

## ■8 群 (情報入出力・記録装置と電源) - 4 編 (画像入力とカメラ)

---

# 1 章 撮像デバイス

### ■概要■

#### 【本章の構成】

## ■8群-4編-1章

### 1-1 撮像デバイスの歴史

(執筆著：安藤隆男) [2010年12月 受領]

#### 1-1-1 テレビ事始

撮像デバイスは、多様な画像システムの中で画像情報を取り込む重要な役割を担う。その歴史は、静止画である書画を送るファクシミリと動画像のテレビジョンの研究開発にまで遡ることになる。

ファクシミリは1843年に Alexander Bain が書画伝送法を考案したのに始まるとされる。こちらは静止画の伝送が目的であるのに、テレビジョンは初めから実際の人物や景色などの動画像を伝送しようとするもので、そこで考案された様々な撮像デバイスが今日の撮像デバイス発展の基礎をなしている。

我が国でのテレビジョンの研究開発は、高柳が浜松高等工業学校に赴任した1924年に始まった。高柳はその動機の一として、東京の例えば歌舞伎座から中継放送をして、音だけでなく舞台全体の様子が映画のように映って、浜松にいながら歌舞伎を楽しむことができる、無線遠視法のような仕掛けを作るために浜松高工へ来たかった」と自筆の書物で回顧している<sup>1)</sup>。そして、1926年12月に静止画であるが「イ」の字を映し出すことに成功した。このとき、使用した撮像デバイスは図1・1に示すように、中心から孔までの距離が少しずつ変化している小さな孔を螺旋状に並べたニポー円板を回転させることで光学像を走査し、光学像の明暗を光電管で検知する方式であった。

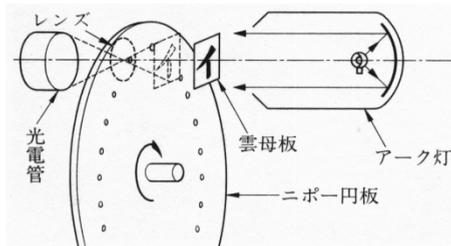


図1・1 ニポー円板による撮像(参考文献1)から引用)

テレビジョンで光学像を電気信号に変換する画像入力、技術的にみて二つの重要な段階がある。第一は、実際の光景をカメラなどに映し出し、その光の強弱を電気に変換すること。第二にカメラに映し出された画の分解(走査)である。この第二の局面こそがテレビ独自のもので、撮像デバイス発展の歴史の中で最大の課題として常に付きまとう。機械的な方式は、画の分解能力を細かくしようとすると、様々な面で無理が予想され、研究の中心が電子的な走査法の開発に移るのはごく自然な流れであった。この解決には真空の中を走る電子線を自由に動かすブラウン管の動作が重要な手掛かりとなった。

#### 1-1-2 機械式から電子式(撮像管)へ

1927年に米国の P. T. Farnsworth は世界初の電子走査式の解像管「イメージディセクタ」を考案し、映像撮影に成功した<sup>2)</sup>。感度が低く実用にはならなかった。1931年に V. K. Zwornik

と高柳が、各画素の信号を読み出すまで貯めておく積分方式を別個に発明した。この原理は、その後に見られる撮像管や固体撮像デバイスでも使われ、技術史上でも価値の高い画期的な発明といえる。1933年、Zworkinは光電面に光が照射されて電荷が生じる位置を高速の電子線で走査することにより光の強弱を電気信号に変換するアイコノスコープを開発、この積分方式を実現した<sup>3)</sup>。イメージディセクタと比較して高感度で、屋外の景色を鮮明に撮像することに成功し、今日のテレビジョン発展の素地をつくった。

1941年、米国でNTSC方式の白黒テレビジョン放送が開始され、アイコノスコープは初期の放送に使われたが、スタジオ用として使用するには感度は不十分であった。この原因は、高速電子ビームで光電面の各画素を走査する際に発生した2次電子が画素の周りに降り戻り、光により生じた電荷を放電してしまうためである。そこで1939年、A. Roseらにより2次電子が発生しない低速度電子ビーム走査方式が考案された<sup>4)</sup>。

1946年にA. Rose, P. K. Weimerらより、この低速度走査方式を利用した新しいイメージ型撮像管イメージオルシコンが考案され<sup>5)</sup>、製品化された。この撮像管は、光電変換を行うイメージ部と走査部、更に電子増倍部からなる。イメージオルシコンは高い感度を持ち、室内照明でも良質な撮像が可能になった。これによりスタジオでの番組制作が容易に行えるようになった。

我が国でも1940年にNHKによるテレビの実験放送が始まると、テレビカメラにイメージオルシコンが使われ、1958年からは国産のイメージオルシコンが使われるようになった。1954年1月には米国NBCがNTSC方式によるカラーテレビの本放送を始めた。我が国でも1956年12月にNHKがカラーテレビの実験放送を開始、1964年10月に開催されたオリンピック東京大会を契機にテレビ時代が到来した。

イメージオルシコンによる画像の品質は高く、テレビジョンの爆発的發展に大きく貢献したが、製造が難しく、高価の割には寿命が短く、また雑音も目立ち、長時間の使用で焼き付きが生じるなどの欠点もあった。更に、テレビのカラー化が進むと、赤、緑、青に対応した多管式カメラが必要になる。複数のイメージオルシコンを使ったカメラは大型でかつ重く、そのうえに放送前の調整と余熱に時間がかかるなどカメラ運用に支障が生じていた。このため1960年代の後半でイメージオルシコンの時代は終わることになる。

1950年、RCAのP. K. Weimerらが光電変換膜に光導電材料の $Sb_2S_3$ を使用し、信号電荷の読み出しに低速度電子ビーム走査を使った光導電型撮像管ビジコンを発表した<sup>6)</sup> (図1・2)。小型で構造が簡単で、動作が容易で使い勝手はよかったが、残像が多く、イメージオルシコンと比べると画質が劣るので、フィルム送像用カメラくらいでスタジオ用カメラには使われなかったが、小型、長寿命で価格も安いことから主に工業用テレビ(ITV)や医療用分野で使われた。例えば、光導電膜に赤外線に感度をもつPbO/PbSや、焦電材料を使った赤外用ビジコンや、X線に感度をもつ膜を使ったX線ビジコンなどは、肉眼では認められない赤外面像の観測や材料の非破壊検査などの分野にもテレビカメラの応用を拓いた。

カラーテレビ時代で注目されたのは、1963年にオランダのフィリップスが開発した光導電型撮像管ブランビコンである<sup>7)</sup>。光導電ターゲットは酸化鉛(PbO)膜である。ブランビコンは小型で暗電流が極めて低く、低残像、高感度で画質も良いことからカラー放送用カメラに適し、一時期、放送局のカラーカメラの多くをブランビコンが独占した。このブランビコンは、日本でも松下電子工業などが製造を始め、放送用カメラに供給した。

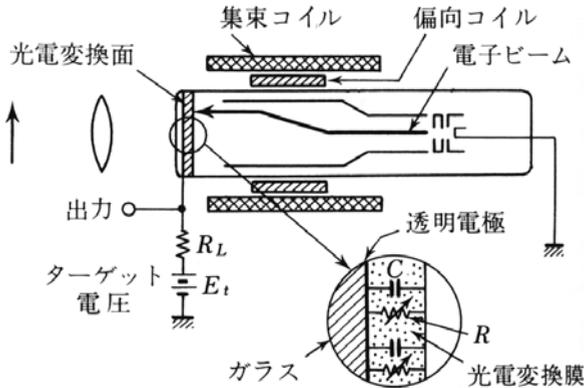


図 1・2 代表的な光導電型撮像管の構造

我が国では 1970 年代に入り、高性能な光導電型撮像管の開発を目指した光導電材料の研究開発が進められた。1971 年に東芝から光導電膜に CdSe を使ったカルニコンが開発され、高感度で各種の ITV に多用された<sup>8)</sup>。1972 年には NHK が日立製作所と協力して光導電膜に Se-As-Te 系のカルコゲナイド系アモルファス半導体を使った高性能な光導電型撮像管サチコンの開発に成功した<sup>9)</sup>。低残像、高解像度で成分の組成を変えることによってカラー撮像に適した分光感度を得ることができ、しかも比較的安価なことから、放送用から家庭用のカラーカメラまで国内外で広く普及したことは特筆してよい。特に、解像度に優れ、小型化しても高い画質が維持されるので、小型化されたサチコンを使ったハンディカメラが開発され、機能性のある報道取材や番組制作を可能にし、その後の ENG (Electronic News Gathering) 時代の先駆けとして活躍した。更に 1973 年、松下電器は光導電膜に ZnSe や ZnCdTe を用いた光導電型撮像管ニュービコンを開発した<sup>11)</sup>。近赤外までの広い分光感度特性を生かして、夜間または暗所の監視用、X 線テレビ用などの分野で使われた。1967 年にはベル研からテレビ電話用として、信頼性の高い撮像管を得る目的で、光導電膜に多数の pn 接合を形成した Si 単結晶を用いたシリコンビジコンも発表された<sup>10)</sup>。

このような多様な光導電型撮像管の開発により、何でも見てみたいという人類の欲望の多くを満たすことはできたが、撮像管は高価で、寿命が短く、取り扱いが難しい製品のため、これを使ったテレビカメラといえばほとんど放送局用か産業、医療などの業務用で、プロフェッショナル向けに限られていた。

カラーカメラの小型化のためには 1 本の撮像管でカラー撮像ができることが望まれた。単管カラーカメラ用撮像管には、映像信号を取り出す透明電極を 3 原色に対応して 3 分割したトライカラービジコンが 1959 年に P. K. Weimer らにより開発されたが、実用化には至らなかった。我が国では、ソニーや日本コロムビアが光導電膜上にストライプ状の 3 原色フィルタを交互に並べ、並び方の工夫で 3 原色の映像信号を位相で分離する方式や周波数別に分離する方式の単管カラー撮像管を開発した<sup>12), 13)</sup>。その後、各社から様々な分離方式の小型化された撮像管が開発、製品化された。1970 年代中頃には、これら単管カラー撮像管を使った家庭用ビデオカメラが数多く商品化され、この分野で我が国が世界の主導権を握るに至った。

### 1-1-3 固体撮像デバイスの誕生 — MOS型 vs CCD型

1947年, ベル研の J. Bardeen, W. H. Brattain, W. B. Shockley によるトランジスタの発明, ならびに 1948年の W. H. Shockley による接合トランジスタの発明は, まったく新しい原理に基づく増幅, 発振可能な半導体デバイスを生み出し, 1970年までには, これまで能動素子の地位を独占してきた真空管を次々とトランジスタに置き換えた. このような時代の中で撮像管の固体化もごく自然の流れではあったが, 実用的な性能を得るには, モノリシック集積回路技術が必要とされ, 撮像管の固体化は大きく遅れた.

1957年, J. ack S. Kilby による集積回路の発明, 1958年の R. Noyce によるシリコンプレーナーICの発明を契機に, 複数のトランジスタを同一 Si 基板上に製作し, 電子回路としての機能をもたせたモノリシック集積回路が経済的に生産できるようになった.

固体撮像デバイスの概念の誕生は, 1963年, ハネウェルの S. R. Morrison によるフォトスキャナー, 1964年に IBM から発表されたスキャニスタに遡る<sup>14), 15)</sup>. しかし, 信号の蓄積効果をもたないため, 外の光景を撮るのには適さなかった. 1967年, RCA の P. K. Weimer らがビジコン型撮像管の等価回路的アナロジーから電子ビームの働きをディジタルシフトレジスタで置換した固体撮像デバイスを CdSe 薄膜トランジスタで実現した<sup>16)</sup>. その後, 1967年にフェアチャイルドの G. P. Weckler らやウェスチングハウスの M. Schuster らによる MOS 型ならびにバイポーラ型のデバイスが報告され<sup>17), 18)</sup>, 固体撮像デバイスへの期待が盛り上がった. 特に, ソースを浮かした MOS トランジスタで蓄積動作を実現した G. P. Weckler の提案は, 固体撮像デバイスの基本構成として今日でも広く応用されている<sup>17)</sup> (図 1・3).

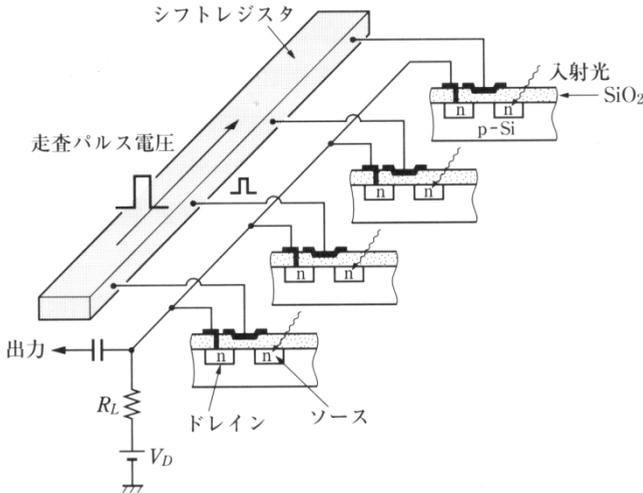


図 1・3 CCDによる4電荷転送

しかし当時は, 実用的な撮像デバイスに必要な画素数を歩留まり良く Si 基板上に実現することが技術的に困難で, その後の半導体集積技術の進展と新しい素子概念の登場を待たねばならなかった. 我が国では, 1960年代の後半になって NEC や日立製作所で半導体メモリの製作プロセスがそのまま使える MOS 型撮像デバイスの研究開発が始まり, 1972年には安藤

らにより 100×100 画素の全固体ビデオカメラが試作され、撮影した人物のモニタ画像が我が国で初めて報告された<sup>19)</sup>。しかし、当時の IC 技術で撮像デバイスに必要な 25 万画素に及ぶ多数の画素ならびに走査回路を歩止まり良く作るとは困難であった。

モノリシック集積回路には、今日の LSI のように膨大な数のトランジスタなどの部品を半導体チップに作りつけ、全部が良品でなければならないという過酷な要求(数の障壁)がつきまとった。これを回避する有効な手段として当時の半導体業界には、電子回路に要求されている機能を一つの半導体デバイスで実現してしまおうとする機能素子の考えがあった。大容量メモリの登場として世間の注目を集めていた磁気バブル素子もその一つで、ベル研で精力的に研究開発がなされていた。1970 年、同じベル研の W. S. Boyle と G. E. Smith は磁気バブル素子の動作についてのディスカッションの中で、磁気バブル素子と類似の現象を半導体デバイスでも実現できることを見出した。これが電荷結合素子 (Charge-Coupled Device: CCD) の誕生である<sup>20)</sup>。

高画質な固体撮像デバイスの実現には、撮像管の電子ビームで行っている走査機能を、集積回路でいわれる「数の障壁」を回避して如何にスマートに固体化するかという点が、当時のテレビ業界では大きな課題であった。CCD はシリコン半導体の表面に空間的に分布する信号電荷をその位置関係を保ちながら、半導体の表面に沿って動かし、一つの端から順次取り出すものであった(図 1・4)。この動作を使えば電子ビームと同等な走査機能が半導体で容易に実現できることが分かり、CCD 型固体撮像デバイスの開発は世界各地で急速に立ち上がった。1969 年には CCD と同じ機能をもつ BBD がフィリップスから発表されているが<sup>21)</sup>、原理的に信号電荷の転送が不完全で、信号の劣化が激しく、撮像デバイスへの応用には向かなかった。

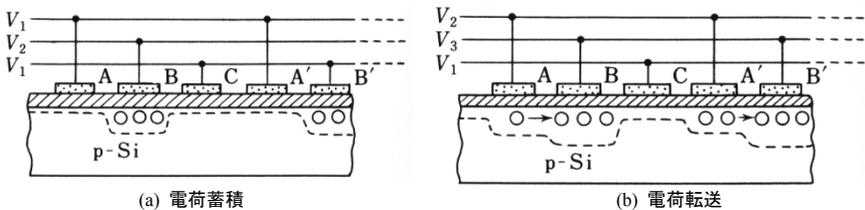


図 1・4 初期の CMOS-APS の画素構成

CCD の電荷転送効率を高める構造として、1971 年に Kosonocky らによるオーバーラップゲート電極構造の提案<sup>22)</sup>、1972 年の Walden らによる埋め込みチャネル構造の提案があり<sup>23)</sup>、現在では電荷転送はほぼ 100 %で、電荷転送に伴う雑音の発生はないといえる。信号電荷の検出については、1971 年に Kosonocky らにより提案された浮遊拡散層 (Floating Diffusion) 構造を使った電荷検出法<sup>24)</sup>が浮遊拡散層の容量を小さくすることで検出感度を向上できる長所があり、現在の固体撮像デバイスでも広く利用されている。

この電荷検出法で生じる  $kTC$  雑音の低減については、1972 年に White らにより相関 2 重サンプリング (CDS: Correlated Double Sampling) 法が考案された<sup>25)</sup>。この回路は  $1/f$  雑音も低減できる効果もあり、現在でも広く使われている。

1973 年には CCD 撮像デバイス構造として Sequin らによりフレーム転送方式 CCD (FT-CCD)

が<sup>26)</sup>、Amelioらによりインターライン転送方式 CCD (IT-CCD) が提案された<sup>27)</sup>。CCD 開発の初期では構造の簡単な FT-CCD が多く、1974 年には RCA の R. L. Rogers らが NTSC 方式に則った 320×512 画素の FT-CCD 撮像デバイスを開発するなど画素数の向上が続いた。

我が国では、1975 年 5 月、NHK が NEC の協力を得て国産としては最初の 3 板 CCD 方式のよるカラーカメラを NHK 総合技術研究所で一般公開し、多くの人々の関心を集めた。また、1980 年 1 月には、ソニーが当時まだ画素数が少なく、画質が充分ではなかったビデオカメラを全日空の旅客機に搭載し、離着陸時の機外の様子を客室のモニタに映すサービスを行い、CCD 撮像デバイスカメラの将来性を強く印象づけた。引き続き 1983 年にはソニーから世界で最初のカラー CCD ビデオカメラが発売された。

MOS 撮像デバイスに関しても、1973 年に米国レチコンから 50×50 画素、1975 年に日立から 250×250 画素のデバイスが報告されるなど着実に画素数の向上が図られた。その後、幾多の特性の改善を経て、我が国では 1981 年、日立から MOS 撮像デバイスを使った日本初の家庭用ビデオカメラが発売された。しかし、MOS 撮像デバイスは画素数が増加するに従って列読み出し線及び行読み出し線の寄生容量が大きくなり、CCD 撮像デバイスに比較して感度が低く、固定パターン雑音による画質劣化もあり、市場から姿を消すことになる。

この間、CCD 型以外にも新たな固体撮像デバイスとして 1970 年にフィリップスから CID (Charge Injection Device)<sup>28)</sup>、1978 年に松下から CPD (Charge Priming Device)<sup>29)</sup>、1983 年には、三菱電機から CSD (Charge Sweep Device)<sup>29)</sup> などが提案され、一部は試作まで進んだが、CCD 型の性能やコスト面で勝負できなかった。

IT-CCD や X-Y アドレス型 MOS の上面に光電変換膜を積層し、より高い光感度や多画素化を目指した積層型撮像デバイスも研究開発され、1988 年には 200 万画素の撮像デバイスも開発された<sup>31)</sup>。開口率が 100% になるメリットがある反面、Si-IC 以外の材料プロセスが必要になること、残像、焼付けなどの課題があり、その後は大きな進展が見られない。

CCD 撮像デバイスに関しては、1981 年に寺西らにより埋め込みフォトダイオード構造が開発され<sup>32)</sup>、暗電流のショット雑音の低減、1982 年には石原らによる垂直オーバーロードレイン (VOD) 構造の開発はスミアの低減のほかに画素サイズの縮小や電子シャッタの実現に役立った<sup>33)</sup>。1983 年の石原らによるマイクロアレイレンズの開発<sup>34)</sup> は感光領域に入射する光の集光率の向上をもたらし、画素の縮小に伴う感度低下を補い、CCD 撮像デバイスならびに CCD ビデオカメラの小型化を促した。更に、2000 年には富士写真フィルムからフォトダイオードを正方格子状の配列ではなく、45° の軸上に配列した新しいパターンレイアウトをもつ PIA CCD (Pixel Interleaved Array CCD) の発表があり<sup>35)</sup>、多画素でのプログレッシブスキャンを可能にした。このほかに低消費電力化や周辺回路のワンチップ化などの進展もあり、1980 年代の後半には固体撮像デバイスと撮像管の売上げ比率は逆転した。1995 年にはハイビジョン放送も始まり、現在、放送用としては、ハイエンドカメラにスミア-135 dB、感度 2000 lx F10 (S/N 54 dB) の標準的な性能をもつ 2/3 型 220 万画素 FIT-CCD が用いられている。これら多くは日本発の成果で、CCD 型撮像デバイスの実用化に対して我が国の果たした貢献は非常に大きい。

これまで動画像の記録にはフィルムカメラが使われていたが、CCD 撮像デバイスの登場により、1982 年、ビデオカメラ部分とデッキ部分を一体化した業務用の肩乗せ式カムコーダが市場に投入された。これにより取材現場での機動性は著しく改善された。1984 年には家電業

界の統一規格に基づく一体型 8 mm ビデオカメラ, 1989 年には軽量化されたパスポートサイズの家庭用ビデオカメラが発表されるなど, CCD は家庭用ビデオカメラを主要な市場として開発が進み, 誰でも手軽に撮影することが可能となった. 反面, カメラの軽量化のために手ブレが生じやすくなった. その後, 2004 年には, 世界で初めて有効走査線数 1080 本のハイビジョンビデオカメラが市場に登場した. 1990 年には, これまで撮像管を使っていた放送用テレビカメラがすべて CCD カメラに置き換わるなど, 1990 年代に入ると, 業務用・民生用を問わず一部の特殊分野(超高感度カメラなど)を除いてほとんどのビデオカメラに CCD 撮像デバイスが使われるようになった. 更に, 1988 年に露光制御技術に不可欠となる電子シャッタ<sup>36)</sup>, 1990 年の電子式手ぶれ補正技術, 1993 年の全面素読み出し方式の開発などが進み, 「固体撮像デバイス=CCD」という時代が長く続いた.

一方, 静止画カメラの分野では, ソニーが 1981 年に記録媒体にフロッピーディスクを用いた電子スチルカメラ「マビカ」を試作し, 1986 年に発売した. 当時, 大きな話題になったが, フィルムカメラに比較して価格が高く, 画質も電池寿命もそれほど良くないなどの理由から市場での評価は芳しくはなかった. その後, 1995 年に, カシオ計算機がデジタルカメラ「QV-10」を発表した. パソコンの普及の追い風もあり, これを境にデジタルカメラの利便性が一般に認知された. 1997 年末頃からデジタルスチルカメラの本格的普及に伴い, CCD 撮像デバイスの小型化, 多画素化に伴う性能の大幅な向上, 正方面素やハニカム CCD というプログレッシブスキャンに適した画素配列など TV 信号フォーマットに依存しない CCD 撮像デバイスが数多く登場, カメラの価格も下がり, フィルムカメラからデジタルカメラへの置き換えが始まった. カメラ映像機器工業会の統計によれば, 2002 年には日本メーカーによるデジタルカメラの総出荷台数がフィルムカメラを上回った.

1999 年にニコンから既存の一眼レフ用レンズが使える一眼レフデジタルカメラ「D-1」が発売されると, 報道関係者やプロカメラマンの間でも関心が集まり, 2000 年のシドニーオリンピックを契機に速報性を重視する報道機関にもデジタルカメラの導入が急速に進んだ. 現在は, 質感や仕上がりを重要視する商用写真や美術写真の分野にまでデジタルカメラの使用範囲が広がっている.

#### 1-1-4 CMOS-APS (Active Pixel Sensor) の台頭

X-Y アドレス型の各画素に MOS トランジスタを追加して光電変換された信号電荷を増幅する pMOS 撮像デバイスが 1969 年に S. G. Chamberlain らにより提案され<sup>37)</sup>, 1987 年には安藤らにより 25 万画素の増幅型固体撮像素子 AMI (Amplified MOS Intelligent Imager) が報告された<sup>38)</sup>が, 固定パターン雑音が大きく実用にはならなかった. このほかに, 1986 年に, 中村らによる CMD (Charge Modulation Device)<sup>39)</sup>, 遊佐らによる SIT (Static Induction Transistor)<sup>40)</sup>, 1988 年には J. Hynecek による FGA (Floating Gate Array)<sup>41)</sup>, 1989 年に田中らによる BASIS (Base-Stored Image Sensor)<sup>42)</sup>などの報告がある. CCD と比較して性能的にも一長一短があり, CMOS LSI プロセスとの整合性もよくないこともあり, それぞれの特長を活かせる分野で実用化されたが, 広く普及はしなかった.

1993 年に米国 NASA のジェット推進研究所 (JPL) の E. R. Fossum らにより現在の CMOS 撮像デバイスの原型である CMOS-APS が発表された<sup>43)</sup>. このデバイスは図 1・5 に示す画素構造を基本としており, フォトダイオード電位をソースフォロアアンプで読み出す 3Tr 構成

である。単一電源、低消費電力、行単位で並列に信号を読み出すことによる高速性や標準 CMOS プロセスで製作できることからシステムオンチップが容易である<sup>44)</sup>などの利点から注目を集めた。標準プロセスで製造可能という特徴は、OmniVision などの新しいベンチャ企業を生むと同時に、製造設備をもたないファブレス企業の参入も容易にし、世界各地で熾烈な開発競争が繰り広げられた。しかし、画素ごとに信号を増幅しているため垂直ならびに水平の信号線の雑音を受けにくい特長をもつが、画素ごとに設けられた増幅器のばらつきによる固定パターンノイズとフォトダイオードの暗電流ノイズが大きく、感度、画質の面で CCD 撮像デバイスに大きな差をつけられ、この解決が CMOS-APS の大きな課題となった。

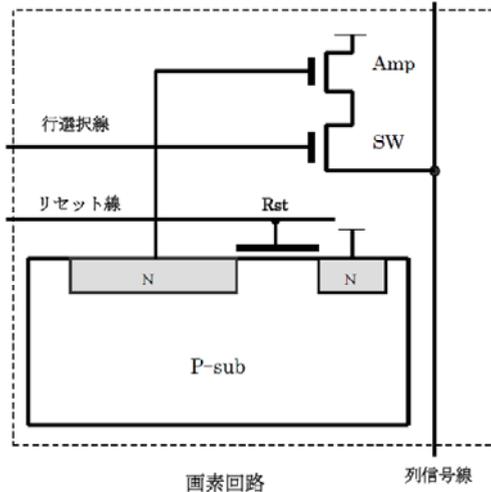


図 1・5 CMOS 回路

固定パターンノイズに関しては、カラム並列に電荷領域差分型ノイズキャンセル回路や、ノイズの抑圧を行いながらデジタル信号への変換を行うカラム並列ノイズキャンセル・AD 変換器などの構成により、ほぼ CCD と同等の雑音まで抑制できる見通しがたった<sup>45),46)</sup>。

1990 年代以降、半導体の微細化、高速化により、アナログの映像信号のデジタル化やデジタル信号処理が容易にかつ安価に行えるようになると、個人で電子映像を自由に扱えるモバイル機器への需要が高まった。映像信号のデジタル化は AD 変換器のオンチップ化が可能な CMOS 撮像デバイスが有利である。AD 変換器を内蔵するデバイス構成には幾つかの方式が提案されているが<sup>72)</sup>、一般的なカメラ用途では 1 水平走査期間を変換時間にあてられ、低中速、高分解能の AD 変換器が使用できる列並列 ADC 方式を採用した報告が多い<sup>73)~75)</sup>。この結果、2000 年には低消費電力、低コストを最大の武器とする CMOS-APS が搭載されたデジタルカメラが登場、爆発的なヒットを記録した。一方、CCD 撮像デバイスは、放送用ビデオカメラや高画質デジタルカメラなど画質重視のハイエンド市場を中心に広がった。

2002 年頃になると、フィルム写真に近い画質が要求されるようになり、携帯電話に搭載される撮像デバイスの高画質化への要求から、CMOS-APS は、画素ピッチの縮小による多画素化と、高感度化、高 SN 比化とが両立できる技術課題の解決を強く求められることになる。

1997 年には埋め込みフォトダイオード構造の提案<sup>47)</sup>、2001 年には完全転送型埋め込みフォトダイオードを用いた 4 Tr 画素の開発<sup>48)</sup>によりフォトダイオードの暗電流ノイズは実用レベルに改善でき、CCD と同等の画質が得られる見通しが立った。しかし、完全転送型埋め込みフォトダイオード構造は標準の CMOS プロセスでは実現できず、感度、画質を優先するには標準 CMOS プロセスの一部修正が必要となった。画素ピッチの縮小に伴う開口率の低下については、これまで各画素内に配置されていた読み出し回路を周囲の複数画素で共有し、トランジスタの数を減らす画素共有技術の導入<sup>49),50)</sup>、基板上の多層配線の厚みによる集光率の低下を改善する低背化プロセスの導入<sup>51)</sup>や層内レンズ技術の導入<sup>52)</sup>などにより、2004 年には 2.25  $\mu\text{m}$  の画素ピッチで開口率 25%、200 万画素の CMOS-APS が開発され、CCD に匹敵する画質を可能にした<sup>50)</sup>。この結果、これまで CCD 撮像デバイスが独占していたハイエンドカメラ市場で CMOS-APS との競合が始まった。2005 年には、初めて 3 板式カラービデオカメラに 1/6 型総画素数 79 万画素の CMOS-APS 撮像デバイスが搭載されたほか、デジタル 1 眼レフカメラにも 1240 万画素 APS サイズの CMOS-APS 撮像デバイスが搭載された。更に、2009 年には画素サイズ 1.4  $\mu\text{m}$  の CMOS-APS 撮像デバイスの量産が始まり、携帯電話やハイビジョンビデオカメラなどの小型化が進んだ。

ビデオカメラは多画素化が進んでくると、静止画の場合と異なりフレームレートを落とせないで画素数に比例して読み出しスピードをあげる必要がある。これには CMOS デバイスが有利で、2005 年、列並列 AD 変換器、列並列デジタル CDS をオンチップ化した高速読み出しと高画質化が両立できる CMOS-APS 撮像デバイスが開発され、600 万画素クラスの画像情報を 60 fps の速度で読み出せることを示した<sup>53)</sup>。同年、ソニーから CMOS-APS を搭載した初めてのデジタルハイビジョンカメラが発売された。

この間、異なるアプローチで高感度化と高画質化を達成した報告がある。2002 年に Foveon 社が受光部内に深さの異なる 3 層の pn 接合面を形成し、光の侵入長が波長によって異なる性質を使って RGB の色情報を一つの画素で取得する新着想 X3 CMOS イメージセンサのニュースリリース<sup>71)</sup>と、イノテックからの新しい閾値変調型撮像デバイス VMIS に関する報告である<sup>54)</sup>。

2000 年代の後半に入ると、民生用デジタルビデオカメラ、デジタルスチルカメラの更なる高解像度化や小型化に伴う画素間クロストークの抑制に加え、最低被写体照度の向上や高速度撮影などへの要求が高まってきた。そこで、2005 年頃から活発に報告されるようになった SOI 構造の裏面照射型 CMOS-APS の開発が注目されてきた<sup>55),56)</sup>。更に、2008 年には OmniVision と TSMC がシリコンバルクウェハを用いた裏面照射型 CMOS-APS の量産化技術を世界で初めて発表<sup>57),58)</sup>、裏面照射型 CMOS イメージセンサの実用化に弾みがついた。我が国でも 2008 年、ソニーが 500 万画素の裏面照射型 CMOS-APS を開発、約 2 倍の感度向上を報告している。2010 年には、ソニーならびに東芝から携帯電話ならびにデジタルビデオカメラ向けに 1641 画素ならびに 1460 画素デバイスの量産に入るとの報道があった。開口率 100%が期待できる裏面照射型イメージセンサのアイデアは古くからあり、天文などの用途に CCD 撮像デバイスでは実用になっているが、実際に製造するには技術的な困難が大きく、これまで量産品には使われなかった。

このように 21 世紀に入り、放送機器や民生機器を問わず多くの分野で CMOS-APS 撮像デバイスが主流となってきた。2008 年の調査によると、撮像デバイス全体の出荷数の 87%以上

が CMOS-APS という結果もある。今日、デジタルカメラでは動画と静止画の双方が撮影できることはあたりまえで、動画用デバイスと静止画用デバイスの分けも曖昧になっている。

2010年には、キャノンが有効画素数1億2000万画素、1秒間に最高約9.5コマの速度で出力できる CMOS-APS 撮像デバイスの開発を発表した。人間の目の視細胞数に匹敵する数の画素をもつので、新たな応用の創出を期待したい。

### 1-1-5 高速度撮像デバイスへの挑戦

これまで高速度ビデオカメラといえば、16mm幅の映画フィルムを用いた高速カメラが一般的であったが、1972年、米国の Video Logic がビジコン撮像管を使って200コマ/秒の白黒ビデオカメラを開発した。その後、プランビコンやハービコンなどの撮像管を使った高速度カメラが開発されたが、NTSC規格のビデオ信号では、撮像管からの信号の取出しが一つのシリアル信号であるため、これ以上の高速化の実現は難しかった。

固体撮像デバイスの時代に入ると、1982年、T-H. Lee らが  $192 \times 248$  画素の撮像面を6分割し、32の並列出力で2000フレーム/秒の高速度 MOS 撮像デバイスを開発<sup>59)</sup>、スピソフィジックス社はこれを使って2000コマ/秒の高速度ビデオカメラ SP2000を開発した。このカメラは1000コマ/秒以上の高速度電子記録の幕開となる画期的なものであった。同じ思想で、1986年には M. Wedsworth らが  $512 \times 512$  撮像画面を  $256 \times 16$  画素の64領域に分割した IT-CCD 撮像デバイスで2000フレーム/秒以上の高速読み出しを実現した<sup>60)</sup>。我が国ではナックが、1994年にオリンパスが開発した分割画像を直接アドレスできる X-Y アドレス型の CMD を使用して、2000コマ/秒までの高速度カラービデオカメラ MEMRECAM Ci を開発した<sup>59)</sup>。

その後、1999年に A. Krymsk らが列並列 AD 変換器構成の  $1024 \times 1024$  画素 CMOS-APS 撮像デバイスで500フレーム/秒の高速度撮像を報告<sup>61)</sup>、2003年には  $1504 \times 1128$  画素で1000コマ/秒、2008年には  $1280 \times 1024$  画素で2000コマ/秒の高速撮影ができる CMOS-APS 撮像デバイスが開発されるなど、2000年以降は、メガピクセルで1000コマ/秒以上の高速撮影には、CMOS-APS 撮像デバイスが主力の座を保っている。

江藤らは、2002年に各画素のフォトダイオードから直線の CCD メモリを下方に伸ばしたものを1単位とし、これを平面内にうまくはめ込んだ構造のまったく新しい原理の画素周辺記録型撮像デバイス ISIS (In-situ Storage Image Sensor) を開発して、100万枚/秒の撮影速度で100枚以上の連続画像を記録できることを報告した<sup>62)</sup>。2010年、このデバイスを使用した  $312 \times 260$  画素の高速度ビデオカメラ (HyperVision HPV-2A) が島津製作所から発売された。

### 1-1-6 超高感度化への挑戦

過去約70年の間、撮像デバイスの超高感度化は常に関心の深い、重要なテーマである。まず1963年、米国 NASA はアポロ計画で月面活動をテレビカメラで撮影する目的で、ターゲットにおける2次電子導電現象を使って電子像の増倍を行う SEC (Secondary Electron Conduction) 管を開発した<sup>63)</sup>。これが高感度撮像管の先駆的試みであったが、感度は良いものの画質が悪く、放送業界では使われなかった。

1970年前後に、電子衝撃による誘起導電現象を応用して高感度を得る超高感度撮像管が注目された。中でも RCA から開発された SIT (Silicon Intensifier Target) 管と呼ばれる撮像管は、

プランビコンやサチコンより数百倍の高い感度をもつので、暗い場面での撮影に多用された<sup>64)</sup>。今日ではEBCCD (Electron Bombardment CCD) に形を変えている。

1985年、NHKの谷岡らは、サチコンの光導電膜に高電界を印加するとアバランシェ増倍が生じ、信号電流が大幅に増加することを見出し、日立製作所がハーピコンの名前で商品化した<sup>65)</sup>。1995年には光導電膜の膜厚を25  $\mu\text{m}$ とした新スーパーハーピコンを開発し、サチコンの600倍の高感度を得るのに成功した<sup>66)</sup>。2001年には約200倍に増倍可能な超高感度新Supper-HARP管とそれを使ったハイビジョン新Supper-HARPハンディカメラを実用化<sup>67)</sup>、<sup>68)</sup>、夜間の緊急報道番組や科学番組などの放送での活用だけでなく、X線画像診断やバイオ研究、更には深海探索や夜間の港湾監視など多くの分野に応用が広がり、究極の超高感度、超高画質撮像デバイスに最も近い先進技術として注目されている。

2001年、米国TIのJ. HynccekによりEMCCD (Electron Multiplying CCD) と呼ばれる固体撮像デバイスが提案された<sup>69)</sup>。EMCCDは、FT-CCDの水平転送部のほかに、電子増倍の機能をもつ転送部を付加した構造で、そこでアバランシェ効果を起こして映像信号を数百倍に増幅できる<sup>70)</sup>。現在では背面照射型のEMCCDも登場し、1024×1024画素の微弱光測定カメラなどが発売されている。

### 1-1-7 まとめ

「科学技術の発展は、見ることから始まる」という言葉で代表されるように、人間の様々な営みの中で「見る」という行為が人々の思考・判断や行動に大きな影響を与えていることを考えると、撮像デバイスの役割は人間社会のこれまでの活動の中でも極めて大きいものがある。

見ることの基本は、いかに高精細で暗いところまで感度よく見ることができるといことである。したがって、ここ100年の撮像デバイス開発の歴史も、高感度化、高解像度化への技術的挑戦の連続であったといえる。近年のエレクトロニクスの発展に伴い、撮像デバイスは真空管から固体デバイスへ、アナログからデジタルへという大きな流れの中で、また放送、業務用カメラからモバイル機器、プロフェッショナルユースからパーソナルユースへと市場の要請にも応えながら、進化を続けてきた。今後はこれに加えて、見る人に感動を与える絵づくりを含めた新しい発展を期待したい。

### ■参考文献

- 1) 高柳健次郎, “テレビ事始,” 有斐閣, 1986.
- 2) Farmsworth, “Television by Electron Scanning,” J. Franklin Inst., pp.411-444, 1934.
- 3) V. K. Zworykin, “The Iconoscope,” Proc. IRE, 22, pp.16-32, 1934.
- 4) A. Rose and H. Iams, “The Orthicon, A Television Pickup Tube,” RCA Rev., 4, 2, pp.186-199, 1939.
- 5) A. Rose, P. K. Weimer, and H. B. Law, “The Image Orthicon-A Sensitive Television Pickup Tubes,” Proc. IRE, 34, 7, pp.70-89, 1946.
- 6) Weimer, Fargue and Goodrich, “The Vidicon-Photoconductive Camera Tube,” Electronics, 23, 5, pp.70-73, 1950.
- 7) de Haan, van der Drift, and Schampers, “The Plumbicon; a New Television Camera Tubes,” Philips Tec. Rev., 25, pp.133-151, 1964/1964.
- 8) Shimizu, Yoshida, Aihara, and Kiuchi, “Characteristics of Experimental CdSe Vidicons,” IEEE Trans. ED, ED-18, 13, pp.1058-1062, 1971.

- 9) Goto, et al, IEEE Trans. ED, ED-21, 11, pp.662-, 1974.
- 10) Crowell, Buck, Labuda, Dalton, and Walsh, "A camera tube with a silicon diode array target," Bell System Tech. J., 46, 2, pp.491-495, 1967.
- 11) 藤原, 江口, 芹沢, 深井, "高感度撮像管ニュービコンの特性について," テレビ電子装置研資, ED-153, 1969.
- 12) 窪田, 黒川, 塩野, 田川, 嶋崎, "電子インデックスによる位相分離方式単管カラーカメラ," テレビジョン学会誌, 27, 4, pp.243-251, 1973.
- 13) 竹村, "ITV用カラーテレビ撮像方式の一考察," 総和45年電気関係4学会大, 1948, 1970.
- 14) S. R. Morrison, "A New Type of Photosensitive Junction Device," Solid-State Electronics, 6, pp.485-494, 1963.
- 15) J. W. Horton, R. V. Mazza and H. Dyn, "The Scanistor -a Solid State Image Scanner," Proc. IEEE, 52, 12, pp.1513-1528, 1964.
- 16) P. K. Weimer, G. Sadasiv, J. E. Meyer Jr., L. Meray-Horvath, and W. S. Pike, "A Self-Scanned Solid-State Image Sensors," Proc IEEE, 55, pp.1591-1602, 1967.
- 17) G. P. Weckler, "Operation of p-n Junction Photodetectors in a Photon Flux Integrating Mode," IEEE J, Solid-State Circuits, SC-2, pp.65-73, 1967.
- 18) M. A. Schuter and G. Strull, "A Monolithic Mosaic of Photosensors for Solid State Imaging Applications," IEEE Trans., Electron Devices, ED-13, pp.906-912, 1966.
- 19) 安藤, 石原, 赤星, "MOSTを用いた固体撮像装置," 第6回テレビジョン学会全国大会, 3-14, 1970.
- 20) W. S. Boyle and G. E. Smith, "Charge Coupled Semiconductor Devices," Bell Syst. Tech. J., 49, pp.587-593, 1970.
- 21) F. L. J. Sangster, "Bucket-Brigade Electronics-New Possibilities for Delay-Axis Conversion and Scanning," IEEE J., SC-4, pp.131-136, 1969.
- 22) W. F. Kosonocky and J. E. Carnes, "Two Phase Charge Coupled Devices with Overlapping Polysilicon and Aluminum Gates," RCA Review, pp.164-202, 1973.
- 23) R. H. Walden, R. H. Krambeck, R. J. Strain, J. Mckenna, N. L. Schryer, and G. E. Smith, "The Buried Channel Charge Coupled Device," Bell Syst. Tech. J., 51, pp.1636-1640, 1972.
- 24) W. F. Kosonocky and J. E. Carnes, "Charge Coupled Digital Circuits," IEEE J. Solid-State Circuits, SC-6, 5, pp.314-322, 1971.
- 25) M. H. White, D. R. Lampe, F. C. Blaha, and I. A. Mack, "Characterization of Surface Channel CCD Signal Detection," IEEE J. Solid-State Circuits, SC-9, 1, pp.1-13, 1974.
- 26) S. H. Sequin, D. A. Sealer, W. J. Bertram Jr, M. F. Tompsett, R. R. Buckley T. A. Shankoff, and W. J. Menamara, "A Charge Coupled Area Image Sensor and Frame Store," IEEE Trans. Electron Devices, ED-20, 3, pp.244-252, 1973.
- 27) G. F. Amelio, "Physics and Applications of Charge Coupled Devices," IEEE Inter-con.
- 28) G. J. Michon and H. K. Burke, "Charge Injection Imaging," ISSCC, Digest of Tech. Papers pp.138-139, 1973.
- 29) 寺川, 山田, 堀居, 高村, 寺本, "呼び水転送による CCD 読み出し新固体撮像素子," 信学技報, SSD79-100, pp.79-84, 1980.
- 30) M. Kimata, M. Denda, N. Yutani, and N. Tsubouchi, "A 480×400 Element Image Sensor with a Charge Sweep Device," IEEE ISSCC, Digest of Tech. Papers, pp.100-101, 1985.
- 31) S. Manabe, Y. Matsunaga, M. Iesaki, S. Uya, A. Hurukawa, K. Yano, H. Nozaki, Y. Endo, Y. Egawa, Y. Ide, M. Kimura, and N. Harada, "A 2 Million Pixel Silicon Imager Overlaid with an Amorphous Silicon Photoconversion Layer," IEEE ISSCC, Digest of Tech. Papers, pp.50-51, 1981.
- 32) 寺西, 河野, 織田, 新井, 石原, "p np 構造フォトダイオードを用いた IL-CCD 撮像素子," テレビ全大, pp.45-46, 1981.
- 33) Y. Ishihara, E. Oda, H. Tanigawa, N. Teranishi, E. Tkeuchi, I. Akiyama, K. Arai, M. Nishimura, and T. Kamata, "Interline CCD Image Sensor with an Anti-Blooming Structure," IEEE ISSCC, Digest of Tech. Papers, pp.168-169, 1982.
- 34) Y. Ishihara and K. Taniguchi, "A High Photosensitivity IL-CCD Image Sensor with Monolithic Resin Lens Array," IEEE IEDM, pp.497-500, 1983.

- 35) T. Yamada, Y-G. Kim, H. Wakoh, T. Tomo, T. Sakamoto, K. Ogawa, E. Okamoto, K. Masukane, K. Oda, and M. Inuiya, "A Progressive Scan CCD Imager for DSC Applications," IEEE ISSCC, Digest of Tech. Papers, pp.110-111, 2000.
- 36) 浜崎, 鈴木, 賀川, 石田, 宮田, 神戸, "可変速電子シャッタ付 IT-CCD 撮像素子," テレビ学技報, 12, 12, pp.31-36, 1988.
- 37) S. G. Chamberlain, "Photosensitivity and Scanning of Silicon Image Detector Array," IEEE J. Solid-State Circuits, SC-4, pp.333-, 1969.
- 38) 安藤, 竹歳, 中村, 今井, "増幅型固体撮像素子 AMI (Amplified MOS Intelligent Imager)," テレビジョン学会誌, 41, 11, pp.1075-1082, 1987.
- 39) T. Nakamura, K. Matsumoto, R. Hyuga, and A. Yusa, "A New MOS Image Sensor Operating in a Non-destructive Readout Mode," 1986 IEDM Tech. Digest, pp.353-356.
- 40) A. Yusa, J. Nishizawa, M. Imai, H. Yamada, J. Nakamura, T. Mizoguchi, and Y. Ohta, "SIT Image Sensor: Design Considerations and Characteristics," IEEE Trans., ED-33, 6, pp.735-742, 1986.
- 41) J. Hyncek, "A New Device Architecture Suitable for High-Resolution and High-Performance Image sensors," IEEE Trans., ED-35, 5, pp.646-652, 1988.
- 42) N. Tanaka, T. Ohmii and Y. Nakamura, "A Novel Bipolar Imaging Device with Self-Noise-Reduction Capability," IEEE Trans. Electron Devices, ED-36, 1, pp.31-38, 1989.
- 43) E. R. Fossum, "Active Pixel Sensors: Are CCD's Dinosaurs?," Proc. SPIE, 1900, pp.2-14, 1993.
- 44) E. R. Fossum, "CMOS Image Sensors: Electronic Camera-on-a-Chip," IEDM Tech. Digest, pp.17-25, 1995.
- 45) 松長, 遠藤, "CMOS イメージセンサのノイズキャンセル回路," 映像学技報, 22, 3, pp.7-12, 1998.
- 46) 杉本, 大澤, 三浦, 宮沢, 星野, 荒川, "コラム間 FPN のないコラム型 AD 変換器を搭載した CMOS イメージセンサ," 映像学技報, 24, 37, pp.79-84, 2000.
- 47) R. M. Guidash, T. H. Lee, P. P. K. Lee, D. H. Sackett, C. i. Drowley, M. S. Swensen, L/Arbaugh, R. Hollstein, F. Shapiro, and S. Domer, "A 0.6  $\mu$  m CMOS Pinned Photodiode Color Imager Technology," IEDM Tech. Digest, pp.927-929, 1997.
- 48) 井上, 櫻井, 上野, 小泉, 桶山, 浅羽, 須川, 前田, 東谷, 加藤, 飯塚, 山脇, "325 万画素 APS-C サイズ CMOS イメージセンサ," 映像学技報, 25, 28, pp.37-41, 2001.
- 49) H. Takahashi, M. Kinoshita, K. Morita, T. Shirai, T. Sato, T. Kimura, H. Yuzurihara, and S. Inoue, "3.9  $\mu$  m Pixel Pitch VGA Format 10b CMOS Image Sensor with 1.5-Transistor/Pixel," 2004 ISSCC, Digest of Tech. Papers, pp.??, 2004.
- 50) M. Mori, M. Katsuno, S. Kasuga, T. Murata, and T. Yamaguchi, "A 1/4in 2M Pixel CMOS Image Sensor with 1.75 Transistor/Pixel," ISSCC, Digest of Tech. Papers, pp.11-111, 2004.
- 51) J. Adkisson, J. Gambino, T. Hoague, M. Jaffe, J. Kyan, R. Laidy, D. McGrath, R. Rassel, D. Sackett, and C. V. Stancampiano, "Optimization of Cu Interconnect Layers for 2.7  $\mu$  m Pixel Image Sensor Technology: Fabrication, Modeling, and Optical Result," IEEE Workshop on CCD and Advanced Image Sensors, pp.1-4, 2005.
- 52) T. H. Hsu, Y. K. Fang, D. N. Yang S. G. Wu, H/c. Chien, C. H. Tseng, L. L. Yao, W. D. Wang, C. S. Wang, and S. F. Chen, "A High Efficiently CMOS Image Sensor with Air Gap in Situ Microlens (AGML) Fabricated by 0.18  $\mu$  m CMOS Technology," IEEE Electron Device Letters, 26, 9, pp.634-636, 2005.
- 53) S. Yoshida, M. Kikuchi, Y. Ito, Y. Inada, S. Kuramochi, H. Wakabayashi, M. Okano, K. Koseki, H. Kuriyama, J. Inutsuka, A. Tajima, T. Nakajima, Y. Kudou, F. Koga, Y. Kasagi, S. Watanabe and T. Nomoto, "A 1/8-inch 6.4 MPixel 60frame/s CMOS Image Sensor with Seamless Mode Change," ISSCC Digest of Tech. Papers, pp.492-493, 2006.
- 54) T. Miida, K. Kawajiri, H. Terakago, T. Endo, S. Yamamoto, T. Okazaki, and A. Nishimura, "1.5 M Pixel Imager with Localized Hole-Modulation Method," ISSCC Digest of Tech. Papers, pp.42-43, 2002.
- 55) B. Pain, "Fabrication and Initial Results for a Back-Illuminated Monolithic APS in a Mixed SOI/Bulk CMOS Technology," IEEE Workshop on CCD and AIS, pp.102-104, 2005.
- 56) J. Prima, F. Roy, P. Coudrain, X. Gagnard, J. Seyura, Y. Cazaux, D. Haraut, N. Virollet, N. Houssy, B. Giffard, and P. Gidon, "A 3 Mega-Pixel Back-illuminated Image Sensor in 1T5 Architecture with 1.45  $\mu$  m Pixel Pitch," International Image Sensors Workshop, pp.5-8, 2007.

- 57) S. G. Wu, C. C. Wang, D. N. Yaung, Y. L. Tu, J. C. Liu, T. H. Hsu, F. J. Shin, C. Y. Yu, G. Y. Shiau, R. J. Lin, C. S. Tran, S. S. Chen, C. C. Wang, S. X. Hueng, H. Rhodes, D. Tai, Y. Qian, D. Mao, S. Manabe, A. Shah, R. Yang, J. C. Hseih, Ca, Chang, C. W. Lu, and S. Tseng, "BSI Technology with Bulk Silicon Substrate," International Image Sensors Workshop, pp.124-153, 2009.
- 58) H. Rhodes, D. Tai, Y. Qian, D. Mao, V. Venezia, Wei Zeng, Z. Xiang, C. Y. Lu, K. C. Ku, S. Manabe, A. Shah, Sasidhai, P. Cizziel, Z. Lin, A. Ercam, and M. Bikumandla, R. Yang, P. Matagno, H. Yang, T. J. Dai, J. Li, S. G. Wu, D. N. Yaung, C. C. Wang, J. C. Liul, C. S. Teai, Y. L. tu and T. H. Hsu, "Mass Production of BSI Image Sensors-Performance Results," International Image Sensors Workshop, pp.154-178, 2009.
- 59) T-H. Lee, T. J. Tredwell, B. C. Anagrostopoulos, J. S. Hayward, T. M. Kelly, R. P. Khosla, D. L. Losee, and J. P. Lavine, "A Solid-State Image Sensor for Image Recording at 2,000 Frame per Second," IEEE Trans. Electron Devices, 29, 9, pp.1469-1477, 1982.
- 60) M. Wedsworth, H. Hosack, J. Freeman, and L. Hovland, "A 640 MegaPixel/sec 512×512 Interline Transfer Virtual Phase CCD," IEDM Tech.Digest, pp.357-360, 1986.
- 61) A. Krymski, D. V. Blerkom, A. Anderson, N. Bock, B. Mansoorian, and E. R. Fossum, "A High Speed 500 Frames/s 1024×1024 CMOS Active Pixel Sensor," Digest of Tech. Papers, Symp. on VLSI Circuits, pp.137-138, 1999.
- 62) T. Etoh, D. Poggemenn, A. Ruckelshausen, A. Theuwissen, G. Kreider, H. O. Folkerts, H. Mutoh, Y. Kondo, H. Maruno, K. Takubo, H. Soya, K. Takehara, T. Okinaka, Y. Takano, T. Reisinger, and C. Lohmann, "A CCD Image Sensor of 1Mframes/s for Continuous Image capturing of 103 Frames," ISSCC Digest of Tech. Papers, pp.46-47, 2002.
- 63) G. W. Goety and H. Boerio, "Secondary Electron Conduction (SEC) for Signal Amplification and Storage in Camera Tubes," Proc. IEEE, 52, 9, pp.1007-1017, 1964.
- 64) R. Rogers, G. Biggs, W. Henry, P. Kaseman, R. Simon, R. Van Asselt, E. Cave, F. Duigon, A. Cope, and G. Morton, "Silicon Intensifier Target Camera Tubes," ISSCC Digest Tech. Papers, pp.176-177, 1970.
- 65) K. Tanioka, J. Yamazaki, K. Shidara, K. Taketoshi, T. Kawamura, S. Ishioka, and Y. Takasaki, "An Avalanche-Mode Amorphous Selenium Photoconductive Layer for Use as a Camera Tube Target," IEEE Electron Devices Letters, 8, 9, pp.392-394, 1987.
- 66) 久保田, 鈴木, 丸山, 加藤, 谷岡, 鮫島, 辻, 牧島, 平井, "新 Supper-Harp 撮像管," テレビ学技報, pp.25-30, 1995.
- 67) 小林, 小楠, 平井, 河合, 大川, 宮川, 鈴木, 高島, 江上, 谷岡, "ハイビジョン用超高感度撮像管," 映情学年次大, pp.347, 2001.
- 68) 宮川, 大川, 鈴木, 高島, 江上, 谷岡, 小林, 小楠, 平井, 本坊, 吉田, "超高感度ハイビジョンハンディカメラ," 映情学年次大, pp.348, 2001.
- 69) J. Hyneczek, "Inpactron-A New Solid State Image Intensifier," IEEE Trans. Electron Devices, 48, 10, pp.2238-2241, 2001.
- 70) J. Hyneczek, "CCM-A New Low-noise Charge Carrier Multiplier Suitable for Detection of Charge in Small Pixel CCD Image Sensors," IEEE Trans. Electron Devices, 39, 8, pp.1972-1975, 1992.
- 71) A. Rush and P. Hubel, "X3 Sensor Characteristics," 日本写真学会誌, 66, 1, pp.57-60, 2003.
- 72) E. R. Fossum, "Architectures for Focal Plane Image Sensor Processing," Optical Engineering, 28, 8, pp.865-871, 1989.
- 73) A. Dickinson, S. Mendis, D. Inglis, K. Azadet, and E. R. Fossum, "CMOS Digital Camera with Parallel Analog-to Digital Conversion Architecture," IEEE Workshop on CCD's and Advanced Image Sensors, pp.20-22, 1995.
- 74) B. Mansoorian, G. Yang, R. Panicacci, C. Wrigley, C. Staller, B. Pain, and E. R. Fossum, "Megapixel CMOS APS with Analog and Digital Readout," IEEE Workshop on CCD's and Advanced Image Sensors, Proc. pp.R29.1-R29.4, 1997.
- 75) B. Mansoorian, H. Yee, S. Huang and E. R. Fossum, "A 250 mW, 60 Frames/s, 1280×720 Pixel, 9b CMOS Digital Image Sensor," ISSCC Digest of Tech. Papers, pp.312-313, 1999.

■8群-4編-1章

1-2 撮像デバイスの原理と基礎

(執筆著：寺西信一) [2011年1月 受領]

対象物から発せられる光情報を画像信号や映像信号と呼ばれる電気信号に変換するデバイスが撮像デバイスである。本節では、撮像デバイスの基本的な構成・機能、各機能の働きについて説明する。

図1・6は撮像デバイスの基本構成を示している。図において波線で囲まれた範囲が撮像デバイスである。左方にある対象物(被写体)によって照明光の一部が反射された光や、対象物自体が発光する光は、被写体の情報をもっているので信号光、または光情報ともいう。被写体の形状に応じた二次元の光強度分布、被写体の色に応じた光の波長情報、被写体が動く場合は、これらの光信号は時間的に変化する。この光信号はレンズなどの光学系によって、撮像デバイス上の撮像面に結像される。

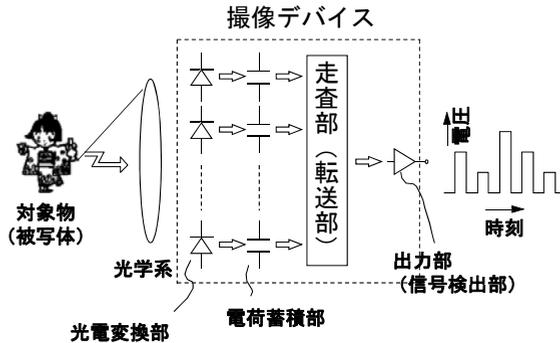


図1・6 撮像デバイスの基本構成

撮像デバイスでは、入射した光信号は電気信号に変換され、出力されるのだが、基本的に四つの機能、すなわち、(1)光電変換部、(2)蓄積部、(3)走査部(転送部)、(4)出力部(信号検出部)に分けられる。撮像デバイスから出力された電気信号は、カメラ内、または、カメラ外の画像処理回路によって、SN比を良くする、解像感を高める、カラー化する、などの画像処理が行われる。その後、定められた規格の信号形式への変換や圧縮が行われる。記憶デバイスに蓄積され、また通信され、更にはディスプレイやプリンタなどで画像として出力される。

以下、四つのそれぞれの機能について説明する。

1-2-1 光電変換部

(1) 光電効果

光電変換部は二次元状に多数配列されている。光電変換部では、入射してきた光信号を電子(または正孔)に変換させる。光がもっているエネルギーが電気信号に変換されるのであるから、光を粒子(光子、フォトン)と考える。光子のもつエネルギー E\_phは波長λの関数

であり、 $h$  をプランク定数、 $c$  を光速とすると、

$$E_{ph} = hc / \lambda \quad (1)$$

であり、波長 $\lambda$ に逆比例しており、波長が長いほど光子エネルギー  $E_{ph}$  は小さくなる。後に半導体のバンドギャップ（禁制帯幅）と比較するために、光子エネルギー $E_{ph}$ は eV（エレクトロンボルト、 $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ ）を、波長 $\lambda$ は nm を単位として表記すると、

$$E_{ph} = 1240 / \lambda \quad (2)$$

である。 $\lambda = 450 \text{ nm}$  の青光の場合、 $E_{ph} = 2.75 \text{ eV}$ 、 $\lambda = 550 \text{ nm}$  の緑光の場合、 $E_{ph} = 2.25 \text{ eV}$ 、 $\lambda = 700 \text{ nm}$  の赤光の場合、 $E_{ph} = 1.77 \text{ eV}$  である。

図 1・7 では、半導体中で光子が吸収され、電子正孔対が発生する様子を示したバンド図である。エネルギー  $E_{ph}$  の光子を価電子帯の電子が吸収すると、電子はエネルギー  $E_{ph}$  だけ励起される。半導体のバンドギャップを  $E_g$  とすると、 $E_{ph} \geq E_g$  の場合、電子は伝導帯まで励起されて内部光電効果を生じさせる可能性がある。 $E_{ph} < E_g$  の場合、電子は禁制帯までしか励起できず、禁制帯には電子は存在できないので、光子の吸収は起こらない。すなわち、 $E_g$  より小さなエネルギーの光子は透過する。

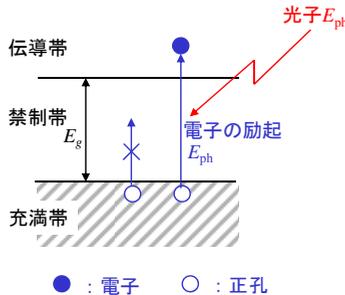


図 1・7 半導体内での電子正孔対の生成（内部光電効果）

半導体を含めた物質中での光の吸収の程度は吸収係数 $\alpha$ （単位は  $\text{cm}^{-1}$ ）で表示される。物質表面（ $x = 0 \text{ cm}$ ）での光強度を  $I_0$  とすると、深さ  $x \text{ cm}$  での光強度は、

$$I = I_0 * \exp(-\alpha x) \quad (3)$$

となる。吸収係数 $\alpha$ が大きいほど光は表面付近で吸収されることになる。吸収係数は物質、波長で異なる。可視光領域の撮像デバイスで光電変換の材料として最も利用されているシリコンの吸収係数を図 1・8 に示す<sup>1)~3)</sup>。シリコンのバンドギャップは  $1.11 \text{ eV}$  であり、限界波長（Cutoff Wavelength） $\lambda_c$ 、 $1120 \text{ nm}$  より短い波長の光を光電変換することが可能である。しかし、限界波長付近では吸収係数が小さくなってなかなか吸収されないことが分かる。その逆に、波長が短いほど吸収係数が大きくなっている。図 1・9 では赤光、緑光、青光のシリコン中での吸収の様子を示した。シリコン中で 50% の光が吸収されるのに必要な深さ（シリコンの厚み）は青光で  $0.35 \mu\text{m}$ 、緑光で  $1.0 \mu\text{m}$ 、赤光で  $3.2 \mu\text{m}$  である。青光と赤光で 1 桁違うために、撮像デバイスの設計において苦勞する点であるが、シリコンは可視光を検出するのに適した材料である。シリコンは集積回路として高度に発展していることも撮像デバイスとしてシリコンが用いられる重要な理由である。

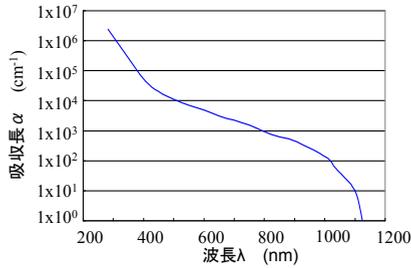


図 1・8 シリコンの吸収係数

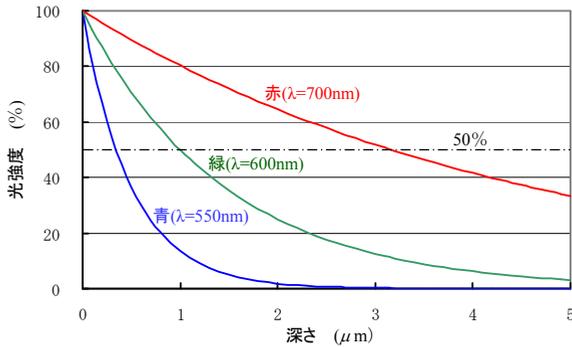


図 1・9 シリコン中での光強度の減衰

シリコンが  $1.1 \mu\text{m}$  より短い波長の光検出に用いられているのに対して、赤外線領域では別の半導体を用いられている。ゲルマニウム Ge はバンドギャップ  $E_g = 0.67 \text{ eV}$ ，限界波長  $\lambda_c = 1.85 \mu\text{m}$ ，インジウムアンチモン InSb は  $E_g = 0.18 \text{ eV}$ ， $\lambda_c = 6.89 \mu\text{m}$  である。水銀カドミウムテルル  $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$  は HgTe (半金属であり， $E_g = -0.26 \text{ eV}$  (77 K)) と CdTe ( $E_g = 1.61 \text{ eV}$  (77 K)) との全率固溶であり，77 K における光吸収の観点からのバンドギャップは成分比  $x$  により  $0 \text{ eV}$  から  $1.61 \text{ eV}$  まで変えることができる。室温付近の黒体放射である熱赤外線 (波長  $10 \mu\text{m}$ ) に相当する  $E_g = 0.1 \text{ eV}$  程度で主に使用されている。

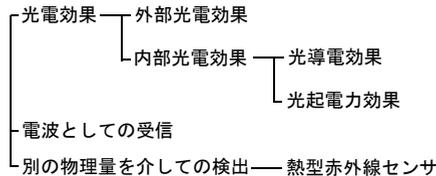


図 1・10 光電変換の方式

内部光電効果には光導電効果と光起電力効果があり，これらについて後ほど記述する。また，金属からの光電子放出である外部光電効果，その他があり，図 1・10 にその分類を示す。電波としての受信とは，波長の長い赤外線を微小なアンテナを設けて検出する方式である。また，別の物理量を介して検出する撮像デバイスの代表的な例は熱型赤外線センサである。

赤外線を物質が吸収すると温度が上昇する。この温度上昇を焦電体やボロメータやサーモパイル（熱電対を複数直列にしたもの）などの温度計で検出することによって、入射する赤外線量を測定するものである。微弱な赤外線を検出するために、MEMS 構造を利用し、熱伝導率と熱容量を小さくしている。

## (2) 外部光電効果（光電子放出）

図 1・11 は、外部光電効果、すなわち、金属表面付近での光子が吸収され、電子が励起される様子を示すバンド図である。左方が金属（フォトカソード、光電面）であり、フェルミレベルまで電子が満たされている。右方は金属の外部、外界である。図示されていないが、電子が外界に引き出されやすいように、金属に対してプラスに印加された電極が更に右方にある。金属のフェルミレベルを基準として、金属中の電子が外界へ放出される際に乗り越えるべき障壁の高さを仕事関数（Work Function） $W$  と呼ぶ。フェルミレベルより下に満たされた電子は、光子を吸収し、光子エネルギー  $E_{ph}$  だけ励起される。励起された電子はホットエレクトロンと呼ばれ、その励起レベルに応じた運動量で移動する。運動量の方向はあらゆる方向を等確率で向く。励起された電子のうち、外界に放出され、信号電子となるためには二つの条件を満たす必要がある。一つは、励起された電子のエネルギーレベルが仕事関数を超えていることである。二つ目は、励起された電子がエネルギーを失い、フェルミレベル付近へ戻るまでの寿命内に、金属と外界との境界に達することである。金属中でのホットエレクトロンの寿命は短いために、金属の表面から数 nm の範囲のみが外部光電効果に寄与できる。

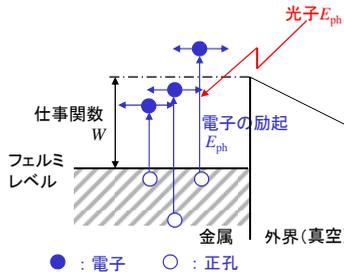


図 1・11 金属表面付近での光による電子励起

外部光電効果では、フォトカソードの物性の影響を受けるのみならず、表面状態の影響を受けやすく、製造条件を技術的に、また、経験的に押さえることによって特性のばらつきを抑えている。外部光電効果を高めるために、フォトカソードの表面にアルカリ金属やセシウムやセシウム化合物を付けることが行われている。

歴史的には、1887年にヘルツ（H. R. Hertz）が放電実験において、陰極に紫外線を当てると放電しやすくなることで発見した<sup>4)</sup>。1905年にはアインシュタイン（A. Einstein）が理論的に外部光電効果を説明し<sup>5)</sup>、光が粒子として振る舞うというプランク（M. Planck）の光量子仮説<sup>6)</sup>を裏付けた。

外部光電効果は、光電子増倍管（フォトマル）やマイクロチャネルプレート（MCP）で利用されている。光電子増倍管では、入射光がフォトカソードから電子を真空へ飛び出させる。

10 個程度設けられた二次電子増倍電極 (Dynode) 間に 100 V 程度が印加されており, 真空中に出た電子は加速され, 第 1 の二次電子増倍電極に衝突し, 数個の二次電子を放出する. これらの電子は再度加速され, 第 2 の二次電子増倍電極に衝突し, 更に増倍される. この電子増倍を次々に繰り返す, 非常に大きな電子増倍を行い, 高い光感度を得ている.

### (3) 光導電効果 (Photoconductive Effect)

半導体にバンドギャップ以上のエネルギーをもつ光を照射した場合, 図 1・7 を用いて説明したように, 伝導帯へ電子が励起され, 同時に, 価電子帯の正孔数が増加する. 半導体の両端に電極を設け, 電圧を印加すると, 光照射によって電気抵抗が下がり, 電流が増加する. この現象を光導電効果, 流れる電流を光電流と呼ばれる.

1973 年にスミス (W. Smith) がセレンに光を当てたときに電気抵抗が下がることを報告した<sup>7)</sup>. この報告が光導電効果の最初の報告とする教科書が多いが, スミスの実験では, 光照射によりセレンの温度が上昇し, 電気抵抗が下がった, とする主張もある<sup>8)</sup>. スミスの短い論文からは判断しがたい.

光照射による電子密度の増加を  $\Delta n$ , 正孔の増加を  $\Delta p$ , 単位時間・単位体積に発生する電子正孔対の数を  $g$ , 電子と正孔の寿命をそれぞれ  $\tau_n$ ,  $\tau_p$  とすると,

$$d \Delta n / dt = g - \Delta n / \tau_n \quad (4)$$

$$d \Delta p / dt = g - \Delta p / \tau_p \quad (5)$$

である. 定常状態を仮定すると式 (4) と式 (5) より,

$$\Delta n = g \tau_n \quad (6)$$

$$\Delta p = g \tau_p \quad (7)$$

である. 光照射による電流の増加分  $\Delta I$  は, 光導電体の断面積を  $A$ , 長さを  $d$ , 電荷素量を  $e$ , 電子と正孔の移動度 (モビリティ) をそれぞれ  $\mu_n$ ,  $\mu_p$ , 印加電圧  $V$  とすると,

$$\begin{aligned} \Delta I &= e (\Delta n \mu_n + \Delta p \mu_p) AV / d \\ &= eg (\tau_n \mu_n + \tau_p \mu_p) AV / d \end{aligned} \quad (8)$$

と表される. 電子と正孔が光導電体の電極間  $d$  を走行する時間をそれぞれ  $t_n$ ,  $t_p$  とすると,

$$t_n = d / (\mu_n V / d) = d^2 / \mu_n V \quad (9)$$

$$t_p = d / (\mu_p V / d) = d^2 / \mu_p V \quad (10)$$

である. 光導電体全体で毎秒発生する電子正孔対数  $G$  は  $gAd$  であるので,

$$\Delta I = eG (\tau_n t_n + \tau_p t_p) \quad (11)$$

と導かれる. 光電流  $\Delta I$  は毎秒励起される電子正孔数  $G$  に比例する. また, 電子と正孔の寿命が大きいほど光電流は大きくなる. しかし, 寿命が長いと応答時間が長くなり, 速い光量の変化に追従できなくなるという欠点がある.

### (4) 光起電力効果 (Photovoltaic Effect)

光起電力効果とは, pn 接合ダイオードのように整流作用を有するデバイスに光を照射することによって起電力が発生する現象である. 現在使用されている固体撮像デバイスでは, シリコン pn 接合ダイオードの光起電力効果が利用されている.

1839 年にベクレル (E. Becquerel) が 2 個の電極が挿入された電解溶液に光を照射したときに電極間に起電力が発生することを発見した<sup>9)</sup>. 固体の光起電力効果は, 1887 年にアダムス

(W. G. Adams) とデイ (R. E. Day) とによって、セレン上に白金電極が接触された構造において発見された<sup>10)</sup>。1931年にはベルグマン (V. L. Bergmann) によって、セレンや酸化銅を用いた実用的なフォトセルが開発された<sup>11)</sup>。

図 1・12 に pn 接合フォトダイオードの光電効果を示すバンド図、図 1・13 にフォトダイオードの電流-電圧特性を示す。バンドギャップ以上のエネルギーをもった光子が空乏層で吸収され、電子-正孔対を発生させた場合、空乏層に存在する電界によって、電子は n 形領域の中性領域方向へ、正孔は p 形領域の中性領域方向へドリフトしていく。それぞれ中性領域に到達すると光電流として外部に取り出すことが可能となる。p 形領域の中性領域で光子が吸収された場合、空乏層のように電界がないので、電子は拡散により移動する。p 形の中性領域には多数キャリアとしての正孔があり、電子・正孔の再結合が電子の寿命を決める。寿命の範囲内に空乏層にまで辿り着けた場合には、その後、空乏層内の電界によって、n 形領域の中性領域に到達でき、光電流となり得る。このため、空乏層で電子-正孔対を発生させた場合に比較して、光電流への寄与は小さい。n 形領域の中性領域においても同様である。照射時の電流特性は、暗時の整流特性の電流特性に光電流が加算された形になる。

逆バイアスの大きさにより、ゼロバイアスモード、逆バイアスモード、アバランシェモードの三つのモードに分類できる。

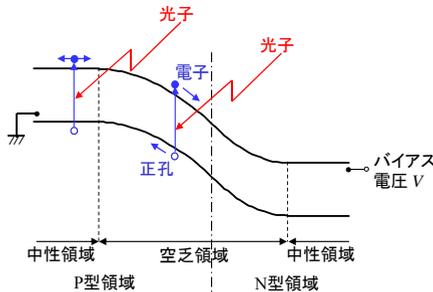


図 1・12 pn 接合フォトダイオードの光電効果

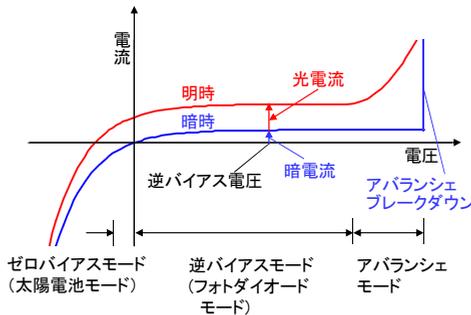


図 1・13 フォトダイオードの電流-電圧特性

ゼロバイアスモード (太陽電池モード) では、外部からの印加電圧は 0 V である。照射が小さいか負荷抵抗が小さい場合は、外部電流 (負荷抵抗を流れる電流) は光電流と同じと

近似できる。他方、光照射が大きいか負荷抵抗が大きい場合は、外部電流は光電流より小さくなり、対数特性を示す。ゼロバイアスモードでは逆バイアスモードに比較して、空乏層幅が狭く、発生した電子-正孔対の光電流への寄与が小さく、量子効率<sup>\*1</sup>が低い。このために、撮像デバイスとしては利用されていない。

逆バイアスモード（フォトダイオードモード）は外部より逆バイアス電圧を印加して空乏層を大きくし、電子-正孔対を空乏層で発生させ、有効利用できるようにしている。更に空乏層を広げるために、p 形領域と n 形領域の間に不純物濃度の小さい i 型領域を挟んだ構造の PIN フォトダイオードが 1953 年に西澤潤一、渡辺寧によって発明されている<sup>12)</sup>。高い近赤外線感度を必要とするセンサや X 線センサにおいては、不純物濃度の小さい領域を数 100 $\mu\text{m}$  の厚さで作込まれている。十分に逆バイアス電圧が大きい場合、負荷抵抗による電圧降下は無視できるので、外部電流は暗電流と光電流の加算になる。暗電流はショットノイズをもっており、SN 比を悪くする。更に、空間的にばらつきがあり、再生画像ではザラや白傷などの悪影響を与える。暗電流は、温度、電界強度、空乏層の大きさ、空乏化している表面の大きさ、結晶性、鉄などバンドギャップの中央付近にレベルを作る不純物、など多くのパラメータに依存する。

更に、逆バイアス電圧を大きくし、アバランシェブレイクダウンの付近に設定すると、アバランシェモードになる。光子によって励起された電子・正孔が大きな電界によって加速され、原子に電離衝突し、新たな電子-正孔対を形成する。この現象を繰り返すことで雪崩（アバランシェ）的に電子数や正孔数が増加する。このような増幅機能がない逆バイアスモードでは、後段にある電子数を電圧に変換する回路や増幅回路のノイズが SN 比を決める。アバランシェモードでは、外部回路のノイズ以上にアバランシェ増幅を行うことによって外部回路のノイズを無視でき、微弱な光の検出に利用できる。この場合、入射光がもつ光ショットノイズと暗電流のショットノイズが残されたノイズとなる。谷岡健吉らはセレンのアバランシェ増幅を利用した高感度な撮像管を開発した<sup>13)</sup>。高感度な特性を利用し、夜間報道、科学番組、X 線画像などに利用されている。

pn 接合ダイオードを用いて光電変換の説明を行ったが、MOS 容量やショットキーバリアダイオードも光電変換部として用いられている。

## 1-2-2 蓄積部

フォトダイオードにおいて、光電変換によって発生した信号となる電子（または正孔）は一定期間蓄積されてから所定の順序で走査され、出力される。撮像管ではツボルキン (V. K. Zworykin) がアイコノスコープ<sup>14)</sup>で、固体撮像デバイスではウェクラール (G. P. Weckler) によって提案され<sup>15)</sup>、電荷蓄積モードと呼ぶ。多数のフォトダイオードからの信号電子を走査するときに、選択されていない期間に光電変換される信号電子をむだにせず有効活用し、感度を向上させるためにはフォトダイオードに対を成す蓄積部が必要である。また、蓄積時間、すなわち、露光時間を機械式シャッタではなく撮像デバイスで調整するためにも電荷蓄積モードは必要である。

信号電子を蓄積するためにはコンデンサが必要であり、逆バイアス状態の pn 接合ダイオ

\*1量子効率 QE [%] とは、信号電子数/入射光子数\*100 である。

ードやMOS容量が用いられる. 光電変換部とは別に隣接着して蓄積部を設ける場合もあるが, pn接合ダイオードやMOS容量が光電変換部と蓄積部を兼ねることが通常である.

図1・14は蓄積動作の等価回路である. いずれもフォトダイオードが蓄積部を兼ねている.

(a)と(b)の方式は電圧出力であり, (c)は電流出力である. (a)では, フォトダイオードに蓄積された信号電子はトランスファゲート(読み出しゲート)がオン状態のときに検出容量に移動され, 検出容量で電圧変換され, 電圧信号として出力される. フォトダイオードはトランスファゲートがオン状態のときに信号電子の移動と同時にリセットされ, トランスファゲートがオフ状態になると, 次の信号電子の蓄積が始まる. 検出容量はリセットゲートがオン状態のときにリセットされる. この方式はインターライン転送方式のCCDイメージセンサ(完全転送されるCCD部分を省略すると(a)と等価になる)や4Tr方式(一つの画素の中に四つのトランジスタが設けられている)のCMOSセンサで使用されている. (b)では, フォトダイオードが検出容量も兼ねている. フォトダイオードの電位を直接検出することで, 電圧出力を実現している. フォトダイオードはリセットゲートがオン状態になることで行われ, オフ状態になると次の信号電子の蓄積が開始される. この方式は, 3Tr方式のCMOSセンサで使用されている. (c)では, フォトダイオードに蓄積された信号電子はリセットゲートがオン状態のときに負荷抵抗を通してリセット電源へ流れる. 負荷抵抗に発生する電圧から信号電流が検出される. 同時にフォトダイオードはリセットされ, リセットゲートがオフ状態になると次の信号電子の蓄積がスタートする. この方式は, パッシブ型MOSセンサで使われている. いずれの方式でも蓄積状態にあるときは, pn接合フォトダイオードのn形領域は電氣的に浮遊(フロート)状態にある.

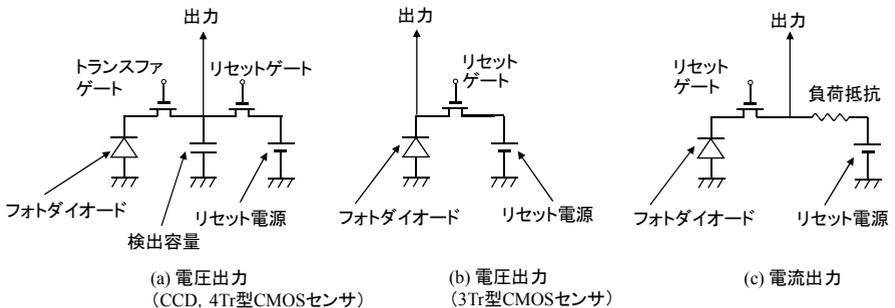
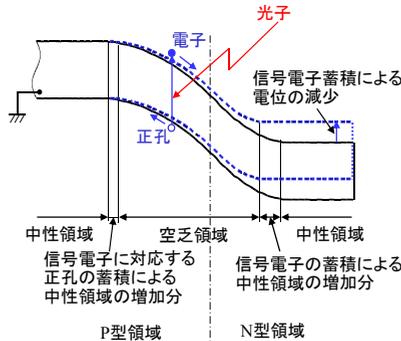


図1・14 蓄積動作等価回路

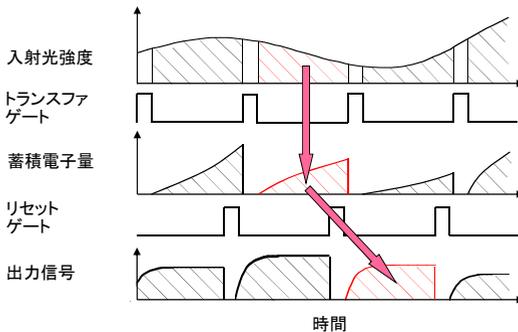
フォトダイオードがリセットされる電圧の決まり方により三つの方式がある. 第1はハードリセットであり, 図1・14の(b)と(c)で行われている. リセットゲートをリニア領域(3極管領域)で動作させ, リセット電源とフォトダイオードを直結させ, リセット電源の電圧にフォトダイオードのn形領域の電圧をリセットする. 第2はソフトリセットであり, トランスファゲートを飽和領域(5極管領域)ないしは弱反転領域(サブスレッシュ領域)で動作させ, フォトダイオードのn形領域の電圧をトランスファゲートの閾値にリセットする. 第3は完全空乏化リセット(完全転送リセット, ビルトインリセット)であり, フォトダイオードのn形領域を完全に空乏化させる. n形領域が完全に空乏化したときのn形領域の電圧

がリセットされた電圧になる．これを実現させるためには，トランスファゲートのオン状態のチャンネル電位をフォトダイオード n 形領域の完全空乏化電圧よりも大きくすることが必要である．n 形領域の完全空乏化電圧は，不純物分布など（MOS 容量の場合はゲート電圧，ゲート絶縁膜厚を含む）フォトダイオードのパラメータで決まる．ハードリセットとソフトリセットでは，リセットゲートのオン抵抗の熱雑音に起因するリセット雑音が生じるが，完全空乏化リセットではリセット雑音が発生しないために，現在最も利用されている．

(a)の方式について，pn 接合ダイオードのバンド図（**図 1・15**）を用いて説明する．**図 1・12**では n 形領域がバイアス電源  $V$  に接続されていたが，**図 1・15** では浮遊（フロート）状態である．光子によって発生した電子-正孔対のうち，電子は空乏層中の電界により n 形領域の中性領域方向にドリフトしていき，中性領域の多数の電子に混じり合い，空乏領域は電子 1 個分小さくなり，中性領域は電子 1 個分大きくなる．n 形領域の空乏領域の減少と同じ電荷量だけ，p 形領域の空乏領域も減少し中性領域になる．このように，信号電子は n 形領域の空乏領域に蓄積され，中性領域を大きくしていく．逆バイアス容量を  $C_{pd}$ ，蓄積された信号電子の電荷量を  $Q_s$  とすると，n 形領域の電位は  $Q_s/C_{pd}$  だけ変化する． $Q_s$  はマイナスであるので電位は減少することになる．この n 形領域の電位変動がリセット動作のときの電子移動の駆動力となる．



**図 1・15** pn 接合フォトダイオードの蓄積動作



**図 1・16** 電荷蓄積モードの時間経過

図 1・16 は、図 1・14(a) の場合の電荷蓄積モードの時間経過を示した波形図である。波形はそれぞれ入射光強度、トランスファゲート、蓄積電子量、リセットゲート、出力信号を示す。蓄積時間に応じて蓄積される信号電子量が増加し、感度増加が計れることが見てとれる。また、蓄積モードによって、1 周期分出力信号は入射光強度に対して遅れることになる。

### 1-2-3 走査部（転送部）

撮像デバイスの代表的な応用製品の一つであるデジタルスチルカメラに使用されている撮像デバイスのフォトダイオードの数（画素数）は 10～20 百万画素ある。これらの画素から信号電子を読み出す方法として、一つ一つの画素から配線を出して並列に読み出すことは配線のあまりの多さで実現することはできない。また、画像情報を通信したり、蓄積（記録）するのにも適していない。規則正しく二次元的に配列された画素に蓄積された信号電子を順序を決めて順次読み出す、直列方式が採用されている。画素の空間的な配列が、電気信号の時間的な系列に変換される。逆に、ディスプレイやプリンタでは、電気信号の時間的な系列が空間的な画素配列に変換される。一枚の画像情報をフレームと呼ぶ。静止画の場合は一枚のフレームが取得される。動画の場合は、一定間隔でフレームが撮像デバイスから読み出される。

動画の場合、1 秒間に読み出されるフレーム数はフレーム周波数（枚/秒）と呼ばれる。フレーム周波数の上限は技術面や経済性から決められるのに対して、下限については人間の目の特性から決められている。すなわち、フレーム周波数が小さくなると、再生画像において動いている被写体の動きが連続的な滑らかさを失ったり、画面が明滅して感じる、フリッカ現象が生じる。人間の眼の反応速度は、光刺激を受けてから検知信号を発信するまで 1/80 から 1/4 秒ぐらいかかり、更に、発信は 1/10 秒程度続くといわれている。これらは明るさなどの条件、個人差などが依存する。また、錘体（Cone）は桿体（Rod）よりも反応が早いとされており、実際、網膜の中心より周囲の方がフリッカは知覚されやすい。

テレビジョンの規格では、NTSC は 29.97 フレーム/秒、PAL は 25 フレーム/秒、日本のハイビジョンは 29.97 フレーム/秒である。後に説明する飛び越し走査のおかげで、実質 2 倍の画像を送っており、59.94～50 枚/秒に相当し、フリッカの課題をクリアしている。高速度カメラ、産業用カメラなどではこのような規格によらず、応用分野に応じた走査が行われている。

図 1・17 を用いて、順次走査と飛び越し走査を説明する。図で升目は 1 画素を表し、画素配列の横方向を水平方向、縦方向を垂直方向と呼ぶ。(a) 順次走査（Progressive Scan）では、左上の画素から水平方向に 1 行分を読み出す。水平方向 1 行のことを走査線と呼ぶ。引き続き 2 行目、3 行目と読み出されていく。コンピュータモニタは順次走査である。(b) 飛び越し走査（Interlace Scan）では、まず、奇数行のみを読み出していき、画素数が半分の画像を作る。この画像をフィールドに対して、フィールドと呼ぶ。次に、偶数行のみを読み出していき、第 2 フィールドを形成する。この図の場合のように、2 フィールドで 1 フレームを形成するとき、2 : 1 飛び越し走査と呼ぶ<sup>16)</sup>。

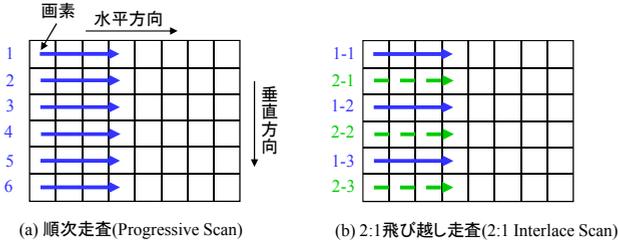


図 1・17 順次走査と飛び越し走査

画素の蓄積部から信号電子を読み出す方法は主に次の三つである。

- (1) **撮像管**：読み出しの順序に応じた蓄積部に電子ビームをランディングさせるために、磁界ないしは電界により電子ビームの方向を移動させていく方法である (1-6「撮像管」を参照)。
- (2) **CCD**：バケツリレーのバケツの働きをする MOS 容量を垂直方向に並べた垂直 CCD と水平方向に並べた水平 CCD が、信号電子をバケツリレー式に出力部へ順次転送する (1-3「CCD」を参照)。
- (3) **MOS センサ**：MOS トランジスタをスイッチとして各画素に配置し、MOS トランジスタを順次オンにすることで画素を選択し、そこに蓄積された信号電子を読み出していき、蓄積された信号電子をそのまま読み出す形式をパッシブ型 MOS センサという。画素にソースフォロア増幅器を設け、増幅された信号をスイッチの働きをする MOS トランジスタで順次読み出していき形式をアクティブ型 MOS センサと呼ぶ (1-4「MOS 型センサ」を参照)。

### 1-2-4 出力部

出力部の構成は走査方式に依存する。前述した各節で説明されるので参照されたい。

シリコン LSI 技術の発展により、撮像デバイス、特に MOS 型センサに各種回路・機能が集積化されることが可能になった。このおかげで、撮像デバイスは単純に画像信号を出力する機能だけでなく、増幅器、AD 変換器、デジタル処理回路、タイミング回路などが集積され、ワンチップカメラ<sup>17)</sup>と呼べるまでになり、カメラ付携帯電話などで使用されている。AD 変換器をどこに設けるかは撮像デバイスの性格を決めるうえで重要である。

- (1) アナログ出力であり、AD 変換器が撮像デバイス外に設けられる。
- (2) 垂直方向、水平方向の走査後にパイプライン形式の AD 変換器が撮像デバイス内に設けられる。
- (3) 画素の垂直列ごとに AD 変換器が設けられ、デジタル信号を水平方向に走査する方式で、コラム AD 方式と呼ばれる<sup>18), 19)</sup>。
- (4) 画素内に AD 変換器を設ける方式で、SIMD (Single Instruction Multi Data) 式の画像処理に適している<sup>20)</sup>。

### 1-2-5 種々の撮像デバイス

3極管, 5極管などの真空管, パイポーラトランジスタ, MOSトランジスタなどの固体素子というように回路素子にいろいろな種類があるように, 撮像デバイスにもいろいろある. それらを表1・1に分類し, 光電効果の種類, 画素内増幅の有無, 蓄積モード, 走査方法を示した. 大きくは撮像管と固体撮像デバイスに分けられる.

表1・1 撮像デバイスの分類

分類	名称	光電効果	画素内増幅	蓄積モード	走査	文献
<b>撮像管</b>						
電子放出型	アイコノスコープ	外部光電効果	無	RS	電子ビーム	14)
	イメージオルシコン	外部光電効果	無	RS	電子ビーム	21)
光導電型	ビジコン	光導電効果	無	RS	電子ビーム	22)
	カルニコン	光導電効果	無	RS	電子ビーム	24)
	HARP管	光導電効果	アバランシェ	RS	電子ビーム	13)
<b>固体撮像デバイス</b>						
CCD	FT-CCD	光起電力効果	無	GS	CCD	27)
	IT-CCD	光起電力効果	無	GS	CCD	28)
	CSD	光起電力効果	無	RS	CCD	29)
MOS+CCD	CPD	光起電力効果	無	RS	V-MOS, H-CCD	30)
MOS型	PPS	光起電力効果	無	RS	MOS	15)
	3Tr型APS	光起電力効果	MOS	RS	MOS	31)-33)
	4Tr型APS(MOSPD)	光起電力効果	MOS	RS	MOS	34)
	4Tr型APS(埋込PD)	光起電力効果	MOS	RS	MOS	35)
CID	CID	光起電力効果	無	RS	MOS	36)
増幅素子型	JFET	光起電力効果	JFET	RS	MOS	37)
	CMD	光起電力効果	JFET	RS	MOS	38)
	FGA	光起電力効果	JFET	RS	MOS	39)
	BCAST	光起電力効果	JFET	RS	MOS	40)
	SIT	光起電力効果	SIT	RS	MOS	41), 42)
	BASIS	光起電力効果	Bipolar	RS	MOS	43)
	BCMD	光起電力効果	MOS	RS	MOS	44)
	VMIS	光起電力効果	MOS	RS	MOS	45)
積層型	積層型MOS	光導電効果	無	RS	MOS	46)
	積層型CCD	光導電効果	無	GS	CCD	47)
TFT型	TFT型センサ	光導電効果	無	無, RS	TFT	48)

略語 蓄積モード RS: Rolling Shutter, GS: Global shutter

MOS PPS: Passive Pixel Sensor, APS: Active Pixel Sensor

撮像管では, 飛点走査カメラ (Flying Spot Camera) の時代の非蓄積モードの感度の低い状況から, 撮像デバイスらしい最初の撮像管でもある, アイコノスコープ<sup>14)</sup>がまず登場する. 外部光電効果を利用している. 蓄積モードであるために感度が100倍程度高められた. イメージオルシコン<sup>21)</sup>では, 電子ビームの加速電圧を低電圧化し, 二次電子の発生を抑制し, 光電変換のリニアリティを向上した. 更に, 電子増倍器を付加し, 感度向上を図っている. そ

の後、光導電効果を利用した撮像管が続く。光導電体の材料が各種開発された。三硫化アンチモン ( $\text{Sb}_2\text{S}_3$ ) を用いたビジコン<sup>22)</sup>、一酸化鉛 ( $\text{PbO}$ ) を用いたブランビコン<sup>23)</sup>、セレン化カドミニウム ( $\text{CdSe}$ ) を用いたカルニコン<sup>24)</sup>、セレン ( $\text{Se}$ ) を用いたサチコン<sup>25)</sup>、亜鉛、カドミニウム、インジウム；セレン、テルルを用いたニュービコン<sup>26)</sup> などがある。感度の向上、比抵抗を上げることによる解像度の向上、残像の低減などを実現している。光導電膜に光電界を印加し、アバランシェ増倍し、大きな SN 比を実現しているハーブ (HARP) 管<sup>13)</sup> は高感度カメラに使用され活躍している。

撮像管の分類には電子ビームの収束方法と走査方法による方法があり、電磁集束電磁偏向 (MM)、静電集束電磁偏向 (SM)、電磁集束静電偏向 (MS)、静電集束静電偏向 (SS) に分類される。

固体撮像デバイスでは、CCD、MOS 型、増幅素子型、積層型、TFT に大きく分類できる。

CCD では、垂直 CCD を信号電子の転送の機能以外に、光電変換、蓄積としても使用するフレーム転送方式 CCD (FT-CCD)<sup>27)</sup> と、光電変換と蓄積のためのフォトダイオードを別に垂直 CCD の間に設けているインターライン転送方式 (IT-CCD)<sup>28)</sup> がある。IT-CCD は、感度の良さ、単板カラーを実現しやすい、チップ面積が小さいなどの理由から多くの分野で使用されている。IT-CCD では、すべてのフォトダイオードからの信号電子を一斉に垂直 CCD に読み出し、その後 CCD の転送機能で順次読み出していく。それに対して、CSD (Charge Sweep Device)<sup>29)</sup> では、1 水平線に対応するフォトダイオードからのみ信号電子を垂直 CCD に読み出し、垂直 CCD を高速に駆動し、直ちに水平 CCD に転送する。垂直 CCD での取り扱い電子量が多いという特徴があり、飽和電子数が多いことが求められる赤外線センサに使用された。

CPD (Charge Sweep Device)<sup>30)</sup> は、垂直方向の転送は MOS 型と同じ信号線で、水平方向は CCD で行い、飽和電子数が大きく、出力部のノイズの小さい撮像デバイスを実現しようとした。しかし、垂直転送が不完全転送モードになり、転送効率不良とそのためのランダムノイズ増加を克服できなかった。

MOS 型には、受動型 (PPS : Passive Pixel Sensor)<sup>15)</sup> と増幅型 (APS : Active Pixel Sensor) がある。PPS は、DRAM の 1Tr IC と同様に、画素内に一つのフォトダイオードと一つの MOS トランジスタのみの単純な構成であり、微細化、歩留まり面から大いに期待された (図 1・14(c) 参照)。しかし、CCD や APS に比較して、フォトダイオードのリセットノイズが大きいことを解決できなかった。

3Tr 型 APS<sup>31)~33)</sup> は、フォトダイオードとその電位を検出するソースフォロアアンプのドライバトランジスタ、フォトダイオード電位をリセットするリセットトランジスタ、水平行を選択する選択トランジスタの三つのトランジスタから画素が構成される (図 1・14(b) 参照)。フォトダイオード電位をリセットするときには発生するリセットノイズが相關二重サンプリング (CDS) で抑制できないという課題がある。

4Tr 型 APS はフォトダイオードが MOS ダイオード (PG : Photogate) のタイプ<sup>34)</sup> と埋め込みフォトダイオード (Pinned Photodiode) のタイプ<sup>35)</sup> がある。CCD の浮遊拡散層出力 (FD : Floating Diffusion) と同様に、フォトダイオードから検出容量 (FD) へ信号電子を転送し、検出容量の電位変化をソースフォロアアンプで検出している (図 1・14(a) 参照)。この方式では、検出容量のリセット電位が信号電位の直前に検出できるために、相關二重サンプリング

でリセットノイズが抑制できるという大きな利点がある。埋め込みフォトダイオードタイプは感度が優っており、また、多画素1セル技術で画素当たりのトランジスタ数を2Tr/画素以下にすることが可能になり微細化にも適し、現在の主流になっている。

CID (Charge Injection Device)<sup>36)</sup>は、MOS キャパシタに蓄積された信号正孔をゲートをオフにして基板に注入し、基板電流を検出することで信号を読み出す。構造が簡単であるという利点があるが、感度が低いという欠点がある。

増幅素子型では、画素部で増幅することによって、画素部以降で発生するノイズによるSN比を改善することができ、高SN比を目標としている。APSでは、フォトダイオードと増幅用のトランジスタが別であるが、増幅素子型では、増幅用トランジスタと蓄積部が一体になり、限られた画素面積を有効利用できるという利点がある。また、非破壊読み出しができるという特徴もある。増幅に用いるトランジスタによって、ジャンクションFET(JFET)型<sup>37-40)</sup>、静電誘導トランジスタ(SIT)型<sup>41,42)</sup>、バイポーラトランジスタ型<sup>43)</sup>、MOSトランジスタ型<sup>44,45)</sup>といろいろ考案されてきた。

JFETやSITでは、ゲート部が蓄積部になっており、蓄積された信号電荷量によってドレイン電流が変調される。バイポーラトランジスタでは、ベースが蓄積部を兼ねており、コレクタ電流をコントロールする。MOSトランジスタでは、バックゲートの働きをするウェルが蓄積部の働きをし、信号電荷に応じてバックゲート電位が変動し、ドレイン電流が変調される。いずれのトランジスタの場合も、蓄積された信号電荷の信号電流の変調度を大きくすることが求められ、ゲートをリング状にするなど工夫が施されている。しかし、埋め込みフォトダイオードを用いた4Tr型APSが、多画素1セル技術、MOSトランジスタの微細化技術の発展のおかげで、画素の微細化に成功し、増幅素子型を駆逐した。

積層型<sup>46,47)</sup>では、MOSセンサやCCDの上に光導電膜を積層し、光電変換は光導電膜で行い、蓄積、走査、出力の機能はMOSセンサやCCDで行う。すなわち、フォトダイオード部を蓄積部としてのみ使用し、蓄積部と光導電膜下の下部電極とを電気的に接続している。積層型では、開口率を大きくできる、結晶シリコンとは異なる光導電材料に応じた分光特性が得られるという利点がある。積層型、特に有機光導電膜を利用した積層型MOSセンサについては1-8節で説明される。

TFT (Thin Film Transistor) 型センサ<sup>48)</sup>は、基本構成はMOS型と同様であるが、使われる素子がTFTである。TFTに使われる半導体が光電変換をするタイプと、TFT上に光導電膜を積層するタイプがある。大面積が容易であり、X線センサに用いられている。

固体撮像デバイスの分類にはほかの観点からの分類方法もある。

光信号がシリコン面の表面(トランジスタや配線が形成されている側)から入射する表面照射型(FSI: Front Side Illumination)と、逆に裏面側から入射する裏面照射型(BSI: Back Side Illumination)の分類がある。天文用CCDなど高感度を必要とする用途で利用されてきたが、微細画素のAPSにおいても感度向上のために2009年から製品化されている。

画素配列が一次元状であるリニアセンサと、二次元状であるエリアセンサとに分ける分類方法もある。また、感度をもつ波長帯による、X線センサ、紫外線センサ、可視光センサ、赤外線センサに分ける分類もある。更には、用途別の分類方法もある。

## ■参考文献

- 1) W. C. Dash and R. Newman, "Intrinsic Optical Absorption in Single-Crystal Germanium and Silicon at 77°K and 300° K," Physical Review, vol.99, no.4, pp.1151-1155, Aug. 1955.
- 2) H. R. Philipp and E. A. Taft, "Optical Constants of Silicon in the Region 1 to 10 eV," Phys. Rev., vol.120, pp.37-38, 1960.
- 3) H. Melciior, "Demodulation and Photodetection Techniques," in F. T. Arecchi and E. O. Schulz-Dubois, Eds., Laser Handbook, 1, North-Holland, Amsterdam, pp.725-835, 1972.
- 4) H. R. Hertz, "Ueber einen Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die electriche Entladung," Annalen der Physik, vol.267, no.8, pp.983-1000, Jun. 1887.
- 5) A. Einstein, "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt," Annalen der Physik, vol.322, no.6, pp.132-148, 1905.
- 6) M. Planck, "Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum," Annalen der Physik, vol.309, no.3, pp.553-563, 1901.
- 7) W. Smith, "Effect of Light on Selenium during the Passage of an Electric Current," Nature, vol.7, p.303, 1873.
- 8) E. Braun, "Selected Topics from the History of Semiconductor Physics and Its Applications," Out of the Crystal Maze (Edited by L. Hoddeson, E. Braun J. Teichmann and S. Weart), Oxford University Press, p.444, 1992.
- 9) M. E. Becquerel, "Memoire sur les Effets Electriques Produits sous l'Influence des Rayons Solaires," Comptes Rendus Hebdomadaires des Seances de L'Academie des Sciences, vol.9, pp.561-567, 1839.
- 10) W. G. Adams and R. E. Day, "On the Action of Light on Selenium," Proc. Royal Soc., vol.A25, pp.113-117, 1876.
- 11) V. L. Bergmann, "Über eine Neue Selen-Sperrschicht Photozelle," Physikalische Zeitschrift, vol.32, pp.286-289, 1931.
- 12) 西澤潤一, 渡辺 寧, "高抵抗薄層領域を有する半導体光電変換器," 特公昭 30-8969, 1953年 6月 30日 出願.
- 13) K. Tanioka, J. Yamazaki, K. Shidara, K. Taketoshi, T. Kawamura, S. Ishioka, and Y. Takasaki, "An Avalanche-Mode Amorphous Selenium Photoconductive Layer for Use as a Camera Tube Target," IEEE EDL, EDL-8, pp.392-394, No.9, Sep. 1987.
- 14) V. K. Zworykin, "Method of and Apparatus for Producing Images of Objects," USP2,021,907 (Applied Nov. 13, 1931). 蓄積モードに関しては, 高柳健次郎, "積分法ヲ利用セル「テレビジョン」送像器," 特許 93465号, 1930年 12月 27日 出願.
- 15) G. P. Weckler, "Operation of p-n Junction Photodetectors in a Photon Flux Integrating Mode," IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol.sc-2, no.3, pp.65-73, 1967.
- 16) 曾根 有, "電視像分解或ハ合成装置ノ改良," 特許 94600号, 1931年 7月 13日 出願.
- 17) E. R. Fossum, "Active Pixel Sensors: Are CCD Dinosaurs?," Proc. SPIE, vol.1900, pp.2-14, 1993.
- 18) K. Chen, M. Afghani, P. E. Danielsson, and C. Svensson, "PASIC: A processor-A/D converter-sensor integrated circuit," IEEE Int. Symposium Circuits and Systems, vol.3, pp.1705-1708, 1990.
- 19) R. Panicacci, et al., "Progress in voltage and current mode on-chip analog-to-digital converters for CMOS image sensors," Proc. SPIE, vol.2654, pp.63-71, Feb. 1996.
- 20) M. Ishikawa, K. Ogawa, T. Komuro, and I. Ishii, "A CMOS vision ship with SIMD processing element array for 1 ms image processing," IEEE ISSCC, pp.206-207, Feb. 1999.
- 21) A. Rose, P. K. Weimer, and H. B. Law, "The Image Orthicon — A Sensitive Television Pickup Tube," Proc. of the IRE, vol.34, no.7, pp.424-432, Jul. 1946.
- 22) P. K. Weimer, S. V. Forgue, and R. R. Goodrich, "The Vidicon photoconductive camera tube," Electronics, 23, 5, p.70, 1950, RCA Review, vol.12, no.3, pp.306-313, 1951.
- 23) E. F. De Haan and A. G. Der Drift, "The "Plumbicon" A Camera Tube with a Photoconductive Lead Oxide Layer," Journal of the SMPTE, vol.73, no.6, pp.473-476, 1964.
- 24) K. Shimizu, O. Yoshida, S. Aihara, and Y. Kiuchi, "Characteristics of Experimental CdSe Vidicons," IEEE Trans. of Electron Devices, ED-18, no.11, pp.1058-1062, 1971.
- 25) 後藤直宏, 設楽圭一, "As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>を用いた光導電形撮像管," テレビジョン学会誌, vol.21, no.1, pp.21-26, 1967.

- 26) 長谷川正, 山本準太, 藤原慎司, “ニュービコン,” テレビジョン学会誌, vol.28, no.11, pp.884-888, 1974.
- 27) M. F. Tompsett, G. F. Amelio, W. J. Bertram, R. R. Buckley, W. J. McNamara, J. C. Mikkelsen, and D. A. Sealer, “Charge Coupled Imaging Devices: Experimental Results,” IEEE Trans. Electron Devices, ED-18, no.11, pp.992-996, 1971.
- 28) G. F. Amelio, “Physics and Applications of Charge-Coupled Devices,” IEEE Intercon Tech. Papers, pp.1-6, Mar. 1973.
- 29) M. Kimata, M. Denda, N. Yutani, and N. Tsubouchi, “A 480 x 400 Element Image Sensor with a Charge Sweep Device,” IEEE ISSCC, pp.100-101, 1985.
- 30) S. Terakawa, T. Yamada, K. Hori, T. Takamura, and I. Teramoto, “A New Organization Area Image Sensor with CCD Readout through Charge Priming Transfer,” IEEE Electron Device Letter, EDL-1, no.5, pp.86-88, 1980.
- 31) P. J. W. Noble, “Light Sensitive Arrays Based on Photodiodes Combined with MOS Devices,” IEE Conf. on Integrated Circuits, pp.251-257, May 1967.
- 32) S. G. Chamberlain, “Photosensitivity and Scanning of Silicon Image Detector Arrays,” IEEE Journal of Solid-State Circuit, SC-4, no.6, pp.333-342, 1969.
- 33) 安藤文彦, 竹歳, 中村, 今井, “増幅型固体撮像素子 AMI (Amplified MOS Intelligent Imager),” TV 学会誌, vol.41, no.11, pp.1075-1082, 1987.
- 34) S. K. Mendis, S. E. Kemeny, and E. R. Fossum, “A 128 x 128 CMOS Active Pixel Image Sensor for Highly Integrated Imaging Systems,” IEEE IEDM, pp.583-586, Dec. 1993.
- 35) P. P. K. Lee, R. C. Gee, R. M. Guidash, T-H. Lee, and E. R. Fossum, “An Active Pixel Sensor Fabricated Using CMOS/CCD Process Technology,” IEEE Workshop on CCD and Advanced Image Sensors, Apr. 1995.
- 36) E. Arnold, M. H. Crowell, R. D. Geyer, and D. P. Mathur, “Video Signals and Switching Transients in Capacitor-Photodiode and Capacitor-Phototransistor Image Sensors,” IEEE Transactions on Electron Devices, ED-18, no.11, pp.1003-1010, 1971.
- 37) J. Lohstroh, “The JFET as a Photosensitive Cell in Image Sensor Arrays,” IEEE ISSCC, pp.34-35, Feb. 1974.
- 38) T. Nakamura, K. Matsumoto, R. Hyuga, and A. Yusa, “A New MOS Image Sensor Operating in a Non-destructive Readout Mode,” IEEE IEDM, pp.353-356, Dec. 1986.
- 39) J. Hynccek, “A New Device Architecture Suitable for High-Resolution and High-Performance Image Sensors,” IEEE Trans. on Electron Devices, vol.35, no.5, pp.646-652, 1988.
- 40) 石田和久, 磯貝忠男, 米山寿一, 壽圓正博, 風間常行, “160万画素 BCAST イメージセンサ,” テレビジョン学会技術報告, vol.20, no.23, pp.37-42, Mar. 1996.
- 41) T. Ohmi, T. Tamamushi, and J. Nishizawa, “Non-Destructive Image Sensor,” IEEE IEDM, pp.350-354, Dec. 1980.
- 42) A. Yusa, J. Nishizawa, M. Imai, H. Yamada, J. Nakamura, T. Mizoguchi, Y. Ohta, and M. Takayama, “SIT Image Sensor: Design Considerations and Characteristics,” IEEE Trans. Electron Devices, ED-35, no.6, pp.735-742, 1986.
- 43) N. Tanaka, S. Hashimoto, M. Shinohara, S. Sugawa, M. Morishita, S. Matsumoto, Y. Nakamura, and T. Ohmi, “A 310k Pixel Bipolar Image (BASIS),” IEEE ISSCC, pp.96-97, Feb. 1989.
- 44) J. Hynccek, “BCMD — An Improved Photosite Structure for High-Density Image Sensors,” IEEE Trans. on Electron Devices, vol.38, no.5, pp.1011-1020, 1991.
- 45) T. Miida, K. Kawajiri, H. Terakago, T. Endo, T. Okazaki, S. Yamamoto, and A. Nishimura, “A 1.5MPixel Imager with Localized Hole-Modulation Method,” IEEE ISSCC, pp.42-43, Feb. 2002.
- 46) T. Tsukada, T. Baji, H. Yamamoto, Y. Takasaki, T. Hirai, E. Maruyama, S. Ohba, N. Koike, H. Ando, and T. Akiyama, “New Solid-State Image Pickup Devices Using Photosensitive Chalcogenide Glass Film,” IEEE IEDM, pp.134-136, Dec. 1979.
- 47) Y. Terui, M. Yoshino, M. Ogura, M. Nakayama, M. Yoneda, K. Kugimiya, S. Akiyama, T. Chikamura, Y. Ota, Y. Miyata, H. Tanaka, M. Fujimoto, and S. Horiuchi, “A CCD Imaging Device Having a PLOSS Structure,” IEEE IEDM, pp.487-490, Dec. 1981.
- 48) P. K. Weimer, H. Borkan, G. Sadasiv, L. Meray-Horvath, and F. V. Shallcross, “Integrated Circuits Incorporating Thin-Film Active and Passive Elements,” Proc. of IEEE, vol.52, no.12, pp.1479-1486, 1964.