512×486 画素 CCD イメージセンサー

松下電子工業株式会社 半導体研究所 堀 居 賢 樹

512×486 画素を持つ CCD イメージセンサーを試作した。ポリ Si・ポリ Si 重ね合せ電極構成を基本とし、フレームトランスファー撮像が可能な構成になっている。界面準位、結晶欠陥の低減のためのプロセスと動作方法に新たな工夫を取り入れることにより白傷の少ない良質の画像が得られ、350 本以上の解像度が実現した。ここでは素子の概要とその特性について述べる。

1. ま え が き

新しい機能素子である Charge Coupled Devices¹⁾ (CCD) の固体撮像素子への応用²⁾ が提案されて以来、解像度の高い画像を得るため、画素数の増加が飛躍的になされてきた。現在一部のもの³⁾⁴⁾ を除いてほとんどが垂直方向 480～520 画素、水平方向 320～380 画素にとどまっている。垂直方向の画素数は実質、画像の走査線数が上限となるため十分な画素数となっている。しかし水平方向については、画素数が不足しているため解像度が低く、実用レベルの解像度の達成が困難な状況である。白黒カメラで、実用レベルの解像度を得るには少なくとも水平方向 450 画素程度必要³⁾ と考えられる。このことはカラーカメラについても同様である。画素数を増すことは、素子の大面積化、高集積化を意味し、プロセス技術の大幅な開発がなければ困難な問題である。

われわれは以前に 312×208 画素をもつ CCD イメージセンサー⁵⁾ を作成した。この結果は、さらに大画素数のイメージセンサー実現には、界面準位の低減、結晶欠陥の低減、フォトリソグラフィーの無欠陥化等、多くの問題を示唆していた。このため今回、この種のプロセス上の問題についての解析を進め、実用上必要とされる 500×500 画素程度のイメージセンサーのもつプロセス上、特性上の問題点を探る目的で、水平方向の画素数 486 をもつ、標準テレビ (NTSC) 方式に適合した素子を作成した。撮像素子の重要要素である画像欠陥は、プロセス上の改善だけでなく動作方法にも改良が必要であることを考え、新しい方法を試みた。

本文では、素子の構成、製作方法、動作方法、特性の概略を述べ、個別の詳細な議論は紙面の都合上別の機会

にする。

2. 素子の構成

試作素子は、図 1 に示すようなフレームトランスファー方式²⁾ CCD 撮像素子で、受光部、蓄積部、読出しレジスター部、出力検知部から構成されている。受光部と蓄積部はそれぞれ同数の 256×486 セルからなり、水平方向については、垂直方向に走るチャンネルストッパーにより互いに区切られている。垂直方向には 4 つの独立な転送電極が、受光部については 36μm、蓄積部については 28μm のピッチで並んでいる。受光部の寸法は、9.216×11.664 mm² で、1 インチビジコン光学系が使用できるようにになっている。

NTSC 方式の 1 水平走査の有効期間 (～52.7μs) に 486 画素を読出すためには、水平読出し周波数は 9.18 MHz になり、きわめて高い周波数となる。このため読

図 1 素子の構成

Block diagram of the sensor.

"512×486 Cells CCD Image Sensor" by Kenju Horii (Semiconductor Research Laboratory, Matsushita Electronics Corp., Osaka)

出しレジスタ部は埋め込みチャンネル化された CCD⁶⁾ になっている。

読出しレジスタ部に隣接して Floating Diffusion Amp. (FDA) タイプの出力検知部が設けられている。さらに読出しレジスタと並列に 2 ビットの、読出しレジスタと同構造の、ノイズ消去用レジスタがあり、これに隣接して、信号用 FDA 回路と同構造のノイズ消去用の FDA 回路が設けられている。信号用 FDA 回路とノイズ消去用 FDA 回路からの出力は外部で差動増幅を行って、転送駆動に伴うクロックノイズを除去するようになっている。

受光部の周辺は、受光電荷蓄積時、受光部周辺から入る光擬似信号を除去するため、擬似信号集積チャンネルを設け、蓄積部、読出しレジスタを通して掃き出されるようになっている。

3. 素子の構造と製作方法

本素子の構造は、ポリ Si・ポリ Si 2 層重ね合せ電極構造の 4 相駆動 CCD からなっている。

受光部と蓄積部は N チャンネル表面型 CCD であり、読出しレジスタ部は埋め込みチャンネル型 CCD である。

図 2 に受光部の断面構造を示す。1 セルは 4 つの転送

図 2 素子の断面構造

Cross section of the imaging area.

写真 1 チップの全体写真

Outerview of a CCD chip.

電極により形成され、転送方向に転送電極幅 $10\mu\text{m}$ 、ギャップ $8\mu\text{m}$ と、転送電極幅 $12\mu\text{m}$ 、ギャップ $6\mu\text{m}$ のポリ Si 電極が重ね合せ $2\mu\text{m}$ で形成されている。

Si 基板は、比抵抗 $8\sim 12\Omega\text{cm}$ の p 型 (100) 面結晶を用いた。読出しレジスタ部の埋め込み層の形成は、 $1.5\times 10^{12}\text{cm}^{-2}$ の磷を 70keV でイオン打込みすることにより行った。受光部、蓄積部のポリ Si 電極長は 9.3mm 近くにもなるため、転送クロックの印加端から離れたところの波形の崩れ、遅れを防ぐため、ポリ Si 抵抗をできるだけ低くする必要がある。ポリ Si 転送電極の膜厚を増すことは、短波長感度を低くするため、ポリ Si 転送電極のシート抵抗を $20\sim 30\Omega/\square$ と低く選んだ。また今回特に、酸化、アニール、ゲッタリングプロセスと画像の白さずの原因である積層欠陥との関係を調べ、解析を加え、最良の条件を選んだ。また界面準位についても同様の考慮をした。

写真 1 は試作素子のチップ写真である。チップサイズ、横 13.7mm 、縦 17.8mm で 42 ピンのパッケージにマウントされる。

4. 素子の動作

受光部から蓄積部への信号電荷のフレームトランスファ中にも、受光部は光が照射されている。このため信号電荷中に光擬似信号が混入する。受光部から蓄積部への転送は、できるだけ短い時間に行うのが望ましい。本素子においては、転送周波数 500kHz においてなお転送劣化をまねくことなく転送できることを確認し、 500kHz を転送周波数として選んだ。

図 3 は受光部、蓄積部の駆動パルス電圧を同じ値に変化させ、このパルス電圧依存性を暗電流、転送損失につ

図 3 暗電流と転送損失の駆動パルス依存性

Dark current output and transfer inefficiency as a function of the driving pulse amplitude.

写真2 受光部転送クロック (a) と蓄積部転送クロック (b) (電荷転送電圧 15V, 電荷蓄積電圧 10V)

(a): transfer clocks of the imaging area, (b): transfer clocks of the storage area.

いて測定したものである。この図からわかるように、暗電流は駆動パルス電圧の増加とともに増す傾向をもち、転送損失は逆に低下する傾向をもっている。このように転送損失と暗電流は駆動パルス電圧に対して相反する依存性を示す。一方、受光部、蓄積部の駆動パルスに注目すると、これらは電荷を転送するクロックパルス（電荷転送電圧）と電荷を集積（蓄積）するパルス（電荷蓄積電圧）からなっている。図3の転送損失に影響するのは主として電荷転送電圧であり、暗電流に影響するのは主として電荷蓄積電圧であることが推論できる。そのため素子の駆動は、電荷転送電圧と電荷蓄積電圧を独立にし、電荷転送電圧を大きく、電荷蓄積電圧を低くする駆動を行った。

受光部については、前述の駆動方法に加えて accumulation 駆動⁷⁾ を行って縦方向のブルーミングを押えるようにした。写真2は前述の駆動を行ったときの受光部、蓄積部のクロック写真である。

5. 基本特性

5.1 転送特性

転送効率は再生画像の質に大きく影響する。本素子においては、特に水平方向の画素数が多いため、読出し周波数が 9.2 MHz 近くになる。

図4は、読出しレジスタ部の転送損失の周波数依存性である。10 MHz においてなお $6 \times 10^{-5}/\text{gate}$ の低い転送損失を示している。そのため、9.2 MHz の周波数による読出しの転送劣化は小さく、画像への影響はきわめて小さいと考えられる。

図4 読出し部 CCD の周波数依存性

Transfer inefficiency as a function of clock frequency for a readout register CCD.

図5 光電変換特性

Typical transfer characteristic.

垂直方向の転送損失はバイアス電荷を飽和電荷量の 10% 与え、電荷転送電圧を 15V にしたとき $1.0 \times 10^{-4}/\text{gate}$ であった。

5.2 暗電流

暗電流は再生画像のダイナミックレンジや画像のきずに関係するため、とりわけ重要である。

暗電流としては、デバイス全体にわたって現われるものと、局在して観測されるものがある。いままでの測定結果からは2種類の暗電流とも第1層ポリ Si 電極下で少なく、第2層ポリ Si 電極下で多い値を示している。

図3に受光部、蓄積部の駆動パルス電圧を変化したときの平均暗電流の依存性を示している。パルス電圧 7 V あたりから暗電流がふえ出すのは、チャンネルストッパーの一部が空乏化を始めるためである。試作した素子の平均暗電流値は $2 \sim 5 \text{ nA}/\text{cm}^2$ であった。

写真 3 信号出力

(a) 水平方向 (b) 垂直方向
Output signal. (a) horizontal, (b) vertical.

5.3 光電変換特性

図 5 は試作素子の光電変換特性である。光源は 2856K のタングステン標準電球を用いている。最大信号レベルをブルーミングを始める値にとると、ダイナミックレンジは 370 倍であった。この範囲内で $\gamma=1$ であった。写真 3 は素子に一樣な光を照射したときの垂直・水平方向の出力波形を示す。出力波形は飽和光量の 50% の入射光であり、このときの出力信号のばらつきは、水平方向において 5%，垂直方向において 6% であった。

5.4 解像度

受光部においては 256×486 個のセルが 2 次元的に有限な開口をもって周期的に配列されている。このような周期的な感度分布をもつ撮像素子においては、決まった限界解像度をもっている。水平方向の限界解像度は各セルに白黒光学パターンが対応するナイキスト限界 (486 本/H) である。これ以上の解像度光学パターンは、光学パターンの空間サンプリング周波数に対する下側波帯の低周波成分が現れるため偽解像となる。垂直方向の限界解像度は受光部の電荷蓄積電極を、フィールドごとに 1/2 セル分だけ変えることにより 1 フレームにおける空間サンプリング周波数が 2 倍となって、みかけ上 512 絵素に相当した解像度となる。

撮像素子の解像度は照射された白黒パターンの空間周波数に対する出力信号の大きさとして表わされる。すなわち MTF (Modulation Transfer Function) 特性といわれている。

CCD イメージセンサーの MTF 特性は、(1) 前述の、絵素が有限な開口を持ちモザイク状に配列されてい

(a) 水平方向

(b) 垂直方向

図 6 MTF 特性

Typical MTF characteristics.

(a) horizontal, (b) vertical.

ること⁸⁾, (2) 転送効率が 100% でないこと⁹⁾, (3) 基板内で発生した信号電荷の横方向拡散⁸⁾, により決定される。

絵素が有限な開口をもつことによる MTF 特性は、光学パターンの正規化空間周波数を f/f_m としたとき、

$$(MTF)_{\text{integ}} = \frac{\sin \pi f/f_m}{\pi f/f_m} \quad (1)$$

で与えられる⁸⁾。前述したように、水平方向については $f/f_m=0.5$ 、垂直方向については $f/f_m=1.0$ までしかとれない。

転送効率劣化による MTF 特性は、転送セル数を N 、転送損失を ε としたとき、

$$(MTF)_{\text{trans}} = \exp[-N\varepsilon(1 - \cos \pi f/f_m)] \quad (2)$$

で与えられる⁹⁾。

電荷の拡散による MTF 特性の劣化は、転送電極側から光学パターンを照射する構造で可視光照射の場合は無視できる¹⁰⁾。

その他の解像度の劣化として、光学系による OTF がある。結局総合 MTF 特性は、

$$\text{MTF} = (\text{OTF})(\text{MTF})_{\text{integ}}(\text{MTF})_{\text{trans}} \quad (3)$$

で与えられる。

図6は水平・垂直方向 MTF の特性である。測定は白レベル出力電圧が飽和出力の半分のところで行った。光源としては白色蛍光灯を使用した。また測定は受光部の中心付近を選んで行った。(a)は水平方向の MTF 特性である。ナイキスト限界で ~ 0.35 であることがわかる。図中の理論曲線は正弦的に濃度変化している光学パターンを図に示したような台形状の感度分布をもった素子に照射した場合の $(\text{MTF})_{\text{integ}}(\text{MTF})_{\text{trans}}$ を書いたものである。

(b)図は垂直方向の MTF 特性である。測定は白黒パターンを用い、インターレース撮像信号⁹⁾の2フィールド分をオシロスコープで合成して観測した。水平方向に比較して急激な低下を示している。この原因は、垂直方向の転送は表面型 CCD であるため水平方向にくらべて転送効率が低く、転送劣化の影響が大きいこと、および図中に示すように垂直方向の感度分布が水平方向にくらべて幅広く広がっているためと考えられる。

測定値と理論曲線の大きな違いは(3)式の (OTF) を考慮していないためと考えられる。このことは光受系によって MTF 特性が著しく変化をうけることを示唆している。

5.5 分光感度特性

図7は分光感度特性の一例である。SiO₂-polySi-Si 層

図7 分光感度特性

Typical spectral response characteristic.

による多重干渉の構造が現れている。感度は可視域から 1.1μm まで認められるが短波長側が非常に悪い。これはポリ Si 電極を透過した光を用いるためである。本論文は分光感度特性の向上については意図していないが、受光部を 10~20μm に薄片化し、裏側から光を取り入れる⁴⁾方法や、第2層ポリ Si 電極の代りに金属酸化膜電極を使用する¹¹⁾方法等により、比較的容易に Si ビジコン程度の分光特性が得られると考えられる。

5.6 撮像特性

本撮像素子の受光部の画素数は 512(V)×486(H) であるが、画像の縦横比が 3:4 であるため、モニター画面には 484(V)×484(H) のみが現れる。各フィールドでは 242(V)×484(H) セルで信号電荷の集積が行われる。垂直方向についてはインターレース撮像⁹⁾が行われる。

画像に現れる欠陥は、大別してフォトリソグラフィーによるもの、膜質によるもの、結晶によるものに分けられる。本試作素子においては、フォトリソグラフィーによるものや膜質によるもの画像欠陥はプロセス環境の無塵化の向上、フォトマスクのパターンの完全化、無欠陥化を図って、きわめて少ない状態にした。結晶に起因した画像欠陥は白点、白線となって現れ、印加電圧に依存し大幅に変化する。本試作素子では前述したように、画像欠陥の原因である積層欠陥低減プロセスと、電荷転送電圧を高く、蓄積電圧を低く設定する動作方法で大幅な改善をみた。

写真4(a)は従来プロセス⁵⁾で作成した素子について、転送電圧と蓄積電圧が同じ場合、(b)は同じ素子で新しい動作方法により撮像した例である。白点、白線と

写真4 駆動方法の差異による画像

(a) 従来駆動 (b) 本動作駆動

Images due to a difference of driving mode.

(a) ordinary mode, (b) new mode.

写真 5 解像度パターン撮像例
Image of a resolution pattern.

写真 6 撮 像 例
Illustration of a image.

も著しく少なくなっていることがわかる。

写真 5 は RETMA チャートの撮像例である。水平解像度の限界はナイキスト限界に対応する $484 \times 3/4$ TV 本である。垂直方向の限界像度はケル定数を掛けた 484×0.75 TV 本である。撮像例において、水平解像度は限界解像度 363 本を越え 400 本まで解像できているかに見

えるが、これは擬信号が出ているためである。撮像写真の在右において解像度はほとんど変っていない。これは 9.2 MHz での転送損失が小さいため水平解像度にほとんど影響していないことを示す。

垂直解像度は 350 TV 本あたりでエッジがぼけてきている。垂直方向についてはインターレース駆動による 2

写真 7 3 CCD カラーカメラによる撮像例
Illustration of a image using 3 CCD color camera.

フィールド間の電荷集積セルの感度分布の重なりが大き
く、擬信号は押えられて観測されない。撮像写真の上下
において、垂直解像度が下の方において幾分悪いのは、
垂直方向の転送効率が影響しているためであると思われ
る。

写真6は画像欠陥のほとんどない素子の撮像例であ
り、写真7は3CCDを用いたカラー撮像例である。写
真から、きわめて良好な画質であることがわかる。

6. む す び

今回、NTSC方式に適合した512(V)×486(H)画素
CCDイメージセンサーを試作した。構造、方式として
はポリSi・ポリSi重ね合せ電極構造を用い、フレーム
トランスファー方式を採用した。界面単位、結晶欠陥と
酸化、アニール、ゲッタリングプロセスとの関係を的確
に握むこと、およびフォトリソグラフィの完全化を行
うことで大面積・大画素数素子も良質な画像が得られ
ることがわかった。電荷転送時の光擬似信号を押えるた
め、フレームトランスファー周波数を高くし、白点、白
傷の画像欠陥を押える方法も良質な画像を得るためにき
わめて有効であることがわかった。解像度としては水平
方向360本、垂直方向350本の実用レベルを達成した。

最後に、本研究を進めるにあたり、日頃御指導いた
だいている当研究所 水野所長、東京研究所 小林所長、撮

像、測定関係で協力いただいた当研究所 国井部長、松
下電産(株)照明研究所 西山室長はじめ関係各位に感謝
致します。

(昭和54年2月3日 受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) W. S. Boyle & G. E. Smith: Charge Coupled Semi-conductor Devices, BSTJ, **49**, 4 (1970) 587
- 2) M. F. Tompsett, et al: Charge Coupled Imaging Devices, IEEE Trans., **ED-18**, 11 (1971) 992
- 3) C. H. Séquin, et al: All-Solid-State Camera for the 525-Line Television Format, IEEE Jour. SSC, **SC-11**, 1 (1976) 115
- 4) M. M. Blouke, et al: Three Phase, Backside Illuminated 500×500 CCD Imager, ISSCC Dig. Tech. Papers (1978) 36
- 5) 堀居ほか: 312×208 画素 CCD イメージセンサ, 信学会電子デバイス資料, ED 77-1 (1977)
- 6) R. H. Walden, et al: The Buried Channel Charge Coupled Device, BSTJ, **51**, 7 (1972) 1635
- 7) W. F. Kosonocky, et al: Control of Blooming in Charge Coupled Imagers, RCA Rev., **35**, 1 (1974) 3
- 8) D. F. Barbe: Imaging Devices Using the Charge Coupled Concept, Proc. IEEE, **63**, 1 (1975) 38
- 9) C. H. Séquin: Interlacing in Charge-Coupled Imaging Devices, IEEE Trans., **ED-20**, 6 (1973) 535
- 10) D. H. Seib: Carrier Diffusion Degradation of Modulation Transfer Function in Charge Coupled Imagers, IEEE Trans., **ED-21**, 3 (1974) 210
- 11) D. M. Brown, et al: High Density CID Imagers, IEEE Trans., **ED-25**, 2 (1978) 79

テレビジョン学会誌8月号予定目次

【ふぉーかす】	海外技術協力に想う.....	NHK	高橋 良
【技術解説】	教育における画像応用.....	千葉大	小郷 寛・加藤徳治
	印刷技術と画像エレクトロニクス.....	凸版印刷	小松信幸
【研究動向】	光メモリー.....	電総研	三橋慶喜
【新技術のページ】	中波空中線構造の新しい工夫.....	NHK	菅野京七
【論文・資料】	複数ゴースト妨害の主観評価に関する定量化の一考察.....	NHK	山崎 滋
	FM放送のマルチパスひずみと受信品質.....	NHK	大原光雄
【講座】	半導体応用回路		
	(第3回) IC 応用回路 (I)	東芝	山田尚志・佐々木実・宮代文夫
【現場だより】	東京大学生産技術研究所多次元画像処理センター.....	東大	尾上守夫
【会議レポート】	第3回 EMC シンポジウム	NHK	黒沼 弘
	CISPR (国際無線障害特別委員会) ハーグ会議.....	農工大	袁妻二三雄・NHK 黒沼 弘

A Three-chip CCD Color Camera

*by Seisuke Yamanaka, Hiroshi Yamazaki, Takeo Hashimoto,
Motoaki Abe, Shigeyuki Ochi*

A color television camera with a resolution high enough for practical use employing three interline-transfer CCD imagers is proposed.

In the imagers, buried channel shift registers and overflow drains are employed which suppress the blooming phenomenon and realize higher transfer efficiency than surface channel shift registers.

Transparent photosensing SnO_2 electrodes rather than the conventional poly-silicon electrodes are applied to the imagers to achieve higher blue sensitivity.

Instead of the frame integration mode, the field integration mode of the interline-transfer CCD is used to suppress undesirable equivalent signal lag caused by the temporal and spatial functions of the CCD.

In order to realize high resolution, a specially offset imaging technique is introduced, and the corresponding mechanical and electrical compensation techniques for misregistration between the three CCD's are discussed.

The horizontal resolution of 280 TV lines and the SNR of close to 40 dB are achieved for a scene illumination of 700 lx at F:2.0.

J. Inst. Engrs. of Japan, Vol. 33, No. 7 (1979) 516~522

512×486 Cell CCD Image Sensor

by Kenju Horii

A charge-coupled area image sensor of the frame transfer type has been fabricated using four-phase two-level polysilicon electrode structure.

The device has 512 vertically interlaced rows and 486 resolution cells per line.

Although the fabrication technique has not advanced yet to produce defect-free devices, high quality images with few white defects are produced by introducing new driving modes.

The measured resolution limits show more than 350 TV line pairs horizontally as well as vertically.

J. Inst. Engrs. of Japan, Vol. 33, No. 7 (1979) 523~529

An Experimental Research of a Single CCD Color Camera Using a Single CCD by Sensor

by Masanobu Morishita, Takanori Tanaka

A new color television camera employing a single interline-transfer CCD image sensor with a color filter array has been developed experimentally.

This CCD image sensor has 490 Vertical×384 Horizontal picture elements.

This paper describes the color camera system configuration, color filter geometry, and the method of color signal separation, and it is concluded with the result of image pickup experiment that a single-chip CCD color camera has a bright future as a consumer product.

J. Inst. Engrs. of Japan, Vol. 33, No. 7 (1979) 530~535