

第16回 イメージセンサ

厚木エレクトロニクス 代表
サクセス インターナショナル 取締役
加藤俊夫

受光素子には、リモコンに使われているような1点で受光するセンサや、プリンタなどに用いられる受光素子が一列に並んだラインセンサもあります。最近脚光を浴びている太陽光発電も受光素子の一種で、光が電気に変換するのは同じ原理です。(色素増感と呼ばれるタイプは異なりますが)。しかし、一般にイメージセンサと言えば、面積を持った受光素子であり、これをArea Image Sensorと呼んでいます。

光を電気信号に変換する原理

受光素子の原理を図1により説明しますと、光がSi中に入ると光のエネルギーで原子に束縛されていた電子が飛び出てきます。つまり、電子と正孔が発生したわけです(図1の左側参照)。リモコンの受光素子や太陽光発電では受光部はpn接合ダイオードの構造になっていますので、図1右のように接合に空乏層があり、その中に発生した電子と正孔が電荷となって取り出されます。発生する電荷の量は、入射光の強さに比例しますが、空乏層の場所が適当でないと感度が上がりません。すなわち、短波長(紫や紫外線)の光はSiの表面で吸収されて内部まで届きませんし、長波長(赤や赤外線)の光はSi内部まで届きますので、これに適した空乏層を作る工夫が必要です。ただし、Siの場合は、 $1.1\mu\text{m}$ の波長より長波長の光は、エネルギーが弱くてSi原子から電子を飛び出させることができません。従って、 $1.1\mu\text{m}$ より長波長の赤外線には感度がありません。

CCDイメージセンサの原理

CCDは、Charge Coupled Deviceを略したもので、電荷結合素子と訳されていますが、筆者は電荷転送素子の

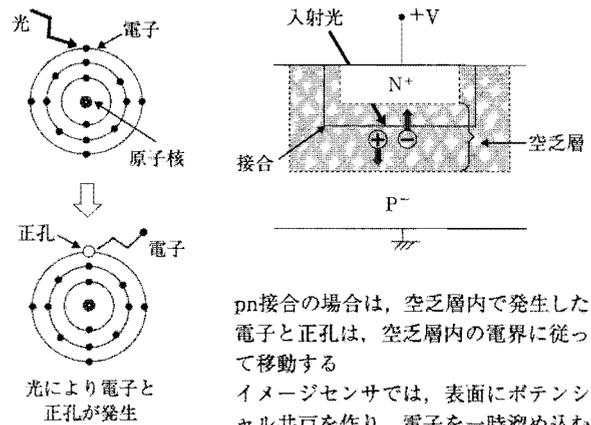


図1 N+Pダイオードによる光電変換

方がぴったりしていると思っています。3相CCDを例にとって、図2でその動作を説明します。図2は、Si上に薄いSiO₂膜を挟んで電極が多数並んだMOS構造となっています。この電極に、 $\phi_1 = 10\text{V}$ 、 ϕ_2 と $\phi_3 = 0\text{V}$ のように三つおきに10Vのバイアスをかけると、図2左のように電極に対抗したSi表面に電荷が溜まります。次に図2右のように ϕ_1 を0Vにし、 ϕ_2 に10Vバイアスをかけると、溜まっていた電荷が右へ移動します。このようにして ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 に次々とバイアスを移動させると、電荷もバケツリレーのように次々に転送されます。これがCCDの原理です。2相や4相のCCDもあります。

次に実際のCCDイメージセンサを見てみましょう。色々な種類がありますが、図3は最も一般的なタイプのインターライン・トランスファー型で、本稿ではこのタイプのCCDを説明します。図3には受光フォトダイオードが1丁目1番地(1, 1)からM丁目N番地(M, N)まで多数並んでいますが、これらはすべてpn接合ダイオ

＜ちょっと脱線1＞ CCDとは何でしょう

かなり半導体のことが分かっている人でも、こんな質問をすると、「ああ、それはカメラに使われている受光素子でしょう」という答えが返ってきます。でも、本文を読まれた方はもうお分かりかと思いますが、CCDには光信号を扱うという意味はまったくありません。単に電荷を転送する素子であって、光信号を読み出すのに CCD動作を取り入れただけなのです。光と関係ないCCDとして、遅延素子 (Delay Line) があります。信号を次々転送すると入れてから出るまで時間がかかりますから、それを遅延素子として使うわけです。

ードです。皆さんがお使いの携帯電話に ついてはデジタルスチルカメラは200 万画素でしょうか。最近では500万画素な どもあるそうですが、図3のフォトダイ オードがこの数だけ並んでいるわけです。 ここで、ちょっと難しいお話しをしな ければなりません。このダイオードは図4 のような構造をしているのです。n型の 部分が埋め込まれたようになっています

が、ここが電位的には最も低くて電子が溜まるポテンシ ャル井戸と呼ばれています。同時に発生した正孔は、p 型基板や表面のP⁺層に吸収されます。従って、CCDイ メージセンサの電荷として利用されるのは、ポテンシ ャル井戸に溜まった電子です。この様子を図4に示しま す。何となく分かっていただけでしょ。 (この 理解には、量子論から導かれたバンド理論を勉強して いただかなければなりません)。なぜ、このような構造に するかと言いますと、Si表面は、Si-SiO₂の界面ですから、 Si原子の並び方が不連続になり、結晶の乱れや、不純物 の析出などが起こりやすいのです。そのような欠陥があ ると、電子が捕まってしまうたり、余計な時に発生し たりして一種のノイズとなります。そこで表面ではなく結 晶内部に電子を溜める工夫をしているわけです。

次に、図3を見ると、これらのフォトダイオードの間 に縦に垂直転送CCDが並んでいます。フォトダイオード で発生した電荷は、全トランスファーゲートを開いて 一斉に矢印のように垂直転送CCDに送られます。垂直 転送CCDには、全画素の電荷が一時蓄えられるわけ です。それを順に下へ送って行きます。最初に、図の (1, 1), (1, 2), (1, 3)・・・(1, N)の電荷が水平転送 CCDへ送られます。水平転送CCDは、すぐ出力部へ 転送します。次に (2, 1), (2, 2), (2, 3)・・・(2,

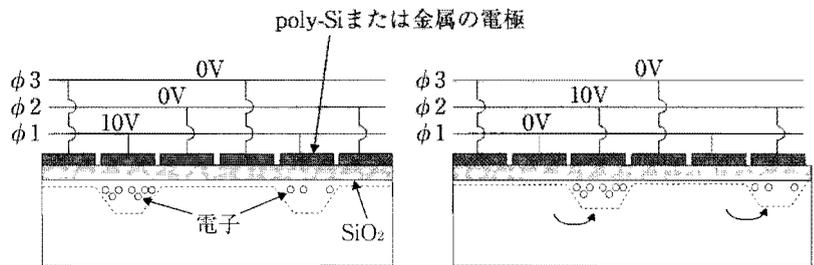


図2 3相CCD動作 電荷が右のキャパシタへつづれたところ

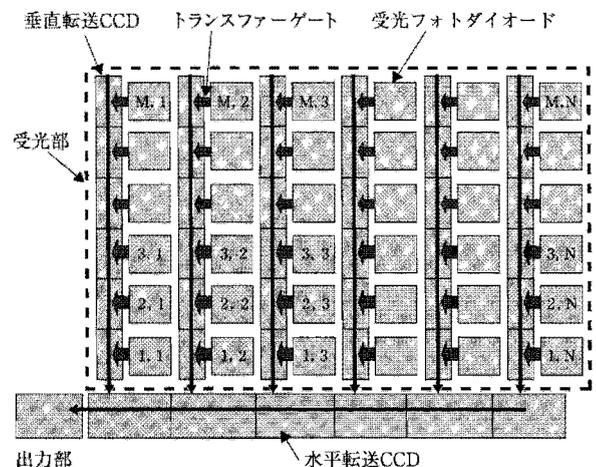
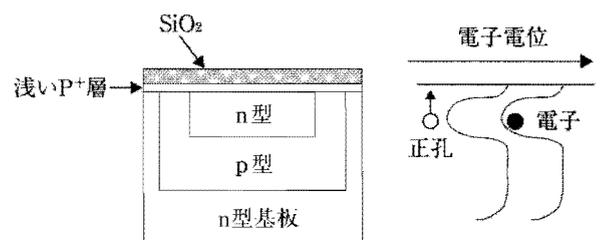


図3 インターライン・トランスファー型 CCD



電子はポテンシャル井戸に蓄えられ、正孔は表面のP⁺層や基板のP層に流れていく

図4 埋め込みダイオード・センサ

<ちょっと脱線2 前編> CCD開発物語

ビデオカメラ、デジタルスチルカメラに続いて携帯電話にもカメラがついて、どこでもパチパチの時代となりましたが、元はと言えばソニーの苦闘の歴史があったのです。その時の責任者だった元ソニー中央研究所副所長の川名喜之氏に一筆頂きました。



▲ソニー元社長 岩間氏

70年、ベル研究所がCCDを発明した直後、ソニー岩間元社長はベル研究所を訪れその報告を受けていた。73年、彼はCCDを大きなプロジェクトとして取り上げることに決定し、5年以内にビデオカメラを商品化し、価格は5万円を目標にすることを命じたのである。これがすべての始まりであった。ソニーが世界一のCCDカメラメーカーになり、今日のソニーを築くトリガになったのであった。同氏は「我が競争相手はフィルム産業であって半導体会社ではない」と言っていた。化学産業をエレクトロニクス化するのが目的であって、正にその通りになった。

しかし、当初はそんなに生易しい物ではなかった。ソニー中央研究所ではフトリソグラフィと洗浄室だけにクリーンルームがあり、他の装置は一般の部屋と同じ環境に置かれていた。加えて中央研究所は一貫してラインを流してデバイスを作るという開発体制は不慣れであった。75年1月、新たに中央研究所と半導体事業の本部にまたがる組織が出来てCCD開発を担当することになり、私（川名）がプロジェクトリーダーに任命された。しかし、容易にはCCDは完成しなかった。孫の代までできっこないと言われる研究に社内からCCDプロジェクト推進反対、即時停止の大きな声上がる中、いくつかの学会にその開発成果を発表し、同時に岩間社長自ら新聞発表を行うことができて、一つの段階を迎えることができた。これは日本のみならず、世界に衝撃を与える一連のイベントであった。その秋、厚木にCCD専用のラインを新設し、中研から大部分のプロセス/デバイス技術者が移動した。

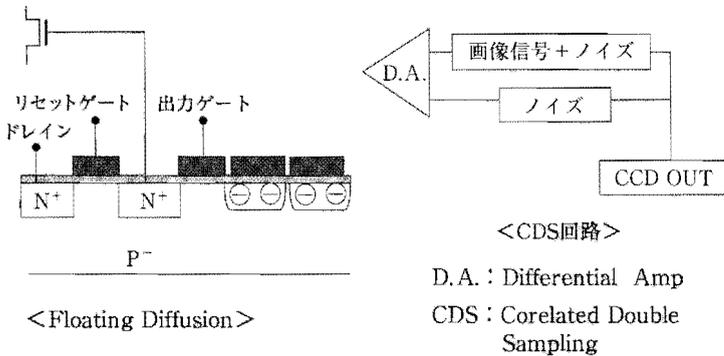


図5 CCDイメージセンサ出力回路

N)の電荷が水平転送CCDへ来ます。これらもすぐに出力部へ送られます。このようにして最後の(M, N)までの電荷が順に水平転送CCDへ送られ、水平転送CCDは、その都度出力部へ転送し、出力部から外部へ電圧として取り出します。すなわち、(1, 1)から(M, N)まで走査(Scan)したわけで、これがCCDイメージセンサの原理です。

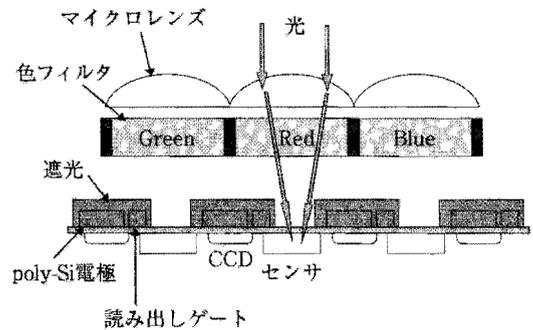


図6 インターラインCCDカラーイメージセンサの構造

最後に出力部の説明をしましょう。水平転送CCDから送られてきた電子を電圧に変換するわけですが、図5左のMOSトランジスタのソース(N-)を、どこにも繋がれていないフローティングな状態にしておき、出力ゲートをONにして、水平転送CCDからの電荷をここに転送します。電荷量Qと電圧Vの関係は、 $Q = CV$ で表され、(Cは、フローティング拡散層の接合容量)電圧に変換

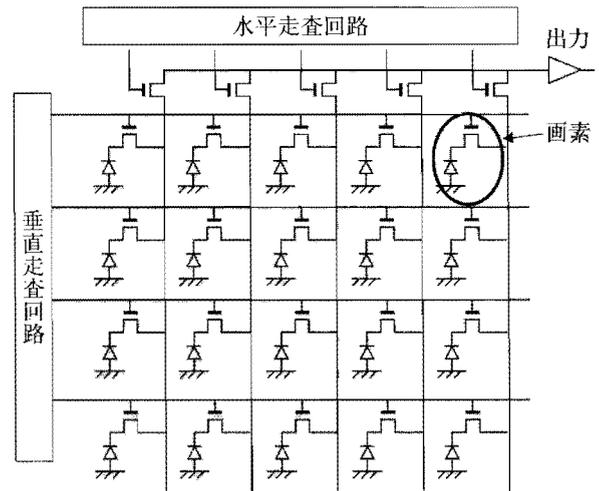
G	R	G	R	G	R	G	M	G	M	G	M
B	G	B	G	B	G	Y	C	Y	C	Y	C
G	R	G	R	G	R	G	M	G	M	G	M
B	G	B	G	B	G	Y	C	Y	C	Y	C
G	R	G	R	G	R	G	M	G	M	G	M
B	G	B	G	B	G	Y	C	Y	C	Y	C

A) 原色フィルタ

G : Green
B : Blue
R : Red

B) 補色フィルタ

Y : Yellow
M : Magenta
C : Cyan



水平走査回路のMOSと垂直走査回路のMOSがともにONになった画素の信号が出力される

図7 単板式、色フィルタの配列

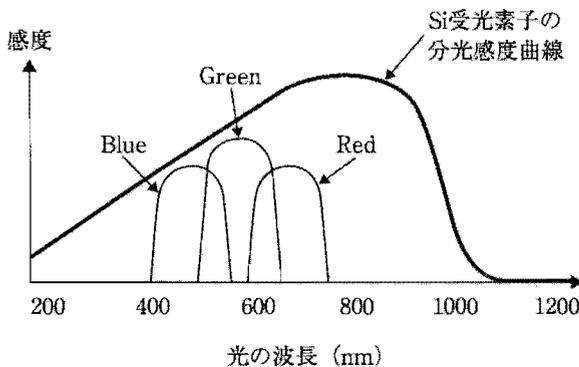


図8 Siの分光感度特性と色フィルタの分光特性

されます。次の水平転送CCDからの電荷を転送するためには、フローティング層をリセットしなければなりませんので、リセットゲートでMOSをONにします。その時、電流の熱ゆらぎによるノイズが発生しますので、それを除くCDS (Corelated Double Sampling) と呼ばれる回路が用いられます。図5右のように画像信号にノイズが含まれていますので、ノイズ分の信号をDA (差動アンプ) で差し引いて画像信号だけを取り出します。

CCDイメージセンサのカラー化

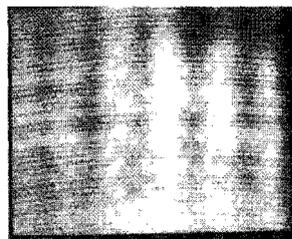
以上で、ちょっと退屈なCCDイメージセンサの原理

図9 MOSイメージセンサの信号読み出し

的な説明は終わり、次に実際の構造がどうなっているか見てみましょう。図6は、センサに光が入射する様子を表しています。すなわち、チップ全面にマイクロレンズが敷き詰めてあります。500万画素のイメージセンサなら、500万個のレンズが載っているわけです。センサの開口部の面積は、大きくてもチップ全体の20%以下ですから、光を有効に利用するためレンズで集めます。ついで、1個のチップで色情報を得るため、色フィルタを通ります。色フィルタは、図7に示したような光の三原色RGB (赤、緑、青) の配列になっています。RGBの分光特性とSiイメージセンサの感度を図8に示します。補色系のマゼンタ、シアン、イエローが用いられることもあります。補色系の方が光の利用率は良いのですが、色情報としてはRGBが良いとされています。カラー化には、3チップ方式も用いられます。これは光をプリズムでRGBに分解し、それに対応したイメージセンサを配置して色信号を得るものです。勿論、3個のチップを用いますからコストは上がります。また、Siは赤外線にも感度がありますので、人間が感じる波長域に合わせるため赤外カットフィルタも挿入されます。

＜ちょっと脱線2 後編＞画像欠陥撲滅への挑戦

新開発ラインでも、減多に合格品はできなかった。歩留りとは呼ばず、出現率と呼べと言われた。確かに何かの拍子に間違っ合格品ができるようなひどい状況であった。まず、フォトリソグラフィの欠陥の問題である。初期のコンタクト/プロキシミティ方式のアライナではたちまちマスクにレジストが付着してパターン欠陥になるのであった。パーキンエルマー・ジャパンの高価なプロジェクト/プロキシミティ方式のアライナを購入し、これによって大きく仕事は前進した。どうやら断線が減ってCCD画像をモニタに映すと、無残な欠陥ばかりが目立った。白線、黒線、白点、黒点、しみなどの欠陥がいたるところにあった。ウェーハの結晶成長時のスワールと呼ばれる組成のムラもあり、結晶欠陥に起因する画像欠陥を撲滅することが重要であった。後にMCZという画期的な結晶引上法を開発するキッカケになった。ゲート酸化膜の問題、poly-Si CVDに関する問題、色フィルタ製法の問題など次から次へと問題続出であった。ウェーハのハンドリングする場所と装置の補機を別の部屋にする、スルー・ザ・ウォールは、現在では当たり前だが、我々が世界で最初に行なったと思っている。また、自動欠陥検査機も自作し、多くのパターン欠陥やダストを検出し歩留り向上に寄与した。次第に欠陥の非常に少ない画像が得られ、白黒からカラーへの転換にも成功し、全日空ジャンボに搭載された。参考に画像欠陥の写真を示す。「おわりに」



結晶成長起因の結晶内不純物
▲組成分布が現れたCCD画像

ソニー岩間元社長の執念によって完成したCCD撮像素子技術は、自社の家庭用ビデオカメラに搭載されただけでなく、日本に電子カメラ産業を創出した。当初は会社中がその成功を危ぶみ、プロジェクト中止という声がトップグループ内も含めて社内に蔓延したが、同氏の将来を見通す見識と執念は開発担当者たちに受け継がれ、これらの批判を恐れず前進した。同氏は何時もプロジェクトに対する指導は厳しかったが、社内の批判からプロジェクトを護った。また、半導体技術の世界的進展が、プロジェクトを後押しした。同氏の当初の見通しのミスもこれらすべてがカバーした。この大きな理想を掲げ、誰もできないからやるんだという経験は、現在も参考にされるべきところがあると思っている。

CMOSイメージセンサ

このところ、CMOSイメージセンサの性能が良くなり、CCDとほとんど変わらない画質が得られるようになったため、携帯電話やデジタルスチルカメラに大量に用いられています。数量では、CCDよりCMOSの方が多く出荷されています。CMOSの場合も、光を受講するセンサの構造はCCDとほとんど同じですから、説明は省略します。

CCDとCMOSの違いは、センサの電荷の読み出し方です。CMOSは、図9のように水平走査回路と垂直走査回路が設けられて、水平と垂直のスイッチMOSトランジスタがONになった交点の画素の電荷が出力へ送られる極めて簡単な仕掛けです。ただし、このCMOSイメージセンサがなかなか実用にならなかったのは、スイッチ

MOSの特性のバラつきが絵の信号のバラつきになってしまうことや、多くのトランジスタと接続していますから、あちこちで拾ったノイズが問題になっていました。画素ごとに感度が違うようなものです。これを各画素の中に増幅回路を設け、スイッチMOSのバラつきを抑える回路を導入したことにより、解決しました。ただし、狭い面積の画素の中に回路を組み込むわけですから、肝心の受光部の面積が小さくなってしまい、各社が設計に工夫するところです。MOSイメージセンサの大きな利点は、シフトレジスタやその他の回路はCMOSですから、センサと同一チップ上に作ることができ、また消費電力が小さい点がCCDより優れています。最近では、35mmフルサイズ(36mm×24mm)という大面積のCMOSイメージセンサも実用化されています。