

令和 4 年度 学生実験 B レポート

実験題目：B-2 光ファイバ

学籍番号： B9TB2025 氏 名：伊藤裕太

電気工学 コース A 班 提出日：

共同実験者名：安部 南欧斗, 石川 瑞基, 淡路 怜

チェックリスト（チェックした項目の□を☑に変えながら，確認すること）

書 式

- ☐ グラフ，プログラムリスト，表，写真以外の部分は丁寧に書かれているか。
- ☐ 実験計画書，目的，概要(原理・方法)，結果，考察，まとめ，参考文献の順にまとめているか。
- ☐ 実験指針を丸写しせず，自分の言葉も含めてまとめているか。
- ☐ 実験結果，および考察（検討）は過去形で記してあるか。また，普遍的な内容は現在形で記してあるか。
- ☐ 実験指針に記載されている考察の項目にすべて回答しているか。
- ☐ 引用箇所を明示し，参考文献リストと対応づけているか。
- ☐ 参考文献リストは，以下のフォーマットで記してあるか。
 - 論文誌などを引用する場合：
[1] 著者名，"標題，" 雑誌名，巻，号，pp.を付けて始め－終りのページ，月年。
 - 著書，編書を引用する場合：
[2] 著者名，書名，編者名，発行所，発行年。
 - 著書の一部を引用する場合：
[3] 著者名，"標題，" 書名，編者名，章番号または pp.を付けて始め－終りのページ，発行所，発行年。

図・表

- ☐ グラフには横軸，縦軸のラベル（変数名と単位）を記しているか。
- ☐ 横向きのグラフがある場合，グラフの上側が綴じしろ側になるように描いているか。
- ☐ 図や表には，図 1，表 1 のような番号づけをしているか。
- ☐ 「単位」が正しく SI 単位系で記載されているか。
- ☐ 図の説明文は図の下側に，表の説明文は表の上側に記しているか。
- ☐ グラフの表現方法は適切か（不適切な曲線補間をしていないか，グラフと記録条件の対応がわかるようにしてあるか等）。
- ☐ 本文で図や表について説明をしているか。

電気・通信・電子・情報工学実験 B 報告書

題目 B - 3 直流回転機

実験日 令和 年 月 日

報告書提出日 令和 年 月 日

東北大学 工学部 電気情報物理工学科
電気工学コース A 班

報告者 伊藤裕太(学籍番号 B9TB2025)

共同実験者 安部 南欧斗

石川 瑞基

淡路 怜

実験の目的

光通信や光計測，レーザー光などを利用した産業や医療応用においては，光源からの光を決まった光路に沿って目的の領域に導く必要がある．そのための伝送路の代表的なものが光ファイバである．光ファイバの伝送原理や伝送特性をファイバの開口数の測定や伝送損失の測定を通して学ぶとともに，伝送モードの概念についても学ぶ．

※参考文献は原則として書籍または論文を引用する．Wikipedia や企業ホームページの URL などは参考文献として認められない．

<チェック項目>

□背景と目的が文献を引用して紹介されている．

□実験の内容（何を調べたか）について述べられている．

□文献番号が正しく記載されている．

1. 原理

1. 伝送原理とモード

一般的なステップインデックス型と呼ばれる光ファイバでは，光が閉じ込められる領域をコア，その周囲の領域をクラディング領域と呼ぶ．通常の通信用石英ガラス光ファイバではコアの直径は $7 - 10\mu\text{m}$ ，クラッドは $125\mu\text{m}$ である．コア，クラディングともに石英ガラスで構成されるが，コアの部分にドーパントと呼ばれるゲルマニウムなどの不純物を添加することにより屈折率を上昇させる．

コアの屈折率を n_1 ，クラッドの屈折率を n_2 とすると，コア・クラッド境界面における全反射臨界角は

$$\varphi_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

で与えられる．

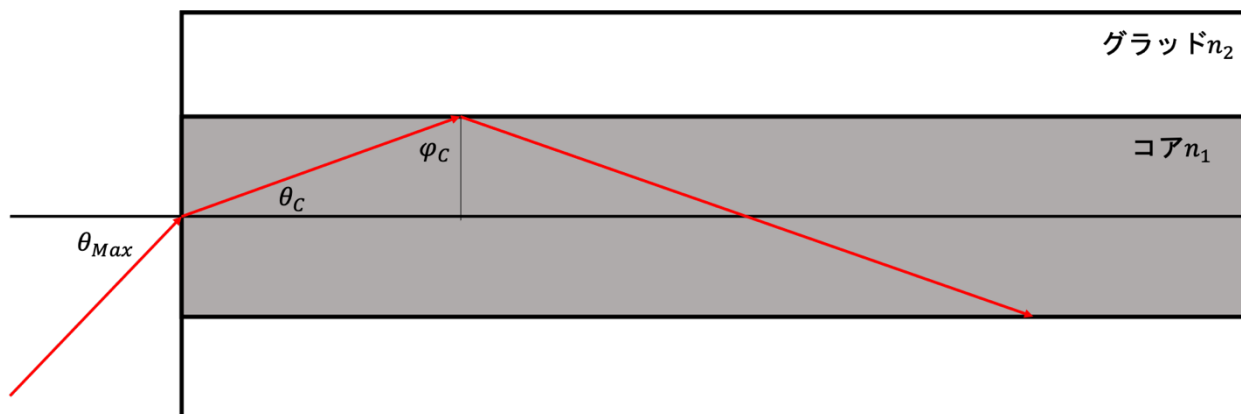


図 1 光ファイバ端面への光の挿入

ここで、図 1 に示すようにファイバの入射端へ $\theta \leq \theta_{Max}$ の角度で入射した光はコアとグラッドの界面で全反射され、コア内を伝播する。この角度 θ はファイバの重要なパラメータの一つであり、

$$\sin \theta_{Max} = n_1 \sin \theta_c = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2)$$

この $\sin \theta_{Max}$ を開口数と呼ぶ。 $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ で定義される比屈折率差を用いると、通常コア・グラッドの屈折率差は極めて小さな値を取るため、(2)式は

$$\sin \theta_{Max} = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (3)$$

と表される。なお、角度 θ_{Max} 以下で入射したすべての光がコア内を伝播するわけではなく、ある条件を満たすとびとびの特定の角度を持つ光のみが伝播する。これを伝播モードと呼ぶ。

伝搬モードが生じる原因は、光の波長の数倍から 10 倍程度と小さいサイズのコアに光が閉じ込められるためであり、このような狭い空間を伝わる光は、空気中のような境界のない空間を伝わる平面波とは異なる特徴的な振る舞いをする。光の進行方向に垂直な方向についてみれば、光はクラディングにはわずかにしかしみ出さないために、コア・クラッド境界面でのその界はほぼ 0 となる。弦の振動に類推して考えれば、この境界面が固定担であり、径方向に定在波が生じるモードのみが安定して存在しえる。このような状態をで生じるものを伝搬モードという。

幾何光学的にモードの成立条件を考えてみる。最も単純な構造の導波路である、平板でサンドイッチ構造を形成したスラブ導波路と呼ばれるもののコア中を光線が伝播する様子を図 2 に示す。

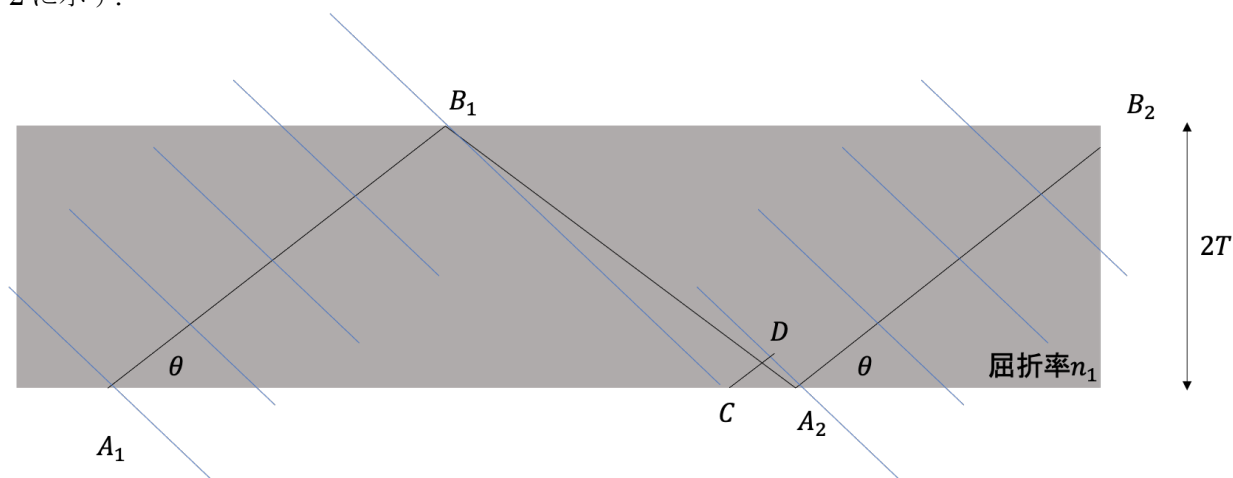


図 2 スラブ導波路中を伝播する光線

光線が屈折率が n である物質中を距離 s だけ進んだ際に生じる位相変化は、真空中の波数 $k_0 (= \frac{2\pi}{\lambda})$ を用いれば、 nk_0s で与えられる。そこで、図 2 にあるように厚さ $2T$ のコア中を経路 $A_1 \rightarrow$

$B_1 \rightarrow A_2 \rightarrow B_2$ に沿って角度 θ で伝播する光において、 $A_1 \rightarrow B_1$ と伝播する光と、 $A_2 \rightarrow B_2$ と進む光の破面が揃うためには、 $A_1 \rightarrow B_1$ と $C \rightarrow D$ との距離差から生じる位相差 ϕ

$$\phi = n_1 k_0 \left[\frac{2T}{\sin \theta} - \left(\frac{2T}{\tan \theta} - 2T \tan \theta \right) \cos \theta \right] \quad (4)$$

と、 B_1 と A_2 において全反射の際に生じる位相差 2δ との和が

$$\phi + 2\delta = 4n_1 k_0 T \sin \theta + 2\delta = 2m\pi \quad (m: \text{整数}) \quad (5)$$

である必要がある。この式を満たす角度 θ はとびとびの値を取ることがわかり、この条件下においてコアの厚さ方向に定在波が生じる。

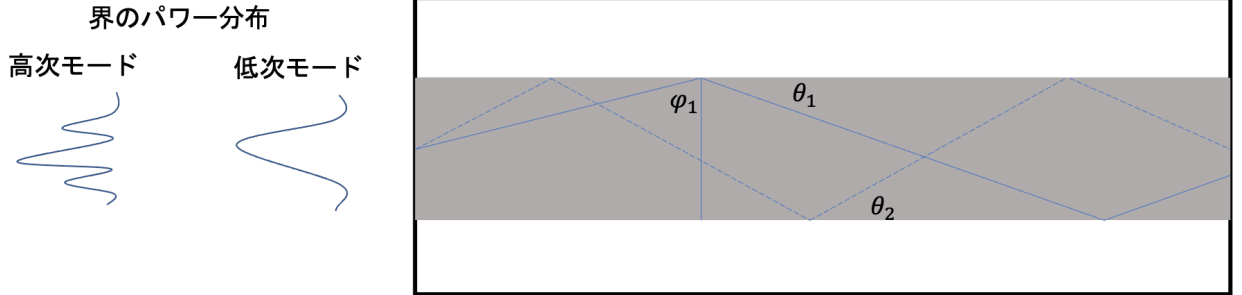


図3 各モードの界分布と伝播角

図3に示すように伝播角 θ が小さい、つまりコア・クラッド界面への入射角 ϕ が大きいものの低次モード、伝播角が大きく、入射角 ϕ が小さいものを高次モードと呼ぶ。モードが工事になるにつれ、入射角が小さくなり全反射臨界角 θ_c を超えるとクラディングに放射されてしまい、コア中を伝播することができなくなる。これをモードの遮断と呼ぶ。ファイバのコア中に存在しえる伝播モードの数は、コアの半径を T とすれば、

$$v = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} k_0 T = \frac{2\pi T}{\lambda} n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (6)$$

で与えられる規格化周波数と呼ばれるパラメータによって決定づけられ、 $v < 2.405$ の時は最低次モードのみが伝播する。このようなファイバを単一モードファイバと呼ぶ。つまり、コア径を細く、屈折率差を小さくすることにより単一モードファイバを構成することができる。一方、 $v \geq 2.405$ となるファイバには複数の伝播モードが存在し、このようなファイバを多モードファイバと呼ぶ。

2. 光ファイバの伝送特性

光ファイバはその用途や使用波長によって、ファイバを構成する材質が異なるが、光通信に使用されるもので最も代表的なものは石英ガラスファイバである。石英ガラスは耐熱性に極めて優れる上、機械的強度も高く、波長300~2000nm程度の紫外から赤外の広い波長域において高い透過性を持っていることが長距離通信に用いられる光ファイバの材料として使われる理由である。石英ガラスファイバは SiO_2 の一部が GeO_2 に容易に置き換わる。 Ge の他にも屈折率を上昇させるものとしてはホウ素がある。また、屈折率を低下させるものとしてはフッ素があり、これをクラッド部に添加する事で純粋石英ガラスをコアとするファイバが構成され、添加物の吸収損失が生じない超低損失ファイバを実現することが可能であり、理論的な固有損失は0.2dB/km程度とされる。

光通信に用いられる波長1.3~1.5 μm の近赤外や可視波長域における石英ガラスファイバの伝送損失の主な原因はガラス内での光の散乱と吸収であり、そのうち散乱をもたらす要因としてはレイリー散乱が挙げられる。レイリー散乱とは光の波長よりも小さな粒子による産卵のことで、散乱強度は光の波長の4乗に反比例する。バルク状の石英ガラスではレイリー散乱は小さいが、ガラスファイバの製造工程では、2000℃程度の液状ガラスを室温程度に急速に冷却して固化するために、分子密度に揺らぎが生じこれがレイリー散乱の原因となる。これは製法上避けることのできない光ファイバ固有の光損失要因である。レイリー散乱の他にもファイバに大きなパワーの光を入射した場合には、非線形現象である、ブルリアン散乱やラマン散乱などが問題となることもある。

一方、吸収損失とは光ファイバの中を伝わる光が吸収されて熱に変換されることによる損失で、ガラス固有の吸収によるものと、ガラス内に含まれる不純物によるものとがある。石

英ガラスの吸収損失には赤外吸収と紫外吸収とがあり、紫外吸収は電子遷移によるもので吸収端は 160nm 付近に存在し、赤外吸収は Si-O 結合の振動吸収によるもので、波長 $9\mu\text{m}$ 付近にピークを持つ。

不純物による吸収損失としては、光ファイバ開発が開始された当初は遷移金属イオンによるものが主だったが、開発が進むにつれこれらの問題は解決され、ガラス内に残存する OH 基が主なものとなった。短波長側ではレイリー散乱によって、長波長側では赤外吸収によって損失が増加し、波長 $1.55\mu\text{m}$ 付近で最も低損失となる。そのため、現在の光通信では主にこの波長が使用される。

<チェック項目>

□原理が簡潔に説明されている。

2. 実験の方法

2.1. 開口数の測定

- (1) 図 4 の装置を用いて、アクリル棒の端面に緑色レーザダイオード光(波長 532nm)を入射して、全反射しながら光が伝播する様子を観察した。

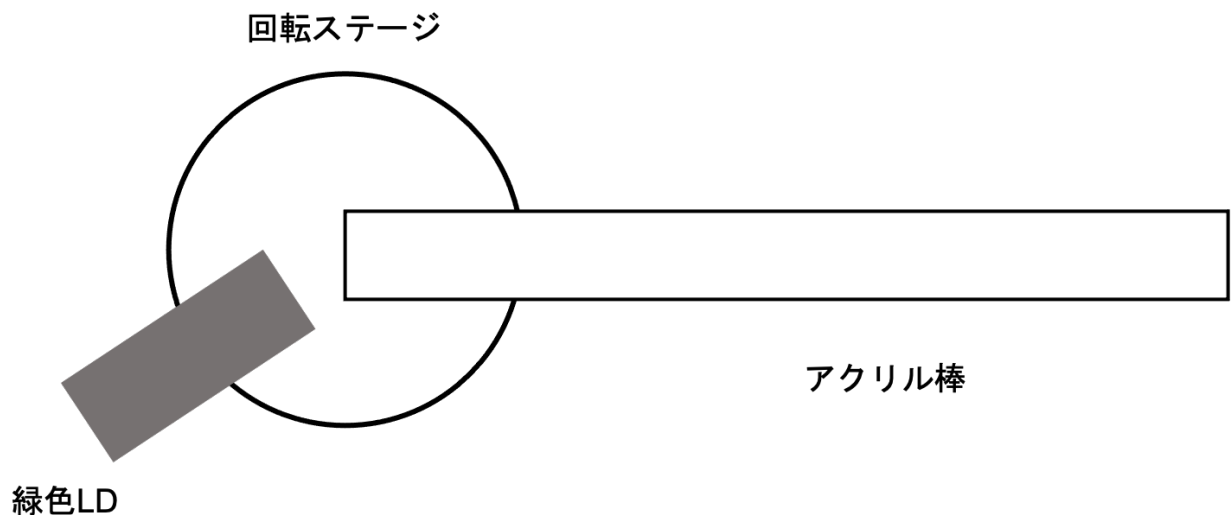


図 4 実験装置

- (2) 入射角度を増大させ、全反射が生じなくなる角度を求め、開口数を算出するとともにアクリルの屈折率を計算した。
- (3) 図 5 の装置を用いて、レーザ光の入射角を変化させながら、ファイバ(マルチモードファイバ、コア径 $80\mu\text{m}$)からの光出力を測定した。入射角 0° の場合に対して、光出力が 10%となる入射角から開口数を計算し、比屈折率を計算した。

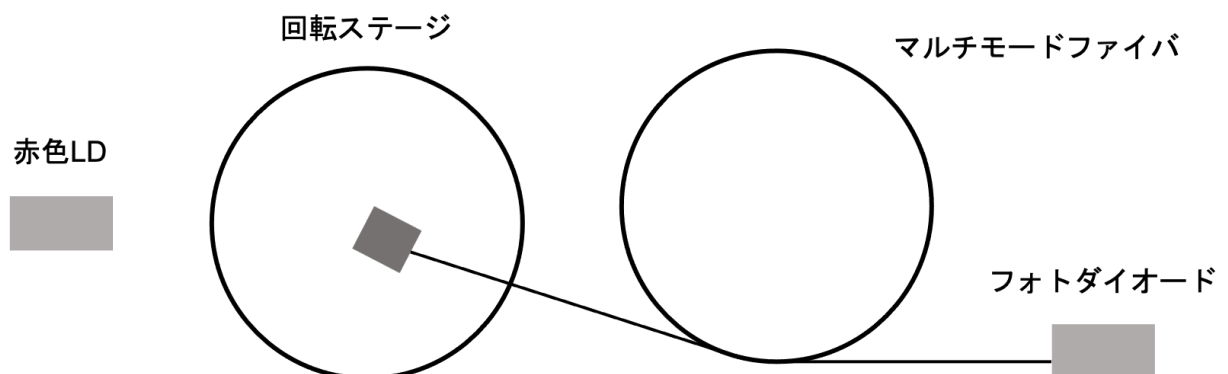


図 5 実験装置

2.2. 損失波長特性とカットオフ波長測定

- (1) 図 6 に示すように、白色光源からの光をシングルモードファイバ(コア径 $10\mu\text{m}$)に入射し、ファイバ透過光の波長特性を光スペクトラムアナライザで測定した。まずは 1m 程度のものについて測定したものを参照スペクトルとし、長さ 30km ほどの長尺ファイバの伝送損失を $[\text{dB}/\text{km}]$ の単位で測定した。

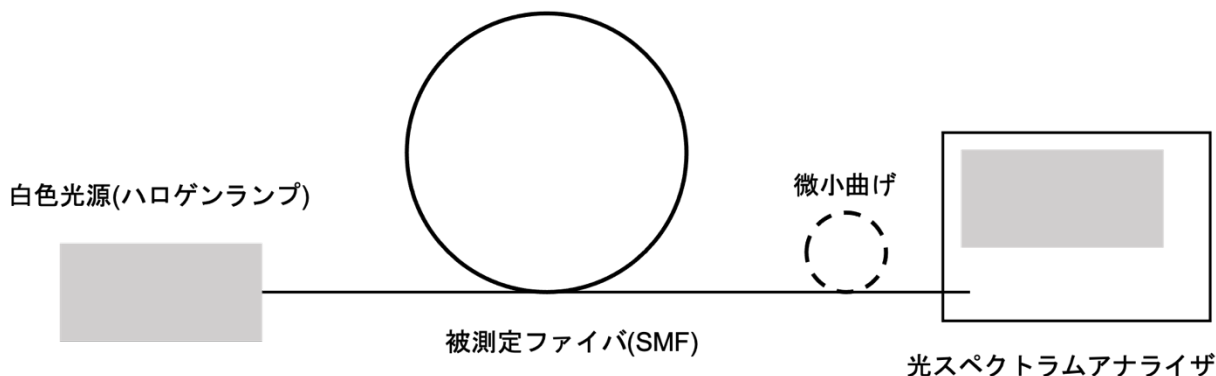


図 6 実験装置

- (2) 図 6 の装置を用いて、まずシングルモードファイバ(長さ 2m 程度、コア径 $10\mu\text{m}$)の透過光を測定した。これを参照スペクトルとして、ファイバを直径 3cm 程度で数回ループさせた状態でファイバの伝送損失スペクトルを測定した。

※「方法」は結果が正しく測定されたことを証明するためのものであり、第三者が再試験するためのマニュアルではないことに注意が必要である。

必要な情報の例：回路に印加する電圧や周波数、計測プローブの位置、試料のサイズ、など

不要な情報の例：どのスイッチを押したか、オシロスコープのメーカー、装置特有の癖、など

※図の使用は著作権に留意すべきであって、指針書や文献からのコピーは禁止である。

<チェック項目>

□実験系が図示されている。

□実験の手順や条件などの必要な情報が簡潔に記載されている。

□図表にそれぞれ通し番号がふられ、キャプションが記載されている。

□図は自作されている。

3. 実験結果

実験結果は表やグラフを用いて整理する。さらに、データに関する事実（何を表しているか、どのような条件で測定されたものか等）に加え、データの特徴や注目すべき点について文章で説明する。実験結果、および考察の文章は過去形で記す。一方、普遍的な内容は現在形で記す。

3.1. グラフに関する注意点

グラフは軸の名称、単位を明記する。

十分に視認可能なサイズのフォントを使用すること。（推奨：英数 Arial）

横向きのグラフは、グラフの上側が綴じしろ側になるように注意する。

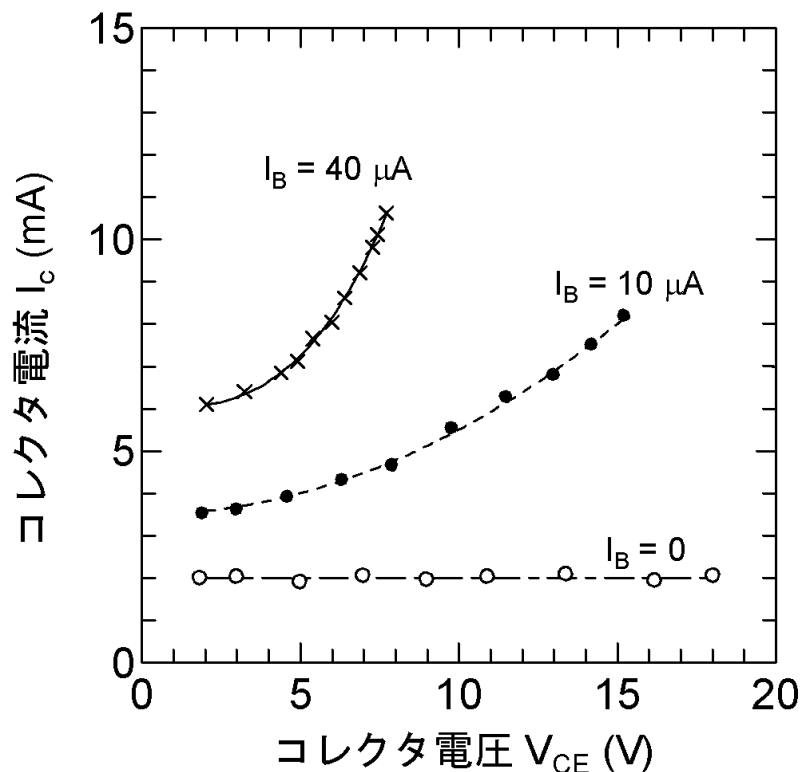


図 2：エミッタ接地回路のコレクタ電流 I_C －コレクタ電圧 V_{CE} 特性の測定結果。

Ge トランジスタ pnp 2SB-77. ○ : $I_B=0$, ● : $I_B=10 \mu A$, × : $I_B = 40 \mu A$.

3.2. 数式について

数式エディタを用いて作成する．式にはレポート全体を通して式番号を振る．

$$\boxed{E = mc^2} \quad E = mc^2 \quad (1)$$

※レポートにはデータをまとめた図表を記載し、図表に用いた生データの記載は不要である．（生データ（数値）は実験ノートに残しておく．）

※数値を記載する場合は有効桁数に留意する．

※測定値はマーカー（×や●）でプロットし、近似曲線を引く、必要であればエラーバーを加える．近似曲線の引き方はケースバイケースである．物理的に意味のある関数曲線（比例、指数関数など）に乘ることを示したい場合には関数曲線で近似する．

<チェック項目>

□実験結果は表やグラフに整理されている（生データをそのまま掲載していない）．

□各図表についてデータの特徴や注目すべき点について文章で説明されている．

□有効桁数が留意されている．

□グラフが正しく記載されている．

□数式に式番号が振られている．

4. 考察

指針書に記載されている全ての考察事項について実験結果から考察を行う．指針の範囲を超えた考察は加点の対象となる．

<チェック項目>

□指針書に記載されている考察事項について正しく考察されている．

5. 結論

この実験が、何を目的として、どのような方法で、どのような結論を得たかについて、簡潔にま

とめる（実験の感想や豊富などを述べるものではない。）。

<チェック項目>

□実験の目的・方法・結論について簡潔にまとめられている。

<参考文献>（MS ゴシック 10.5pt）

- [1] 教科書を参考文献とする場合の書式
著者：書物名，頁（単ページの場合 p.OO，複数ページの場合 pp.OO-OO），出版社（年）.
- [2] 論文誌を参考文献とする場合の書式
著者：“論文題目”，雑誌名，巻(vol.OO または OO 巻)，論文頁（年）.
- [3] 二村忠元：電気磁気学，電子・通信・電気工学基礎講座 1，p.56，丸善（1972）.
- [4] K. F. Schrum, S. H. Ko, and D. Ben-Amotz: “Description and theory of a fiber-optic confocal and super-focal Raman microspectrometer”, Appl. Spectrosc., vol.50, pp.1150- 1155 (1996).

※文献のフォーマット指定は注意深く守らなければならない。半角スペースやコンマの位置などにも注意が必要である。

<チェック項目>

□フォーマットが守られている。

□本文中の文献番号と一致している。