

光電変換の基礎

正会員 江上 典文[†]

1. まえがき

現在、カメラは私たちの生活になくてはならない存在になっている。個人用としては、携帯電話やモバイル端末に付加された小型カメラ、デジタルスチルカメラ、ビデオカメラが盛んに利用されている。また、安心・安全の観点から、多くの場所に防犯カメラが設置され、車にも多種のカメラが搭載されている。さらに、病気の診断や治療にはX線カメラや内視鏡カメラが多く用いられている。このように日常生活で目にするところ以外でも、産業や学術、バイオ、アミューズメントなど、さまざまな分野で多種多様なカメラが活躍している。

イメージセンサは、このようなカメラの中に搭載されている電子デバイスで、カメラに入射した光の情報を電気信号に変換するという重要な役割を担っている。

本稿では、可視光を対象に、イメージセンサの最も基本的な機能である、光を電気に変換するしくみについて解説する。

2. 画像を構成するために必要な情報

カメラに被写体からの光が入射すると、入射した光は光学レンズによってイメージセンサ上に光の像として投映され、電気信号に変換される。この電気信号から画像を構成する際に必要となるのは、イメージセンサのどの位置に、どのような波長の光(被写体の色情報)が、どのような強さ(被写体の輝度情報)で入射したかという情報である。また、動画像の場合には、どのような時間間隔で光の像が電気信号に変換されたかという情報も必要となる。

通常、イメージセンサの表面は、図1に示すように、画素とよばれる独立した小さな領域に仕切られている。投映された光の像は細かく分割され、各画素で光電変換されるため、どのような順序で各画素から電気信号を読み出すかを決めておくことで、位置情報を取得することができる。ま

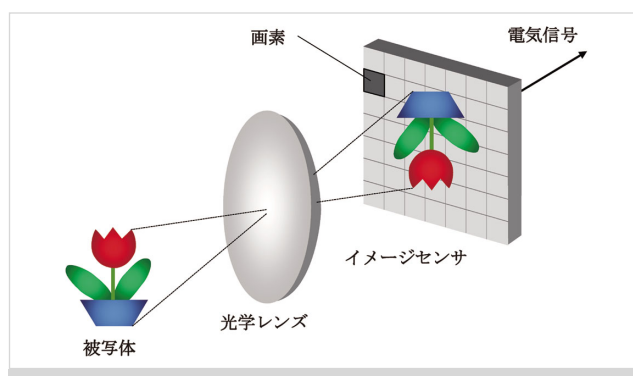


図1 撮像の概念

た、光の像を電気信号に変換する時間間隔も事前に決めておくことで、動画像を構成することができる。

3. 光電変換

光電変換とは、光を電気に変換するという意味であるが、より正確には、入射した光のエネルギーで、物質や、物質を構成する原子に束縛されている電荷を解き放つということである。束縛を解かれて自由になった電荷は、電界などによって容易に移動させることができるため、電荷の流れ、すなわち電流として増幅することや外部に取出すことが可能となる。

光電変換は、その動作原理から、外部光電効果^{1) 2)}と内部光電効果の2種類に分類される。また、内部光電効果は、さらに光導電効果³⁾と光起電力効果^{4) ~ 6)}に分けられる。

3.1 外部光電効果

外部光電効果とは、金属や半導体の表面に光を照射すると、光の持つエネルギーによって、金属内や半導体内の電子が外界(真空空間)に飛び出す現象である。

金属を例にとると、図2に示すように、導体である金属ではフェルミ準位(電子の占有確率が1/2となるエネルギーレベル)まで電子が満たされている。そのため、電子が真空空間に出るには、電子は真空準位(真空空間に存在する、運動エネルギーを持たない電子の最低エネルギーレベル)とフェルミ準位の差(仕事関数)を超えるエネルギーを入射した光から獲得しなければならない。

光のエネルギーは、光を粒子(フォトン)と考えると、一

[†] 近畿大学 産業理工学部 電気通信工学科

"Fundamentals of Image Input Device Technologies (1): Photoelectric Conversion" by Norifumi Egami (Faculty of Humanity-Oriented Science and Engineering, Kinki University, Fukuoka)

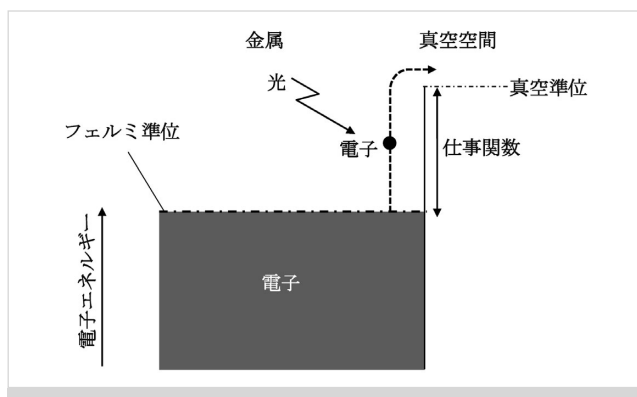


図2 金属のエネルギーバンド

つの光子が持つエネルギー E_p は以下に示す式(1)で表される。

$$E_p = hc/\lambda \text{ (J)} \quad (1)$$

ここで、 h はプランク定数、 c は光速、 λ は光の波長である。

また、 E_p をeV(電子ボルト)、光の波長 λ をnmの単位にとると、式(1)は式(2)に変換される。

$$E_p \div 1240/\lambda \text{ (eV)} \quad (2)$$

金属が光を吸収すると、電子は上記 E_p に相当するエネルギーを得るため、電子が真空空間に放出されるには E_p が仕事関数より大きいことが必要条件となる。ただし、電子が仕事関数より大きいエネルギーで励起されても、すべての電子が真空空間に飛び出すわけではない。励起された電子はさまざまな方向に運動するため、光から得たエネルギーを失うまでの間に金属の表面に到達した電子のみが真空空間に放出される。そのため、外部光電効果に寄与する電子は、物質表面の極近傍に存在する電子に限定される。

この外部光電効果は、微弱な光を2次電子増倍によって大きな光電流に変換する光電子増倍管の光電変換部などに利用されている。

3.2 内部光電効果

3.2.1 光導電効果

光導電効果とは、両端に電極を設けて電圧を印加した半導体に光を照射すると、半導体の抵抗が下がり、半導体中を流れる電流が増加する現象である。

半導体では、図3に示すように、電子が存在することのできない禁制帯のエネルギー幅(バンドギャップ)以上のエネルギーを持つ光が入射すると、価電子帯の電子が伝導帯に励起される。また、価電子帯には電子の抜けた孔である正孔が生成される。この伝導帯に励起された電子と価電子帯の正孔はドリフトや拡散によって容易に移動することからキャリアとよばれる。電圧の印加された半導体内にキャリアが生成されると、キャリアは電界に沿って移動し、電流となる。そのため、半導体中を流れる電流は、光が照射されていない状態に比べて、増加する。

この光導電効果は、固体イメージセンサが登場する前にイメージセンサの主流であった光導電型撮像管の光電変換

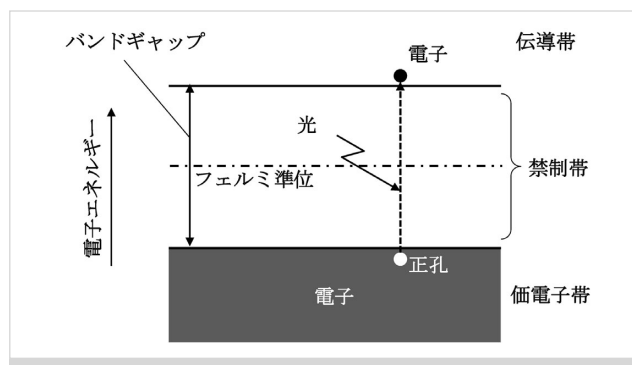


図3 半導体のエネルギーバンド

膜に利用されていた。

3.2.2 光起電力効果

光起電力効果とは、半導体のpn接合や、半導体と金属のショットキー接合など、整流作用を持つ半導体に、バンドギャップ以上のエネルギーを持つ光を照射したときに起電力が発生する現象である。

この光起電力効果は、現在、多くのカメラに搭載されている固体イメージセンサの光電変換に利用されているもので、4章でより詳しく説明する。

この章では、光電変換の分類とそれらが発現する要件などについて述べたが、光電変換を利用するうえで留意すべき点を以下に示す。

- (1) 光電変換で広義の意味でのキャリアを生成するには、物質の仕事関数やバンドギャップ以上のエネルギーを持つ光を照射しなければならない。言い換えると、あるエネルギーを持つ光でキャリアを生成するには、光のエネルギーより小さな仕事関数やバンドギャップを持つ物質を用いる必要がある。
- (2) 光の持つエネルギーは、式(1)または式(2)であらわされ、光の波長 λ のみに依存する。
- (3) 上記(1)が満たされているときには、生成されるキャリアの数は、照射される光の強弱、すなわち入射光量に比例する。

イメージセンサの光電変換では被写体の輝度情報を得るために上記(3)を利用しているが、そのためには前提となる(1)を満たす必要がある。可視光(波長 λ の範囲を380nm~780nmと仮定)を例にとると、波長 λ が長くなるほど光の持つエネルギーは低くなることから、可視光が持つ最も低いエネルギーは約1.6eV($\lambda=780$ nm)となる。そのため、可視光の全波長域で光電変換を可能とするには、仕事関数やバンドギャップがこの値以下の物質を用いる必要がある。

4. 光起電力効果を利用した光電変換素子

現在、可視光用固体イメージセンサの光電変換には光起電力効果が利用されている。ここでは、本効果を利用した光電変換素子の例としてpn接合フォトダイオードを取り上げ、その構造や動作などについて述べる。

pn 接合フォトダイオードの基板には主にシリコンが用いられている。シリコンのバンドギャップは約1.1eVで、可視光全域を光電変換することができる。また、シリコン原子の最外殻電子は4個で、5個の最外殻電子を持つリンなどの不純物（ドナー）がドーピングされると、電子が1個過剰となり、 n 型シリコンになる。この n 型シリコンでは、過剰な電子は室温程度の熱エネルギーで原子の束縛から解放されるため、多数キャリアは電子となるが、過剰な電子が抜けたイオン化ドナーは正に帯電していることから、熱平衡状態では n 型シリコンは電気的に中性となる。これとは逆に、3個の最外殻電子を持つホウ素を不純物（アクセプタ）としてドーピングすると、電子が1個不足し、 p 型シリコンになる。この p 型シリコンでは正孔が多数キャリアとなるが、電子を受け入れたイオン化アクセプタは負に帯電しているため、熱平衡状態では n 型シリコンと同様、電気的に中性となる。

上記 n 型シリコンと p 型シリコンを接合したものが pn 接合である。 pn 接合では、 n 型シリコンの電子と p 型シリコンの正孔が拡散によって、それぞれ相手方へ進入し、再結合することから、空乏層とよばれるキャリアの存在しない領域が接合部分につくられる。空乏層には、正のイオン化ドナーと負のイオン化アクセプタのみが存在し、キャリアの拡散を妨げる電界が形成される。この電界によるドリフトと、拡散がバランスした状態で、キャリアの移動は止まり、平衡状態となる。

この pn 接合を用いた光電変換素子が pn 接合フォトダイオードである。その模式的断面を図4に示す。 pn 接合フォトダイオードは、 p 型シリコンの一部に、 p 型シリコンよ

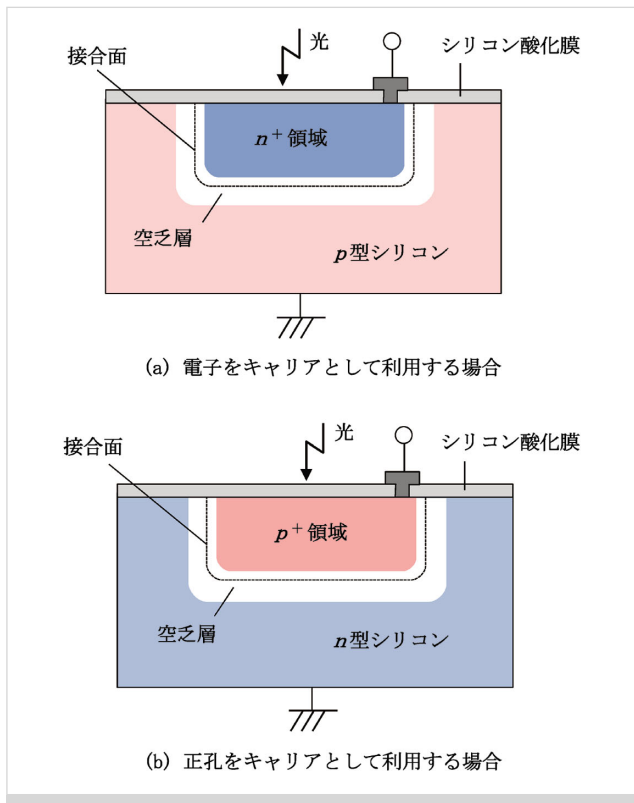


図4 pn 接合フォトダイオードの模式的断面

り不純物の濃度を高めた n^+ 領域を形成することで作製される。また、これとは逆に、 n 型シリコンの一部に p^+ 領域を形成することでも作製される。前者は入射した光によって生成された電子をキャリアとして利用する場合に、また、後者は正孔を利用する場合に用いられる。

この pn 接合フォトダイオードをイメージセンサの光電変換に用いる場合には、逆方向バイアス状態で使用される。例えば、図4(a)に示す、 p 型シリコンの一部に n^+ 領域を形成した pn 接合フォトダイオードでは、 p 型シリコンを接地し、 n^+ 領域に正の電圧を印加した後、 n^+ 領域を電気的に切り離した状態で使用される。逆方向バイアス電圧が印加されると、図5に示すように、バイアス電圧を印加しない場合に比べて、接合部分につくられる空乏層が拡大する。この空乏層にバンドギャップより大きなエネルギーを持つ光が入射すると、図6に示すように、価電子帯の電子が伝導帯に励起され、2種類のキャリア、電子と正孔が生成さ

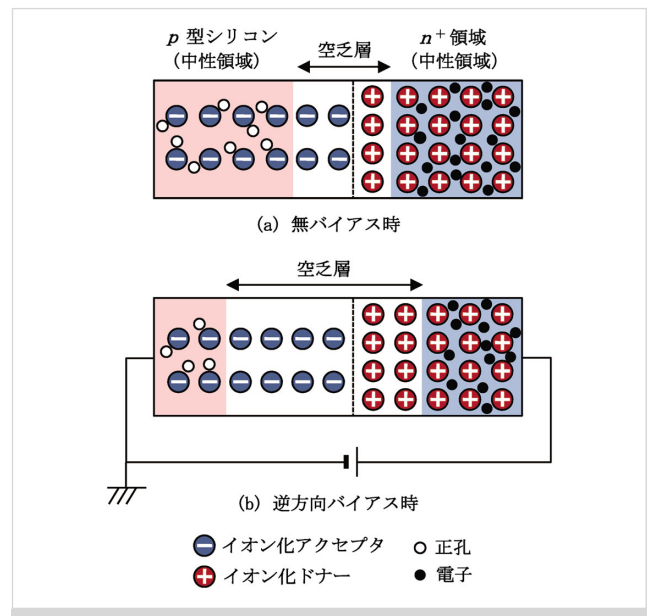


図5 pn 接合における空乏層の広がり

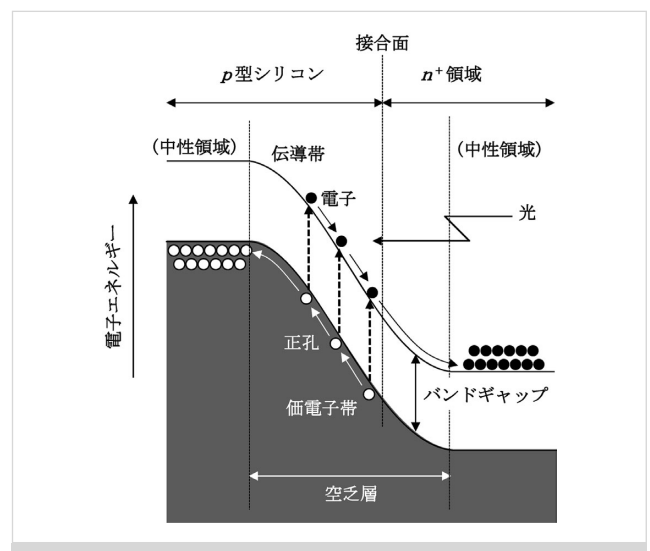


図6 pn 接合におけるエネルギーバンド

れる。電子は、空乏層に存在する電界によって、 n^+ 領域の中性領域に移動し、蓄積される。一方、正孔は p 型シリコンの中性領域に移動し、素子の外部に排出される。また、 p 型シリコンや n^+ 領域の中性領域で光が吸収された場合には、空乏層と同様、電子と正孔が生成されるが、これらのキャリアが信号に寄与する割合は小さい。これは、 p 型シリコンの中性領域で光が吸収された場合を例にとると、光によって発生したキャリアのうち、電子は拡散によって空乏層側に移動するが、多くの電子は p 型シリコン中性領域の多数キャリアである正孔と再結合し、空乏層にたどり着いた電子のみがドリフトによって n^+ 領域に移動し、信号となるためである。このように、 pn 接合フォトダイオードでは空乏層での光電変換が信号に寄与する割合が大きいため、ダイオードを逆方向バイアス状態にすることで空乏層を拡大し、光電変換の有効利用を図っている。

上記 pn 接合フォトダイオードでは、キャリアは一定時間（動画の場合は画像と次の画像を提示する時間間隔に相当）、生成、蓄積された後、外部回路に読出される。また、このとき、外部回路に流れる電流は光電流と暗電流の和になる。光電流は、入射光によって生成されたキャリアによる電流で、入射光量に比例する。一方、暗電流は入射光とは無関係な電流である。この暗電流は画質劣化の要因となることから、その発生を抑制することができるフォトダイオード（埋込みフォトダイオード）⁷⁾も開発、実用化されている。図7に、電子をキャリアとして利用する埋込みフォトダイオードの模式的断面を示す。 pn 接合フォトダイオードと異なる点は、 p 型シリコンの一部に形成された n 領域の上部（光入射側）に、高濃度な p^+ 層が設けられていることである。通常の pn 接合フォトダイオードでは、シリコンとシリコン酸化膜の界面に界面準位とよばれる電子が存在できる準位がある。そのため、界面近傍の電子が熱エネルギーを得ると、この界面準位を介して、電子が価電子帯から伝導帯に励起され、暗電流となる。一方、埋込みフォトダイオードでは、高濃度な p^+ 層を挟むことで、界面近傍の電子密度を低く抑え込み、この暗電流の発生を抑制している。この埋込みフォトダイオードは、現在、高画質を実現できるフォトダイオードとして多くのイメージセンサに採用されている。

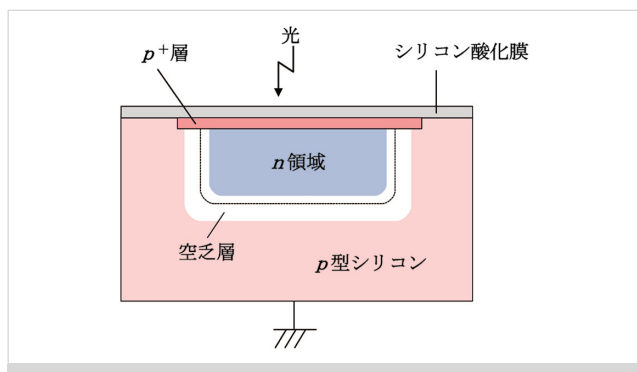


図7 埋込みフォトダイオードの模式的断面

5. 光の波長情報の取得 ～色再現～

ここでは、被写体の色情報を得るために、イメージセンサやカメラでは入射した光の波長をどのようにして識別しているかについて述べる。

原理的には、イメージセンサの各画素に、どのような波長の光が、どのような強さで入射しているかがわかり、これをディスプレイで再現できれば、被写体の色と輝度とを忠実に再現することができる。しかし、このような方法の実現には、多大な技術的困難などを伴うことから、被写体の色再現については光の三原色という原理を利用している。この原理は、可視光の長波長域に位置する光（人間は赤色に感じる；赤色光）、中波長域に位置する光（緑色光）、短波長域に位置する光（青色光）を基準（原色）に取り、それらを加法混合することで、人間が光によって感じる色のほとんどを再現することができるというものである。このことは、入射した光から赤、緑、青に相当する波長成分の光を取出し、その強弱を電気信号に変換することで、被写体の色と輝度とを再現できることを示している。原色の取り方や入出力デバイスの性能などによって再現できる色の範囲は限定されるが、人間が見てほとんど違和感がない程度に被写体の色を再現することができる。

上記光の三原色に対応した電気信号を得るには、三板式、単板式とよばれる二つの方法がある。前者の三板式は、光学レンズを通して入射した光をプリズムで赤、緑、青に相当する波長成分に分離し、それぞれの光の輝度を三つのイメージセンサで電気信号に変換する方法である。また、後者の単板式は、図8に示すように、一つのイメージセンサの前面に、赤、緑、青のいずれかの光のみを通す3種類のカラーフィルタを離散的に配置することで、光の三原色に対応した電気信号を得る方法である。三板式では、原理上、単板式に比べて、より高画質なカラー画像を得ることができるが、プリズムが必要でカメラが大きく、重くなるため、一般的なカメラには主に単板式が採用されている。

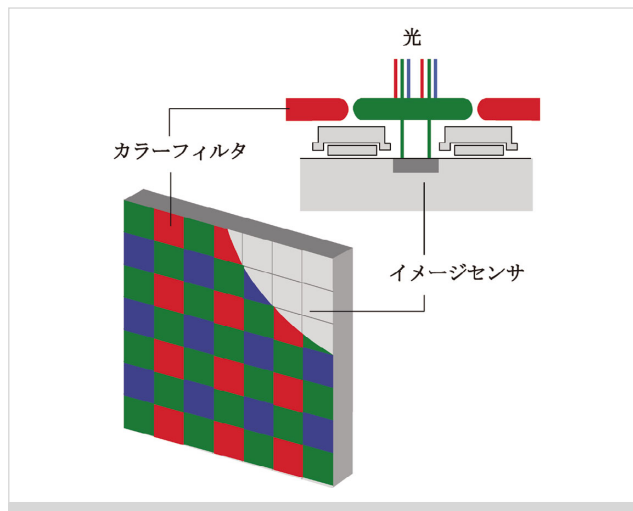


図8 カラーフィルタの一例（ベイヤー配列）

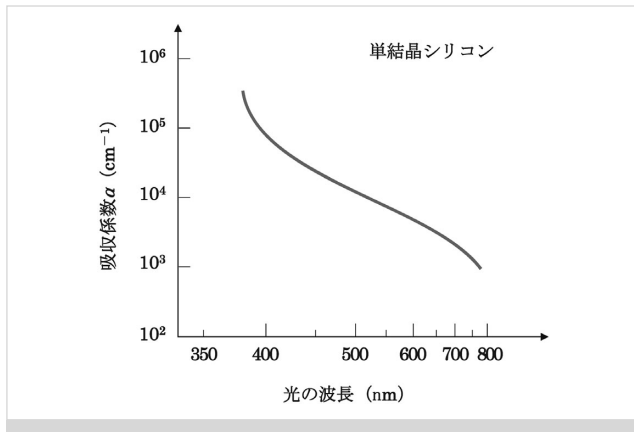


図9 吸収係数の入射光波長依存性

このように、入射した光を光の三原色に波長分離することで、被写体の色をほぼ再現することができるが、その際、留意しなければならない点がある。それは、イメージセンサの光電変換では入射した光が物質に吸収されて、光の強弱に対応した数のキャリアが生成されることを利用しているが、この光の吸収が物質や入射する光のエネルギーによって異なることである。

半導体を含む物質に光が入射すると、物質表面から深さ x cm の位置での光強度 I は以下に示す式 (3) で表される。

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

ここで、 I_0 は物質表面 ($x=0$) での光強度、 α は光の吸収係数である。

式 (3) は、 α が大きいほど光は物質の表面近くで吸収され、 α が小さいと光が物質に深く侵入してもなかなか吸収されないことを示している。この吸収係数 α の値は物質や、入射する光のエネルギー、すなわち光の波長 λ に依存する。

現在、可視光用固体イメージセンサの光電変換材料に用いられているシリコンでは、図9⁸⁾⁹⁾に示すように、吸収係数は、入射する光の波長 λ に強く依存し、 λ が短くなるほど α は大きく、また、 λ が長くなるほど α は小さくなる。赤色光 (波長 $\lambda=700$ nm)、緑色光 ($\lambda=530$ nm)、青色光 ($\lambda=450$ nm) がシリコンに入射したとき、それぞれの光が侵入する深さと光強度 (I/I_0) との関係を図10に示す。入射した光の強度が50%となる、すなわち入射した光の半分が吸収される深さは、赤色光では約 $3.2 \mu\text{m}$ 、緑色光では約 $0.8 \mu\text{m}$ 、青色光では約 $0.3 \mu\text{m}$ となり、赤色光と青色光では光が吸収される深さが一桁異なることがわかる。このことは、イメージセンサの光電変換部を設計するうえで悩ましい問題となるが、通常は、光が最も深く侵入する赤色光に合わせて光電変換部は設計される。

6. むすび

本稿では、可視光を対象に、イメージセンサの最も基本的な機能である光電変換のしくみについて述べた。

光電変換そのものは物理的な現象であるが、この現象をい

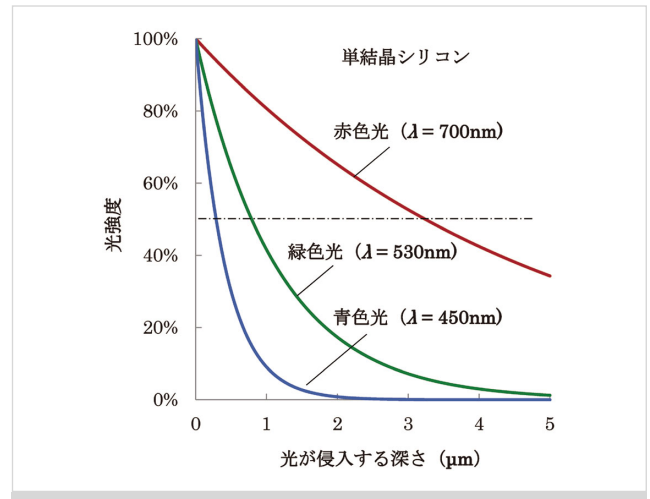


図10 光強度と光が侵入する深さとの関係

かにしてイメージセンサに取り込むか、また、性能をより高めるにはどのような構造が最適かなどの観点から、これまで研究開発が進められ、今もその努力が続けられている。

現在、可視光用イメージセンサではシリコンを用いた光電変換素子が圧倒的な優勢を誇っており、当面、この状況は続くと思われるが、一方で、新たな試みとして、有機材料を用いた光電変換やイメージセンサの研究開発なども進められており、将来が期待される。(2013年10月24日受付)

〔文 献〕

- 1) H.R. Hertz: "Ueber einen Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die electrische Entladung", Annalen der Physik, 267, 8, pp.983-1000 (1887)
- 2) A. Einstein: "Ueber einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt", Annalen der Physik, 322, 6, pp.132-148 (1905)
- 3) W. Smith: "Effect of Light on Selenium during the Passage of an Electric Current", Nature, 7, p.303 (1873)
- 4) M.E. Becquerel: "Memoire sur les Effects Electriques Produits sous l'Influence des Rayons Solaires", Comptes Rendus Hebdomadaires des Seances de L'Academie des Sciences, 9, pp.561-567 (1839)
- 5) W.G. Adams and R.E. Day: "On the Action of Light on Selenium", Proc. Royal Soc., A25, pp.113-117 (1876)
- 6) V.L. Bergman: "Uber eine Neue Selen-Sperrschicht Photozelle", Physikalische Zeitschrift, 32, pp.286-289 (1931)
- 7) 寺西, 河野, 織田, 石原: "p-n-p 構造フォトダイオードを用いた IL-CCD の残像特性", テレビ大全, pp.45-46 (1981)
- 8) W.C. Dash and R. Newman: "Intrinsic Optical Absorption in Single-Crystal Germanium and Silicon at 77° K and 300° K", Physical Review, 99, 4, pp.1151-1155 (1955)
- 9) G.E. Jellison, Jr. And F.A. Modine: "Optical Absorption of Silicon between 1.6 and 4.7 eV at elevated temperatures", Appl. Phys. Lett., 41, 2, 15, pp.180-182 (1982)



江上 典文 1980年、九州工業大学工学研究科電気工学専攻修了。同年、NHK入局。徳島放送局を経て、1983年より、放送技術研究所に勤務し、冷陰極HARP撮像板、固体撮像デバイスの研究開発に従事。2013年より、近畿大学産業理工学部電気通信工学科教授。博士(工学)。正会員。