3. 高密度エリアセンサの動向

正会員 秋山 郁男[†]

1. ま え が き

CCD (Charge Coupled Device: 電荷結合素子) をはじめとする固体撮像素子, とりわけエリアセンサは, 市場規模拡大のために, よりいっそうの“低価格化”と“多様化”が図られつつある. このうち“低価格化”は, 高密度化技術 (=画素サイズ縮小化) を使ってチップサイズを縮小化することにより達成できる. また, 電子スチルカメラ専用 CCD やハイビジョン用 CCD などの高解像度エリアセンサに代表される“多様化”も, 高密度化技術を使って多画素化することにより実現できる.

このように高密度化技術は, “低価格化”と“多様化”(=多画素化)に共通する重要な技術である. 反面, 撮像素子には感光領域が狭くなると光感度が劣化する宿命がある. すなわち, 行き過ぎた高密度化は特性劣化につながる. よって, 感度, ダイナミックレンジ, スミア等の基本性能を低下させずに, いかに“高密度化”を図るかがこの技術の重要なポイントとなる.

2. 標準方式エリアセンサの開発動向

2.1 高密度化の動向

図1に標準方式エリアセンサの画素数の推移を示す. 同図の縦軸には, 画素数に対応させて, 目安となる水平解像度が示されている. この2つの縦軸の相互関係は一義的には決定されない. 特に単板カラーカメラでは, カラーフィルタ構成, 信号処理などにより, 少ない画素数で水平解像度を向上させる手法が採用されるからである.

エリアセンサの実用化は20万画素レベルから商品化が開始され, 現在では35~40万画素レベルに達している. 標準 (NTSC) 方式では走査線数が525本に

図1 標準方式エリアセンサの画素数の推移

限定されているので, 水平解像度だけを必要以上に向上させても画質の改善には限度がある. この限界画素数が40万とも見なすことができ, 図1の高解像度化の推移が飽和していることに対応している.

図1から読み取れるもうひとつの傾向は, イメージサイズ (光学フォーマット) が年々減少している点である. すなわち, 従来の2/3インチサイズ (イメージエリアの対角線長=11 mm) から1/2インチサイズ (イメージエリアの対角線長=8 mm) に移行する傾向にある. これはチップサイズの縮小化によって歩留まりを改善し, “低価格化”を図るのが目的である. このチップサイズの縮小化は, 熾烈な低価格競争が続く民生向けエリアセンサの分野で特に顕著である. 総合的な高性能化が要求される放送局用・業務用カメラ向けエリアセンサには2/3インチサイズを使用し, また小型化・低価格化が要求される民生向けエリアセンサには1/2インチサイズを使うといった, いわゆる“棲み分け”が進行しつつある.

さらに, 1/3インチ化 (イメージエリアの対角線長=5.5 mm) への動きもある. すでに1/3インチ25万画素CCD¹⁾が数社より発売されている. これらセンサの画素サイズは8.6(H)×6.8(V) μm であり, その画素面積は後述する1インチ200万画素CCDに匹敵するほど小さい.

[†] 日本電気株式会社 マイクロエレクトロニクス研究所
“Recent Trends of High-packing Density Solid State Area Sensors” by Ikuo Akiyama (Microelectronics Research Laboratories, NEC Corporation, Sagamihara)

2.2 標準方式 CCD の最近の技術動向

最近の標準方式 CCD は、既存の技術に磨きをかけ、よりいっそうの“高性能化”と“多機能化”を図る傾向にある。前者の例はフレームインタライン転送 (FIT) 構造²⁾や埋め込み構造フォトダイオード³⁾であり、後者は電子シャッタ機能⁴⁾に代表される。

FIT-CCD の最近の開発例には、2/3 インチ 38 万画素〔有効 768(H)×494(V)画素〕のもの⁵⁾や、1/2 インチ 38 万画素〔有効 775(H)×485(V)画素〕のもの⁶⁾、1/2 インチ 35 万画素〔有効 712(H)×485(V)画素〕のもの⁷⁾などがある。これらのうち、2/3 インチ FIT-CCD は高解像度、高 S/N、低スミアが要求される放送局用・業務用カメラに使用される。これに対し、1/2 インチ FIT-CCD は、従来は放送局用・業務用専用だった FIT 構造の民生品への展開を可能とするもので、家庭用カメラ一体型 VTR の高級化競争に拍車がかかるものと思われる。

FIT-CCD の最大の利点は、ここで改めて述べるまでもないが、スミアを効果的に低減できる点である。すなわち、垂直ブランキング期間内で、垂直 CCD 中に残存するスミア成分を高速転送によって掃き出した後に、フォトダイオードに蓄積されていた信号電荷を垂直 CCD へ読出し、ついで、これら信号電荷をメモリー領域へ高速転送することにより、スミアを飛躍的に低減できる。

FIT-CCD には、電子シャッタ機能を比較的容易に付加できる利点もある。すなわち、標準方式 CCD の通常の駆動では、等価的なシャッタ速度が 1/60 秒と低速なため、動きの速い被写体に対しては画像のぼけが生じる。これを防ぐためにはメカニカルシャッタを使って等価的なシャッタ速度を速くする方法も考えられるが、FIT-CCD では純電子的にシャッタ速度を可変することができる。電子シャッタ動作の詳細な説明は文献⁸⁾に譲るが、FIT-CCD では最大 1/60 秒から最小約 1/2000 秒位までのシャッタ速度を 1 ライン期間 (約 1/15750 秒) 単位で任意に選択できる。特に、商用周波数 50 Hz の地域で、シャッタ速度を 1/100 秒に設定すれば、蛍光灯照明下で発生するフリッカ (蛍光灯フリッカ) が抑制され、その効果は大きい。なお、従来のインタライン型 CCD に簡便な電子シャッタ機能を付加する方法として、擬似 (Quasi-) FIT-CCD⁹⁾が考案されたが、メモリー領域の大きさが制限されるため、シャッタ速度の可変範囲は 1/250~1/2000 秒と比較的高速側に限られる。

埋め込み構造フォトダイオードは、残像特性向上と暗電流低減のために発案された¹⁰⁾。図 2(a)と(b)に

(a) 従来構造フォトダイオード

(b) 埋め込み構造フォトダイオード

図 2 フォトダイオード構造図

おのの従来構造のフォトダイオードと埋め込み構造フォトダイオードを示す¹¹⁾。従来構造において、残像特性を向上させるために、フォトダイオードから垂直 CCD への電荷転送が完全転送モードとなるようにすると、Si-SiO₂界面が空乏化して、暗電流が増加する。ここで高温時の低照度撮影においては、暗電流むらによる固定パターン雑音が支配的となるため、感度向上のためには暗電流の低減が不可欠である。埋め込み構造ではフォトダイオードの n 層の上に p⁺ 層を設け、ここに正孔を常に蓄積することにより非空乏状態とし、界面単位からの暗電流の発生を防いでいる。この埋め込み構造フォトダイオードの採用により、暗電流が従来構造の 1/10 以下になったとの報告⁷⁾もある。

上述した電子シャッタ機能は、縦型オーバーフローレイン (VOD) 構造¹²⁾を使っても実現できる⁵⁾¹³⁾¹⁴⁾。すなわち、図 3¹⁵⁾に示すように、通常動作時には基板電圧 V_{sub} を一定電圧に保って、フォトダイオードに信号電荷を蓄積する。一方、電子シャッタ動作時には、基板電圧 V_{sub} に ΔV_{sub} を加えて、フォトダイオード中に溜っていた不要電荷を n 型基板へ掃き出す。この不要電荷の掃き出しに際しては、フォトダイオードの表面電位を一定に保つことが重要である。埋め込み構造フォトダイオードは、表面が p⁺ 層 (正孔が蓄積されている) によって常に一定電位に保たれているため、VOD 構造を使った電子シャッタに適した構造といえる。この電子シャッタの最大の特長は、インタライン型 CCD に FIT-CCD と同等以上に選択範囲の広いシャッタ機能が搭載できた点である。また、本シャッタ機能を FIT-CCD に適用した場合、不要電荷の基

図3 縦型オーバーフローライン構造を用いた電子シャッタ機能（フォトダイオード部の縦方向電位分布を示す）

板への掃き出しと垂直 CCD 中に残存するスミア成分の掃き出しとが独立して行えるため、最小1ライン期間(約1/15750秒)の高速シャッタが使用可能となる⁵⁾。反面、インタライン型 CCD に適用した場合には、垂直 CCD 中に残存するスミア成分のすべてを高速掃き出しすることができないため、CCD 自身のスミアが充分小さいことが、本シャッタ機能適用に当たっての必要条件となる。

スミア低減には、電気的な手法と素子構造自身の改善とがある。前者には、FIT-CCD におけるスミア成分の高速掃き出しがある。一方後者には、基板内の電荷中性領域で発生するキャリアの拡散を防ぐ構造、例えばフォトダイオード下のウェルの完全空乏化や垂直 CCD の二重ウェル構造等がある。また、遮光膜をフォトダイオードに近接させることにより、光の漏れ込みによるスミアが低減できる。この遮光膜として、高融点材料であるタングステンシリサイド(WSi₂)を用いたものが発表されている¹⁾。

その他、標準方式 CCD の最近のユニークな開発例として、バーチャルフェイズを用いた1/2インチ36万画素フレーム転送方式 (FT) CCD¹⁷⁾と、垂直 CCD にアコーディオン読出し構造を用いた1/2インチ40万画素 FT-CCD¹⁸⁾がある。

2.3 増幅型エリ阿森サ

増幅型エリ阿森サにも高密度化の兆しが見え始めた。最近の開発例としては、2/3インチ25万画素 AMI (Amplified MOS Imager)¹⁹⁾や1/2インチ28万画素 FGA (Floating Gate Array) イメージセンサ²⁰⁾、2/3インチ31万画素 BASIS (Base Stored Image Sensor)²¹⁾、1/2インチ31万画素 CMD (Charge Modulation Device) イメージャ²²⁾などがある。

増幅型エリ阿森サは出力不均一性(固定パターン雑音)が大きく、今すぐに CCD と置き換え可能なレ

ベルには達していないが、半導体微細加工技術の発達により、かなり小さく抑えられるようになってきた。特に増幅型固体撮像素子には、高速駆動が可能、非破壊読出しが可能等の、CCD にはない優れた特長があり、高速度カメラ²³⁾や画像処理用など特殊用途への応用が期待できる²⁴⁾。また、ハイビジョンカメラ向けの固体撮像素子に適しているとの見解もある。

3. 超高解像度エリ阿森サの開発動向

3.1 超高解像度化の動向

標準方式エリ阿森サに関する設計・製造技術は、増幅型など一部のものを除いて、ほぼ確立した感がある。今後は、よりいっそうの特性改善が進むと同時に、用途別専用素子など“多様化”が進むであろう。

超高解像度を指向する動きは、低速走査テレビ応用として開始され、100万画素²⁵⁾、400万画素²⁶⁾もの CCD が製品化されている。しかし、これらは主に天体観測用に開発されたものであり、数フレーム/秒程度の準静止画を撮像することを目的としている。このため、30フレーム/秒が要求されるテレビ応用(動画撮像)には適用できない。テレビ応用を想定した超高解像度 CCD は、124万画素 CCD²⁷⁾の開発に始まり、電子スチルカメラ専用 CCD や HDTV への応用を狙った200万画素レベルのものまでが試作報告されるに至っている。

3.2 電子スチルカメラ用エリ阿森サ

電子スチルカメラ専用 CCD の開発の兆しが現れ始めた。図4はこの一例であり、2/3インチ57万画素〔有効1188(H)×484(V)画素〕FT-CCD³⁸⁾を示している。このセンサの特徴は、電子スチル画モードと従来のムービーモードの両方に対処すべく、撮像領域とメモリ領域の間にも水平 CCD を設けた点である。すなわち、電子スチル画モードのときには、同図(b)に示すように、第1フィールドの信号電荷を水平 CCD 1 から読出し、ついで第2フィールドの信号電荷を、メモリ領域を介して水平 CCD 2 から読出す。一方、ムービーモードのときには、通常の FT-CCD と同じ動作をし、信号電荷は上下のラインの信号電荷とフィールド毎に交互に加算され、メモリ領域を介して水平 CCD 2 から出力される。

その他、電子スチルカメラ専用 CCD として、1/2インチ20万画素〔有効786(H)×250(V)画素〕フルフレームモード CCD²⁹⁾や2/3インチ75万画素〔有効766(H)×980(V)画素〕インタライン型 CCD³⁰⁾、2/3インチ38万画素〔有効775(H)×494(V)画素〕全画素読出し FIT-CCD³¹⁾など独創的なものが報告されてい

図 4 電子スチルカメラ専用 CCD の例

る．さらに，準静止画入力用として，2/3 インチ 140 万画素〔有効 1320(H)×1035(V)画素〕フルフレームモード CCD³²⁾が市販されている．

3.3 ハイビジョン用エリアセンサ

ハイビジョンは，次世代テレビとして期待されている HDTV の一方式であり，走査線数が標準 (NTSC) 方式の約 2 倍 (1125 本)，画面の縦横比 (アスペクト

比) が 9:16 で，従来よりも横長になっている．このため，ハイビジョンカメラに搭載するエリアセンサの画素数としては，少なくとも 200 万画素以上が要求される．ハイビジョン用エリアセンサとして，いかなる種類の固体撮像素子 (CCD，増幅型等)を採用するかは論議の分かれるところであるが，現在までのところ，インタライン型 CCD³³⁾，積層構造 CCD³⁴⁾，FIT-

CCD³⁵⁾およびトレンチ加工技術を使ったインタライン型 CCD³⁶⁾が発表されており、今後その種類はさらに増えるものと思われる。

図5に200万画素インタライン型 CCD³³⁾の素子構成を示す。イメージサイズは感度向上のためには大きい方が良いが、歩留まり向上とフォトリソグラフィにおける露光フィールドの制限、および使用するカメラレンズの重量・値段等からは小さい方が有利である。このため、イメージサイズは1インチ光学系に対応させて14.0(H)×7.8(V)mmとしている。また、有効画素数は1920(H)×1035(V)、画素サイズは7.3(H)×7.6(V)μmであり、現在量産されている1/2インチ38万画素 CCDと比較して70%以下に縮小されている。

この200万画素 CCDを3個用いたハイビジョン CCD カラーカメラもすでに試作³⁷⁾されている。本カメラの水平・垂直解像度は、共に標準方式の約2倍の1000 TV本である。感度は2000 lx、F4 (3200 K、反射率89.9%)であり、また、そのときの輝度信号のSN比は、新しい CCD 雑音除去回路³⁸⁾を採用することにより、30 MHz帯域で52 dBが得られている。これらは従来の撮像管を用いたハイビジョンカメラに匹敵する優れた特性である。

光電変換膜にアモルファス Si 膜を用いた200万画素積層構造 CCD³⁴⁾の画素断面図を図6に示す。通常のインタライン型 CCD のフォトダイオードに対応する領域は蓄積ダイオードとして機能し、アモルファス Si 膜の下部に形成された画素電極と結ばれている。このような構造であれば、その表面全体を受光面として利用でき、光学開口率をほぼ100%まで改善できる。積層構造にすることにより、インタライン型 CCD の約5倍の感度向上が報告³⁴⁾されている。光電

図6 200万画素積層構造 CCD の画素断面図

変換膜の積層プロセスと半導体プロセスとの整合性、残像の低減が課題であるといわれている。

インタライン型 CCD はチップサイズが縮小化でき、低コスト化し易い反面、スミア特性が悪いことも指摘されている。このスミアの低減を目的として、1インチ130万画素[有効1258(H)×1035(V)画素]FIT-CCD³⁵⁾が開発された。1インチサイズの CCD では、チップサイズが大きくなるため、転送電極の配線抵抗も大きくなる。このため、垂直 CCD 駆動パルスに波形歪みが生じ、チップ中央部での最大転送電荷量が減少する。この CCD では、図7に示すように、ポリ Si 転送電極に Al の裏打ち配線を施すことで配線抵抗の低減を図っている。

トレンチ加工技術を使った2/3インチ200万画素インタライン型 CCD³⁶⁾が提案されている。画素断面図を図8に示す。垂直 CCD の転送方向に沿って長いトレンチ(溝)を掘り、トレンチの側壁と底面に CCD の転送チャンネルを形成している。このため、通常の垂

図7 ポリ Si/Al 裏打ち配線を用いた画素部の平面図

図8 トレンチ CCD の画素断面図

直 CCD に比べてチャンネル幅が広がり、広いダイナミックレンジが確保できる。今後、詳細な動作確認とスミアの低減対策が必要であるといわれている。

4. む す び

高密度エリアセンサを含めた固体撮像素子には、一般的に、光学開口率が低いためモアレが発生し易い、ナキスト限界内での周波数レスポンスは大きい解像度に伸びがない、3板式カラーカメラを構成したとき、電気的手法によるレジストレーション誤差の補正が難しい、駆動のために比較的高周波のクロックパルスを使うため、クロック雑音が飛び込み易い等の欠点がある。

反面、長寿命でかつメンテナンスフリーなため運用コストが安い、図形歪みがなく、周辺部まで空間分解能が高い等、上記欠点を補っても余り得る大きな利点がある。このため、標準方式エリアセンサはもちろんのこと、電子スチルカメラやハイビジョンに向けての“多様化”がますます進展するものと思われる。

また昨今は、半導体微細加工技術だけでなく、設計、製造に係わる各種シミュレーション技術も進歩しており、開発期間の短縮化と“低価格化”が期待できる。

(1989年10月9日受付)

【参 考 文 献】

- 1) D. L. Losee, et al.: "A 1/3" Format Image Sensor with Refractory Metal Light Shield for Color Video Applications", ISSCC Dig. of Tech. Papers, pp. 90-91 (1989)
- 2) 堀居ほか: "単板カラー撮像素子の高性能化", テレビ大全, pp. 51-52 (1981)
- 3) 寺西ほか: "インターライン転送方式 CCD イメージセンサの残像現象", テレビ学技報, 4, 41, pp. 25-30 (Feb., 1981)
- 4) 海瀬ほか: "電子シャッター機能付放送用 CCD カメラ", テレビ大全, pp. 99-100 (1986)
- 5) 廣田ほか: "2/3 インチ有効 38 万画素 FIT-CCD 撮像素子", テレビ大全, pp. 21-22 (1989)
- 6) 笹野ほか: "可変電子シャッター付 1/2 インチ 40 万画素 CCD センサ", テレビ学技報, 12, 12, pp. 37-42 (Feb. 1988)
- 7) 渋谷ほか: "1/2 インチ 710 画素 FIT-CCD 撮像素子", テレビ大全, pp. 25-26 (1989)
- 8) 堀居ほか: "502(V)×600(H) FIT-CCD 撮像素子", テレビ誌, 41, 11, pp. 59-66 (Nov. 1987)
- 9) 山口ほか: "1/2 インチ 670(H)×385(V) QFIT-CCD 撮像素子", テレビ大全, pp. 93-94 (1987)
- 10) 寺西ほか: " p^+np 構造フォトダイオードを用いた IL-CCD センサの残像特性", テレビ大全, pp. 45-46 (1981)
- 11) 北浜ほか: "1/2 インチ 27 万画素 CCD 固体撮像素子の高感度化", テレビ学技報, 13, 11, pp. 61-66 (Feb. 1989)
- 12) Y. Ishihara, et al.: "Interline CCD Image Sensor with an Anti Blooming Structure", ISSCC Dig. of Tech. Papers, pp. 168-169 (1982)
- 13) 竹内ほか: "縦型オーバーフロー構造 CCD イメージセンサの駆動法—その 1—", テレビ大全, pp. 31-32 (1982)
- 14) 松井ほか: "1/2 インチ有効 38 万画素連続可変速シャッター付 IT-CCD 撮像素子", テレビ大全, pp. 23-24 (1989)
- 15) 浜崎: "高解像度 CCD 撮像素子", 平 1 連大, pp. 3-57~3-

- 60 (1989)
- 16) 秋本ほか: "IL-CCD 型固体撮像素子におけるスミアの解析", テレビ学技報, 12, 12, pp. 19-24 (Feb. 1988)
- 17) J. Hynecek: "High-Resolution 8-mm CCD Image Sensor with Correlated Clamp Sample and Hold Charge Detection Circuit", IEEE Trans., ED-33, 6, pp. 850-362 (June 1986)
- 18) A. J. P. Theuwissen, et al.: "A 400 K Pixel 1/2" Accordion CCD-Imager", ISSCC Dig. of Tech. Papers, pp. 48-49 (1988)
- 19) 安藤ほか: "増幅型高感度固体撮像素子 AMI", NHK 技研 R & D, 1, pp. 8-15 (May 1989)
- 20) J. Hynecek: "A New Device Architecture Suitable for High-Resolution and High-Performance Image Sensors", IEEE Trans., ED-35, 5, pp. 646-652 (May 1988)
- 21) N. Tanaka, et al.: "A 310 Pixel Bipolar Imager (BASIS)", ISSCC Dig. of Tech. Papers, pp. 96-97 (1989)
- 22) 森ほか: "31 万画素 CMD イメージャ", テレビ大全, pp. 33-34 (1989)
- 23) 藤田ほか: "6 倍速高速度カメラシステム (アクションアナライザ) の開発", テレビ大全, pp. 47-48 (1989)
- 24) 今井: "増幅型固体撮像素子", 平 1 連大, pp. 3-53~3-56 (1989)
- 25) R. D. McGrath, et al.: "A 1024×1024 Virtual Phase CCD Imager", IEDM Dig. of Tech. Papers, pp. 749-750 (1983)
- 26) M. M. Blouke, et al.: "Large Area CCD Image Sensors for Scientific Applications", Proc. of SPIE, 570, pp. 82-88 (Aug. 1985)
- 27) I. Akiyama, et al.: "A 1280×970 Pixel CCD Image Sensor", ISSCC Dig. of Tech. Papers, pp. 96-97 (1986)
- 28) J. Bosiers, et al.: "A 2/3" 1188(H)×484(V) Frame-Transfer CCD for ESP and Movie Mode", IEDM Dig. of Tech. Papers, pp. 70-73 (1988)
- 29) 藤井ほか: "電子スチルカメラ用 CCD の技術動向", テレビ学技報, 13, 11, pp. 55-59 (Feb. 1989)
- 30) 武藤ほか: "2/3 インチ 80 万画素 CCD カラーイメージセンサ", テレビ学技報, 13, 11, pp. 73-78 (Feb., 1989)
- 31) 柳井ほか: "40 万画素全画素読み出し FIT-CCD", テレビ学技報, 13, 11, pp. 79-84 (Feb. 1989)
- 32) E. G. Stevens, et al.: "A 1.4-Million-Element CCD Image Sensor", ISSCC Dig. of Tech. Papers, pp. 114-115 (1987)
- 33) 永野ほか: "200 万画素高精細度 CCD イメージセンサ", 信学技報, ED 87-174, pp. 45-50 (Feb. 1988)
- 34) S. Manabe, et al.: "A 2-Million Pixel CCD Imager Overlaid with an Amorphous Silicon Photoconversion Layer", ISSCC Dig. of Tech. Papers, pp. 50-51 (1988)
- 35) T. Nobusada, et al.: "Frame Interline Transfer CCD Sensor for HDTV Camera", ISSCC Dig. of Tech. Papers, pp. 88-89 (1989)
- 36) T. Yamada, et al.: "Trench CCD Image Sensor for High Resolution Cameras", ICCE Dig. of Tech. Papers, pp. 176-177 (1989)
- 37) 秋山ほか: "ハイビジョン CCD カラーカメラ", テレビ技報, 12, 43, pp. 37-42 (Oct. 1988)
- 38) M. Ohbo, et al.: "A New Noise Suppression Method for High-Definition CCD Cameras", ICCE Dig. of Tech. Papers, pp. 178-179 (1989)

あきやま いくお
秋山 郁男 昭和 52 年、山梨大学大学院電気工学専攻修士課程修了。同年、日本電気(株)に入社。中央研究所を経て、現在、同社マイクロエレクトロニクス研究所に勤務。CCD ビデオ遅延線、CCD イメージセンサおよび CCD カメラの研究開発に従事。正会員。