

PVDF薄膜を用いたモノリシック焦電型赤外線イメージセンサ

藤塚徳夫, 坂田二郎, 宮地幸夫, 水野健太郎, 大塚一雄, 多賀康訓, 田畑修

Monolithic Pyroelectric Infrared Image Sensor Using PVDF Thin Film

Norio Fujitsuka, Jiro Sakata, Yukio Miyachi, Kentaro Mizuno,
Kazuo Ohtsuka, Yasunori Taga, Osamu Tabata

要 旨

16×16画素のモノリシック焦電型赤外線イメージセンサを開発した。本イメージセンサは、エレクトロスプレー法によるPVDF焦電膜、埋め込みチャンネルMOSFETによる低ノイズ検出デバイス、マイクロマシニングによる4本のビームで支持されたメンブレン構造の熱絶縁構造を特徴とする。

検出部サイズ75μm角, チョッピング周波数55Hzのイメージセンサにおいて, 電圧感度6600 V/W, 比検出能 $1.6 \times 10^7 \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ が達成され, 黒体炉開口部の熱画像を得る事に成功した。感度バラツキ, ノイズ, オフセット電圧に課題が残るが, モノリシック焦電型赤外線イメージセンサ実現に見通しを得た。

Abstract

A 16 × 16 monolithic pyroelectric infrared image sensor has been developed. This image sensor utilizes an electro-spray (ESP) deposited polyvinylidene fluoride (PVDF) thin film as a pyroelectric material, a buried channel MOSFET as a low noise detection device, and a micromachined four-beam-supported membrane as a thermal isolation structure. A voltage sensitivity of 6600 V/W and a detectivity of $1.6 \times 10^7 \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ have been realized with a sensing area of $75 \mu\text{m} \times 75 \mu\text{m}$ at a chopping frequency of 55 Hz. A thermal image of the circular window of a black body furnace has been successfully obtained. These results offer the promising prospect of a monolithic pyroelectric IR image sensor, although the uniformity in voltage sensitivity, noise and offset voltage still remain to be improved.

キーワード 焦電, 赤外線, センサ, PVDF, マイクロマシニング

1. はじめに

赤外線センサには、赤外線のフォトンエネルギーにより励起されるキャリアによって生じる導電率の変化、あるいは光起電力を検出する量子型と、黒体放射に基づく赤外線の放射エネルギー吸収による温度変化を検出する熱型がある。一般に量子型は熱型に比べ高感度であるが、波長依存性を持

ち、極低温の冷却が必要という特徴を持つ。一方熱型は量子型に比べ感度は劣るが、波長依存性を持たず、冷却不要という特徴を持つ。冷却不要な熱型は、量子型に比べ低コスト化が期待できるため、自動車、家電等への幅広い応用が期待され、近年活発な研究開発が進められている。中でも焦電センサは高感度化が期待できるため、熱型センサでは有力な候補である。しかし、MOSデバイ

スが形成されたシリコン基板上に高い焦電係数と均一性を持つ焦電膜を成膜することが困難であったため、熱画像表示可能な高感度で大規模なモノリシック焦電型赤外線イメージセンサは実現されていない¹⁻⁴⁾。モノリシック化により、チップの低コスト化、低ノイズ化、高機能化、大規模2次元アレイセンサの実現等が期待できる。

我々は、薄膜で形成した熱絶縁構造上にPVDF焦電膜をエレクトロスプレイ (ESP) 法により成膜し、これをCMOS検出回路と集積化した焦電型赤外線センサを提案している。この概念に基づき、 $400\mu\text{m}$ 角のシリコン窒化膜メンブレンを検出部とする単体センサを試作し、雑音等価温度差 (NETD) 0.1°C を達成した⁵⁾。

イメージセンサの実現には、NETDを同程度に保ったまま検出部サイズを小型化する必要がある。しかしNETDは受光部から基板への熱コンダクタンスに比例し、受光面積に反比例するため、従来と同一な熱絶縁構造を単純に小型化すれば、熱コンダクタンスは増加し、受光面積が減少するためNETDは増加してしまう。

本稿では、新規熱絶縁構造と材料変更により、検出部サイズの小型化と熱コンダクタンスの低減に成功し、熱画像表示を実現した、検出部サイズ $75\mu\text{m}$ 角、256画素のモノリシック焦電型赤外線イメージセンサについて報告する^{6,7)}。

2. 設計と作製

2.1 構成

センサ1画素の断面構造をFig. 1に示す。 $75\mu\text{m}$ 角の検出部とMOSFET検出回路を持つセンサエレ

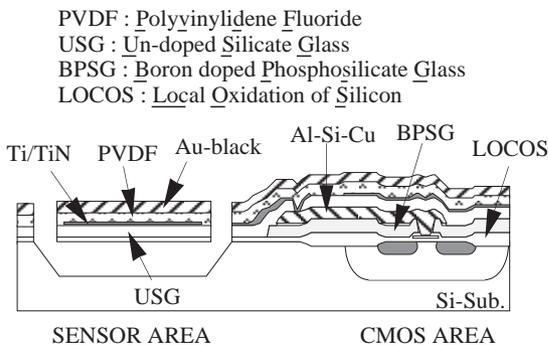


Fig. 1 Cross-sectional structure of the sensing cell.

メントがSi基板上に集積化される。試作したイメージセンサはセンサ構造、検出回路、焦電膜成膜について以下に示す特徴を持つ。

2.2 センサ構造

イメージセンサには単体センサの小型化と、高感度化が必要となる。この相反する条件を満たすには受光部の熱コンダクタンス低減、つまり熱の逃げにくい構造にすることが有効なため、センサ構造、材料の観点からセンサ設計の見直しを行った。

センサ構造には、限定された面積内で、大きな受光部と高い熱絶縁性を合わせ持つ事が要求される。そこで、新規センサ構造として、Fig. 2に示すマイクロマシニングによるビーム支持メンブレン構造と呼ぶ形状を用いた。この構造では、 $59\mu\text{m}$ 角の受光部が、幅 $4\mu\text{m}$ 、長さ $59\mu\text{m}$ の4本のビームにより支持される。

材料に関しても、支持メンブレン材料にシリコンプロセスで広く用いられるUn-doped Silicate Glass (USG: プラズマCVDによるノンドープのシリコン酸化膜) を、下部電極材料にTiを用いた。シリコン酸化膜の熱伝導率 ($1.2 \times 10^{-2} \text{ Wcm}^{-1}\text{K}^{-1}$) は従来我々のセンサでメンブレンとして用いたシリコン窒化膜の熱伝導率 ($1.8 \times 10^{-1} \text{ Wcm}^{-1}\text{K}^{-1}$) に比べ、約1桁小さい。Tiの熱伝導率 ($2.2 \times 10^{-1} \text{ Wcm}^{-1}\text{K}^{-1}$) も従来我々のセンサで下部電極として用いたAlの熱伝導

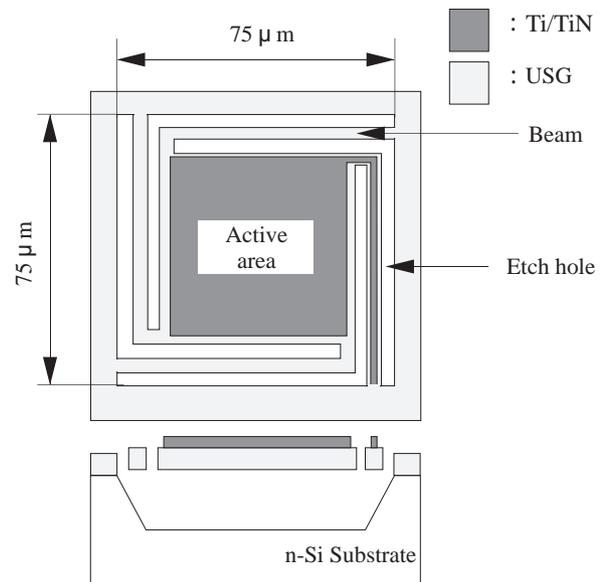


Fig. 2 Sensor structure (four-beam-supported membrane structure).

率 ($2.37 \text{ Wcm}^{-1}\text{K}^{-1}$) に比べ約1桁小さく, 加えてAlと異なり受光部と基板の分離を行うアルカリ系Si異方性エッチング液に対する耐性を持っている。なお, TiNは接触抵抗低減のために成膜している。

2.3 検出回路

イメージセンサ1画素内の等価回路図をFig. 3に示す。PVDF焦電膜で発生する電荷をソースフォロワ回路によりインピーダンス変換し, 電圧として取り出している。この検出回路は以下の3つの特徴を持つ。

第一に, 埋め込みチャンネルMOSFETによる回路構成。イメージセンサからの出力は約4.0Vのオフセット電圧を持ち, チョッピング周波数に同期した μV オーダーの交流信号である。この様に出力が微小なため, センサS/N, つまり高感度化同様, 低ノイズ化が重要である。本検出回路では, 検出回路を構成するMOSデバイスの $1/f$ ノイズ低減を狙い, 埋め込みチャンネルMOSFETで構成する。

第二に, 保護ダイオードの接続。ESP成膜は後述する様に, $8 \sim 15\text{kV}$ の強電界中でのプラス電荷を持つPVDF液滴の噴霧であり, 液滴の持つプラス電荷のチャージアップにより, 検出MOSFETのゲート酸化膜が絶縁破壊される。本検出回路ではゲートとGND間にダイオードを接続し, 成膜中GNDに接地しESP成膜による電荷蓄積を防ぐ。

第三に, 差動出力によるオフセット電圧の除去。チップからの出力は前述の様にオフセット電圧を持つ。熱画像表示用の信号処理を行うには, このオフセット電圧を高速に除去する必要があり, 本

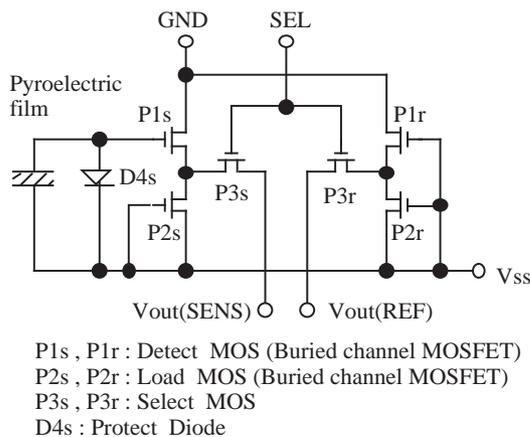


Fig. 3 Equivalent circuit of a sensing cell.

検出回路では同一画素内にセンサと同じリファレンス回路を作製し, 差動出力により, オフセット電圧を除去する。

なお, 各画素からの信号は, アレイ周辺に作製した読み出し用デジタル回路により, 順次読み出される。

2.4 焦電膜成膜

モノリシック可能な焦電膜としてエレクトロスプレイ法によるPVDF焦電膜を用いる⁸⁾。ESP成膜装置の概観図をFig. 4に示す。ジメチルフォルムアミド (DMF) 等の有機溶媒中の0.2%のPVDF溶液は, ニードルと基板間の $8 \sim 15\text{kV}$ の強電界の印加によりチャージされる。チャージされたPVDF溶液の液滴は, 電界によってニードルから基板まで移動する。基板までの輸送工程で, 殆どの溶媒は窒素により蒸発され, 残った溶媒とPVDFポリマーは基板上の電極上に成膜される。成膜と同時にPVDF中の双極子は電界により基板の上に垂直に配向されるため, 導電性を持つ任意基板の任意電極上に, ポーリングを必要とせず, 焦電性・均一性とも良好なPVDF薄膜が成膜できる。

2軸移動機構を持つ成膜装置により, 2cm^2 の領域において, $4\text{nCcm}^{-2}\text{K}^{-1}$ の焦電係数を持つPVDF薄膜が $\pm 5\%$ 以内の均一性でワンステップで基板上に直接成膜できている。

2.5 プロセス

プロセスはCMOSプロセスによる検出回路作製後, センサ部を作製するpost-CMOSプロセスであ

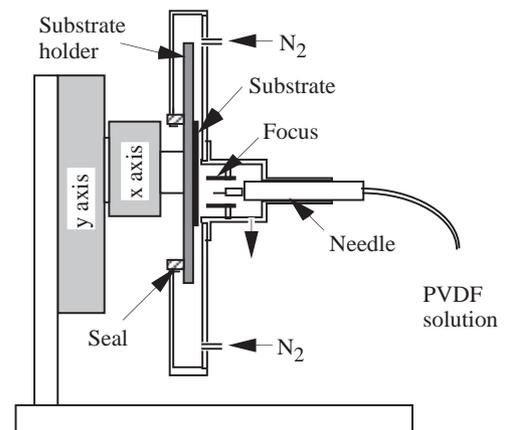


Fig. 4 Schematic structure of an ESP deposition apparatus.

る。CMOSプロセス以後のプロセスフローをFig. 5に示す。

(1)センサ支持膜となる厚さ700nmのUSG膜をプラズマCVDにより成膜し、Alまでのコンタクトホールをフォトリソグラフィ、RIEにより加工する。

(2)下部電極となる厚さ100nmのTi/TiN複合膜をスパッタにより成膜し、フォトリソ、RIEによりパターニングする。続けて、同様の方法で基板と受光部の分離を行うSi異方性エッチング用のエッチホールを加工する。

(3)熱絶縁構造がエチレンジアミンピロカテコール（EDP）水溶液を用いたSi異方性エッチングにより形成される。

(4)PVDF焦電膜をTi下部電極上にESP法により成膜する。

(5)赤外線光の吸収膜でもある金黒上部電極をアレイ部上に蒸着により成膜する。なお、金黒は波長2～20 μm の赤外光を90%以上吸収する。

PVDFと金黒の成膜中、ボンディングパッドを

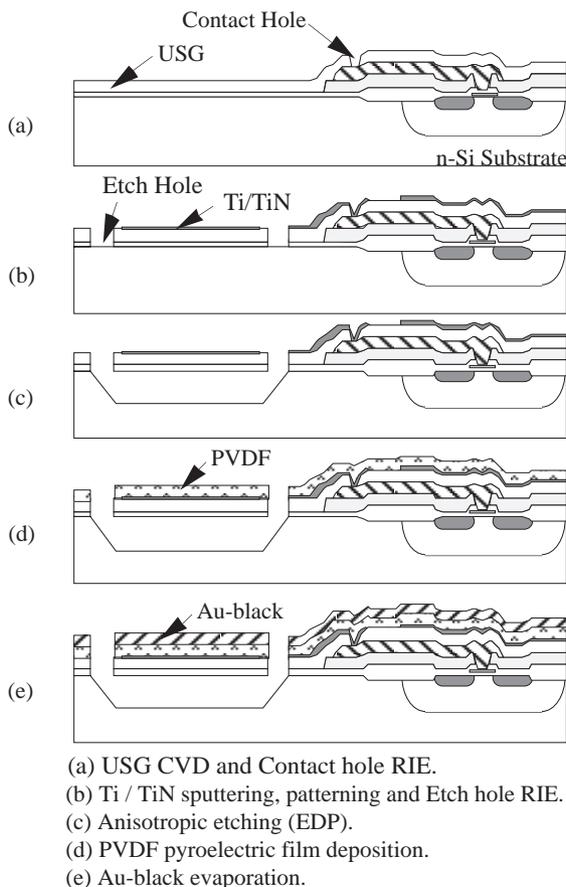


Fig. 5 Process flow of the image sensor.

保護するためにメタルマスクを用いている。

アルカリ系Si異方性エッチング液に対する耐性を持つTiを下部電極材料に用いることで、下部電極パターニング後にSi異方性エッチングを行うことを可能にし、熱コンダクタンスの低い4本ビーム支持メンブレン構造を実現できている。

加えて、Ti下部電極成膜時に、既に同一基板の上に作製されている検出回路のAlボンディングパッド表面もTiで覆うことにより、受光部の分離を行うEDP水溶液からAlを保護する。TiはAl同様優れたボンディング性を持つため、除去の必要がない。

ビーム支持メンブレン構造は構造強度および剛性が低いため、USG、Tiの持つ内部応力により容易に変形・破壊する。ビーム支持メンブレン構造を平坦に歩留まり良く作製するため、USG、Tiの応力制御と形状パラメーターの最適化を行っている。

3. 結果と考察

3.1 センサ構造

EDP水溶液により基板から分離された検出部のSEM写真をFig. 6に示す。USG、Tiの応力制御と形状パラメーターの最適化により、高い熱絶縁性を持つビーム支持メンブレン構造を平坦に歩留まり良く作製できている。USG膜厚は700nm、Ti/TiN複合膜の厚さは100nmである。

3.2 単体センサ特性

焦電出力は、熱源である黒体炉、可視光をカットする光学フィルタ、メカニカルチョッパ、FFTアナライザを用いて測定した。センサは検出部の熱コンダクタンス低減のため、約1Torrの真空封止を行った。真空封止により、キャビティ内の空

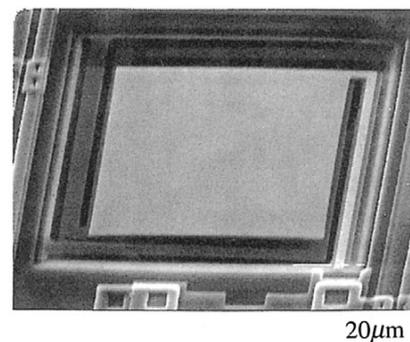


Fig. 6 A SEM photograph of a sensing element.

気の影響が無くなり、電圧感度は約5倍に増加した。この様なマイクロ構造の熱型センサでは真空封止は不可欠である。

Fig. 7に単体センサの電圧感度のチョッピング周波数依存特性を示す。約30Hzまで電圧感度のピーク値が伸び、その後、周波数に比例して低下する。チョッピング周波数10Hzで、10000V/Wの最大電圧感度を得られた。電圧感度の立ち下がりには熱時定数が支配しており、本結果から熱時定数5.3msecが算出された。

Fig. 8に焦電膜ノイズ (V_{NS})、保護ダイオードノイズ (V_{ND})、ソースフォロワ回路ノイズ (V_{NZ})の周波数特性を示す。全ノイズ (V_N)は下記の様に、これらの二乗平均である。

$$V_N^2 = V_{NS}^2 + V_{ND}^2 + V_{NZ}^2 \quad (1)$$

イメージセンサのチョッピング周波数は55Hzとしており、55Hzでのノイズはそれぞれ $1.7\mu\text{VHz}^{-1/2}$ 、 $0.8\mu\text{VHz}^{-1/2}$ 、 $0.7\mu\text{VHz}^{-1/2}$ であった。この結果より、ノイズは焦電膜が72%、保護ダイオードが16%、ソースフォロワ回路が12%支配しており、低ノイズ化には焦電膜の低ノイズ化が重要であることが明らかになった。

Fig. 9にセンサのS/Nを表す比検出能の周波数特性を示す。チョッピング周波数40Hzで最大値 $2.4 \times 10^7 \text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ が得られた。

単体センサの性能指数をTable 1にまとめる。

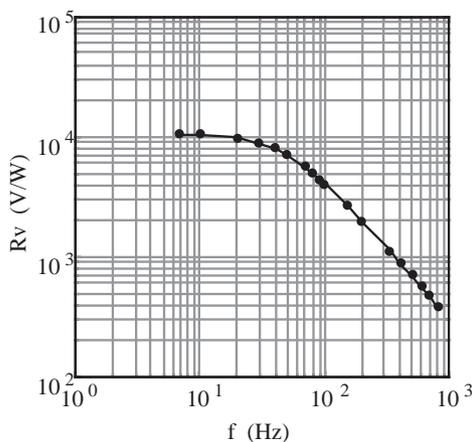


Fig. 7 The frequency dependence of voltage sensitivity.

3.3 電圧感度, ノイズ, オフセットのバラツキ

イメージセンサに関して、電圧感度、ノイズ、差動出力後のオフセット電圧の均一性を評価した。Fig. 10に、イメージセンサのチョッピング周

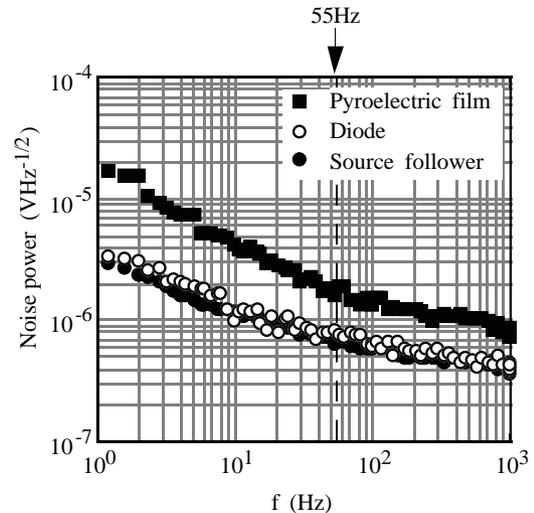


Fig. 8 The frequency dependence of noise power.

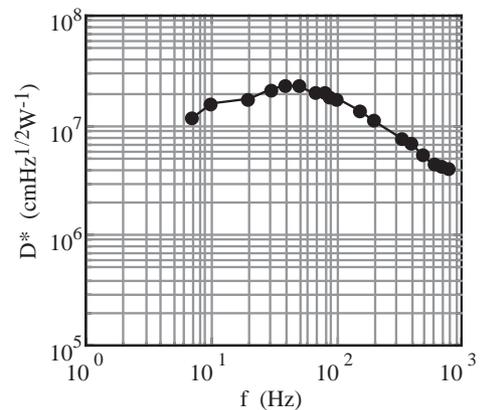


Fig. 9 The frequency dependence of detectivity.

Table 1 Characteristics of the single sensor.

Sensor size	$75 \times 75 (\mu\text{m}^2)$
PVDF thickness	700 (nm)
Pyroelectric coefficient	$4 (\text{nCcm}^{-2}\text{K}^{-1})$
Voltage sensitivity	10000 (V/W)
Detectivity	$2.4 \times 10^7 (\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1})$
Thermal time constant	5.3 (msec)

波数である55Hzでの電圧感度のバラツキを表すヒストグラムを示す。評価したイメージセンサでは、256画素中38画素(15%)の不良画素があった。電圧感度の平均値は6607V/W、標準偏差1254V/Wであった。電圧感度バラツキはソースフォロワ回路と焦電膜の特性バラツキによるものである。画像表示は、感度バラツキデータより補正係数を乗じた処理を行い、不良画素に対しては周辺画素のデータより補間した。

Fig. 11に、任意25画素のノイズバラツキを表すヒストグラムを示す。ノイズの平均値は $1.33\mu\text{VHz}^{-1/2}$ 、標準偏差 $0.1255\mu\text{VHz}^{-1/2}$ であった。

Fig. 12に、差動出力後のオフセット電圧のバラツキを表すヒストグラムを示す。

ESP成膜前は平均値7.5mV、標準偏差5.1mVであったが、ESP後は平均値108.2mV、標準偏差16.3mVと平均値、標準偏差とも増加した。これは、ESP成膜による検出回路の特性変化と、焦電膜の発生する電荷の影響である。

電荷に関しては、ESP成膜後の熱処理で低減させられるが、検出回路の特性変化については、原因不明でクリアできていない。この様に差動出力によるオフセット電圧除去が不十分なため、交流カップリングによりオフセット電圧を除去しており、信号処理時間を増加させている。

3.4 イメージセンサ特性

Fig. 13に金黒上部電極成膜前のイメージセンサ

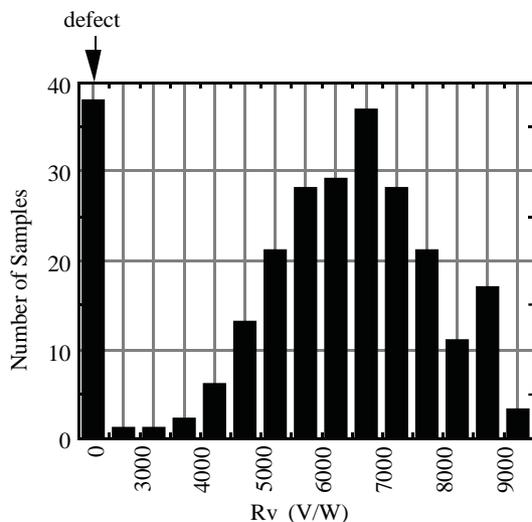


Fig. 10 Distribution of voltage sensitivity.

チップ写真を示す。チップサイズは $4 \times 4\text{mm}^2$ であり、 $75\mu\text{m}$ 角の検出部が $150\mu\text{m}$ ピッチで256画素(16×16)のアレイを構成する。アレイ周辺に読み出し用デジタル回路を作製している。Fig. 14に試作したカメラ部を示す。波長 $2\mu\text{m}$ 以下をカットする光学フィルタ、f値1.0の赤外線用レンズ、メカニカルチョッパ、真空封止したセンサチップ、低ノイズアンプにより構成される。Fig. 15に本センサにより得られた円形の黒体炉開口部の熱画像表示例を示す。青が低温、赤が高温を表し、黒体炉の温度変化に応じて熱画像が変化することがわかる。イメージセンサ特性をTable 2にまとめる。検出部サイズ $75\mu\text{m}$ 角、画素数256画素、チョッピング周波数55Hzのイメージセンサにおいて、電圧感度6600V/W、比検出能 $1.6 \times 10^7\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 、NETD 0.15°C を達成した。なお、NETDの算出は、光学系の損失は無く、周波数帯域 $\Delta f=1\text{Hz}$ の条件を用いた。

4. おわりに

ESP法によるPVDF焦電膜を用いて、検出部サイズ $75\mu\text{m}$ 角、256画素(16×16)のモノリシック焦電型赤外線イメージセンサを試作した。チョッピング周波数55Hzにおいて、電圧感度6600V/W、比検出能 $1.6 \times 10^7\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 、NETD 0.15°C を達成し、黒体炉開口部の熱画像を得る事に成功した。

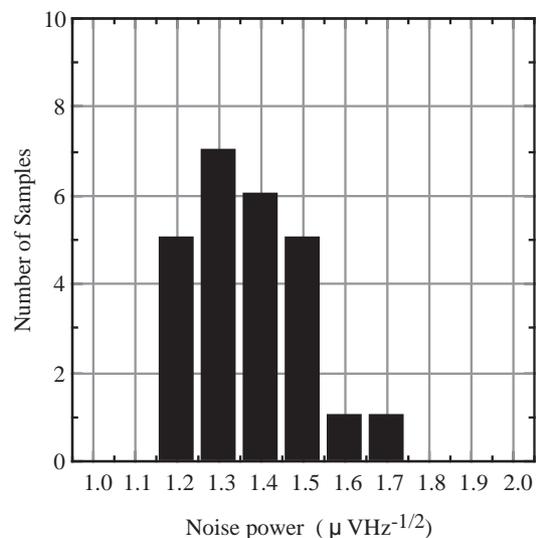
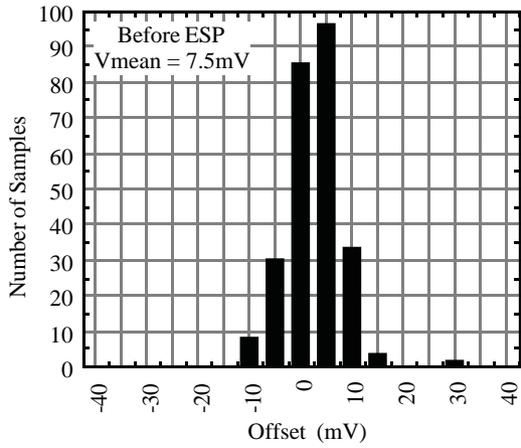


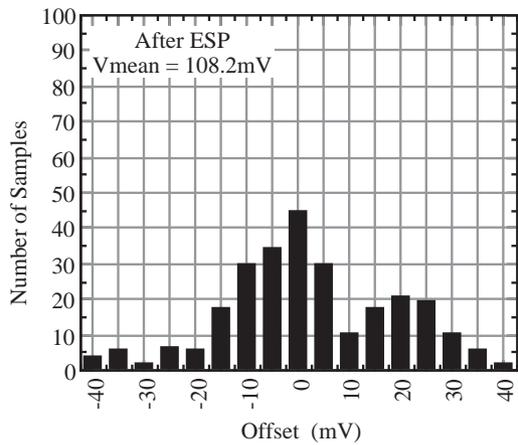
Fig. 11 Distribution of noise power.

電圧感度のバラツキ, ノイズ, オフセット電圧等改善を必要とする課題は残るが, モノリシック

型の焦電型赤外線イメージセンサ実現の見通しを得た。



(a) Before ESP



(b) After ESP

Fig. 12 Distribution of offset voltage.

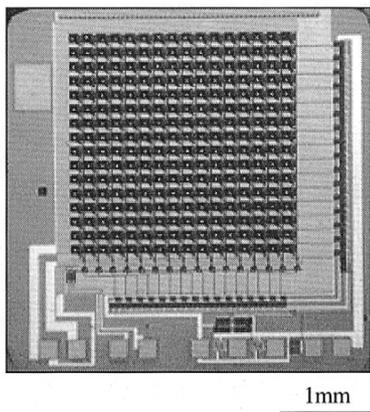


Fig. 13 A photograph of the image sensor.

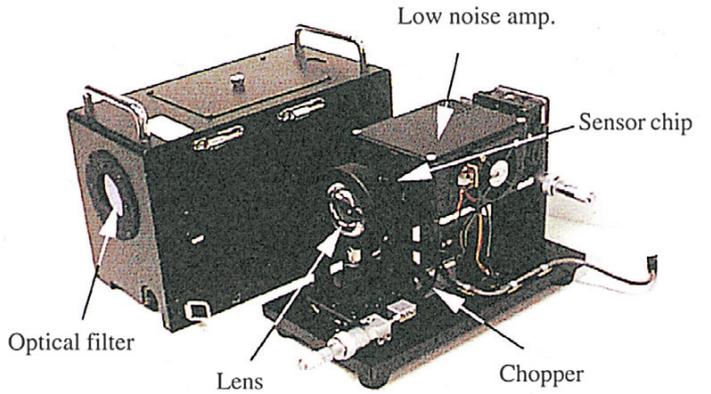


Fig. 14 A photograph of the prototype camera.

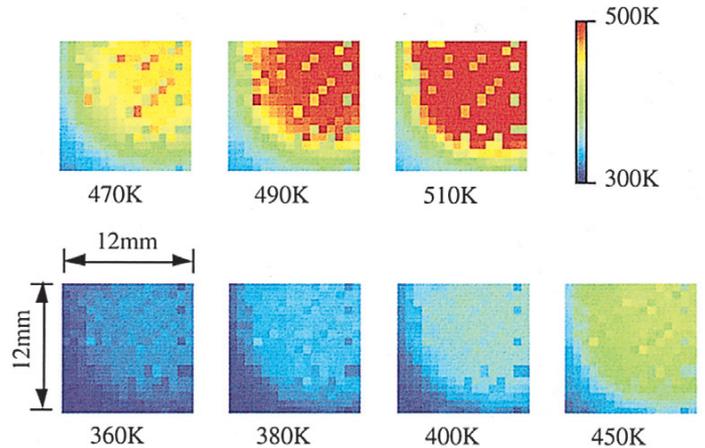


Fig. 15 A thermal image of the circular window of a black body furnace.

Table 2 Characteristics of the PVDF thin film IR image sensor (temperature of sensor is 300K).

Sensor size	75 × 75 (μm ²)
Elements number	256 (16 × 16)
Chopping frequency	55 (Hz)
R _v	6600 (V/W)
D*	1.6 × 10 ⁷ (cmHz ^{1/2} W ⁻¹)
NETD	0.15 (K)
Thermal time constant	5.3 (msec)

参 考 文 献

- 1) Munch, W. V., Nagel, M., Rinner, M. and Wohl, G. : "P(VDF/TrFE) Copolymerfilms for the Fabrication of Pyroelectric Arrays", Sensors and Actuators A, 37-38 (1993), 365 ~ 369
- 2) Munch, W. V., Nagel, M., Wohl, G., Ploss, B. and Ruppel, W. : "A 3 × 3 Pyroelectric Detectors Array with Improved Sensor Technology", Sensors and Actuators A, 41-42(1994), 156 ~ 160
- 3) Kohler, R., Neumann, N. and Hofmann, G. : "Pyroelectric Single-element and Linear-array Sensors Based on P(VDF/TrFE) Thin Films" , Sensors and Actuators A, 45(1994), 209 ~ 218
- 4) Setiadi, D., Sarro, P. and Regtien, P. P. L. : "A 3 × 1 Integrated Pyroelectric Sensor Based on VDF/TrFE Copolymer" , Transducers'95, (1995), 644 ~ 645
- 5) Asahi, R., Sakata, J., Tabata, O., Mochizuki, M., Sugiyama, S. and Taga, Y. : "Integrated Pyroelectric Infrared Sensor Using PVDF Thin Film Deposited by Electro-spray Method", Technical dig. of The 7th int. conf. on solid-state sensors and actuators (Transducers'93), (1993), 656 ~ 659
- 6) Fujitsuka, N., Sakata, J., Miyachi, Y., Mizuno, K., Ohtsuka, K., Taga, Y. and Tabata, O. : "Monolithic Pyroelectric Infrared Image Sensor Using PVDF Thin Film" , Technical dig. of The 15TH Sensor symp., (1997), 133 ~ 136
- 7) Fujitsuka, N., Sakata, J., Miyachi, Y., Mizuno, K., Ohtsuka, K., Taga, Y. and Tabata, O. : "Monolithic Pyroelectric Infrared Image Sensor Using PVDF Thin Film", Technical dig. of The 9th int. conf. on solid-state sensors and actuators (Transducers'97), (1997), 1237 ~ 1240
- 8) Sakata, J. and Mochizuki, M. : "Preparation of Organic Thin Films by an Electrospray Technique I. Crystal Forms and Their Orientation in Poly(vinylidene fluoride) Films", Thin Solid Films, 195(1991), 175 ~ 184

著 者 紹 介



藤塚徳夫 Norio Fujitsuka
 生年：1967年。
 所属：機能デバイス研究室。
 分野：シリコンマイクロセンサ，マイクロマシニング。
 学会等：電気学会会員。



坂田二郎 Jiro Sakata
 生年：1954年。
 所属：機能デバイス研究室。
 分野：薄膜物性評価・制御。
 学会等：応用物理学会，日本化学会会員。
 工学博士。



宮地幸夫 Yukio Miyachi
 生年：1954年。
 所属：パワー高周波デバイス研究室。
 分野：パワーデバイスの研究開発。



水野健太郎 Kentaro Mizuno
 生年：1966年。
 所属：機能デバイス研究室。
 分野：センサ用アナログCMOS ICの設計。



大塚一雄 Kazuo Ohtsuka
 生年：1963年。
 所属：機電技術課。
 分野：計測，信号処理におけるハード・ソフトウェア開発。
 学会等：自動車技術会会員。



多賀康訓 Yasunori Taga
 生年：1944年。
 所属：第1特別研究室。
 分野：薄膜物性，表面・界面物性。
 学会等：表面技術協会，Am. Vacuum Soc., IEEE, Mater. Res. Soc.会員。
 工学博士。



田畑 修 Osamu Tabata
 生年：1956年。
 所属：立命館大学理工学部機械工学科。
 分野：マイクロ・ナノ加工技術とマイクロシステムへの応用に関する研究。加工（シリコン異方性エッチング，放射線応用など），物性評価（薄膜の機械的物性評価など），マイクロシステム応用（加速度センサ，マイクロ化学分析システムなど）。
 学会等：日本機械学会，電気学会，IEEE 会員。
 1998年日本ME学会科学新聞・研究奨励賞受賞。
 1992年電気学会論文発表賞受賞。
 1993年R&D100選受賞。
 工学博士。