
IoT eラーニング

各種センサーの種類と仕組み②

(光センサー)

国立大学法人 琉球大学

● 光センサー

- 光センサーとは
- 波長による電磁波の分類
- 光電効果
- 光センサーの種類
- フォトダイオード
 - ・ フォトダイオードの原理
 - ・ (参考) 半導体関連の用語
 - ・ フォトダイオードの分類
 - ・ フォトダイオードの物性的構造による分類
 - ・ 各種フォトダイオードの特徴
 - ・ フォトダイオードの長所・短所
 - ・ フォトダイオードの種類と主な用途
- フォトトランジスタ
 - ・ フォトトランジスタの特性
- CdS光導電セル
 - ・ CdS光導電セルの原理
 - ・ CdS光導電セルの照度対抵抗特性
- 赤外線センサー
 - ・ 焦電型赤外線センサー
- フォトインタラプタ

➤ 太陽電池

- ・ アモルファスシリコン太陽電池と単結晶太陽電池との比較
- イメージセンサー
 - ・ イメージセンサーの特徴
- カラーセンサー
- ロータリー・エンコーダ

光センサー

● 光センサーとは

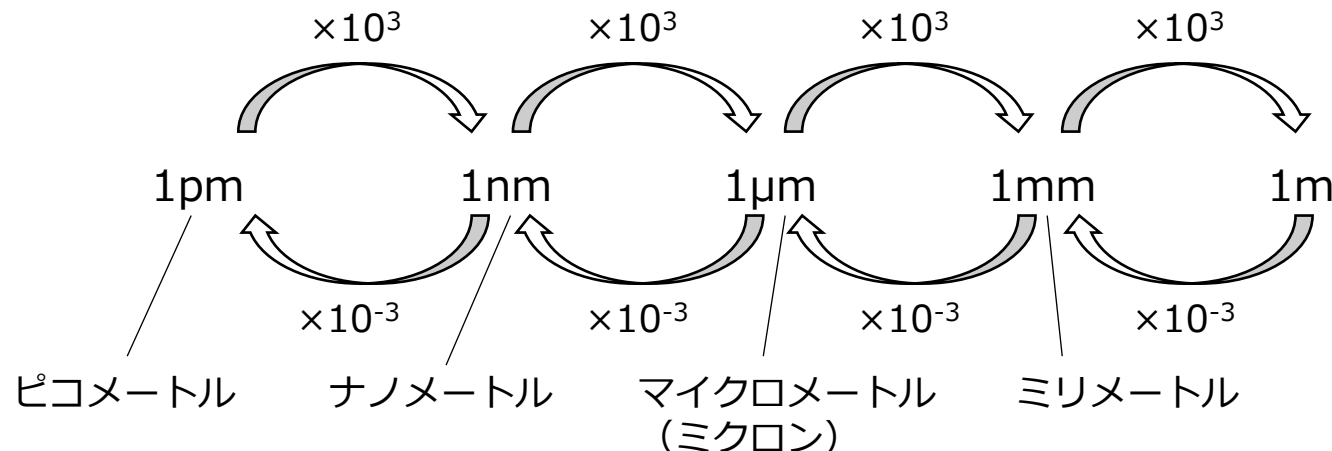
検出対象が光であるセンサー。ここでいう「光」には、目に見える可視光線その他、赤外線、紫外線、X線なども含まれる。こうした光を、物質の光電効果によって生じた電気的変化を測定することで光を検知する。

➤ (参考) 光とは

波長が1nm～1mmまでの電磁波。粒子としての性質と、波動としての性質を併せ持つ。光のうち、波長が380nm～780nmまでのものは目に見えるので、可視光線という。

可視光線の波長帯域は400nmであるのに対し、赤外線は780nm～1mmと非常に広い。また、紫外線は10nm～380nmである。

※単位の確認



● 波長による電磁波の分類

光

波長	名称	備考
10mm～	マイクロ波、極超短波、など	TV、ラジオ、携帯電話、無線LAN、航空機通信、等
1mm～10mm	ミリ波	
100μm～1mm	極遠赤外線	
5μm～100μm	遠赤外線	熱エネルギーが非常に大きく、赤外線ヒータなどに使われる。
1.5μm～5μm	中赤外線	
780nm～1.5μm	近赤外線	光通信や赤外線リモコンなどに使われる。
380nm～780nm	可視光線	
315nm～380nm	近紫外線	UV-A
280nm～315nm	中紫外線	UV-B
100nm～280nm	遠紫外線	UV-C
10nm～100nm	極遠紫外線	
1nm～10nm		
1pm～1nm	X線	
～1pm	ガンマ線	

● 光電効果

物質に光が当たると電流が流れる現象。光センサーは、以下のような性質を利用して光を検知する。

➤ 光起電力効果

光電効果によって半導体の接合部に電圧が生じる現象。

（応用される光センサー）フォトダイオード、フォトトランジスタ、（太陽電池）

➤ 光導電効果

光エネルギーによって抵抗率が減少し、物質の導電性が高くなる現象。内部光電効果ともいう。

（応用される光センサー）CdSセル、CdSeセル、PbSセル

➤ 光電子放出効果

光エネルギーによって物質から電子が外部に放出される現象。外部光電効果や、単に光電効果ともいう。また、放出された電子を光電子という。

（応用される光センサー）光電管、光電子増倍管（フォトマル）

● 光センサーの種類

光センサーには多くの種類がある。以下はその例。

分類	光センサーの種類	代表的な素子
接合あり	PNフォトダイオード	Si、Ge、GaAs
	PINフォトダイオード	Si
	アバランシェフォトダイオード	Si、Ge
	フォトトランジスタ (フォトダーリントン)	Si
	フォトIC、フォトサイリスタ (フォトリフレクタ、フォトインタラプタ)	Si
接合なし	光導電素子	CdS、CdSe、CdS・Se、PbS
	焦電素子	PZT、LiTaO ₃ 、PbTiO ₃
真空管類	光電管、フォトマル、撮像管、UVトロン	
その他	カラーセンサー	Si、a-Si（アモルファスシリコン）
	固体イメージセンサー	CCD型(Si)、CMOS型(Si)、CPD型(Si)
	位置検出用素子（PSD）	Si
	太陽電池（フォトダイオード）	Si、a-Si（アモルファスシリコン）

● フォトダイオード

光センサーの代表的なもの。フォトトランジスタ、フォトICなどは、いずれも受光部にフォトダイオードを使用して発展させたもの。

➤ フォトダイオードの構造

半導体のP-N接合部に光検出機能を加えたセンシングエレメント。一般には素材としてシリコン（Si）が用いられる。センサー部に増幅手段がないため出力信号があまり大きく取れない。しかし、入射光に対する直線性（リニアリティ）や応答特性が優れているため、様々な分野に幅広く使われている。

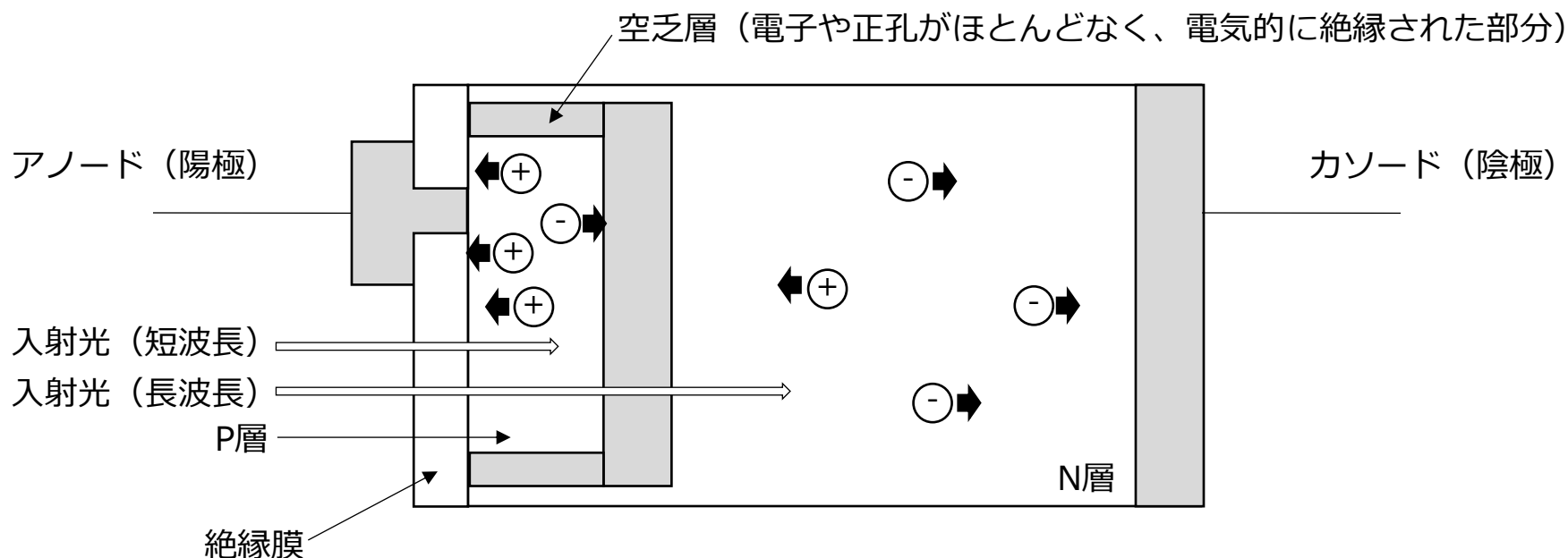
➤ フォトダイオードアレー

複数のフォトダイオードを配列したもの。カラーアナライザ、マルチチャンネル分光光度計、光スペクトラムアナライザなどに使用される。

● フォトダイオードの原理

フォトダイオードに一定エネルギー以上の光が当たると、電子が伝導帯に引き上げられ、もとの価電子帯に正孔が残る。この現象は素子内のP層、空乏層、N層のいたるところで発生し、空乏層中では電界の作用によって電子はN層へ、正孔はP層へ向かってそれぞれ加速する。ここでN層中で発生した電子は、P層から移動してきた電子とともにN層導電帯に集結する。一方、正孔は、N層中をP-N結合まで拡散し、加速されてP層価電子帯に集結する。

このように、フォトダイオードでは、入射光量が大きければ大きいほど、P層ではプラスに、N層ではマイナスにそれぞれ帯電し、一種の発電機となって電流が流れる。



●（参考）半導体関連の用語

➤ 半導体

導体（金属）と絶縁体との中間の抵抗率を示す物質。一般的に、温度が上がると電気伝導度が増す（抵抗率が下がる）（導体とは逆）。

➤ N型半導体

電圧がかけられると電子の移動によって電荷が運ばれる半導体。

➤ P型半導体

電圧がかけられると正孔（自由電子が移動して空位になった部分）の移動によって電荷が運ばれる半導体。

➤ 価電子帯

特定の原子核に拘束されている価電子が属するエネルギー帯。特に半導体の場合、伝導帯のすぐ下のエネルギー帯をいう。

➤ 伝導帯（導電帯）

電界の作用によって高い準位に持ち上げられた電子を含むエネルギー帯。一般的には伝導帯は空であり、すぐ下の充満したエネルギー帯からあるエネルギーレベルをもって分離されている。

● フォトダイオードの分類

フォトダイオードには様々な種類があり、使用目的や要求性能によって使い分けられている。

分類	フォトダイオードの例
物性的構造による分類	PN型、PIN型、フォtoaバランシェ型
使用素材による分類	GaAsPフォトダイオード、GaPフォトダイオード、シリコンフォトダイオード、ゲルマニウムフォトダイオード
外観形状による分類	受光面サイズによる分類 丸型、角型、分割型、直線型、異形型
機能による分類	位置検出用(PSD)、光計測用、リニア用、大電力用センサーモジュール、センサアレー
応答特性による分類	低速型、高速型、超高速型
波長感度による分類	紫外線用、赤外線用、可視光用、広帯域用
パッケージによる分類	フラットパッケージ型、メタルケース型、セラミックケース型、樹脂モールド型
用途による分類	光通信用、フォトカプラー用、カメラ用、光ディスク用、エンコーダ用、計測用
補助部材による分類	フィルタ付、レンズ付、コネクタ付、アンプ付

● フォトダイオードの物性的構造による分類

フォトダイオードは半導体のP-N接合に光エネルギーが照射されるよう構成されたもので、一般にシリコンがその素材として使われる。その内部構造は、P-N接合部を基本として、種々の物性的工夫がなされており、検出波長、応答性、感度などを適宜使い分けている。

フォトダイオードの種類		特徴
PNフォトダイオード	拡散型	低暗電流
	低容量拡散型	低暗電流、高速応答、高紫外・高赤外感度
	PNN ⁺ 型	低暗電流、高紫外感度、低赤外感度
PINフォトダイオード		超高速応答
ショットキー型フォトダイオード		高紫外感度
アバランシェ型フォトダイオード		超高速応答、内部増倍機能

● 各種フォトダイオードの特徴

➤ PNフォトダイオード

拡散型、低容量拡散型、PNN+型がある。

• 拡散型PNフォトダイオード

P-N接合の表面を SiO_2 膜で覆ったもの。暗電流が小さい。

※暗電流：入力信号に無関係に流れる電流のことで、雑音信号に相当する。

暗電流が小さいほど微弱な信号も正確に取り出すことができる。

使用素材：シリコン、GaAsP、GaPなど。

• 低容量拡散型PNフォトダイオード

N型半導体に不純物濃度の低い高抵抗型を使用し、空乏層を広げたもの。

拡散型と比べて接合容量がかなり小さい分、応答特性が改善される。

● 各種フォトダイオードの特徴

➤ PINフォトダイオード

P層とN層との間に、特に抵抗の大きいI層を作り、これによって接合容量を極端に小さくしたもの。低容量拡散型に比べて、応答特性がさらに改善される。

➤ ショットキー型フォトダイオード

N型半導体の表面に金（Au）などの薄い蒸着膜を形成し、ショットキー効果によるP-N接合を形成したもの。

※ショットキー効果：金属と半導体の間で整流効果を示すこと。

一般に、この種の素子は表面から接合部までの距離が短く作られているため、可視光から紫外線領域までの波長感度を有する。

➤ アバランシェ型フォトダイオード

アバランシェ増倍と呼ばれる現象を利用して受光感度を上昇させたもの。

※アバランシェ増倍：半導体中に大きな電界があると、光子の衝突によって発生する電子が加速され、他の半導体原子と衝突して複数の電子をはじき出す。ここでははじき出された電子は電界によって加速され、他の半導体原子と衝突してさらに電子をはじき出す。この連鎖によって移動する電子が爆発的に増える現象を、アバランシェ増倍という。

● フォトダイオードの長所・短所

- フォトダイオードの長所
 - 入射光に対するリニアリティが良い
 - 応答特性が良い
 - 一般に波長感度が広い
 - 低雑音である
 - 小型軽量である
 - 振動、衝撃に強い

- フォトダイオードの短所
 - 一般に出力信号（電流）が小さい
→一般的にはトランジスタやICなどによる増幅手段を併用する。

● フォトダイオードの種類と主な用途

種類	特徴	主な用途
PNフォトダイオード	<ul style="list-style-type: none">・ 紫外線から赤外線までの広範囲な波長感度を有する・ 入射光量に対する直線性が優れている・ 微弱な光にも検出感度を有する・ 応答特性がPINフォトダイオードよりも悪い	照度計、カメラの露出計、オートストロボの光センサー、煙センサー（火災センサー）、分光光度計
PINフォトダイオード	<ul style="list-style-type: none">・ 高速応答性・ 湿度特性がPNフォトダイオードよりも悪い	光通信、レーザーディスク、光リモコン
APD （アバランシェ型フォトダイオード）	<ul style="list-style-type: none">・ 光電流増幅作用を有する・ 広い波長感度を有する・ 暗電流が小さい・ 高速応答である	光ファイバによる光通信
GaAsPフォトダイオード	<ul style="list-style-type: none">・ 視覚度に近い波長・ 一般に可視光用	カメラの露出計、分光光度計
複合型フォトダイオードPSD （位置検出用フォトダイオード）	<ul style="list-style-type: none">・ 光スポットの位置検出・ 入射光の光軸合わせ	メカトロニクス各種光学系
フォトセンサーモジュール	<ul style="list-style-type: none">・ フォトセンサーと信号処理部が同居しているので高性能・ アンプ内蔵のため出力が大きい・ デジタル出力タイプは波長の立ち上がり、立ち下がり特性が良い	メカトロニクス各種光学系、オプトメカトロニクス

● フォトトランジスタ

フォトダイオードは極めて優れた応答特性を有し、測光範囲も広く、利用価値の高いセンサーのひとつ。一方で、出力電圧が非常に小さいという欠点もある。そのため、フォトダイオードを単体で使うことはほとんどなく、何らかの増幅手段を併用する。

フォトトランジスタは、フォトダイオードに増幅手段を合わせたもの。フォトダイオードとトランジスタを組み合わせている。従って、フォトトランジスタの性質は、フォトダイオードの出力特性にトランジスタの特性が加わったものと考えられる。

● フォトトランジスタの特性

➤ フォトトランジスタの応答特性

フォトトランジスタの応答特性は、一般にフォトダイオードのそれに比べて1桁以上遅くなる。これは、コレクタ、ベース間の接合容量がいちじるしく増大し、応答特性に悪い影響を与えることによる。

一般に、フォトトランジスタの応答特性はその負荷抵抗に大きく依存する。例えば、負荷抵抗を 100Ω から $1k\Omega$ へと10倍にただけで、応答特性が1桁程度低下する（応答時間が遅くなる）。そのため、応答特性を優先する場合、負荷抵抗を低めに設定する必要がある。一方で、出力利得は反対に低下するため、配慮が必要。

➤ フォトトランジスタの暗電流

一般に、フォトトランジスタの暗電流は、フォトダイオードと比較して100倍程度大きくなる。また、暗電流は高温になるほど増加するので、用途によっては温度補償を必要とする。

※温度補償：温度によって特性が変化する部品に対し、その温度変化による変動を抑えるような仕組み。

● CdS光導電セル

CdS（硫化カドミウム）を主成分とした光導電素子の一種。照射光によって内部抵抗が変化するため、一種の抵抗器と考えることもできる。そのため、フォトダイオードやフォトトランジスタに比べて回路的に扱いやすく、光センサーでありながら抵抗と同じような感覚で使うことができる。

主な用途は、街路灯の自動点滅器、カメラの露出計、照度計、フォトカプラーなど。

CdS光導電セルはフォトトランジスタに比べ、応答特性があまり良くない。そのため、使用場面は比較的緩やかな照度変化に限定される。しかし、バイアス光や負荷抵抗を使い分けることで、応答特性をある程度は改善することができる。

● CdS光導電セルの原理

CdS光導電セルは、光センサーのうち光導電素子に分類される。CdS光導電セルの原理は、以下の光導電効果による。

➤ 光導電効果

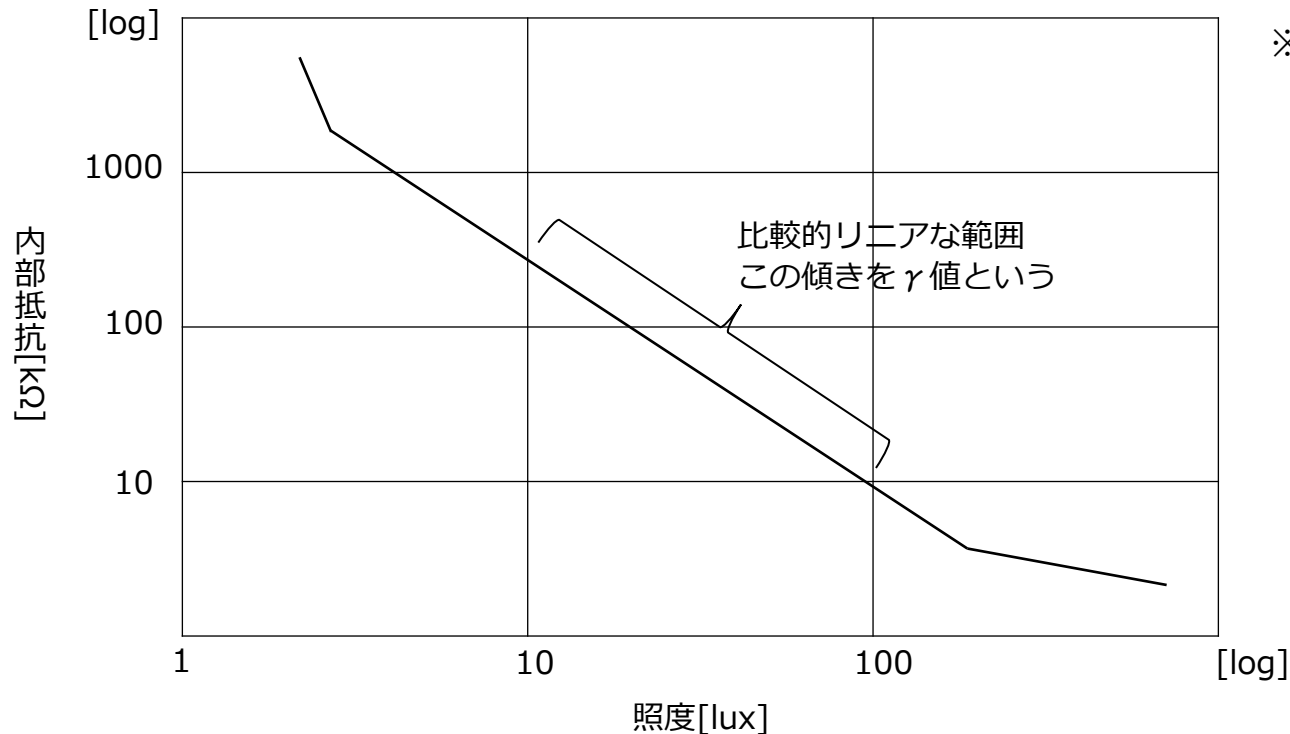
光導電体にある程度周波数の高い入射光が入ると、半導体に吸収された光エネルギーによって電子が伝導帯に引き上げられる。結果として生じる自由電子や正孔（これらがキャリアとなる）によって電流が流れ、電気伝導度が高くなる（内部抵抗が低くなる）。

光導電素子の材料にはCdSの他、セレン（Se）を加えたCdSeやCdS・Seなどもある。

● CdS光導電セルの照度対抵抗特性

CdS光導電セルは入射光量に対応して内部抵抗が変化する。全く光が当たらない場合は絶縁体に近い。光が当たると、その光エネルギーに応じて内部抵抗が低下する。

照度[lux]と内部抵抗[k Ω]の関係を両対数グラフにすると、ほぼ直線になる。この直線の傾き（の絶対値）を γ （ガンマ）指数、照度指数、 γ 特性、 γ 値などと呼ぶ。 γ 指数が大きいCdS光導電セルは、照度に対する抵抗値の変化が大きい。



※CdS光導電セルの γ 値は、照度10luxと100luxの2点間における内部抵抗から算出される。

● 赤外線センサー

赤外線センサーには、量子型と熱型とがある。

➤ 量子型赤外線センサー

光起電力効果や光導電効果を利用したもの。検出感度が高く、応答速度が速い。一方、検出感度に波長依存性があり、長波長の遠赤外線領域ではセンシングエレメントの冷却が必要になる。

フォトダイオード、PbSセル、CdSセルなどが含まれる。

➤ 熱型赤外線センサー

熱起電力効果、焦電効果、熱導電効果を利用したもの。検出感度が低く、応答速度が遅い。一方で、検出感度に波長依存性がなく、センシングエレメントの冷却を必要としない。

サーモパイル、PZT、LiTaO₃、サーミスタボロ・メータなどが含まれる。

● 焦電型赤外線センサー

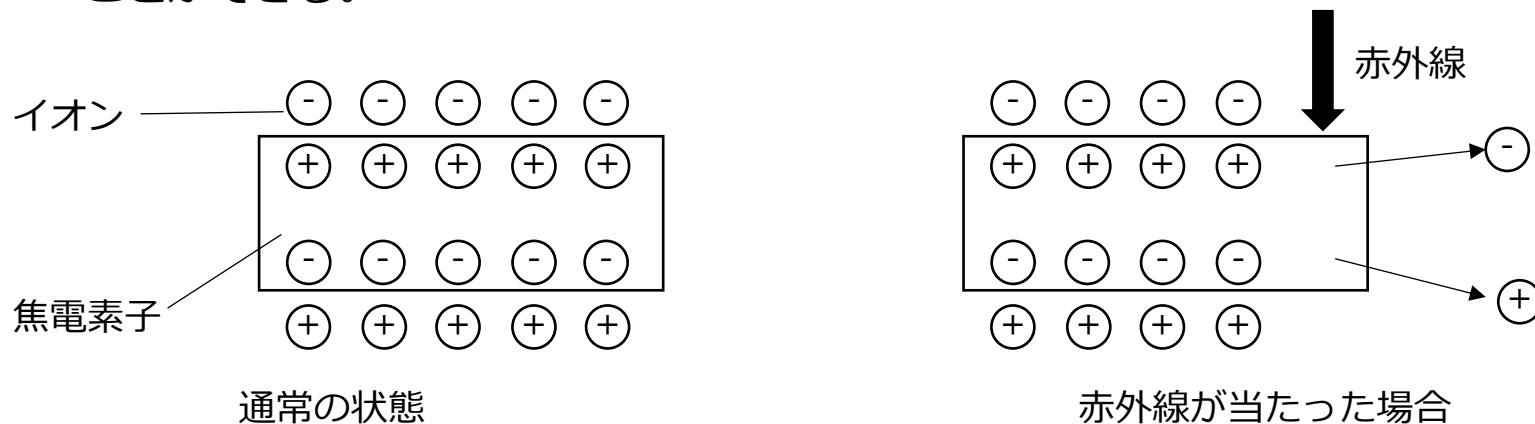
焦電物質の焦電特性を応用したもので、あらゆる物体から放射される赤外線エネルギーを検出するセンサー。

➤ (参考) 焦電特性

PZT（ジルコン酸チタン酸鉛）などの結晶構造の、温度変化に対応して表面電荷が変化する特性。

➤ 焦電型赤外線センサーの原理

焦電体は、赤外線が照射されて温度が変化すると、その表面の両端に、正負に分極された電荷が生じる。焦電体は常温でも分極しているが、表面にイオンを吸着しているので分極は観測されない。しかし、温度が変化すると分極も変化し、その変化分が電荷として放出される。この電荷を測定することで、赤外線センサーとして利用することができる。



● フォトインタラプタ

対向する発光部と受光部を持ち、発光部からの光を物体が遮るのを受光部で検出することによって、物体の有無や位置を判定する。構造上、光透過型と光反射型とに分けられる。

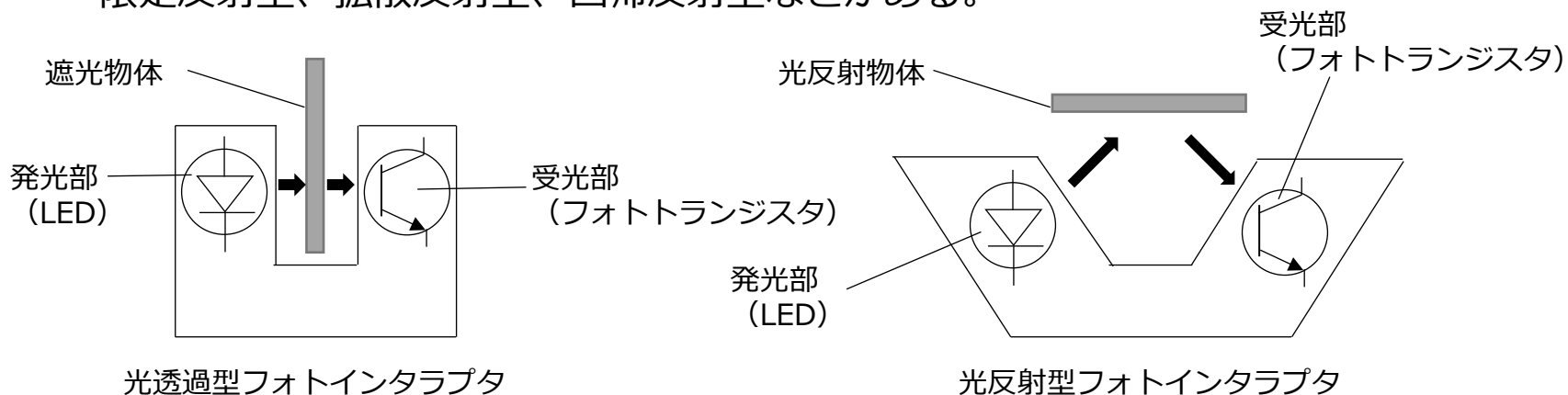
➤ 光透過型フォトインタラプタ

発光部と受光部との間にスリット円板などの遮光物体が通過するよう構成されたもの。出力信号が大きく、遮光物体の位置精度をそれほど要求しない。但し、発光部と受光部との間に遮光物体を介在させるため、小型化が難しい。

長距離用、中距離用、至近距離用がある。

➤ 光反射型フォトインタラプタ

発光部からの光を物体に当て、反射した光を受光部で検出する。光透過型に比べて外乱光の影響を受けやすいので、光に変調をかけて外乱光と区別しているものが多い。限定反射型、拡散反射型、回帰反射型などがある。



● 太陽電池

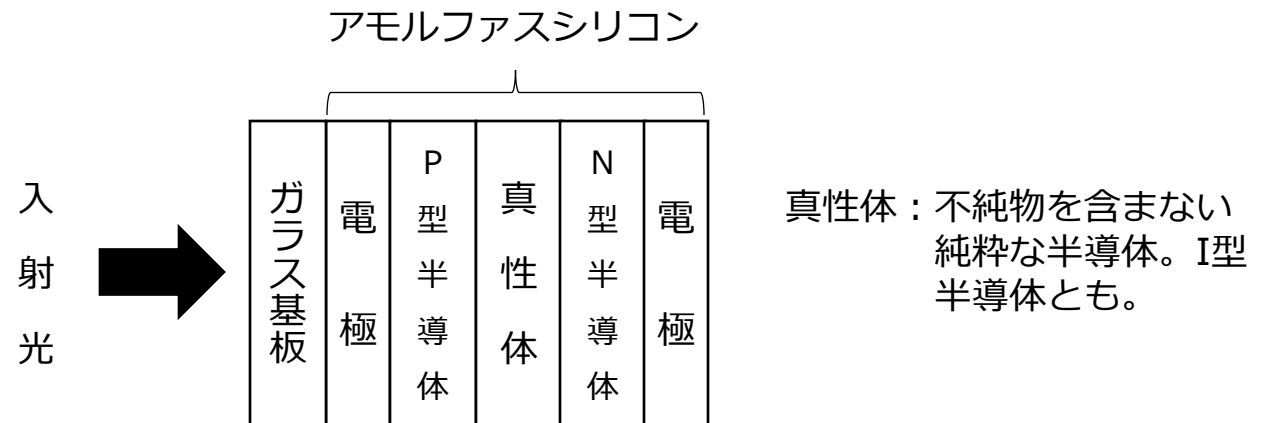
太陽電池は光エネルギーを電気エネルギーに変換する。原理に光起電力効果を用いており、フォトダイオードと基本的には同じ。光を受けて電気を出力するので、光センサーの一種と考えることもできる。

太陽電池は出力エネルギーを重視するので、高いエネルギー変換効率が要求される。一方、フォトダイオードは光センサーとして用いるので、応答特性が要求される。

➤ アモルファスシリコン太陽電池

太陽電池の欠点は、あまり大きな電力を取り出すことができないこと。この発電コストを改善した変換素子に、アモルファスシリコン（a-Si）太陽電池がある。

単結晶シリコンに比べて製造コストが安く、大面積、任意形状が可能。



アモルファスシリコン（a-Si）太陽電池の構造

● アモルファスシリコン太陽電池と単結晶シリコン太陽電池との比較

素材	アモルファスシリコン	単結晶シリコン
出力効率	4～12%	15～20%
分光感度特性	視感度に近い	近赤外光にピーク（800～900nm）波長感度を有する 広帯域の波長感度を有する（450～1100nm）
素材の厚さ	1 μ m以下の非晶質シリコン	200～510 μ mの単結晶シリコン
寿命、信頼性	非晶質のため、強い入射光に対し素子が劣化しやすい	単結晶のため、半永久的である
その他の特徴	大面積、湾曲構造の素子をつくることのできる 製造コストが安い	大型の素子が作りにくい 一般に高価

単結晶シリコン（Si）は、Si原子が空間的に繰り返しパターンを持って配列している。一方、アモルファスシリコン（a-Si）は結晶構造ではなく、Si原子がランダムな配列で構成されている。「アモルファス」とは「非晶質」という意味である。

また、アモルファスシリコン太陽電池は分光感度特性が視感度に近く、人間の目と同じような感じ方をするため、照度計やカメラの露出計などにも使われている。

● イメージセンサー

1次元または2次元の光学情報を時系列の電気信号に変換する光センサーの一種。イメージセンサーには真空管を用いた撮像管や、半導体を用いた固体イメージセンサーがある。固体イメージセンサーは小型、軽量、低電圧動作、低消費電力、焼き付きなしなどのメリットがあるため、広く使われている。

➤ 固体イメージセンサーの種類

固体イメージセンサーには、XYアドレス指定方式と、信号転送方式とがある。

- XYアドレス指定方式

各画素の発生信号を順次トランジスタで選択的に読み出す方式。
MOS型、CMOS型、CID型、PCD型などがある。

- 信号転送方式

各画素の出力信号を同時に電荷転送素子（CTD）に転送し、その後で順次信号を読み出す方式。
CCD型、BBD型などがある。

● イメージセンサーの特徴

イメージセンサーは、光電変換部、電荷蓄積部、電荷読み出し部から構成されている。検出素子にはフォトダイオードが使われている。

固体イメージセンサーは、シリコンの半導体基板上に多数の光電変換部と信号読み出し部がそれぞれ集積化されている。

➤ 固体イメージセンサーの主な用途

- 1次元イメージセンサー
ファクシミリ、複写機のパターン読み取り用、非接触寸法計測、位置計測など
- 2次元イメージセンサー
画像読み取り装置、テレビカメラの画像センサーなど

➤ CCDイメージセンサー

固体イメージセンサーであり、信号転送方式。光電変換部にフォトダイオード・アレーが用いられている。CCDカメラの解像度はその画素数が重要で、6分の1インチで6.8万画素、3分の1インチで41万画素、3分の2インチで200～400万画素を実現している。

その他、CMOSセンサーなどが家庭用ビデオカメラ、携帯電話などのモバイルツール、医療設備などに幅広く使われている。

● カラーセンサー

白色光中に含まれる固有の波長帯域を検出する光センサー。集積型カラーセンサーと多層型カラーセンサーとがある。

主な用途は、色の識別用、ビデオカメラ等のホワイトバランス用など。

➤ 集積型カラーセンサー

R、G、Bの3つに分かれた単色センサーを一体化したもの。R、G、Bに分解された3枚のカラーフィルタと3個のフォトダイオードから構成される。

分光感度特性はR、G、Bいずれも、ほぼ同等に扱うことができるため、これらの三原色を適宜分解することにより、中間色も含めた12色以上のカラー識別が可能。

➤ 多層型カラーセンサー

フォトダイオードの接合面の深さによって分光感度特性が異なることを利用したもの。波長が長くなるほど光子が半導体の内部に進入する性質を利用。

カラーフィルタが必要なく、素子数も少なくて済む。その反面、カラー判別回路が複雑になる、温度補償回路を必要とする、などの短所もある。

● ロータリー・エンコーダ

回転軸の回転角変位をデジタル信号として出力する。出力信号方式によって、インクリメンタル型、アブソリュート型、ハイブリッド型などがある。また、検出素子によって光学式と磁気式とに分けられる。光学式にはLEDとフォトランジスタ、LEDとフォトICなどの組み合わせが用いられている。

主な用途は、各種工作機械、自動組立機、角度計、回転計、ロボットアーム、その他各種位置決め装置など。

➤ インクリメンタル型

一様なスリットの入った円板（符号板）を用いる。LEDからの光を符号板に当て、スリットを通過してきた光をフォトICで検出する。LEDとフォトICを2組用い、それぞれで検出された信号（A相、B相）に対して、波形の高低の数を回転方向に応じて加減算することで、回転の角度を測る。

➤ アブソリュート型

符号板のスリットごとに各位置で異なる符号を割り当てたもの。絶対的な角度位置を出力することができる。

符号板をLEDとフォトICなどではさむ構造から、一種の光透過型フォトインタラプタと考えることもできる。