

マイクロボロメータによる 12 μm ピッチ 640 $\times$ 480 画素小型非冷却赤外線センサの開発 Small Size 640x480 Uncooled Infrared Detector Development with 12 μm Pixel Pitch Micro Bolometer

佐々木得人¹

¹ 日本電気株式会社 誘導光電事業部

Tokuhiro SASAKI¹

¹Guidance and Electro-Optics Division, NEC Corp.

要旨：非冷却赤外線センサは、サーモグラフィ、監視・セキュリティなどのサーマルカメラ用センサとして最近普及している。現在、市販されているこれらのセンサでは 17 μm ピッチ画素が主流となってきた。今回、さらに非冷却赤外線センサの小型化を図るため 12 μm ピッチで 640 $\times$ 480 画素となる撮像用信号読み出し回路 ROIC (Readout-IC) およびマイクロボロメータによる MEMS (Micro Electro-Mechanical System) 撮像素子の開発を行い、マイクロボロメータ撮像素子のばらつき補正機能を省略することでチップ小型化と低消費電力を達成した。画素の 12 μm 化により、今後さらに用途拡大が可能な小型軽量の赤外線カメラの実現が期待できる。

Abstract : Uncooled infrared detector has recently become popular as a sensor for thermography, surveillance and security monitoring camera and so on. The pixel pitch of commercially available uncooled infrared camera is currently 17 μm . We have developed 640 x 480 uncooled infrared detector focal plane arrays which has read-out integrated circuit and pixels of micro electro-mechanical systems designed with furthermore smaller pixel pitch by 12 μm to reduce size of the uncooled infrared camera. The chip size reduction and low power dissipation could be achieved by eliminating non uniformity correction of the micro bolometer pixels. It is expected to realize small size and lightweight infrared camera which will be able to expand its applications by using 12 μm pixel pitch micro bolometer.

Key Words: uncooled infrared detector, bolometer, MEMS, 12 μm pixel, Readout IC, thermography, surveillance and security camera

1. はじめに

波長 10 μm 帯を検出するための赤外線センサは大別して、量子半導体材料を用いる冷却型赤外線センサと熱型材料を用いる非冷却赤外線センサがある。冷却型は量子型半導体材料を液体窒素温度程度まで冷却しないと性能が得られないことから冷却機構を必要とする。一方、非冷却赤外線センサは量子型のような冷却機構を必要としないため、機構そのものと保守が不要となり、冷却型に比べて安価なサーマルカメラ用の赤外線センサとしてサーモグラフ

ィや監視・セキュリティモニターなどで広く用いられるようになってきた。

非冷却赤外線センサの撮像素子であるマイクロボロメータは、フォトリソグラフィによる微細加工ができる半導体製造装置を用いたマイクロマシン技術を応用した MEMS 素子であり、モノリシックにシリコン基板の信号読み出し回路上に形成できることが特長である。現在市販のものでは素子ピッチの微細化が進み、撮像素子の大きさが 20 μm オーダーの画素ピッチから 17 μm ピッチのもの

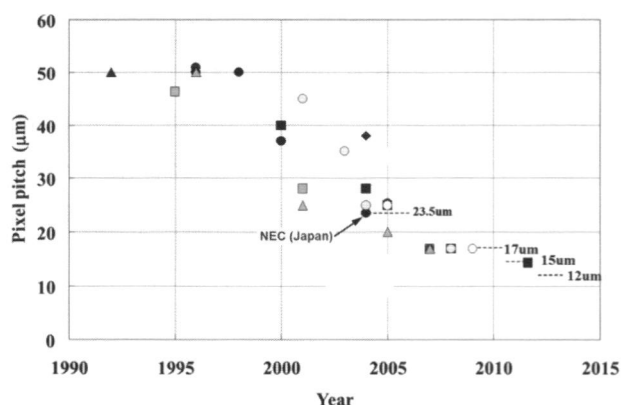


Fig. 1 Technology trend for pixel pitch of uncooled infrared detector¹⁻⁸⁾.

が主流となってきた。年代による画素サイズ縮小の変遷を Fig. 1 に示す¹⁻⁸⁾。

2次元の撮像センサでは素子ピッチが小さくなるとカメラ自体の小型軽量化に貢献できるため、撮像素子の縮小における開発動機となっている。今回、筆者等は波長 $\lambda=10\ \mu\text{m}$ における光の回折限界 ($1.22\lambda F$, $F=1$) にほぼ等しい $12\ \mu\text{m}$ で、カメラの小型化を目指して素子ピッチ縮小開発を行い、 $12\ \mu\text{m}$ ピッチで 640×480 画素となるマイクロボロメータ非冷却赤外線センサを開発した。

2. 画素ピッチ $12\ \mu\text{m}$ 用 640×480 非冷却赤外線センサ

2.1 低ノイズ信号読み出し回路の小型化

これまでに筆者等の開発した ROIC は、画素サイズ $23.5\ \mu\text{m}$ ピッチに対応していた²⁾。通常、ボロメータ素子抵抗のばらつきに起

因する積分出力電圧ばらつきがあり、出力電圧のダイナミックレンジの制限から十分に積分ゲインをあげることができないため、回路後段のノイズの影響により S/N 比が悪化する。この ROIC ではこれによる S/N 比の悪化を防ぐため、ばらつき補正回路を設けていた (Fig. 2 (a))。この回路ではボロメータ抵抗とキャンセルボロメータ抵抗に印加する電圧を変化させて電流を一定にすることでばらつき補正を行っていた。しかし、ばらつき補正回路の電圧をそのまま各ボロメータ端に印加するために構成していたキャンセル用オペアンプがノイズ源となり得る。オペアンプでの十分なノイズ低減を行うために回路消費電流が増え、回路を構成するトランジスタ面積を大型にする必要があった。このままで画素ピッチの縮小に対応させようとする、撮像エリア幅の縮小に伴い読み出し回路部分が伸びてしまい (Fig. 3)、チップ小型化を図ることが困難となる。

画素ピッチ $12\ \mu\text{m}$ 用の ROIC においてチップサイズ小型化を実現するためには、ばらつき補正機能の削減が必要で、このためにはボロメータ素子の均一性向上を行わなければならない。筆者等は、ボロメータ素子の均一性向上が最近可能となってきたため、ばらつき補正回路のキャンセル用オペアンプを省略した回路設計を行った (Fig. 2 (b))。

今回開発した画素ピッチ $12\ \mu\text{m}$ 用 640×480 ROIC と従来の $23.5\ \mu\text{m}$ 用 640×480 ROIC の大きさ比較を Fig. 4 に示す。撮像エリアを $12\ \mu\text{m}$ 画素に対応させるとともにチップ小型化を図ることができた。ばらつき補正機能を削減した結果、 $12\ \mu\text{m}$ 用 640×480 ROIC の消費電力は約 $0.14\ \text{W}$ となった (従来は約 $1\ \text{W}$)。

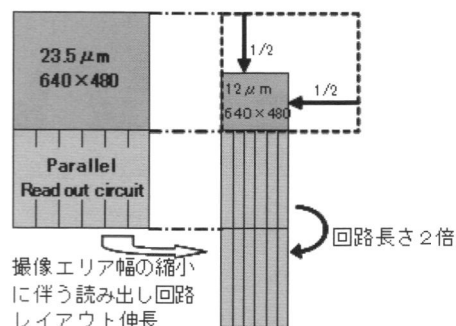


Fig. 3 Demerit of pixel pitch reduction in ROIC.

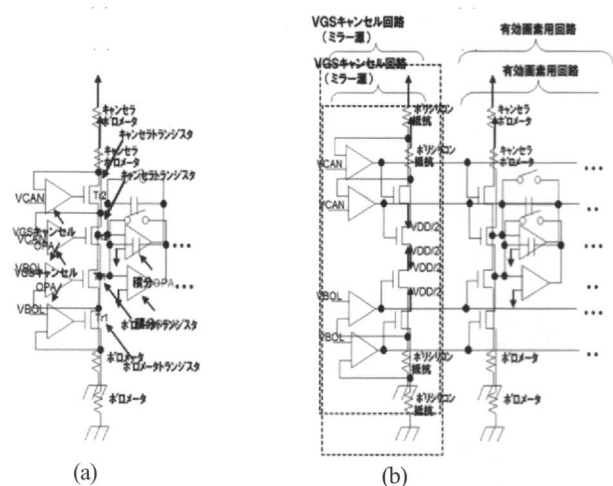


Fig. 2 Method for read out bolometer resistance; (a) Conventional and (b) developed circuit.

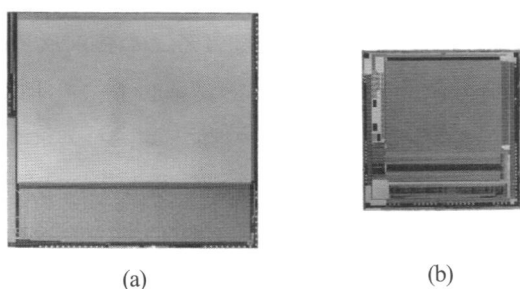


Fig. 4 Photographs of ROIC; (a) 23.5μm-640×480, (b) developed 12μm-640×480.

2.2 マイクロボロメータ撮像素子 (12μm ピッチ用)

今回の開発では、素子ピッチを筆者等の従来センサの 23.5 μm からほぼ 1/2 サイズの 12 μm に縮小を図っている。また、この 12 μm は非冷却赤外線センサの検知波長 10 μm のおよその回折限界である。1 素子の受光面積が約 1/4 になり従来センサ素子と同等の性能を得ようとする場合、従来に比べて約 4 倍の感度向上が必要となる。ここでマイクロボロメータ素子の感度は次式で表される。

$$\text{Res} = \frac{\alpha \eta V_B}{G_{th}} \quad (1)$$

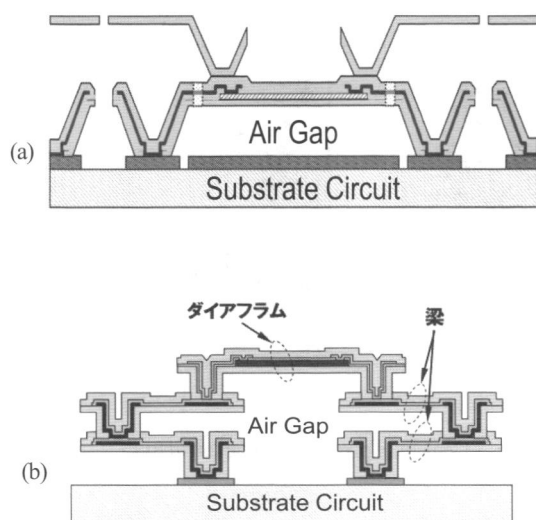


Fig. 5 Schematic cross sectional structure of the pixels; (a) conventional 23.5 μm pitch, (b) developed for 12 μm pitch. Not in same scale.

Res はボロメータ素子の感度 (V/W)、 α はボロメータ材料の抵抗温度係数 (%/K)、 η は赤外吸収率 (%)、 V_B はボロメータのバイアス電圧 (V)、 G_{th} は MEMS 素子構造の梁の熱コンダクタンス成分 (W/K) である。(1) 式からわかるように感度を向上させるには、それぞれのパラメータに関係する素子の構造、材料を検討する必要がある。ただし、バイアス電圧 V_B を増加させることは消費電力の増加となってしまったためここでは検討外としている。また、吸収率 η はほぼ膜厚に依存する項であるため、厚くすることは熱容量が大きくなり、熱時定数による応答性が遅くなることから得策ではないため対象外とした。

従来の素子では、ボロメータ材料層および梁となる材料層がダイアフラム素子の同一平面層上にレイアウトされており、それぞれの

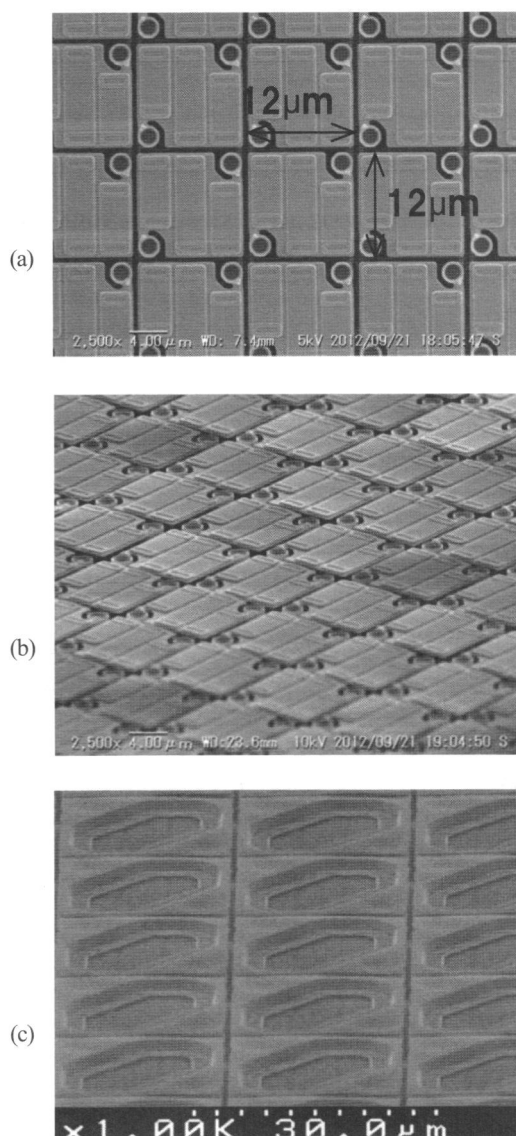


Fig. 6 SEM images of bolometer pixel arrays; (a) top view of 12 μm pixels, (b) perspective view of 12μm pixels, and (c) perspective view of conventional 23.5 μm pixel.

寸法について独立したパラメータ検討が困難となっていた。これに対して、12 μm 素子では梁の材料層をボロメータ材料層とレベルを変え下層にレイアウト配置することにより、ほぼ独立してそれぞれ最適化を図ることが可能となった。これまで 23.5 μm 未満の素子では二重犠牲層による素子構造の検討を行ってきた³⁾が、さらに感度の向上を図るため新たに三重犠牲層による素子構造を開発した。

Fig. 5 に従来の 23.5 μm 素子 (Fig. 5 (a)) と今回開発した 12 μm 素子 (Fig. 5 (b)) の断面構造を示す。12 μm 素子ではボロメータ膜から信号読み出し回路までの階層の異なる部分の電気的なコンタクトの微細化が必要になるため、コンタクトホール形成についてはドライエッチング化を図ることでコンタクトエリア面積の縮小を実施した。この構造により 12 μm 素子では熱コンダクタンスを従来の 23.5 μm 素子の場合の 20 nW/K から 6 nW/K まで改善した。Fig. 6 に開発した 12 μm 素子アレイ表面 (Fig. 6 (a), (b)) と従来の 23.5 μm 素子アレイ表面 (Fig. 6 (c)) の電子顕微鏡写真を示す。

ボロメータ材料としてこれまで酸化バナジウムが使われており、この材料の抵抗温度係数 α は $-1.7\%/K$ ²⁾ (酸化バナジウムは負の抵抗温度係数を有する) である。

ボロメータ材料は一般的に半導体的振る舞いを示し、その抵抗 R はボルツマン分布の活性化エネルギー E_a に比例、絶対温度 T に反比例する。抵抗 $R(T)$ と抵抗温度係数 $\alpha(T)$ は次式で表される。

$$R(T) = R_0 \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2)$$

$$\alpha(T) = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} \quad (3)$$

k はボルツマン定数である。活性化エネルギー E_a が大きいほど、即ち抵抗が大きいほど α は大きくなる傾向にある⁹⁾。同時に α が大きいと抵抗増加のためボロメータ材料内の電子キャリア数が減り、材料内で発生する 1/f ノイズ (電子キャリアの総数に反比例) が増加する。ボロメータ抵抗の大きさにも依存するが、センサを駆動するフレームレート 30 Hz では、設計抵抗値の範囲において 1/f ノイズが支配的となっている。このため、1/f ノイズを抑えて α を大きくできることがボロメータ材料の要件となる。

筆者等は遷移金属を添加した酸化バナジウム系材料を独立行政法人産業技術総合研究所と共同で開発を行っており、Nb5%添加した合金酸化物 $V_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_2$ で $-3.5\%/K$ (室温) の特性の材料が見つかった¹⁰⁾。現在 12 μm 素子への適用のための開発を行っている。

2.3 12 μm 素子による 640×480 非冷却赤外線アレイセンサ

今回開発した ROIC とセンサ素子により 12 μm -640×480 非冷却赤外線アレイセンサを開発した。非冷却赤外線センサでは、素子感度を保つために、センサ素子の周囲環境を真空にすることで基板との断熱を図っている。このためアレイセンサは真気密が保てる真空パッケージに実装しなければならない。今回の開発では従来筆者等が適用してきた排気管のないチューブレス型セラミックパッケージを用いることでセンサの小型化を図ることとした。また、センサの実装レイアウトに自由度を持たせるために端子部にフレキシブルプリント基板を使っており、後段の回路基板が設計し易くなるようにした。

Fig. 7 (a) に開発した 12 μm ピッチ 640×480 非冷却赤外線アレイセンサ (大きさ 24 mm×24 mm×高さ 6.7 mm、重さ 11 g) の外観写真を示す。従来の 23.5 μm ピッチ 640×480 デバイス (Fig. 7 (b)) (大きさ 49 mm×49 mm×高さ 17 mm、重さ 75 g) に比べて大きさが約 1/10、重さが約 1/7 を実現することができた。この 12 μm ピッチ 640×480 非冷却赤外線アレイセンサを用いて撮像した例を Fig. 8 に示す。ボロメータ材料を酸化バナジウムとした場合の温度分解能 NETD (Noise Equivalent Temperature Difference) は、約 150 mK (F/1, 30 Hz) であった。

また、この 12 μm ピッチ 640×480 非冷却赤外線アレイセンサを用いて従来の重さの 1/10 以下の 30 g 以下 (レンズを除く)、大きさ約 25 mm サイズの赤外線カメラモジュールを試作した (Fig. 9)。

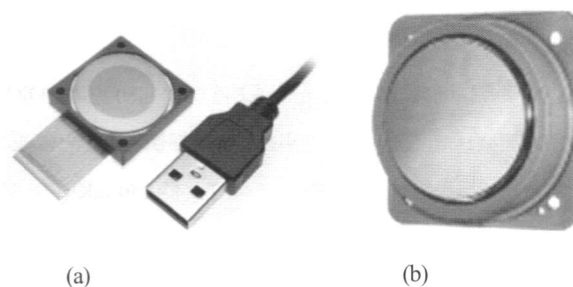


Fig. 7 Photo images of (a) 12 μm -640×480 uncooled infrared detector and (b) 23.5 μm -640×480 uncooled infrared detector.



Fig. 8 Infrared image taken by 12 μm -640×480 uncooled infrared detector.



Fig. 9 Proto type infrared imaging camera module designed for 12 μm -640×480 uncooled infrared detector.

3. まとめ

以上のように画素ピッチ 12 μm による 640×480 用の ROIC および素子を開発した。同センサを用いて赤外撮像することに成功し、酸化バナジウムをボロメータとして NETD 約 150 mK (F/1, 30 Hz) を得た。

今後はさらに高感度ボロメータ材料を適応して高感度化するとともに、小型化の特長を活かした小型軽量となる赤外線カメラモジュールを実現することで、このデバイスが従来のサーモグラフィ、監視セキュリティなどの用途以外にも広く応用されることが期待できる。

謝辞

センサ開発については、NEDO（独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構）次世代戦略技術実用化開発助成事業による

助成で実施された。

また本開発の実施については、日本電気株式会社誘導光電事業部関係者の方々の多大なご支援ご協力を頂いた。ここに深謝します。

参考文献

- 1) 佐々木得人：OPTRONICS **365** (5) (2012) 86.
- 2) S. Tohyama, M. Miyoshi, S. Kurashina, N. Ito, T. Sasaki, A. Ajisawa, Y. Tanaka, A. Kawahara, K. Iida, and N. Oda：Optical Eng. **45** (2006) 014001.
- 3) S. Tohyama, T. Sasaki, T. Endoh, M. Sano, K. Katoh, S. Kurashina, M. Miyoshi, T. Yamazaki, M. Ueno, H. Katayama, and T. Imai：Proc. SPIE **8012** (2011) 80121M.
- 4) D. Fujisawa, T. Maegawa, Y. Ohta, Y. Kosasayama, T. Ohnakado, H. Hata, Masashi Ueno, H. Ohji, R. Sato, H. Katayama, T. Imai, and Munetaka Ueno：Proc. SPIE **8353** (2012) 83531G.
- 5) B. Fièrue, P. Robert, C. Minassian, M. Vilain, J.L. Tissot, A. Crastes, O. Legras, and J. J. Yon：Proc. SPIE **6940** (2008) 69401X.
- 6) R. Blackwell, D. Lacroix, T. Bach, J. Ishii, S. Hyland, J. Geneczko, S. Chan, B. Sujana, and M. Joswick：Proc. SPIE **6940** (2008) 694021.
- 7) S. Black, M. Ray, C. Hewitt, R. Wyles, E. Gordon, K. Almada, S. Baur, M. Kuiken, D. Chi, and T. Sessler：Proc. SPIE **6940** (2008) 694022.
- 8) T. Schimert, J. Brady, T. Fagan, M. Taylor, W. McCardell, R. Gooch, S. Ajmera, C. Hanson, and A. J. Syllaios：Proc. SPIE **6940** (2008) 694023.
- 9) N. Oda：2nd International Workshop on Terahertz Technology, -Extended Abstracts- pp.179-180, (2009 Nov. 30-Dec.3).
- 10) 石崎晴朗, 西川雅美, 中島智彦, 篠田健太郎, 土屋哲男：第 73 回応用物理学学術講演会予稿集, 06-253, 14a-C9-7, (2012).
(論文受付 2012 年 12 月 17 日, 論文受理 2013 年 3 月 9 日)

■著者紹介■

氏名 佐々木 得人

所属 日本電気株式会社 誘導光電事業部 赤外線センサグループ
(〒401-0016 山梨県大月市大月町真木 747 NEC 山梨内)

1986 年大阪大学工学部電気工学科卒、1988 年同大学院工学研究科修士課程電気工学専攻修士。1988 年日本電気株式会社中央研究所にて分子線エビタキシ法による HgCdTe 薄膜の結晶成長の研究に従事。1994 年酸化バナジウム型ボロメータ材料膜の開発に従事。2000 年 誘導光電事業部に酸化バナジウムボロメータによる非冷却赤外センサの開発に従事、シニアマネージャー、現在に至る。
所属学会：応用物理学会、映像情報メディア学会
E-mail：t-sasaki@dt.jp.nec.com

