

第3章

光電変換から信号出力までの手法と特徴 CCDイメージ・センサの基礎


この章では、CCDイメージ・センサがどのような原理にもとづいて動作しているかを解説します。また、信号電荷を転送する機能をもった素子であるCCDが、走査という概念に対してイメージ・センサのなかでどのような役割を果たしているかという点と、最も一般的に使われているCCDイメージ・センサを例に、画素構造とその動作がどうなっているかを詳しく述べることにします。

3-1 どうやって動くのだろう

すでに、第2章で撮像の基本概念を光電変換と走査という二つのキーワードにより説明しましたが、ここではCCDイメージ・センサがどのような基本動作によって動いているのか、さらに踏み込んで解説しましょう。

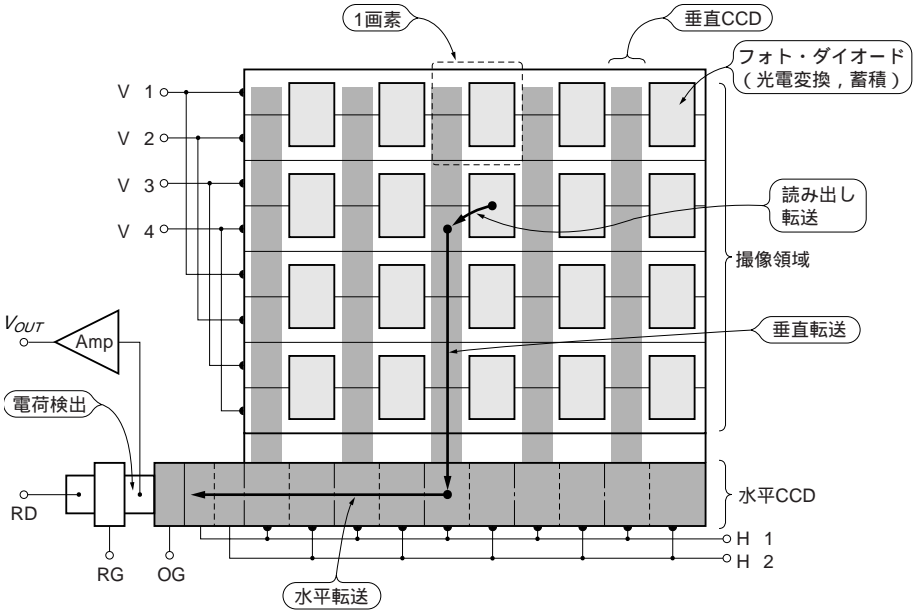
まず、CCDイメージ・センサの動作を分解してみると、次に示すような四つの基本動作により成り立っていると考えられます。

- (1) 光電変換(光を信号電荷に変換)
- (2) 電荷の蓄積(信号電荷をためる)
- (3) 電荷の転送(信号電荷を送る：CCDの機能)
- (4) 電荷の検出(信号電荷を電気信号に変える)

これらの動作は、3-1に示すCCDイメージ・センサの概略構造で言えば、光電変換と電荷の蓄積はフォト・ダイオードで、電荷の転送は垂直CCDと水平CCDで、電荷の検出はFDアンプという場所で行われます。

それでは、四つの動作を順に説明しましょう。

図3-1 典型的なCCDイメージ・センサの概略構造と四つの動作



3-1-1 光電変換

まず光電変換ですが、これは撮像面に当たった光の強さに応じて電荷が発生することです。別の言い方をすれば、物質のなかに存在する電子が光からエネルギーを受け取ることによって状態が変わることで、わずかな電界をかければその電子が自由に動くような状態になる現象です。

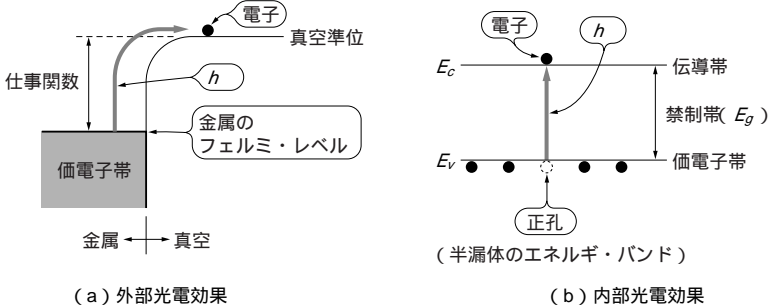
この光電変換は、物理的に2種類の状態変化に分類され、ひとつは外部光電効果、もうひとつは内部光電効果と呼ばれます(図3-2)。

二つの光電効果

外部光電効果は、固体の表面にある電子が光子(フォトン)のエネルギーを受けて真空中に放出される現象を指します。このとき、価電子帯と真空準位の差にあたる仕事関数と呼ばれるエネルギーを必要とします。一方、内部光電効果は、固体の内部で電子のとりうるいくつかのエネルギー準位のうち、エネルギーの低いほうにある電子が、光子のエネルギーにより高いほうに励起される現象です。

具体的には、半導体の一種であるSi単結晶では、原子のもつ電子軌道のエネルギーが結

図3-2 外部光電効果と内部光電効果



晶格子の周期性により帯状のエネルギー状態(バンド)を形成し、電子のとりうるエネルギー準位が価電子帯 E_v と伝導帯 E_c の二つに分かれます。このようなエネルギー準位の状態、つまりエネルギー・バンドにおいて、価電子帯にある電子が光のエネルギーを受けて伝導帯に励起される現象が内部光電効果です。

伝導帯に励起された電子は、わずかな電圧(電界)を与えれば移動するので、光の強さに応じた信号電荷として取り出せる可能性があります。半導体を使った CCD イメージ・センサは、この内部光電効果を利用して、光電変換による信号電荷を得ています。

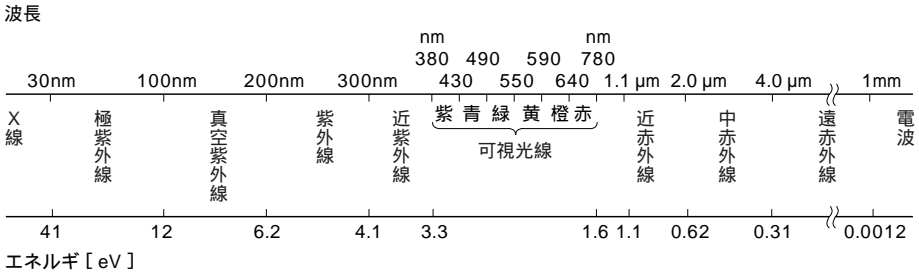
CCD イメージ・センサの材料に使われる Si 単結晶は、価電子帯 E_v と伝導帯 E_c の差が室温で約 1.1 eV あります*1。これを禁制帯(エネルギー・ギャップ)と称していますが、光電変換が行われるにはこの禁制帯より大きいエネルギーをもった光子が必要になります。では、そのようなエネルギーをもった光とはどんな光なのでしょう。光子がもつエネルギーは、プランク定数 h (6.626×10^{-34} J·s) と光の振動数 ν [/s, Hz] の積で表されます。また、光の振動数は光速 c (2.998×10^8 m/s) を光の波長 λ [m] で割った値ですので、光子のエネルギー E [J] は次の式で示されます。

$$E = h \nu = h \frac{c}{\lambda} \dots\dots\dots (3-1)$$

ここで言うエネルギー E の単位はジュールですので、これをエネルギー授受により電子の位置する電位の変化、すなわち電位差 [V] に直すには、電子の電荷量 q (1.602×10^{-19} C) で割る必要があります。すると、1.1 eV の禁制帯より大きいエネルギーをもつ光は、波長が約 1100 nm 以下になります。つまり、Si 単結晶で光電変換できる光の波長は最大約

*1：電子を 1V の電位差だけ移すのに必要なエネルギーが 1eV である。

図3-3 光の波長分布図



1100 nmということになり、これを基礎吸収端とも呼んでいます*2。この近辺の波長は、図3-3に示す光の分布⁽¹⁰²⁾のなかで近赤外光と呼ばれるものです。われわれ人間が目で感じることができる可視光(380 ~ 780 nm)の波長はそれより短く、したがってSi単結晶で光電変換することが可能です。

光の吸収

次に、光電変換を考えるうえで欠かせない光の吸収について解説します。

半導体に光が吸収される際、光子のエネルギーが電子のエネルギーなどに置き換わります。そのなかでも、光子が電子を価電子帯から伝導帯に励起するのに必要なエネルギーをもち、光電変換を起こすとき、それを基礎吸収と呼びますが、ここで行われる光の吸収の様子は、光の波長に対する感度(分光感度特性)に大きく影響しますので、とても大切な要素です。

イメージ・センサに使われるSi単結晶などは、照射された光がすべて結晶の表面で吸収されるわけではなく、結晶の中に入り込みながら表面から徐々に吸収されます。ここでは、光吸収過程の物理を詳しく述べることは省略して、具体的にSi単結晶を例に光が吸収される様子を見てみましょう。

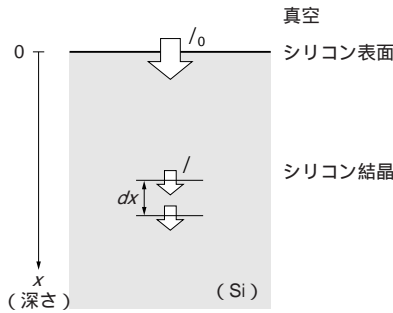
Si単結晶の基板の中における光は、図3-4のように、基板表面の座標を0として表面に垂直なx軸方向に吸収されながら進んでいくものとします。基板表面からの深さxにおける光強度をIとして、さらに短い距離dxを進んだ光強度の変化をdIとするなら、dIはその時点の光強度Iと進んだ距離dxに比例しますので、次のような式が成り立ちます。

$$dI = - I dx \dots\dots\dots (3-2)$$

ここで、 α は光の吸収係数です。この式から、結晶表面における光強度を I_0 とすれば、

*2：別のメカニズムにより、これより長い波長もわずかばかり光電変換する。

図3-4
光の吸収の様子



次のようになります。ただし、結晶表面における光の反射を無視しました。

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \dots\dots\dots(3-3)$$

これは、光強度 I の深さ方向の分布は指数関数で表されることを示しています。別の見方をすれば、光が減衰したぶんが表面と x の間で吸収された光になります。そこで、吸収係数 α に目を移すと、 α が大きければ光が基板表面近くですぐに吸収され、逆に α が小さければ基板深くまで光が進んでもなかなか吸収されないことを示しています。Si 単結晶の吸収係数 α が、光のエネルギーに対してどのように変化するかを図3-5⁽³⁰⁴⁾にグラフとして表しました。

このグラフが示す吸収係数から、可視光領域のなかでも波長の短い青色の光は比較的基板表面近くで吸収されるのに対して、波長の長い赤色の光は基板深くまで吸収されず到達することがわかります。それでは、人間の目に見える各色に対して、Si 基板のなかで光の半分が吸収されるのに必要な結晶の厚さ(深さ)を求めてみましょう。すると表3-1のように、青い光は $0.3 \mu\text{m}$ の深さがあれば半分が吸収されるのに対して、赤い光はその10倍の $3.0 \mu\text{m}$ も必要になることがわかります。

*

*

光電変換を簡単にまとめると、これは撮像面に照射された光のエネルギーを受けて信号電荷を得る動作であることがわかりました。また、CCD イメージ・センサに使われる Si 単結晶の光電変換を得るためには、Si 単結晶のエネルギー・バンドの状態から、光の波長は 1100 nm 以下である必要があります。さらに、光が Si 単結晶のなかで吸収される過程から、可視光のなかでも波長の長い赤の光が吸収される深さは、青い光に比べて約10倍の $3.0 \mu\text{m}$ が必要です。