目的

半導体デバイスの基本的な構成要素として重要なpn接合の働きの原理を、pn接合素子として最も基礎的なpn接合ダイオードの電流―電圧特性を測定することで理解することが目的である。

原理

＜pn接合の原理(１)＞

Si,Geの４価の真性半導体の中に原子が５個のヒ素（As）、りん（P）、アンチモン（Sb）などをごく微量混ぜて結晶を作ると、５価の価電子のうち４個はSiの価電子と共有結合するが、残りの余った電子１個（過剰電子）は自由電子となることができる。

この過剰電子はエネルギー的に価電子帯よりも伝導体に近い禁制帯に位置していて、このエネルギー準位をドナー準位と言い、過剰電子を生じさせる元素をドナーと呼んでいる。

このドナー電子は過剰電子を失うと、正電荷を得たこととなり、陽イオンとなる。ドナー準位にできた正孔は価電子帯にできる正孔と異なり、禁制帯にあるため、電子が入り込むことができず、キャリアとしての作用をすることができないので、キャリアの働きは電子のみが行う。このような半導体をｎ型半導体という。

　一方で、４価の真性半導体の中に不純物として３価の元素アルミニウム（Al）またはガリウム（Ga）、ホウ素（B）、インジウム（In）をごく微量入れて結晶を作ると、３価の電子は価電子が３個しかないため、正孔ができる。このように正孔を生じさせる元素をアクセプタといい、正孔のエネルギー準位はアクセプタ準位と言われる。ドナー準位とは逆に価電子帯のすぐそばの禁制帯に位置しているので、正孔には価電子帯の電子が飛び込みやすく、アクセプタは陰イオンとなる。このような半導体をp型半導体という。

ｎ型半導体での電子、p型半導体での正孔は多数キャリアと呼ばれ、ｎ型半導体中に存在するわずかな正孔、ｐ型半導体に存在するわずかな電子は少数キャリアと呼ばれる。

＜ｐｎ接合の原理(２)＞

ｐ型、ｎ型半導体を結合させたｐｎ接合を考える。接合によって、接合面の近くの電子と正孔は一部が結合し、ｎ型半導体領域に電子を失った正イオン、ｐ型半導体領域には電子を余分に持った負イオンが現れる。（図１）

このようなキャリアの欠乏した領域を空乏層という。空乏層ができる仕組みは、ｐ型半導体の多数キャリアとｎ型半導体の多数キャリアの濃度の差が引き起こすもので、その濃度が釣り合おうとする際に拡散電流が流れることで形成される。具体的には、それぞれの半導体の多数キャリアが境界面に引き寄せられ、結合し消滅することで、アクセプタイオン・ドナーイオンが残ることで電界が発生し空乏層ができる。その発生した電界が拡散を抑え、空乏層幅は安定する。別の視点で考えると、多数キャリアの移動がだんだん少なくなり空乏層の広がり方も収まっていき、多数キャリアと少数キャリアの移動する量が釣り合った後は空乏層の幅は安定する。次に、図２（a）のようにｐ側にマイナス、ｎ側にプラスの電圧を加えると、ホールはｐ型の電極の方に動き、電子はｎ型の電極の方に引き寄せられることで、接合付近にはキャリアが不足し、電流はほとんど流れない。そして、空乏層の幅は広がる。

次に、図２(b)のようにｐ側にプラス、ｎ側にマイナスの電圧を加えると、接合面の電位障壁を通り抜けて、電子がｐ型へ、ホールはｎ型に侵入する。また、両電極から電子、ホールがそれぞれ補給されるので電流は流れ続ける。図２(b)電源電圧を順方向電圧、この時の電流を順方向電流という。また、図２(a)の電源電圧を逆方向電圧、この時の微量な電流を逆方向電流という。

ダイアグラム

自動的に生成された説明

ｐｎ接合ダイオード

順方向電圧を加えると小さい電圧で大きな電流が流れる。一方、逆方向に電圧を印加した場合には少数キャリアによる微量な逆方向電流が流れる。さらに、逆方向電圧を大きくしていくと、ツェナ現象と雪崩現象によって急激に電流が増加する。

ツェナ効果

逆電圧の増加によって接合部の電界が強くなり、価電子帯の電子がこの電界からエネルギーを得て伝導体に上がり、多量の自由電子と正孔の対ができて逆電流が流れる。詳しく説明すると、トンネル効果が原因で発生する現象で、一般的なダイオードよりもp・n型半導体に不純物を大量に添加することで起こる。pn接合ダイオードは不純物濃度が高い時、一般的なpn接合ダイオードの場合より空乏層が狭くなる。ツェナダイオードのような不純物濃度が高いダイオードは、一般的なダイオードよりも多数キャリアがさらに多く、短距離で同等の電界(空乏層)をつくり上げることができる。したがって空乏層幅が狭くなる。このように空乏層幅が狭くなったダイオードに逆電圧をかけると、今度は少数キャリアの拡散により、ごく微量の電流、逆方向電流が流れる。そして空乏層の電界が大きくなり、価電子帯と伝導体の距離が短くなる。これがツェナダイオードの場合、空乏層の幅が狭いので、価電子帯の電子が伝導帯に移動し電流が流れる。そして電流が急激に流れ、電圧の変化が小さくなる。

雪崩現象

接合部の逆電界で加速された自由電子と正孔が空乏層内の電子に衝突して、自由電子と正孔の対を発生させて逆電流が流れる。これらを積極的に利用し、逆方向電圧を加えて一定電圧を得るために作られたのがツェナダイオードまたは定電圧ダイオードである。

ホワイトボードに書かれた文字

自動的に生成された説明

実験機器

・電源：スイッチングジェネレータAC100Ⅴin/ＤＣ５Ｖout

・基盤：ブレッドボード　・固定抵抗：２２０Ω

・可変抵抗：２ＫΩ２５回転ポテンショメータ

・ダイオード：発光ダイオード(ＬＥＤ)実験①、②ツェナダイオード　実験③

・電流計：デジタルマルチメータ（ＹＯＫＯＧＡＷＡ732-01）

・電圧計：カードハイテスター（Ｈ10Ｋ13244）

＜それぞれの役割＞

電源：安定した直流電圧を与えることができる。

基盤：素子を接続して回路を構成するために用いられる。

可変抵抗：抵抗を変化させることで回路に流れる電流・電圧を変化させる。

ダイオード：電流が流れているかどうかを判定する。

電流計・電圧計：それぞれ回路にかかる電圧・流れる電流を測定する。

実験内容

実験①

図7の回路にて電流計のレンジを400/4000µＡに設定し、多回転ポテンショを回して、電流計の表示が1,2,4,7,10,20,40,70µＡの時の電圧を調べた。その後、図8の回路に組み替え、電流計のレンジを400/4000µＡに設定し、多回転ポテンショを回して電流計の表示が7,10,20,40,70,100,200,400,700,1000,2000,4000μＡの時の電圧を調べた。

さらに、図8の回路と同じ構成で電流計のレンジを40/400ｍＡに設定し、多回転ポテンショを回して、電流計の表示が、0.4,0.7,1,2,4,7,10ｍＡの時の電圧を調べた。

時計, 吊るす, 記号, ストリート が含まれている画像

自動的に生成された説明 ダイアグラム, 概略図

自動的に生成された説明

実験②

実験①-２,３回路からダイオードの正負を逆にし、電流計のレンジを40/400ｍＡに設定し、多回転ポテンショを回して、電圧計が1.0,1.5,2.0,2.5Ｖの時の電流を調べた。

時計と文字の加工写真

低い精度で自動的に生成された説明

実験③

実験②の回路からLED をツェナダイオードに変え、電流計のレンジを400/4000µＡに設定し、多回転ポテンショを回して電流計の表示が7,10,20,40,70,100,200,400,700,1000,2000,4000µＡの時の電圧を調べる。(図12)次に電流計のレンジを40/400ｍＡに設定し、多回転ポテンショを回して電流計の表示が0.4,0.7,1,2,4,7,10ｍＡの時の電圧を調べた。さらに、図13のように回路を組み替え、電流計のレンジを400/4000µＡに設定し、多回転ポテンショを回して、電流計の表示が1,2,4,7,10,20,40,70µＡの時の電圧を調べた。

時計が付いている｜｜｜ｐ

中程度の精度で自動的に生成された説明 壁の時計

中程度の精度で自動的に生成された説明

実験結果

　　　





考察（報告事項）

１．原理参照

２．

実験①-２，３において、順方向特性のデータを実用ダイオードの式を用いて解析する。実用ダイオードの式Ｉ=Ｉ₀exp(eV/nkT)を変形すると、㏒Ｉ=e/nkT・ｖ+logⅠ₀となるこの式の左辺はI-Vグラフを片対数で取ったグラフの縦軸に相当するので、　最小二乗法を用いることで傾きを求めることができる。直線の式（y=ax+b）を求める公式a=Sxy/Sx²、b=y-axから、傾きe/nkT≒20.589、片対数グラフで　切片logI₀≒-29.6114となった。この傾きから、各定数を代入してnを求めると、n≒1.88となり、nは2に近いことが分かった。したがって再結合電流が支配的であると言える。次に、逆方向特性を理想ダイオードの式で比較する。理想ダイオードの式Ｉ=Is｛exp(eV/kt)-1｝（逆方向飽和電流）を実験結果と比較すると、微小なIsに対して、実験②では負の電圧を取るので、exp(eV/kt)の部分は限りなく小さくなり、Ｉ≈-Isと考えることができる。よって実験②での発光ダイオードの逆方向特性は、理想ダイオードの式と傾向があっているとわかる。また、理想ダイオードの式Ｉ=Is｛exp(eV/kt)-1｝で考えると、逆方向の電圧をどれだけかけても逆方向電流はＩ≈-Isでほとんど変化しないと考えられる。

３．

実験③の特性と理想ダイオードの式、そして実験②の結果と比較する。

まず、実験③は、電流が流れた状態での電圧を測定しているので、ツェナ効果が起きた後の状態であると考えられる。また、電流値の変化に対し電圧値の変化ははるかに小さく、急激に電流が増加することが分かる。今回の測定結果では電圧の変化が測定されたが、一般的にツェナダイオードは、電流の変化に対しほぼ一定の電圧を保つことから、定圧の電圧を得るために用いられる。今回の実験③より得られた特性を理想ダイオードの式と比較してみると、傾向がかなり異なっているとわかる。また、報告事項2でも述べたように、発光ダイオードの逆方向特性は理想ダイオードの式と傾向があっていることが分かり、実験③のツェナダイオードとは特性が大きく異なっている。そして、実験③から得られた特性は一般的なツェナダイオードの特性と近いと考えられる。

４．

次に、実験①と実験③でそれぞれ二つの回路を用いて測定をしたが、これらの測定結果にずれが生じるのは電圧計と電流計の接続のしかたが原因である。

電流計に流れる電流をＩ、ダイオードに流れる電流をＩ₀、電圧計の電圧をＶ，ダイオードの抵抗をR,ダイオードに加わる電圧をＶ₀、電流計の内部抵抗、電圧計の内部抵抗をそれぞれRa、Rbとすると、実験①、③の最初の回路において、V=V₀+RaⅠ₀、Ⅰ=Ⅰ₀となる。組み替えた後の回路ではV=V₀、Ⅰ=Ⅰ₀+V₀/Rvとなる。よって、最初の回路と組み替えた後の回路では、測定結果に違いがでて、同じ電圧測定値の場合後者の方が電流測定値が大きくなることが分かる。つまり、これらの違いは電流計と電圧計の内部抵抗がもたらした結果だとわかった。今回の場合はあくまでダイオードの電流-電圧特性を調べる実験であるので、電流が大きく流れ始めた後の場合、ダイオードの内部抵抗はきわめて小さくなるので、実験①-1、③-1,2のようなVA法だと電流計の内部抵抗が誤差でなくなり電圧を測定するのには不適切である。また、電流が流れ始める直前までは、ダイオードの抵抗はきわめて大きく、電流計の内部抵抗は誤差と捉えることができるので、順方向電圧の測定に関してはVA法、AV法のどちらを利用した際も測定結果の差は誤差であると考えられる。よって、ダイオード自体にかかる電圧・電流を測定するためにはAV法の方が適し、ダイオードの電流-電圧特性を調べるのによいと考えられる。

参考文献

松波弘之（1999）『半導体工学（第2版）』朝倉書店

高橋清・山田陽一（2013）『半導体工学（第3版）-半導体物性の基礎-』森北出版

大類重範（2022）『アナログ電子回路』オーム社