

研究や実務に役立つエレクトロニクスの参考書

2026
Winter
No.173

トランジスタ技術 SPECIAL

半導体は進化する…光センサ/フォトダイオード/発光/色再現/絶縁/レーザ/測距etc

LED・センサから始める 光のエレクトロニクス



**実務
教科書**
「学ぶ」を応援!

CQ出版社

入門実験でつかむ 光と光エレクトロニクスの基本

竹下 照雄 Teruo Takeshita

現代に生きるわたしたちは、照明から始まり、通信、計測、加工など、挙げたら切りがないほどの光技術の恩恵にあずかり、豊かな生活を送っています。

ここでは実験を通して、光と光センサの世界を学びながら、電子回路、光の物理、半導体の物性を考えていきます。

第1章では、簡単な実験を通して現物の光と光センサの世界を俯瞰します。

まずは実験！光源と光センサを触ってみる

● 実験回路と測定器 Analog Discovery 2

何はともあれ、現物を触って感じてみるのが大切でしょう。まずは発光素子であるLED^(A)* (Light Emitting Diode)を光らせ、その光波形を光センサであるフォトダイオード^(B) (Photodiode)で観測してみます。

実験ではUSB簡易測定器「Analog Discovery 2」^(C) (Digilent)を用いて、LEDの駆動とフォトダイオードからの出力電流のモニタを行いました。実験回路を図1に示します。光半導体素子と抵抗だけで組み上げた

きわめて簡単な回路です。写真1に実験のようすを示します。

● LEDを1 kHzで点灯する

LED駆動は、Analog Discoveryの任意波形発生機能Wavegeneの出力電圧(W₁)により行います。図2(a)に、W₁出力電圧と、フォトダイオードからの出力電流を電圧変換した波形を示します。また、図2(b)は、拡大したその立ち上がり応答波形です。応答波形より、W₁出力電圧すなわちLED回路にパルス電圧が加えられるとLEDはパルス発光し、フォトダイオードはその光波形を捉えています。

この実験において、CH₂の観測電圧が150 mV、電流-電圧変換抵抗が1 kΩであることから、フォトダイオードからの出力電流は約150 μA (= 150 mV / 1 kΩ)です。W₁出力は、繰り返し周波数1 kHz、デューティ比50%、振幅0～5 Vの矩形波電圧としました。

● LEDと対向するフォトダイオードの反応を見る

簡単な実験ですが、LEDと抵抗による直列回路に電圧を加えるとなぜ光るのか、その光波形をなぜフォ

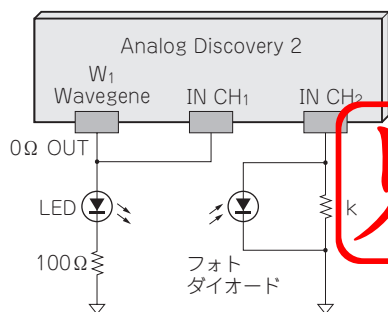


図1 LEDとフォトダイオードを使った光エレクトロニクス基本実験

オシロスコープやファンクション・ジェネレータが一体となったポケット・サイズ測定器Analog Discovery 2を利用。部品の内訳…①LED：OSG 58A3131A (OptoSupply)，②フォトダイオード：S7686 (浜松ホトニクス)。S7686はS16839-01 MS (浜松ホトニクス)で代替可能

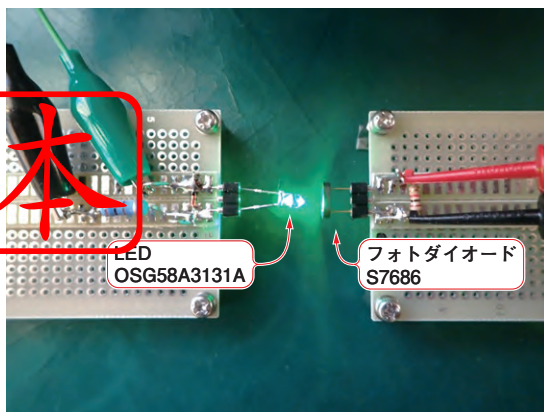
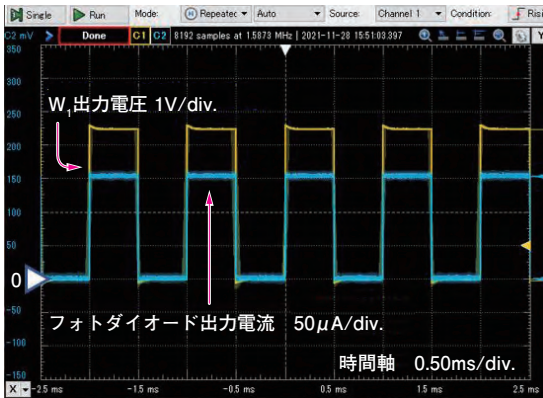


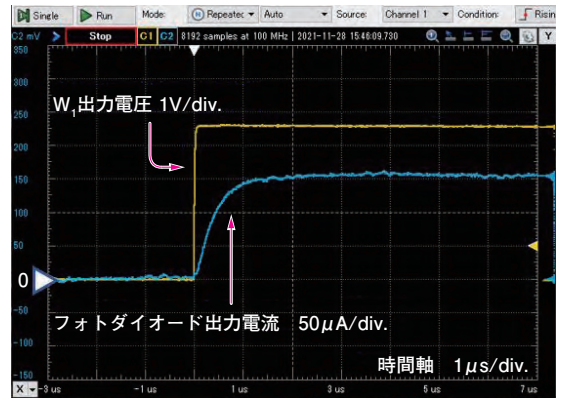
写真1 まずは光源LEDと光センサ(フォトダイオード)を触ってみる

図1の実験のようす

* 章末のコラム2に光実験に関する用語をまとめました。



(a) W_1 出力電圧とフォトダイオードの出力波形



(b) 立ち上がり波形(拡大図)

図2 LED回路へのパルス電圧とフォトダイオード出力波形を見比べてみる
Analog Discoveryによる W_1 出力および観測波形

トダイオードと抵抗の並列回路により観測できるのか、改めて考えると不思議になります。

また、印加電圧や抵抗値はどんな値が適当なのか、使う素子はどうやって選ぶのかなど、疑問点はたくさんあると思います。ここでは抵抗値や電圧を変えて、試していただきたいと思います。

肌感覚で光をつかむ

一番身近な光といえば太陽の光が挙げられます。蛍の光もととてもきれいです。思いつくまま、自然界に存在する光から人工の光までを表1にまとめてみました。熱くて触れないほどの温度にまで上がる光源と、発光中でも触ることができる冷たい光源、さらに光の可干渉性がある光源とない光源で分類しました。

可干渉性とは、光が互いに干渉を起こすことができるという意味で、光の波長と位相が互いにそろっている場合に起こります。例えば、レーザ・ポインタの光は可干渉性があり、単色で壁などを照らすとザラザラした模様が見えます(写真2)。この模様はスペックル(speckle)と呼ばれ、壁で生じた散乱光である電磁波が重ね合わさり、その山と谷の位相により光強度を強

め合ったり、弱めあったりするために現れます。

LEDは人工の冷たい光です。発光中に図1の実験で扱ったLED素子に触ってもぬるい程度の温度です。一方、家庭で広く使われている白熱灯は熱く、触り続けると火傷してしまいます。発光部であるフィラメントにはタングステンが用いられ、100 W白熱灯のフィラメント温度は約2800 K(約2500℃)にまで達します。物質は高い温度になると発光します。これを熱放射(または温度放射)と呼びます。

そもそも光とは何か

● 身近な光の現象

身近な光の現象として、雨上がりに見られる虹や、鏡に映る自分の姿、シャボン玉の七色などが挙げられます(図3)。虹は太陽の光が「屈折」により波長ごと

表1 身の回りにあふれる光

由来	光源の温度	光の可干渉性	光源または光の名前	発光原理
自然	熱い		地上での太陽光	熱放射(ほぼ黒体放射) ^(a)
	冷たい		蛍の光	化学発光
人工	熱い	なし	白熱灯	熱放射(ほぼ黒体放射)
			蛍光灯	放電による紫外線励起蛍光
	冷たい		LED	半導体PN接合部での電子とホール
		あり	半導体レーザ ^(E)	の結合

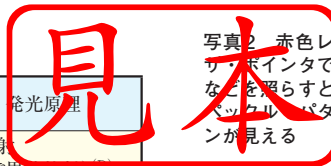
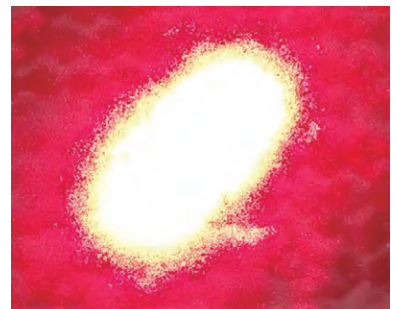
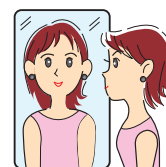


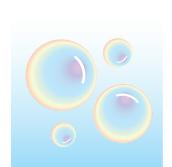
写真2 赤色レーザ・ポインタで壁などを照らすとスペックルパターンが見える



(a) 虹



(b) 鏡に映った自分



(c) シャボンの七色

図3 身近な光の現象

光センサの基本： フォトダイオード入門

竹下 照雄 Teruo Takeshita

フォトダイオードは一言で表すと「光を電流に変える石(半導体)」です。しかも、電源や制御回路も不要です。現代では、生活のいたるところでフォトダイオードが使われており、最も身近な半導体受光素子といえます。例えば、自動点灯の街灯や、写真撮影時に使われる照度計、リモコンの受光部などに使われています(図1)。

基本光センサ 「フォトダイオード」の特徴

インターネットでフォトダイオードを調べてみると次の記述がありました。

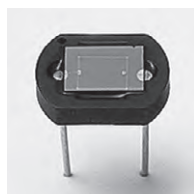
フォトダイオードは、光半導体素子のPN接合部に光を照射すると電流や電圧を発生する受光素子です。広い意味では太陽電池も含まれますが、通常は光の強弱の変化を精密に検出するセンサを意味します⁽¹⁾。

この文章は明快ですが、わかったような、わからないような感じがします。

経験的ですが、筆者は大まかには、フォトダイオードを光センサとして以下のように位置づけています。

- 目に見えるくらいの強さの光を捉えるセンサ
- 入射光に対する出力電流のダイナミック・レンジが広く直線性が優れている
- 安価で小型軽量、長寿命、機械的強度が高い
- 広帯域型は受光面が小さくて集光が大変

フォトダイオードの外観例を写真1に示します。写真1(a)は光強度測定用に受光面積を広げたものです。



(a) S7686
(8×6×1mm)



(b) S5973 (直径 5.4×3.6mm)

写真1 Si フォトダイオードの一例(浜松ホトニクス)

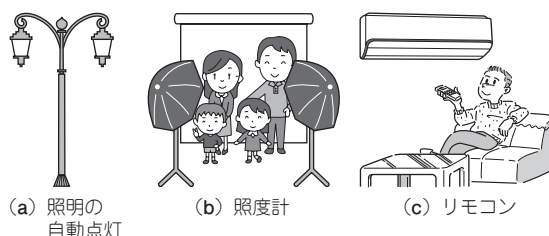


図1 基本光センサ：フォトダイオードは身近に使用されている

写真1(b)は光通信用に応答帯域を広げたもので、受光面積が小さいために入射窓に集光用レンズを付けたものもあります。

● 入射光量に応じて電流が変化する

フォトダイオードは、ダイオードの一種です。ダイオードは材料によってシリコン(Si)、ゲルマニウム(Ge)、ガリウムヒ素(GaAs)、シリコン・カーバイド(SiC)や、金属と半導体を組み合わせたショットキー・バリア型があります。機能によるダイオードの分類と構造を表1に示します。

ダイオードと名の付くものは定電流ダイオードを除き、構造的に半導体のPN接合を用いています。この中でフォトダイオードは、光を電流に変えることに特化したPN接合ダイオードです。入射光量により、電流-電圧特性が変化する特徴があります。

● フォトダイオードの電流-電圧特性

フォトダイオードの電流-電圧特性を図2に示します。この電流-電圧特性の曲線は、入射光量によって異なります。

暗中で電圧を加えると、①の曲線のように整流ダイオードと同じ特性が得られます。これに対して光が入射すると、①の曲線は②に移動し、さらに光を強くすると光強度に比例して曲線は③へと平行移動します。

グラフの縦軸上の電流 I_{sc} は、フォトダイオードの両端子を短絡したときに流れる電流を表します。短絡電流と呼ばれます。 I_{sc} は入射光量に対する直線性が

表1 フォトダイオードはダイオードの一種…入射光量に応じて電流が変化する

名 前	構 造	用途・機能
小信号スイッチング・ダイオード	半導体のPN接合	小信号を整流する
整流ダイオード		パワー・ラインの整流を行う
定電圧ダイオード		基準電圧を発生する
バリキャップ・ダイオード		電圧制御できる可変容量
フォトダイオード		光を電流・電圧に変換する
LED (Light Emitting Diode)		電流を流すことで光を放射する
レーザ・ダイオード (Laser Diode)	ゲートとソースを短絡したジャンクションFET	電流を流すことでレーザ光を放射する
定電流ダイオード		印加電圧や負荷によらず一定の電流を流す

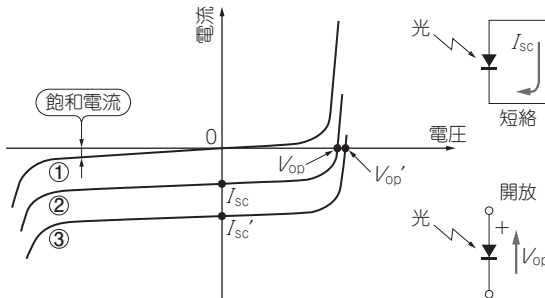


図2 フォトダイオードの電流-電圧特性

優れています。フォトダイオードの種類や使用回路などにより異なりますが、6～9桁に及ぶ直線性をもっています。なお、短絡電流はフォトダイオードだけで使われる概念です。

グラフ横軸上の電圧(順方向電圧) V_{op} は、フォトダイオードの両端子を開放したときに現れる開放電圧です。こちらは温度に対する影響が大きいために光量測定には使われません⁽²⁾。

● 光センサとしての特徴と性能

使う側から見ると、フォトダイオードには次の特徴があります⁽³⁾。

- ・入射光強度に対する優れた直線性
- ・高い機械的強度
- ・低ノイズ
- ・小型軽量
- ・広い波長範囲
- ・長寿命
- ・安価

光センサの構造から見たフォトダイオードの分類は量子型光センサになります。

理想的な光強度の測定

● 例…視感度に合わせて S7686 の主な特性

写真1(a)に示したSi フォトダイオード S7686(浜松ホトニクス)を例として、フォトダイオードの使い方を説明します^{注1}。表2はデータシートに記された、電

表2⁽⁴⁾ S7686の電気的および光学的特性

項目	記号	条件	min	typ	max	単位
感度波長範囲	λ	-	-	480～660	-	nm
最大感度波長	λ_p	-	-	550	-	nm
受光感度	S	$\lambda = \lambda_p$	-	0.38	-	A/W
短絡電流	I_{sc}	100 lx, 2856 K	-	0.45	-	μA
暗電流	I_D	$V_R = 1 V$	-	2	20	pA
上昇時間	t_r	$V_R = 0 V$ $R_L = 1 k\Omega$	-	0.5	-	μs
端子間容量	C_t	$V_R = 0 V$, $f = 10 kHz$	-	200	-	pF

気的および光学的特性です。

項目を順に上から見ていくと、「感度波長範囲」および「最大感度波長」から、S7686は視感度に合わせて感度をもつカラー・フィルタを備えていることがわかります。「受光感度」より、最大感度波長($\lambda = 550 nm$)の光を1 W入射すると得られる光電流は0.38 A(標準値)です。「短絡電流」より、100 lxで色温度^{注2}2856Kの光を入射したときの光電流は0.45 μA です。一方で、「暗電流」(漏れ電流)の存在により、光がまったく入射しなくても最大20 pAの信号電流が流れます。

「上昇時間」は、光検出抵抗を1 k Ω としたときの応答速度で、0.5 μs (標準値)です。カソード-アノード端子間には200 pF(標準値)の「端子間容量」が存在します。

● フォトダイオードのおよその応答速度

ここでS7686の応答速度は、端子間容量により制限されることが予想できます。S7686の応答速度は次のように計算されます。

注1：S7686はすでに製造終了している。代替品としてS16839-01MS(浜松ホトニクス)が使用可能。パッケージがセラミックから樹脂に変わり外形寸法が厚くなったが、実験データに影響はない(厳密にはデータシートの短絡電流の値が0.45 μA ではなく0.43 μA となる。ほかの特性は同じ)。

注2：色温度とは、光の連続した色分布を表す尺度。約3000 Kは電球色と呼ばれる。

電流を光に変える石！ LEDを理解して使う

竹下 照雄 Teruo Takeshita / コラム：小野田 浩久

LED (Light Emitting Diode, 発光ダイオード) を一言で表すと「電流を光に変える石(半導体)」です。本章では、もっとも身近な半導体発光素子といえるLEDについて説明します。

LEDが使われている身近なものは、LED照明、交通信号機、家電機器のリモコン(図1)など、数えきれないほどあります。LEDは、私たちの生活になくてはならないものになっています。LEDは現代人が手にした「新しい光源」です。

電流を光に変える半導体：LED

● 電流を流すとPN接合部が光る

LEDが発明されるまでの人工の光源といえば、白熱灯、蛍光灯、メタルハライド・ランプが挙げられます。いずれも真空技術を使った明かりで、熱や放電エネルギーが光となります。

これに対してLEDは、電流を流すと半導体PN接合

部が光るというまったく異なるしくみです。発光中に触っても熱くありません。それにしても、半導体はいったいなぜ光るのでしょうか。本章ではその原理についても掘り下げます。

● LEDの外観

LEDの外観例として砲弾型のものを写真1に示します。砲弾型はLEDの形状ではもっとも歴史が古く、代表的な形状です。

アノード端子(長いリード端子)からカソード端子へ電流を流すと、光を発します。発光部の半導体チップは、光学レンズと保護を兼ねたエポキシやシリコンの外装に納められています。

LEDの基本的な光らせ方

LED (OSG58A3131A, OptoSupply) を光らせてみます。図2に回路を示します。簡単な構成ですが、電源電圧と抵抗値はどのようにして決めたのかを解説します。

● 発光時のLEDパラメータを確認

データシート(表1)で定格動作時のパラメータを確認します。表1の①行から、順電流 I_F が20 mAのときに順電圧(DC Forward Voltage) V_F の標準値は3.1 Vです。ここを動作点として設計します。

また、③行から波長(Domi.Wavelength)の標準値は555 nmで発光色が緑色であることがわかります。

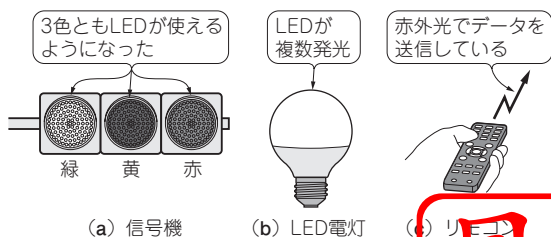


図1 身近に使われているLEDいろいろ



写真1 砲弾型LED
OSG58A3131A
(OptoSupply)

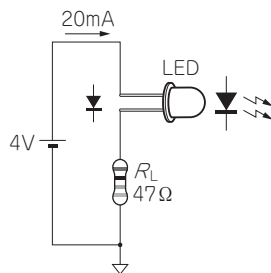


図2 LED駆動回路

第4章 演色性に色温度…色再現性の考え方

照明としてのLED入門

大塚 康二 Koji Otsuka

LED照明のあらまし

● LEDは発熱する！

「LEDは半導体だから長寿命で効率が良く、熱や紫外線が出ないから回りの環境に悪い影響を与えない」という話を耳にすることがあります。これは大きな間違いです。

確かに、LEDが表示ランプ専用だった時代は、従来の豆電球と比較すれば、上記の話が成り立っていました。しかし、灯具の光源として見ると、「熱を制することがLED灯具の寿命を制する」と言われるほど、LEDは発熱します。

● 代表的な照明光源の違い

▶ 白熱電球の場合

各種光源の発光スペクトルを図1(a)に示します。物がある温度に熱せられたときに発する光は、プラン

クの黒体放射の式^{注1}で表されます。色温度3000 Kの電球のスペクトルは、電球のフィラメント温度3000 K(約2700℃)におけるプランクの黒体放射ほぼそのものとなります。

図1(a)の発光スペクトルを見てわかるように、白熱電球における発光の主体は赤外光線で、可視光線は裾の存在です。言い換えると、入力した電力のほとんどを赤外線に変換しています。

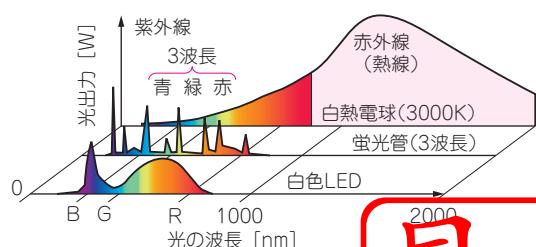
▶ 蛍光灯の場合

蛍光灯は水銀蒸気中の放電で発生した紫外線を蛍光体で可視発光に変換する原理ですから、赤外線はほとんど出ません。発熱部は広い管表面全体となるので、概して対流(周辺の空気への放熱)により効果的に熱放散しているといえます。

▶ LEDの場合

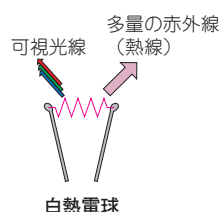
LEDは発熱が点と言えるほど小さなLEDチップと

注1：第7章の式(1)を参照。

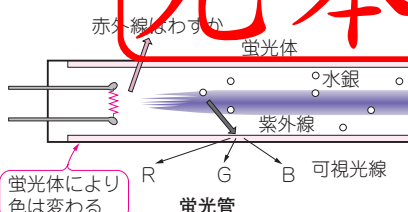


電球：目に見えないため損失にカウントされているが、赤外線を多量に放出している。総光出力としては効率が低い。冷却不要

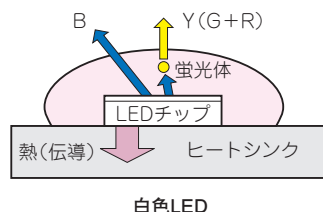
LED：赤外線をほとんど発生しない(可視光のみ放出)。損失はすべて熱になる。温度上昇は寿命や性能を著しく損ねる。冷却が不可欠



白熱電球



(b) 各種照明光源の構造



白色LED

図1 代表的な照明光源の違い

赤外線を放射せず小型のLEDは光源が発熱する

色とは何なのか… 色覚と波長の関係

竹下 照雄 Teruo Takeshita / コラム：小野田 浩久

私たちの日常はさまざまな色で彩られています。空の青、雲の白、葉っぱの緑、玉虫色、金(Au)のゴールドなどは自然の色です。人工の色には、信号機の赤・青・黄、テレビ画面に映し出されるさまざまな色、お父さんが好きな提灯の赤など…。私たちは、これらを「色覚」という感覚で捉えています(図1)。

一方で、さまざまな波長が含まれている光を物理的な方法で波長成分に分ける「分光」と呼ぶ捉え方もあります。

本章では、この世界を彩る「色」や、それを感じる「色覚」とは何なのか、そして物理的な計測手段である「分光」について解説します。

実験 赤・緑・青の光を混ぜると何が起きるか

● 3色LEDの発光実験回路

赤・緑・青(RGB)3色のLEDを1つのパッケージに納めたマルチチップLED素子を搭載した基板「AE-SDEF0500BC1(秋月電子通商)」を写真1に示します。赤緑青LEDの発光波長はそれぞれ、621 nm, 525 nm, 470 nmです。まずはこれを光らせてみます。

出力光を白い紙で受けて、その散乱光を目視します。図2はRGB LEDの駆動回路です。スイッチで各LEDをON/OFFします。



写真1 RGB LED モジュール AE-SDEF0500BC1(秋月電子通商, 10×8 mm)
LED素子として SDEF0500BC1(星和電機)を搭載(画像提供: 秋月電子通商)

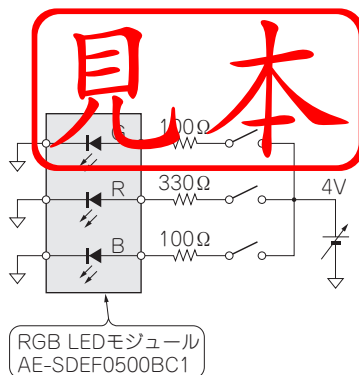


図2 RGB LED 駆動回路



図1 街の彩

● 赤緑青の光をすべて混ぜると…

スイッチを順に1つだけONして、赤緑青LEDそれぞれの発光色を確認します。スイッチをすべてONにすると白い光に見えます。スイッチの組み合わせで混ぜ合わされた光は、表1に示す色に見えます。

このように、赤・緑・青の光を混ぜ合わせるとさまざまな色が得られます。赤緑青が「光の3原色」と呼ばれる理由です。表1の結果を図3に示します。

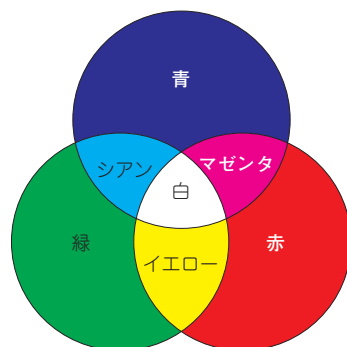


図3 光の3原色

第6章 秋月で買える浜ホト分光器 C12880MA 入門

光の周波数スペクトル分布計の製作

エンヤヒロカズ / コラム：田口 海詩

本稿では、秋月電子通商で入手できる浜松ホトニクス分光器を使って、光の周波数分布を可視化するスペクトロメータを製作します。光の周波数分布を調べることができるため、簡易的な食品の分析まで行ってみました。

作るもの… 光の周波数スペクトル分布計

製作したスペクトル分布計の画面構成を写真1に示します。スペクトルを画面全体に表示しています。表示する波長範囲は340 nm～850 nmです。可視光範囲は目安ではありますが、実際の色を表示しています。

マイコン・ボードにはディスプレイ体型のM5Stackを使用しました。

10 nm単位で色を設定しています。波長範囲では色数が52になります。またRGBの3原色の436 nm(B), 546 nm(G), 700 nm(R)がわかるように表示しています。画面上部には蓄積時間を表示しています。

● 機能

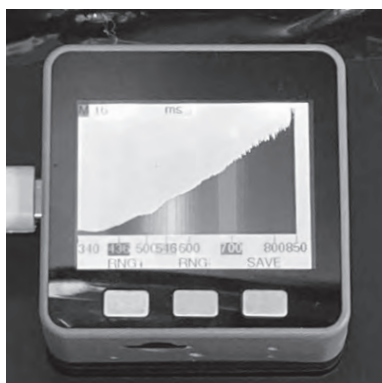
画面下部には3つのボタンの用途を表示しています。現在はボタンの機能は固定です。データの保存「SAVE」と、露光時間の増減(「RNG +」, 「RNG -」)です。この辺りの画面構成はM5Stackの画面サイズ(320×240)に合わせていますが、画面サイズの違うディスプレイを使ったときにも、移植が比較的容易になるようにプログラムを作成しました。

● できること…光の周波数スペクトル分析

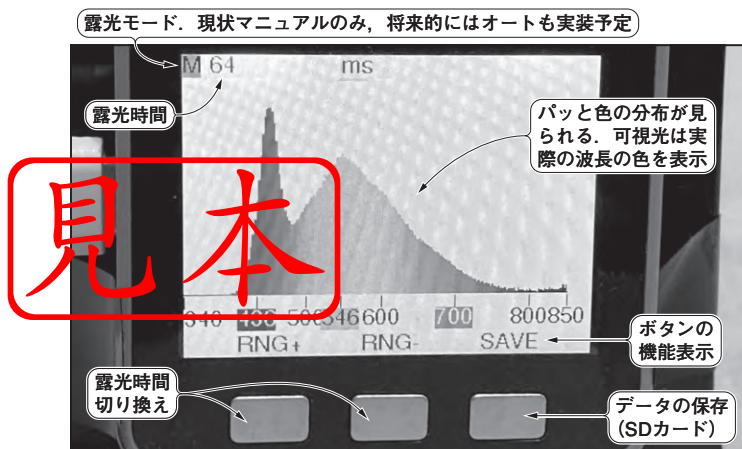
白熱電球、太陽光、蛍光灯、LEDの4つの光源のスペクトルを測定してみた結果を図1に示します。肉眼ではどの光源も白でしたが、スペクトルを見ると大きく違います。

白熱電球は波長が長くなるに従い単調増加しています。また太陽光も多少の変動はありますが、波長全域にわたっています。

蛍光灯やLEDは特定の波長にピークがあり、あまり均等なスペクトルではありません。ですので光源と



(a) 外観(画面表示例)



(b) 画面表示の詳細

写真1 製作した光の周波数スペクトル分布計

秋月で買えるマイクロ分光器C12880MA(浜松ホトニクス)と、マイコン・キットM5Stackを組み合わせて製作。周囲光だけでなく、簡易的な食品の分析も行ってみた

見えないけれどそこにある光… 赤外線と紫外線

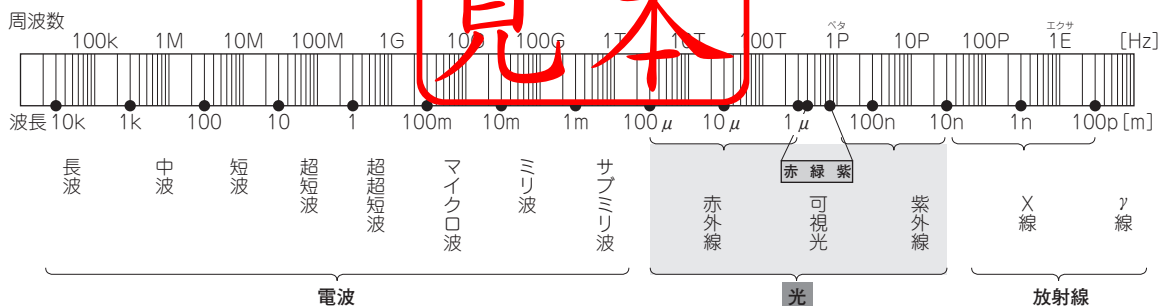
竹下 照雄 Teruo Takeshita

光は電磁波です。電磁波の大まかな分類では、図1に示すように低い周波数から高い周波数にかけて「電波」「光」「放射線」と呼ばれています。第5章で取り上げた「色」は、「光」の中でも可視光領域の話です。可視光領域は赤外線と紫外線領域の間にあります。人間の視覚では捉えられない赤外線、紫外線は「見えないけれどそこにある光」と言えます。

赤外線・紫外線にはそれぞれ固有な特徴があり、私たちの生活では図2に示すように、これらを利用しています。例えば、照明の人感センサ〔図2(a)〕やテレビのリモコン〔図2(b)〕、火災報知器〔図2(c)〕などが挙げられます。ここでは赤外線、紫外線(+放射線を少し)とそのセンサを取り上げ、特性や応用を説明します。



図2 紫外線や赤外線の使用されているところ



赤外線と紫外線の位置づけ

- 可視光領域を挟んで両側に赤外線と紫外線がある
波長分布から見ると、図3に示すように可視光領域(380 nm ~ 750 nm)を挟んで長波長側に赤外線領域が、短波長側に紫外線領域があります。その外側はさらにずっと連続しています。

光はエネルギーをもっています。エネルギーは光の周波数に比例するので、波長が短い光ほどエネルギーが大きくなります。このエネルギーや波長の違いが赤外線や紫外線の特徴となって現れます。

- 人間の眼では捉えられない光を捉えるセンサ達

図4に赤外線から可視光・紫外線にわたって感度をもつセンサを示します。光の中でも人間の眼に見える領域は、ほんの一部に過ぎないことがわかります。赤外線を捉える焦電センサとサーモパイルについて後ほど取り上げます。

- すべての物質は光を発している

ふつうは気づかないですが、すべての物質は光を発しています。人の体からも赤外線の光を発しています。温度 T [K] と発光波長 λ [m] の関係を表すプランクの放射則において、黒体から輻射される電磁波の分光放射輝度 I は、式(1)で表されます。

見本

「見える」の物理①…反射

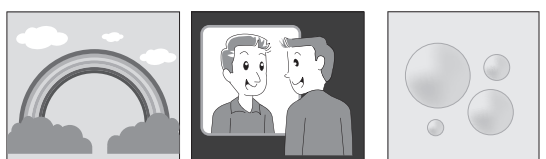
竹下 照雄 Teruo Takeshita / コラム：杉浦 銀治, 岩田 直樹

光は電磁波です。したがって光は電気・電子応用の対象ですが、普通のエレクトロニクス技術者にとっては別物に見えるようです。光の周波数が、無線通信などで使われている電磁波より何桁も高いことが理由かと思われまふ。これではもったいないです。

そこで光に親しみをもってもらいたくために身近な光現象を取り上げ、中でも「反射」についてエレクトロニクスの目でサイエンスすることで、電気の世界と光の世界のつながりを探ってみます。

身近にある光現象

身近な光現象には、雨上がりに見られる虹や鏡に映る自分、シャボン玉の7色などがあげられます(図1)。虹は太陽の光が水滴の中で反射を起こし、さらに屈折によって波長ごとに分けられたものです。鏡に映る自分は、金属膜表面での光の反射です。また、シャボン玉の7色はシャボン膜の表面(外側)と裏面(内側)で起



(a) 虹 (b) 鏡に映った自分 (c) シャボン玉の7色

図1 身近に見られる光現象

表1 自然の光現象と人工の光現象

光現象にはこのほかにも、散乱や吸収、偏光などや非線形なものがある

	自然	人工
反射	水面に映る逆さ富士や波のキラキラ、虹、シャボン玉や油膜の7色	鏡
屈折	虹	プリズム
干渉	シャボン玉や油膜の7色	分光器、CD記録面の反射光、レーザー光のスペckル・パターン
回折	おぼろ月夜、お風呂の中で見る灯り	LDの空間モード、分光器

こる光の反射と干渉が原因です。

これら自然の光現象に加え、同じ原理で生じる人工の光現象を表1に示します。本章ではこれまで触れてこなかった反射を掘り下げます。

物が見えるのは「光の反射があるから」

● 液体の中でガラスが消える？

物が見えるとはどういうことかを探ります。理科教室でもよく出てくる「液体中でガラスが消える」実験を行いました。

見えるということは物に当たった光が反射し、その光を眼で捉えることです(図2)。

ガラス(ガラスの器、屈折率 ≈ 1.5)のまわりを空気(屈折率 ≈ 1)で囲んでいるときは、光の反射が大きくガラスがはっきり見えるのですが、ガラスと同じ屈折率の液体でまわりを満たすと、ガラスの表面で起きていた反射がなくなり、見えなくなるというしかけです。

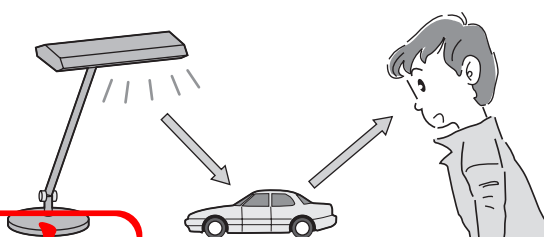


図2 反射があってこそ物が見える
厳密には吸収や発光でも、物があることがわかる



(a) グラスを洗面器内に置いたとき (b) グラスを砂糖水につけたとき

写真1 グラスを砂糖水に浸けるとガラスが見えにくくなる

「見える」の物理②… レンズと焦点と集光点

小野田 浩久 Hirohisa Onoda

なぜ光で「レンズ」が必要か

筆者は30代半ばの光学技術者です。初めて光学について学んだ中学校理科の授業は20年も前の話で、今はどんな授業をしているのかわかりませんが、とにかく私も私は光学が嫌いでした。

物体から線を引いて、どこに像ができるかという作図を何度もテストで行いました(図1)。しかし、これにどんな面白さがあるのか、当時はさっぱりわかりませんでした。

さらに嫌いだったのは、レンズの公式です。簡単な式で覚えるのは苦労しませんでした、これがどう重要なのか、これっぽっちもわかりませんでした。

この当時の自分に「将来はレンズのしごとをしているよ」と言ったら「嘘だ!それは別人だ!」とでも言いだしそうです。そんな筆者が、光とレンズ、焦点と見えることの関係について、できるだけ実的に伝えられればと思います。

● 直進する光の向きをコントロールする

光を活用するうえでレンズの存在は欠かせません。光は直進性をもっています。太陽の光がはるかかなたの地球まで届き、「暖かい」と感じるくらい強く照らすことができるのは、寄り道せず一直線に地球に向かってきているからです。そんな直進する光を制御し活用するには、光の進行方向をコントロールする道具が必要です。それがレンズです。

レンズによって、まっすぐ進むだけだった光の進行方向を曲げられます。1カ所に集めたり、所定の場所に導いたり、波長によって分離したりと、光を制御して活用できるようになります。

実際の活用事例としては、光をレンズで1点に集めることによって金属を加工できるレーザー加工機や、極微細な細胞を観察できる顕微鏡などがあります。また、今やスマートフォンに搭載されているカメラにも非常に高度に設計されたレンズ群が入っており、これによってきれいな写真が撮れます。光の時代と言われる現代において、光とレンズは切っても切り離せない関係です。

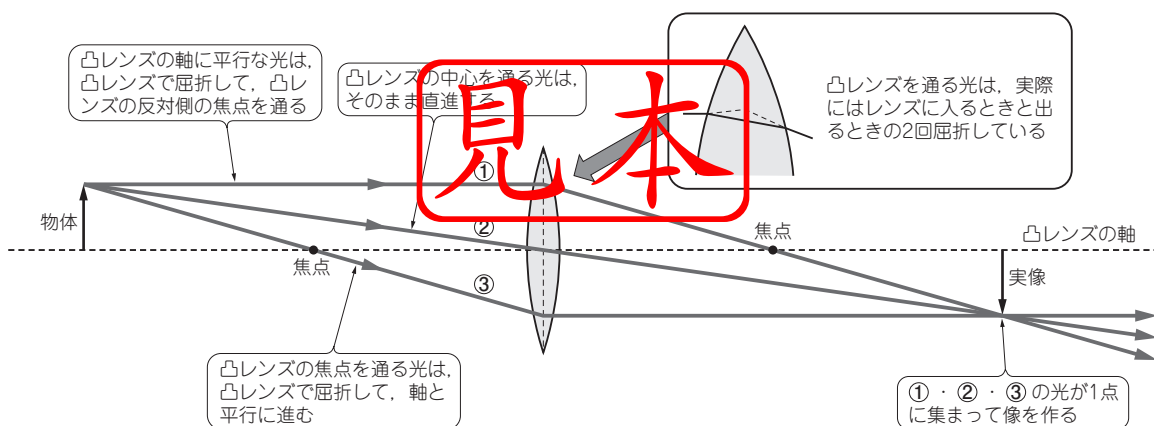


図1 中学校理科で習った凸レンズによる実像の作図

「見える」の物理③…偏光

竹下 照雄 Teruo Takeshita

太陽が照り付ける夏の日の運転中などは、路面の照り返しやフロントガラスのギラつきがとてまぶしくなります。まぶしさから眼を守るために偏光レンズのサングラスをかける人もいますが、偏光とは何なのでしょう。ここでは偏光とその応用例を取り上げます。

偏光とは

● 光は電磁波という横波

光は電磁波です。電磁波(つまり電波)というとアンテナを思い浮かべる読者も多いと思います。空中を飛んでくる電波をとらえるために、八木アンテナの向きを変えたり、回転方向を縦にしたり横にしたりしますが、それは電磁波に方向があるためです。

光の電磁界分布を図1に示します。光の進行方向(y 軸)に対して垂直に、電界と磁界が直交の関係で伝わります。このような状態の電磁波を横電磁界波といいます。

電磁界の振動方向は伝搬条件により自由に変化します。図1において電界は z 方向、磁界は x 方向だけの単一面なので、この例は直線偏光の場合を表したものです。 z 方向だけでなく x 方向にも電界がある場合がありますが、単純化のためにここでは省略します。

● 波には向きがある…特定の方向にのみ振動する「偏光」

光は波なので、波長、強度、位相、進行方向、振動方向などの特性を持ちます。偏光とは、このうち電磁界の振動方向に着目したものです。

太陽光や白熱電球など自然界の光の振動方向はランダムで全方向です。これに対して、特定方向にのみ振動する光を偏光といいます。

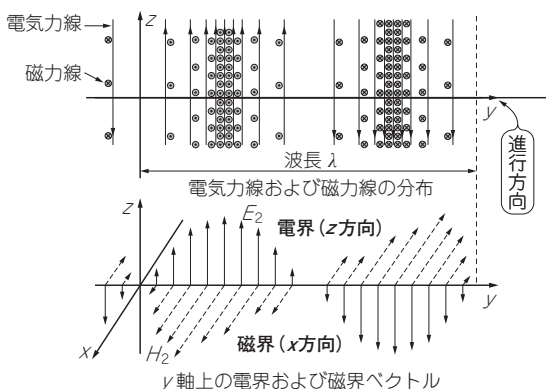


図1(1) 光の電界・磁界分布

光の電界・磁界分布は電波の電界・磁界分布とよく似ている。それもそのはず、光も電波も電磁波である

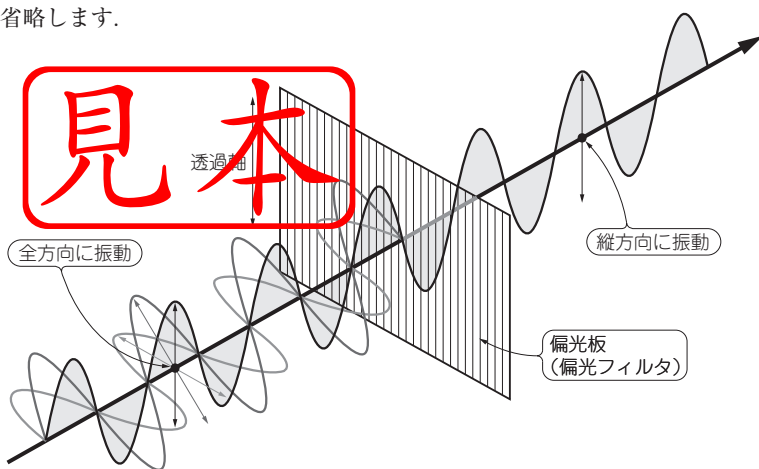


図2(2) 偏光板(偏光フィルタ)の働き

普通光は全方向360°に振動しているが、偏光板を透過できるのは透過軸に沿って振動する光の成分だけである。この図では、縦方向に振動する成分だけが透過している

一番使う絶縁 トランジスタ・カプラ

小山 泰宏
Yasuhiro Koyama

トランジスタ・カプラの基本特性

受光素子がフォトトランジスタとなっているトランジスタ出力フォトカプラ(以下、トランジスタ・カプラ)は汎用性が高く、応用範囲も広いため、今でも市場でもっとも多く使用されています。

例えばエアコンの室内機-室外機間のデータ通信などの低速デジタル信号伝送や、スイッチング電源の出力電圧を入力側へアナログ信号としてフィードバック(誤差増幅帰還)する応用などがあります。

ここでは代表的なデバイス TLP185(SE)を用いて、基本特性、設計上の注意点を説明します。

● 代表的なトランジスタ・カプラ TLP185(SE)

表1に、TLP185(SE)の代表的な基本特性を示します。表(a)の発光素子/受光素子の特性については、それぞれダイオード/トランジスタ単体の特性に準じています。発光素子に $I_F=10\text{ mA}$ を流すと、 $1.25\text{ V}(\text{typ})$ ほどの電圧降下が生じることがわかります。

表1 代表的なトランジスタ・カプラ TLP185(SE)の基本特性(指定がない限り $T_a=25^\circ\text{C}$)

項目		記号	測定条件	min.	typ.	max.	単位
発光側	入力順電圧	V_F	$I_F=10\text{ mA}$	1.1	1.25	1.4	V
	入力逆電流	I_R	$V_R=5\text{ V}$	-	-	5	μA
受光側	コレクタ-エミッタ間降伏電圧	$V_{(BR)CEO}$	$I_C=0.5\text{ mA}$	80	-	-	V
	エミッタ-コレクタ間降伏電圧	$V_{(BR)ECO}$	$I_E=0.1\text{ mA}$	7	-	-	V
	暗電流	I_{DARK}	$V_{CE}=48\text{ V}$ $V_{CE}=48\text{ V}, T_a=85^\circ\text{C}$		0.01 2	0.08 50	μA

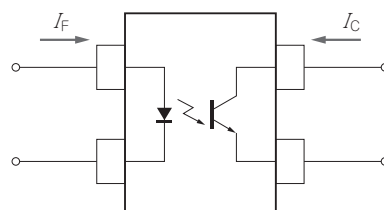
(a)発光素子/受光素子

項目	記号	測定条件	変換効率	min.	max.	単位
変換効率	I_C/I_F またはCTR	$I_F=10\text{ mA}, V_{CE}=5\text{ V}$	なし	50	600	%
			Y	50	150	%
			GR	100	300	%
			GB	100	600	%
			BL	200	600	%
			YH	75	150	%
			GRL	100	200	%
			GRH	150	300	%
コレクタ-エミッタ間飽和電圧	$V_{CE(\text{sat})}$	$I_C=2.4\text{ mA}, I_F=8\text{ mA}$	なし		0.3	V
		$I_C=0.2\text{ mA}, I_F=1\text{ mA}$	GB		0.3	V

(b)結合特性

項目	記号	注記	測定条件	min.	typ.	max.	単位
絶縁耐圧	BV_s	(注1)	AC, 60s	3750	-	-	V_{rms}

(c)絶縁特性



$$\text{CTR} = 100 \times I_C / I_F [\%]$$

(例) $I_F=5\text{ mA}, I_C=10\text{ mA}$ のとき,
 $\text{CTR} = 100 \times 10\text{ mA} / 5\text{ mA} = 200 [\%]$

図1 トランジスタ・カプラの変換効率 CTR

表(b)が光結合特性です。変換効率(I_C/I_F)はCTR(Current Transfer Ratio)とも記載され、トランジスタ・カプラの重要パラメータの1つです。

CTRは図1に示すように、入力側LEDに流す電流 I_F に対する出力側トランジスタのコレクタ電流 I_C の比率を%で表したものです。TLP185(SE)の場合、表1(b)に示す通り一般品では $50 \sim 600\%$ ($@I_F=5\text{ mA}, V_{CE}=5\text{ V}, T_a=25^\circ\text{C}$)と、12倍幅で規定されています。より狭い幅で規定された選別品もあります。

第9章 20k~50MbpsからRS-485/パワエレIPM用まで 最高50Mbps! 高速通信用フォトカプラ

山縁 大地
Daichi Yamamidori

本稿では機器間やデバイス間での信号伝送において、絶縁インターフェースとして使用されている高速通信用フォトカプラとIPM(Intelligent Power Module)インターフェース用フォトカプラについて、各素子の特徴と応用技術を交えて紹介します。

フォトカプラの伝搬レート確認

● 高速化が必要な背景

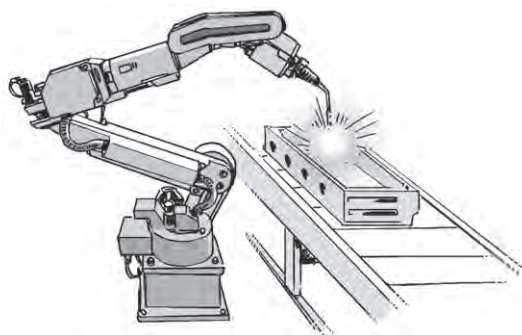
フォトカプラが使用されるFA、OA、家電製品、車などの製品は、性能や機能、省エネの観点で進化し続けています。工場内ではあらゆる機器どうしが接続され、通信し合うことで自動化が進んでいます。オフィス機器や家電製品は高機能かつ小型・薄型で環境に優しい製品が次々にリリースされています。車も自動運転技術の搭載が始まっていますし、脱炭素社会の実現に向けた電気自動車を街中で見かけることも増えてきました(図1)。

このような進化を実現するために必要なポイントの1つに、通信の高速化が挙げられます。通信を高速化することで、機器制御の精度を上げることができるからです。

産業系、家庭やオフィス、車それぞれに対し、RS-485やEthernet、CANといった高速の通信規格があり、通信の高速化は今後も進められる見込みです。絶縁しつつ信号を送るフォトカプラにおいても、各規格で求められる通信速度を満たすことができる高速品が必要となります。

● 高速通信用フォトカプラによる信号伝送例

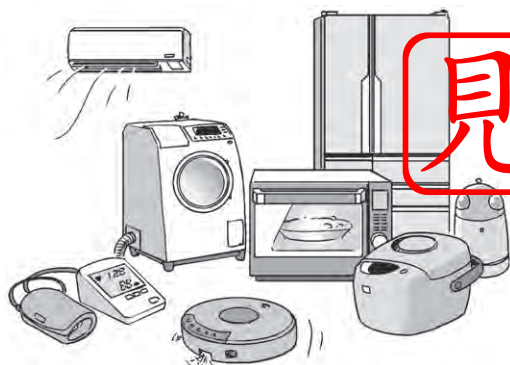
トランジスタ・カプラによる信号伝送レートは、一般には数kbpsまででした。それに対して高速通信用フォトカプラは、20k~50Mbps(bps: bit per second, 1秒あたりの転送できるデータ数)の信号伝送に対応することができます。また、1Mbps以上の高速通信用フォトカプラでは伝搬遅延時間(高速通信用フォト



金属部材の製造現場で

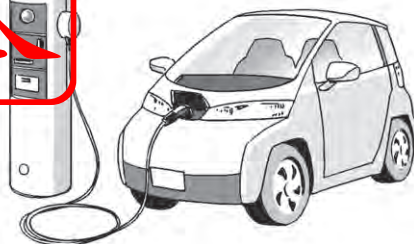


自宅のAV機器にも



エアコンや白物家電でも

見本



EVの充電スタンド

図1 あらゆる電子機器でフォトカプラが安全対策とノイズ対策に使われている

レーザ光を発する半導体 レーザ・ダイオード

竹下 照雄 Teruo Takeshita

レーザ・ダイオード(Laser Diode)を一言で表すと「電流をレーザ光に変える石(半導体)」です。人類が創り出した「新しい光」レーザ光と、それを発するレーザ・ダイオードについて説明します。

電流をレーザ光に変える半導体… レーザ・ダイオードとは

● 使用されている身近な例

レーザ・ダイオードが使われている身近なものには、レーザ・ポインタ、CD/DVD/Blu-rayなどの光ディスク)、バーコード・リーダの光源、レーザ・プリンタ、光通信など多くの例が挙げられます(図1)。とくに近年は、ToF^{注1}技術によるLiDAR^{注2}や3次元画像センサ^{注3}用の光源など、新しい用途が開発されています。

● LEDの発光部に光の共振器を付けたもの

名前にレーザがつくと、ハードルが高い印象を受けます。しかし、恐れることはありません。レーザ光を発するレーザ・ダイオードでも、使い方はLED(Light Emitting Diode)とほとんど変わりません。レーザ・

ダイオードはLEDの発光部に、レーザ光を得るために光の共振器を取り付けたもので、外から見ても構造の違いはわかりません。

使用上の主な注意点は、レーザ光はエネルギー密度が高くなる場合があります(コラム2を参照)。

● 電流を流すとPN接合部が光る

レーザ・ダイオードはLEDと同じく、電流を光に変える半導体光源です。レーザ・ダイオード/LEDが発明されるまでの人工の光源といえば、白熱灯、蛍光灯、メタルハライド・ランプなどが挙げられます。いずれも真空技術を使った明かりで、熱や放電のエネルギーを利用しています。

これに対してレーザ・ダイオード/LEDは、電流を流すと半導体PN接合部が光る現象を利用したまったく異なる光源です。LEDはこの光をそのまま取り出します。一方レーザ・ダイオードは、この光を利用して光の正帰還共振を起こし、レーザ光として取り出すものです。

● 外観

レーザ・ダイオードの外観例としてD650-5I(US-Lasers)を写真1に、出力窓から見た発光部を写真2に示します。点で発光しています。

D650-5Iのピン配置を図2に示します。D650-5Iは1つのパッケージにレーザ・ダイオード(LD)と光出力

注1: ToF [Time of Flight(飛行時間)] はレーザやLEDなどから光を対象物に照射し、その反射光から対象物までの距離を測定する技術。照射光と反射光の時間差を利用する方式と、位相差を利用する方式がある。

注2: LiDAR [Light Detection And Ranging(光による検知と測距)、ライタと読む] は、ToF技術を用いて、物体までの距離や方向を測定する方式。観測対象に向けて光をスキャンする場合もある。

注3: 3次元画像センサはToF技術を利用して、距離と画像を同時に取得できるセンサ。

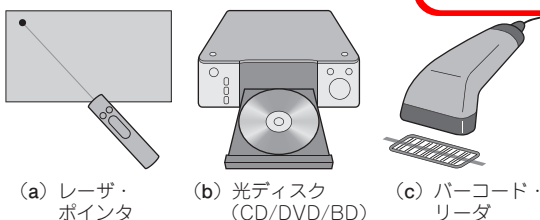


図1 レーザ・ダイオードの身近な使用例

見本

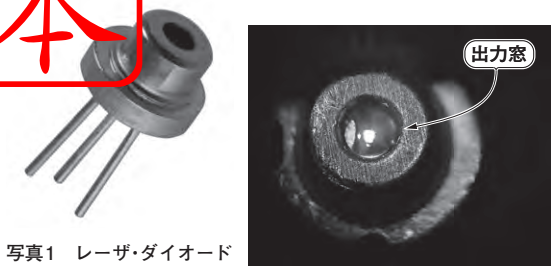


写真1 レーザ・ダイオード D650-5I(US-Lasers社) パッケージはTO-18型(5.6mm径)。DigiKeyで購入した

写真2 出力窓から見たレーザ・ダイオードの発光点

光通信と光ファイバの回路技術

小島 学 Manabu Kojima

ここでは、光データ通信の基礎について解説します。また、高速データ通信を実現するために光に求められている重要な性質である光スペクトルの基礎と、評価事例を紹介します。

光ファイバを使った通信システムの誕生

● 光通信のはじまり

▶ ベルによる自然光を使った光通信の実験

電話の発明(1876年)で有名なアレキサンダ・グラハム・ベルが、1880年に声を光に変えて213 m先まで伝送、再び音声に戻すという実験に成功しました。この実験は、図1に示すような装置で行われました。

しかし、この方式は途中の伝送路が空間であるため、光が広がったり拡散してしまうことから長距離の伝送は困難でした。しかも、雨や霧または障害物などの妨害を避けることができないので、当時実用化されることはありませんでした。

▶ 光通信を実用化させた光ファイバとレーザの登場

光通信を行う上で最も重要な要素として、光の減衰が極度に少ない伝送媒体と小電流で動作する安定かつ長寿命の光源が必要になります。

1960年代にレーザが発明され、1970年代に光ファイバ・ケーブル(以降、光ファイバ)が実用化されてから、光通信は長足の進歩を遂げました。半導体レーザ

は、数十万分の1 mm²という微小な半導体の窓から放射される安定、かつ指向性の優れた光線で、膨大な量の情報を伝送できます。

光ファイバは、人間の髪の毛ほどの細いガラスでできており、その中に光信号を閉じ込め、この光信号をほとんど減衰させずに遠方まで伝播させることができる高性能な伝送媒体です。

● 通信システムの基本構成

図2に示す光ファイバ通信システムは、基本的には従来のメタリック・ケーブルを、そのまま光ファイバに置き換えたものです。まず、電話、パソコンなどの端末から送られる電気信号は、E-O(電気-光)変換器によって光信号に変換され、光ファイバに送り込まれます。E-O変換器では、デジタル信号の‘0’、‘1’は、光の点滅に変換されます。

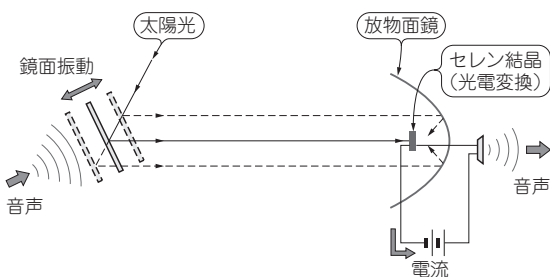


図1 ベルの光電話の原理

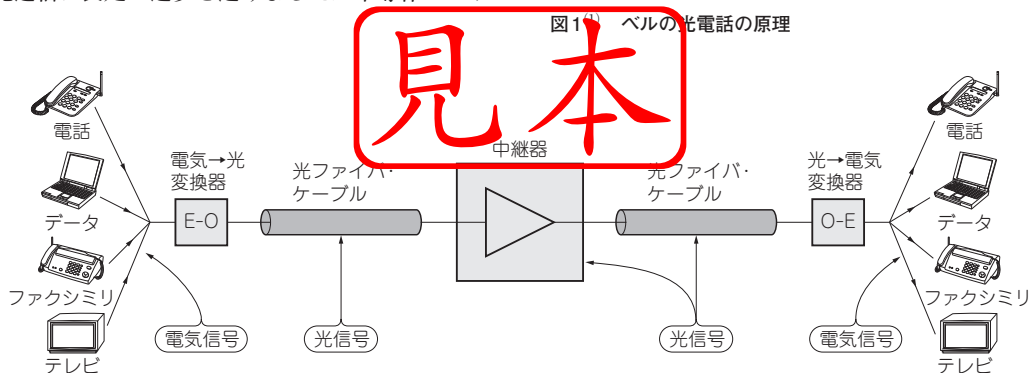


図2⁽¹⁾ 光ファイバ通信システムの基本構成

2mまで! 秋月で買える ToF距離センサVL53L0X

川口 正 Tadashi Kawaguchi

従来の距離センサで入手しやすいものは、超音波(40 kHz程度)を出してその反射で距離を測るものでした。しかし超音波では、対象物は壁のような大きなものでないとうまく検出できません。

ToF(Time of Flight)距離センサは、ある程度絞った範囲で対象物の光の反射を使うため、小さい対象でも距離が測定できます。また、赤外線を使っているため、通常の光の妨害を受けにくい特徴もあります。

ToF 距離センサ VL53L0X

ここでは「VL53L0X 使用レーザー測距センサーモジュール(AE-VL53L0X, 秋月電子通商)」を使用して、

ToF 距離センサの応用について説明します。AE-VL53L0X モジュールの仕様を表1に示します。

写真1に、キットに付属のケーブルを付けた状態のモジュールを示します。写真1の左側の小さい黒い四角の部品がVL53L0X(STマイクロエレクトロニクス)です。Class 1 レーザは、光が弱く裸眼に入っても危険でない強さのレーザです。

● おもな特徴

赤外レーザ光を使い、レーザ光発射時から対象物から光が反射してくる間の時間(ToF; Time Of Flight, 飛行時間)を測ることで、対象物までの距離を測定できます。半導体レーザ光に光学系(レンズ)を組み合わせ、ビームを絞って目的の範囲に円錐状に広げて使います。

VL53L0X は、VCSEL(Vertical-cavity Surface-emitting Laser)と呼ばれるタイプの半導体レーザを使用しています。このレーザの光を直接出力するのではなく、レンズを使って図1のように円錐状にレーザ光を広げて出力しています。被測定対象物から戻ってくる光を受け取る受光部も、図1で示された円錐状の範囲のみを受光するようにして不要な外来光を防いでいます。

表1 AE-VL53L0X モジュールの主な仕様

モジュールの状態	はんだ付け不要完成品
使用デバイス	VL53L0X(STマイクロエレクトロニクス)
電源電圧	3.3 ~ 5 V
計測範囲	最小: 約 3 cm, 最大: 約 200 cm (屋内、表面が白色の物体)
光源	940 nm(赤外線), Class 1 レーザ
インターフェース	I ² C, 3.3 V-5 V 信号レベル変換回路搭載
コネクタ	ケーブル付きコネクタ付属

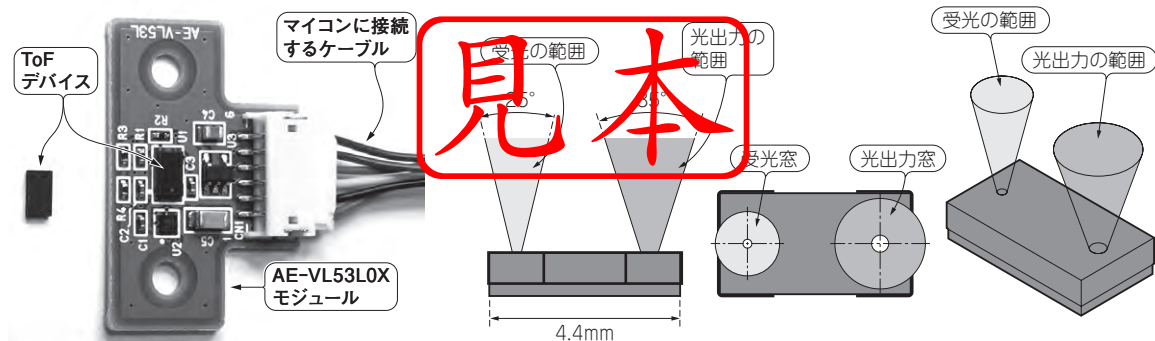


写真1 AE-VL53L0Xの外観とToFデバイスVL53L0X

図1⁽¹⁾ レーザToF測定デバイスVL53L0X

外形寸法: 4.4 mm×2.4 mm×1 mm。エミッタからレーザ光を出力し、コレクタ側で物体からの反射光を取り込む

部品は更新されることがあるので
適宜読みかえてください。

距離が測れる ToFカメラ入門

多田 遼 Ryo Tada

距離を測る技術の多くは、音や光などを対象物へ発し、対象物から戻ってくる音や光を受け取ることを基本にしています。みなさんは、豊富な経験に基づいて自身から物体までの距離が予測できると思います。これに近い技術として、カメラと機械学習を組み合わせ、距離を推定する技術が報告されています(20)(21)。

ToF(Time of Flight)は、赤外光などが対象物に当たって返ってくるまでの時間を用いて距離を測定する技術の総称です。そのため、ひとえにToFと

表現しても、測定できる範囲や頻度はさまざまです。

ToFカメラとは

● RGBカメラとの違い

被写体を撮影するカメラ(以降、RGBカメラ)とToFカメラの違い、ToFカメラの種類について説明します。

図1は、対象物を人とした場合の出力情報の違いです。RGBカメラでは、太陽光や蛍光灯などが対象物に当たり、それがイメージ・センサへ入り色情報(RGBなど)に変換されて画面に表示されます。

ToFカメラは、面で発光するVCSEL(垂直共振器型面発光レーザー: Vertical Cavity Surface Emitting Laser)と呼ばれるレーザーが対象物を照らします。RGBカメラでいうところのフラッシュが似た動作になります。対象物に当たった赤外光はセンサへ入ります。センサの後段で距離情報に変換されて画面に表示されます。

RGBカメラを例にすると、色情報(YUVなど)に変換する画像処理プロセッサ(Image Signal Processor: ISP)を使用せず、イメージ・センサの情報をそのまま出力するRAW方式に似ています。ToFカメラは、ISPがないので常にRAWで出力されるのです。

● ToFカメラの方式

ToFには、直接と間接の2方式があります。どちら

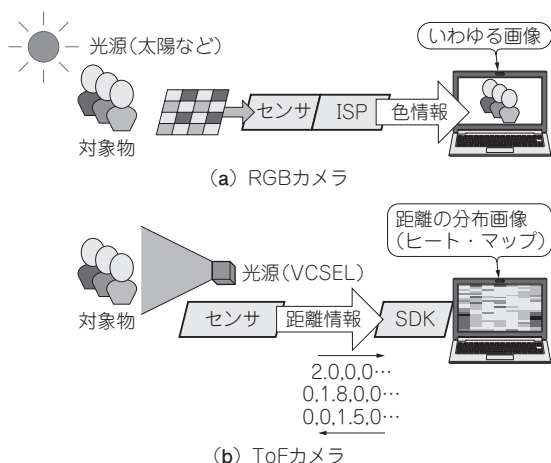


図1 ToFカメラは距離情報を画像にする

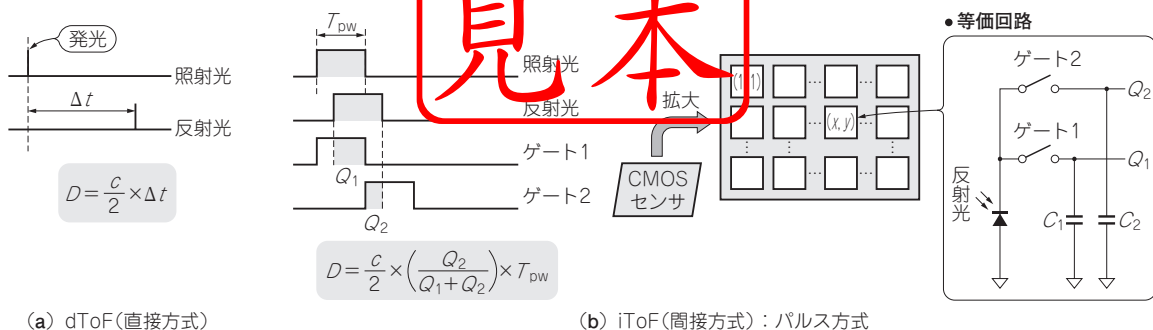


図2 ToFカメラには直接方式と間接方式がある

わずか光子1粒からカウント! 微弱光半導体センサMPPC

竹下 照雄 Teruo Takeshita

本章では、単一光子を検出することができる、極微弱光計測用の半導体光センサMPPC(Multi-Pixel Photon Counter)を取り上げます。写真1にMPPCの一例を示します。

極微弱光が測れる光子数カウンタ MPPCのあらまし

● これからクルマ等でも期待されている光センサ

MPPCという極微弱光計測用半導体光センサは、あまりなじみがありません。なぜならMPPCは、医療機器としてのPET(Positron Emission Tomography, 陽電子放出断層撮影法)や学術研究での高エネルギー実験⁽²⁾で素粒子検出などに使われており、私たちの普段の生活では触れる機会がないからです。

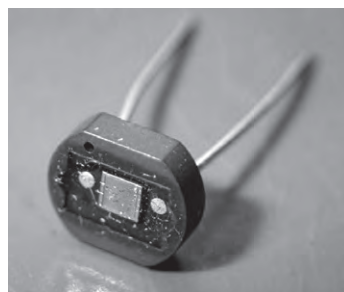
しかし、近年は車の自動運転や安全機能のために搭載されようとしています。ToF(Time of Flight)技術を用いたLiDAR(Light Detection and Ranging)により、前方や周囲の障害物を検知するための光センサとしてです。

MPPCは、これからの未来を切り開く光センサと言えます。産業界での活躍も期待されています(図1)。

● フォトダイオードからの進化…光子1粒まで測れるガイガーモード動作に!

MPPCも基本的にPN接合ダイオードです。表1に

写真1 極微弱光が測れる半導体センサMPPC: S13360-135 OCS(浜松ホトニクス)
有効受光面サイズは1.3×1.3 mm。パッケージのみ異なるS13360-1350 CS-01(浜松ホトニクス)でも代替可



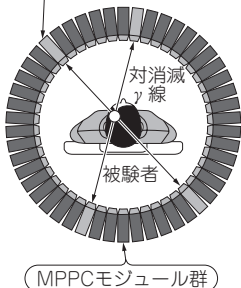
ダイオード構造の光センサをまとめました。

ダイオード構造による光センサの基本は、フォトダイオードです(第2章とAppendix 1を参照)。線形動作を行い、増倍機能を持ちません。

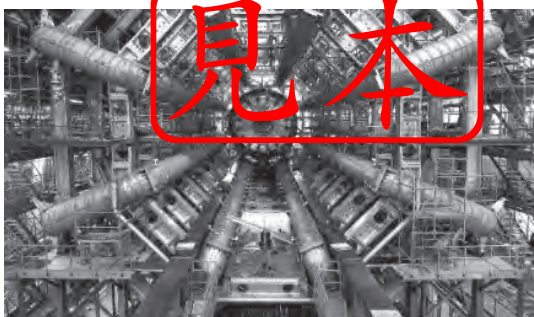
PN接合部に大きな逆バイアス電圧を加えることで増倍機能をもたせたフォトダイオードが、アバランシェ・フォトダイオード(Avalanche Photodiode, 以降APD)です。増倍原理は、アバランシェ増倍と呼ばれます。光入射により励起されたキャリア(電子&正孔)は、空乏層の電界で加速されて結晶格子に衝突し、新たな電子-正孔対を生成します。これが繰り返し連鎖的に起こることで電子増倍が行われます(図2)。

APDのアバランシェ増倍には出力電流が入射光量に比例する線形増倍と、ガイガーモードと呼ぶ、これ以上増やすことができない電流量までの増倍があります。

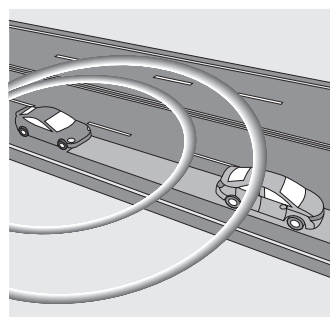
癌の位置情報



(a) 医療機器PET⁽¹⁾に



(b) 高エネルギー実験に [欧州原子核研究機構のイメージ⁽²⁾]



(c) クルマのLiDARに

図1 普段なじみがなかった極微弱光用の半導体光センサMPPCはこれからクルマなどでも期待されている

カミオカンデでニュートリノ捕捉! 光電子増倍管入門

竹下 照雄 Teruo Takeshita

あのニュートリノを捉えた超高感度な 光センサ「光電子増倍管」

- 技術者にはたまらない特性三高…高感度・高速・高ダイナミック・レンジ!

素粒子の1つであるニュートリノを捉えたことで知られる超高感度光センサに、光電子増倍管(PMT: Photomultiplier Tube, 通称 ホトマル)があります。その検出能力は、「月の上で懐中電灯を照らして、地球上でその光を捉えられる」⁽¹⁾と表現されています。

超高感度で知られる光電子増倍管ですが、加えて光検出部が大きいにもかかわらずサブGHzの周波数応答帯域幅をもつことや、ダイナミック・レンジが桁にも及ぶなど、技術者・研究者やマニアにはたまらない光センサです。

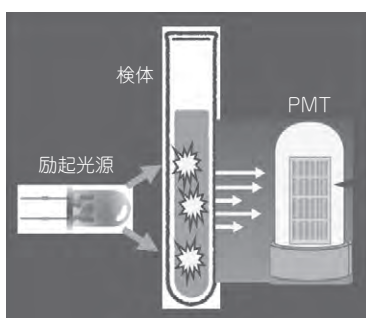
本章では外部光電効果を利用した光センサとして、

真空管技術を使った光電子増倍管を取り上げます。真空管という古い技術という印象がありますが、PMTは光計測の最先端で現役バリバリに働いています。

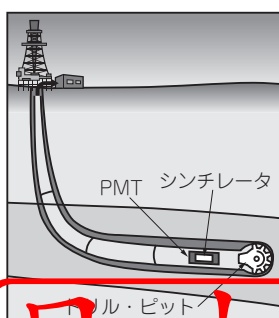
光電子増倍管(PMT, ホトマル)の あらまし

- 普段は触れる機会が少ないけどなくてはならない
光電子増倍管(以降、PMT)という光センサは、あまりなじみがありません。なぜならPMTは図1に示すような、PCR検査装置などの医療機器や石油探査プローブなどの専門機器に使われており、私たちの普段の生活では触れる機会がほとんどないからです。

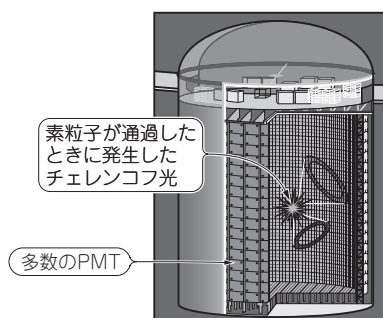
しかしPMTは医療やエネルギー供給を支える、私たちの生活になくてはならない光センサです。また、学術研究の高エネルギー実験で古くから使われています。素粒子であるニュートリノ検出に使われたことで



(a) PCR検査装置



(b) 石油探査プローブ



(c) スーパーカミオカンデ

図1 光電子増倍管(PMT, ホトマル)が使われているところ(イメージ)

表1 主な光センサと光電子増倍管の位置づけ

	動作原理による大分類		現象による分類		センサ名	感度	応答速度
	量子型	内部光電効果	光起電力効果	光導電効果			
		外部光電効果			光電子増倍管(PMT, 写真1), 光電管	高感度・波長依存性あり	高速
		熱型	焦電効果	ゼーベック効果	焦電センサ	低感度・波長依存性なし	低速
					サーモパイル		低速

このPDFは、CQ出版社発売の「トランジスタ技術SPECIAL No.173」の一部見本です。
内容・購入方法などにつきましては以下のホームページをご覧ください。

内容 <https://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/MSP/MSP202601.html>
購入方法 <https://www.cqpub.co.jp/order.htm>

CQ出版社

