

■8群-4編-1章

1-5 カラーフィルタ, マイクロレンズ

(執筆著: 佐野義和) [2010年12月 受領]

カラーフィルタにより撮像素子から色認識される原理は, 人間の視細胞の中に三原色を感じる3種類の錐体が存在し, 光刺激を赤, 緑, 青の混合比率で認識する加法混色¹⁾の仕組みに基づいている. 構造面からは, 現在主流のシリコンウエハ上に直接パターンニングするオンチップカラーフィルタ(OCF)と貼り合わせ構造がある. 材料面からは, 染料を用いる方法, 顔料を用いる方式, 更に無機干渉フィルタがある. 本節では単板カラーフィルタを中心にその材料や, 製造方法と構造視点から, 特性やその特徴を解説する.

マイクロレンズは, 撮像デバイスの重要特性の一つである感度(SN比)の増大を目的に技術躍進を遂げ, ほぼすべての撮像デバイスに採用されるまでに至った. その集光の考え方や基本構造を概説し, 高画素撮像デバイス開発とともに進展しているオンチップマイクロレンズ(OCL)技術を説明する. 感度向上は, 撮像デバイスのシリコン部分の構造, OCF構造, OCL構造などに対する総合的なシミュレーション(SIM)を用いて最適条件を求めることが重要であり, シミュレーションについても言及する.

1-5-1 カラーフィルタ特性

単板式カラーフィルタの色の組合せは二つあり, 原色フィルタと補色フィルタに分かれる. 原色フィルタは, 三原色のレッド:赤, グリーン:緑, ブルー:青(R, G, B)色分光が用いられ, 代表的な配列は Bayer(緑市松)方式²⁾である. 高い色再現性が特長で, デジタルスチルカメラ(DSC)を中心に多く採用されている. 補色フィルタは, マゼンタ:紫紅, イエロー:黄, シアン:緑青に, グリーン:緑を加えた4色分光(Mg, Ye, Cy, G)が用いられ, 代表的配列は色差順次方式³⁾で, 透過光量が多いため, フィールド蓄積インターレース方式の民生用ムービーなど, 低照度撮影が必要な製品に採用されている. 表1・2には単板式カラーフィルタの色種とその配列を示し, 原色と補色の色配列の代表例を平面図で表した.

表1・2 単板式カラーフィルタの色種と配列

原色フィルタ				補色フィルタ					
色種	色配列			色種	色配列				
レッド: R, 赤	G	R	G	R	マゼンタ: Mg, 紫紅	Mg	G	Mg	G
グリーン: G, 緑	B	G	B	G	イエロー: Ye, 黄	Cy	Ye	Cy	Ye
ブルー: B, 青	G	R	G	R	シアン: Cy, 緑青	G	Mg	G	Mg
	B	G	B	G	グリーン: G, 緑	Cy	Ye	Cy	Ye
	Bayer方式				色差順次方式				

1-5-2 カラーフィルタ構造と材料

カラーフィルタは構造面から, オンチップカラーフィルタ(OCF)と貼り付け構造に区別される. OCFは現在主流の構造で, 拡散工程完了したウエハ上に直接カラーフィルタを形成する. 既存の半導体設備がそのまま流用できるために, 撮像デバイスとカラーフィルタの位

置精度が高く、かつ生産性が高いという特長がある。

貼り付け構造は撮像デバイスのセルサイズが大きく、画素数が比較的少ない時代は主流であったが、近年の生産数は極めて少なくなっている。高温環境や高耐候性を要求される場合に、無機材料の多層干渉膜カラーフィルタの貼り付け構造が採用されている。撮像デバイスとカラーフィルタとの接着は、撮像デバイスをパッケージに組み立てた後に行われる。厚さ0.5 mm前後のガラス板に形成されたカラーフィルタの各色の中心と、撮像デバイスのフォトダイオード (PD) 開口位置中心を正確に合わせて接着する。合わせ精度は画素サイズの10%以下が要求される。この構造は、撮像デバイスとカラーフィルタ両方の歩留まりが低かった時代には、双方の良品同士を組み合わせられる利点があった。

表 1・3 では構造、材料、工法でカラーフィルタを分類した。OCF 構造の有機材料を中心にその特徴を述べる。1980年代から1990年代前半は、ゼラチンやカゼインなどの天然蛋白を被染色材料とし、酸性染料で染色する染色工法が主流であった。感光性をもたせるためクロム系材料を添加していた。安全性の観点からクロム系を排除するためと、セルの微細化に対応する解像度限界のために、作業の安全性が高い感光材を含んだ高解像度合成樹脂⁴⁾を、含金属系染料で染色する染色工法へ置き換えられるようになった。しかし、染色工法では、染料液の pH、液温度、染色時間、作業中の温湿度、成分の経時変化など、多くのパラメータの制御が必要で、定着や洗浄条件も最終分光に影響し、制御が難しかった。

表 1・3 単板式カラーフィルタの色と配列

項目	構造	材料分類	工法	材料種類
カラーフィルタ	オンチップ	有機材料	染色着色	合成樹脂
				天然蛋白 (減少)
		無機材料	蒸着・スパッタ	顔料色素
				染料色素
	貼り付け	無機材料	蒸着・スパッタ	多層干渉膜
		有機材料 (減少)	染色着色・色素含有	合成樹脂・天然蛋白

感光性樹脂の中に顔料や染料を分散させた色素含有レジスト工法は、生産性が向上し微細化に有利である。更に、カラーフィルタ層の膜厚でフィルタ分光がほぼ決定するために制御が容易である。この色素含有レジスト工法の場合、半導体で用いられるプロセス装置でほぼ製造可能となる。すなわち、塗布、露光、現像のリソグラフィ工程と、パターンニングのドライエッチング工程でカラーフィルタ形成が可能となった。このため、色素含有レジストを入手すれば、半導体メーカーで OCF 製造が可能になった。その後、染料を顔料に置き換えた高耐光性の顔料含有カラーレジストが開発された⁵⁾。更に、微細 OCF 形成のため、露光紫外線を短波長化して解像度を上げるため g 線 (436 nm) から i 線 (365 nm) の感光剤開発や顔料粒子径の微細化、凝縮防止の分散剤の開発が進み、実用量産化が可能となった。

別のカラーフィルタ方式として、OCF 構造の無機材料のカラーフィルタがある。その製造方法は、高屈折率の無機材料とそれより相対的に低い屈折率の無機材料を電子ビーム蒸着やスパッタで交互に薄膜構成し、干渉フィルタを形成する工法である⁶⁾。高屈折材料としては

TiO₂, ZnS, SiN, 低屈折材としては MgF₂, SiO₂ などが代表的な材料である。耐熱性, 耐候性に優れ, また, 拡散プロセスと一貫して製造できる特長がある。既存のカラーフィルタ分光と一致させるためには, 単純な膜構成では難しいが, 多層化することにより可能であることが示されている。

1-5-3 カラーフィルタプロセス

図 1・66 には, オンチップカラーフィルタ (OCF) の染色工法, 及び色素含有レジスト工法の工程フローを示し, その二つの工法を比較した。染色工法では, 第 1 工程で感光性樹脂の塗布を行い, 第 2 工程でパターン露光をする。第 3 工程で現像を行い, 第 4 工程で染色をする。第 5 工程は透明膜を塗布する防染工程や, 定着液に浸漬して染色の安定化を行い, 一色目のカラーフィルタが形成される。三原色のフィルタを形成する場合は, この第 1 から第 5 までの工程を三色分繰り返して OCF が完成する。

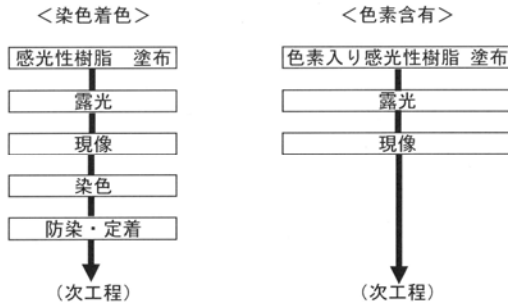


図 1・66 カラーフィルタ染色・定着と色素含有工程比較

色素含有レジスト工法では, 第 1 工程の塗布と, 第 2 工程の露光, 及び第 3 工程の現像のみが必要であり, 染色工法に必要な第 4 工程の染色と第 5 工程の防染・定着を削減することができる。色素含有レジスト工法の分光特性は, 塗布する樹脂の中に色素を予め分散させているため, その樹脂の膜厚を制御することのみで決定される。色素含有レジスト工法は, シンプルな工程条件や, 短い工数, 汎用の半導体設備で製造ラインが構築できるため, OCF 製造の主流となっている。第 1 工程の塗布と第 3 工程の現像の製造設備は, コータ/デベロッパと称する汎用の半導体製造装置を用いる。コータ内で, 色の数に合わせた数の塗布用ノズルを揃えれば, カラーフィルタ塗布工程は, 1 台の装置で構成できる。第 2 工程の露光では, ステップと呼ばれる汎用の半導体製造装置が用いられる。色素含有レジスト工法における三原色フィルタの工程数は, 染色・定着工法に比べほぼ 60% となり, 大幅な低減ができる。

補色フィルタでは, マゼンタ (Mg), イエロー (Ye), シアン (Cy), グリーン (G) の 4 色のカラーフィルタが必要である。補色フィルタでは二つの製造方法がある。一つは, Ye フィルタと, Cy フィルタとの重ね合わせで G 分光を作る方法であり, このため, 3 色の材料で 4 色の OCF を製造することができ, G 材料を削減することができる。もう一つの製造方法は, 4 色を独立に形成する方式であり, G の材料を必要とするため 4 材料 4 色形成となる。この方式の特徴は, 各色を同一面上にフィルタ配列するため, 3 材料 4 色形成と比べて OCF の厚

みを小さくすることができる。

1-5-4 マイクロレンズ技術の進展

オンチップマイクロレンズ (OCL) の着想は、撮像デバイス (Image Sensor : IS) の感度向上の目的で、PD上にレンズを個々に配置する構造として 1976 年に出願された⁷⁾。OCLによる集光効果は、1983年にOCLを実搭載したISの試作⁸⁾で確認された。1986年以降、民生向けのビデオカメラ (ムービー) の需要が増加し、OCLを搭載したISが本格的に量産化され始めた。1980年代の末になると、市場ニーズの高い小型軽量のムービーを実現するため、主要なISの光学系サイズは、1/2型から1/3型になったが、光学サイズを小さくしても、感度を低下させない設計が必要であった。このような背景の中、1990年に半導体微細加工技術と、レンズ材料開発、及びシミュレーション (SIM) を組み合わせて、高感度を実現したマイクロレンズのプロセス⁹⁾が開発され、OCL技術が、ISの民生分野のみならず、放送・業務¹⁰⁾の現場取材を中心としたENG^{*1)}と呼ばれる領域や、監視・通信用カメラの分野でも広く採用された。現在、OCLは様々な撮像機器の高感度要請に対し、なくてはならない技術として用いられている。

1-5-5 マイクロレンズの集光とシミュレーション

ISにおけるOCLの集光の考え方は、通常の凸レンズの集光理論と同じ原理で示される⁸⁾。OCL上に達した光の経路は、中空パッケージ内の気体とOCL上のレンズ材料双方の屈折率差で決定される。PDへの集光率はOCLの開口率に比例し、ISの感度も比例するので、実効開口率⁹⁾が、感度評価に対し有効な評価指標となる。集光率のSIMは幾何光学に基づく光線追跡と、波動の二つがある。光の波長に対して十分大きいPD開口寸法を有するISでは、集光率のSIMは、光を光線として取り扱うSIMで十分である。SIMは、1画素を単位セルと考え、その1セルにつき何本の光線が到達するかを計算する。相対的な感度のSIMでは、単位セルに到達するすべての光線本数 ΣU を分母とし、受光部のPDに到達する光線本数 ΣT を分子とした比率で示される。その値は、実効開口率EAR (Effective Aperture Ratio) と称する。EARは式(1)のように求めることができる⁹⁾。

$$EAR = (\Sigma T / \Sigma U) \times 100 \% \quad (1)$$

OCLがない場合、インターライン転送型CCD (IT-CCD) のEARは30%程度である⁹⁾。EARの理論上の最大値は100%となるので、理想形状のOCLを実現した場合、ISの相対感度はOCLなしの構造に対し数倍の増加が期待できる。EARの値は、光の軌跡を複数の光線として追跡し、取り扱った全光線の軌跡を集積すれば求められる。光線追跡に基づく精度の高いEARの値を求めるには、ISの構造が複雑でも光線の取り扱い本数をできるだけ多くとればよい。コンピュータの性能が向上したために、十分な光線本数による光線追跡SIMが実行可能となった。光線追跡におけるSIMの種類は、有限要素法⁹⁾や、モンテカルロ手法¹¹⁾や、更にデバイスとOCLをメッシュで区切り、ISのPD内部に発生する電流を予測¹²⁾し、感度計算する方法がある。EAR値決定の主要パラメータは、OCLのレンズ形状 (t : レンズ厚み, s : レンズ間スペース) である。レンズ形状は、底辺の長方形のドームレンズ (Rectangular

*1) ENGはElectronic News Gatheringの略称でVTRなどを用いた電子式ニュース取材システム。

dome-lens) と、半球レンズ (Hemispherical lens)、及び半円柱 (Semi-cylindrical lens) の3種類に大別⁹⁾される。商品化されているISでは、更に感度向上するため、様々なOCLの形状工夫がなされている。図1・67では、IT-CCDの平面模式図を用いて単位セルの領域と、開口領域であるフォトダイオード、及び遮光領域を示している。

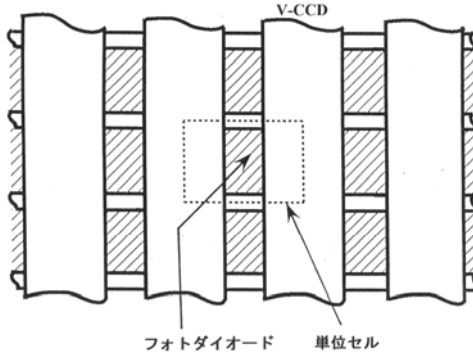


図1・67 IT-CCDの単位セルの説明図

レンズ形状のほかにEARの決定パラメータとしては、PD開口面積と、その開口形状、各材料における光屈折率と、反射率、そして、吸収率、及びレンズからPDまでの距離(h)と、遮光部を含めた内部形状、及びセット光学系の面シェーディングとその絞り値がある。更に、各画素に対する光線の入射角度が重要であるため、ISの撮像中心から単位セルまでの距離と方向を表す座標がパラメータの一つとなる。図1・68ではIT-CCDとOCL断面図、ならびに、その記号の内容を示す。

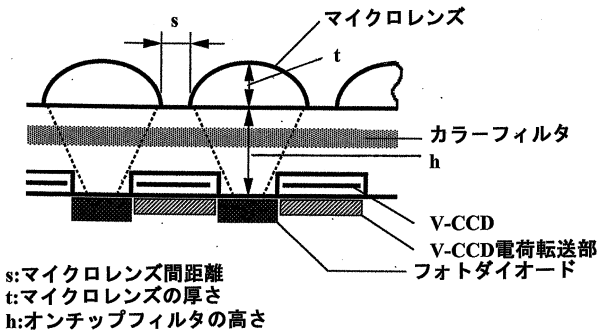


図1・68 CCDとオンチップマイクロレンズの断面図と記号

現在の光学SIMの主流は、デバイスの立体構造をパラメータとした三次元SIM¹³⁾である。近年、ISの微細化が急激に進みPDの開口寸法が、可視光の波長領域($\lambda=400\sim 700\text{ nm}$)に近づいている。この場合、光学SIMは光を波動として取り扱い、回折や干渉の効果をとり込み、感度計算の精度を高めている¹³⁾。波動SIMの場合、計算時間を短縮する工夫として二次元で三次元SIMの代替えにすることや、ISの複雑な構造を簡略化することが必要となる。

1-5-6 オンチップマイクロレンズの基本構造とプロセス

図 1・69 では OCL とカラーフィルタ模式図を示す。OCL 形成方法は、溶融法⁹⁾とエッチバック法とに分かれる。溶融法は、感光性レンズ材料を用い、材料の熔融とその液の表面張力を利用し、半球状に材料を固めるプロセスである。この形成方法の特徴は、フォトリソグラフィの工程とその設備で、レンズ形成が可能なことである。フェノール系ポジ型の紫外線感光材が主に使われている。

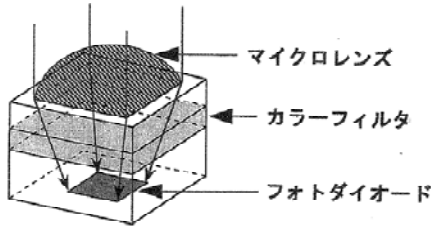


図 1・69 オンチップマイクロレンズとカラーフィルタ模式図

エッチバック法は、透明樹脂を塗布し、その上に半球形状のレジストを形成しドライエッチングで透明膜まで削り、レンズを形成する。この方式の特徴は、レンズ材料の選択範囲が広いことである。この形成方法では、透明性や屈折率の高い材料を選択し光学設計することができる。また、レンズ形状の変更は、エッチング条件を制御することで可能となる。製造工程の設備は、フォトリソグラフィのほかにドライエッチングの装置が必要である。

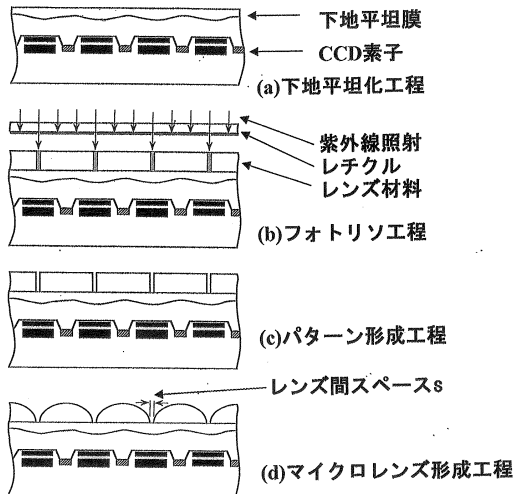


図 1・70 オンチップマイクロレンズ形成工程

図 1・70 では溶融法による OCL 形成工程を説明する。(a)凹凸のある IT-CCD 素子 (IS) の表面を透明樹脂のスピンコートで埋め込み、平坦化する。(b)平坦化した IS 表面に感光性レンズ材料を均一に塗布する。ステッパ装置でレチクルをマスクとして紫外線照射を行い、レ

レンズ間スペース：sの部分で露光する。(c) 現像液で感光した部分を分解除去しパターン形成する。(d) OCL 構造は、パターンを加熱することで得られる。感光性レンズ材料は熔融し液相となり、半球状態になった後、固相に変化する。

図 1・71 では形成された OCL の表面を写した電子顕微鏡 (SEM) 画像を示す。図 1・72 では補色の OCF 上に形成された OCL の光学顕微鏡写真を示す。溶融法で作られた OCL は、均一な半球状のレンズになっている。また図 1・73 では、同じ IS 表面の左半分に OCL を形成し、画像出力し、OCL 有りとなしとの効果を確認した出力画像を示す。OCL が搭載されている左の領域は、右の OCL 無しの領域に比べ2倍以上の感度増加があり、画質に対しても優れている。

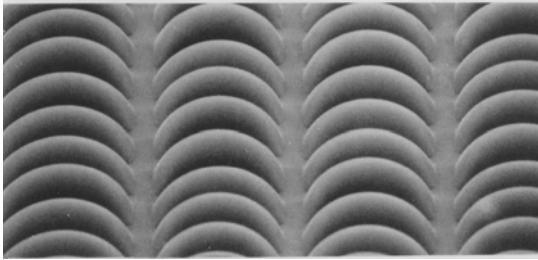


図 1・71 オンチップマイクロレンズ表面 SEM 画像 (3000 倍)

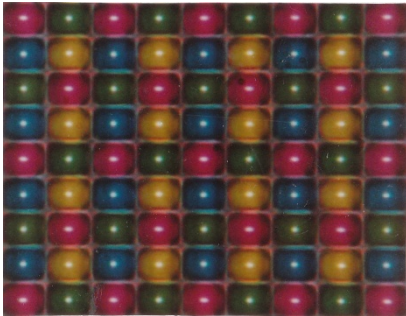


図 1・72 補色オンチップカラーフィルタ上のマイクロレンズ写真



図 1・73 マイクロレンズの感度向上効果 (向かって左はレンズ有り)

1-5-7 マイクロレンズの感度向上の取り組み

単位セル内の PD に入射する光量は、高画素化が進むと、単位セル面積の縮小により少なくなっていく。そのため、単レンズ方式の OCL では感度特性の維持が次第に困難となっている。特に暗いシーンでは、セットの光学レンズ絞りが開放近くになるため、OCL のレンズ表面に垂直入射する光線のほかに、OCL に対し斜めに入射する光線が増加し、その集光対策¹⁴⁾が必要となってくる。斜め光の PD への集光は、図 1・68 で示したオンチップフィルタの厚み： h の値を小さくすると増加する。すなわち、OCL と PD を近づけることにより感度が向上する¹¹⁾ので、微細画素の IS のプロセス設計において OCF の厚みを薄くすることが重要である。

また、レンズ間スペース : s は、感度に対して無効領域となるため、できるだけ小さく設計⁹⁾する。製造上 OCL のレンズ間スペースを最小化できる材料やプロセスの取り組みが、感度改善の有効な方策となる。

微小面積の PD に対する集光率を更に高めるため、従来の OCL の直下に層内レンズ¹¹⁾を形成した複数レンズ構造が、OCL の主流となっている。層内レンズは周囲の屈折率より大きな値の透明材料を用いて形成され、下向き凸レンズや、上向き凸レンズ、そして上下方向に凸レンズが重なった構造のものがある。層内レンズは感度向上のみならず、スミアの値も低減する効果がある¹¹⁾。図 1・74 は、層内レンズの断面 SEM 画像であり、下凸形状の層内レンズである。層内レンズが、PD の遮光部周辺に当たっていた光を中央付近に集め、その結果、スミアの原因となる迷光を減少させる。層内レンズの感度向上とスミア低減効果は、光学 SIM と、IS の実測評価の両方で確かめられている。

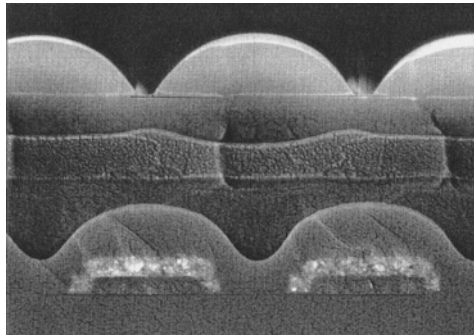


図 1・74 層内レンズの断面 SEM 画像

今まで述べた OCL は、凸レンズで光を屈折させて PD に集光させる方式である。この方式以外に、光の回折効果を用いた、デジタルマイクロレンズ (DML) が発表されている¹⁵⁾。この方式は、高解像度の露光機とドライエッチング装置を用い、無機材料の DML を形成し OCL とする。DML の特徴は、無機材料であるため、半導体の拡散プロセス内で製造できることと、従来の凸レンズ型 OCL に比べて、IS の画角周辺部の光量低下を少なくできる¹⁶⁾ことである。回折光を利用した DML は、微細化する IS の感度を更に向上させる有望な OCL 技術と考えられる。

■参考文献

- 1) 安藤隆男, 菰淵寛仁 (映像情報メディア学会編), “固体撮像素子の基礎,” 第 6 章 カラー撮像技術, pp.183, 日本理工出版会, 1999.
- 2) B. E. Bayer, “Color Imaging Array,” U. S. Patent, 3,971,065, 1976.
- 3) 曾根賢朗, 石川清次, 平本政夫, 橋本 進, 高村 亨, 黒田隆男, 堀居賢樹, 大久保祥雄, “フィールド読み出し方式 CCD のカラー撮像評価,” テレビ技報, 6, 45, pp.23-28, 1983.
- 4) K. Shimomura, et al., “Novel Synthetic Aqueous Photoresist for CCD Micro Color Filter,” SPIE, 2195-72.
- 5) H. Aoki, et al., “Advanced Complementary Color Filter Technology without Dyeing Process for CCD Image Sensors,” SPIE, 3333-132.
- 6) Y. Inaba, et al., “Degradation-Free MOS Image Sensor With Photonic Crystal Color Filter,” IEEE Electron Device Lett., vol.27, no.6, pp.457-459, Jun. 2006.

- 7) 和田孝道, 照井康明, 吉野 優, 大田善夫, “固体撮像装置及びその製造方法,” 特許公報, 特願昭 51-151123, Dec. 1976.
- 8) Y. Ishihara, et al., “A high photosensitivity IL-CCD image sensor with monolithic resin lens array,” IEDM Tech. Digest, pp.497-500, Dec. 1983.
- 9) Y. Sano, et al., “Submicron Spaced Lens Array Process Technology for a High Photosensitivity CCD Image Sensor,” IEDM Tech. Digest, pp.283-286, Dec. 1990.
- 10) MEI/MEC (Panasonic), SONY, “Pioneering Developments in MICROLENS Technology for CCDs Used in ENG Cameras,” EMMY AWARD, The National Academy of Television Arts and Sciences, Technical/Engineering Achievement Awards Committee Data Inquiry, Oct. 1994.
- 11) 佐野義和, 重田陽子, 小林美千代, 青木裕光, 梅田卓也, 上坂 渡, 塚本 朗, 千田浩之, 新添真人, “オンチップ層内レンズ技術による CCD 撮像素子光電変換特性の向上,” テレビ誌, vol.50, no.2, pp.226-233, Feb. 1996.
- 12) 武藤秀樹, “CCD の形状・光学・デバイス統合シミュレーション,” テレビ年次大, pp.89-90, 1995.
- 13) 武藤秀樹, “層内レンズ構造の 3 次元波動光学シミュレーション,” 映像情報メディア技報, vol.23, no.49, pp.7-12, IPU'99-46, Jul. 1999.
- 14) 廣田 功, 古川順一, 高村洋二, 和田隆宏, 慶児幸秀, 大塚洋一, 西堀一彦, 建部竜太郎, 北山尚一, 志村雅之, 松井拓道, “1/3 インチ有効 38 万画素 IT 型 CCD 撮像素子,” テレビ技報, vol.16, no.18, pp.7-12, IPU'92-8, CE'92-9, Feb. 1992.
- 15) K. Tshikiyo, et al, “A MOS Image Sensor with Microlenses Built by Sub-wavelength Patterning,” 28.8, ISSCC, Feb. 2007.
- 16) K. Onozawa, et al, “A MOS Image Sensor with a Degital-Microlens,” IEEE Electron Device Lett., vol.27, no.6, pp.457-459, 2006.

■8群-4編-1章

1-6 撮像管

(執筆者：久保田 節) [2011年1月受領]

撮像管は、電子式撮像デバイスの先駆けとして開発され、その後、特性改善を進めながら、テレビジョン放送をはじめとする映像システムの進展を支えてきた。その後、半導体技術の発展とともに、CCD (Charge Coupled Device) や CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) といった固体撮像デバイスが主流となってきたが、超高感度撮像などの一部の特殊な分野においては、今なお撮像管が用いられている。本節では、アモルファスセレン (a-Se) を主成分とした光導電膜内でのアバランシェ増倍現象を利用した超高感度 HARP (High-gain Avalanche Rushing amorphous Photoconductor) 撮像管^{1), 2), 3)} を例にとり、その構造や動作原理、基本特性などについて説明する。

1-6-1 構造、動作

撮像管は、金属や半導体に光が入射した際に電子が放出される「光電子放出」を利用したものと、同様に光が入射した際に導電率が增加する「光導電効果」を利用したものに大別される。初期の撮像管であるアイコノスコープやイメージオルシコンは前者に分類されるが、1950年に光導電効果を用いたビジコンが開発されて以降、後者が一般的となり、その後もプランビコンやカルニコン、サチコンなどの光導電型撮像管が相次いで開発された。

1980年代に入り、ハイビジョン用機器の開発が本格化するにつれて、カメラに関しては高感度化が大きな課題とされていた。しかし、既存の高感度撮像デバイスは光電子放出を利用していたため、光ショットノイズによる画質劣化が目立ち、また、ハイビジョンに要求される高い解像度を小型のデバイスで実現することは困難であった。そこで、光導電型撮像管の一つであるサチコンの光導電膜について感度向上の検討が開始された。その結果、a-Seを主成分とし、良好な電荷注入阻止特性(高耐電圧特性)を有する光導電膜に非常に強い電界を印加すると、膜内でアバランシェ増倍現象が生じ、実効的な量子効率が1を大幅に上回る極めて高い感度が画質劣化を伴うことなく実現できることが見出された。この現象を基にHARP撮像管(図1・75)が開発された。



図 1・75 HARP 撮像管の外観

HARP 撮像管の動作原理を図 1・76 に示す。入射光のエネルギーによって HARP 光導電膜(以後、HARP 膜と記す)の内部に電子・正孔対が生成される。このうち正孔が膜に印加さ

れた強い電界（約 10^8 V/m 以上）によって加速され、Se 原子との衝突イオン化を繰り返すことで、次々と新たな電子・正孔対を発生させる。その結果、入射光子 1 個に対して多数の正孔が膜の電子ビーム走査側に蓄積される。一方、電子銃からは電子ビームが放射され、HARP 膜を走査する。その際、HARP 膜に蓄積された正孔と電子ビームの電子が結合することにより電流が流れ、この電流を外部に取り出すことで映像信号が得られる。

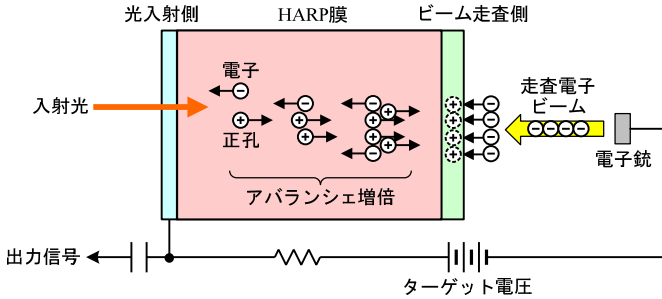


図 1・76 HARP 撮像管の動作原理

HARP 膜の基本構造を 図 1・77 に示す。HARP 膜は、透明信号電極側に酸化セリウム (CeO_2) 層を、また、電子ビーム走査側に三硫化アンチモン (Sb_2S_3) 層を設けることで、外部からの正孔や電子の注入を抑制した阻止型構造となっている。HARP 膜の主成分は先に述べたように a-Se であるが、捕獲準位に捉えられた正孔により光入射側界面付近の膜内電界を緩和するためのフッ化リチウム (LiF) や、a-Se の耐熱性を向上させるためのヒ素 (As) を微量に添加している。更に、a-Se のバンドギャップは 2.0 eV で、波長が 620 nm 以上の光にはほとんど感度がないため、カラーカメラの赤チャンネル用 HARP 膜にはバンドギャップが 0.34 eV と小さいテルル (Te) を添加して、赤色光に対する感度の向上を図っている⁴⁾。

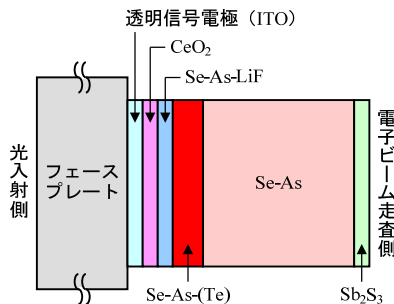


図 1・77 HARP 膜の基本構造

1-6-2 基本特性

膜厚 $15\mu\text{m}$ の HARP 膜と MM (磁界集束・磁界偏向) 型電子銃を組み合わせたハイビジョン用 2/3 型 HARP 撮像管の主要特性を紹介する。

(1) 感度特性

代表的な電流-電圧特性を図1・78に示す。印加電圧が1200Vを過ぎたあたりからアバランシェ増倍現象による信号電流の急激な増加が見られており、印加電圧1500Vにおいて約200倍の増倍率が得られている。このときの暗電流は約2nAで、カメラ実装時の撮像管の基準信号電流である200nAに比べて十分小さいことから、画質への影響は無視できる。

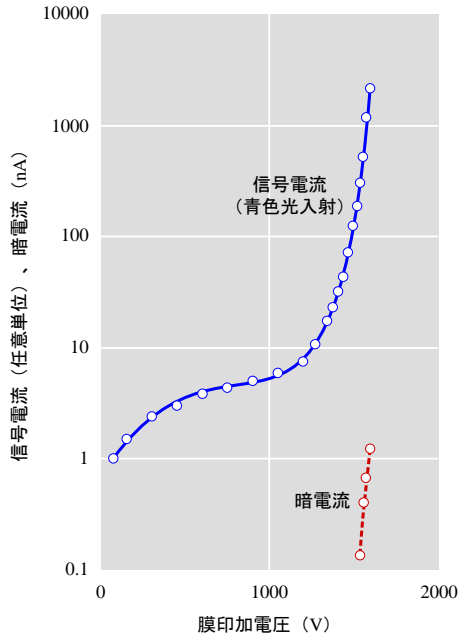


図1・78 HARP 撮像管の電流-電圧特性例

(2) 残像特性

HARP 撮像管の残像は、HARP 膜の蓄積容量に起因する容量性残像の成分が支配的であることから、膜厚の増加にともなって残像も減少する。HARP 膜の膜厚を開発当初の2μmから15μmへ増したことで膜の蓄積容量が1600pFから210pFまで低減されたため、入射光遮断後、3フィールド目の残留信号で規定される残像値は測定限界以下である。

(3) 解像度特性

レトマチャートの撮像例を図1・79に示す。垂直限界解像度は800TV本以上と良好で、アバランシェ増倍動作による解像度の劣化は認められない。これは、a-Seの比抵抗が高いことに加えて、印加電界が高いために電荷の拡散がほとんど生じないためと考えられる。

(4) 分光感度特性

緑／青チャンネル用 HARP 膜 (Te 添加なし) と赤チャンネル用 HARP 膜 (Te 添加あり)

の分光感度特性例を**図 1・80**に示す。色再現やSN比の観点から、光電変換効率は可視光全域においてできるだけ高い方が望ましいため、添加しているTeの増量による光電変換効率のさらなる改善⁵⁾や、新たな材料を用いた高効率感光層とa-Seからなる増倍層を接合した高効率HARP膜の開発も進められている⁶⁾。

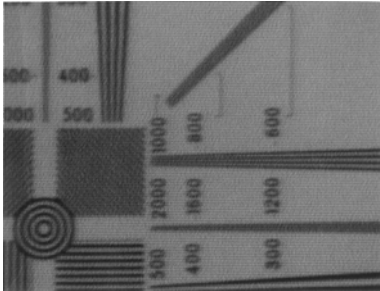


図 1・79 レトマチャート撮像例

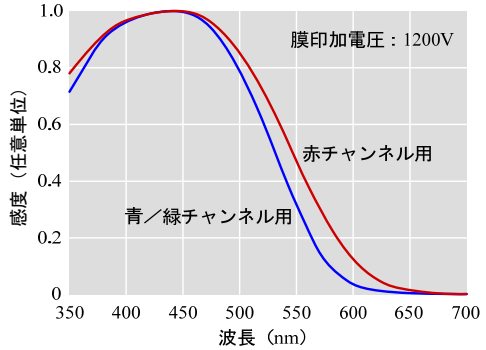


図 1・80 分光感度特性例

(5) 光電変換特性

図 1・81は HARP 撮像管の光電変換特性の一例である。入射光量が増すに従って γ 値は小さくなるが、これは入射光量が増してHARP膜のビーム走査側の電位が上昇することにより、実効的な膜印加電圧が低減するという一種の負帰還作用が生じるためである。なお、SN比の実測値から算出したHARP撮像管の過剰雑音係数は1以下との報告があるが⁷⁾、その理由として、a-Seにおける正孔と電子のイオン化係数の比が大きいことに加え、この負帰還作用が関係していると考えられる。

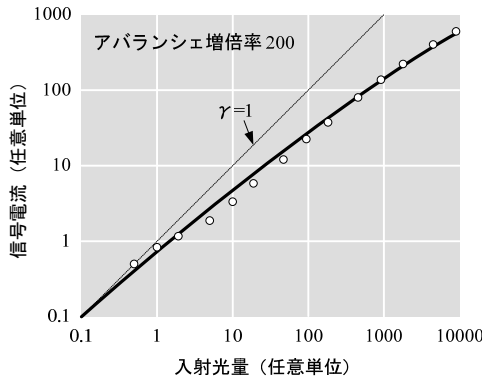
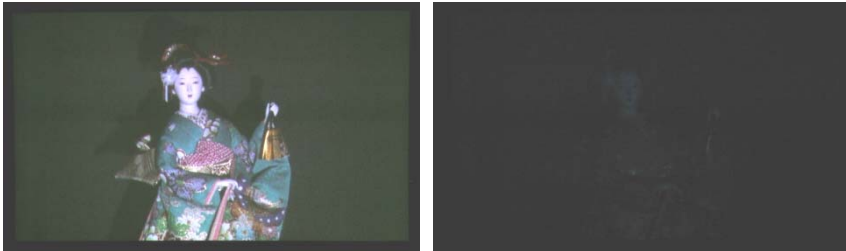


図 1・81 光電変換特性例

(6) 撮像例

膜厚 $15 \mu\text{m}$ の HARP 撮像管を適用したハイビジョン HARP カメラと従来のハイビジョン CCD カメラとの比較撮像例を **図 1・82** に示す。通常動作時でハイビジョン CCD カメラの約 30 倍の感度を実現しており、更に、動きの遅い被写体に対しては、暗電流が少ないという HARP 撮像管の特長を活かして、蓄積増感動作を行うことも可能である。



HARP (アンペゲイン 0 dB)

CCD (アンペゲイン +18 dB)

図 1・82 比較撮像例 (被写体照度 0.3 ルクス, レンズ絞り F1.7)

1-6-3 冷陰極 HARP 撮像板

次世代の HARP 撮像デバイスを目指して、デバイスサイズの小型化や低消費電力化を図った「冷陰極 HARP 撮像板」の開発も進められている^{8), 9), 10)}。**図 1・83** に示すように、冷陰極 HARP 撮像板は、電圧を印加するだけで電子を放射する微小な冷陰極を多数平面上に並べた冷陰極アレイと HARP 膜とを対向配置した構造となっている。HARP 撮像管では 1 本の電子ビームで HARP 膜を走査するのに対し、冷陰極 HARP 撮像板では冷陰極アレイの各画素から順次放射された電子で HARP 膜を走査し、蓄積された光生成電荷を読み出すことで映像信号が得られる。冷陰極 HARP 撮像板では、水平ブランキング期間中に冷陰極アレイから放射された電子によって HARP 膜に生成された過剰な電荷の一部を取り除くことができるため、映像信号の白レベルの数百倍に相当する高輝度光が入射してもブルーミングやコメットテールなどの偽信号の発生を防止することが可能である¹¹⁾。

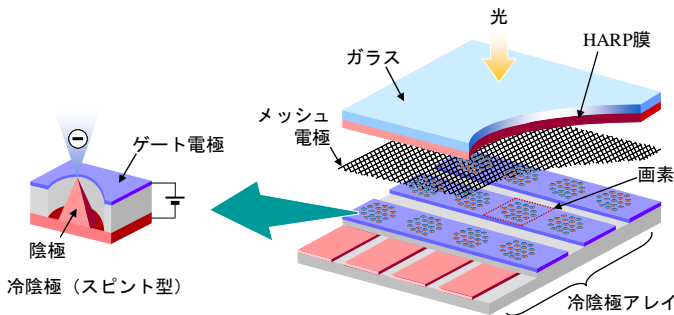


図 1・83 冷陰極 HARP 撮像板の構造

■参考文献

- 1) 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 Cameras Tube Target," *IEEE Electron Device Lett.*, EDL-8, no.9, pp.392-394, 1987.
- 2) 谷岡健吉, 山崎順一, 設楽圭一, 竹歳和久, 河村達郎, 平井忠明, 高崎幸男, 雲内高明, "アバランシェ増倍 a-Se 光導電膜を用いた高感度 HARP 撮像管," *テレビ誌*, vol.44, no.8, pp.1074-1083, 1990.
- 3) 大川裕司, 宮川和典, 松原智樹, 菊地健司, 鈴木四郎, 久保田節, 江上典文, 谷岡健吉, 小林 昭, "超高感度 15 μm 厚 HARP 光電変換膜," *映情学誌*, vol.62, no.10, pp.1641-1648, 2008.
- 4) 谷岡健吉, 山崎順一, 鈴木四郎, 昼間栄久, 設楽圭一, 高崎幸男, 辻 和隆, 平井忠明, "赤色光増感型 HARP 撮像管," *テレビ学技報*, vol.12, no.50, pp.37-42, 1988.
- 5) 大川裕司, 宮川和典, 松原智樹, 菊地健司, 鈴木四郎, 久保田節, 谷岡健吉, 小林 昭, "赤色光増感型高感度 15 μm 厚 HARP 光電変換膜の開発," *映情学誌*, vol.62, no.12, pp.2031-2036, 2008.
- 6) 大川裕司, 宮川和典, 松原智樹, 菊地健司, 鈴木四郎, 谷岡健吉, 久保田節, 江上典文, 小林 昭, "CdSe 層を接合した高量子効率 HARP 光電変換膜," *映情学年次大*, 12-9, 2009.
- 7) K. Tsuji, T. Ohshima, T. Hirai, N. Gotoh, K. Tanioka, and K. Shidara, "Ultra-high-sensitive Image Pickup Tubes Using Avalanche Multiplication in a-Se," *Proc. Materials Res. Soc. Symp.*, vol.219, pp.507-518, 1991.
- 8) Y. Takiguchi, K. Osada, M. Nanba, K. Miyakawa, S. Okazaki, T. Yamagishi, K. Tanioka, M. Abe, N. Egami, M. Tanaka, and S. Itoh, "128 \times 96 pixel FEA image sensor with HARP target," *IEICE Trans. Electron.*, E85-C, no.11, pp.1916-1921, 2002.
- 9) N. Egami, M. Nanba, Y. Takiguchi, K. Miyakawa, T. Watabe, S. Okazaki, K. Osada, Y. Obara, M. Tanaka, and S. Itoh, "50 \times 50 μm pixel magnetic focus field emitter array image sensor with high-gain avalanche rushing amorphous photoconductor target," *J. Vac. Sci. & Tech. B*, vol.23, no.5, pp.2056-2062, 2005.
- 10) M. Nanba, Y. Takiguchi, Y. Honda, Y. Hirano, T. Watabe, N. Egami, K. Miya, K. Nakamura, M. Taniguchi, S. Itoh, and A. Kobayashi, "640 \times 480 pixel active-matrix Spindt-type field emitter array image sensor with high-gain avalanche rushing amorphous photoconductor target," *J. Vac. Sci. & Tech. B*, vol.28, no.1, pp.96-103, 2010.
- 11) 瀧口吉郎, 難波正和, 本田悠葵, 久保田節, 江上典文, 中村和仁, 谷口昌照, "FEA-HARP におけるブルーミング抑制駆動法," *映情学誌*, vol.64, no.3, pp.399-404, 2010.

■8群-4編-1章

1-7 ワイドダイナミックレンジセンサ

(執筆者：須川成利) [2011年2月 受領]

イメージセンサのダイナミックレンジ (DR) とは、飽和時と暗時における光信号と雑音信号の比、または飽和時の光量と暗時雑音相当の光量の比として定義される。ビデオカムコーダからデジタルカメラ、携帯電話へ、更には、車載、監視、医療、ファクトリーオートメーション (FA)、科学計測などの分野にイメージセンサの応用展開が飛躍的に拡大しつつある中で、人間の鑑賞を目的とした概ね 70~80 dB 程度の DR 性能をもつイメージセンサにとどまらず、更に明暗の差が大きい条件の下でも良好な撮像が行えるワイド DR (WDR) イメージセンサの実現が強く望まれるようになってきた。図 1・84 に通常の DR 性能を有するイメージセンサ及び WDR 性能を有する CMOS イメージセンサによる撮像例を示す³¹⁾。

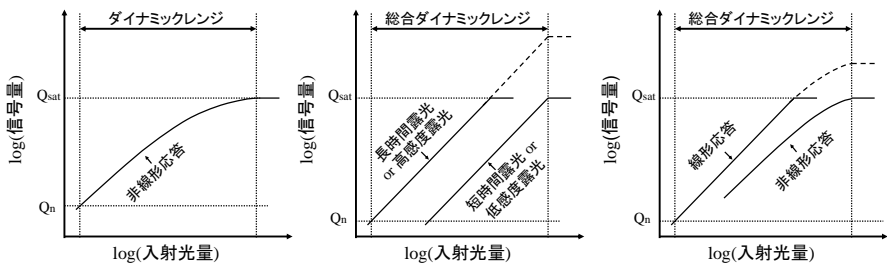


(a) 通常の DR 性能を有するイメージセンサ

(b) 94dB の DR 性能を有する WDR CMOS イメージセンサによる撮影例

図 1・84 通常の DR 性能を有するイメージセンサと、94 dB の DR 性能を有する WDR CMOS イメージセンサによる撮影例

WDR イメージセンサは、その DR 拡大方法から、光変換特性が非線形応答のもの、線形応答のもの、両者を組み合わせたものに分類される。図 1・85 (a)~(c) はこれら三つの分類の WDR イメージセンサにおける DR の定義を示している。以下に、表 1・4 にまとめた三つの分類における代表的な WDR イメージセンサの構造、動作、基本特性を説明する。



(a) 非線形応答

(b) 線形応答

(c) 非線形応答と線形応答を組合せたもの

図 1・85 各分類の WDR イメージセンサにおける DR の定義

表 1・4 代表的な WDR イメージセンサ

大分類	方式	方法	文献
非線形応答	MOS	MOSFETサブスレッショルド特性を用いた対数圧縮	(1)
	CMOS	対数圧縮固定パターン雑音除去	(2-4)
	CMOS	対数圧縮信号の積分及び固定パターン雑音除去	(5)
	CMOS	蓄積電荷容量可変繰り返し積分	(6)
	CMOS	画素内メモリからFDへのフィードバック	(7)
線形応答	CCD	長短2回露光	(8)
	CMOS	ローリングシャッター長短2回露光	(9, 10)
	CMOS	時系列複数回露光・列並列巡回ADC読出し	(11-14)
	CMOS	FDにスイッチ・容量を追加した低・高光電変換ゲイン	(15)
	CMD	非破壊読出し	(16)
	CMOS	非破壊読出し	(17-20)
	CMOS	非破壊読出し・2回目を以降中間電圧から読出し	(21-24)
	CMOS	非破壊読出し・フォトダイオード蓄積リセット回数カウント	(25)
	CMOS	非破壊読出し・大小2つのフォトダイオード・小フォトダイオード複数回露光	(26)
	CCD	感度の異なる複数のフォトダイオード	(27)
	CMOS	横型オーバーフロー電荷蓄積	(28-40)
	CMOS	横型オーバーフロー電荷蓄積・複数回露光・列並列容量を用いた電流読出しハイブリッド	(34, 35)
	CMOS	アクティブ・パッシブ読出し切替え	(41, 42)
	CMOS	列並列高低ゲインアンプ・ADC	(43)
	組合せ他	CMOS	線形・非線形応答組合せ
CMOS		横型オーバーフロー電荷蓄積・複数回露光・非線形電流読出しハイブリッド	(48)

1-7-1 非線形応答 WDR イメージセンサ

非線形応答の WDR イメージセンサでは、MOSFET のサブスレッショルド特性を利用し、光電流を対数圧縮し電圧信号に変換して DR を拡大する方法が従来からよく知られている。

図 1・86 に本方式のイメージセンサの画素部の回路図の例を示す¹⁾。

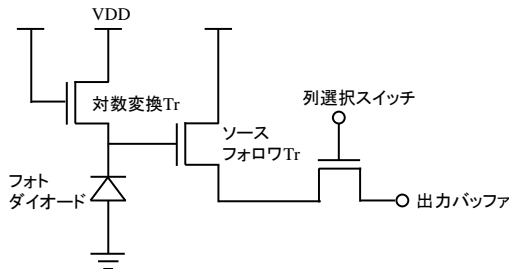


図 1・86 MOSFET のサブスレッショルド特性を利用したイメージセンサ画素部の回路図例

この方法は特に高照度側に光電変換応答を拡大する用途に向いている。単純に対数圧縮を行うと、画素ごとの対数圧縮特性の不均一性により固定パターン雑音が発生するので、これを抑制するためにオンチップで対数圧縮特性を較正して均一化を図り低照度側の撮像性能を向上させる方法が提案されており^{2)~4)}、120 dB 程度の DR 性能が達成されている。図 1・86 に MOSFET のサブスレッショルド特性を利用した非線形応答のイメージセンサの画素部の回路図の例を示す。

また、光電流を対数圧縮した信号を画素内に設けた容量で積分し、更に画素ごとの MOSFET 回路の閾値電圧ばらつきなどに起因する固定パターン雑音を除去して、低照度側での信号対雑音比 (SN 比) を向上させる方法が報告されている⁵⁾。積分動作を行うことにより

低照度側へ撮像範囲を拡大するだけでなく、動画撮像時に発生するフリッカ雑音も抑制しており、動体抽出型イメージセンサとしても応用されている。DRとしては140dBを超える性能が得られている。

以上のようなMOSFETのサブスレッショルド特性を利用した対数圧縮イメージセンサは、複雑な合成信号処理を必要とせず比較的簡単にWDR性能を得られるという特長があるものの、フォトダイオード(PD)の暗電流の低減、低照度側の応答速度の向上、対数圧縮の温度特性の補正などの課題が残存しており、現在これらを改善しようとする開発が進んでいる。

非線形応答のイメージセンサとしてMOSFETのサブスレッショルド特性を用いずに非線形応答特性を得る方法の提案もある。例えば、一定量以上の余剰電荷をドレインに排出する電荷蓄積動作を、蓄積電荷量を時間とともに増しながら数回繰り返すことで、部分蓄積ごとに線形応答であるが蓄積時間全体としては対数的な光電変換応答特性をもたせるという方法が提案されている⁶⁾。DRとしては、通常蓄積動作で70dB、WDR動作で96dBの性能が報告されている。

また、画素内に設けたメモリからFDにフィードバックをかけ、異なる露光時間の情報をFD部で合成することにより、複数回露光動作で対数的な光電変換応答特性を実現するCMOSイメージセンサが報告されている⁷⁾。露光時間1.5μs、150μs、1.5msの情報を画素内で合成することにより140dBのDRを実現している。

1-7-2 線形応答のWDRイメージセンサ

線形応答のWDRイメージセンサは、カラー画像撮像などのように色ごとに明暗差の激しい信号処理を行う必要がある場合などでは、非線形応答のイメージセンサよりも一般的にはシステム側に受け入れられやすい。

線形応答のWDR化技術の先駆けの報告としては、例えば、長短2回の露光時間で得られた光信号電荷を垂直CCDでそれぞれ転送した後、WDR信号を合成する方法がある⁸⁾。

CMOSイメージセンサにおいては、行ごとに蓄積時間の開始時間がずれるローリングシャッタ動作時に、n行目の信号読み出しを行う水平ブランキング時間内にn-Δ行目の信号読み出しも行うことで、長短二つの蓄積時間の信号を得る方法が報告されている^{9),10)}。ここでは、n行目の長時間露光信号とn-Δ行目の短時間露光信号はそれぞれ二つの経路から出力してWDR信号を合成することにより、約110dBのDR性能を達成している¹⁰⁾。図1・87に本方式の模式図を示す。

また、蓄積時間の異なる複数回の露光蓄積動作とそれに続く画素信号読み出し動作が時系列的に連続するように全画素を走査し、センサ外部のメモリを利用してWDR信号を合成する方法が提案されている¹¹⁾。こ

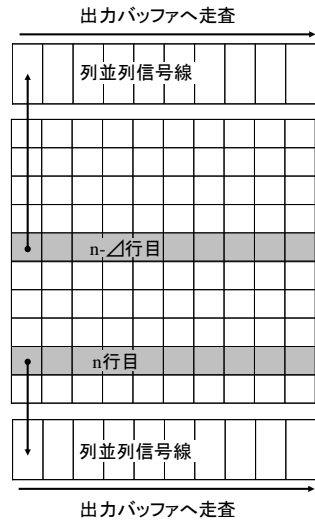


図1・87 n行目の信号読み出しを行う水平ブランキング時間内にn-Δ行目の信号読み出しも行う長短二つの蓄積時間の信号を得るCMOSイメージセンサ方式の模式図

の方法は集中読み出し複数回露光法とも呼ばれている。回路構成が単純でかつ高精度な新しい1.5b サンプリング列並列巡回型 ADC を列ごとに設け、短時間露光の信号読み出しを高速に行えるようにしており、DR として 117 dB の性能を達成している。この方法を発展させて 24000 倍以上の露光時間比を確保し、かつ、列ごとに設けた列並列巡回型 ADC のオフセットを低減することで、140 dB を超える WDR 信号を¹²⁾、更に列並列巡回型 ADC の動作タイミングを最適化してランダムノイズの低減、非線形性の抑制をすることで 153 dB の WDR 信号を得ることに成功している¹³⁾。列並列巡回型 ADC は、容量、アンプゲイン、DC オフセットの不均一性をデジタル補正し 14 bit 分解能のものに発展している¹⁴⁾。

一方、画素サイズ 3.75 μm 角、画素数 1280 \times 960 の 2 画素共用型 CMOS イメージセンサにおいて、フローティングディフュージョン (FD) 部にスイッチと容量を付加した画素回路構成とし、FD 容量のみで電荷-電圧変換する高光電変換ゲインモード、FD 容量と付加容量を接続して電荷-電圧変換する低光電変換ゲインモード及び 3 回の露光動作を組み合わせる動作を行うものが報告されている¹⁵⁾。2 回の露光動作で得られた信号は周辺部に設けられたラインメモリに保持し、3 回目の露光動作と同期をとっている。高、低の光電変換ゲイン 147 $\mu\text{V}/e^-$ 、37 $\mu\text{V}/e^-$ 時にそれぞれ読み出しランダムノイズ(RN) $< 2e^-$ 、 $< 7e^-$ を達成し、露光切り替え点の SN 比を 20 dB 以上とした条件で、3 回露光で最大 112 dB の DR を実現している。

以上は、信号を読み出した後で画素をリセットし、初期状態に戻してから次の蓄積動作を継続する複数回露光方法を基本にした線形応答の DR 拡大方法の例であるが、一方で、信号読み出し後に画素リセットをせずに非破壊読み出し特性を積極的に利用して DR を拡大しようとする方法も提案されている。非破壊読み出しを用いた複数回露光による DR 拡大方法は、まず CMD イメージセンサ技術の報告の中に見出される¹⁶⁾。CMOS イメージセンサにおいてもいくつかの方法が提案されており、例えば、ある蓄積時間で画素信号を読み出し、設定したある閾値電圧よりも高い場合には画素をリセットして再度蓄積を行い、また、閾値電圧よりも低い場合には画素をリセットせず蓄積を継続して DR を拡大するという方法がある。この方法は一般的には閾値信号レベルの制御が複雑になることが懸念されるが、浮動小数点 ADC や画素ビットシリアル ADC を用いてこうした動作を効果的に行おうとするものがある^{17)~20)}。

また、2 回目の短時間の蓄積を中間電圧から開始して信号を読み出すことで固定パターン雑音の除去を行い、7.5 フレーム/秒の動作で DR を 72 dB から 96 dB にまで可変に拡大することを実現しようとする技術が報告されている²¹⁾。この技術は WRGB カラーフィルタ配列の CMOS イメージセンサの W 画素の DR 拡大に応用されている²²⁾、²³⁾。更に、短時間蓄積において中間電圧電荷転送を複数回繰り返してより良い線形応答信号を得ようとした CMOS イメージセンサも報告されている²⁴⁾。15 フレーム/秒の動作で 121.8 dB の DR が実現されている。

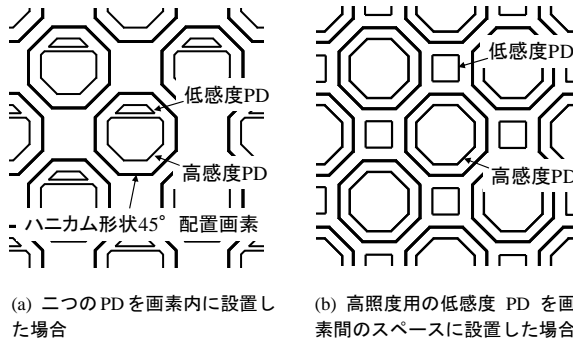
そのほかには、PD の蓄積電圧がある閾値に達したときにリセットした回数をカウントして換算した信号と最後の蓄積時間で得られた信号を合成する CMOS イメージセンサ²⁵⁾、画素内に大小二つの PD を設け小 PD の画素で複数回の露光を行う CMOS イメージセンサ²⁶⁾などが報告されている。

以上のような複数回露光時間による WDR 化技術については、高速に動く被写体を撮像す

際の動画撮像性能を懸念する向きもあるが、読み出し動作を高速化し複数回露光の撮像時間差を小さくするなどの工夫や、複数の露光時間の異なる画像を高度な信号処理により合成するなどの技術を用いることにより、用途によっては問題なく適応できるものもあると考える。

一方、複数回の露光を行わずに一回の露光で線形応答の光電変換特性の DR を拡大しようとするものがある。

まず、画素ごとに低照度用の高感度 PD と高照度用の低感度 PD を設置し、それらの出力を合成して WDR 信号を得る方法が報告されている²⁷⁾。これにより約4倍ないしは8倍程度の DR 拡大が実現できており、WDR デジタルカメラ用 CCD として実用化されている。図 1・88 にこの方式の CCD における画素部の模式図を示す。



画素はハニカム構造を有し、45° 配列したものについて示す。

図 1・88 画素ごとに低照度用と高照度用の感度の異なる二つの PD を有するイメージセンサの画素部の模式図

また、完全空乏転送埋め込み型 PD を有する 4 トランジスタ型 CMOS イメージセンサの FD 領域に隣接して、PD が飽和を超えた際に PD からあふれた光電荷を同一蓄積時間内に蓄積する横型オーバーフロー容量を画素ごとに設置し DR を拡大する方法が提案されている^{28)~30)}。低照度側の撮像性能は 4 トランジスタ型 CMOS イメージセンサと同等の高感度・高 SN 比性能を維持し、露光時間を分割せず、かつ、線形応答の信号で 100 dB を超える DR 性能を実現している。飽和前側信号と過飽和側信号電荷を混合して過飽和側信号を得ることで、過飽和側信号には最小でも PD 飽和に近い信号電荷が存在し、その結果、暗電流などの雑音成分に対する許容度が高いという特徴をもっている²⁹⁾。また、飽和前側信号と過飽和側信号の信号切替え選択を PD 飽和電圧以下で行うことで、PD 飽和ばらつきの影響も受けにくいよう工夫されており、WDR デジタルカメラ用 CMOS イメージセンサとして実用化されている。図 1・89 にこの方式の画素部の回路図を示す。

この方式における FD 及び PD の構造設計と飽和性能設計を独立に最適化できるという特長を活かし、100 ke⁻程度の飽和信号電子数を確保したうえで、FD の寄生容量を低減して 200 $\mu\text{V}/\text{e}^-$ の入力換算光電変換ゲイン及び 2e⁻ 程度の入力換算雑音を両立した CMOS イメージセンサや^{31), 32)}、PD の内部電界を緩和して暗電流を 60 °C において 0.8e⁻/秒 $\cdot\mu\text{m}^2$ まで低減した

CMOS イメージセンサが報告されている³³⁾。また、画素内容量と列並列容量を利用することで、線形応答で、露光切り替え点における SN 比を高く保ち、3 回の多重露光で 185 dB、4 回の多重露光で 200 dB (13 フレーム/秒の動作時) を超える DR 性能を有する CMOS イメージセンサが報告されている^{34), 35)}。

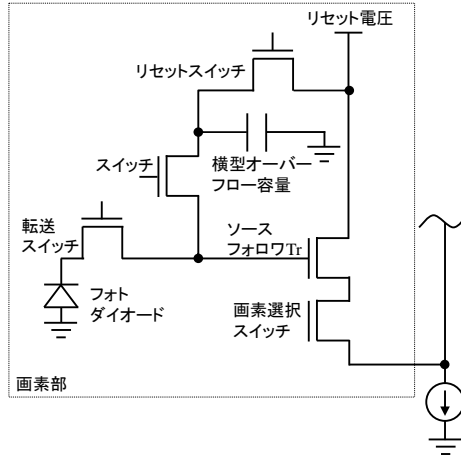


図 1・89 4 トランジスタ型 CMOS イメージセンサの FD 領域に隣接して、横型オーバーフロー容量とスイッチを画素ごとに設置した WDR CMOS イメージセンサの画素部の回路図

更に、この方式における CMOS イメージセンサでは、マイクロレンズ上に無機膜を形成しマイクロレンズとカラーフィルタの酸化熱分解を抑制して耐熱性能を向上させた画素サイズ $4.5 \mu\text{m}$ 角、画素数 800×600 のものにおいて、飽和電荷量 154ke^- 、暗時 $\text{RN } 2.3\text{e}^-$ 、DR 96.5 dB を達成している³⁶⁾。また、上記と同一フォーマットの画素アレイを用い、熱雑音を抑制したゲイン $\times 1$ 倍の列アンプ回路を導入して、読み出し回路系 RN を 0.5e^- (光電変換ゲイン $100 \mu\text{V/e}^-$) に低減している³⁷⁾。更に、画素ごとに横型オーバーフロー容量を独立に設計できる特徴を活かして、飽和露光量を画素間でほぼ均一にした DR が 102 dB (W 画素) の斜め 45° 画素配置、実効画素ピッチ $4.2 \mu\text{m}$ 、画素数 1280×480 の WRGB CMOS イメージセンサが報告されている^{38), 39)}。また、高照度光照射時に PD からあふれるオーバーフロー電子を直接横型オーバーフロー容量に導くためのトランジスタを設置した、画素サイズ $3 \mu\text{m}$ 、画素数 1280×960 の 2 画素共用 CMOS イメージセンサを作成し、飽和信号量 69ke^- 、暗時 $\text{RN } 2.4 \text{e}^-$ 、DR 90 dB を達成している⁴⁰⁾。

また、画素内にオーバーフロー容量を設けた CMOS イメージセンサにおいて、画素ごとにアクティブ・パッシブ読み出しを切り替えることによる WDR 化が報告されている⁴¹⁾。この方式を進展させた CMOS イメージセンサにおいて、82 dB の DR 性能を達成している⁴²⁾。

また、列回路に高低二つのゲインをもつアンプとそれぞれに接続した AD 変換器を設置して、同一の水平ブランキング期間に高ゲイン信号 ($\times 30$) と低ゲイン信号 ($\times 1$) を得る CMOS イメージセンサが報告されている⁴³⁾。画素サイズ $6.5 \mu\text{m}$ 角のグローバルシャッタ機能を有

する5トランジスタ画素構成で、画素数 320×240 、1回露光動作で、高ゲイン/低ゲイン信号切り替え点のSN比段差 -0.2 dB、暗時RN $1.1 e^-$ 、飽和電荷量 $42 ke^-$ 、DR性能として92 dBを達成している。

1-7-3 線形・非線形応答の組合せのWDRイメージセンサ

線形・非線形応答の組合せのWDRイメージセンサでは、低照度側では線形応答の電荷積分動作を行い、高照度側では光電流を対数圧縮して非線形応答にし、低照度側の感度・SN比性能を確保したうえで、高照度側にDRを拡大する方法も提案されている。

まず、低照度側撮像はPDの電荷積分動作で行い、高照度側については、PDに接続したMOSFETのサブスレッショルド特性を利用して高照度下の光電流を流し出し対数圧縮を行い、DRを拡大する方法が報告されている⁴⁴⁾。

また、MOSFETの代わりにダイオードを接続してダイオード順方向特性を利用して高照度側光信号を対数圧縮する方法もある⁴⁵⁾。ここではPD拡散層内に反対導電型のダイオードを作り込んでおり、開口率の減少を防ごうとしている。

ほかには、画素信号出力を列ごとに設けたオペアンプを介して画素内リセットトランジスタのゲート電極にフィードバックし高照度信号をリセットトランジスタのサブスレッショルド特性を利用して対数圧縮するもの⁴⁶⁾、4トランジスタ型CMOSイメージセンサの画素内電荷転送トランジスタチャネルのポテンシャル障壁を利用して高照度状態でPDから過剰電荷をFD領域に対数的に排出ものなどもある⁴⁷⁾。

以上の線形・非線形応答を組み合わせたWDRイメージセンサにおいては、それぞれ100 dB⁴⁴⁾、120 dB^{45), 47)}、143 dB⁴⁶⁾のDR性能が報告されている。

以上、様々なWDRイメージセンサ技術を概観してきたが、共通していえることは、高照度側へのDR拡大に注目したものが多くことである。それは、低照度側へのDR拡大が、デバイス構造、製造技術改良などにより暗時雑音信号を極力低減し、かつ、実効開口率の向上や浮遊容量の低減などの方策を更に加えて感度・SN比を向上していくという、地道な正攻法に依存せざるを得ないからかもしれない。

WDRイメージセンサの応用面に関しては、例えば、文献にまとめられている^{49), 50)}。中でも、近年急速にエレクトロニクス化率が高まってきている車載への応用が注目されている⁵¹⁾。ここでは、WDR化のみならず、いくつかの機能と統合した高機能イメージセンサの実現が要求されている。

また、従来のイメージセンサの課題であった感度向上とDR確保のトレードオフを解消するためにWDRイメージセンサ技術を利用して、超高感度化することが可能になるであろう。

今後WDRイメージセンサは、アプリケーションごとに最適な方式が採用され、様々な分野に広く用いられていくと予想される。その際には、イメージセンサ技術のみならず、WDR画像信号の処理技術、表示技術の新たな開発も当然必要になる。WDRイメージセンサは、今後も様々な技術開発を展開しながら、撮像分野を牽引していくことになるだろう。

■参考文献

- 1) S. G. Chamberlain and J. P. Y. Lee, "A Novel Wide Dynamic Range Silicon Photodetector and Linear Imaging

- Array,” IEEE Trans. Electron Devices, ED-31, no.2, pp.175-182, 1984.
- 2) D. Scheffer, B. Dierickx, and G. Meynants, “Random Addressable 2048 x 2048 Active Pixel Image Sensor,” IEEE Tran. Electron Devices, vol.44, no.10, pp.1716-1720, 1997.
 - 3) S. Kavadias, B. Dierickx, D. Scheffer, A. Alaerts, D. Uwaerts, and J. Bogaerts, “A Logarithmic Response CMOS Image Sensor with On-Chip Calibration,” IEEE J. Solid-State Circuits, vol.35, no.8, pp.1146-1152, 2000.
 - 4) M. Loose, K. Meier, and J. Schemmel, “A Self-Calibrating Single-Chip CMOS Camera with Logarithmic Response,” IEEE J. Solid-State Circuits, vol.36, no.4, pp.586-596, 2001.
 - 5) 角本兼一, 矢野 壮, 楠田将之, 掃部幸一, 田中良弘, “FPN キャンセル・積分機能内蔵対数変換形 CMOS イメージセンサ,” 映情学誌, vol.57, no.8, pp.1013-1018, 2003.
 - 6) S. Decker, R. D. McGrath, K. Brehmer, and C. G. Sodini, “A 256 x 256 CMOS Imaging Array with Wide Dynamic Range Pixels and Column-Parallel Digital Output,” IEEE J. Solid-State Circuits, vol.33, no.12, pp.2081-2091, 1998.
 - 7) 山田隆善, 春日繁孝, 村田隆彦, 加藤剛久, “画素内多重露光合成による広ダイナミックレンジセンサ,” 映情学技報, vol.32, no.19, pp.13-16, 2008.
 - 8) H. Komobuchi, A. Fukumoto, T. Yamada, Y. Matsuda, and T. Kuroda, “1/4 inch NTSC Format Hyper-D Range IL-CDD,” Proc. 1995 IEEE Workshop on CCDs and AIsS, SS-1, Apr. 1995.
 - 9) O. Yadid-Pecht and E. R. Fossum, “Wide Intra-scene Dynamic Range CMOS APS Using Dual Sampling,” IEEE Trans. Electron Devices, vol.44, no.10, pp.1721-1723, 1997.
 - 10) K. Mabuchi, N. Nakamura, E. Funastu, T. Abe, T. Umeda, T. Hoshino, R. Suzuki, and H. Sumi, “CMOS Image Sensor Comprised of Floating Diffusion Driving Pixels With Buried Photodiode,” J. Solid-State Circuits, vol.39, no.12, pp.2408-2416, 2004.
 - 11) M. Mase, S. Kawahito, M. Sasaki, and Y. Wakamori, “A 19.5b Dynamic Range CMOS Image Sensor with 12b Column-Parallel Cyclic A/D Converters,” 2005 ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.350-351, Feb. 2005.
 - 12) J.-H. Park, M. Mase, S. Kawahito, M. Sasaki, Y. Wakamori, and Y. Ohta, “A 142dB Dynamic Range CMOS Image Sensor with Multiple Exposure Time Signals,” 2005 A-SSCC Dig. Tech. Papers, pp.85-88, Nov. 2005.
 - 13) J.-H. Park, S. Kawahito, M. Furuta, M. Sasaki, Y. Wakamori, M. Mase, and Y. Ohta, “A Wide Dynamic Range CMOS Image Sensor with Improved 12-bit Column Parallel Cyclic ADCs,” 映情学誌, vol.61, no.3, pp.360-368, 2007.
 - 14) 朴 鍾皓, 川人祥二, 磯部圭吾, Suhaidi Shafie, 飯田哲也, 溝田 崇, “デジタル誤差補正回路を持つ 14b カラム並列巡回型 ADC を集積した CMOS イメージセンサ,” 映情学技報, vol.32, no.19, pp.27-30, 2008.
 - 15) J. Solhusvik, S. Yaghamai, A. Kimmels, C. Stephansen, A. Storm, and J. Olsson, et al., “A 1280×960 3.75 μ m pixel CMOS imager with Triple Exposure HDR,” Proc. 2009 International Image Sensor Workshop, pp.344-347, 2009.
 - 16) T. Nakamura and K. Saitoh, “Recent progress of CMD imaging,” Proc. 1997 IEEE Workshop on CCDs and AIsS, R14, Jun. 1997.
 - 17) D. X. D. Yang, A. El Gamal, B. Fowler, and H. Tian, “A 640 x 512 CMOS Image Sensor with Ultrawide Dynamic Range Floating-Point Pixel-Level ADC,” IEEE J. Solid-State Circuits, vol.34, no.12, pp.1821-1834, 1999.
 - 18) D. Stoppa, A. Simoni, L. Gonzo, M. Gottardi, and G.-F. Dalla Betta, “Novel CMOS Image Sensor With a 132-dB Dynamic Range,” IEEE J. Solid-State Circuits, vol.37, no.12, pp.1846-1852, 2002.
 - 19) W. Bidermann, A. El Gamal, S. Ewedemi, J. Reyneri, H. Tian, D. Wile, and D. Yang, “A 0.18 μ m High Dynamic Range NTSC/PAL Imaging System-on-Chip with Embedded DRAM Frame Buffer,” 2003 ISSCC Dig. Tech. Papers. pp.212-213, Feb. 2003.
 - 20) P. M. Acosta-Serafini, I. Masaki, and C. G. Sodini, “A 1/3” VGA Linear Wide Dynamic Range CMOS Image Sensor Implementing a Predictive Multiple Sampling Algorithm With Overlapping Integration Intervals,” IEEE J. Solid-State Circuits, vol.39, no.9, pp.1487-1496, 2004.
 - 21) 江川佳孝, 小池英敏, 岡元立太, 山下浩史, 田中長孝, 細川純一, 他, “2重露光動作を用いたワイドダイナミックレンジ CMOS イメージセンサ,” 映情学技報, vol.31, no.21, pp.25-28, 2007.

- 22) 本多浩大, 飯田義典, 江川佳孝, 関 弘道, 田中長孝, “White-RGB カラーフィルタ・アレイをもちいた高感度単板カラーCMOS センサ,” 映情学技報, vol.31, no.50, pp.15-18, 2007.
- 23) 江川佳孝, 田中長孝, 河合信宏, 関 弘道, 中尾 彰, 本多浩大, 飯田義典, 物井 誠, “ワイドダイナミックレンジ (WDR) 機能を有する W (白) RGB4×4 カラーフィルタ配列の CMOS イメージセンサ,” 映情学技報, vol.32, no.19, pp.23-26, 2008.
- 24) 大池祐輔, 戸田 淳, 田浦忠行, 加藤昭彦, 佐藤弘樹, 笠井政範, 奈良部忠邦, “中間電圧駆動による電化転送を用いた広ダイナミックレンジ CMOS イメージセンサ,” 映情学技報, vol.31, no.43, pp.25-28, 2007.
- 25) 原 彰宏, 山口 隆, 浜本隆之, “画素リセット判定による広ダイナミックレンジイメージセンサ,” 映情学誌, vol.61, no.3, pp.378-382, 2007.
- 26) S. Shafie, S. Ito, and S. Kawahito, “Dynamic Range Expansion Technique of CMOS Image Sensors with Dual Charge Storage in a Pixel and Multi Exposures for Reduced Motion Blue,” 映情学技報, vol.31, no.60, pp.5-8, 2007.
- 27) 小田和也, 小林寛和, 竹村和彦, 竹内豊, 山田哲生, “広ダイナミックレンジ撮像素子の開発 - 第4世代スーパーCCD ハニカム -,” 映情学技報, vol.27, no.25, pp.17-20, 2003.
- 28) S. Sugawa, N. Akahane, S. Adachi, K. Mori, T. Ishiuchi, and K. Mizobuchi, “A 100 dB Dynamic Range CMOS Image Sensor Using a Lateral Overflow Integration Capacitor,” 2005 ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.352-353, Feb. 2005.
- 29) S. Adachi, S. Sugawa, N. Akahane, K. Mori, T. Ishiuchi, and K. Mizobuchi, “The Tolerance for FD Dark Current and PD Overflow Current Characteristics of Wide Dynamic Range CMOS Image Sensor Using a Lateral Overflow Integration Capacitor,” Proc. 2005 IEEE Workshop on CCDs and AISs, pp.153-156, Jun. 2005.
- 30) N. Akahane, S. Sugawa, S. Adachi, K. Mori, T. Ishiuchi, and K. Mizobuchi, “A Sensitivity and Linearity Improvement of a 100 dB Dynamic Range CMOS Image Sensor Using a Lateral Overflow Integration Capacitor,” 2005 Symposium on VLSI Circuits, pp.62-65, Jun. 2005.
- 31) S. Adachi, W. Lee, N. Akahane, H. Oshikubo, K. Mizobuchi, and S. Sugawa, “A 200- $\mu\text{V}/\text{e}^-$ CMOS Image Sensor With 100-ke $^-$ Full Well Capacity,” IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol.43, no.4, pp.823-830, 2008.
- 32) W. Lee, N. Akahane, S. Adachi, K. Mizobuchi, and S. Sugawa, “A 1.9e- Random Noise CMOS Image Sensor With Active Feedback Operation in Each Pixel,” IEEE Trans. Electron Devices, vol.56, no.11, pp.2436-2445, 2009.
- 33) 溝淵孝一, 足立 理, 山下友和, 岡村誠一郎, 押久保弘道, 赤羽奈々, 須川成利, “高温下の耐性・撮像性能を改善した広ダイナミックレンジ CMOS イメージセンサ,” 映情学誌, vol.62, no.3, pp.368-375, 2008.
- 34) 井出典子, 赤羽奈々, 須川成利, “画素容量・列容量電荷電圧変換を組合せた多重露光線形応答広ダイナミックレンジ CMOS イメージセンサ,” 映情学誌, vol.64, no.3, pp.335-342, 2010.
- 35) N. Ide, N. Akahane, and S. Sugawa, “A linear response 200-dB dynamic range CMOS image sensor with multiple voltage and current readout operations,” IS&T/SPIE Electronic Imaging, 6816-05, 2008.
- 36) K. Mizobuchi, S. Adachi, N. Akahane, H. Sawada, K. Ohta, H. Oshikubo, and S. Sugawa, “4.5 μm Pixel Pitch 154ke- Full Well Capacity CMOS Image Sensor,” Proc. 2009 International Image Sensor Workshop, pp.235-238, 2009.
- 37) T. Kohara, W. Lee, N. Akahane, K. Mizobuchi, and S. Sugawa, “A CMOS Image Sensor With 2.5-e $^-$ Random Noise and 110-ke- Full Well Capacity Using Column Source Follower Readout Circuits,” 2009 Symposium on VLSI Circuits, Digest of Technical Papers, pp.182-183, 2009.
- 38) S. Kawada, S. Sakai, N. Akahane, K. Mizobuchi, and S. Sugawa, “A Color-Independent Saturation, Linear Response, Wide Dynamic Range CMOS Image Sensor With Retinal Rod- and Cone-like Color Pixels,” 2009 Symposium on VLSI Circuits, Digest of Technical Papers, pp.180-181, 2009.
- 39) S. Kawada, S. Sakai, Y. Tashiro, and S. Sugawa, “WRGB LOFIC CMOS Image Sensor with Color-Independent Exposure and Widely-Spectral High Sensitivity,” Ext. Abst. Solid State Devices and Materials, pp.1064-1065, 2009.

- 40) S. Sakai, Y. Tashiro, N. Akahane, R. Kuroda, K. Mizobuchi, and S. Sugawa, "A Pixel-Shared CMOS Image Sensor Using Lateral Overflow Gate," Proc. European Solid-State Circuits Conference, pp.240-243, 2009.
- 41) Y. Nose, K. Tani, A. Wada, K. Kagawa, Y. Adachi, M. Nunoshita, and J. Ohta, "An electronic calibration and image reproduction scheme in an active-passive hybrid wide dynamic range CMOS imager," Proc. ISICE 2007, pp.170-175, 2007.
- 42) 谷 邦之, 香川景一郎, 能勢悠吾, 和田 淳, 布下正宏, 太田 淳, "アクティブ・パッシブ画素値読み出し方式を併用した CMOS イメージセンサによる画像取得," 映情学技報, vol.32, no.19, pp.31-34, 2008.
- 43) B. Fowler, C. Liu, S. Mims, J. Balicki, W. Li, H. Do, and P. Vu, "Wide Dynamic Range Low Light Level CMOS Image Sensor," Proc. 2009 International Image Sensor Workshop, pp.340-343, 2009.
- 44) E. C. Fox, J. Hyneczek, and D. R. Dykaar, "Wide-Dynamic-Range Pixel with Combined Linear and Logarithmic Response and Increased Signal Swing," Proc. SPIE, vol.3965, pp.4-10, Jan. 2000.
- 45) M. Waeny, S. Tanner, S. C. Lauxtermann, N. Blanc, M. Willemin, M. Rechsteiner, E. Doering, J. Grupp, P. Seitz, F. Pellandini, and M. Ansoerge, "High-Sensitivity High-Dynamic Digital CMOS Imager," Proc. SPIE, vol.4306, pp.78-84, May 2001.
- 46) G. G. Storm, J. E. D. Hurwitz, D. Renshaw, K. M. Findlater, R. K. Henderson, and M. D. Purcell, "Combined Linear-Logarithmic CMOS Image Sensor," 2004 ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.116-117, Feb. 2004.
- 47) K. Hara, H. Kubo, M. Kimura, F. Murao, and S. Komori, "A Linear-Logarithmic CMOS Sensor with Offset Calibration Using an Injected Charge Signal," 2005 ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.354-355, Feb. 2005.
- 48) N. Akahane, R. Ryuzaki, S. Adachi, K. Mizobuchi, and S. Sugawa, "A 200dB Dynamic Range Iris-less CMOS Image Sensor with Lateral Overflow Integration Capacitor using Hybrid Voltage and Current Readout Operation," 2006 ISSCC Dig. Tech. Papers, vol.16.no.7, Feb. 2006.
- 49) 川人祥二, "応用からみたイメージセンサの開発動向," 映情学誌, vol.59, no.3, pp.359-361, 2005.
- 50) 浜本隆之, 太田 淳, "新機能・新原理の撮像デバイスとその応用," 映情学誌, vol.59, no.3, pp.362-367, 2005.
- 51) J. Marek, H.-P. Trah, Y. Suzuki, and I. Yokomori, "Sensor for Automotive Technology," WILEY-VCH GmbH & Co.KGaA, pp.372-403, 462-480, 2003.