

画像解像度が向上した非冷却赤外線イメージセンサ

Uncooled Infrared Radiation Image Sensor

本多 浩大 舟木 英之

■ HONDA Hiroto

■ FUNAKI Hideyuki

赤外線イメージセンサは、人肌から自然放射される赤外線を検知して温度分布を画像化することで、暗闇の中でも人物を検出でき、車載用の前方歩行者検知装置や、高性能人感センサ、プラント監視カメラなどに応用できる。しかし、本格的に普及させるためには、更に画像解像度を上げる必要があった。

東芝は、320×240画素 (QVGA: Quarter Video Graphics Array) を持ち、ノイズ等価温度差 (NETD: Noise Equivalent Temperature Difference) 0.25 Kを達成した非冷却赤外線イメージセンサを開発した。MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) プロセスの改善で画素を微細化し、画素ピッチを従来品の32 μmから22 μmに縮小することで従来と同じチップサイズと感度を保ったまま、多画素化を実現した。また、読出し回路のノイズ低減により、温度分解能の目安となるNETDを向上させた。

Toshiba has developed a quarter video graphics array (QVGA) (320 × 240 pixels) uncooled infrared radiation image sensor that achieves a noise equivalent temperature difference (NETD) of 0.25 K. As this sensor can detect a person in the dark from the image of the temperature distribution by sensing far-infrared radiation emitted by the skin, it is applicable to many areas including pedestrian detection sensors for automobiles, human detection sensors, security sensors, and so on.

In order to increase the resolution, or the number of pixels, we have utilized a microelectromechanical systems (MEMS)-based process to reduce the pixel pitch from 32 μm to 22 μm, which realizes a QVGA image sensor of the same sensitivity and chip size, and decrease the read-out circuit noise to improve the NETD from 0.55 K to 0.25 K.

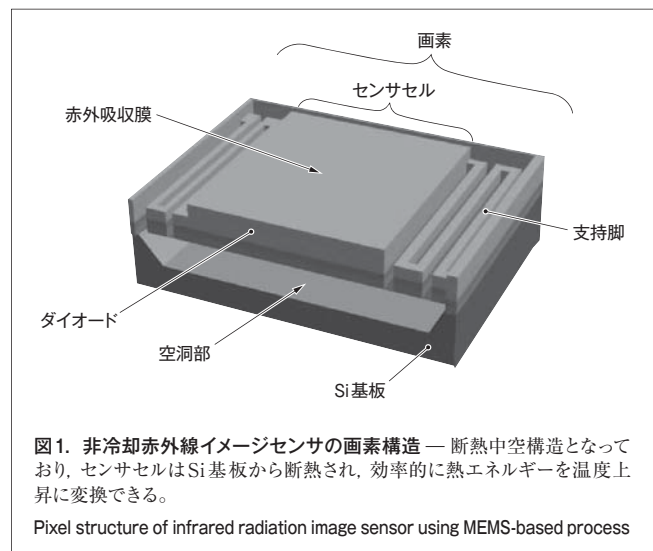
1 まえがき

赤外線イメージセンサは、対象物から自然に放射される赤外線を検知して温度分布を画像化でき、投光器のような光源が不要である。ヘッドライトの当たらない前方の歩行者を検知して警告を出す車載用の前方歩行者検知装置や、高性能人感センサ、プラント監視用カメラなど、応用分野は多岐にわたっている。

冷却器を用いて約-200℃で動作する冷却型の赤外線イメージセンサと異なり、室温下で動作する非冷却赤外線イメージセンサは高価な冷却器が不用であり、製造コストを低減できることから近年盛んに開発されている^{(1), (2), (3)}。

この非冷却赤外線イメージセンサを前方歩行者検知や監視カメラなどに本格的に普及させるためには、多画素化して画像解像度を上げることが課題になっていた。例えば、50 m以上遠方の人物を認識するためには、320×240画素以上の解像度が必要である。しかし、レンズとパッケージを従来品と同じサイズに保ったまま多画素化することが求められており、画素ピッチの縮小と感度を維持する技術が必要であった。

東芝は、画像解像度を上げるため、画素ピッチを従来品の32 μmから22 μmに縮小した非冷却赤外線イメージセンサを



開発した。ここでは、その概要と特長などについて述べる。

2 非冷却赤外線イメージセンサの構造と動作原理

非冷却赤外線イメージセンサの画素構造を図1に示す。被写体からの赤外線輻射は8～12 μmの波長帯に分布してお

り、センサセル上の赤外線吸収膜で吸収されて熱エネルギーに変換される。センサセルは、シリコン (Si) 基板をエッチングして形成した空洞部の上に、支持脚と呼ばれる細長い梁 (はり) 構造で支持されている。このような中空構造は、MEMS プロセスで形成する。センサセルは、この構造によって Si 基板から断熱され、効率的に熱エネルギーを温度上昇に換えることができる。

更に、センサセル内に設けられたダイオードの順方向特性の温度依存性を利用し、温度上昇を電気信号に変換して読み出す。すなわち、センサセルは、光エネルギーを熱エネルギーにいったん変換し、次にそれを電圧信号に変換する間接検出タイプの光センサである。

赤外線イメージセンサの性能を示す指標は、温度分解能の目安となる NETD であり、式(1)で表わされる。

$$\text{NETD} = \frac{\Delta T \cdot V_n}{V_{sig}} \quad (1)$$

ΔT : 被写体の温度差

V_n : 画素出力段換算のノイズ電圧

V_{sig} : 画素出力段換算の信号電圧

NETD の単位は K であり、SN 比 (信号対雑音比) が 1 となるときの被写体温度差を表している。NETD の値が小さいほど温度分解能が高いことから、 V_n を低減するか、被写体に温度差が生じたときの V_{sig} を大きくすることが NETD の向上につながる。

3 高断熱性による解像度向上

式(1)のうち、信号電圧 V_{sig} は式(2)で表わされる。

$$V_{sig} = \frac{PA\gamma}{G_{th}} \cdot \frac{dV}{dT} \quad (2)$$

P : 単位面積当たりの入射エネルギー (W/m²)

A : センサセルの面積 (m²)

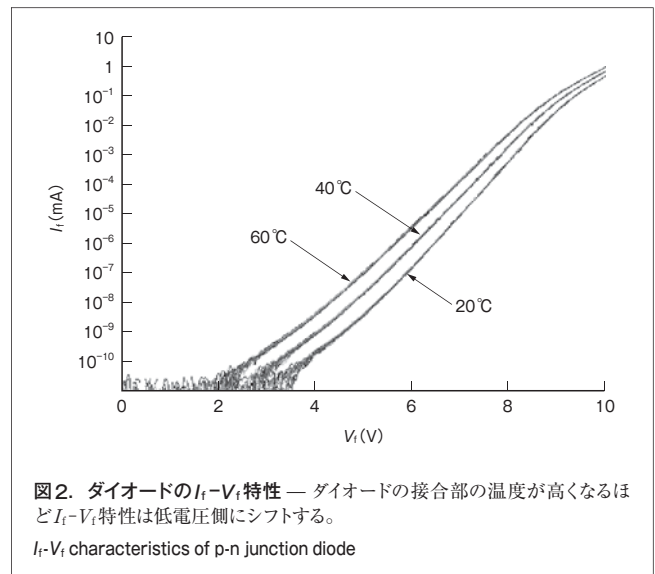
G_{th} : 支持脚の熱コンダクタンス (W/K)

γ : 赤外吸収膜の吸収率

dV/dT : ダイオードの熱電変換効率

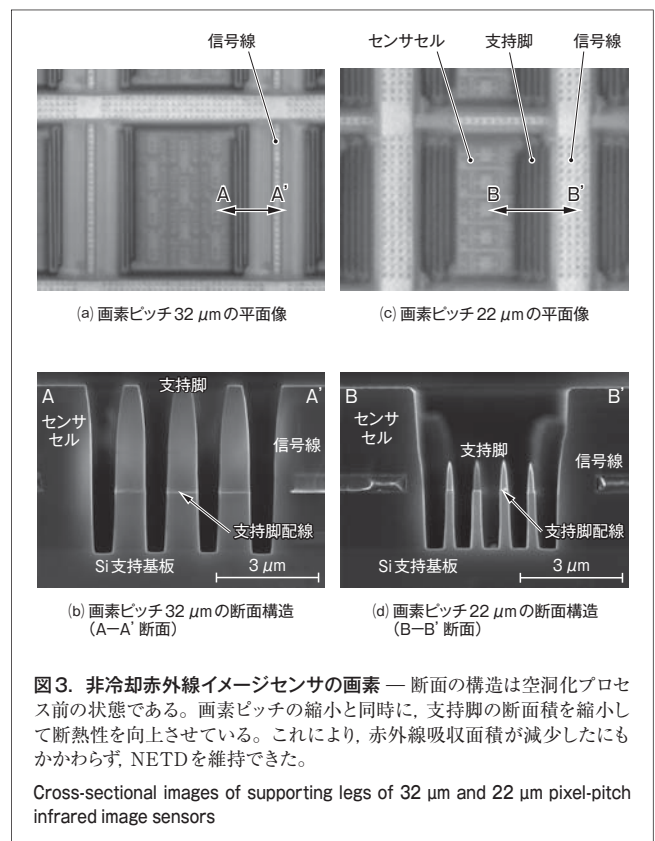
赤外線照射によるセンサセルの温度上昇は、入射エネルギーと散逸エネルギーのバランスによって決まり、式(2)は平衡状態が実現しているときの信号電圧を示している。

NETD を決定する最大の要素は G_{th} 、すなわち支持脚の断熱性能である。 G_{th} の値が小さいほど散逸エネルギーが少ないため、センサセルの温度上昇は高くなり、感度が高くなる。一方、熱が逃げにくくなるため、被写体の動きに対する応答速



度が遅くなるというトレードオフ (二律背反) の関係があり、設計の際には注意が必要になる。

電圧信号を読み出す際に、ダイオードには一定の I_f (順方向電流) が流れる。ダイオードの順方向特性、すなわち I_f - V_f (順方向電圧) 特性を 図2 に示すが、ダイオードの接合部の温度が上昇すると、 I_f - V_f 特性は低電圧側にシフトする。このシフト量は dV/dT で表され、ダイオードの直列接続個数に比例



して大きくなる。当社は、ダイオードをセンサセル内に10個配置し、直列接続することで dV/dT を高めている。センサセル温度が1K変化すると、ダイオード10個直列時の V_i は約12 mV変化する。

レンズ及びパッケージを従来品と同じサイズに保ったままで多画素化を実現するには、画素ピッチを縮小することが必要になる。画素ピッチを縮小することで A が減少するので、NETDを同等に保つためには G_{th} の低減、すなわち支持脚の高断熱化が必須である。

今回当社は、MEMSプロセスを改善し、支持脚スリミング技術を導入して、支持脚の太さと高さをそれぞれ半減し、 G_{th} をセンサセルの面積縮小分に相当する約40%に低減できた。従来の $32\mu\text{m}$ ピッチと新たに開発した $22\mu\text{m}$ ピッチの各画素の平面及び支持脚部断面の比較を図3に示す。

式(2)における A と G_{th} を等しくスケールダウンできたため、NETDを従来と同等の約0.55 Kに保ったまま、画素ピッチを $32\mu\text{m}$ から $22\mu\text{m}$ に縮小できた。これにより、チップサイズを保持しながら、従来の 160×120 画素から 320×240 画素への多画素化を実現し、小型セラミックパッケージに実装することができた。

4 ノイズ低減のアプローチ

非冷却赤外線イメージセンサは、仮に断熱構造を最適化して得られる信号を最大にできたとしても、被写体の温度変化に対応した信号電圧は非常に微小である。

今回当社は、まず読出し回路のトランジスタのノイズ、なかでも赤外線イメージセンサの駆動周波数帯で支配的である $1/f$ ノイズに着目した。 $1/f$ ノイズは、その名のとおりに周波数に反比例して低周波になるほど大きくなり、トランジスタでは式(3)で表わされる。

$$\delta I_D = \int \sqrt{\frac{K_F}{C_{OX}L^2} \frac{I_D^{A_F}}{f^{E_F}}} df \quad (3)$$

δI_D : 一定の I_D (ソース-ドレイン間電流) を流す際に含まれるノイズ電流

C_{OX} : 単位面積当たりのゲート酸化膜容量

L : ゲート長

f : 駆動周波数

K_F, A_F, E_F : トランジスタ作製プロセスに依存するパラメータ

ここで、積分記号は動作周波数帯での積分を表している。

このセンサでもっともSN比に影響するのは、ダイオードに定電流を流す定電流トランジスタであり、式(1)中の V_n は式(3)

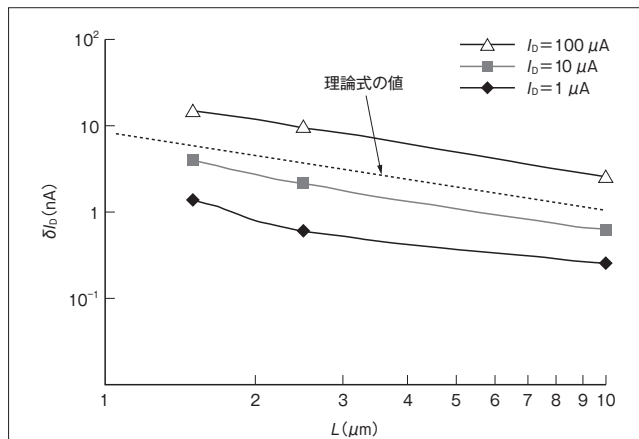


図4. 電流ノイズのゲート長依存性 — 異なる I_D 条件において測定した $1/f$ ノイズを、10 Hzから1 kHzまで積分している。理論式のプロットと同様に、 L に反比例してノイズが低下することがわかる。

Dependence of noise in source-drain current on gate length

の δI_D に直接比例する。式(3)から、定電流トランジスタの L を大きくするほど δI_D 、すなわち V_n は低減されることがわかる。

実際に L の異なる複数のトランジスタのノイズを測定し、10 Hzから1 kHzまで積分した結果を図4に示す。電流値を1, 10, 100 μA にそれぞれ設定して $1/f$ ノイズを測定した結果、理論式どおり、 L に反比例してノイズが小さくなる傾向が見られた。

この結果を用いて L を最適化し、NETDを比較した結果、図5に示すようにNETDの平均値が0.57 Kから0.25 Kまで低減した。 L は、ゲート面積増大によるチップ面積の占有、並びにゲート容量の増大が問題にならない範囲内で最大値を採用した。NETDが0.25 Kのセンサを用いて屋外を撮影した画像を図6に示す。車両のタイヤ付近など、高温の物体が白く映っているのがわかる。

開発した非冷却赤外線イメージセンサの基本仕様を表1に示す。

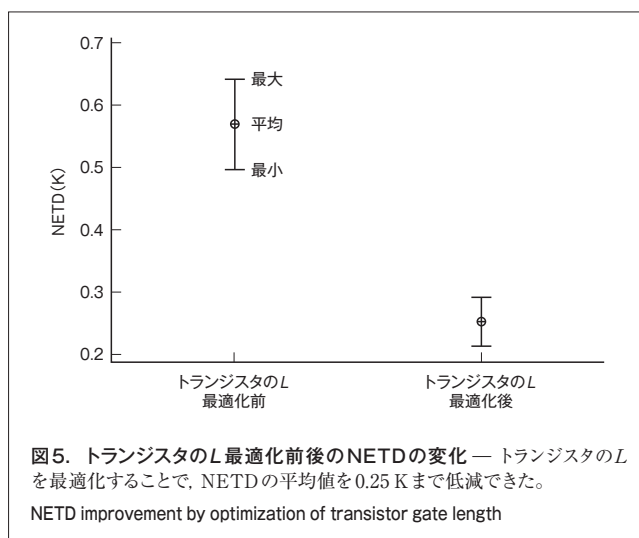


図5. トランジスタの L 最適化前後のNETDの変化 — トランジスタの L を最適化することで、NETDの平均値を0.25 Kまで低減できた。

NETD improvement by optimization of transistor gate length



図6. 屋外での撮像例 — NETDが0.25 Kのセンサを用いて屋外を撮影しており、車両のタイヤ付近など、高温の物体が白く映っている。

Example of outdoor imaging

表1. 非冷却赤外線イメージセンサの基本仕様

Basic specifications of Toshiba infrared image sensor

項目	基本仕様
画素ピッチ	22 μ m
有効画素数	320×240画素
チップサイズ	8.5×8.5 mm
イメージエリアサイズ	7.04×5.28 mm
パッケージサイズ	16×16×1.75 mm
F値*	1.0
フレームレート	30フレーム/s
NETD	0.25 K

*レンズの焦点距離を有効口径で割った値で、レンズの明るさを示す指標

5 あとがき

今回、MEMSプロセスを改善し、画素ピッチを従来品の32 μ mから22 μ mに微細化することで、感度とチップサイズを保ったままで、従来の160×120画素から320×240画素への多画素化を実現した。また、トランジスタの1/fノイズ低減のアプローチからSN比を向上させ、NETD 0.25 Kの非冷却赤外線イメージセンサを実現することができた。

今後は、NETDが0.1 K以下となる高感度化を図るとともに、連続動画撮影に必要なシャッターレス化に挑戦し、いっそうの高機能化を進めていく。

文献

- (1) Ohnakado, T., et al. "Novel readout circuit architecture realizing TEC-less operation for SOI diode uncooled IRFPA". Proc. SPIE 7298. Orlando, FL, USA, 2009-04, SPIE The International Society for Optical Engineering. 2009, p.72980V-1 - p.72980V-10.
- (2) Ueno, R., et al. "Uncooled infrared radiation focal plane array with low noise pixel driving circuit". IDW/AD'09 Proc. Miyasaki, Japan, 2009-12, The Institute of Image Information and Television Engineering and The Society for Information Display. 2009, p.1451 - 1454.
- (3) Funaki, H., et al. "160 x 120 pixel uncooled TEC-less infrared radiation focal plane array on a standard ceramic package". Proc. SPIE 7298. Orlando, FL, USA, 2009-04, SPIE The International Society for Optical Engineering. 2009, p.72980W-1 - 72980W-9.



本多 浩大 HONDA Hiroto

研究開発センター 表示基盤技術ラボラトリー研究主務。
赤外線イメージセンサの研究・開発に従事。
Electronic Imaging Lab.



舟木 英之 FUNAKI Hideyuki

研究開発センター 表示基盤技術ラボラトリー研究主幹。
イメージセンサの研究・開発に従事。
Electronic Imaging Labs.