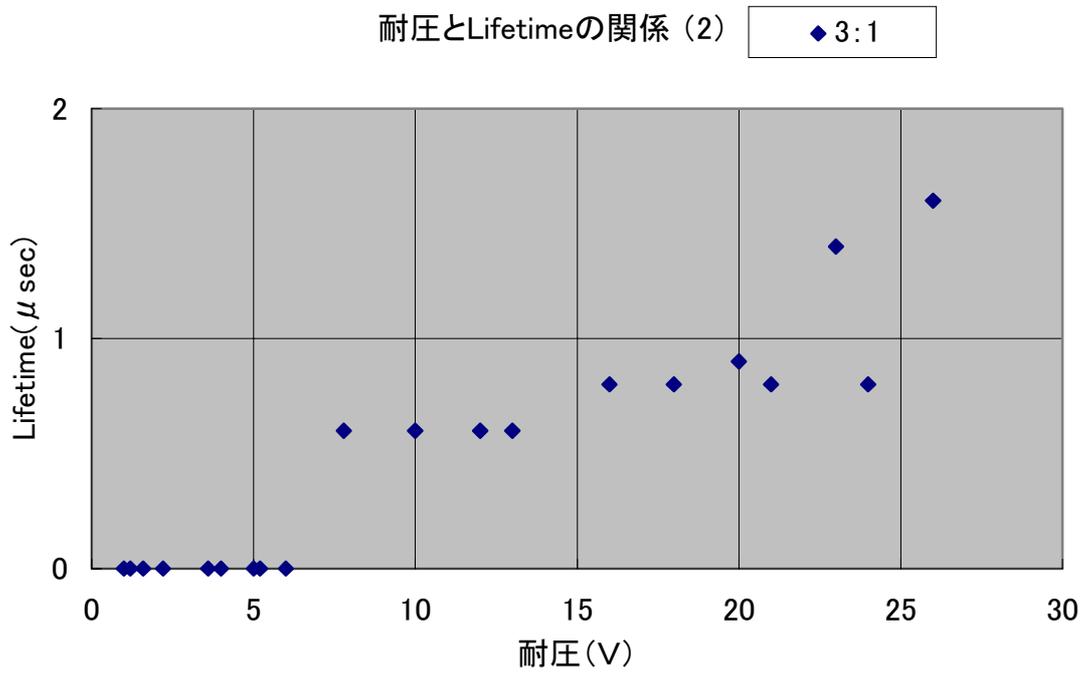


図 5.2 Vf=3, Vr=1 のとき

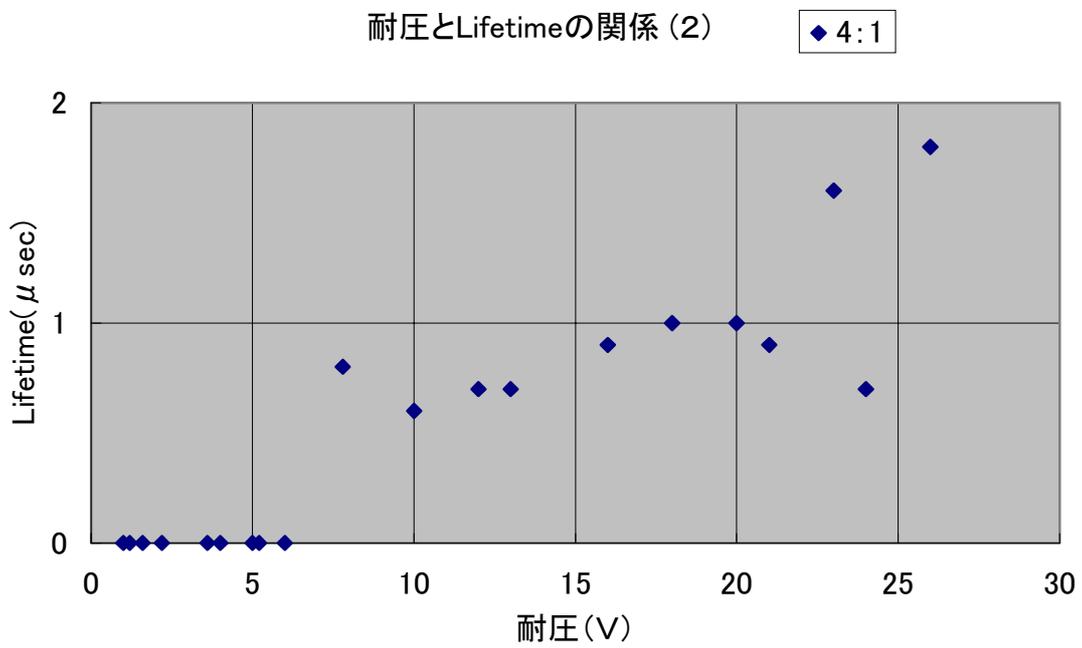


図 5.3 Vf=4, Vr=1 のとき

5.2 C - V測定

ここで、PN接合のC - V特性より基板の不純物濃度を測定した。

その結果、測定に用いた試料（耐圧 26[V]）のときは図 5.4 のようになった。その他測定した耐圧の結果は付録に示す。

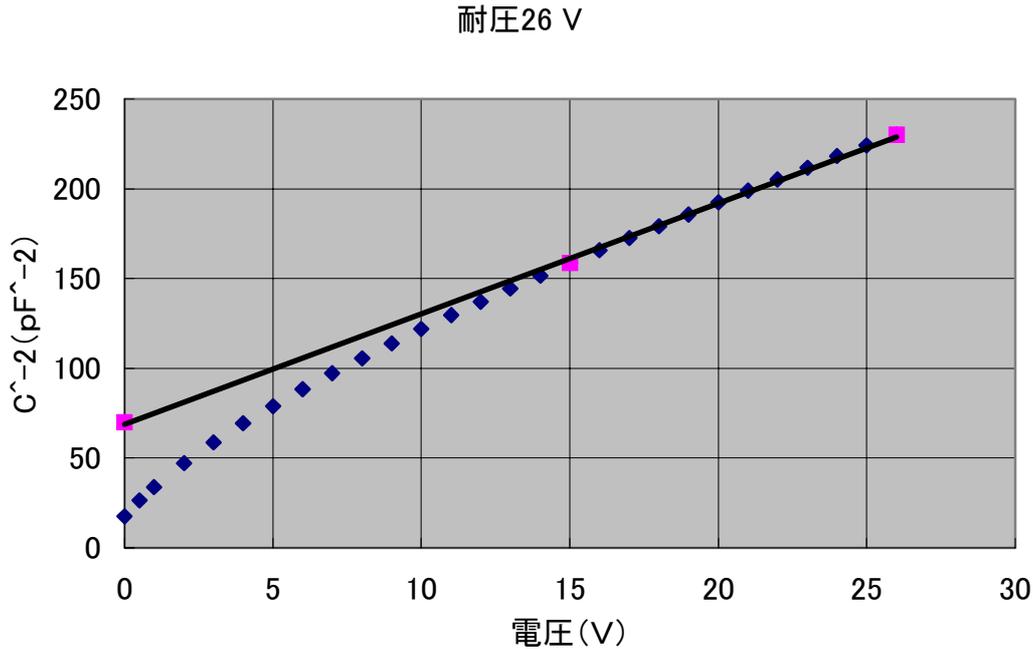


図 5.4 PN接合容量と印加電圧の関係

次に、測定データが得られたのでこれを使ってそれぞれ耐圧別ごとに濃度を求める。
濃度は

$$N = \frac{2}{q \times s^2} \times \frac{\Delta V}{\Delta(C^{-2})}$$

で求められる。ここで、 ϵ は比誘電率、 q は単位電荷、 s は面積である。

これを図 5.4 を使い説明をすると、電圧の小さな所では接合は不純物濃度が薄くなっているため勾配がきつくなっており、内部の勾配より濃度を求める。勾配は横軸を V 、縦軸を (C^{-2}) として、上式に代入すれば濃度が求まる。

5.3 耐圧と濃度の関係

ここで、先ほど 5.2 により求めた不純物濃度とPN接合耐圧の関係をそれぞれ調べると、図 5.5 のようになった。ただし、耐圧の小さなダイオードについては 5.1 のように Lifetime が短すぎるため測定値が読み取れなかったため省いてある。

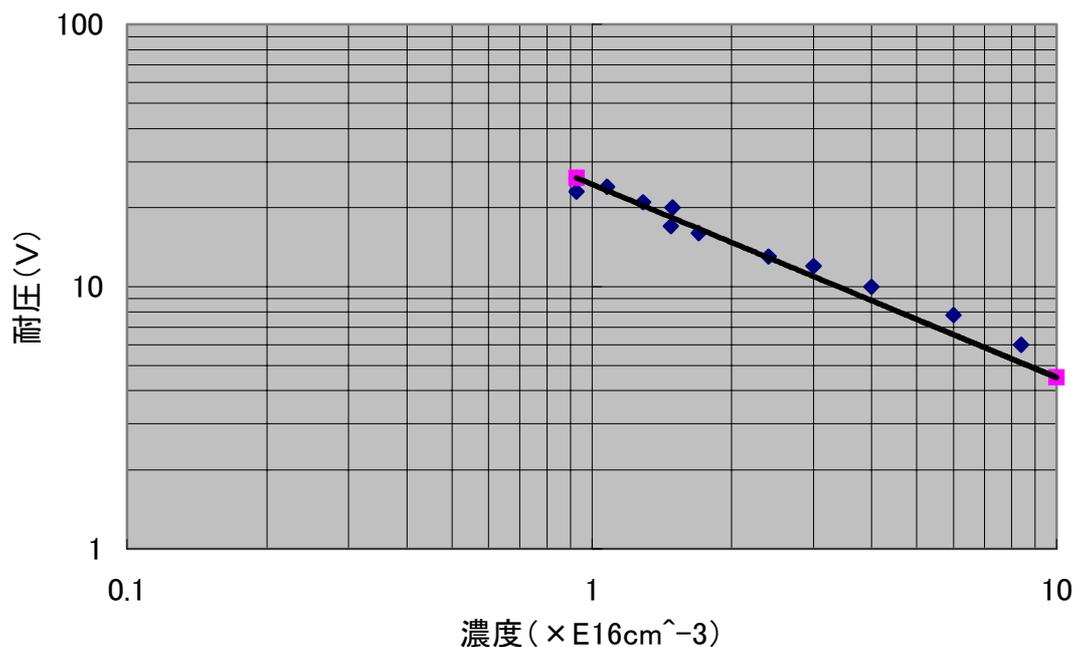


図 5.5 耐圧と濃度の関係

この結果、耐圧の低いダイオードほど濃度が濃くなっていることが分かる。逆に耐圧の高いダイオードは濃度が薄い。

このデータは、合金階段接合データとほぼ一致を示している。したがって、C - V測定より求めた濃度はほぼ正確な値が得られていると判断できる。

5.4 濃度と の関係

最後に、先ほど 5.2 の C - V 測定より求めた濃度と t から求めた Lifetime をプロットすると図 5.6 のようになった。

ここで、不純物の濃い領域では Lifetime はトラップの数すなわち基板濃度に逆比例するという関係が正しいかを確認した。

また、試料についてはたぶん同一プロセスであると判断してツェナーダイオードは同一シリーズのもの入手し測定を行った。

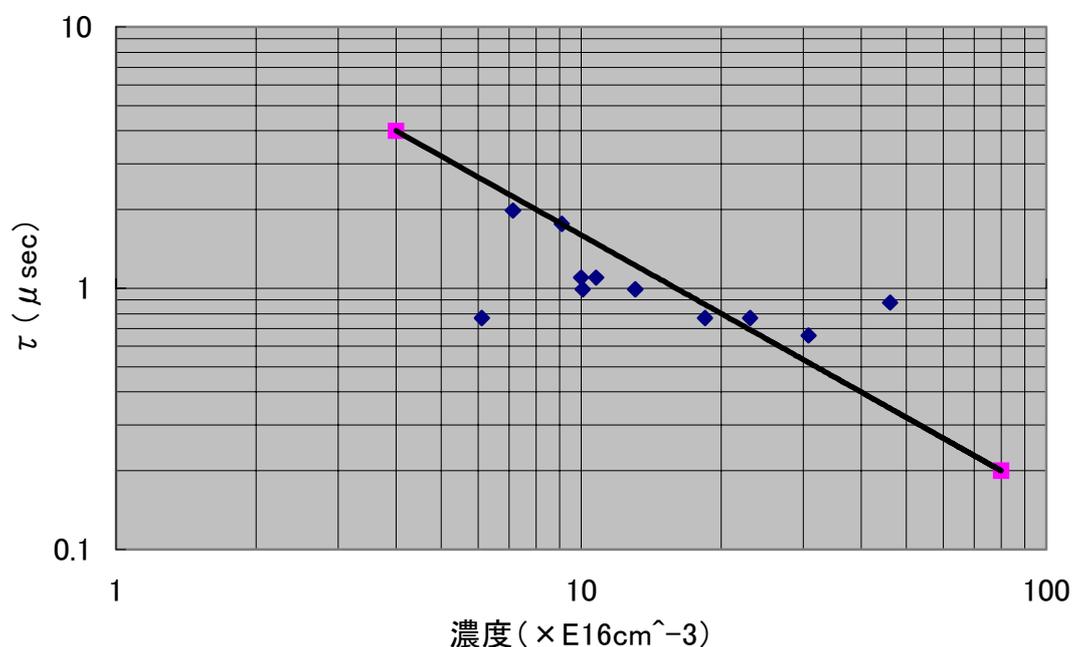


図 5.6 濃度と の関係

この結果図 5.6 の直線は逆比例の関係式を示すもので、これより一部を除いてほぼ 4 5 度に近い直線で近似する値が得られた。このそれぞれの点はダイオード 3 個ずつの平均点を測ったがほとんどばらついていなかった。したがって、この一部のものはシリーズとして違うプロセスが入っていたものと判断した。

よって、濃度の濃い領域での Lifetime は不純物濃度にほぼ逆比例するという結果が得られた。

5.6 通常のダイオードと高速ダイオードとの比較

次に、通常の高耐圧ダイオード（1400～1800V）と高速高耐圧ダイオード（1100～1200V）の比較をしてみた。同じ様に4章の測定回路、測定方法を使って調べ、それぞれ図5.7と図5.8のようになった。

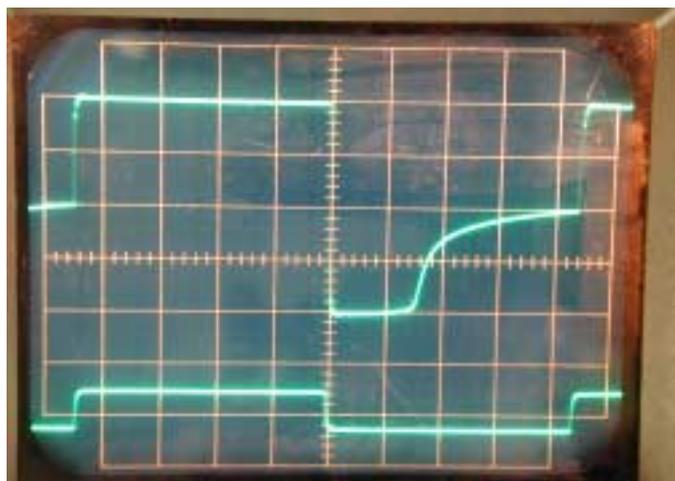


図 5.7 通常のダイオード測定写真



図 5.8 高速ダイオード測定写真

この結果、高速は通常よりも2割程度改善されていることが分かった。ここで、通常の高耐圧ダイオード（1400～1800[V]）は1.5 μ secで、高速高耐圧ダイオード（1100～1200[V]）は1.0～1.2 μ secあり、これは濃度から推測されるよりも2桁少ない。

6. 結論

基板濃度の異なるツェナーダイオードの Lifetime を測定した結果基板濃度に逆比例することが分かった。これより、プロセス条件が一定であれば は基板の不純物濃度に逆比例するという理論式にほぼ合致することを確認した。しかし、測定結果より一部理論式と合わないデータが得られた。これはプロセス条件が異なることを表している。したがって、Lifetime は基板濃度とプロセス条件に依存することが分かった。

また、ほぼ同じ耐圧の通常のダイオードと高速ダイオードを比較した結果、高速ダイオードは 20%程度 Lifetime を改良していることが分かった。耐圧からみた濃度で考えると、1000[V]では Lifetime は不純物濃度よりもはるかに小さいので他の影響つまりプロセス条件による影響の方が大きいことがいえるが、ツェナーダイオードの様に $10^{15} [cm^{-3}]$ よりも測定の少ない結果では大体結晶の格子振動及び欠陥で Lifetime が決まっていると思われる。

この研究で、PN接合ダイオードやツェナーダイオード等のダイオードの Lifetime 測定システムを構築した。ダイオードに順方向、逆方向に電圧を印加するパルス回路を作り、リングングや接地などの問題を解決していく上で回路技術を学び、測定技術を習得した。

そして、目的であった半導体の少数担体の Lifetime に対して基板不純物濃度とプロセス条件がどのように影響するのかを調べた。ここで、ツェナーダイオードの接合容量の印加電圧依存性より基板濃度を求め、接合耐圧との整合性を確認した。さらに、Lifetime との関連性も評価した。

また、高速ダイオードについても同じ様に測定し評価するといった一連の研究を進めることができた。

7. 謝辞

本研究を行うにあたり終始御懇切な指導とご指示をいただき、より良い環境を提供していただいた高知工科大学 電子・光システム工学科 河津 哲教授誠にありがとうございました。先生の御厚意に深く感謝の意を捧げます。

また、種々の面でお世話になった大畠先輩、大橋先輩、同じ研究室の弓岡 浩二君に、厚くお礼申し上げます。

8. 参考文献

- 1) 工学博士 石橋幸男著：“初めて学ぶアナログ電子回路”、総合電子出版社(1996)
- 2) 坂本康正著：“基礎から学ぶ電子回路”、共立出版株式会社(1991)
- 3) 岸野正剛著：“現代 半導体デバイスの基礎”、オーム社(1995)
- 4) 工学博士 入江泰三、理学博士 遠藤三郎共著、“半導体基礎工学(Ⅰ)”、工学図書株式会社(1987)
- 5) 元大阪電気通信大学教授 / 工学博士 清水潤治著：“半導体工学の基礎”、コロナ社(1985)
- 6) 京都大学教授 / 工学博士 田丸啓吉著：“パルス・デジタル回路”、株式会社昭晃堂(1988)

9. 付録

ここでは、5章で測定したツェナーダイオードの耐圧別(1~26[V]まで)の Lifetime と C - V測定結果をそれぞれ示す。

9.1 Lifetime 測定結果 (耐圧別)

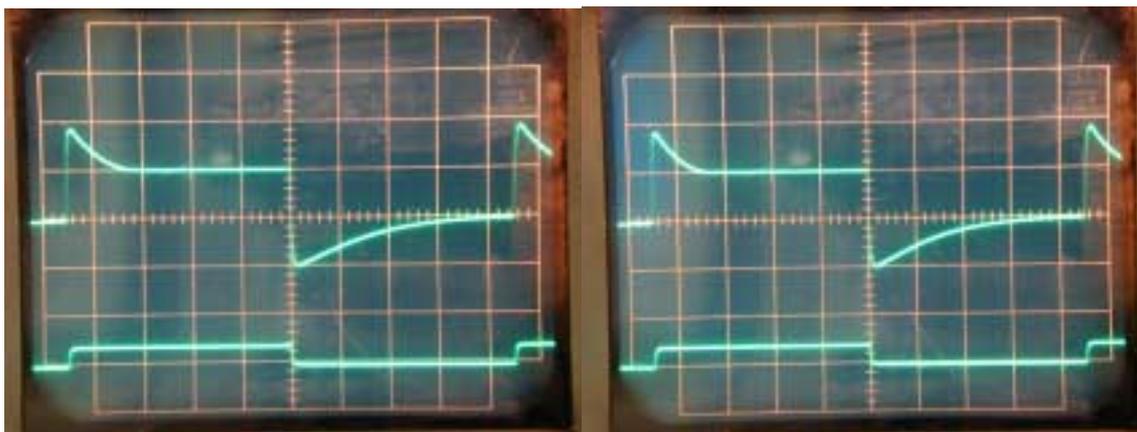


図9.1 耐圧 左:1V、右:1.2Vのとき

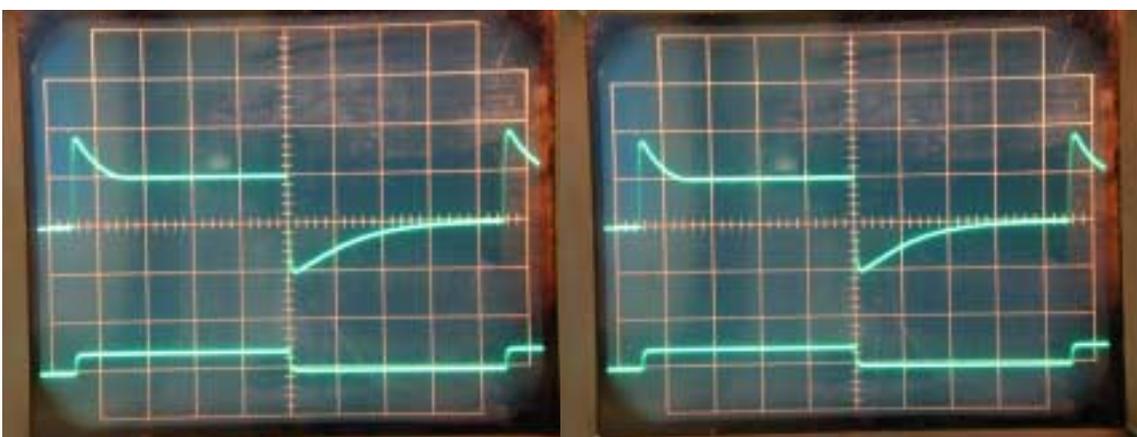


図9.2 耐圧 左:1.6V、右:2.2Vのとき

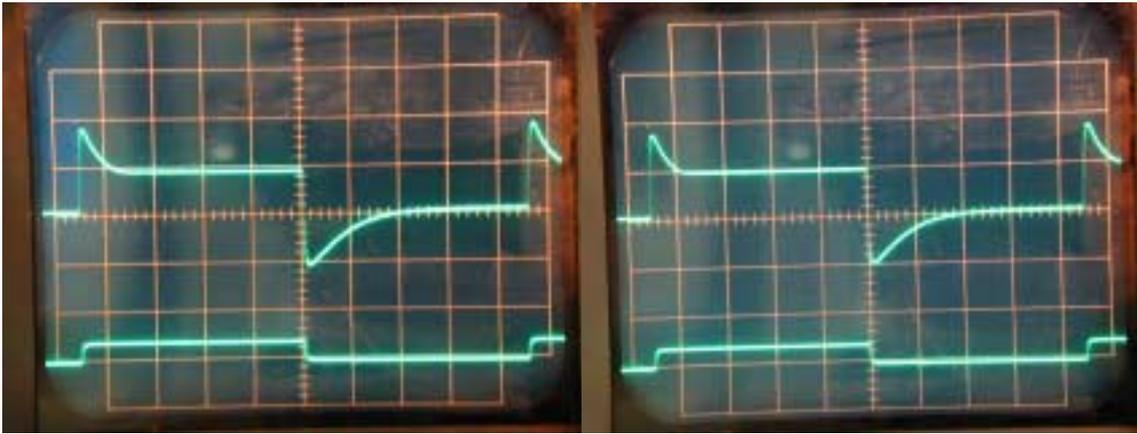


図 9.3 耐圧 左 : 3.6V、右 : 4V のとき

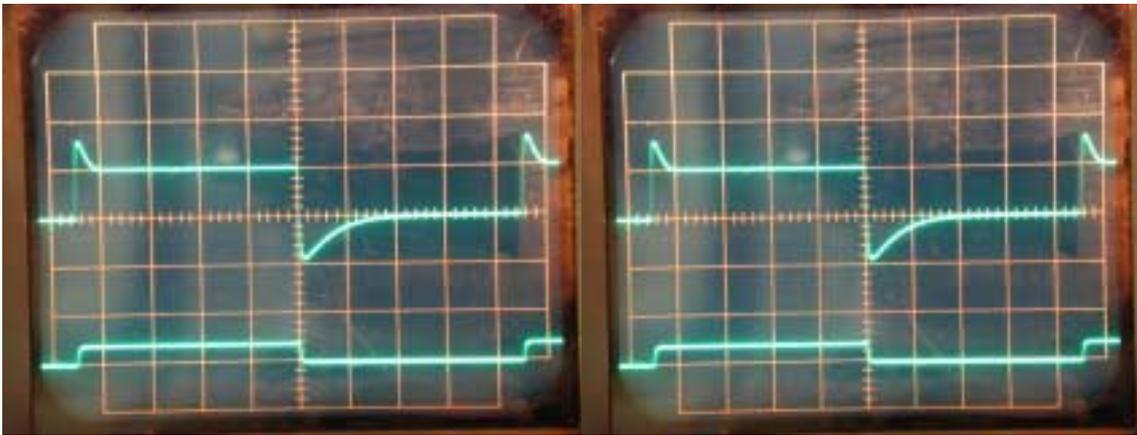


図 9.4 耐圧 左 : 4V、右 : 5V のとき

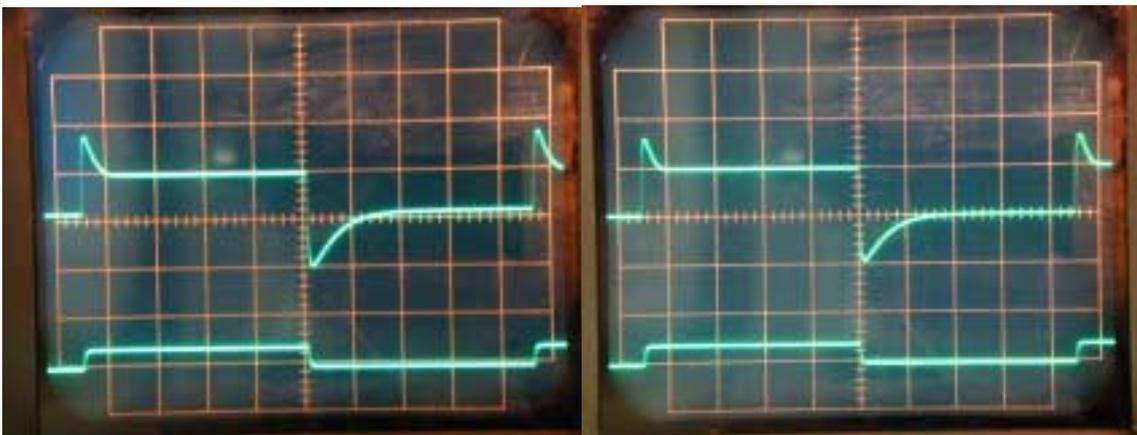


図 9.5 耐圧 左 : 5.2V、右 : 6V のとき

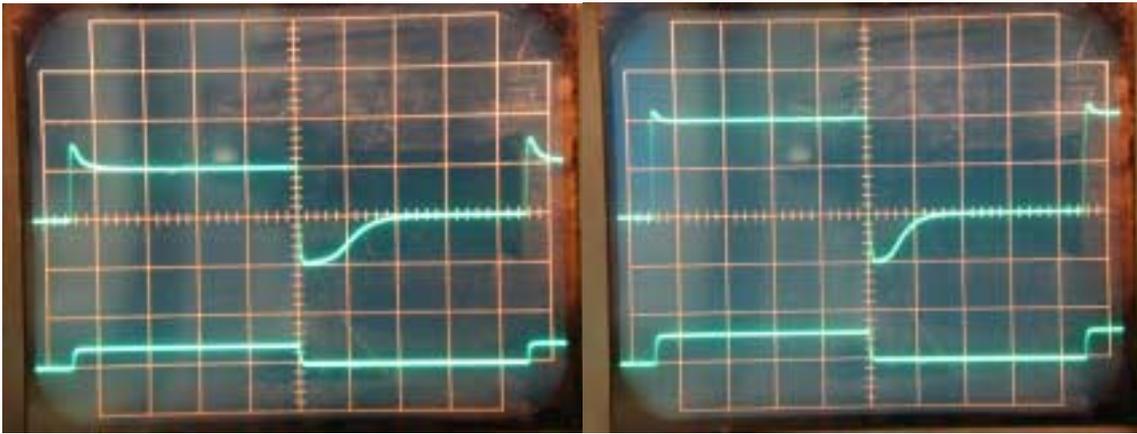


図 9.6 耐圧 左 : 7.8V、右 10V のとき

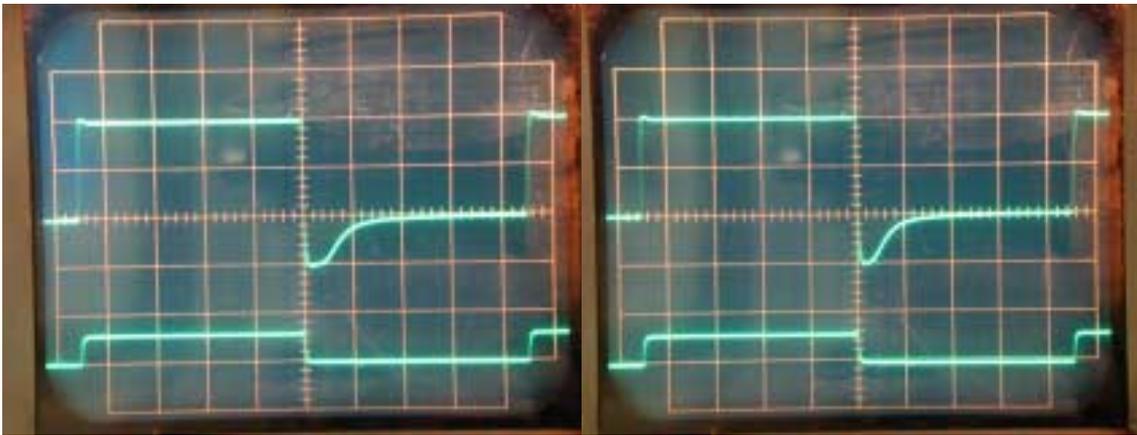


図 9.7 耐圧 左 : 12V、右 13V のとき

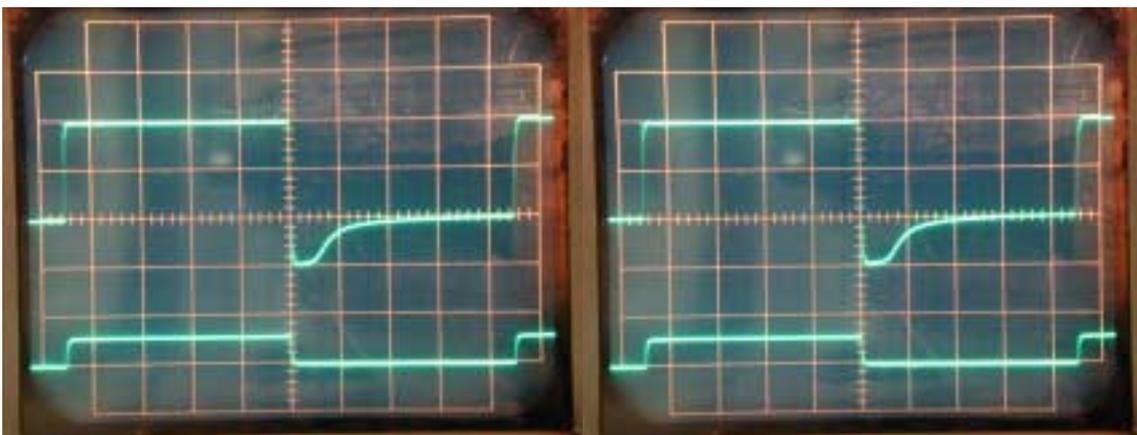


図 9.8 耐圧 左 : 16V、右 18V のとき

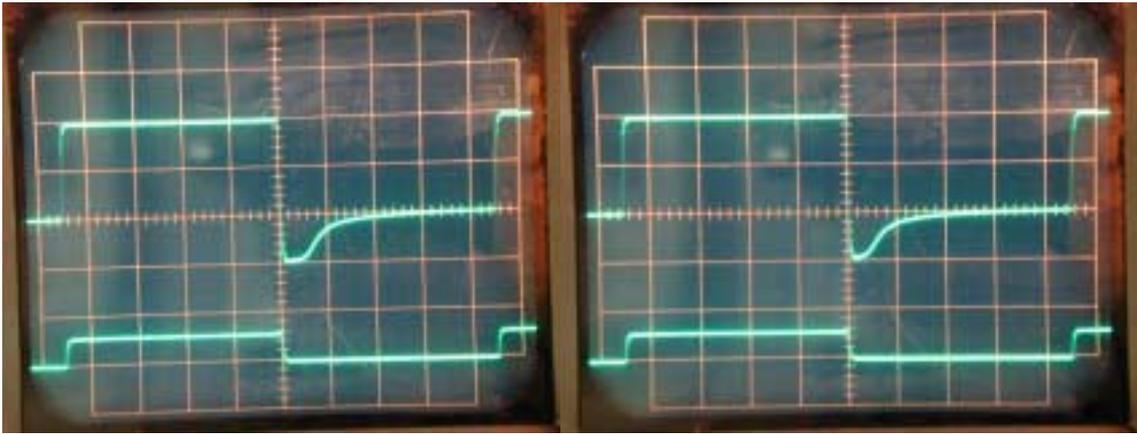


図 9.9 耐圧 左 : 20V、右 : 21V のとき

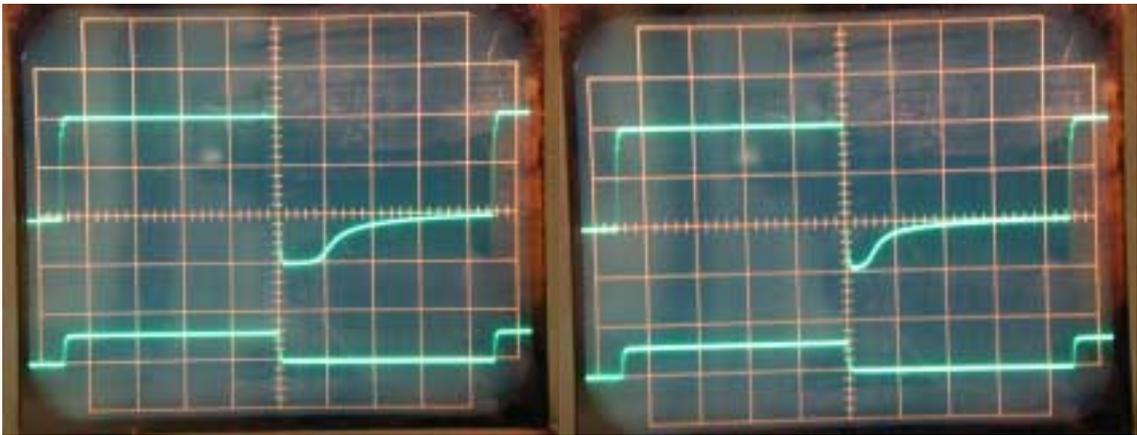


図 9.10 耐圧 左 : 23V、右 : 24V のとき

9.2 C - V測定結果 (耐圧別)

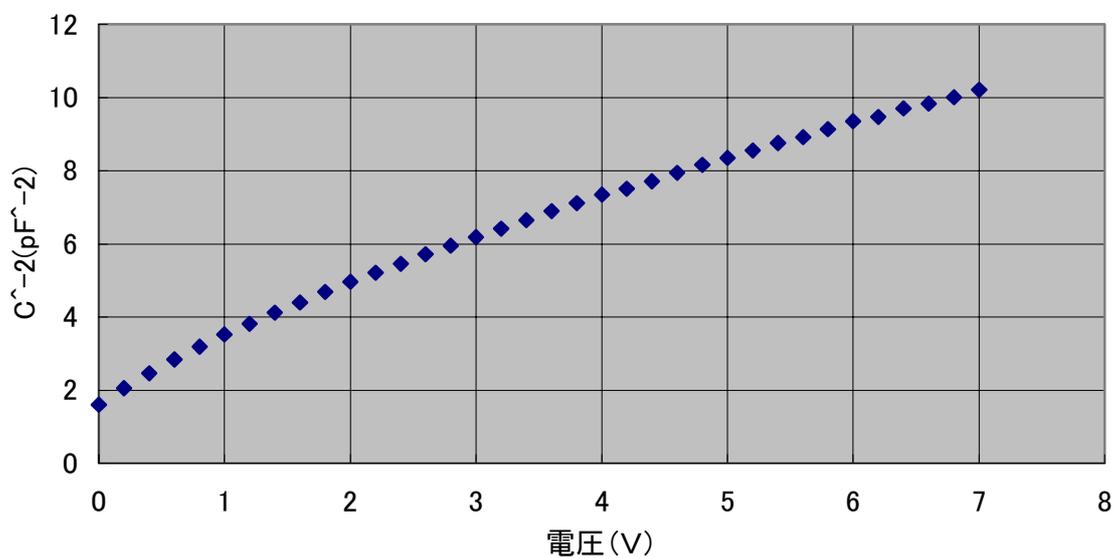


図 9.11 耐圧 7.8V のとき

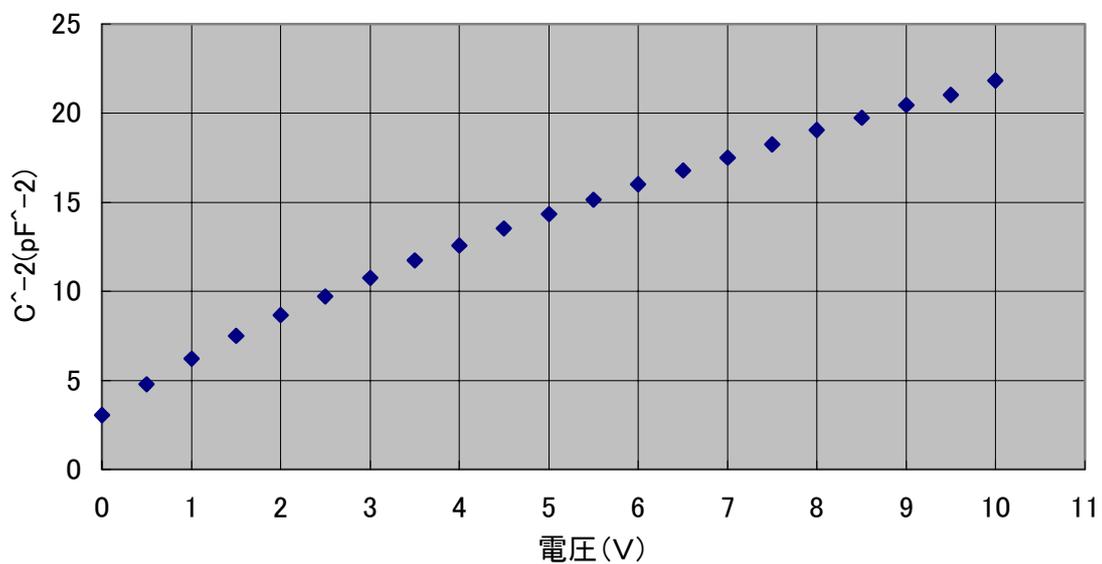


図 9.12 耐圧 10V のとき

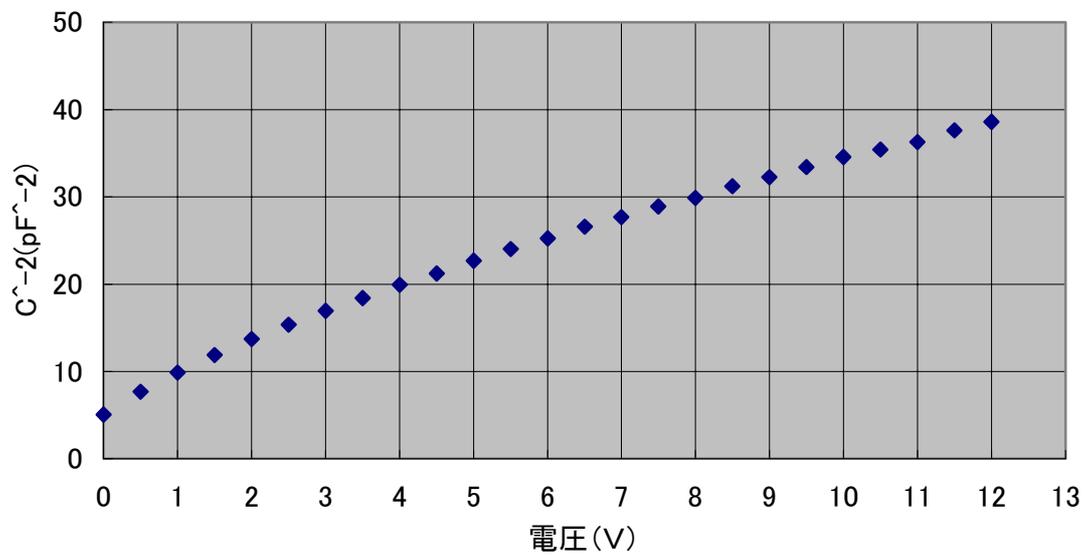


図 9.13 耐圧 12V のとき

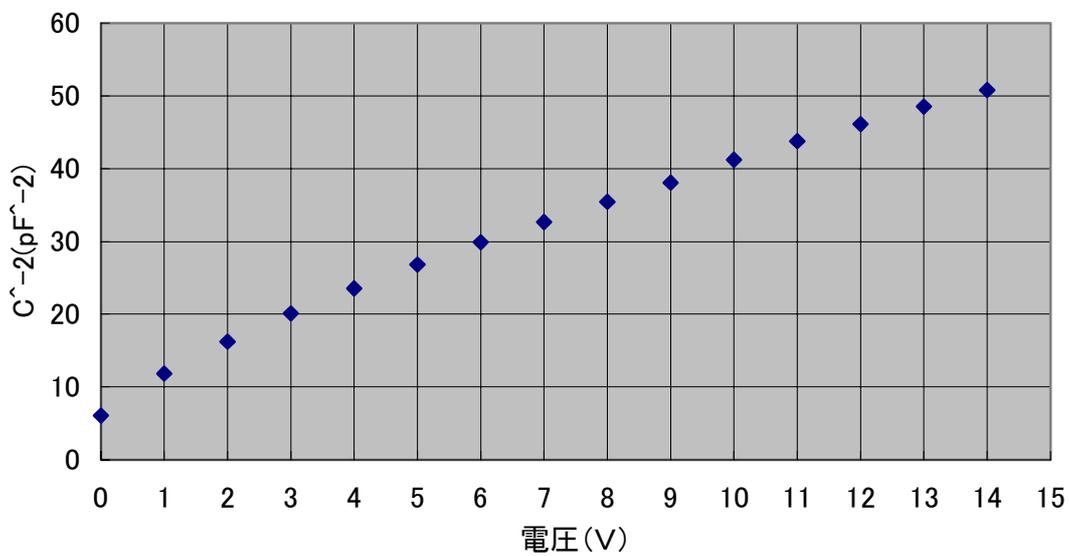


図 9.14 耐圧 13V のとき

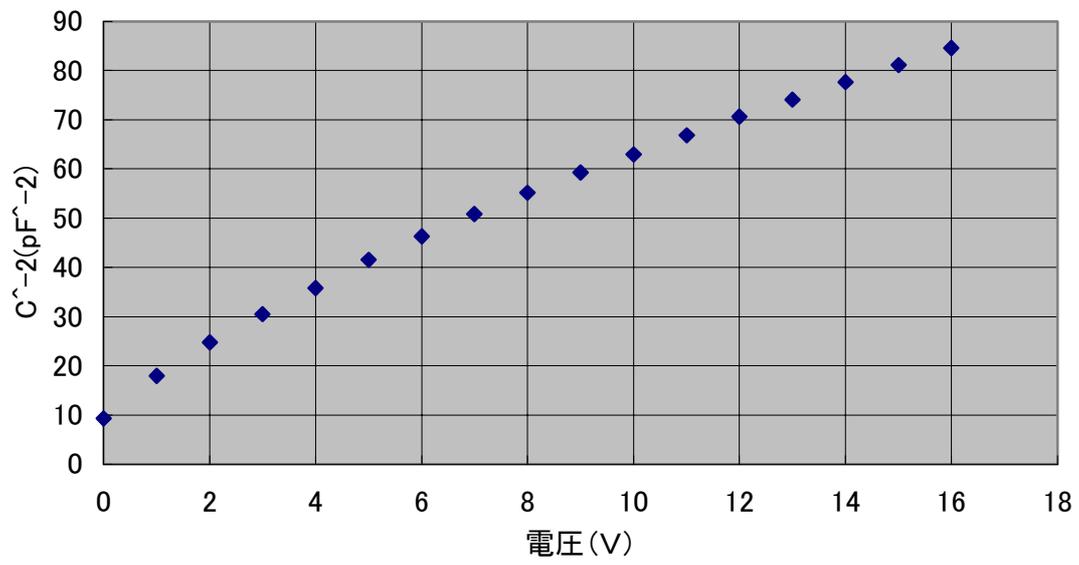


図 9.15 耐圧 16V のとき

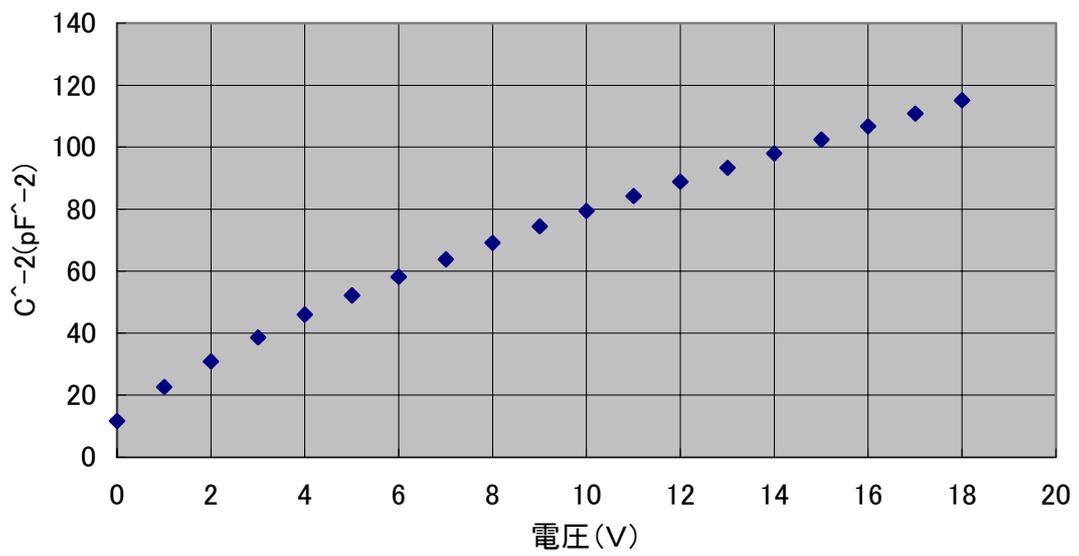


図 9.16 耐圧 18V のとき

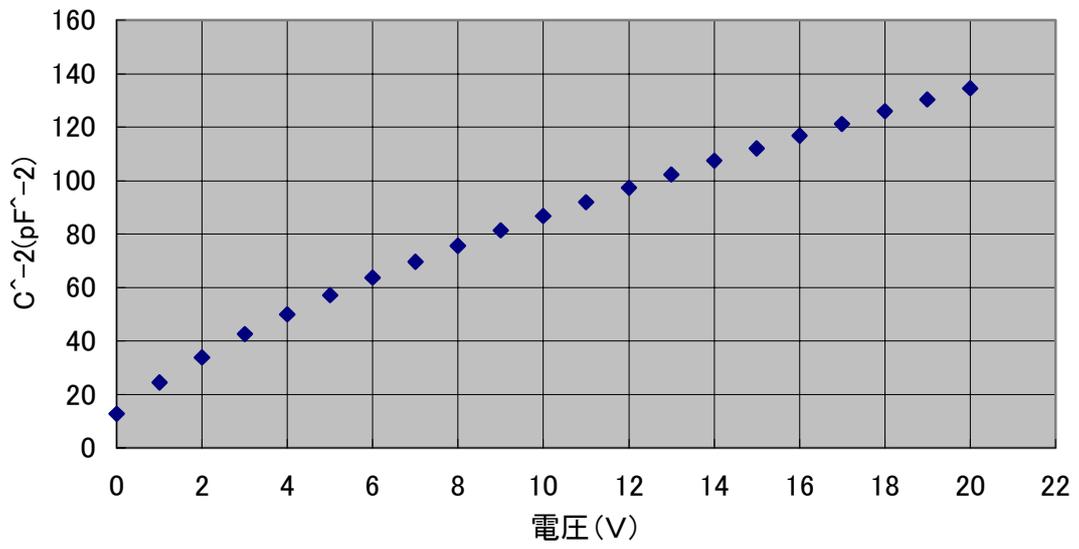


図 9.17 耐圧 20V のとき

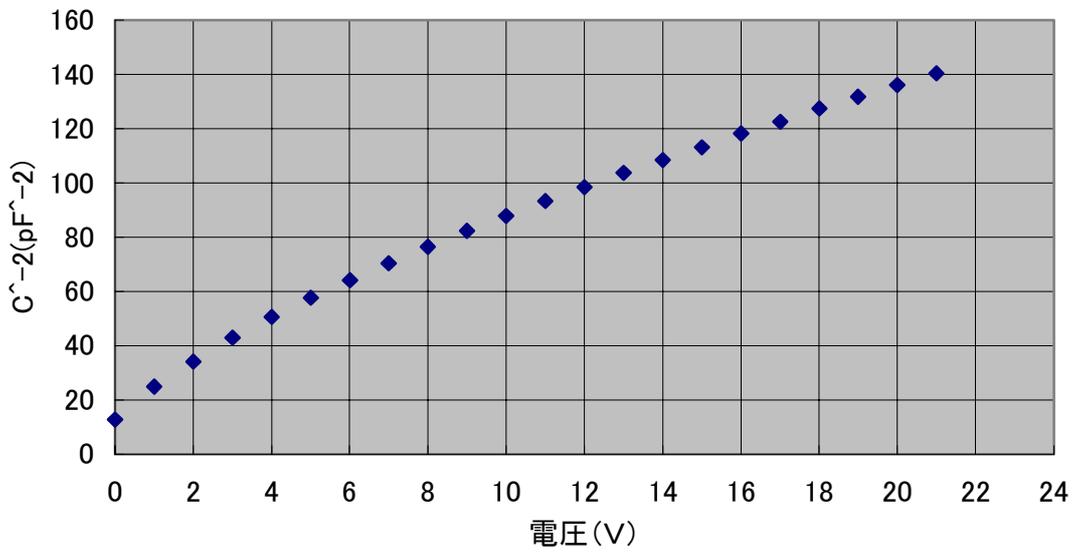


図 9.18 耐圧 21V のとき

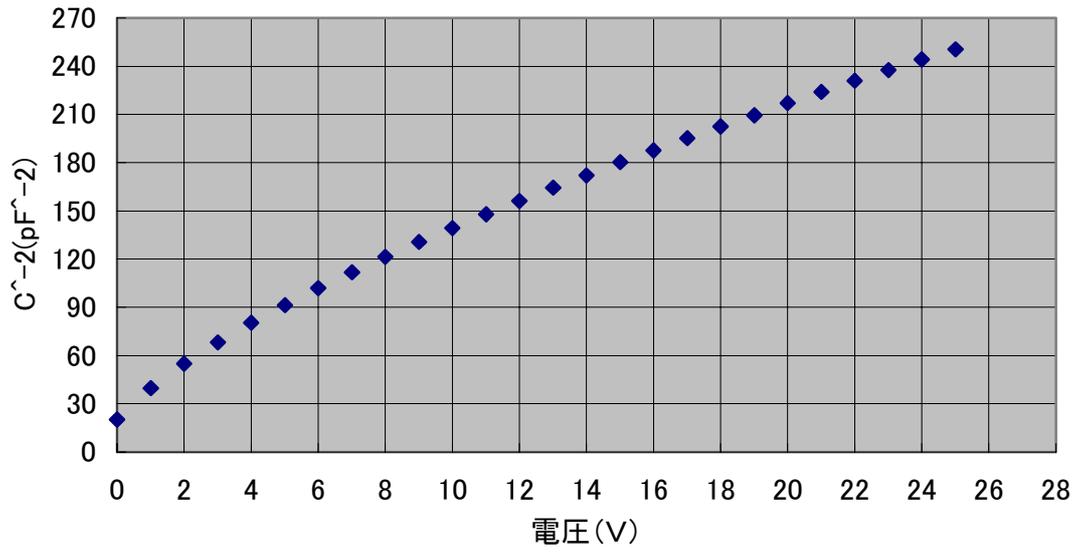


図 9.19 耐圧 23V のとき

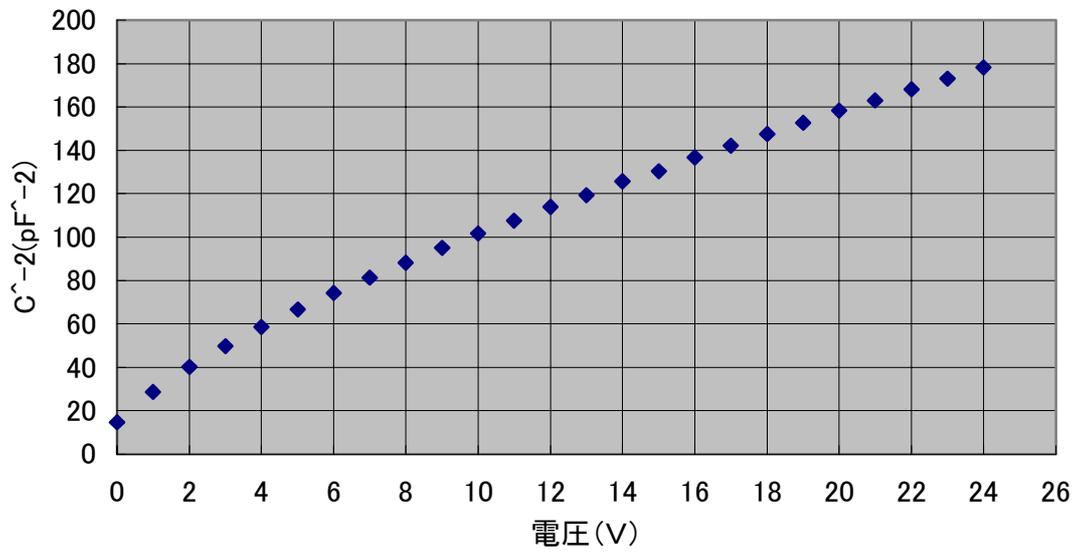


図 9.20 耐圧 24V のとき