

E3. 半導体素子とその応用回路

E3 半導体素子とその応用回路

E3.1 はじめに

半導体素子は、電子回路中に非常に多用される素子である。E コースの第 3 回では電子回路に関する基礎項目として半導体素子を使用した回路について扱い、代表的な半導体素子であるダイオードおよびトランジスタについてその構造や電気的な特性に関する基礎知識を習得する。はじめに半導体とは何かをその種類や原理に基づいて説明し、さらに実験的な検証を通して実際にその特性を確認してみよう。

本日の目標

1. 半導体素子の種類とその構造・性質を理解する
2. 代表的な半導体素子であるダイオード、トランジスタの特性を確認する

E3.2 半導体概論

E3.2.1 真性半導体

知識 E3.1 半導体とは？

物質は電気を通すか通さないかによって、導体・絶縁体に分類することができる。導体には金属などが、絶縁体にはガラスやゴムなどが分類され、半導体にはシリコンやゲルマニウムといった物質が分類される。半導体とは、導体と絶縁体の中間的な特性を示す物質のことを指し、周囲の温度や電界などに応じて電気抵抗率が変化する特性を持っている。

知識 E3.2 真性半導体

不純物の混ざっていない純粋な半導体は真性半導体と呼ばれ、ゲルマニウム (Ge) やシリコン (Si) など価電子数が 4 である物質がその例に挙げられる。

Fig.E3.1 に示したように、これらの物質の結晶は、各原子が互いに隣り合う

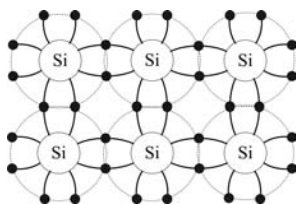


Fig.E3.1: 真性半導体の共有結合

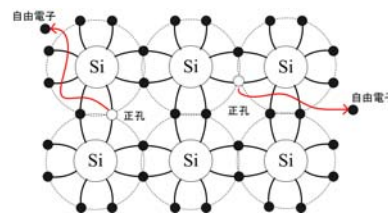


Fig.E3.2: 自由電子と正孔の発生

4 原子と価電子を共有する共有結合によって構成されており、結晶に外部からエネルギーが加わらない限り価電子は原子核との結びつきを切ることができず、電流を流すことはできない。

原理 E3.1 真性半導体の電流

真性半導体の結晶に外部から温度，光，電界などのエネルギーを与えると，Fig.E3.2 に示すように価電子が原子核との結びつきを離れ，自由電子と呼ばれる結晶内を自由に移動できる電子が発生する．また自由電子が抜けた跡には，正孔またはホールと呼ばれる正の電荷をもつ穴が残り，この自由電子と正孔が移動することによって電流を流すことができる．これらの自由電子と正孔は総称してキャリアと呼ばれ，電荷を運ぶものという意味をもっている．

E3.2.2 不純物半導体

知識 E3.3 不純物半導体

真性半導体では自由電子と正孔の数は同一であるが，外部から特定の元素を真性半導体に混入させ，自由電子あるいは正孔のいずれか一方のキャリアを人為的に多くすることができる．

このようにして作られる半導体は真性半導体に対して不純物半導体と呼ばれ，多数キャリアの違いによって n 型半導体と p 型半導体がある．

原理 E3.2 n 型半導体

真性半導体に（ドナーと呼ばれる）周期律表の V 族の元素をごく微量混入させて，自由電子の数 > 正孔の数 とした半導体である．Fig.E3.3 に示すように共有結合の際に価電子が余り，外部からのわずかなエネルギーによって原子核から離れ，正孔をともなわない自由電子が発生する．

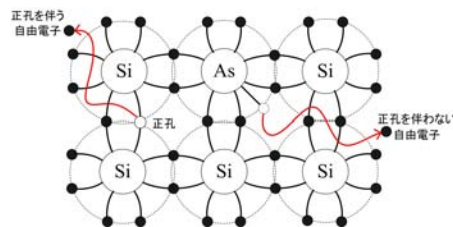


Fig.E3.3: n 型半導体の共有結合

n 型半導体に電圧を印加すると，自由電子が移動することによって電流が流れる．この負 (Negative) の電荷をもった自由電子が電気の伝導を担うキャリアとなることから，n 型半導体と呼ばれる理由である．

原理 E3.3 p 型半導体

真性半導体に（アクセプタと呼ばれる）周期律表の III 族の元素をごく微量混入させて，正孔の数 > 自由電子の数 とした半導体である．Fig.E3.4 に示すように共有結合の際に価電子が不足し，その不足分を他の原子より取り込むことによって，自由電子をともなわない正孔が発生する．

正孔は自由電子とは異なりそれ自体は移動することができないが，p 型半導体に電圧を印加すると，電子が順次正孔に移ることによってあたかも正孔が移動しているかのように振る舞うことで電流が流れる．この正 (Positive) の電荷

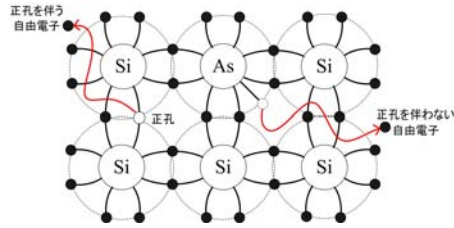


Fig.E3.4: p型半導体の共有結合

をもった正孔が電気の伝導を担うキャリアとなることが、p型半導体と呼ばれる理由である。

E3.2.3 pn接合半導体のバイアス特性

知識 E3.4 pn接合半導体

Fig.E3.5 に示したように、結晶中の一部を p 型、残りの部分を n 型に形成した半導体を pn 接合半導体と呼び、p 型領域と n 型領域の境界を接合面と呼ぶ。

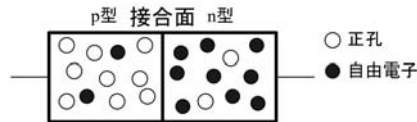


Fig.E3.5: pn接合半導体

pn 接合半導体を作ると、各領域におけるキャリア濃度の違いから p 型からは正孔が、n 型からは自由電子が接合面を通して他の領域へ拡散し、拡散した領域における多数キャリアとの再結合により消滅する。

その結果、Fig.E3.6 に示すように接合面付近には空乏層と呼ばれるキャリアの存在しない正負の電荷のみの領域が形成される。この電荷によって Fig.E3.6

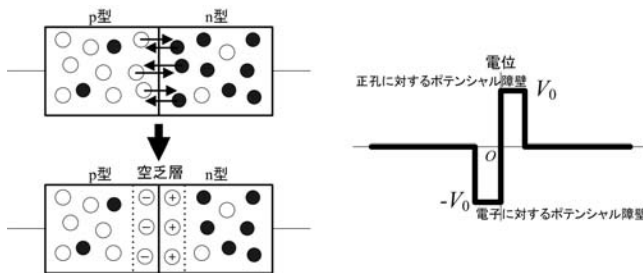


Fig.E3.6: 空乏層の形成とポテンシャル障壁

に示したような電位差 (ポテンシャル障壁) が生じ、キャリアの移動が妨げられて拡散が止まる。

原理 E3.4 pn接合半導体の順方向バイアス特性

pn 接合半導体の p 側に (+), n 側に (-) の直流電圧 V を掛けると、Fig.E3.7 に示すようにポテンシャル障壁は V だけ低くなり、空乏層を通して p 型へは自

由電子が、n型へは正孔が注入されるようになる。ポテンシャル障壁以上の電圧(拡散電圧)が掛けられると障壁は消滅し、自由電子と正孔は自由に移動ができるようになる。このような電圧の印加方向を順方向バイアスという。

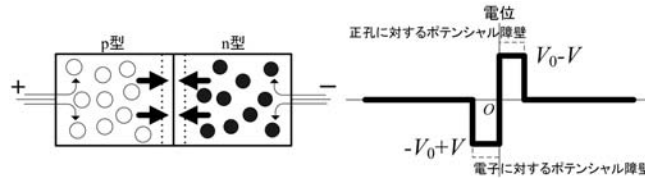


Fig.E3.7: 順方向バイアスによるポテンシャル障壁

p型半導体内の正孔は印加電圧の(+)に反発すると同時に(-)に引かれ、接合面を乗り越えてn型半導体に入り、自由電子と出会って消滅する。反対にn型半導体内の自由電子は印加電圧の(-)に反発すると同時に(+)に引かれ、p型半導体に入って正孔と出会い消滅する。このように正孔と自由電子は再結合により消滅してしまうが、印加電圧の電流によって次々に正孔と電子が流入し、継続して電流が流れることになる。

キャリア再結合の際に過剰なエネルギーが熱や光として放出されることがあり、後者を積極的に利用したのが発光ダイオード(LED)になる。

原理 E3.5 pn 接合半導体の逆方向バイアス特性

pn 接合半導体の p 側に(-), n 側に(+)の直流電圧 V を掛けると, Fig.E3.8 に示すようにポテンシャル障壁は V だけ高くなり, 空乏層の幅はさらに広がる。

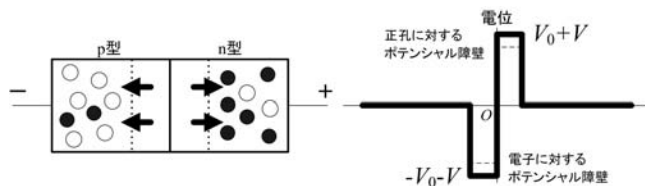


Fig.E3.8: 逆方向バイアスによるポテンシャル障壁

p型半導体における多数キャリアである正孔は印加電圧の(+)に反発すると同時に(-)に引かれ, またn型半導体における多数キャリアである自由電子は印加電圧の(-)に反発すると同時に(+)に引かれて, それ以上の変化が生じなくなる。一方で各領域の少数キャリアにとっては順方向バイアスに相当するので, 微小な電流が流れることになる。このような電圧の印加方向を逆方向バイアスという。

さらに印加電圧を上げていくと, ある電圧で電流が急激に流れるようになる(降伏)。これには, p型半導体中に熱によって生じる少数の電子が接合面付近の高電界によって加速されて基板の原子に衝突・励起して電子と正孔の新しいキャリアを同時に生成し, その連鎖反応で電流が流れるなだれ降伏と, トンネル効果によって障壁を超えることなく電子が通過するトンネル電流によるツェナー降伏がある。

E3.3 ダイオード

E3.3.1 ダイオードの種類

知識 E3.5 ダイオードの種類

主に使用されているダイオードとして、以下の種類が挙げられる。

- pn 接合ダイオード (pn Diode)
p 型・n 型の 2 種類の半導体が接合された最も一般的なダイオード。各半導体から端子が出ており、p 型半導体からの端子はアノード、n 型半導体からの端子はカソードと呼ばれる。
- 定電圧 (ツェナー) ダイオード (Zener Diode)
逆方向バイアスを掛けたときに電流にかかわらず一定の電圧が得られる性質を利用し、電圧の基準として用いられるダイオード。順方向バイアスの特性は通常のダイオードと同等である。
- 発光ダイオード (LED)
順方向バイアス時に pn 接合面で発生するキャリア再結合で、光が放出される発光再結合またはエレクトロルミネセンスと呼ばれる再結合が起こることがある。この効果を利用した発光素子である。
- レーザダイオード (Laser Diode)
レーザ光線を発生させるダイオードで、半導体レーザとも呼ばれる。発光の原理は発光ダイオードと同じくエレクトロルミネセンス効果に基づく。
- フォトダイオード (Photo Diode)
pn 接合部への光の入射にともなって p 領域に正孔・n 領域に電子が集まる光起電力効果により電位差が生じる。その電位差または電流を測定し光センサとして利用するもの。太陽電池と同じ効果に基づく。
- 可変容量ダイオード (Variable Capacitance Diode)
逆方向バイアスを掛けたときに pn 接合の空乏層厚みが変化することを利用して静電容量 (接合容量) を可変としたコンデンサである。

E3.3.2 pn 接合ダイオードの電圧-電流特性

知識 E3.6 pn 接合ダイオード

pn 接合ダイオードとは、p 型半導体と n 型半導体を接合して両端に金属電極をつけてリード線を引き出した 2 端子素子であり、回路図上では Fig.E3.9 に示



Fig.E3.9: pn 接合ダイオードの記号

す記号で表される。

Fig.E3.10 に電圧-電流特性を示すように、順方向バイアスを印加してもすぐに電流は流れ出さず、印加電圧がある値以上になると電流が流れ始める。この

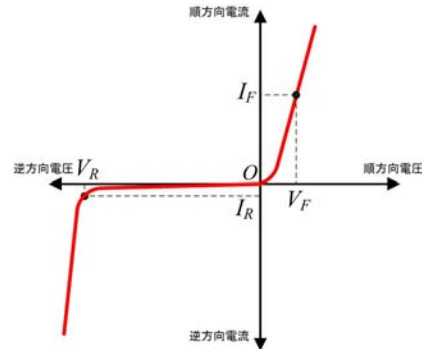


Fig.E3.10: pn 接合ダイオードの電圧-電流特性

電圧は拡散電圧 V_F と呼ばれ、シリコンダイオードで通常 $0.6 \sim 0.7V$ 程度、発光ダイオードで $1.4V$ 以上の値となる。一方、逆方向バイアスでは順方向に比較して無視できる程の微小な電流が流れ、伏降までその性質が持続する。

実験 E3.1 ダイオードの電圧-電流特性を確認してみよう

pn 接合ダイオードの電圧-電流特性を観測し、特性値をデータシートと比較検討してみよう。

1. 手順

- (a) Fig.E3.11 に示す回路をブレッドボード上に構成する
- (b) 安定化電源より直流電圧を印加し、アノードカソード間の電圧および電流を測定する
- (c) 供給電圧を変化させて (b) の電流・電圧測定を繰り返し、電圧 - 電流特性グラフを作成する
- (d) 獲得された特性をデータシートと比較する

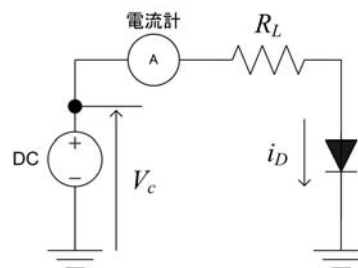


Fig.E3.11: ダイオードの電圧-電流特性評価回路

2. 考察項目

- 観測された拡散電圧はいくつになったか?
- 観測されたツェナー電圧はいくつになったか?

E3.3.3 pn 接合ダイオードの整流作用

知識 E3.7 整流作用

これまで説明してきたように, pn 接合ダイオードは一方に電流を流しやすい性質をもつ. この性質を整流作用と呼び, 整流作用を利用して例えば交流信号から直流信号を取り出すことが可能となる.

実験 E3.2 ダイオードの整流作用を確認してみよう

pn 接合ダイオードを利用して整流回路を作成し, その出力電圧を観測して整流作用について考察する. 回路を通した波形と通していない波形をそれぞれ観測し, 得られた波形を比較することによって理解を深めよう.

1. 手順

- Fig.E3.12 に示す回路をブレッドボード上に構成する
- ファンクションジェネレータより正弦波あるいは三角波を印加し, その時の抵抗に掛かる電圧波形を観測する
- 回路を Fig.E3.13 に示す整流回路に組み換える
- ファンクションジェネレータより正弦波あるいは三角波を印加し, その時の抵抗に掛かる電圧波形を観測する
- (b) の場合と (c) の場合の観測波形について違いを比較する

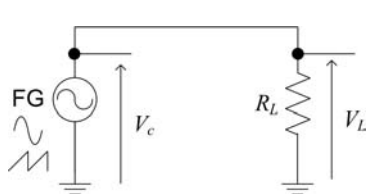


Fig.E3.12: 整流作用評価回路 (1)

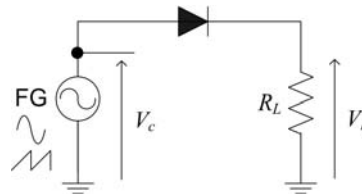


Fig.E3.13: 整流作用評価回路 (2)

2. 考察項目

- 所望の直流成分が抽出されているか?
- 波形の負の部分が取り除かれていること以外に変化はあるか?

事前課題 E3.1 整流回路の出力波形を予測しよう

Fig.E3.12 および Fig.E3.13 に示した回路に, V_C として $1V_{P-P}$ の正弦波信号を印加したときの出力 V_L の波形を予測しなさい. ただし, ダイオードの拡散電圧は $0.6V$ とする.

E3.4 トランジスタ

E3.4.1 トランジスタの種類

知識 E3.8 トランジスタの種類

主に使用されているトランジスタとして、以下の種類が挙げられる。

- バイポーラトランジスタ (Bipolar transistor)

Fig.E3.14 に示すように、p 型半導体・n 型半導体を接合した半導体素子である。薄い p 型の両端を n 型で挟んだ npn 型、薄い n 型の両端を p 型で挟んだ pnp 型があり、それぞれエミッタ・ベース・コレクタと呼ばれる端子を持つ。特に一般にトランジスタといえばこのタイプを指し、特性が等しい npn 型と pnp 型の対をコンプリメンタリと呼ぶ。

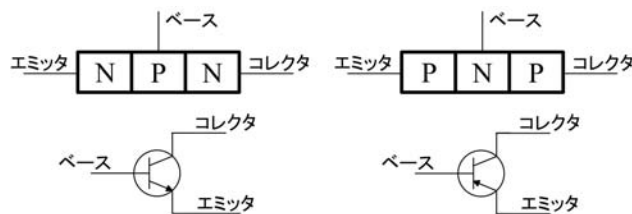


Fig.E3.14: バイポーラトランジスタの模式図と回路記号

- 電界効果トランジスタ (Field Effect Transistor = FET)

ゲート電圧 (チャネル電界) により電流を制御する方式のトランジスタ。ゲート電極が半導体酸化物の絶縁膜を介しているものを特に MOS(Metal Oxide Semiconductor)-FET という。

E3.4.2 トランジスタによる電流増幅作用

原理 E3.6 トランジスタの動作

npn 型トランジスタを動作させるためには、Fig.E3.15 に示すように 2 つの pn 接合間に対し B-C 間には逆方向バイアスを、E-B 間には順方向バイアスを掛ける。順方向バイアスの印加によって、エミッタ側の p 型からベースの n 型

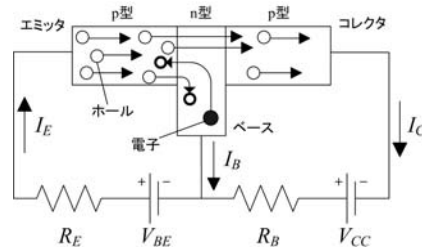


Fig.E3.15: npn 型バイポーラトランジスタ内のキャリアの動き

へ多数キャリアの正孔が注入される。ベースは非常に薄く作られていて、注入

された正孔の大多数は電子と再結合することなく B-C 間の接合面に到達する。B-C 間には逆方向バイアスが印加されているので、正孔はさらに加速されてコレクタへと流れ、コレクタ電流として取り出される。

なお、npn 型トランジスタの動作はキャリアおよび印加電圧などの向きがすべて逆になるだけで、原理は pnp 型と全く同一である。

知識 E3.9 トランジスタによる電流増幅作用

npn 型トランジスタの等価回路を示したものが Fig.E3.16 となる。トランジ

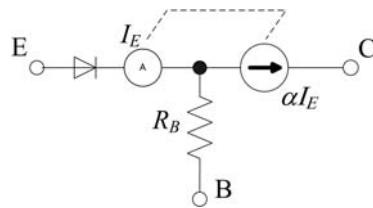


Fig.E3.16: pnp 型バイポーラトランジスタの等価回路

スタのコレクタ電流は、式 (E3.1) に示すように B-C 間の電圧には依存せずエミッタ電流によって決定され、その電流増幅率 α は 0.98 ~ 0.99 となる。

$$I_C = \alpha I_E \quad (\text{E3.1})$$

エミッタ電流は E-B 間の順方向電圧によって決定されるので、コレクタ電流は E-B 間の順方向電圧 (すなわちベース電流) によって制御することが可能である。

E3.4.3 トランジスタの基本増幅回路

アナログ電子回路中では、トランジスタは基本的に増幅器として使われている。その基本的な増幅回路とその特徴を以下に示す。

例 E3.1 ベース接地回路

ベース接地増幅回路を Fig.E3.17 に示す。

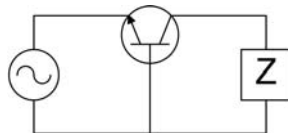


Fig.E3.17: ベース接地回路

- 入力インピーダンスが低く、出力インピーダンスが高い
- 周波数特性が良く、位相は同相
- npn 型を使用し、電圧-電流変換、電圧レベル変換などに利用

$$\text{電流増幅率} = \alpha \quad (\text{E3.2})$$

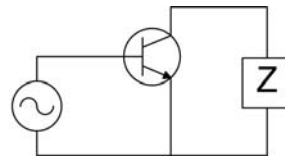


Fig.E3.18: エミッタ接地回路

例 E3.2 エミッタ接地回路

エミッタ接地増幅回路を Fig.E3.18 に示す .

- 入力インピーダンス・出力インピーダンスともに中程度
- 周波数特性は普通，位相は逆相
- トランジスタを利用する増幅回路としての基本で，電流利得と電圧利得の双方が得られる
- 電流増幅率が大きい

$$\text{電流増幅率} = -\frac{\alpha}{(1-\alpha)} \quad (\text{E3.3})$$

例 E3.3 エミッタフォロワ回路

エミッタフォロワ増幅回路を Fig.E3.19 に示す .

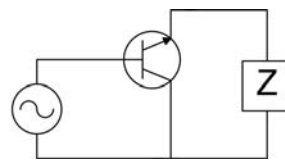


Fig.E3.19: エミッタフォロワ回路

- 入力インピーダンスが高く，出力インピーダンスが低い
- 周波数特性は良く，位相は同相
- 歪みが少なく周波数特性も良いので，オーディオアンプや安定化電源などに利用

$$\text{電流増幅率} = \frac{1+\alpha}{(1-\alpha)} \quad (\text{E3.4})$$

一方デジタル電子回路中では，トランジスタは電子的なスイッチとして使われ，半導体メモリ・マイクロプロセッサ・その他の論理回路で利用されている .

知識 E3.10 トランジスタの出力特性

電力増幅率の高いエミッタ接地回路の出力特性を例に説明する . Fig.E3.20 に示したように出力特性は 3 つの領域に区分され，それぞれの特徴は以下のように纏めることができる .

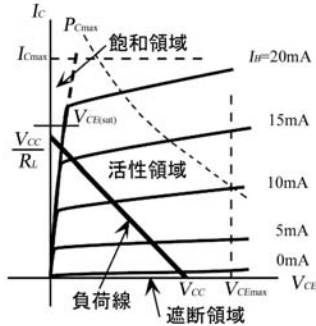


Fig.E3.20: エミッタ接地回路の出力特性

活性領域 コレクタ電流値がベース電流値に比例する領域． I_{CE} , V_{CE} とともに大きくなるので，電力の損失は多くなる．

飽和領域 ベース-エミッタ間のバイアス電圧が高く，ベース電流が十分に流れていて，コレクタ電流がそれ以上増加しなくなった領域．スイッチでいうと ON 状態に相当する．飽和領域の等価回路を Fig.E3.21 に示す．

遮断領域 ベース-エミッタ間にバイアス電圧を加えていなく，コレクタ電流が流れない領域．スイッチでいうと OFF 状態に相当する．遮断領域の等価回路を Fig.E3.22 に示す．

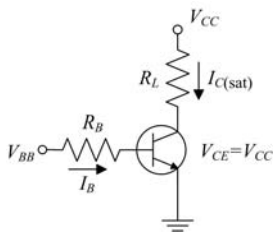


Fig.E3.21: 飽和領域の等価回路

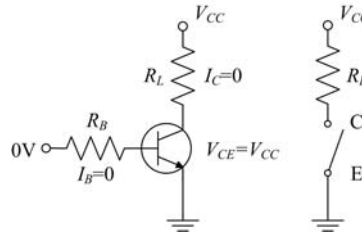


Fig.E3.22: 遮断領域の等価回路

損失電力 トランジスタのコレクタ電流 I_C とコレクタ-エミッタ間電圧 V_{CE} の積は，トランジスタ内ではすべて熱に変わって損失する電力であり，損失電力と呼ばれる．電力が無駄なることはもちろん，発生する熱が問題となっていることも多い．

負荷線 負荷線とは式 (E3.5) あるいはそれを変形した式 (E3.6) を出力特性中に示したものである．

$$V_{CC} = V_{CE} + I_C R_L \tag{E3.5}$$

$$I_C = -\frac{V_{CE}}{R_L} + \frac{V_{CC}}{R_L} \tag{E3.6}$$

増幅回路では，この負荷線が最大許容コレクタ電流 $I_{C_{max}}$ ，最大許容コレクタ電圧 $V_{CE_{max}}$ ，最大許容コレクタ損失 $P_{C_{max}}$ で囲まれた領域に入るように設計する必要がある．

実験 E3.3 トランジスタ基本増幅回路の出力特性を確認しよう

エミッタ接地増幅回路を材料にその出力特性を観測し，得られた特性をデータシートと比較検討してみよう．

1. 手順

- (a) Fig.E3.23 に示す回路をブレッドボード上に構成する
- (b) ユニバーサル電源の電圧を調節して，ベース電流 i_B を設定する
- (c) E-C間の電圧 V_{CE} を変化させ，その時のコレクタ電流 i_C を測定する
- (d) 手順 (b)，(c) を，ベース電流を変更して繰り返す
- (e) 獲得された出力特性をデータシートと比較する

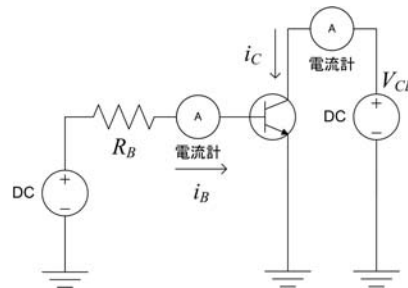


Fig.E3.23: エミッタ接地増幅回路出力特性評価回路

2. 考察項目

- 得られた電流増幅率はデータシートに示された範囲内の値となっているか？
- コレクタ・エミッタ間飽和電圧はいくつか？

E3.4.4 トランジスタのリニア動作とスイッチング動作

知識 E3.11 リニア動作とスイッチング動作

トランジスタ増幅回路による負荷の駆動では，トランジスタの活性領域を使用するリニア動作と，飽和領域および遮断領域のみを使用するスイッチング動作がある．それぞれの使用方法に特徴があり，用途に応じて使い分けられている．

リニア動作 トランジスタの活性領域を使用して負荷を駆動する方式．コレクタ-エミッタ間電圧 V_{CE} により，損失電力は大きくなってしまふ．

スイッチング動作 トランジスタの飽和領域および遮断領域のみを使用して負荷を駆動する方式．ベース-エミッタ間に流すベース電流をあらかじめ調節しコレクタ-エミッタ間電流が十分大きく得られるようにしておき，ベース電流を ON-OFF させることで飽和領域と遮断領域を行き来してコレクタ-エミッタ間電流を ON-OFF 制御する．わずかなベース電流で大きなコレクタ電流の ON-OFF が制御できることに加え，損失電力が小さいことがその特徴である．

実験 E3.4 リニア動作とスイッチング動作により負荷を駆動してみよう

トランジスタのリニア動作およびスイッチング動作によって負荷を駆動し、その特徴を比較してみよう。

1. 手順

- (a) Fig.E3.24 の回路をブレッドボード上に構成する
- (b) 可変抵抗を調節して活性領域を使用するようにベース電流値 i_B を設定し、負荷を直流電圧で駆動する (リニア動作)
- (c) このときの負荷に掛かる電圧 V_L の波形を記録する
- (d) 回路を Fig.E3.25 に組み変える
- (e) 可変抵抗を調節して飽和領域を使用するようにベース電流値 i_B を設定し、負荷を ON-OFF 信号で駆動する (スイッチング動作)
- (f) このときの負荷に掛かる電圧 V_L の波形を記録する

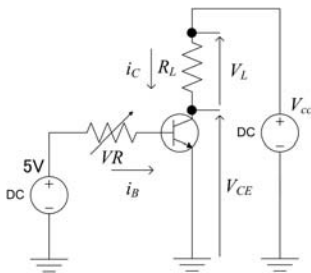


Fig.E3.24: リニア駆動回路

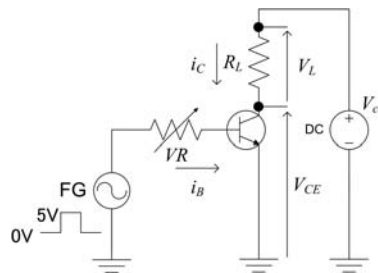


Fig.E3.25: スイッチング駆動回路

2. 考察項目

- リニア動作・スイッチング動作時の損失電力値について計算しなさい

事前課題 E3.2 トランジスタ増幅回路の負荷線を算出しよう

Fig.E3.24 あるいは Fig.E3.25 の回路に、E1 で使用した電球を負荷 R_L として組み込むときの負荷線の式 (E3.6) を求めなさい。ただし R_L については観測した電球の電圧-電流特性から読み取って算出し、 $V_{CC}=10V$ とする。

