

温度安定性と応答性を向上させた 遠赤外線イメージセンサ

Far-Infrared Image Sensor with Improved Temperature Stability and Response Speed

石井 浩一 本多 浩大 舟木 英之

■ ISHII Koichi ■ HONDA Hiroto ■ FUNAKI Hideyuki

遠赤外線イメージセンサは、物体から放射される遠赤外線を検知してその温度分布を映像化できる2次元温度センサである。主な用途は、夜間の歩行者検知を目的とした車載システムや、建物・設備の保守及び保全などであり、可視光センサあるいは近赤外線センサでは得られない温度情報に基づく異常検知が可能である。

東芝は、半導体の量産ラインで製造できる、単結晶シリコンを用いた遠赤外線センサデバイスを開発しており、微細半導体プロセスを生かした画素の微細化などを実現してきた⁽¹⁾。しかし一方で、特に屋外で使用する場合に要求される温度安定性や、センサ感度と応答性の両立などに課題があった。これらの課題を解決するために、温度安定性を向上させるための読出し回路、及び感度を維持したまま応答性を向上できる画素構造を開発した。その結果、温度変動に対するセンサ出力変動を従来の1/20に抑制するとともに、応答性を36%改善できることを確認した。

A far-infrared image sensor is a two-dimensional temperature sensor that can visualize temperature distribution by detecting infrared radiation emitted from objects. Far-infrared image sensors make it possible to detect unusual temperature conditions, which is impossible with visible and near-infrared sensors, in the main application fields including automotive night-vision systems for pedestrian detection and the maintenance and surveillance of buildings and facilities.

Toshiba has been developing far-infrared image sensors using single-crystal silicon fabricated on a semiconductor mass-production line, and refined the pixels by applying advanced semiconductor processes. However, the temperature stability required for outdoor use of these sensors and the tradeoff between the sensitivity and response speed are significant issues. To overcome these problems, we have newly developed a read-out circuit to improve the temperature stability and a pixel structure to improve the response speed without reduction of the sensitivity. We have confirmed that, as a result of these developments, the sensor output fluctuation according to the variation in chip temperature is reduced to 1/20 compared with that of the conventional sensor and the response speed is improved by 36%.

1 まえがき

遠赤外線イメージセンサは、物体（被写体）が放射する遠赤外線（波長8～12 μ m）を検知し、温度分布を映像化できるセンサである。暗闇でも人を検知できる特徴を生かして自動車の夜間前方監視システムや、非接触で被写体の温度分布を取得できるため建物や設備の診断などに使用されている。

屋外で使用される用途では、広い環境温度範囲において安定して動作することが要求される。遠赤外線イメージセンサは温度センサであるため、被写体の温度に反応する一方でセンサ自体の温度変化による影響も受ける。すなわち、環境温度の変化に伴ってセンサ温度が変化すると、センサからの出力信号も変化して安定した映像出力を得ることが困難になる。このため、従来はセンサ温度を一定に保持するためにペルチェ素子などが使用されていたが、近年はペルチェ素子が不要なTEC (Thermo Electric Cooler)-less技術が開発されている。

東芝は、遠赤外線に対して感度を持たない参照画素を設け、感度を持つ感熱画素の信号から参照画素の信号を差し引くことで環境温度成分を除去する、TEC-less技術を開発し

た^{(2), (3)}。この技術によって、環境温度変化による影響を大部分除去できるが、読出し回路が持つ温度特性のためにセンサとしての温度安定性は必ずしも十分とは言えなかった。また、参照画素の不感特性が、被写体の条件によって左右されるといった課題もあった。

そこで当社は、これらの課題に対して、読出し回路及び参照画素構造を変更することで温度性能の大幅な改善を実現した。また一般に、センサ温度分解能の指標であるノイズ等価温度差 (NETD: Noise Equivalent Temperature Difference) と応答性 (熱時定数) は二律背反の関係にあるが、当社の微細半導体技術を生かした画素構造の採用により、NETDを増加させることなく応答性も改善できた。

ここでは、遠赤外線イメージセンサの温度安定性と応答性を向上させる技術について述べる。

2 東芝の遠赤外線イメージセンサの温度補償機構

初めに、当社の遠赤外線イメージセンサのTEC-less技術の原理について述べる。センサの有効画素数は320×240画素

であり、感熱画素と温度補償のための参照画素を持つ。

感熱画素と参照画素の構造を図1に示す。感熱画素は外部から入射した遠赤外線セル内で熱に変換し、更に内部のダイオードによって電気信号に変換する。十分な電気信号を得るにはセル内で発生した熱を保持する必要があるため、セル裏面は空洞化され、かつ2本の細い支持脚だけで支えられた断熱構造となっている(図1(a)及び(b))。一方、参照画素はセル最上面に反射膜を設けており、遠赤外線を遮断する構造となっている(図1(c))。

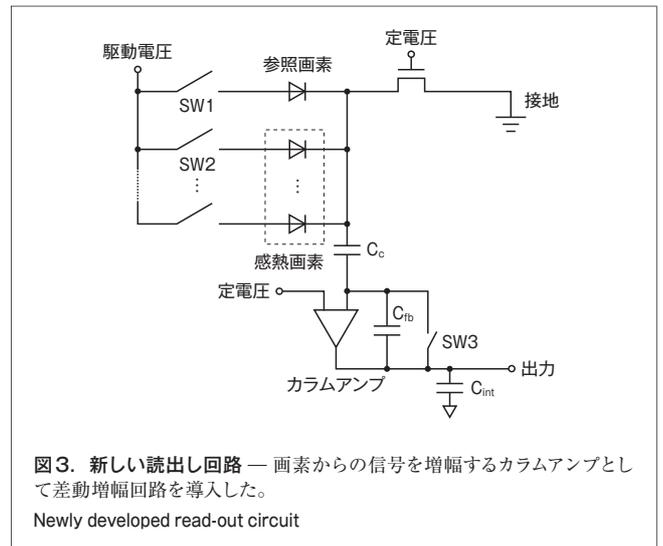
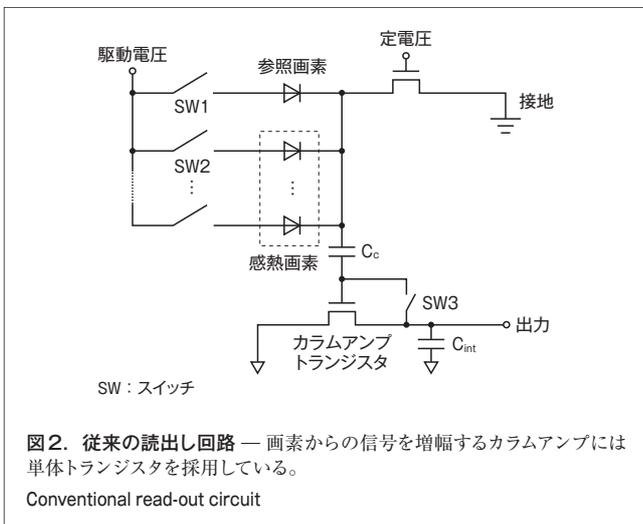
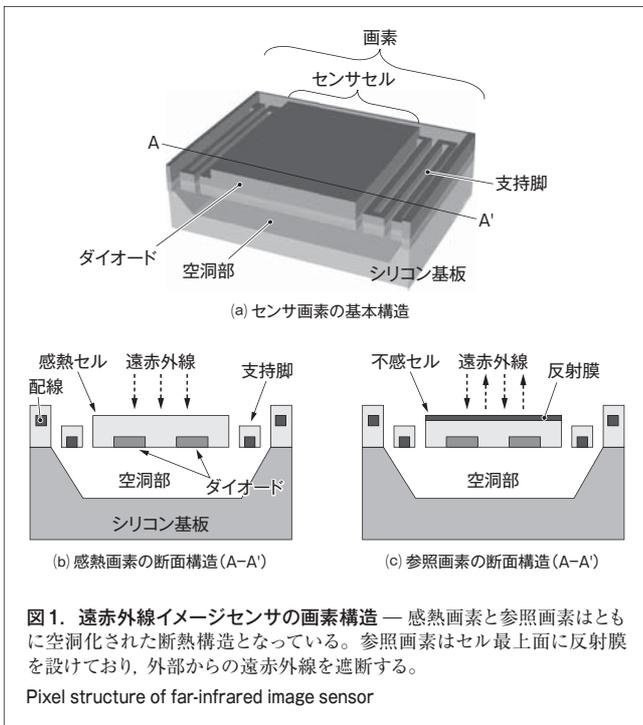
画素からの信号を増幅して読み出す積分型読出し回路の構成を図2に示す。第1行目の参照画素の駆動時(SW1オン, SW3オン)には、参照画素内ダイオードの順方向電圧 V_{fr} とカ

ラムアンプトランジスタのしきい値電圧を反映した電位差が結合容量 C_c 両端にクランプされる。続く第2行目以降の感熱画素の駆動時(SW2オン, SW3オフ)には、参照画素と感熱画素のダイオード順方向電圧の差($V_{fr} - V_{fs}$)だけが反映された電圧がカラムアンプトランジスタのゲート電圧に印加され、積分容量 C_{int} に電荷が蓄積される。ここで、 V_{fs} は感熱画素内ダイオードの順方向電圧である。蓄積された電荷は画素信号として読み出される。 V_{fr} と V_{fs} は同じチップ温度を反映しており、かつ外部からの遠赤外線照射による温度変化は V_{fs} だけに反映されているため、その差分である画素信号は外部からの遠赤外線の情報だけを含み、環境温度を反映したチップ温度の影響は受けない。このように異なる画素を用いた自己相関サンプリング(CDS: Correlated Double Sampling)によって、チップ温度が変化してもその変化分はセンサ内でキャンセルされることになり、TEC-less化が実現できる。

3 読出し回路及び参照画素構造の改善による温度安定性の向上

前述のTEC-less技術は、環境温度による変化がもっとも大きい画素ダイオードの順方向電圧への影響を除去するものである。一方、画素信号を増幅するためのカラムアンプトランジスタも環境温度変化による影響を受けるため、増幅後の画素信号は環境温度に対する安定性が不十分であった。これを解決するため、新しい読出し回路を導入した(図3)。

カラムアンプの単体トランジスタに替えて、二つの容量(C_c , C_{fb})の比で増幅率が決まる差動増幅回路を採用した。TEC-less化の原理は図2の回路と同様であり、参照画素の駆動時(SW1オン, SW3オン)には結合容量 C_c 間の電圧をクランプし、感熱画素の駆動時(SW2オン, SW3オフ)には参照画素ダイオードの順方向電圧との差分だけが増幅され、画素信号と



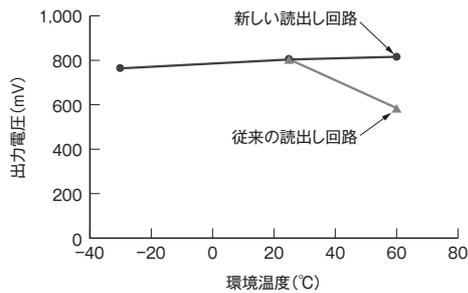


図4. センサ出力電圧の温度依存性 — 新しい読出し回路を用いることにより、従来の読出し回路に比べてセンサ出力電圧の温度安定性が向上した。
Temperature stability of sensor output voltage

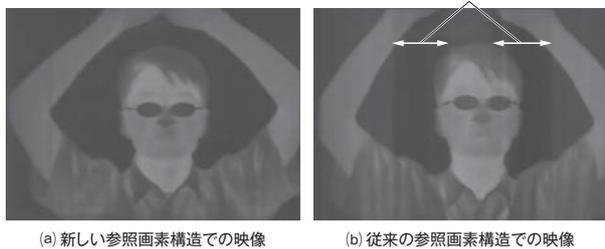


図5. 参照画素構造の違いによる映像比較 — 従来の参照画素構造では尾引き現象が見られたが、新しい参照画素構造の導入により尾引き現象は解消された。
Comparison of infrared images utilizing conventional and newly developed reference pixels

して積分容量 C_{int} に電荷が蓄積される。温度安定性に優れた差動増幅回路を用いることで、センサ全体としての環境温度変化に対する依存性を低減できる。

環境温度を変化させたときのセンサ出力電圧について、従来の読出し回路と新しい読出し回路を比較した結果を図4に示す。環境温度を25°Cから60°Cまで変化させたときの出力電圧は、従来の回路が200 mV以上変化しているのに対して、新しい回路では10 mV程度に抑制された。また新しい回路では、-30°Cまで低下させた場合にも25°Cからの出力電圧変化は50 mV程度であり、センサの温度安定性は大幅に改善された。

一方、前述のとおり従来の参照画素はセル最上面に反射膜を設けており、外部からの遠赤外線を全て遮断することが理想的であるが、実際には完全に遮断することは困難である。これに起因した不具合の例を図5(b)に示す。参照画素は画面の最上行に設けられているが、ここに被写体からの遠赤外線が入射すると(図5(b)では手による)CDSの基準レベルとなる参照画素が反応してしまい、その列の全ての画素レベルが低下する現象(以下、尾引き現象と呼ぶ)が生じている。

この課題を解決するために導入した、新しい画素構造を図6に示す。セル裏面の空洞部形状を変更し、一部がシリコン基板と連結するようになった。この構造を採用することによ

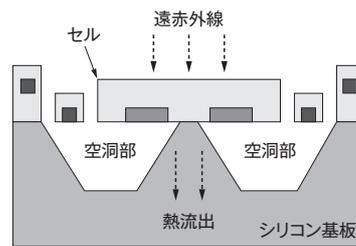


図6. 新しい参照画素の断面構造 — 空洞化形状を変更することにより、外部からの遠赤外線放射による熱を逃がす構造とした。
Cross-sectional structure of newly developed reference pixel

り、セル表面から入射した遠赤外線による熱は直ちにシリコン基板側に流出するため、熱の影響が軽減される。図5(a)は新しい参照画素構造を採用したセンサチップによる映像を示したものであり、尾引き現象がないことがわかる。また、100°Cの被写体が放射する遠赤外線を参照画素に照射しても尾引き現象が発生しないことを確認している。

4 感熱画素構造の改善によるセンサ応答性の向上

センサの性能指標である $NETD$ と応答性(熱時定数 τ_{th}) は二律背反の関係にある。 $NETD$ と τ_{th} はそれぞれ式(1)及び(2)のように表され、両式を G_{th} を介して整理すると式(3)となり、二律背反の関係にあることが導かれる。

$$NETD = \frac{\Delta T}{\frac{S}{N}} = \frac{G_{th} N \Delta T}{I_{in} \eta \beta \frac{dV_f}{dT}} \quad (1)$$

$$\tau_{th} = \frac{C_{th}}{G_{th}}, \quad C_{th} = c \beta t \rho \quad (2)$$

$$\tau_{th} = \frac{A}{NETD}, \quad A = \frac{c t \rho N \Delta T}{I_{in} \eta \beta \frac{dV_f}{dT}} \quad (3)$$

ここで、 ΔT : 被写体の温度差、 S : 信号電圧、 N : ノイズ電圧、 G_{th} : センサセルからシリコン基板までの熱コンダクタンス、 I_{in} : 単位面積当たりの入射遠赤外線エネルギー、 η : センサセルの赤外線吸収係数、 β : センサセルの有効面積、 dV_f/dT : ダイオード熱電変換係数、 C_{th} : センサセルの熱容量、 c : センサセルの比熱、 t : センサセルの厚さ、 ρ : センサセルの密度、である。

センサの応答性を向上、すなわち τ_{th} を下げるためには、式(2)より断熱性を低下 (G_{th} を増加) させるか、セルの熱容量を小さく (C_{th} を低下) すればよい。しかし、 G_{th} を増加させると式(1)より $NETD$ は悪化し、 C_{th} を低下させるために β を縮小しても式(1)及び(2)より同様に $NETD$ が増加する。そこで、 $NETD$ を損なわずに応答性を向上させるセル構造を検討した。具体

的には、当社の微細半導体プロセスを用いてセル内に微細ホールを設けることを試みた。微細ホールを設けると β は低下するが、ホールサイズを遠赤外線波長に対して十分小さくすることで実質的な面積低下は抑制できると考えられる。セル内に $3 \times 3 \mu\text{m}$ の微細ホールを設けたときの微細ホール占有率と τ_{th} との関係を図7に示す。微細ホールの占有率が増えるに

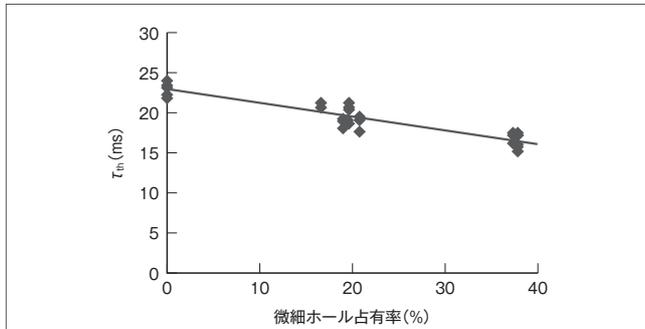


図7. 微細ホール占有率と τ_{th} との関係 — 微細ホール占有率が増加すると C_{th} が低下するため、 τ_{th} は理論どおり減少した。
Relationship between occupation of fine holes and thermal time constant

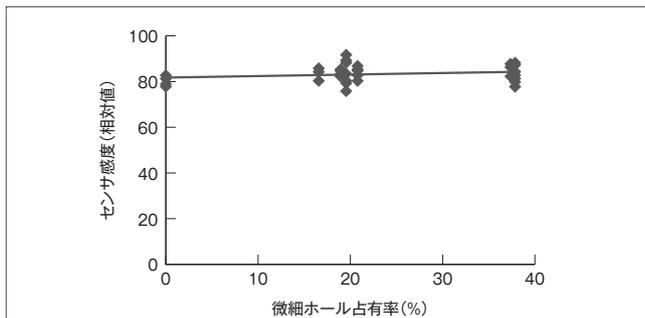


図8. 微細ホール占有率とセンサ感度の関係 — 微細ホール占有率を変化させてもセンサ感度への有意な影響は見られなかった。
Relationship between occupation of fine holes and sensor sensitivity

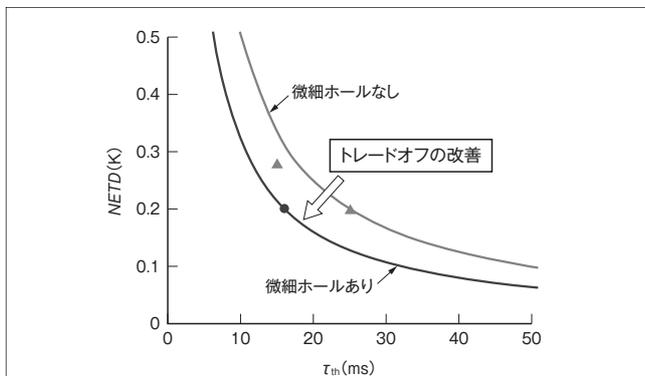


図9. τ_{th} とNETDの関係 — セルに微細ホールを設けることにより、 τ_{th} とNETDのトレードオフが改善された。
Relationship between thermal time constant and noise equivalent temperature difference (NETD)

従って C_{th} が低下するため、式(2)のとおり τ_{th} は減少した。一方、センサ感度との関係を調べると、微細ホール占有率を増加させてもセンサ感度は微細ホールがない場合と変わらなかった(図8)。微細ホールのサイズが遠赤外線波長に対して十分小さいために、遠赤外線吸収量の低下が生じなかったためと考えられる。

NETDと τ_{th} の関係を図9に示す。微細ホールをセルに設けた新しい画素構造を採用することにより、両パラメータのトレードオフは改善され、NETDが0.2 Kにおいて τ_{th} は25 msから16 msに36%向上した。

5 あとがき

遠赤外線イメージセンサの環境温度安定性を向上させるために読み出し回路の変更を行い、環境温度に対するセンサ出力変動を従来の1/20以下に抑制した。また、参照画素の構造を変更することで従来生じていた尾引き現象をなくすことができた。更に当社の微細半導体プロセスを用いてセンサセル内部に微細ホールを設けることで、センサ感度と応答性のトレードオフを改善し、センサ感度を維持したまま応答性を36%向上できた。

今後、センサ感度の向上を含めてセンサ性能の更なる改善を図るとともに、量産を見据えた課題の克服に取り組んでいく。

文献

- (1) 本多浩大 他. 画像解像度が向上した非冷却赤外線イメージセンサ. 東芝レビュー. 65, 6, 2010, p.32-35.
- (2) Funaki, H. et al. A 160 x 120 pixel uncooled TEC-less infrared radiation focal plane array on a standard ceramic package. Proc. SPIE. 7298, 2009, p.72980W-1 - 72980W-9.
- (3) Honda, H. et al. A 320 x 240 pixel uncooled TEC-less infrared radiation focal plane array with the reset noise canceling algorithm. Proc. SPIE. 7660, 2010, p.76600Z-1 - 76600Z-10.



石井 浩一 ISHII Koichi

研究開発センター 表示基盤技術ラボラトリー主任研究員。
イメージセンサの研究・開発に従事。
Electronic Imaging Lab.



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。
イメージセンサの研究・開発に従事。
Electronic Imaging Lab.



舟木 英之 FUNAKI Hideyuki, D.Eng.

研究開発センター 表示基盤技術ラボラトリー研究主幹, 博士(工学)。イメージセンサの研究・開発に従事。応用物理学会, IEEE会員。
Electronic Imaging Lab.