

光 ・ エレクトロニクス学 科

電 子 工 学 実 験 2

目次

2-1. 半導体ダイオードの温度特性	.....	2
2-2. 光半導体素子の特性	.....	5
2-3. トランジスタの静特性	.....	11
2-4. トランジスタ増幅回路の製作および特性測定	.....	15
2-5. 超音波による波動計測実験	.....	19

2-1. 半導体ダイオードの温度特性

1. 目的

半導体ダイオードの順方向、逆方向の電圧対電流特性とその温度依存性を測定し、その性質を理解する。

2. 概論

Ge、Si等の半導体を用いた整流、検波の機能を持つ半導体ダイオード素子は現在広く利用されている。このような半導体ダイオードはその構造から点接触型、合金型、拡散接合型等に分類されるが、その電圧対電流特性はほぼ共通しており図1に示すような順方向、逆方向特性を示す。ダイオードの順方向特性は、使用している半導体および構造により異なるが、Geを用いたダイオードでは、ほぼ0.1~0.2V程度の印加電圧から電流の立ち上がりが始まる。一方Siを用いたものでは、ほぼ0.6~0.7V程度から立ち上がりが始まる。これはGeとSiのエネルギーギャップの差によっている。さらに順方向特性は温度により変化する。図2は順方向特性の温度依存性の例を示す。小電流領域においては、同一電流値のもとの順方向電圧対温度の関係は、Ge、Si共にほぼ $dV/dT = -2.3\text{mV}/^\circ\text{C}$ で変化することが知られている。一方ダイオードに逆方向の電圧を印加したときに流れる電流を逆方向電流 I_R と呼ぶが、実用上は不用なものである。 I_R は一般にGeダイオードでは数 μA であるのに対してSiでは数 nA であり、特にGeダイオードで大きな問題となる。さらにこの電流は温度によっても大きく変化することが知られており、回路設計上大きな問題となる。図3

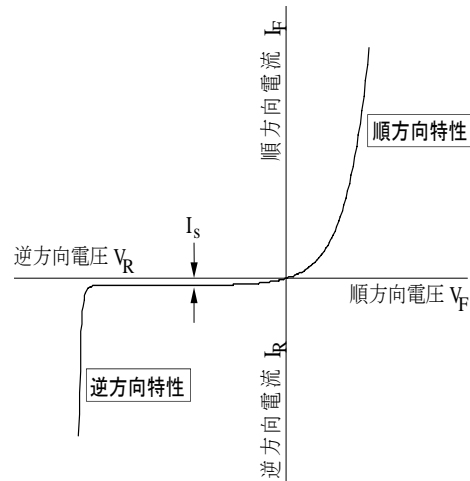


図1 半導体ダイオードの静特性

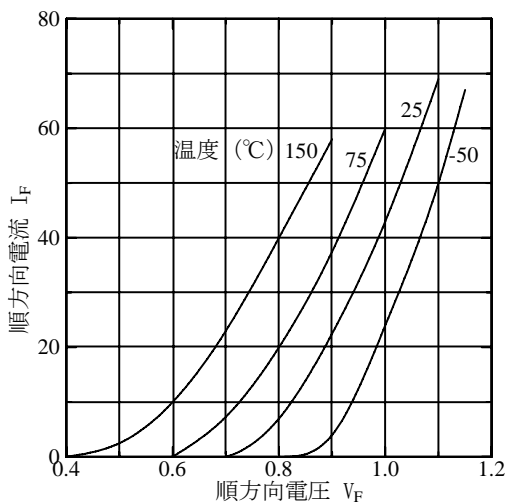


図2 順方向温度依存性の例

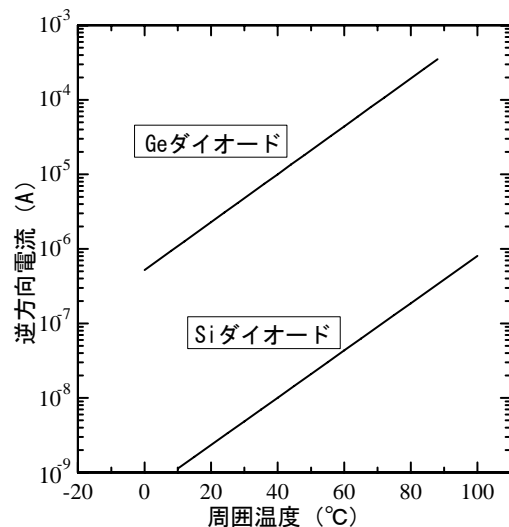
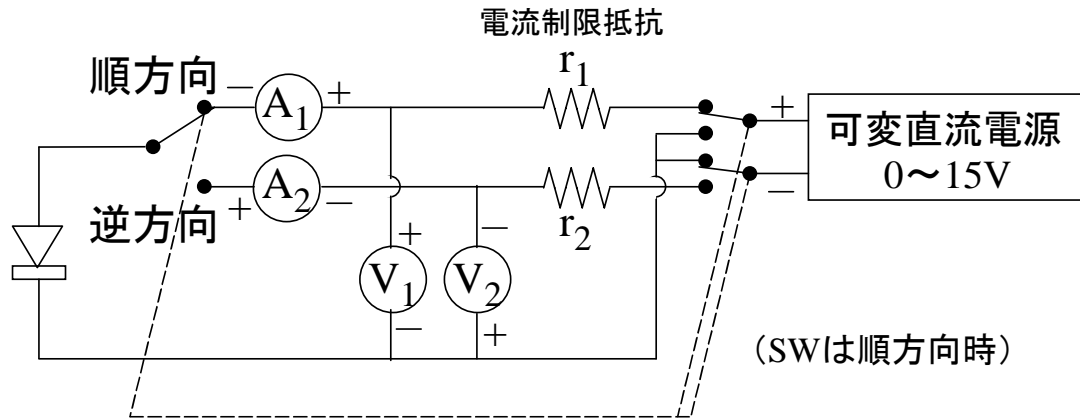


図3 逆方向電流対温度特性



$V_1 : 0 \sim 1\text{V}$ 、 $A_1 : 0 \sim 10\text{mA}$ 、 $V_2 : 0 \sim 10\text{V}$ 、 $A_2 : 0 \sim 100\mu\text{A}$

図4 測定回路

はある逆方向印加電圧に対する逆方向電流の温度変化を示す。図より 10°C の温度変化によってほぼ2倍に変化することがわかる。近似的に逆方向電流 I_R は

$$I_R = I_{R0} \exp\{k(T - T_0)\}$$

と書ける。ここで I_{R0} は基準温度 T_0 における逆方向電流、 k は材料により定まる定数で Si では約 $0.1/^\circ\text{C}$ 、Ge では約 $0.08/^\circ\text{C}$ 程度の値を取る。

3. 実験装置

測定に使用するダイオードは Ge ダイオードである。図4は測定回路図を示す。

4. 測定法

- 1) 測定回路の配線を確認した上で電圧計、電流計、電源およびダイオードを接続する。ダイオードは各テーブルに2本ずつ準備されているが、どちらか一方のみの測定を行うこと。
- 2) 室温で SW を順方向特性測定に切り換え、可変直流電源の電圧を零から徐々に増加させその都度 V_1 、 A_1 を読み取る（ダイオードの順方向電流は 10mA 以下にとどめること）。
- 3) SW を逆方向特性に切り換える。可変直流電源の電圧を同様に零から上昇させその都度 V_2 、 A_2 を読み取る。逆方向電流が $100\mu\text{A}$ かあるいは逆方向電圧が 10V に達すれば測定を止める。必ず値を読み取る度に方眼紙にプロットして特性の形状を確認しながら実験を進めること（必ずしも等間隔で電圧を変化させる必要はない。電流変化の大きいところは詳細に測定せよ）。
- 4) ダイオードを恒温乾燥器の上部より差し込む。この時ダイオード両端の配線を恒温乾燥器の壁面等にショートさせないように注意すること。また実験開始前に恒温乾燥器を予め温めておくこと（ 40°C 程度）。
- 5) 2)、3)の測定を約 20°C 間隔で温度を上昇させながら測定を繰り返す。測定時には、温度計でその時の温度を測定すること（恒温乾燥器の温度設定つまみは不正確）。但し温度の上限は 100°C 程度とする。

5. 報告

- 1) 順方向特性の温度変化 (等間隔グラフ)
- 2) 逆方向特性の温度変化 (等間隔グラフ)
- 3) 逆方向一定電圧をパラメータに逆方向電流対温度特性 (片対数グラフ)
- 4) 順方向の一定電流をパラメータに順方向電圧対温度特性 (等間隔グラフ)

6. 考察

- 1) 報告 4)のグラフの傾きから順方向の dV/dT を求めることができる。最小二乗法を用いて順方向の dV/dT の推定値を求めよ。
- 2) 報告 3)のグラフの傾きから逆方向時の k を求めることができる。最小二乗法を用いて逆方向時の k の推定値を求めよ。

2-2. 光半導体素子の特性

1. 目的

入射光に対するフォトダイオードの静特性の変化を調べるとともに、断続的な入射光に対する応答特性を求める。

2. 光電効果

光が電気に変換される現象はまとめて光電効果と呼ばれ、光が照射される固体の内部あるいは外部でこの現象がおきる場合をそれぞれ内部光電効果および外部光電効果として区別する。後者の外部光電効果による光電子放出現象を利用した素子の例として光電管がある。また前者の例としては、さらに光の入射によって固体内部の電気伝導度が変化する光伝導効果と起電力が発生する光起電力効果に分類される。光伝導効果の例としては CdS 素子が有名であり、光起電力効果の例としては、半導体の pn 接合を利用したフォトダイオードや太陽電池などがある。

3. フォトダイオード

1) 構造と動作原理

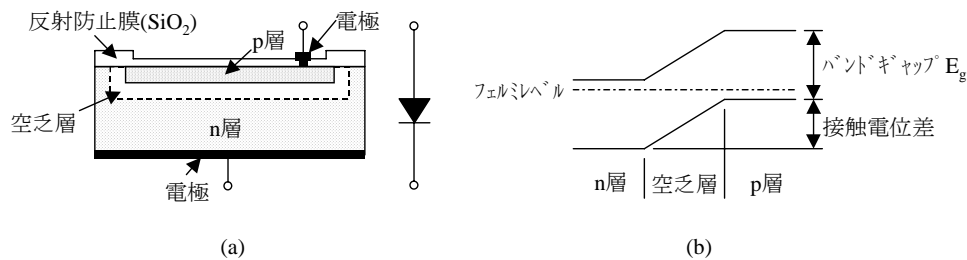


図1 暗中のダイオード

図1(a)にフォトダイオードの断面図、図1(b)にはフォトダイオードの暗中のバンドモデルを示す。この時は熱平衡状態であるので p 層、n 層のフェルミレベルは一致して、内部には接触電位（電位障壁）が発生し、空乏層には電位勾配ができる。フォトダイオードに光が照射されると、半導体内の電子が励起される。この励起エネルギーがバンドギャップ E_g より大きいと電子は伝導帯に引き上げられて自由電子となり、後にホールを残す。この電子-ホール対は p 層、n 層、空乏層のいたるところで生成される。このうち空乏層では電位障壁によって電子は n 層、ホールは p 層へドリフト

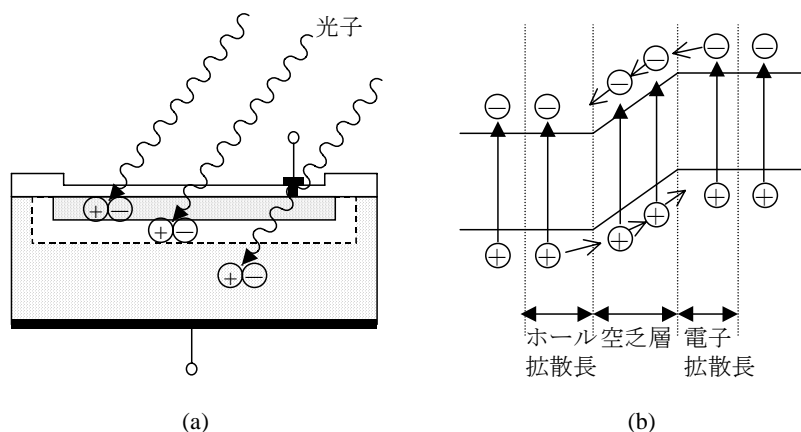


図2 光照射時のフォトダイオード

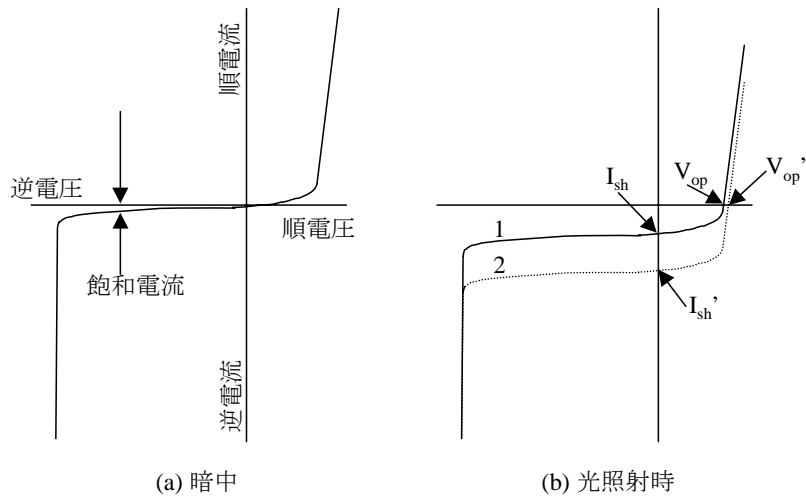


図3 電圧－電流特性

していく。また p 層の電子拡散長以内にある電子、n 層のホール拡散長以内にあるホールも空乏層まで拡散していきことができるので、電圧によってドリフトし、p 層、n 層には電荷が蓄積される (図 2(a)、(b))。これが光起電力効果である。フォトダイオードの感度を高めるには、表面の p 層を薄くして、透過率を良くし、空乏層を厚くするのが有効である。

このようにして蓄積された電荷は pn 接合の電位障壁を引き下げるため、電子は n から p へ、ホールは p から n へと移動しやすくなり、蓄積電荷が減っていく。そのため光を照射しつづけても、電荷は無制限に蓄積されるわけではなく、電位障壁をある値まで下げると電荷の移動は見かけ上なくなる。この電位障壁の変化 (フェルミレベルのずれ) は外部に電圧として現れ、これを開放端電圧 V_{op} という。また 2 つの電極を短絡させると電荷は外部に流れ出るためフェルミレベルのずれは起こらず、外部に電圧は現れない。このとき流れる電流は短絡電流 I_{sh} と呼ばれる。

2) 電圧－電流特性

フォトダイオードに暗中で電圧を印加すると、図 3(a)の様に、一般の整流用ダイ

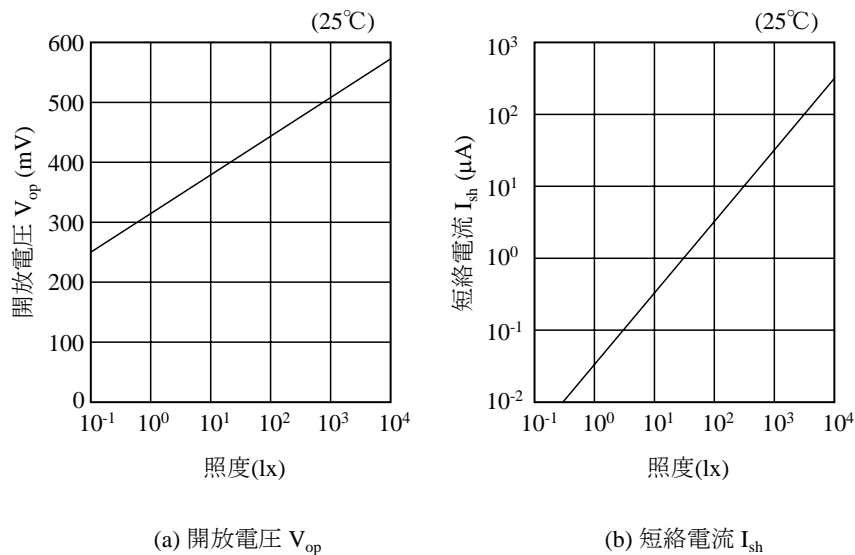


図4 光量と出力信号の関係 (S2386-5K)

オードと同様の電圧－電流特性が得られる。しかし、フォトダイオードに光を照射するとこの曲線は図3(b)の様に下に移動し、さらに光を強くすると2の様に更に下がる。ここでフォトダイオードの両端を開放しておく、順方向に V_{op} (または V_{op}') の電圧が現われ、両端を短絡しておく、逆方向に I_{sh} (又は I_{sh}') の電流が流れる。ここで V_{op} と I_{sh} を光量の関数として示すと図4の様になる。このように I_{sh} は入射光量に対する直線性が優れ、その直線性範囲は素子の種類や負荷抵抗などにより異なるが、6～8桁にも及ぶ。

3) 等価回路

フォトダイオードを等価回路で表すと図5の様になる。この等価回路から出力電流を求めると、次の様になる。

$$I_o = I_L - I_D - I' = I_L - I_s \left(\exp \frac{qV_D}{kT} - 1 \right) - I'$$

ここで I_s はフォトダイオードの逆方向飽和電流、 q は電子の電荷、 k はボルツマン定数、 T は素子の絶対温度である。開放端電圧 V_{op} は $I_o = 0$ の時の電圧であるので、

$$V_{op} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_L - I'}{I_s} + 1 \right)$$

となり、 I' が無視できる時 I_s は周囲温度に対して指数関数的に増加するので V_{op} は I_L の対数に比例し、周囲温度に逆比例することになる。しかし、微弱光となってくるとこの関係が崩れてくる。これに対して I_{sh} は $R_L = 0$ 、 $V_o = 0$ のときの出力電流なので

$$I_{sh} = I_L - I_s \left(\exp \frac{q(I_{sh} R_s)}{kT} - 1 \right) - \frac{I_{sh} R_s}{R_{sh}}$$

となる。ここで第2項、第3項が I_{sh} の直線性の限界を決定する原因となる。ただし R_s は数 Ω 以下、 R_{sh} は $10^7 \sim 10^{11} \Omega$ となり、第2項、第3項はかなり広い範囲において無視することができる。分かる。

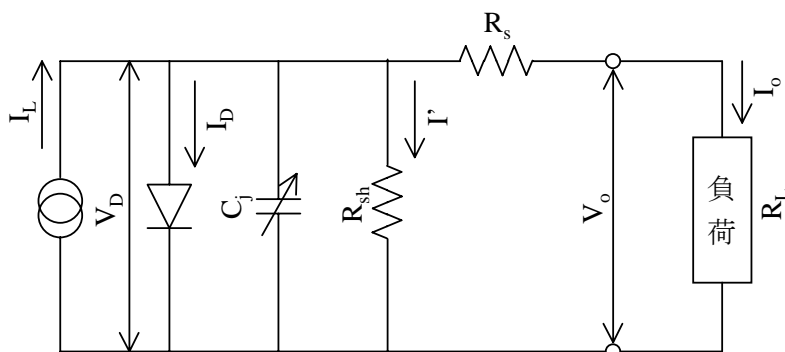


図5 フォトダイオードの等価回路。ここで I_L は入射光による発生電流 (光量に比例)、 I_D はダイオード電流、 C_j は接合容量、 R_{sh} は並列抵抗、 R_s は直列抵抗、 I' は並列抵抗電流、 V_D はダイオード両端の電圧、 I_o および V_o はそれぞれ出力電流および出力電圧である。

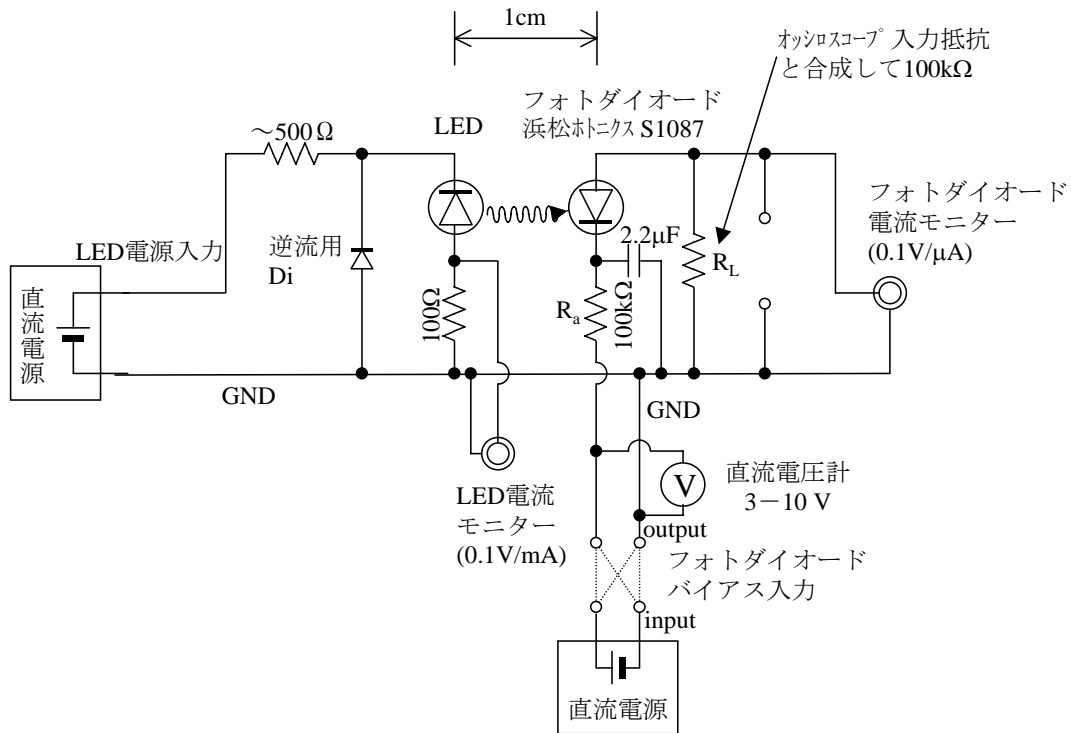


図 6 実験装置

4. 実験装置

使用器具

- フォトダイオード特性測定装置
- フォトダイオードバイアス切り替えスイッチ
- 0-15V 程度の直流電源
- 直流電圧計 (3-10V フルスケール)
- オシロスコープ (2 現象用)

今回の実験では、フォトダイオードへの光源として発光ダイオード（以下 LED と略す）を用いる。ここで照射光量の絶対計測は困難であるので、LED の順方向電流とフォトダイオード間の距離でもって光量を代表させるものとする。特性測定装置の回路図を図 6 に示す。

5. 実験

A. 静特性測定

目的：暗時および一定光量の照射時におけるフォトダイオードの静特性変化を求める。

測定：

- 1) フォトダイオード特性測定装置の LED 電流モニター端子、およびフォトダイオード電流モニター端子をオシロスコープの入力の CH-1 (または CH-A) および CH-2 (または CH-B) にそれぞれ接続する。オシロスコープのトリガーモードを Auto、トリガースロープを+、トリガースソースを CH-1、ディスプレイモードを chop または alt に設定する。

- 2) 直流電源の2つの出力端子を、それぞれLED電源入力端子、およびフォトダイオードバイアス電源入力端子に接続する。フォトダイオードバイアス電圧については、直流電源に順方向-逆方向切り替えスイッチ（図6ではフォトダイオードバイアス入力）を接続し、スイッチの出力端子をフォトダイオードバイアス電源入力端子および直流電圧計に接続すること。
- 3) 特性測定装置のふたを開け、LEDとフォトダイオードが約1cmの間隔で互いに向き合っていることを確認する。次にLED電源を+数Vにし、LEDが赤く点灯することを確認する。点灯していることを確認した上で、オシロスコープのCH-1入力選択SWをGNDとDCで切り替え、輝線が垂直方向に平行移動することを確認する。この実験ではCH-1の輝線の移動量からLED電流を測定する。LED電流1mAあたり0.1Vの電圧が発生している。
- 4) 特性測定装置のふたを閉じ、LED電流を2mA（オシロスコープ上では0.2V）に設定する。フォトダイオードバイアス電圧を-5Vから+1Vの間で変化させ、その都度オシロスコープのCH-2の輝線の移動量を測定する。逆方向バイアスについては、切り替えスイッチを逆方向側に設定し、直流電圧計の接続を順方向とは逆にする。CH-2の移動量に関しては、フォトダイオード電流1μAあたり0.1Vとなっている。これによりフォトダイオードバイアス電圧 V_{bias} に対するフォトダイオード電流 I_{pd} を測定する。実験回路図からも分かるように、実際のフォトダイオード印加電圧 V_{pd} は負荷抵抗 R_L および直列抵抗 R_a による電圧降下のため V_{bias} とは異なる。フォトダイオード電圧 V_{pd} は

$$V_{pd} = V_{bias} - I_{pd}(R_L + R_a)$$

により求めることができる。ここで $R_L + R_a = 200k\Omega$ である。先に測定した結果からフォトダイオード電圧 V_{pd} とフォトダイオード電流 I_{pd} の関係を求め、静特性をグラフ用紙に記入せよ。

- 5) LED電流を1mA、0mA（消灯）をした場合についても同様に静特性を測定せよ。

B. 開放端電圧、短絡電流の測定

目的：開放端電圧、短絡電流が入射光の強度にどのように依存するかを観察し、フォトダイオードの特性の理解を深める。

測定：

- 1) 静特性測定時と同じ配線にし、LED電流を2mA（オシロスコープ上では0.2V）に設定する。
- 2) フォトダイオードバイアス電圧を変化させ、フォトダイオード電流が0となるようにし、その時のバイアス電圧を求める。先の実験方法4)に示したようにフォトダイオード電圧 V_{pd} はバイアス電圧 V_{bias} とは異なるが、フォトダイオード電流が0の時には $V_{pd} = V_{bias}$ となる。これが開放端電圧である。
- 3) つぎに、フォトダイオードバイアス電圧を0とし、この時のフォトダイオード電流を読み取る。厳密には、この時の電流は短絡電流とは異なるが、逆方向バイアスでは電流がほとんど変化しないため、便宜上この電流を短絡電流とみなしても良い。
- 4) LED電流を0.2mAずつ減少させて、2)、3)の測定を繰り返せ。

6. 報告

- 1) LED 電流に対するフォトダイオード静特性の変化
- 2) LED 電流に対する開放端電圧の変化
- 3) LED 電流に対する短絡電流の変化

7. 考察

- 1) 静特性について特に等価回路との関連を考察せよ。
- 2) 開放端電圧、短絡電流の入射光強度依存性を、光電流発生メカニズムと関連づけて説明せよ。

2-3. トランジスタの静特性

1. 目的

接合型トランジスタの、共通エミッタ接続について静特性を測定し、トランジスタの基礎知識を得る。

2. 原理

トランジスタはその構造、製造方法、使用区分などによりいろいろに分類できるが、本実験ではSi pnp接合 2SA733、あるいはSi npn接合 2SC945を使用する。

1) 動作機構

トランジスタにはn型半導体の両側にp型半導体をはさみ、2つのpn接合面を有するもの(pnp型)と、その逆のnnp型がある。図1にpnp型トランジスタを示す。両側の領域をそれぞれエミッタ(Emitter)、コレクタ(Collector)といい、中間の領域をベース(Base)という。

トランジスタは3個の電極を有しているので、その1個を共通にし、残りの2個の電極を入力と出力として使用する。通常、ベースを共通にする“共通ベース接続”、コレクタを共通にする“共通コレクタ接続”、およびエミッタを共通にする“共通エミッタ接続”の3接続方法が実用に供せられている。しかしトランジスタ回路は通常共通エミッタ接続が多く用いられている。

2) 温度特性、コレクタ損失

トランジスタは比較的熱に敏感で、接合部の温度がある値以上に達すると、特性に永久変化を生じる。したがって許容できる周囲温度 T_a 、接合部温度 T_j が規定されている。最大接合部温度は使用時の周囲温度とコレクタ損失 P に依存する。規格表を見ると最大定格として許容しうる電圧、電流の最大値が規定されている。動作状態では、

$$P = V_{CE} \times I_C$$

の電力が消費され、これが熱になり、接合部温度を上昇させる。温度上昇が許容接合部温度を超えるとトランジスタは破壊されてしまう。このため消費電力の最大値を定めて、最大コレクタ損失 P_c と呼んでいる。 P_c は通常 25°C の場合をさすが、周囲温度が上昇すると P_c は小さくなる。例えば2SA733では 25°C の時、 $P_c=250\text{mW}$ であるが、 75°C では 125mW となる。

注： P_c は(最大)コレクタ(電力)損失、コレクタ消費電力、許容コレクタ損失ともいう。

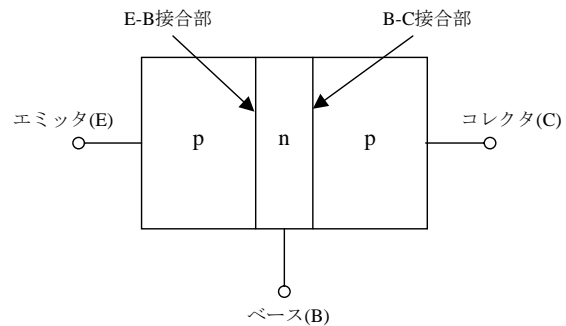


図1 pnp型トランジスタ

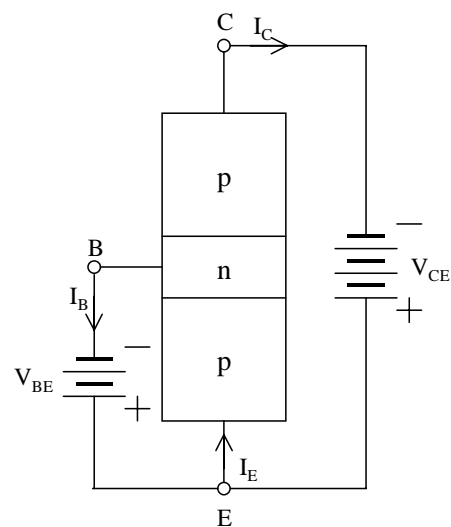


図2 共通エミッタ接続

3) コレクタ遮断電流 I_{CE0}

ベースを開放状態とし($I_B=0$)、エミッタ、コレクタに電圧を加えた場合に流れるコレクタ電流をいう。この値は数 μA 以下が普通であるが、温度とともに指数関数的に増加する。

4) 動作説明

図2は pnp 型トランジスタでの共通エミッタ接続の説明図である。まず V_{CE} の印加だけでは両側の p 領域の正孔はベース領域を越えることはできないので、電流はほとんど流れない。次に V_{BE} を印加すると順方向であるからエミッタ内の正孔は加速されてベース内に達する。この正孔の一部はベース内で電子と結合してベース電流 I_B となるが、ベース領域の不純物は微量で厚みは極めて薄いので、大部分の正孔はコレクタ内に入り V_{CE} の強い電界によってコレクタ電流 I_C となる。エミッタ電流を I_E とすると

$$I_E = I_C + I_B$$

の関係が成立する。さらに I_C と I_B の比を直流電流増幅率 h_{FE} と呼び、 $h_{FE}=I_C/I_B$ で表される。

5) 静特性

真空管の場合には、グリッドは普通負電圧で使用するのでグリッド電流は流れず、測定すべきものはプレート電流・電圧とグリッド電圧である。トランジスタの場合はいずれの接続でも入力電流が流れるので、測定すべき量は入力電圧および電流、出力電圧および電流の4種類である。

本実験では V_{CE} をパラメータにした $V_{BE}-I_B$ 特性(入力特性)、 I_B をパラメータにした $V_{CE}-I_C$ 特性(出力特性)について測定を行う。静特性は図3のように3つの象限に渡って描かれる。このうち第1象限には出力特性を、第3象限には入力特性を描くことになる。また第2象限には $V_{CE}-I_C$ 特性からの変換によって得られる I_B-I_C 特性を描くことができる。この曲線の傾きは h_{FE} を示している。

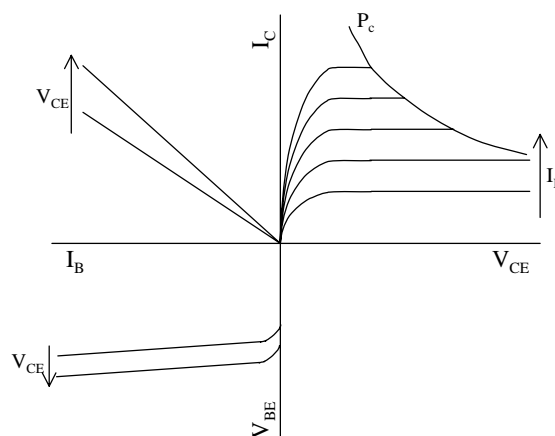


図3 静特性曲線 (低電圧領域)

3. 測定法

実験に用いる回路は図4の様になっており、既にパネルに組み込まれている。測定では pnp 型トランジスタの場合は2SA733、npn 型トランジスタの場合は2SC945を用いる。測定に必要な計器を結線すれば測定が行える。以下に測定の手続きを示す。ただし各電圧、電流については絶対値で示すので、pnp 型および npn 型について電流、電圧の符号は各自よく考えること。また P_c が規定されているので、それを越さないよう注意のこと。

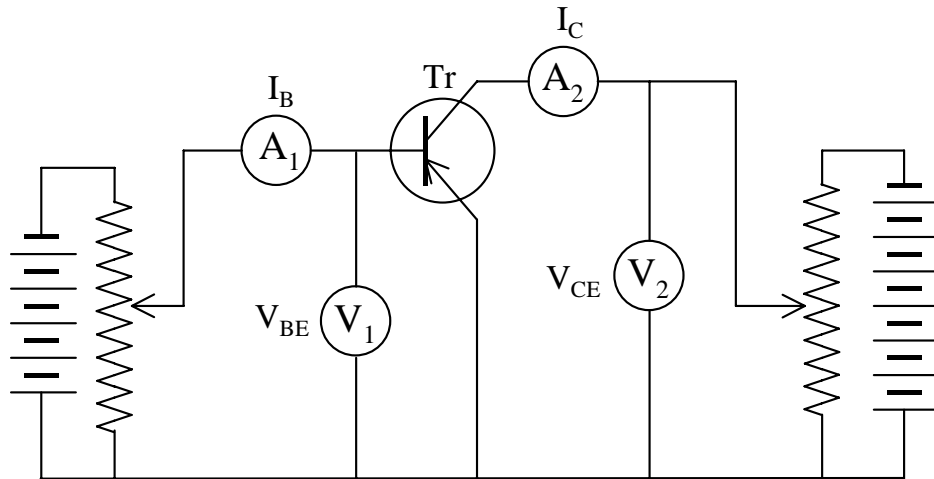


図4 実験回路図の例

A. V_{CE} - I_C 特性

- (1) 供試トランジスタの最大コレクタ損失 P_c をあらかじめ方眼紙に描いておく。
- (2) I_B は 0.24mA まで 0.04mA 間隔でそれぞれ一定とする。
- (3) V_{CE} を 1V までは 0.1V 間隔、以降 10V までは 1V 間隔で変化させ、その都度 I_C を測定する。この時電圧計 V_1 は接続しないこと。また I_C の最大値は 100mA とし、それを越さないようにすること。

B. I_B - V_{BE} 特性

- (1) V_{CE} は 0 、 1 、 5V でそれぞれ一定とする。
- (2) I_B を 0.02mA ずつ変化させ、 V_{BE} を測定する。ただし 0.02mA 以下は微細に変化させて測定を行う。この時 I_B の最大値は 0.24mA とし、それを越さないようにすること。

3. 報告

- (1) V_{CE} - I_C 特性曲線を描く。
- (2) I_B - V_{BE} 特性曲線を描く。
- (3) V_{CE} - I_C 特性曲線から I_B - I_C 特性曲線を描く。この時 V_{CE} は 0.2V 、 0.5V 、 1V 、 5V とせよ。

4. 考察

- (1) 供試トランジスタの直流電流増幅率について考察せよ。
- (2) I_B - V_{BE} 特性曲線について、 V_{CE} を変化させたときの特性曲線の移動について何故そうなるのか考察せよ。
- (3) V_{CE} - I_C 特性曲線について、何故このような形状となるかについて考察せよ。
- (4) I_B - I_C 特性曲線について、 V_{CE} を変化させるとどのように変化するかについて考察せよ。

付録

実験で用いるトランジスタの最大定格、電気的特性（周囲温度は 25°C）を以下に示す。

最大定格

項目	記号 (単位)	定格	
		npn 型 2SA733	npn 型 2SC945
コレクタ - エミッタ間電圧	V_{CE0} (V)	-50	60
コレクタ電流	I_C (mA)	-100	100
コレクタ損失	P_c (mW)	250	250
接合部温度	T_j (°C)	125	125

電気的特性

項目	記号	npn 型 2SA733		npn 型 2SC945	
		条件	定格	条件	定格
コレクタ遮断電流	I_{CB0}	$V_{CB}=-60V$ $I_E=0$	Max. $-0.1\mu A$	$V_{CB}=60V$ $I_E=0$	Max. 100nA
直流電流増幅率	h_{FE}	$V_{CE}=-6.0V$ $I_C=-1.0mA$	90-600 Typ. 200	$V_{CE}=6.0V$ $I_C=1.0mA$	90-600 Typ. 200
直流ベース電圧	V_{BE}	$V_{CE}=-6.0V$ $I_C=-1.0mA$	Max. $-0.68V$	$V_{CE}=6.0V$ $I_C=1.0mA$	Max. 0.65V

2-4. トランジスタ増幅回路の作製および特性測定

1. 目的

低周波増幅回路の理解を深めるために、増幅器の設計、製作および入・出力特性、周波数特性の測定を行う。

2. 低周波増幅回路

一般に、低周波増幅回路はラジオ受信機の検波信号やマイクロフォンからの音声信号といった低周波信号の増幅に用いられている。それらの目的においては、元の信号を正確に増幅する必要があるため、A級増幅回路が主に用いられている。トランジスタは主にエミッタ接地方式で使用される。その結果として、増幅回路の入力インピーダンスは低くなるので、設計に当たっては十分な注意が必要である。例えば、二段増幅回路においては、二段目の増幅回路の入力インピーダンスが一段目の増幅回路の負荷インピーダンスに並列に加わる。この点に注意した設計が必要である。入力インピーダンスを高める方法として、負帰還の手法がある。負帰還により高入力インピーダンス化を実現した例として、エミッタフォロワ回路が良く知られている。また、負帰還はトランジスタ特性のばらつき、温度変化などに対して、増幅回路を安定に動作させる有効な手法である。このように、負帰還はいくつかの利点を持つが、負帰還量に対応して回路の増幅利得は低下する。

3. 入力・出力特性

増幅回路は、入力信号に比例した出力信号を与える。しかし、入力信号が大きくなるとその線形性は崩れ、出力信号は入力信号に比例しなくなる。入力・出力特性の例を図1に示す。出力信号が入力信号にほぼ比例している範囲を、ダイナミックレンジと呼ぶ。

出力の飽和は、トランジスタの出力電圧が増加し、能動動作範囲を超えるために起こる。トランジスタの動作点の設定不良や電源電圧の不足がダイナミックレンジを狭くする。

4. 周波数特性

入力信号周波数に対する増幅利得の関係を、周波数特性と呼ぶ。増幅利得としては、ダイナミックレンジ内で求めた値が使われる。増幅利得があらゆる周波数に渡って一定値となることはない。増幅回路内の結合コンデンサの存在、配線間容量、トランジスタ自体の周波数特性などがその原因である。

必要とする周波数特性を持つ増幅回路を作ることができる。周波数特性を修正する方法は、CRネットワークによる方法と負帰還を利用する方法に大別される。それらの方法はトーンコントロール、イコライザ回路などに応用されている。

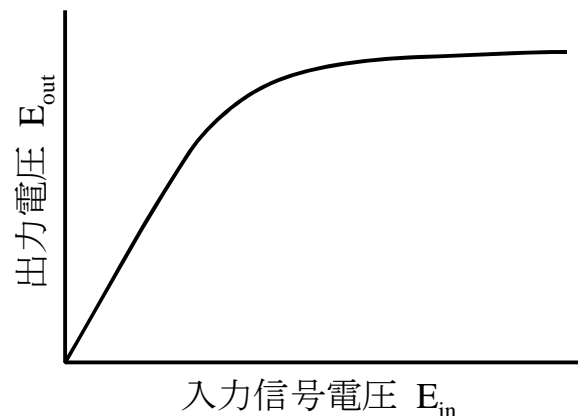
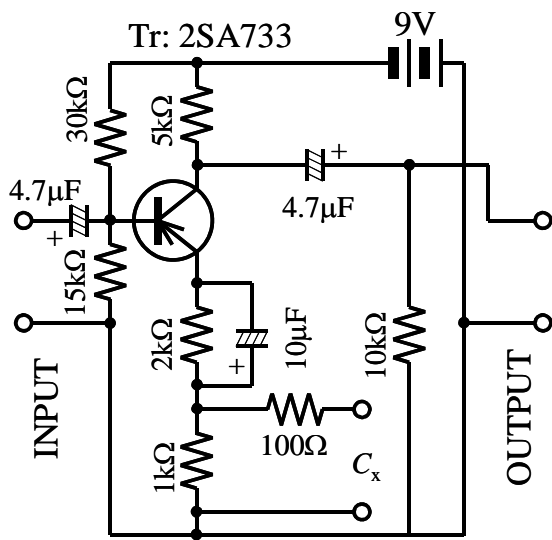
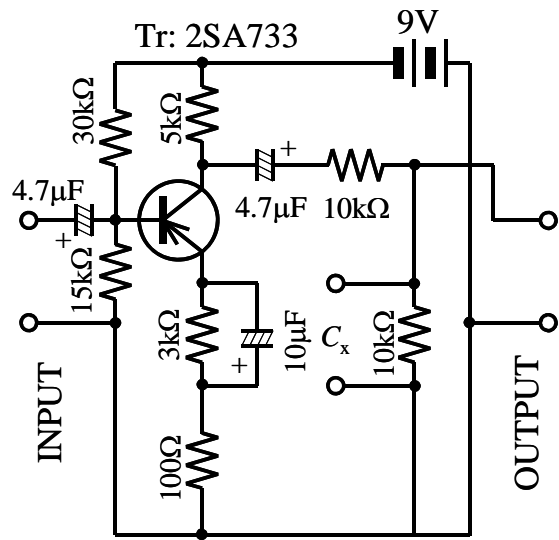


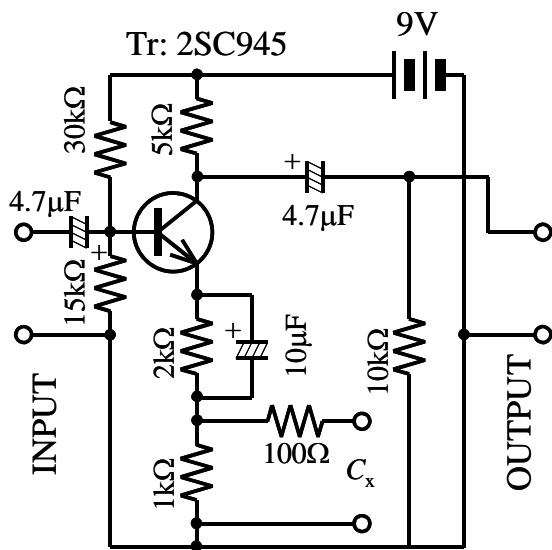
図1 入力・出力特性



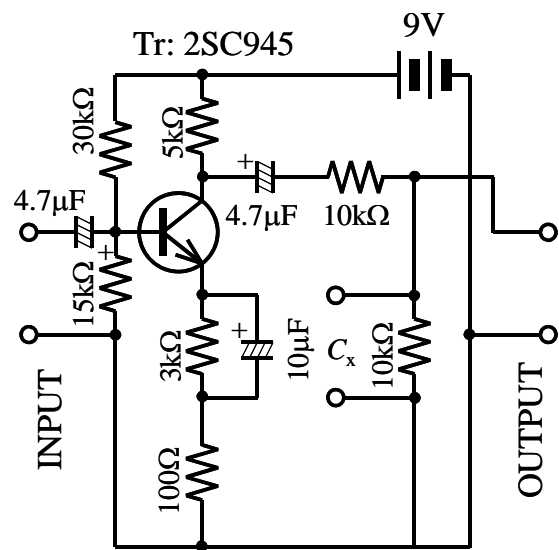
A-1



B-1



A-2



B-2

図2 Si トランジスタ一段増幅回路

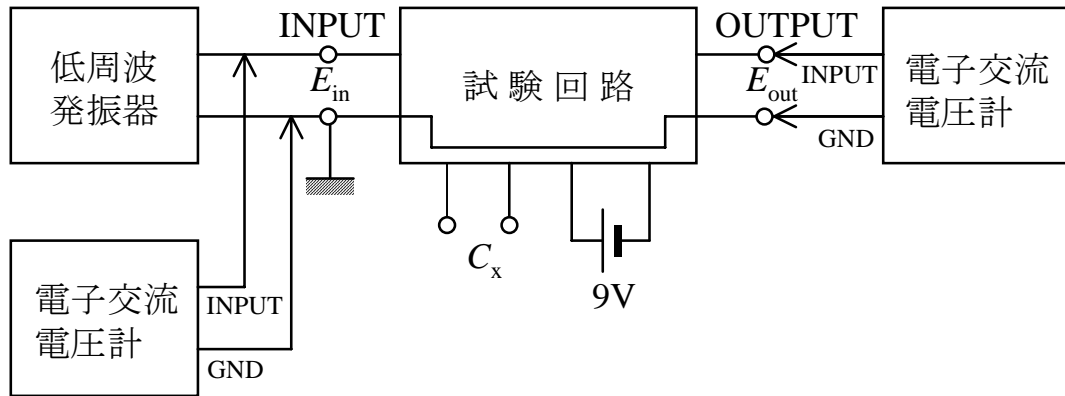


図3 測定装置

5. 実験方法

(1) 増幅回路の製作

Si トランジスタを用いた、一段増幅回路を各自ブレッドボード上に製作する。ブレッドボード内部の配線については「オペアンプ回路の製作および特性測定」に図があるので、それを参照のこと。作製する回路例を図2に示す。各班で重複のないように回路を選択し、製作する。また、独自に設計した回路を製作しても良い。製作に当たっての注意点としては

- ・ トランジスタのピン配置
- ・ 電解コンデンサの極性
- ・ ブレッドボード内の配線

などが挙げられる。また、配線の差込不足による接触不良も良く起こるので注意せよ。

- (a) まず直流動作点の確認を行う。直流動作ではコンデンサーは開放となるので、入力配線、出力配線および電解コンデンサを省いた回路を作製する。この回路について、トランジスタのコレクター-エミッタ間電圧 V_{CE} 、ベース-エミッタ間電圧 V_{BE} 、コレクタ電流 I_C の測定を行う（直流動作点の確認）。コレクタ電流については、コレクタに接続された $5k\Omega$ の抵抗の両端の電圧 V_L を測定し、その値からオームの法則により求めよ。各自が製作した回路について、測定した直流動作点と計算により求めた直流動作点（計算方法は付録参照）の比較を行い、作製した回路が正常動作をしているかどうかの判定を行う。
- (b) 入力配線、出力配線、電解コンデンサを取り付け、入力端子に低周波発振器を接続する。さらに、入力端子、出力端子をオシロスコープに接続し、入力電圧を変化させ、増幅特性の線形領域および飽和領域における入力波形・出力波形を観察せよ。入力信号の周波数は $10kHz$ とせよ。

(2) 特性測定

特性測定に必要な装置の概略を図3に示す。

A. 入力・出力特性

正弦波電圧を入力として測定回路に加え、出力電圧を測定する。そのとき、入力電圧は $0\sim 500mV$ の範囲で変化させる。また、周波数 f と外部負荷コンデンサ C_x の値は次のようにする。

回路 A-1 および A-2 : $C_x = \text{無接続}, 0.5\mu F, f = 300Hz, 10kHz$

回路 B-1 および B-2 : C_x =無接続、 $0.02\mu\text{F}$ 、 $f=300\text{Hz}$ 、 10kHz
 以上の各 4 通りの組み合わせについて測定を行う。

B. 周波数特性

発振器の周波数を変えながら、入力電圧と出力電圧を測定する。その時、入力電圧は 50mV 一定とし、周波数は $20\text{Hz}\sim 200\text{kHz}$ の範囲で変化させる。この結果をグラフにする時は、周波数軸は対数とするので、周波数をどのように設定するかを良く考えること。 C_x の値は次の通りとする。

回路 A-1 および A-2 : C_x =無接続、 $0.1\mu\text{F}$ 、 $0.5\mu\text{F}$

回路 B-1 および B-2 : C_x =無接続、 5000pF 、 $0.02\mu\text{F}$

6. 報告

- (1) 無入力時における各部の電圧
- (2) 直流動作点の計算結果
- (3) 線形領域、飽和領域での入力・出力波形
- (4) 入力・出力特性を示すグラフ
- (5) 周波数特性を示すグラフ (縦軸は増幅利得 $A(\text{dB})=20\log(E_{\text{out}}/E_{\text{in}})$ とせよ。両対数グラフ用紙を用いると、増幅利得を計算する必要はない。)

付録：直流動作点の計算方法

図 4 に示すトランジスタ増幅回路を考える。ここでは、直流動作点を簡単に計算するため、ベース電流 I_B は 0 であると仮定する。これは電流増幅率 h_{FE} (または β) を無限大と仮定したことに等しい。実際のトランジスタの増幅率は無限大ではないが、ここではこの仮定による近似的な計算で十分である。この仮定のもとでは、コレクタ電流 I_C とエミッタ電流 I_E は等しくなる。

いま、ベース電位については、2 通りの表し方ができる。一つは、2 つの抵抗 R_A 、 R_B により電源電圧 V_{CC} が分圧されていると考えた場合、もう一つは、エミッタ電流 (= コレクタ電流) によって R_E の両端に現れる電圧とベース-エミッタ間電圧 V_{BE} の和を考えた場合である。もちろんこれらの 2 つは等しいので

$$\frac{R_B}{R_A + R_B} V_{CC} = V_{BE} + I_C R_E$$

となる。一般に、Si トランジスタではベース-エミッタ間電圧 V_{BE} は $0.6\sim 0.7\text{V}$ であるので、この値を用いると上式からコレクタ電流 I_C を求めることができる。

次に、電源電圧 V_{CC} をコレクタ電流 I_C によって R_L の両端に現れる電圧、エミッタ電流 (= コレクタ電流) によって R_E の両端に現れる電圧、およびコレクタ-エミッタ間電圧 V_{CE} の和として表すと

$$V_{CC} = I_C (R_L + R_E) + V_{CE}$$

となる。先に求めたコレクタ電流 I_C を用いればコレクタ-エミッタ間電圧 V_{CE} を求めることができる。

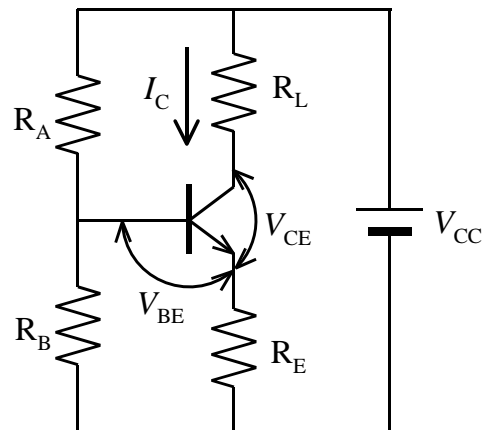


図 4 トランジスタ増幅回路

2-5. 超音波による波動計測実験

1. 目的

超音波を用いて波動の基本特性の測定を行い、波動に関する理解を深めることを目的とする。

2. 原理

一般に人間の耳に聞こえる周波数は、おおよそ 30Hz~20kHz 程度といわれており、これを可聴周波という。これより高い周波数の音波、つまり人間の聴覚器官では捉えられない周波数の高い音波のことを超音波という。これが狭義での超音波の定義である。しかし、広義には、「人間の耳で直接聞くことを目的としない音波」のことを超音波と捉えて差し支えない。つまり、20kHz 以下の音波でも、それが直接聞くことを目的としないものならば、超音波ということになる。

超音波は音波の一種なので、音波の性質をそのまま持っている。以下に音波の性質をいくつか挙げる。

(1) 伝搬には振動が伝わる物質が必要

音波は、物体の振動の伝搬である。したがって、振動する物体が何ものなければ音波は伝搬しない。耳で音が聞こえるということは、空気が振動しており、それを聴覚器官で捉えているということである。

(2) 物質と波の形

物質には気体・液体・固体があり、その状態によって存在する音波が異なる。気体・液体では縦波（伝搬方向と振動方向が同一）のみであるが、固体では縦波と横波（伝搬方向と振動方向が直角）さらにはねじり波や表面波なども存在する。

(3) 物質と伝搬速度

音波は電波や光にくらべてその伝搬速度は著しく遅く、さらにその物質の状態や湿度、圧力などによっても変化する。例えば、空気中の音の伝搬速度 v は温度 $t(^{\circ}\text{C})$ に依存し、

$$v=331.5+0.6t \text{ (m/s)}$$

で与えられる。水中では約 1530m/s、鉄では約 5000m/s となる。また、音波は気体中では減衰しやすく、液体や固体では効率よく伝搬できる。

空気中を伝播する超音波は縦波なので、図 1(a)に示すように空気の密度が疎な場所と密な場所が存在する。このとき媒質の変位を縦軸として図示すると、電磁波・光などの横波と同様に図 1(b)に示すような正弦波で表現することができる。したがって超音波の波長 λ が定義できる。一方、ある場所とともに変位がどのように変化するかを図示すれば、図 2に示すようにやはり正弦波で表わすことができ、これより周期 T が求めら

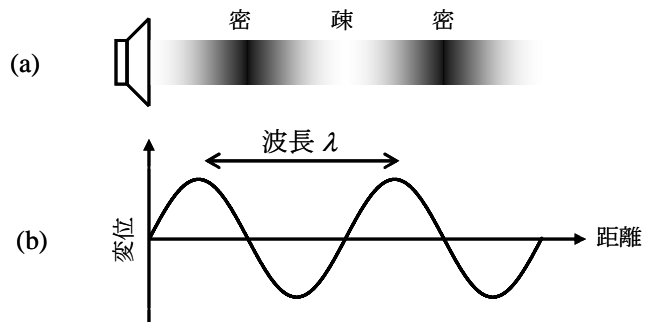


図 1 (a) 送信器からの疎密波
(b) 縦波の図示

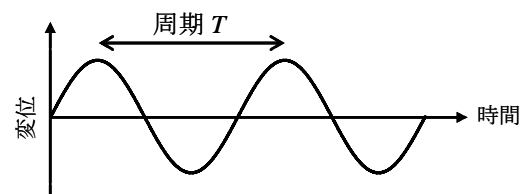


図 2 ある場所での変位の時間変化

れる。超音波の振動数（周波数） f は $f=1/T$ で与えられる。また超音波の伝播速度を v とすると、 $v=f\lambda=\lambda/T$ なる関係式が成立する。

実験では超音波送信器として村田製作所製 MA40S4S、超音波受信器として村田製作所製 MA40S4R を用いる。これらは圧電セラミックスでできている。送信器では圧電セラミックの両端に高周波電圧を印加するとセラミックに歪が生じ、超音波が発生する。このとき圧電セラミックの機械的な特性により、ある周波数で効率的に超音波が発生する。この周波数を共振周波数という。図 3 に MA40S4S の共振特性を示す。この素子では共振周波数が約 40kHz であることが分かる。受信器では空気の変位によってセラミックに歪が生じ、この時に発生する電圧を信号として取り出している。送信器・受信器のいずれも指向特性を有している。図 4 に受信器である MA40S4R の指向特性を示す。受信面と垂直な方向で感度が高く、角度が大きくなるにつれて感度が減少していることがわかる。

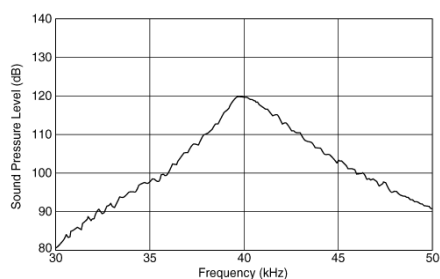


図 3 MA40S4S の共振特性

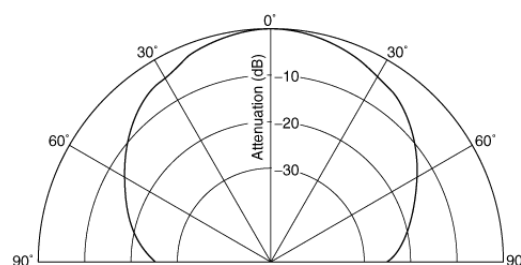


図 4 MA40S4R の指向特性

3. 実験

実験では超音波送信器 1 個、超音波受信器 2 個を用いる。実験装置の概略を図 5 に示す。送信器はレールの端にあるホルダーに取り付けられている。送信器のケーブルを発振器に接続する。さらに周波数カウンターも発振器に接続する。発振周波数は 40kHz 前後とする。つぎに、受信器をレール上の微調整ステージのホルダーに取り付ける。微調整ステージの読みを 10 にしておく。微調整ステージに取り付けた受信器のケーブルをオシロスコープの CH1 に接続する。このときトリガーソースは CH1 とせよ。



図 5 実験装置

① 超音波送受信器の周波数特性の測定

- (1) 送信器と微調整ステージ上の受信器を約 20cm の間隔でほぼ向かい合わせる。
- (2) オシロスコープの MODE を CH1 に設定し、受信波形を観察する。
- (3) 発振器の発振周波数を変化させながら、受信信号の周期と振幅を読み取る。発振周波数は 35kHz から 45kHz の間で変化させよ。変化させる周波数間隔は周波数特性がわかるように工夫せよ。
- (4) 受信信号の振幅が最大となる周波数（共振周波数）を求めよ。

② 超音波受信器の指向特性の測定

- (1) 送信器の発振周波数を①で測定した共振周波数に設定する。
- (2) 微調整ステージ上の受信器を回転させ、5 度おきに振幅の測定を行い、指向特性の測定を行う。

③ 超音波の減衰特性の測定

- (1) 送信器の発振周波数を①で測定した共振周波数に設定し、受信器を②で測定した振幅が最大になる角度に設定する。
- (2) 微調整ステージ全体を送信器ステージに極力近づけ、オシロスコープで受信信号の振幅を読み取る。
- (3) 微調整ステージ全体を 5cm ずつ後ろに移動させながら振幅を読みとる。

④ 超音波の波長と音速の測定

- (1) もう一つの受信器をレール上にない固定ホルダーに取り付け、ケーブルをオシロスコープの CH2 に接続する。
- (2) このホルダーをレールのそばの適当な位置におき、送信器のほうに向ける。これ以降この固定ホルダーの位置は絶対に変えないこと。
- (3) 送信器の発振周波数を①で測定した共振周波数に設定し、微調整ステージ上の受信器を②で測定した振幅が最大になる角度に設定する。
- (4) オシロスコープの MODE を ALT にし、トリガースソースを CH2 に設定する。
- (5) 微調整ステージを移動させ、2つの受信器からの信号がどのように移動するかを観察する。
- (6) 微調整ステージを 0 にあわせた後、CH1 と CH2 の信号の位相がほぼ一致するように微調整ステージ全体を動かす。さらに微調整ステージのつまみを回して 2つの波形の位相を完全に一致させる。このときの微調整ステージの位置を主尺と副尺から読み取り記録する。
- (7) 微調整ステージのつまみを回しながら 2つの波形の位相差が π （半周期のずれ）、 2π （1周期のずれ）、 3π （1.5周期のずれ）、・・・となる時の微調整ステージの位置を記録する。
- (8) (6)、(7) の測定を数回繰り返す。
- (9) 横軸を位相差、縦軸を微調整ステージの読みとして方眼紙にすべての測定結果をプロットし近似直線を引く。このとき最小二乗法をもちいると正確な近似式が得られる。
- (10) 近似直線の傾きから超音波の波長を求めよ。具体的には位相差が 2π となるのに必要なステージの移動量を求めれば良い。

4. 考察

- (1) ①で測定した共振特性について図 3 に示した特性との比較をせよ。
- (2) ②で測定した指向性について図 4 に示した特性との比較をせよ。
- (3) ③で測定した減衰特性について考察せよ。いま、測定した振幅を A 、送信器から受信器までの距離を R としたとき、振幅 A が距離 R に対して

$$A=R^{-n}$$

にしたがって減衰すると仮定する。両辺の対数をとると

$$\log_{10}A=-n\times\log_{10}R$$

となる。そこで、振幅 A と距離 R の関係を両対数グラフにプロットし、その傾きから n を求めよ。また求めた n の値が意味するところについて考察せよ。

- (4) 超音波の波長と共振周波数から音速を求め、室温から計算される音速と比較せよ。
- (5) ④の実験で、微調整ステージを動かしたときの 2 つの受信器からの波形の移動について考察せよ。