2/3 インチ 200 万画素スタック CCD カラーカメラ の高ダイナミックレンジ化

正会員 中村 信男[†], 正会員 坂口 夏絵, 正会員 江川 佳孝[†]
正会員 大澤 慎治[†], 正会員 遠藤 幸雄[†], 正会員 松長 誠之[†]

Dynamic Range Expansion for a 2/3-in 2-Million Pixel STACK-CCD Color Camera

Nobuo Nakamura[†], Natsue Sakaguchi[†], Yoshitaka Egawa, Shinji Ohsawa[†],
Yukio Endo[†] and Yoshiyuki Matsunaga[†]

Abstract Three kinds of operations for a STACK-CCD of a 2/3-in 2 million-pixel high-definition-television (HDTV) imager to expand its dynamic range and a S/N ratio are proposed and evaluated. A high-light signal suppression operation, knee control operation, can expand the dynamic range up to 90 dB without a fixed-pattern noise for the STACK-CCD imager. A small signal reset (SSR) operation reduces the random noise generated in the storage diode (SD) from 30 electrons to 26 electrons. The fixed-pattern noise generated in the SD is also suppressed by up to 10 electrons by the accumulation operation and a surrounding channel stop region. Using these operations, the dynamic range of 90 dB, the S/N ratio of 54 dB can be obtained for the 2/3-in 2 million-pixel STACK-CCD imager with the incomplete-transfer type storage-diode.

1. ま え が き

1997 年の本格的なハイビジョン(HDTV)放送を目前にして、ポータブル化が可能な 2/3 インチ 200 万画素カラーカメラの開発が行われている^{1)~4)}。筆者らも積層型構造の 2/3 インチ 200 万画素スタック CCD センサの開発を行ってきた^{5)~7)}。スタック CCD センサは 100% の開口率と高い量子効率により、大きな信号電荷量を扱うことが可能であり、高い S/N を得ることができる。しかし、ハイビジョン素子のセルサイズはすでに 5 μm 程度まで微細化されており、充分なフ

ォトダイオード面積を確保し、多くの信号電荷量を転送することが困難になっている。これはセルの微細化とともに撮像特性が劣化することを示している。

そのため、撮像特性を改善するためのいくつかの研究が行われている。ダイナミックレンジ(Dレンジ)の向上^{8)~10)}や、雑音を抑圧するための研究がそれである。デバイス上で D レンジを拡大するには 2 つの方法がある。ひとつは入射光量(信号電荷量)の大きい領域の光電変換特性を小さくし、D レンジを高輝度領域へ拡大する方法¹¹⁾¹²⁾であり、他の方法は信号電荷の小さい領域のノイズを抑圧して、D レンジを低照度領

キーワード：STACK-CCD センサ、ハイビジョンカラーカメラ、ダイナミックレンジ拡大、ニー動作、ランダム雑音、固定パターン雑音

1993 年 7 月 21 日、1993 年テレビジョン学会年次大会で発表

1996 年 8 月 19 日受付、1996 年 10 月 22 日再受付

[†] 株式会社東芝 研究開発センター ULSI 研究所 研究第 1 担当 (〒210 川崎市幸区小向東芝町 1 番地、TEL 044-549-2192)

[†] ULSI Research Lab., Research and Development Center, Toshiba Corp. (1, Komukai Toshiba-cho, Saiwai-ku, Kawasaki 210, Japan)

域へ拡大する方法である^{13)~15)}。

本論文では、2/3 インチ 200 万画素スタック CCD カラーカメラを開発し、このカメラの最大の特徴である高ダイナミックレンジ化の手法について、3つの技術を提案し、系統的に解析・実験を行い、ハイビジョンカラーカメラにおける有効性を議論した。

第1は、画質の劣化なくDレンジを高輝度領域に拡大するダイナミックレンジ拡大動作である。1フィールドの有効期間に長時間蓄積した信号電荷と、1フィールドの垂直ブランキング期間に短時間蓄積した信号電荷を画素内部で加算する方法である。信号蓄積前の画素電位は信号電荷の蓄積毎に一定電圧に設定される。長時間蓄積した信号電荷量が外部で設定される信号量を超えると、その超過した信号電荷は不要なものとして画素外部へ読み捨てる。このスライス動作は、信号蓄積前の画素電位と信号蓄積後の画素電位の電圧差のみを信号電荷量として画素へ蓄積するので、この動作を採用しても固定雑音は発生せず、20 dB 以上のダイナミックレンジ拡大ができる。第2は、画素への電荷の注入・排出動作時の電荷量を最適化することにより、画素で発生するランダム雑音を抑圧する小信号リセット動作である。第3は、信号蓄積期間にイメージ部の転送電極に負電圧を印加して、フォトダイオード周辺をホール蓄積状態にするとともに、フォトダイオードと基板で形成される空乏層の広がりを抑え、暗電流に起因する固定パターン雑音を抑圧する暗電流抑圧動作である。

これらの技術を用いることにより、ハイビジョンカメラとしては最高性能の 90 dB のダイナミックレンジと、信号対雑音比 54 dB (F 8, 2000 lx) を達成することができた。提案した3つの技術の有効性を証明するとともに、新機能を搭載した 2/3 インチ 200 万画素ハイビジョンカラーカメラの性能を大幅に改善できることが示せたので、その内容について報告する。

2. スタック CCD センサ

図1に、2/3 インチ 200 万画素スタック CCD センサの回路構成図と断面図を示す。センサはイメージ部とメモリー部からなる FIT 構成であり、水平信号線は2線出力である。フォトダイオードで発生する容量性残像を抑圧するため、イメージ部の上下に電荷注入ダイオード (CID) が配置形成され、垂直 CCD を経由して電荷が画素に注入される。

スタック CCD センサは、最上層に光電変換膜であるアモルファスシリコン領域を持った積層構造をしており、画素サイズは $5.0\ \mu\text{m}(\text{H}) \times 5.2\ \mu\text{m}(\text{V})$ である。

図1 STACK-CCD センサの上面図(a)と断面図(b)
Top-view(a) and cross-sectional view(b) for the
STACK-CCD imager.

2画素1組のセルレイアウトにより、垂直 CCD レジスタの領域を大きくできる。転送電極は WSi 配線 (シート抵抗 $4\ \Omega$) により裏打ちされているので、1.3 MHz の高速フレームシフトが可能である^{5a)}。また、蓄積ダイオード部には WSi 電極が接続しているので、蓄積ダイオード部の信号電荷を完全に読出すことができない。

そのため、画素からの信号読出し時や画素電位のリセット動作時に、蓄積ダイオード領域でランダム雑音が発生する。さらに np 型の蓄積ダイオード構造のために、埋め込みフォトダイオード型と比較して大きな暗電流起因の固定パターン雑音が発生する。

3. 動作解析および結果

3.1 スーパーダイナミックレンジ (SDR) 動作

最初に、画素で D レンジを拡大する動作について

説明する。図2に、Dレンジを拡大するスーパーダイナミックレンジ動作(ニー動作)のタイミング図を、図3に、そのタイミング図に対応するポテンシャル図を示す。図2の上が垂直ブランキング期間を示し、下が転送電極に印加するタイミング図である。すべての動作は垂直ブランキング期間内に、次のフローで行われる。

まず最初に読出し電極に V_{FS1} パルスが印加され、 P_1 期間に蓄積ダイオード領域に蓄積された信号電荷量の一部が、垂直 CCD レジスタに排出される(図3の(b)：蓄積ダイオード領域の信号電荷量は Q_1 。このときの電位は ϕ_{SD1})。この排出された信号電荷は、スイープアウト期間に垂直 CCD レジスタの外部に排出される。スイープアウト期間 P_2 の間も、蓄積ダイオード領域には信号電荷が蓄積される(図3の(c)：信号電荷量 Q_2 が蓄積し、このときの電位は ϕ_{SD2})。その後、読出し電極に V_{FS2} ($V_{FS2} > V_{FS1}$) パルスを印加することによって、 P_1 期間に蓄積された信号電荷量 Q_1 と、 P_2 期間に蓄積された信号電荷量 Q_2 の和が全信号電荷量として読出される。

図4に、スーパーダイナミックレンジ動作を行った場合の光電変換特性を示す。横軸に入射光量を、縦軸に規格化したカメラ出力を示す。この図から明らかに、低照度領域と高輝度領域の光電変換特性は異なり、その傾きは図2の蓄積期間 P_1 と P_2 の比になっている。また曲がりの点(ニー点と呼ぶ)は、2つのパルス V_{FS1} と V_{FS2} の電圧比を調整することによって設定できる。

このとき2つの問題が発生する。第1は画素毎のニー点ばらつきをどの程度小さく抑えられるか、第2は3板式カラーカメラに応用した場合のニー点近傍のホ

ワイトバランス制御が可能か、という問題である。この2点について、理論的に考察する²¹⁾。

蓄積ダイオードから垂直 CCD レジスタへの信号電流は次の2式でおのおの与えられる。

$$I = I_s \times \exp [\beta \times (\phi_{FSG} - \phi_{SD})] \quad (1)$$

$$I = C_{SD} \times (d\phi_{SD}/dt) \quad (2)$$

ここで $\beta = q/kT$, ϕ_{FSG} は読出しゲートの電位, ϕ_{SD} は蓄積ダイオードの電位, C_{SD} は蓄積ダイオードの容量, I_s は定数である。

図3 ニー動作時の電位図
Potential diagram for the STACK-CCD imager under the knee control operation.

図2 ニー動作時のタイミングチャート
Timing diagram for the STACK-CCD imager under the knee control operation.

図4 ニー動作時の光電変換特性
Photoconversion characteristics under the knee control operation.

図2の T_{FS1} パルス期間の最終時点における蓄積ダイオード電位 ϕ_{SD1} は、転送ゲート下のポテンシャルを ϕ_{FS1} として、(1)(2)式を積分することによって求められる。

$$\phi_{SD1} = \phi_{FS1} + (1/\beta) \times \{ \ln [(\beta \times I_s \times T_{FS1}/C_{SD}) + \exp(\beta \times (\phi_{sig} - \phi_{FS1}))] \} \quad (3)$$

ここで ϕ_{sig} は P_1 期間に蓄積ダイオードに蓄積された信号電位である。

2 回目の P_2 期間までに蓄積される信号電荷量 ϕ_{SD2} は

$$\phi_{SD2} = \phi_{SD1} + (\phi_{SD3} - \phi_{sig}) \times (P_2/P_1) \quad (4)$$

ここで ϕ_{SD3} は信号電荷蓄積前の蓄積ダイオードの初期電位である。

読出し電極に V_{FS2} を印加した場合の読出しゲート下のポテンシャルを ϕ_{FS2} とすると、読出し期間 T_{FS2} パルスの最終時点における蓄積ダイオードの電位 ϕ_{SD3} は、(3)式と同様に求めることができる。

$$\phi_{SD3} = \phi_{FS2} + (1/\beta) \times \{ \ln [(\beta \times I_s \times T_{FS2}/C_{SD}) + \exp(\beta \times (\phi_{SD2} - \phi_{FS2}))] \} \quad (5)$$

出力信号 V_{out} は、 ϕ_{SD3} と ϕ_{SD2} の電位差で表すことができ、(3)(4)式を(5)式に代入することにより得られる。

$$\begin{aligned} V_{out} &= (C_{SD}/C_{FD}) \times (\phi_{SD3} - \phi_{SD2}) \quad (6) \\ &= (C_{SD}/C_{FD}) \times \{ \phi_{SD3} - \phi_{SD1} \\ &\quad + (\phi_{SD3} - \phi_{sig}) \times (P_2/P_1) \} \\ &= (C_{SD}/C_{FD}) \times \{ \phi_{SD3} - \phi_{FS1} - (1/\beta) \\ &\quad \times \{ \ln [(\beta \times I_s \times T_{FS1}/C_{SD}) \\ &\quad + \exp(\beta \times (\phi_{sig} - \phi_{FS1}))] \} \\ &\quad + (\phi_{SD3} - \phi_{sig}) \times (P_2/P_1) \} \quad (7) \end{aligned}$$

ここで、 C_{FD} は2段ソースフォロア回路のフローティングディフュージョンアンプの容量である。

この(7)式によって計算された理論結果が、図4の実線で示されている。実験結果である黒丸(●)と理論値である実線(一)はよく一致していることがわかる。また実験結果および理論結果ともに二点近くではスムーズな光電変換特性が得られる。(7)式から、デバイス温度が上昇すると光電変換特性はさらにスムーズなカーブを示す。この結果は3板式カラーカメラのホワイトバランス調整が容易に行えることを示している。

次に、二点のばらつきを考える。二点のばらつきは、蓄積ダイオードの容量ばらつきと蓄積ダイオードの信号電位のばらつきが原因である。つまり、その大きさ $V_{out} + V_m$ は(6)式より与えられる。

$$V_{out} + V_m = (C_{SD} + \delta C_{SD})/C_{FD} \times \{ (\phi_{SD3} + \delta \phi_{SD3}) - (\phi_{SD2} + \delta \phi_{SD2}) \} \quad (8)$$

ここで V_m , $\delta \phi_{SD3}$, $\delta \phi_{SD2}$ は、それぞればらつきの大き

さを示す。

スーパーダイナミックレンジ動作はすべての画素で行われるが、ひとつの画素を考えると、同じゲートを用いて信号の読出し動作とスキミング動作が行われる。つまり、(8)式の $\delta \phi_{SD3}$ と $\delta \phi_{SD2}$ は等しい。よって(8)式は

$$V_{out} + V_m = \{ (C_{SD} + \delta C_{SD})/C_{FD} \} \times (\phi_{SD3} - \phi_{SD2}) \quad (9)$$

$$V_m = (\delta C_{SD}/C_{FD}) \times (\phi_{SD3} - \phi_{SD2}) \quad (10)$$

となる。(10)式からわかるように、二点のばらつきは、蓄積ダイオードの容量ばらつきが原因であることがわかる。画素間の容量ばらつきは画素間のポテンシャルのばらつき(30 mV)よりも小さくできるので、プロセスの改善などにより二点のばらつきをさらに抑圧できる。(10)式から容量ばらつきが5%と仮定すると、二点ばらつきは約1 mVとなる。このばらつきは素地むらと異なり、信号電荷がある場合のばらつきであるから、画像特性上ほとんど問題にならない。実際に試作した STACK-CCD カラーカメラの画像特性評価では、この大きさはさらに小さいものと思われる。

図5に、低照度領域と高輝度領域の両方が撮像されている被写体の、再生像と対応するビデオ出力信号を示す。SDR 動作(二点動作)がない場合、低照度領域は撮像される(図の人形部分)が、高輝度領域(グレイスケールチャートの明るい部分)は白とびが生じている。SDR 動作を適用した場合、低照度領域はそのまま高輝度領域も撮像される。このときの二点近傍の固定雑音のばらつきは1 mV 以下であった。高輝度領域の光量は飽和信号量の10倍である。つまり SDR 動作を行うことにより、従来の10倍以上のダイナミックレンジ拡大を、つまり90 dBのダイナミックレンジを固定雑音の増加なしに達成することができた。

3.2 小信号リセット動作 (SSR 動作)

スタック CCD センサの SN 比をさらに向上させるためには、画素で発生するランダム雑音を抑圧しなければならない¹⁶⁾¹⁷⁾。このランダム雑音を抑圧するために、図6に示す小信号リセット動作 (SSR 動作: Small Signal Reset) を提案した。動作を簡単に説明する。従来は図6(a)に示すように、大きな電荷を蓄積ダイオードに注入し多くの信号をリセットすることにより、蓄積ダイオードのバイアス電荷量を決定していた。しかしあとで示すように、画素で発生するランダム雑音は信号電荷量依存性をもっているため、電荷注入後に排出される信号電荷量を小さくすることによって、ランダム雑音を小さくできる。この動作を小信

(a) Reprod 瀬威急頂 image without the knee control operation

(b) Reproduced image with the knee control operation

図 6 小信号読出し動作時の電位モデル
Potential model for the small signal read-out operation.

(a) Conventional Operation
(Large Signal Reset Operation)

(b) Small Signal Reset Operation

図 6 小信号読出し動作時の電位モデル
Potential model for the small signal read-out operation.

図 7 小信号のリセット動作時の電位モデル
Potential model for the small signal reset operation.

ので、必ずランダム雑音が発生する。よって、画素で発生するランダム雑音の大きさを理論的に考察するとともに、実験結果と比較することで、ランダム雑音発生メカニズムを検証した。

図 7 に、蓄積ダイオード領域のポテンシャル図と、蓄積ダイオードに存在する電子の分布関数を示す。この分布関数は信号電荷の読出し動作時の分布関数を示している。この分布は蓄積ダイオードに存在する電子のエネルギー分布であり、フェルミ・ディラックの分

号リセット動作と呼ぶことにする。スタック CCD センサの蓄積ダイオードは不完全転送モードで動作する

布関数で示され、数 q/kT 程度の分布の広がりをもつ。

フェルミ・ディラック分布関数 $F(\phi_{SD})$ は、フェルミエネルギーを ϕ_{SD3} として次式で与えられる¹⁸⁾。

$$F(\phi_{SD}) = 1 / \{1 + \exp[-\beta \times (\phi_{SD} - \phi_{SD3})]\} \quad (11)$$

β は q/kT 、 ϕ_{SD} は蓄積ダイオードの電位、 ϕ_{SD3} はフェルミエネルギーである。

蓄積ダイオード領域の電子の状態密度 $G(\phi_{SD})$ は

$$G(\phi_{SD}) = C_{SD}/q \quad (12)$$

となる。ここで C_{SD} は蓄積ダイオードの容量である。フェルミ・ディラック分布関数は電子が存在するかしないかの2項分布をしている。よって、その時の分散 $\text{Var}(\phi_{SD})$ は次式で与えられる。

$$\text{Var}(\phi_{SD}) = F(\phi_{SD}) \times [1 - F(\phi_{SD})] \quad (13)$$

信号読出し初期においては大きな電流が流れるので、蓄積ダイオードの電位はフェルミ準位からずれる。そのときの蓄積ダイオード電位は ϕ_{SD1} となる。また信号読出し終期においては電流がほとんど流れないため、蓄積ダイオードの電位はフェルミエネルギーに等しくなる。よって、蓄積ダイオードで発生するランダム雑音 N_i は、(13)式に(11)(12)式を代入し、 ϕ_{SD1} から ϕ_{SD3} まで積分することにより求められる。

詳細は付録で説明するが、画素で発生する全ランダム雑音 N は、信号蓄積前の注入・排出動作時に発生するランダム雑音と、信号読出し時に発生するランダム雑音の和となり、次式で与えられる（詳細は付録を参照のこと）。

$$N = (1/q) \times \sqrt{\{k \times T \times C_{SD} [1 - (1/(1 + \exp(\beta \times \delta\phi_{SD})))]\}} \quad (14)$$

以上の結果から、画素のランダム雑音は信号電荷量 $\delta\phi_{SD}$ に依存し、信号電荷量が小さいときはランダム雑音も小さいことがわかる。また、容量性残像を低減する目的で行う注入・リセット動作（バイアス電荷ある場合）により、ランダム雑音が $(1/q) \times \sqrt{k \times T \times C_{SD}/2}$ だけ増加することがわかった。このときのバイアス電荷量は1500電子である。

バイアス電荷は、容量性残像を抑圧するのに必要である。容量性残像は低照度領域で問題となるが、注入・リセット動作は毎フィールド行われるため、第2フィールドまで残る容量性残像は発生しない。さらに1000電子のバイアス電荷により、第1フィールド残像を0.5%以下にできる。これまでの経験によると、第1フィールド残像はモニタ上ではほとんど問題とはならないことがわかっている²⁰⁾。つまり、バイアス電荷量を最適化することにより、容量性残像を低減し、注

図8 バイアス電荷がある場合のランダム雑音の信号電荷量依存性

Dependence of the random noise on the input signal charge for the STACK-CCD imager with the bias charge.

入・リセット動作時に発生するランダム雑音をさらに減少できる可能性がある。

図8に、バイアス電荷が存在する場合のランダム雑音の信号電荷量依存性を示す。スタックCCDセンサのランダム雑音は3種類存在する。1つはフローティングディフュージョンアンプのリセット雑音、2つ目は画素で発生するランダム雑音、3つ目は入射光のフォトンのショット雑音である。図8では信号電荷量を変化させる手段としてバイアス電荷量を変化させているので、3番目のショット雑音は考えなくてよい。

フローティングディフュージョンアンプのリセット雑音は当社独自のAGI動作によって、10電子まで抑圧している¹⁵⁾²¹⁾。よって暗時の雑音は、画素で発生するランダム雑音が支配的となる。SSR動作がない場合の全ランダム雑音は30電子(rms)である。SSR動作を適用することにより、全ランダム雑音は26電子まで抑圧される。つまりSSR動作によって4電子のランダム雑音抑圧が達成された。この雑音抑圧効果はそれほど大きいわけではない。この理由はフィールドシフトゲート下のチャンネル電位のばらつきのために、全画素一定の小信号電荷を注入することが難しく、あまり小さな信号量では注入むらが発生するためである。画素で発生するランダム雑音の理論値(図中の実線)と実験値(図中の黒丸●)はよく一致しており、画素のランダム雑音が電子の熱分布から発生していることを示している。バイアス電荷量が減少すると画素

図 9 バイアス電荷がない場合のランダム雑音の信号電荷量依存性

Dependence of the random noise on the input signal charge for the STACK-CCD imager without the bias charge.

で発生するランダム雑音も減少するが、それに伴い容量性残像が少しずつ現れる¹⁷⁾。SSR 動作によってランダム雑音は抑圧されるが、さらにランダム雑音を減少させるためには、セル構造の変更などの手法が必要となってくる。

図 9 に、バイアス電荷がない場合のランダム雑音を示す。この実験の場合、光によって入力信号量を変化させているので、ランダム雑音の種類は、(1)画素で発生するランダム雑音、(2)光のショット雑音、(3)出力アンプのリセット雑音、の 3 種類となる。電荷の注入・リセット動作がないので、画素のランダム雑音は暗時では問題にならない。つまり出力アンプのリセット雑音により、ランダム雑音が決定される。すなわちバイアス電荷がない場合の暗時の SN 比は、バイアス電荷がある場合のそれよりも改善される。また入射光がある場合、スタック CCD センサの S/N は、光のショット雑音で支配されることがわかる。この場合も、実験値(図中の黒丸●)と理論値(図中の実線)はよく一致している。

3.3 暗電流抑圧動作 (ホール蓄積動作)

スタック CCD センサの雑音を抑圧するためには、画素で発生する暗電流による固定パターン雑音を低減しなければならない²²⁾。バイアス電荷のばらつきに起因する固定パターン雑音は問題のないレベルまで抑圧されている²³⁾ので、ここでは暗電流起因の FPN 抑圧について議論する。

図 10 暗電流と固定パターン雑音の温度依存性

Dependence of the dark current and the fixed pattern noise on the device temperature for the STACK-CCD imager.

画素で発生する暗電流の原因としては、(1)シリコン/酸化膜界面のトラップ準位/欠陥準位から発生するもの、(2)蓄積ダイオードの空乏層で発生する発生・再結合電流、(3)基板からの拡散電流、(4)光電変換膜で発生するもの、がある。

図 10 に、従来のスタック CCD センサの暗電流と FPN を示す。暗電流と FPN の活性化エネルギーから、光電変換膜の暗電流の影響(バンドギャップは 1.8 eV)は無視できる。60°Cにおける暗電流は約 250 電子、その時の FPN は 45 電子 p-p である。暗電流の活性化エネルギーは 0.93 eV、FPN のそれは 0.74 eV であることから、暗電流は基板からの暗電流が支配的であるが、固定パターン雑音の支配的原因はむしろ(1)と(2)が支配的になっていると考えることができる。

固定パターン雑音の原因になっている活性化エネルギー $E_g/2$ の暗電流成分が、上記(1)シリコン/酸化膜界面のトラップ準位/欠陥準位、および(2)蓄積ダイオードの空乏層で発生する発生・再結合電流と考えて、この 2 つを抑圧できる駆動方法と、暗電流の発生を抑圧できるセル構造の検討を行った²²⁾。前者は、信号電荷蓄積期間中に蓄積ダイオード周り、および垂直 CCD 部分の表面にホール蓄積層を形成するために、蓄積動作時の転送電極電圧を負電圧にすることである。後者は、蓄積ダイオード周辺をチャネルストップ

図 11 ホール蓄積動作時の固定パターン雑音の印加電圧依存性

Dependence of the fixed pattern noise on the applied voltage on the hole accumulation operation.

の p^+ 層で囲み、蓄積ダイオード周辺の空乏層の広がりを防いでいることに特徴がある。この動作は、スタック CCD センサが FIT 構成のために可能である。

図 11 に固定パターン雑音の転送電極印加電圧依存性を示す。図中の d はチャンネルストップ領域と蓄積ダイオード領域のマスク上での距離である。印加電圧が負電圧ほど、また蓄積ダイオードとチャンネルストップ領域の距離 d が近いほど、固定パターン雑音を抑圧できる。図より 60°C において、 $d=0.3\mu\text{m}$ 、蓄積動作時の印加電圧 -3V において、固定パターン雑音 19 電子 p-p まで低減できる。さらに蓄積動作時の印加電圧を -5V にすることによって、10 電子 p-p まで抑圧可能である。 $d=0\mu\text{m}$ すると逆に FPN が増加する。これは蓄積ダイオード領域の高濃度 n^+ 層と、チャンネルストップ領域の p^+ 層の間で大きな接合リーク電流が発生しているものと考えられる。つまり 3.2 節で議論した画素で発生するランダム雑音の抑圧とともに、暗電流に起因する画素の固定パターン雑音も、駆動方法の改善により低減することができた。

これまで議論してきたように、セルのランダム雑音を抑圧する小信号リセット動作 (SSR 動作) と、同じくセルの固定パターン雑音を抑圧する暗電流抑圧動作を用いることにより、ハイビジョン対応のスタック CCD カラーカメラの S/N を 54 dB (F 8, 2000 lx) にすることができた。

4. む す び

2/3 インチ 200 万画素スタック CCD カラーカメラ

を開発し、その最大の特徴である高ダイナミックレンジ化について 3 つの新しい技術を提案し、理論的な解析と実験結果により、それら技術のハイビジョンカラーカメラにおける有効性を示した。

高ダイナミックレンジ化を行った結果、ニー一点近傍の固定雑音を増加させずに、ハイビジョンカラーカメラとしては最高性能の 90 dB のダイナミックレンジを達成した。また画素で発生するランダム雑音と、暗電流起因の固定パターン雑音を抑圧することによって、F 8, 2000 lx において 54 dB の S/N を達成することができた。

しかし、さらに高い S/N を達成するためには、画素で発生するランダム雑音を今以上に抑圧するセル構造を提案していかなければならず、将来的にはランダム雑音が発生しないセンサにしていくことが重要である。また SN 比の改善とともに特性上重要なのが画像の質感である。STACK-CCD センサの特徴である画像の質感の良さと、長時間残る残像との関係など、魅力ある画質を作る上で明らかになっていない問題点も多い。今後、これらの課題を明らかにし、撮像素子としての能力を高めていく予定である。

本研究の機会と多くのご指導をいただきました、当社研究開発センター ULSI 研究所の真鍋ラボラトリー・リーダーに感謝いたします。ニー動作に関して有益な議論をいただきました、当社マルチメディア技術研究所の大井グループ長、藤谷研究員に感謝いたします。また、ランダム雑音の解析について有益なご助言をいただきました、当社マルチメディア技術研究所の杉本主務に感謝いたします。

最後に、スタック CCD センサの研究・開発を共に行っている ULSI 研究所研究第 1 担当のメンバー、および ULSI 研究試作部の方々に感謝いたします。

【参 考 文 献】

- 1) K. Harada, et al.: ISSCC Digest of Technical Papers, pp. 170-171 (Feb. 1992)
- 2) Albert J. P. Theuvsissen, et al.: IEEE T-ED, **40**, 9 (Sep. 1993)
- 3) Y. Toyoda, et al.: ISSCC Digest of Technical Papers, pp. 220-221 (1994)
- 4) M. Morimoto, et al.: ISSCC Digest of Technical Papers, pp. 222-223 (1994)
- 5) H. Yamashita, et al.: ISSCC Digest of Technical Papers, pp. 224-225 (1994)
- 6) H. Yamashita, et al.: IEEE J-SSC, pp. 881-889, **30**, 8 (Aug. 1995)
- 7) 飯田ほか: 信学技報, ICD 94-92, pp. 57-64 (1994)
- 8) T. Kuroda, et al.: ISSCC Digest of Technical Papers, pp. 184-185 (1996)
- 9) 宮原ほか: “広ダイナミックレンジ CMD イメージセンサ”, テレビ年次大, pp. 15-16 (1996)

- 10) 佐藤ほか: “電子シャッタによる広ダイナミックレンジ 3 CCD カラーカメラ”, テレビ年次大, pp. 19-20 (1996)
- 11) Y. Endo, et al.: IEEE T-ED, **32**, 8, pp. 1511-1513 (Aug. 1985)
- 12) N. Nakamura, et al.: IEEE T-ED, **41**, 12, pp. 2291-2296 (Dec. 1994)
- 13) 大保ほか: “高解像度 CCD カメラに適した雑音除去方法の検討”, テレビ学技報, **13**, 11, pp. 7-12, TEBS (1989)
- 14) 西田ほか: “積分型相関 2 重サンプリング法による CCD 撮像素子の低雑音化”, 昭 60 信学総全大, 1330 (1985)
- 15) 遠藤ほか: “2/3 インチ 200 万画素スタック CCD を用いた 3 板式カラー化の検討”, テレビ学技報, **18**, 29, pp. 7-12, IPU 94-23 (1994)
- 16) 松長: “スタック CCD の雑音解析”, テレビ学技報, **20**, 1, pp. 13-18, IPU 96-3 (1996)
- 17) 中村ほか: “不完全転送型フォトダイオードのランダムノイズの低減”, テレビ学技報, **20**, 23, pp. 25-30, IPU 96-13 (1996)
- 18) S. M. Sze: “Physics of Semiconductor Devices”, 2nd ed., New York, Wiley
- 19) J. E. Carnes, et al.: RCA Rev., **33**, pp. 327-343 (1972)
- 20) N. Nohmi, et al.: “Capacitive Lag-Free CCD Imager Overlaid with an Amorphous Silicon Photoconversion Layer”, Extended Abstracts of the 22nd (1990 International) Conference on Solid State Devices and Materials, Sendai, pp. 713-716 (1990)
- 21) 江川ほか: “2/3 インチ 200 万画素スタック CCD 実験カラーカメラ”, テレビ年次大, pp. 443-444 (1994)
- 22) 石村ほか: “2/3 インチ 200 万画素スタック CCD の固定パターン雑音の低減”, テレビ年次大, pp. 83-84 (1994)
- 23) 宮川ほか: “スタック CCD センサの固定パターン雑音の低減”, テレビ学技報, **16**, 75, pp. 13-18, IPU 92-52 (1992)

付 録

画素からの信号電荷の読出し動作時に発生するランダム雑音 N_1 は, 次式のように与えられる.

$$N_1 = \sqrt{\left\{ \int G(\phi_{SD}) \times \text{Var}(\phi_{SD}) d\phi_{SD} \right\}} \\ = \sqrt{\left\{ \int_{\phi_{SD3}-\delta\phi_{SD}}^{\phi_{SD3}} G(\phi_{SD}) \times \text{Var}(\phi_{SD}) d\phi_{SD} \right\}} \quad (\text{付} \cdot 1)$$

$$= \sqrt{\left\{ \int_{\phi_{SD3}-\delta\phi_{SD}}^{\phi_{SD3}} (C_{SD}/q) \times F(\phi_{SD}) \times [1 - F(\phi_{SD})] d\phi_{SD} \right\}} \\ = \sqrt{\left\{ (C_{SD}/q) \times \int_{\phi_{SD3}-\delta\phi_{SD}}^{\phi_{SD3}} [\exp(-\beta \times (\phi_{SD} - \phi_{SD3}))] \right.} \\ \left. / [1 + \exp(-\beta \times (\phi_{SD} - \phi_{SD3}))]^2 d\phi_{SD} \right\}} \quad (\text{付} \cdot 2)$$

$$= (1/q) \times \sqrt{\left\{ k \times T \times C_{SD} \times [(1/2) - (1/(1 + \exp(\beta \times \delta\phi_{SD})))] \right\}} \quad (\text{付} \cdot 3)$$

もし信号電荷量 $\delta\phi_{SD}$ が大きくなると, ランダム雑音 N_2 は, 次式のように簡略化される.

$$N_2 = (1/q) \times \sqrt{\{k \times T \times C_{SD}/2\}} \quad (\delta\phi_{SD} \rightarrow \infty) \quad (\text{付} \cdot 4)$$

(付・4)式は従来から知られているリセット雑音の

$1/\sqrt{2}$ 倍である¹⁹⁾. つまり, 図 7 のようなリセット動作の方法により, ランダム雑音の大きさを小さくすることができる.

スタック CCD センサは, 信号蓄積前に容量性残像を抑圧する目的で電荷の注入・リセット動作を行う. そのため, リセット動作時と信号読出し動作時の 2 回, ランダム雑音が発生することになる. これは, リセット動作時は(付・4)式で与えられるランダム雑音が, 信号電荷読出し時は(付・3)式で与えられるランダム雑音が, 信号電荷量とともに読出されることにほかならない. このように画素で生じるランダム雑音のメカニズムは, 画素に存在する信号電子の熱的な分布(フェルミ・ディラック分布関数)によって, ひき起こされていることがわかった.

なかむら のぶ
中村 信男 1989 年, 豊橋技術科学大学大学院電気電子工学系修了. 1990 年, (株)東芝に入社. 以来, 研究開発センター ULSI 研究所において, 固体撮像素子の設計・評価を中心とした研究開発に従事. 正会員.

さかぐち なつみ
坂口 夏絵 1993 年, 早稲田大学理工学部電子通信学科卒業. 同年, (株)東芝に入社. マルチメディア技術研究所にて業務用カメラの開発に従事. 現在, 研究開発センターにて, 固体撮像素子の研究開発に従事. 正会員.

えがわ よしたか
江川 佳孝 1978 年, 佐賀県立唐津工業高等学校電気科卒業. 同年, (株)東芝に入社. 1979 年より, 固体撮像素子の研究開発に従事し, 現在に至る. 現在, 研究開発センター ULSI 研究所に所属. 正会員.

おおさわ しんじ
大澤 慎治 1984 年, 電気通信大学電子工学科卒業. 1986 年, 同大学大学院修士課程修了. 同年, (株)東芝に入社. ULSI 研究所において, 固体撮像デバイスの研究開発に従事. 正会員.

えんどう ゆきお
遠藤 幸雄 1968 年, 県立川崎工業高等学校卒業. 1963 年, (株)東芝に入社. 研究開発センター ULSI 研究所に勤務し, 現在に至る. 撮像管の応用研究を経て, 固体撮像素子の研究開発に従事. 正会員.

まつなが よしゆき
松長 誠之 1979 年, 東京大学工学部電子工学科修士課程修了. 同年, (株)東芝に入社. 以来, 固体撮像素子の研究・開発に従事し, 現在に至る. 現在, 研究開発センター ULSI 研究所に所属. 正会員.