

光通信を体験する

2010年7月 筑波大学応用理工学類一日体験教室 体験実験

1 はじめに

現代社会は、さまざまな科学・技術の成果に支えられて成立しています。応用理工学類では、そのような科学技術の成果をただ用いるだけではなく、その原理を基礎から理解し、必要に応じてそれらを改良したり、新しく組み直したりすることのできる力を養うことを目指しています。

光通信も、現在の情報化社会を支えるインフラストラクチャーとして、なくてはならないものの一つです。この体験実験では、光通信に用いられている、発光ダイオード、半導体レーザー、光ファイバーといったオプトエレクトロニクス素子の性質を調べ、それを通して、情報化社会を支えている科学技術の基礎を学ぶことを目的としています。

2 光通信の特徴

光ファイバーを伝送線として用いる光通信は、1960年代の後半に本格的な研究が始められ、今や国内の長距離通信や海外との通信のための海底ケーブルなどで、従来の同軸ケーブルやマイクロ波回線などを遥かに凌ぐ多量の情報の伝送に役立っています。

光通信で用いる光も、皆さんがよく知っている電磁波の一種です。そして光通信が従来の電波を利用した通信よりも遥かに多量の情報を伝送することができる理由は、光が非常に高い周波数領域における電磁波であるということにあります。そのことを説明するために、古くから行われている中波のAMラジオ放送と光通信を較べてみようと思います。AM放送は約1000 kHzの電波を搬送波として用いています。放送局ではその約1000 kHzの搬送波の振幅を図1のように音声信号で変調してそれをアンテナから発信しています。我々はラジオ受信機で電波を受信してその包絡線から音声信号を取り出しているのです。

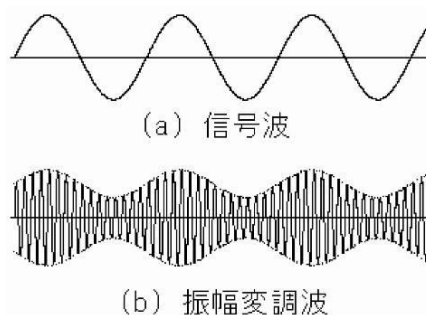


図1 振幅変調

ここで、考えなければならないことは約1000 kHzの搬送波と数十 Hzから約10 kHzまでの音声の周波数(可聴周波数)の関係です。例えば、1000 kHzの搬送波がその搬送波のみで全く音声信号などで変調されていなければ、きれいな正弦波ですから、その周波数スペクトルには1000 kHz成分のみしか存在しません。しかし図1のようにその振幅を約10 kHzの周波数幅をもつ音

声信号で変調すると、その電波のスペクトルは 1000 kHz の周りに約 10 kHz の広がりをもつこととなります。そこで他局との混信を避けるためにはお互いの搬送波の周波数を 100 kHz 程度離されなければなりません。これが同一地域で共存できる放送局がせいぜい 10 局程度に制限される理由となります。

ところで先ほど述べたように、光は非常に高い周波数の電磁波でその周波数は 10^{15} Hz のオーダーになります。ここで一つの音声信号に 100 kHz ずつ割り当てるものとする、原理的には一本の光ファイバーで $10^{15} \text{ Hz} / 10^5 \text{ Hz} = 10^{10}$ すなわち 100 億回線の音声信号の通信を行うことができることとなります。これは全世界の人々が同時に一本の光ファイバーを使って通話することが原理的には可能であることを意味します。

3 光通信技術

光通信の実用化には、以下に述べる光ファイバーと半導体レーザーの開発が決定的な役割を果たしました。

3.1 光ファイバー

光ファイバーを用いた光通信の特長は上に述べた大容量性に加えて、電氣的なノイズの影響を受けない、電氣的ノイズを出さない、中継器が少なくて済む、といったものであり、これらは光ファイバーの特長でもあります。

長距離通信用の光ファイバーは通常直径約 100 μm の非常に透明な石英ガラスでできています。その構造は図 2 のように中心部の屈折率の大きいコアとその周りの屈折率の小さいクラッドから成り立っています。光は屈折率の大きいコア部を伝搬します。光線がコアとクラッドの境界に達したときその入射角が臨界角よりも大きければ全反射によってコア内に反射され、クラッドに漏れ出すことはありません。非常に純度の高い材料を用いることによって、0.2 dB/km 程度の非常に小さい減衰率が実現されています。ただし、光ファイバーをあまり強く曲げるとコアを伝搬する光線の入射角が臨界角以下となって光はクラッド部へ漏れ出してしまいます。またガラスですから破壊する可能性もあります。そのため、光ファイバーを強く曲げて半径 10 cm 以下にすることは危険です。本課題においては、プラスチック・ファイバーを用います。プラスチック・ファイバーは石英ファイバーほど減衰率が低くありませんが、電氣的ノイズの影響を受けない、電氣的ノイズを出さないといった光通信の特長を生かして、短距離の情報伝送に用いられています。

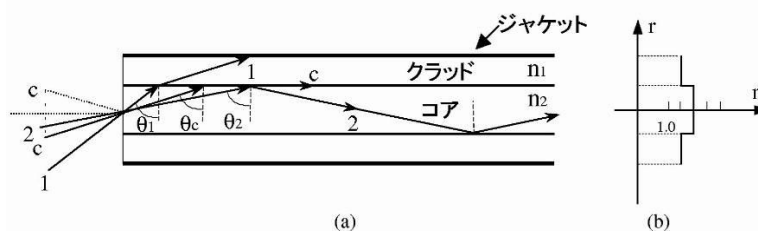


図 2 光ファイバーの構造 (a)臨界角 θ_c より大きいクラッドに対する入射角 θ_2 を持つ中心コア中の光線は、捕らえられてファイバー中心部を伝搬する。 θ_c より小さい入射角 θ_1 を持つ光線は、

クラッドを通りぬけて外被によって吸収される。(b)光ファイバーの屈折率分布。

3.2 発光ダイオード

電気信号を光に変換する素子として、最も簡単なものが、発光ダイオード（LED: Light Emitting Diode）です。LEDは、半導体のダイオードのpn接合を利用した発光素子です。

図3(a)は、pn接合を模式的に示したものです。図3(b)は、電圧を印加する前のエネルギーバンド構造を示しています。n型とp型の半導体を接合させると、n型中の多数キャリアである電子はp型領域へ拡散し、p型中の多数キャリアである正孔はn型領域へと拡散します。その結果、n型領域には、電子を失ってイオン化したドナーによる正の空間電荷が、また、p型領域には正孔を失ってイオン化したアクセプタによる負の空間電荷が、それぞれ作られます。この正負の空間電荷による電気二重層は、それ以上のn型領域からの電子、p型領域からの正孔の拡散を抑える電位障壁 (V_{bi}) を形成します。このときフェルミ準位 E_F はn型およびp型両領域を通じて等しくなります。このように形成されたダイオードに順方向電圧を加えると、図3(c)に示すように電位障壁は印加電圧の分だけ低くなるので、印加電圧がある値を超えたときに、n型領域からp型領域に電子が、また、p型領域からn型領域に正孔が流れるようになります。その結果、それぞれの領域で電子と正孔とが再結合します。このときに、そのエネルギーを光子として放出するのが、LEDの発光です。GaAsなどの直接遷移型の半導体材料を用いることにより、高い発光効率が得られます。それに対し、間接遷移型半導体であるSiを用いたダイオードは、発光素子としては用いられません。

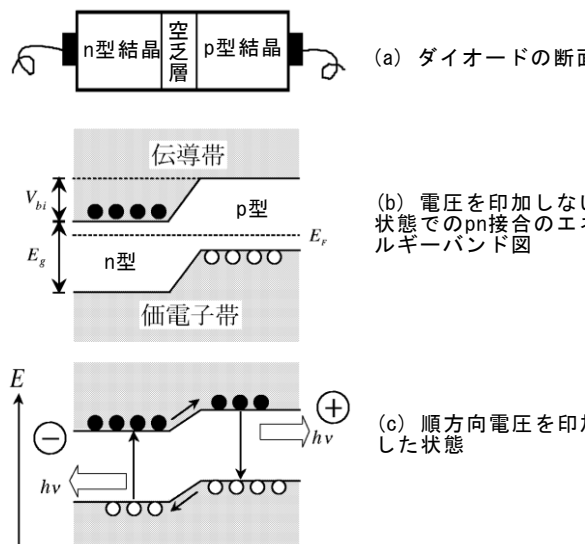


図3 発光ダイオードの構造と発光のしくみ

3.3 半導体レーザー

LEDの発光の原理をそのまま使い、それに加えて共振器構造を形成し、誘導放出による増幅によってコヒーレント光を発生させるものが半導体レーザー（LD: Laser Diode）です。通信の搬送波である光を発生させる光源としては、指向性がよくきれいな正弦波的光波を発振するレー

ザーが最適です。しかし通常のヘリウムネオンレーザーやアルゴンレーザーなどは電気エネルギーから光への変換効率が0.1%以下と極めて低く、また装置も大がかりである上、長期的安定性にも問題があります。一方半導体レーザーは本体のサイズが100 μm程度と非常にコンパクトである上、変換効率が最大で数十%にも達し、長期的安定性にも優れています。またその駆動電流の変調により、容易に高周波の変調も加えることができるため、光通信に広く使用されています。

図4に、代表的な半導体レーザーの構造の例を示します。誘導放出による光の増幅率を高めるため、外部からの電流によって注入された電子を、上下・左右方向に効果的に閉じ込めるための構造を有しています。

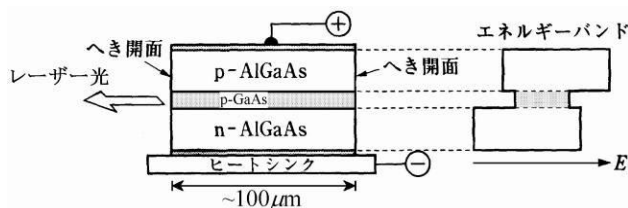


図4 代表的な半導体レーザーの構造

図5が、レーザーの原理図です。多くのレーザーにおいては、レーザー増幅媒体が、二つの反射鏡によって挟まれた共振器の中に置かれ、そこを光が何度も往復することによって、光強度に正のフィードバックが生じ、レーザー発振が起こります。半導体レーザーでは、結晶のへき開面が反射鏡の役割をします。

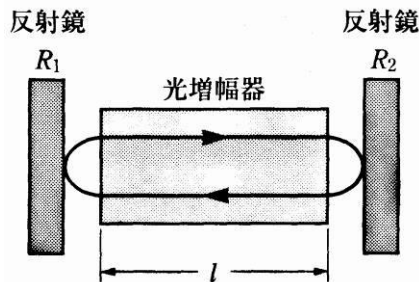


図5 レーザーの原理図

3.4 フォトダイオード

フォトダイオードは、光信号を電気信号に変換するために最もよく用いられる素子です。光から電気への変換過程は、LEDにおける電気から光の変換のちょうど逆になっています。光子が半導体のpn接合部に吸収され電子・正孔対を生成すると、それが、そこに印加されている逆電圧によって、お互いに別れる方向に加速され、これが光電流となります。本実験で用いるフォトトランジスタは、フォトダイオードとトランジスタが一体となったものであり、光の検出と電気信号の増幅を同時に行う素子であると理解できます。

[課題 1] 図 6 の回路を用いて、LED の特性を調べる。

(問 1) LED を流れる電流、LED にかかる電圧及び、LED の発光出力を測定し、電流-電圧、電流-発光出力の関係のグラフを作成する。また、測定値を用いて、LED で消費された電気エネルギーから光のエネルギーへの変換効率を計算し、電流-変換効率のグラフを作成する。(それぞれ電流を横軸、電圧、発光出力、変換効率を縦軸にとり、線形目盛りのグラフを描くこと。) LED の発光出力の電流、電圧に対する相対的な依存性が分かればよいので、発光出力や変換効率の絶対値は分からなくてよい。これらをもとに、LED の特性について論じよ。

実験はグラフを書きながら行うように。例えば、上の実験では電流-電圧、電流-発光出力等のグラフを書きながら行うとわかりやすいでしょう。

★注意★

LED を壊さないため、電流を 50 mA 以上流さないように。

光の出力を測定するためのパワーメーターの受光部は、大変破損しやすいので注意して扱うこと。測定中に受光部が動かないように、ホルダーにしっかりと固定すること。また、信号光を照射しないときに出力されるバックグラウンドにも注意し、必要なら照射時のデータから差し引くこと。実験室に備え付けてあるダンボール箱を利用することにより、バックグラウンドを効果的に下げることができる。

パワーメーターは、測定する光の波長によって感度が異なるので、波長の設定が正しい(“650 nm” または “A” モード) ことを確認すること。

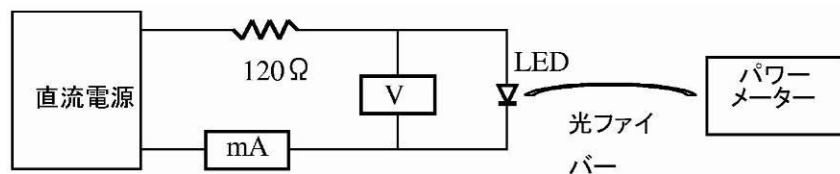


図 6 LED の特性を調べるための回路図

[課題 2] LED に流す電流を 40 mA とし、光ファイバーの長さをいろいろ取り換えて、光ファイバーの透過光出力を測定せよ。

光ファイバーの減衰率を求めるためにも、長さ-透過光出力のグラフを片対数グラフに書きながら行うとよい。光ファイバーの中を伝搬する光の出力を $I(x)$ とし(光の伝搬方向を x とする。), 単位長さあたりの光出力の減衰の割合を α とすると、 $I(x)$ は、微分方程式

$$\frac{d}{dx} I(x) = -\alpha I(x)$$

に従う。したがって、光ファイバーの長さを L とすると、光ファイバーを透過する光の出力は、

$$I = I_0 \exp(-\alpha L)$$

(I_0 は入射光出力) となる。ただし、この議論では、ファイバーの入射および出射端面での反射損失や結合損失を考慮していない。実際の実験では、これらも考慮しなければならない。

★注意★

透過光特性が変化するので、光ファイバーを曲げすぎて折らないように。また、そのために特性が変わってしまった光ファイバーがある場合は、そのデータは減衰率を求めるための解析から除外すること。

(問2) 光ファイバーの減衰率のおおよその値 (単位は dB/km で) を求めよ。この単位での減衰率の値は、上記の α とは異なるので注意すること。できれば最小 2 乗法を用いて、光ファイバーの長さ と 透過光出力 との関係の片対数グラフを線形フィットせよ。(コンピュータを用いてもよい。) 必ず、求めた減衰率に対応する直線を片対数グラフに書き込んで、求めた減衰率が測定データと矛盾がないか確認すること。

光出力について

光の単位時間あたりのエネルギーを、光の出力 (power) という。SI 単位系では W(ワット) を単位として表される。

デシベル (dB) について

デシベルは、出力の大きさを、ある値に対する比率の対数で表す単位であり、一般にエネルギーの流れの減衰や利得などを表すために用いられる。入力信号を I_{in} 、出力信号を I_{out} としたときのデシベル表記での比率は、 $10 \log_{10} I_{out} / I_{in}$ (dB) となる。デシベルについて定量的に理解するために、 ± 3 dB がどのような割合を示すのか計算するのもよいだろう。

dBm は、出力を表わす対数単位であり、1 mW を基準として、出力をデシベル単位の値で表したものである。すなわち、dBm と mW で表された光出力の値をそれぞれ [dBm]、[mW] と書くと、 $[dBm] = 10 \log_{10} [mW]$ となる。dB/km 単位の減衰率は、横軸を光ファイバーの長さ (km 単位)、縦軸を dB (あるいは dBm) 単位の透過光出力としてプロットし、直線でフィットしたときの、直線の傾きに等しくなる。

[課題3] 半導体レーザー (LD) の特性を調べる。使用する LD には、図 7 のような配線が既になされている。この回路に電源と電圧計、電流計を接続して、この回路を流れる電流とこの回路にかかる電圧を測定し、それらの値を使って、LD を流れる電流と、LD にかかる電圧を求めよ。(回路に印加される電圧から、抵抗による電圧降下分を差し引くことによって、LD にかかる電圧が求められる。) またその時の LD の光出力も同時に測定せよ。このとき、パワーメータの受光部を、LD の出力部になるべく近づけて、出力光のほとんどを受光するようにすること。

また、用意されている電圧計では測定可能な電圧が足りないので、この課題ではその代わりに電源回路の電圧表示を用いること。ただし図 7 中のコイルとコンデンサーは、LD への過電流防止のために挿入されているものであり、本実験のような直流電圧の印加時には、それぞれ、抵抗ゼロ、抵抗無限大と考えてよい。

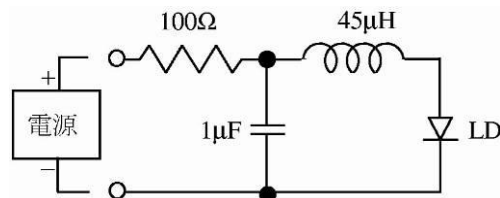


図 7 半導体レーザーを駆動するための回路

使用する LD は、発振波長 650 nm、標準出力 5 mW の赤色 LD である。LD は、過電流や静電気などに非常に弱いので、扱いには特に注意すること。以下に、その注意点を示す。

- 回路に直接接触しないこと。
- 接続・取り外しの作業は、必ず、電源の出力をゼロにして行うこと。
- レーザー発振し始める電流 (I_{th} : しきい電流) より、15mA 以上電流を多く流さないこと。また、光出力が 5 mW を超えないこと。
- レーザーの出力光は強いので、絶対に直接目に入れないこと。

まず、電流値が 0 mA から 25 mA 程度 (25 mA を超えてはいけない) までの間で、電流に対する光出力の関係をおおまかに測定する。このとき同時に、出力光を目視し、レーザー発振の様子に異常がないことを確かめる。電流－光出力のプロットから、光出力が急激に増加し始める電流値、すなわちしきい電流 (I_{th}) のおおまかな値を得る。この値を使って、上記の制限範囲内での、電流、電圧、光出力を測定する。過電流などにより LD を破損してしまったら、速やかに担当者に連絡すること。また、実験開始時にすでに LD が破損している場合があるので、LD が発振しない、明瞭なしきい電流が観測されない、出力の空間分布がおかしい、といったことが見られたら、担当者に連絡すること。

(問 3) LD の、電流－光出力、電流－電圧の関係のグラフを作成せよ。また、LD が消費した電気エネルギーから出力光エネルギーへの変換効率を計算し、それと電流との関係を表すグラフを作成せよ。軸はすべて、線形目盛りにする。以上の結果を LED の場合と比較し、相違点の原因について考察せよ。また、しきい電流と外部微分量子効率を求めよ。(外部微分量子効率を計算するときは、各物理量の単位も考慮し、求めた結果が無次元量となることを確かめよ。) これらをもとに、LD の特性について論じよ。

しきい電流について

レーザー発振している領域の電流－光出力の関係を直線で近似し、その直線を外挿して光出力ゼロのときの電流値を求めたものが、しきい電流である。

外部微分量子効率について

半導体レーザーの量子効率とは、素子に流れ込む電子の数に対する発生する光子の数の比である。外部量子効率とは、素子の外部に取り出される光について定義された量子効率であり、外部微分量子効率とは、（レーザー発振時における）電流の増加分と、それによって増加する光出力とに対して計算される量子効率である。電流の増加分を ΔI 、それによる光出力の増加分を ΔP としたとき、単位時間当たりに素子に注入される電子の数の増加分は $\Delta I/e$ 、単位時間当たりに素子の外部に出射される光子の数の増加分は $\Delta P/h\nu$ であるので、外部微分量子効率は $e\Delta P/(h\nu\Delta I)$ で与えられる。ただし、 e 、 h 、 ν はそれぞれ素電荷、プランク定数、光の振動数である。 ν は、レーザーの発振波長から計算できる。

【課題 4】 LD の出力光の広がり角を測定し、LD の構造について考察する。

（問 4）パワーメーターの受光部を LD からはずして、LD の出力を白い紙などにあて、出力光の空間分布を肉眼で観察せよ。特に、水平方向、鉛直方向それぞれの、出力光の広がり角のおおよその値を測定せよ。その結果から、LD の構造について推察せよ。特に、LD の出力面の水平方向、鉛直方向の大きさを求めること。ただし、図 8 に示すように、間隔 d の狭い隙間を波長 λ の光が通過するとき、回折によって光は広がるが、十分遠くで見た広がり角 θ （単位：rad）は、おおよそ

$$\theta \cong \frac{\lambda}{d}$$

となることを用いてよい。

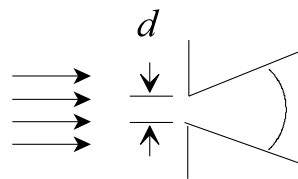
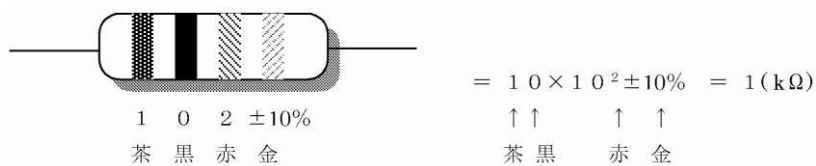


図 8 光の回折現象

4 付録

4.1 抵抗

色名	第1色帯 第1数字	第2色帯 第2数字	第3色帯 乗数	第4色帯 公称抵抗許容差	覚え方の例
黒	0	0	0	—	黒い礼服
茶	1	1	1	±1%	お茶を一杯
赤	2	2	2	±2%	赤いニンジン
オレンジ	3	3	3		第3の男
黄	4	4	4		騎士
緑	5	5	5	±0.5%	五月みどり
青	6	6	6		青二才のろくでなし
紫	7	7	7		紫七部
灰	8	8	8		ハイヤー
白	9	9	9	±5%	ホワイトクリスマス
金	—	—	—	±10%	
銀	—	—	—	±20%	



4.2 コンデンサー

