CMD 撮 像 素 子

—高解像度化への取り組み—

正会員 中 村 力[†], 正会員 松 本 一 哉[†], 野 本 哲 夫[†]

A CMD Image Sensor

—An Approach to High-Resolution Imaging—

Tsutomu Nakamura[†], Kazuya Matsumoto[†] and Tetsuo Nomoto[†]

Abstracts This paper introduces examples of CMD high-resolution cameras and analyzes the factors that limit the performance of CMD and other imagers. The necessary conditions for achieving higher resolution are explained. Making the quantum efficiency near unity is the one and only method to improve the optical performance. In electronics, the main subjects are noise suppression and power saving. It is concluded that CMDs and some APSs (Active Pixel Sensors) are superior to the CCD family from the viewpoint of wide bandwidth and low power consumption.

1. ま え が き

近年, BTA S-001 の規格¹⁾ を満足するハイビジョン用 Charge-Coupled Device (CCD) 型固体撮像素子^{2)~5)} が開発された. ハイビジョン用撮像素子では約 200 万個の画素数と, 74.25 MHz の高速な信号レートが要求される. 画素数の増加は (1 画素の受光部の面積)/(信号転送路の面積) の比を低下させ, スメア抑圧能力の低下を招く. さらに信号レートの上昇により消費電力が増大する. 例えば, ハイビジョン用 IT-CCD および, スメア抑圧能力の上昇が可能な FIT-CCD の消費電力は, それぞれ 0.49 W および 2.21 W と報告されている²⁾. 消費電力の増大により, 素子の温度が上昇し, 暗電流が増加するため, ペルチェ素子等を用いてセンサを冷却する方法が採用された³⁾ が, その結果, カメラ全体での消費電力はさらに増大する.

一方, 我々は, 増幅型撮像素子 (Active Pixel Sensors) の一種である, CMD 撮像素子⁶⁾⁷⁾ が, 低消費電力, 高速駆動の容易性等により, 高解像度撮像の分野において有望であると考えて開発を進めてきた. 最近では, CMD 撮像素子を用いたハイビジョンカメラ⁸⁾ や高速カメラ⁹⁾ が市場に出はじめた.

高解像度撮像においては, 従来の撮像領域では大きな問題とならなかった点が解決すべき問題として顕在化してくる. しかし, これまでこれらの問題が系統的に取り扱われた例はなかった.

本論文では, 2 章で CMD の動作原理を説明した後, 3 章にて固体撮像装置を用いて高解像度撮像を行う際に問題となる点を, 光学的側面と電氣的側面より明らかにし, 今後の開発の指針を示す. 4 章では, これまで開発を行ってきた CMD 撮像素子とそれを用いたカメラを紹介し, CMD 撮像素子の課題と高解像撮像分野における CMD 撮像素子の優位性を示す.

キーワード: 画像入力, 固体撮像素子, CMD,

1995 年 5 月 26 日テレビジョン学会情報入力研究会で発表

1995 年 8 月 7 日受付, 1995 年 12 月 11 日最終受付

[†] オリンパス光学工業株式会社 応用研究部 (〒 399-04 長野県上伊那郡辰野町伊那富 666, TEL 0266-41-4135)

[†] Applied Research Dept., Olympus Optical Co., Ltd. (Tatsuno, Nagano, 399-04, Japan)

2. CMD の動作原理

本章では CMD の動作原理を説明した後、CCD 撮像素子と比較した CMD 撮像素子の特徴を述べる。

CMD 撮像素子の 1 画素はフォトトランジスタである CMD で構成される。この画素構造を図 1 に示す。図中の同心円状のゲート部が MOS フォトダイオードを兼ねる。また、p-基板は縦型オーバフロー dren としても作用する。さらにゲート外周部のドレインがドレイン電極と画素分離領域とを兼ねるため、画素寸法の縮小が容易となる。CMD の断面構造は MOS-FET に類似しており、CMOS-FET との製造工程の整合性に優れている。ただし、nMOS-FET が P-WELL 中に形成されるのに対して、CMD は n-層/p-基板中に形成される。光発生正孔はゲート電極下の Si/SiO₂ 界面に蓄積される。この蓄積される正孔量により信号となる CMD のチャンネル電流が変調される。このチャンネル電流は、ソースからドレインに向かって N-バルク中を流れるチャンネル電子によってもたらされる。MOS 界面に蓄積された正孔に対して、このチャンネル電子電流は空間的に異なった領域を流れるため、非破壊信号読出し動作が可能となる。

図 2 に CMD 撮像素子の回路構成を示す。各列の CMD のソース部は垂直方向のソース線に共通につながる。このソース線は、水平走査回路で駆動される MOS スイッチを介して、ビデオラインにつながっている。各行の CMD のゲート部は、共通に水平方向のゲートラインにつながっている。垂直走査回路から各ゲートラインに印加されるパルスにより、各行の CMD は読出し動作やリセット動作状態に制御される。以上、説明したように、CMD 撮像素子の画素選択は X-Y アドレス方式で行われる。

通常の CCD¹⁰⁾¹¹⁾ と比べた場合の CMD 撮像素子の特徴は以下の通りである。

- (1) 1 画素は 1 個のフォトトランジスタ：CMD で構成される。
- (2) CMD のすべての動作は、電界によるドリフト機構で行われる。
- (3) X-Y アドレス方式のセンサ構成であり水平・垂直走査回路は CMOS-FET で形成される。

図 1 を用いて説明した CMD の画素構造とその動作に起因する (1) の特徴により、CMD 撮像素子は画素寸法の縮小、すなわちセンサの高解像度化が容易となる。また、画素部において信号を増幅するため、優れたスミア抑圧特性が得られる⁹⁾。さらに (2) にまとめ

図 1 CMD 画素構造図
Pixel structure of the CMD imager.

図 2 CMD 撮像素子構成図
Block diagram of the CMD imager.

た CMD の動作機構および MOS 型フォトダイオードであることに起因して、無残像特性⁸⁾や、kTC 雑音が存在しないという特徴が導かれる。加えて、(3) の特徴により、CMD 撮像素子は低消費電力⁸⁾で高速動作が可能となる。低消費電力という特長に関しては、以下の 3 章で詳述する。

3. 性能限界

撮像素子の目的は、光学情報を電氣的に再生できる情報に変換することにある。本章では、その性能限界を把握するために光学的解析と電氣的解析を行う。解析に当たっては、画素寸法と CMD ならびに CCD の方式上の差異に焦点をあてる。

3.1 光学的限界

高解像度撮像を実現するためには、多画素のセンサが必要である。しかしながら、解像度は使用するセンサの画素数だけで決定されるものではなく、組合される結像光学系の影響も受ける。ここでは、センサの画素数を一定とした場合に、結像光学系との組合せにより生じる光学的な限界について考察する。簡単なた

め、画素寸法の異なる2種類のセンサを仮定する。どちらのセンサを用いる場合も、撮像にあたっては同一の視野角と同一の被写界深度が要求される。視野角は下式のように、受光面の対角寸法と結像レンズの焦点距離により規定される。

$$(\text{視野角}) = 2 \tan^{-1}(d/f) \quad (1)$$

ただし、 d は受光面の対角寸法 ($d \propto p$: 画素寸法)、 f は焦点距離である。ここで受光面の対角寸法は画素寸法と画素数の積に比例するので、視野角を一定に保つためには

$$p/f = \text{const.} \quad (2)$$

とならなければならない。同様にして、被写界深度を一定に保つためには

$$f^2/(pF) = \text{const.} \quad (3)$$

とならなければならない¹⁶⁾。ただし、 F : レンズの F 値である。よって、これらの2つの条件が同時に成り立つためには

$$F/p = \text{const.} \quad (4)$$

が要求される。

一方、1つの画素に入射するエネルギー E は

$$E \propto p^2/(4F^2) = (1/4)(p/F)^2 \quad (5)$$

で与えられる。よって(4)式の関係より、視野角と被写界深度を一定に保つ条件の下では、画素寸法によらず、各画素に入射するエネルギーは一定となることがわかる。すなわち、画素面積を大きく設定しても画素に入射する光子数を増加させることはできない。

次に、小絞り効果と呼ばれる回折現象による解像度劣化について考察する。結像レンズの絞りにより入射光線が回折されるので、点光源の被写体は結像面では拡がりを持つ。絞りが円形の開口形状を有する場合、この像を Airy Disk と呼び、その半径 Δ が像のぼけ具合の指標となる。この半径は下式に示すように、レンズの F 値と波長 λ の積に比例する¹⁷⁾。

$$\Delta = 1.22 F \lambda \quad (6)$$

よって(4)式を用いると、

$$\Delta \propto p \quad (7)$$

の関係が得られる。つまり、視野角と被写界深度を一定に保つ条件の下では、画素寸法が大きくなると、(4)式に従ってレンズの F 値も大きくする必要があるので、小絞り効果によるぼけも画素寸法に比例して大きくなることになる。すなわち、結像光学系の解像限界は画素数のみで決定され、画素寸法とは関係しない。換言すると、画素寸法を大きくしても、小絞り効果の影響からは逃れられない。

光学系についての考察の最後に、結像光学系の大きさについて触れる。通常、固体撮像素子では、斜め入

射光は、画像の再生に種々の弊害をもたらす。これら为了避免するため、入射光線の主軸が受光面の全面でほぼ垂直に近くなるテレセントリックな光学系を採用することが広く行われている。このテレセントリックな光学系では、そのレンズ群の後玉の直径は原理的に受光面の対角長より大きくなければならない。よって、画素寸法が大きな撮像素子を利用するためには、レンズ系も大きくする必要がある。

以上の議論は、①高解像度撮像を実現するには多画素化が必須であり、②同一の視野角と同一の被写界深度が前提となる場合、画素寸法を大きくしても1画素に入射する光子数は一定に留まり、また、解像限界も画素寸法にはよらない、③逆に画素寸法の増大は結像光学系の大型化を招く、と要約できる。すなわち、高画質化を目的として画素寸法を大きくする手法は、本質的な解決策とはなりえない。逆に高解像度化に対しては、撮像素子の受光領域の面積を一定にして、画素寸法を縮小することが最善策となる。一般的に画素面積を縮小した場合、画素面積に対する配線領域等の光に不感領域の面積が増大し、量子効率が低下する。そこで、画素の信号量を増加させて高画質化を実現するためには、単位面積当たりの量子効率を向上させることが唯一の手法となる。我々は現在、CMD に適用可能なオンチップマイクロレンズの検討を行っている。集光効率の F 値依存性と色収差の低減、および各種結像光学系との適合性が、開発のポイントと考えている。

3.2 電氣的限界

高解像度撮像においては、種々のランダム雑音が画質を劣化させる。CMD 撮像素子の場合、ランダム雑音の主因は検出雑音となる。この検出雑音は、出力容量の低減あるいは多線出力方式¹²⁾の採用により低減できる。特に後者の方法は、検出アンプのバンド幅の狭帯域化を可能にすると共に、出力容量も低減する。CMD 撮像素子は X-Y アドレス方式であるため、多線読出し構成の実現は容易である。一方、CCD は本質的に信号を順次読出すデバイスであるため、多線読出し構成とするには困難が伴う。ただし、X-Y アドレス方式の撮像素子においても、 S/N を律速するランダム雑音の主因が検出雑音以外の場合は、上述の手法は無効となる。

高解像度撮像あるいは高速度撮像においては、消費電力も重要な問題となる。固体撮像素子の動作原理上、電荷の充放電により電力が消費される。一般に消費電力 P_s は次式で見積もることができる。

$$P_s = f_{ck} C V^2 \quad (8)$$

ここで f_{ck} と C および V は各々、駆動周波数と駆動容量およびクロック電圧振幅を表す。消費電力 P_s が増大すると、撮像素子の温度が上昇する。その結果、受光部の暗電流が増加し、画質が劣化する。高解像度撮像では駆動周波数 f_{ck} が増大する。また、多画素化に際しても1画素の飽和電荷数を保つ必要があるため、結局、高解像度撮像では駆動容量 C も増大するため、消費電力低減策が必須となる。単に駆動周波数 f_{ck} を下げ消費電力の低減を図った場合、フレームレートが低下し、光蓄積時間および信号読出し時間が長くなる。その結果、動解像度の劣化や受光部の暗電流の増加を招き、結局画質の劣化につながる。つまり、フレームレートを低下させずに低消費電力を実現することが必要である。

CMD 撮像素子では3つの手法を採用し低消費電力化を図った。第1は前述の多線信号読出しである。多線読出しにより、同一のデータレートを保ったまま駆動周波数を低減でき、その結果、撮像素子の電力消費を低く抑えることができる。第2点は充放電される容量の低減である。CMD 撮像素子では、画素部と水平走査回路部の容量の充放電が電力消費の主要因である⁸⁾。水平走査回路はデジタル回路であるため、その低容量化は比較的容易である。一方、CCD は周知のとおり大容量を有しており、アナログ特性を保持したまま、その容量値を低減することは困難である。さらに、FIT-CCD や FT-CCD 等、撮像面以外に電荷メモリ部を有する CCD の容量低減は特に難しい。第3は駆動の低電圧化である。これは全撮像素子に共通の低消費電力化手段である。しかし MOS スイッチのオン/オフのみを制御すればよいデジタル駆動を動作の基本とする CMD と比べて、低電圧駆動に際して最大信号電荷量の低下や転送効率の低下が生じるアナログ駆動を基本とする CCD 撮像素子の方が、駆動電圧の低減は困難が伴う。

4. CMD 撮像素子の代表的特性

4.1 CMD 撮像素子

CMD において改善すべき課題は感度と S/N の向上である。2章で説明した量子効率を改善するためには、まず CMD の光学的な開口率を上昇する必要がある。オンチップマイクロレンズがない状態においては、CMD の開口率は30~40%となっている。CMD の電流-電圧特性の保持あるいは製造上のデザインールの制限により、開口率の抜本的な向上は困難であり、CMD においてもオンチップマイクロレンズの使用が必要と考えている。オンチップマイクロレンズの

採用により、CCD においては光学的な開口率が約30%から約70%に増加した¹³⁾と報告されている。

量子効率の改善のためには、ゲート電極の光透過率の向上も重要な課題である。ゲート電極を含む CMD の上部構造膜を無反射条件とすることで、p-n フォトダイオードに近い光利用効率を得られる¹⁴⁾¹⁵⁾。現状の CMD 撮像素子の量子効率は約20%程度であるが、以上説明した手段を導入することにより、2倍以上の感度向上が可能であると判断している。

もうひとつの重要な課題はランダム雑音の低減である。CMD 撮像素子のランダム雑音の要因としては、暗電流のショット雑音と CMD のチャンネル雑音および検出アンプ雑音があげられる。そこで CMD のランダム雑音を評価した¹⁸⁾。図3に、1/2 インチ 33 万画素 $7\mu\text{m}$ CMD 撮像素子の雑音特性を示す。この評価において検出アンプの雑音の影響を除くため、駆動周波数を6MHzに設定し、また、信号の帯域幅を3MHzに制限した。この条件下では、検出アンプの雑音は $0.38\text{ nA}_{\text{rms}}$ と無視できる値にまで低減されている。

図3に示した評価結果より、この場合、高温側では暗電流のショット雑音が支配的であることがわかる。暗電流の発生原因としては、Si/SiO₂ 界面に存在する界面準位がひとつの要因としてあげられる。この界面準位はシリコンあるいは酸素原子の不對電子対と考えられ、この準位を介して電子・正孔対、つまり暗電流が発生する。もうひとつの発生原因としては、ゲート/ドレイン近傍に存在する強電界領域での暗電流の増倍が考えられる。界面準位の減少および電界強度の低下により、室温において暗電流値は $0.5\text{ nA}/\text{cm}^2$ に減少したが、より一層の低減策を検討中である。

検出雑音は、センサの出力容量とフィードバック型の $I-V$ 変換アンプ間で発生する。この雑音は次式で表現できる。

図3 CMD 撮像素子の雑音特性
Noise characteristics of the CMD imager.

$$I_n^2 = 4kTB^3(4/3)\pi^2 C^2 R_{eq} \quad (9)$$

ここで I_n は検出雑音, k はボルツマン定数, T は絶対温度, B は信号帯域, C は出力容量, R_{eq} は入力トランジスタの等価雑音抵抗を表す. 高速/高解像度撮像を実現するためには広い信号帯域が必要となる. さらに多画素化は出力容量の上昇を招く. よって, 検出雑音の低減は高解像度撮像を実現するための重要な課題である.

基本的には, (9)式で示される通り, 出力線の低容量化が検出雑音を低減するキーポイントとなる. このため, 200 万画素 CMD 撮像素子においては, MOS スイッチおよび信号出力線の構造を最適化して低容量化を図った. その結果, ボンディングワイヤと出力パッドの寄生容量を含めた出力線の容量は 20 fF/段まで低減できた. 図 3 に示したノイズ電流の低温側での挙動はその温度依存性が少なく, このことにより低温側での雑音は CMD のチャンネル雑音で律速されていると判断している. CMD のチャンネル雑音の原因については現在解析中である.

以上, 説明した CMD カメラは, CMD の特徴を有効に活用した開発事例となっている.

4.2 CMD カメラ

ここでは高解像度撮像の例として, CMD 撮像素子を使用した 2 種類のカメラを紹介する. ひとつはハイビジョン規格である BTA S-001 に適合した 1 インチ 200 万画素センサを使用したカメラであり, もうひとつは高速度撮像に適した CMD 撮像素子を使ったカメラである.

まず, 1 インチ 200 万画素 CMD 撮像素子の仕様と特性を表 1 にまとめた. 3 章で説明したように, 温度上昇により画素部で発生する暗電流を抑圧するため, 低消費電力化を図った. 最初に, 水平走査回路の駆動電圧を 3 V に低減した. さらに, 信号の 2 線読出し構成を採用した. 2 章の CMD 撮像素子の特徴を反映して, 低スミアレベルと低消費電力が実現できた.

図 4 に本撮像素子を使用したハイビジョンカメラの構成を示す. このハイビジョンカメラは顕微鏡用途など高解像度が必要とされる用途を念頭におき開発された. 病理診断においては, 色再現性と色解像度等が重要視され, システムとしてはハイビジョンのベースバンドの解像が要求される. このカメラにおいては, 1 つの CMD 撮像素子を焦点面に配置しており, 結像レンズとセンサとの間に, 回転方式のカラーフィルタ(赤, 緑, 青, 黒)を介在させた. この回転フィルタは毎秒 3.75 回転する. このフィルタの回転に同期して赤, 緑, 青の画像信号が CMD 撮像素子より順次読出

表 1 2M-CMD 撮像素子の性能特性
Specifications and performance of the 2M imager.

Pixel size	7.3 μ m(H) $\times$ 7.6 μ m(V)
Number of effective pixels	1920(H) $\times$ 1036(V)
Die size	16.6 mm(H) $\times$ 10.7 mm(V)
Optical aperture ratio	34%
Signal output	2 lines mixture
Face plate saturation	76 lx
Saturation signal	28 μ A/pixel
Power dissipation	206 mW
Smear level	-123 dB
Image lag	<0.1%

図 4 HDTV カメラ構成図
HDTV camera configuration.

表 2 HDTV カメラの性能仕様
Performance of the HDTV camera.

Imaging device	1 inch 2 M pixel CMD
Output signal	BTA-S 001
Sensitivity	F 4/2000 lx
S/N	46 dB
Horizontal resolution	1000 TV lines

図 5 HDTV カメラ撮像例 (拡大写真)
Enlarged reproduced image of the HDTV camera.

される. この画像信号はプリアンプを通り, A/D コンバータに送られる. そして, 各色に対応する画像信号はフレームメモリーに蓄積され, その後, プロセス, 色信号の同時化処理等が行われる. カメラから

表 3 高速ビデオカメラの性能仕様
Specifications of the high speed video camera.

Imaging device	1/2 inch CMD, Single chip, color
Sensitivity	F 4/24000 lx (@ gain 0 dB and 500 fps)
S/N	46 dB
Horizontal resolution	>350 TV lines (up to 500 fps)
Recording speeds	100, 250, 500, 1000, 2000 fps
Sensing areas	Full 580×434 pixels Half 408×300 pixels Qtr 260×234 pixels

は、アナログの R/G/B 信号と Y/P_R/P_B 信号が出力される。なお、SCSI 等のデジタル出力も可能である。カメラ特性を表 2 にまとめた。図 5 に本カメラによる撮像例を示す。

第 2 のカメラ例として、表 3 に 33 万画素カラー CMD 撮像素子を使用した高速カメラの特性をまとめた。このビデオカメラは株式会社 NAC により開発された。特徴としては、一体型、カラー、高速高解像度、固体画像メモリ内蔵、等があげられる。

この撮像素子の水平走査回路は、常に 74.88 MHz のスキャンレートで駆動される。駆動クロックのパターンを変更することにより、撮像速度は 60 fps より 2000 fps まで可変可能である。60 fps から 500 fps の速度範囲ではフルイメージが得られる。一方、毎秒 2000 枚の撮像速度では 1/4 画面の映像信号が得られる。高速動作が可能であり、かつ CMD 撮像素子に単線出力方式を採用したため、撮像素子の高速駆動が必要となるが、信号処理回路が 1 系統で済むためカメラ全体の回路規模は小さくなる。その結果、カメラの周辺回路の簡略化と低消費電力化が可能となり、ハンディタイプ的高速カメラシステムが実現できた。

5. む す び

本稿においては、まず高解像度を実現するための必要条件を説明した。その結果、光学的な制限により、センサの特性改善の最も重要な項目は、限定された画素面積内での量子効率の向上であることを明らかにした。電気的な改善項目としては、ランダム雑音の低減と低消費電力化が重要であることを述べた。次に、CMD 撮像素子の代表的な特性に触れ、CMD 撮像素子の応用例として 2 種類の高解像度/高速 CMD カメラを紹介した。本稿で説明した CMD 撮像素子および、今回は説明を割愛した幾つかの増幅型撮像素子は、高速/高解像度撮像の領域では、信号の広帯域化および消費電力への対応という観点から CCD より有望であるといえる。

【参 考 文 献】

- 1) 放送技術開発協議会：“1125/60 高精細度テレビジョン方式スタジオ規格 BTA S-001” (1987)
- 2) M. Morimoto, et al.: “A 2/3-inch 2M-pixel IT-CCD Image Sensor with Individual p-wells for Separate V-CCD and H-CCD Formation”, in ISSCC Dig. Tech. Papers, pp. 222-223 (Feb. 1994)
- 3) S. Manabe, et al.: “A 2-million pixel CCD Image Sensor overlaid with an Amorphous Silicon Photoconversion layer”, in ISSCC Dig. Tech. Papers, pp. 50-51 (Feb. 1988)
- 4) 米本和也ほか：“HDTV 用 200 万画素 FIT-CCD イメージセンサ”, ITEJ Tech. Rep., **15**, pp. 7-12 (1991)
- 5) T. Nobusada, et al.: “Frame Interline Transfer CCD Image Sensor for HDTV Camera”, in ISSCC Dig. Tech. Papers, pp. 88-89 and 301 (Feb. 1989)
- 6) K. Matsumoto, et al.: “The Operation of a Charge Modulation Device (CMD) Image Sensor”, IEEE Trans. Electron Devices, **38**, 5, pp. 989-998 (1991)
- 7) K. Matsumoto, et al.: “Analysis of Operational Speed and Scaling Down the pixel Size of a Charge Modulation Device (CMD) Image Sensor”, IEEE Trans. Electron Devices, **38**, 5, pp. 999-1004 (1991)
- 8) 中島ほか：“1 インチ 200 万画素 CMD イメージセンサ”, テレビ誌, **47**, 2, pp. 219-225 (1993)
- 9) NAC Visual Systems: “MEMORECAM,” Product Catalogue (1994)
- 10) W. S. Boyle and G. E. Smith: “Charge Coupled Semiconductor Devices”, BSTJ, **49**, pp. 587-593 (1970)
- 11) TV 学会編：“固体撮像デバイス”, 昭晃堂 (1986)
- 12) P. K. Weimer: “Systems and Technologies for Solid-State Image Sensor”, RCA Review, **32**, p. 251 (1971)
- 13) Y. Sano, et al.: “Submicron Spaced Lenz Array Process Technology for a High Sensitivity CCD Image Sensor”, IEDM Dig. of Tech. Papers, pp. 283-286, 11.5.1 (1990)
- 14) 松本ほか：“高抵抗 MCZ 基板を用いた MOS 型センサー CCD 撮像素子” テレビ学技報, TEBS 87-5, ED693, pp. 35-40 (1983)
- 15) K. Matsumoto: USP No. 4929994
- 16) 辻内：“光学概論 I—基礎と幾何光学—”, pp. 155-156, 朝倉書店 (1979)
- 17) 久保田：“応用光学”, pp. 188-192, 岩波全書
- 18) 宮原ほか：“CMD イメージセンサにおけるランダムノイズ”, テレビ年次大, 4-6 (1995)

なかむら つとむ
中村 力 1981 年、北海道大学理学部物理学科大学院修士課程修了。同年、オリンパス光学工業(株)に入社。現在、同社応用研究部にて、固体撮像素子の開発に従事。正会員。

まつもと かずや
松本 一哉 1980 年、京都大学理学部物理学科卒業。同年、オリンパス光学工業(株)に入社。現在、同社応用研究部で固体撮像素子の研究開発に従事。正会員。

の ち と づ ー
野本 哲夫 1990 年、東北大学工学部応用物理学科大学院修士課程修了。同年、オリンパス光学工業(株)に入社。現在、同社応用研究部にて、固体撮像素子の開発に従事。