

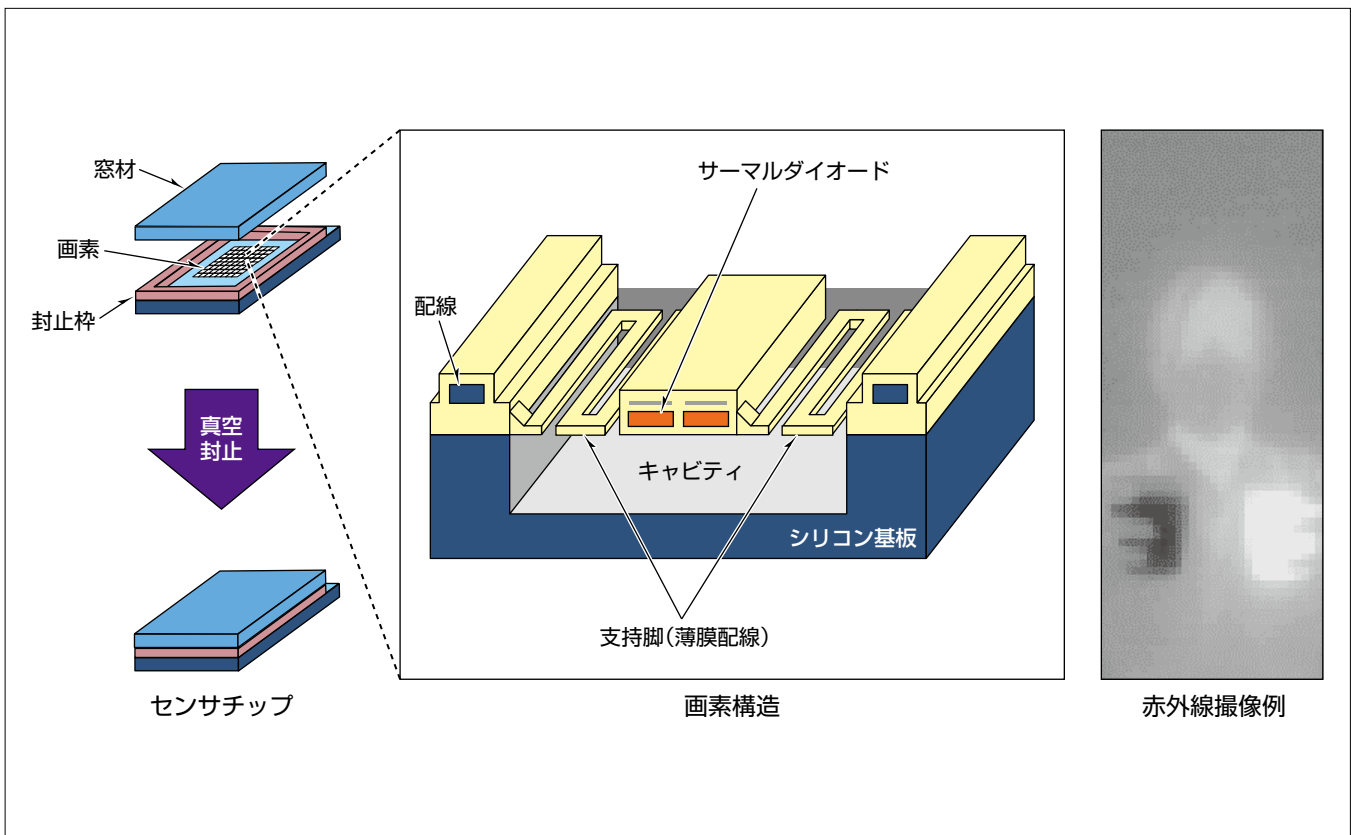
サーマルダイオード赤外線センサ技術

Thermal Diode Infrared Sensor Technology

要 旨

赤外線センサで用いられる波長帯は、大気の窓と呼ばれる、大気が赤外線をよく透過する波長帯から、1～3μm帯(短波長赤外)、3～5μm帯(中波長赤外)、8～14μm帯(長波長赤外)に分けられ、各波長帯はそれぞれ特徴があり、用途・使用条件に応じて選択される。常温物体からは10μm近傍の赤外線が最も多く放射されることから、これらの波長帯のうち8～14μm帯を検知対象とした赤外線センサは、常温物体の検知に優れている。赤外線センサは、検出原理の違いから冷却型(量子型)と非冷却型(熱型)に大別され、特に非冷却赤外線センサは、冷凍機が不要であることから、防犯機器、空調機器、スマートビルなどの幅広い分野で使用されてきたが、最近では、ウィズコロナへの対策と

して、発熱者のスクリーニングなどでの非接触体温計測へのニーズも急速に高まっている。非冷却型の赤外線イメージセンサは、シリコン基板上に断熱構造を持つ画素(温度センサ)を二次元アレーとして形成したもので、温度センサとしては、ボロメータ、サーモパイル、強誘電体、ダイオードなど様々なものが用いられている。三菱電機が開発を行う赤外線イメージセンサは、温度センサ部にシリコン単結晶でできたダイオードを使用しており、高温分解能化(<100mK)を実現し、0.1℃単位での温度分析を可能にしている。また、センサの使用環境に応じた信号補正技術や、温度センサ高感度化技術によって、温度計測の高精度化につながる。



サーマルダイオード赤外線センサ

サーマルダイオード赤外線センサの画素構造と80×32画素センサによる赤外線撮像例を示す。

1. ま え が き

非冷却赤外線イメージセンサは、Si(シリコン)-LSI技術とマイクロマシニング技術が融合した代表的なセンサであり、近年の非冷却赤外線イメージセンサ性能は、マイクロマシニング技術の発展によって着実に向上している。非冷却赤外線イメージセンサには幾つかの方式があるが、当社は、温度センサとしてSOI(Silicon On Insulator)層に形成した単結晶Siダイオードを用いるサーマルダイオード方式を提案し、開発してきた⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。この方式は、温度センサ部にSi単結晶でできたダイオードを使用しており、イメージセンサの画面内感度均一性が優れているという特長を持つ。非冷却赤外線イメージセンサに対する要求には、低コスト化に寄与する画素サイズ縮小や高解像度の撮像を目的とした多画素化などがあり、開発が進められてきた。

本稿では、民生向けなど市場の拡大フェーズにあるサーマルダイオード赤外線センサ技術について述べる。

2. サーマルダイオード赤外線センサ

2.1 サーマルダイオード

サーマルダイオード赤外線センサの画素断面図を図1に示す。サーマルダイオードが形成された温度センサ部は、基板内に形成された空洞の上に支持脚で保持された高断熱構造を持っており、入射赤外線量に応じてサーマルダイオードの温度が変化するようにになっている。ダイオードには、外部から順バイアスによって一定電流を流しておき、入射赤外線量をダイオードの温度変化による順方向電圧の変化として読み出す。入射赤外線によって温度センサであるサーマルダイオードの温度が高くなると、定電流動作で順方向電圧 V_f が低くなるサーマルダイオードの特性を用いている(図2)。また、サーマルダイオード赤外線イメージセンサの被写体温度感度は、サーマルダイオードの順方向電圧 V_f の温度変化係数 dV_f/dT に比例する。温度変化係数はダイオードの直列個数に依存するため、駆動(電源)電

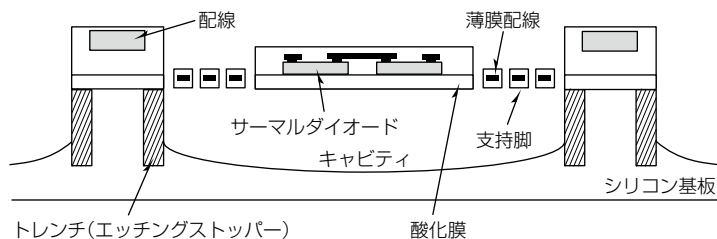


図1. 画素断面図

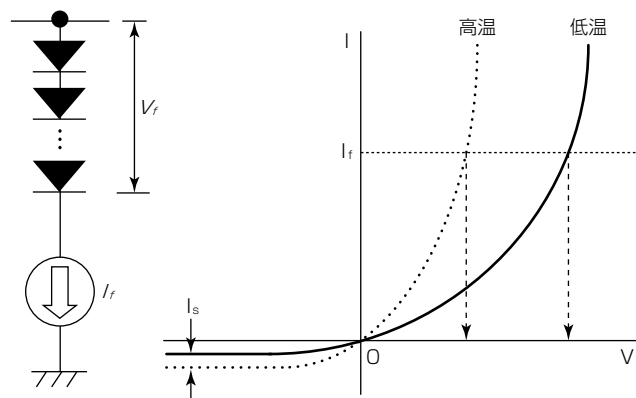


図2. サーマルダイオード特性

圧の範囲内でダイオードの直列個数を増やすことがセンサの高感度化に寄与する。

2.2 チップスケールパッケージング

非冷却赤外線イメージセンサは、シリコン基板上に断熱構造を持つ画素(温度センサ)を形成したもので、温度センサであるサーマルダイオードを、最終的に真空保持する必要がある。従来は、センサ全体をセラミックパッケージ等で、真空封止する方法が一般的であったが、コストやサイズの増大を引き起こしていた。この課題を解決するために、図3に示すように画素領域を取り囲むように封止枠を形成し、赤外線透過する窓材として張り合わせ、画素部分だけを真空で封止するチップスケールパッケージング技術を開発した(図4)。この技術によって、従来のセラミック

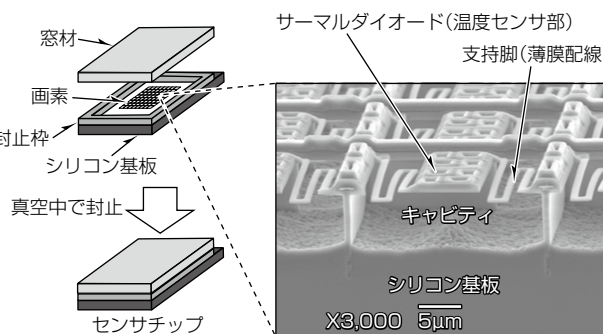


図3. チップスケールパッケージ

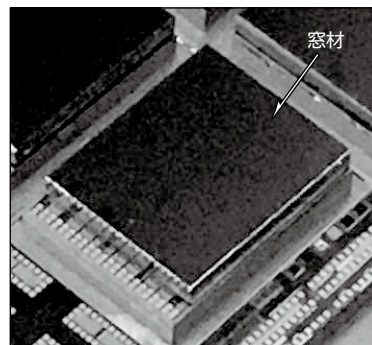


図4. センサチップ一例

パッケージを不要にし、センサの大幅な小型化を実現している。

2.3 被写体温度計測

サーマルダイオード赤外線センサの出力は、被写体放射率、被写体温度、センサ温度、センサモジュール温度の関数である。よって、サーマルダイオード赤外線センサは、各画素出力のオフセット、光量に対する感度及びそれらの温度特性によってセンサ出力が変動する。そのため、一定期間ごとにシャッターを閉じ、一様温度の被写体(シャッター)を見せ、各画素の特性を補正する処理が必要である。被写体温度に対するセンサ出力の環境温度依存性の一例を図5に示す。

当社が採用しているサーマルダイオード方式は、単結晶Siダイオードを用いているため、通常のセンサ使用環境温度範囲であれば、線形に近い特性を持っている。そのため、環境温度2条件(20℃、40℃)のデータを基にした2点による信号補正でも、図6に示すように、FPN(Flat Pattern Noise)は、0.1℃以下であり、0.1℃単位での温度分析にも

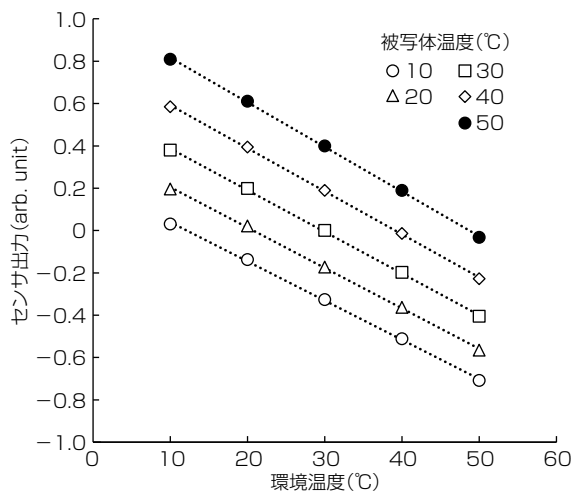


図5. センサ出力の環境温度依存性

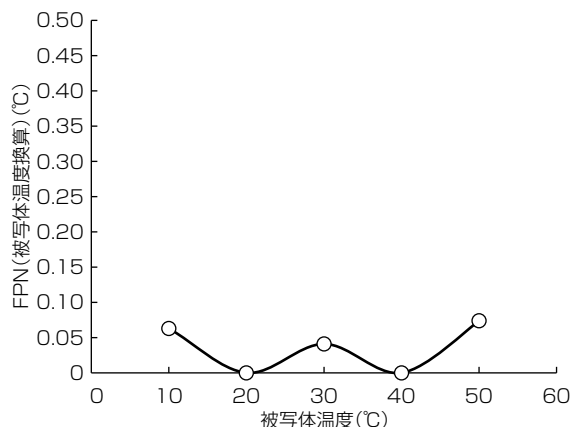


図6. FPN特性(環境温度: 20℃)

十分な性能を実現できる。ここでFPNは、温度が一様な被写体を撮像した際のサーマルダイオード赤外線イメージセンサの各画素出力の標準偏差を被写体温度換算したものであり、特性としては、より小さい値が好ましい。

3. 赤外線センサの高性能化開発

3.1 サーマルダイオード縮小化技術

サーマルダイオード赤外線センサの二次元画素アレーでの各画素の画素縮小(図7)は、センサチップサイズの縮小を実現し、低コスト化と、光学系を含むセンサモジュールの小型化を可能にする。そのため、画素縮小の取組みは、非冷却赤外線センサの開発動向として、一つの重要な流れになっている。例えば、画素ピッチを25μmから17μmに縮小した場合、画素面積は半減することになり、温度センサ部の面積は著しく減少するため、感度を維持するには、①温度センサ高感度化や、②支持脚の高断熱化が必要である。

サーマルダイオード方式では、ダイオードの直列個数を増加させるほど感度が向上するという特徴を持つことから、ダイオード1個当たりの面積低減が重要になる。図8に示すように、従来はPNダイオードを酸化膜の分離領域で分離して直列接続するのに対して、PNダイオードとNPダイオードをペアとし、分離領域なしで接続する2in1ダイオード構造を開発した。この構造によってダイオード面積の15%以上の削減が実現できる。

3.2 高感度読み出し回路技術

サーマルダイオード赤外線センサの高感度化は、被写体温度計測の高精度化にとっても重要である。感度向上手段の一つとして、3.1節に述べたように温度センサ部のダイ

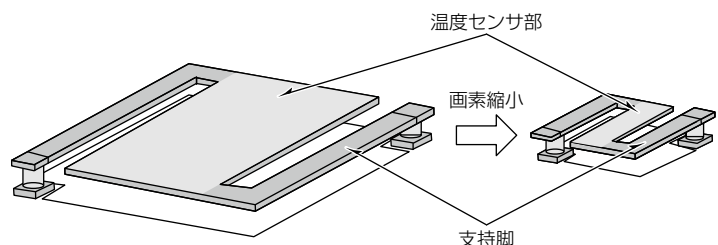


図7. 画素縮小化

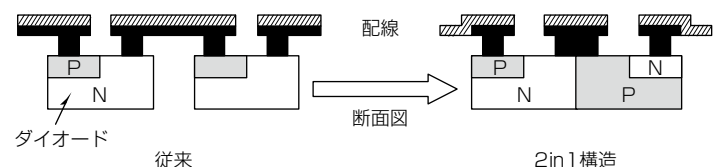


図8. サーマルダイオードの小型化

オード直列個数を増加させる方法があり、この場合には、使用する電源電圧を上昇させる必要がある。電源電圧の制約がある場合には、ダイオード直列個数を変えずに、**図9**に示す高感度読み出し回路による感度向上が可能である。

ダイオードの温度が上昇(下降)すると順方向電圧 V_f は減少(増加)する。電源電圧から V_f を引いた電圧である M_d のゲート電圧は増加(減少)し、 M_d の電流は減少(増加)する。この電流減少(増加)はカレントミラー回路によってダイオード電流 I_f を減少(増加)させる。これによって、ダイオードの順方向電圧は更に減少(増加)する(**図10**)。そのため、**図9**に示す回路構成によれば、ダイオードの順方向電圧 V_f 変化とダイオード電流 I_f 変化に正帰還ループを施しているため、ダイオード1個で得られる画素出力電圧変化以上の出力電圧変化が得られ、ダイオード1個当たりで従来以上の感度を実現する。この高感度読み出し回路を適用したセンサ出力特性を**図11**に示す。

その結果、高感度読み出し回路の適用によって、ダイ

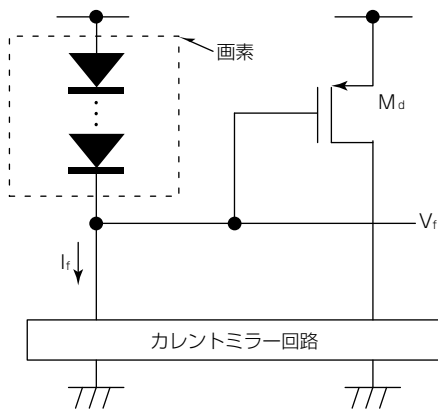


図9. 高感度読み出し回路構成例

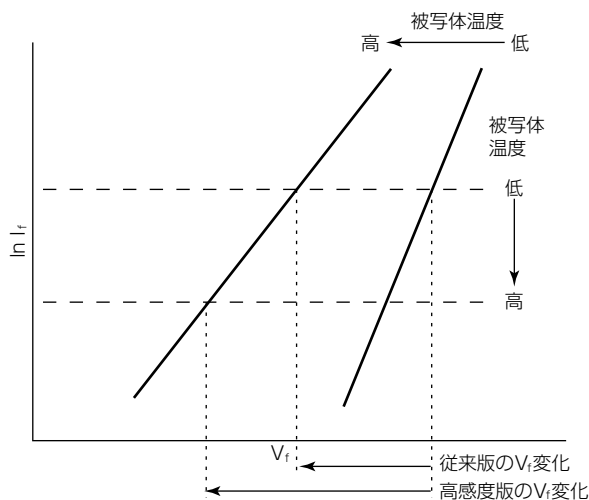


図10. サーマルダイオードの電圧-電流特性

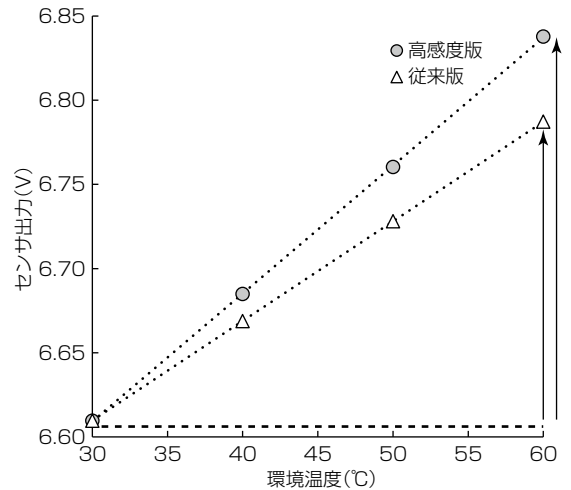


図11. 高感度読み出し回路による出力特性

オードの温度変化係数 dV_f/dT は、 1.9mV/K (1個当たり)になり、従来版読み出し回路の約1.3倍(1個当たり)の温度変化係数 dV_f/dT を実現している。この回路構成をアレー化する場合には、正帰還回路、電流源及び積分回路を、アレー状に配列された複数の画素の列ごとに設ける。

4. む す び

サーマルダイオード赤外線センサ技術について述べた。サーマルダイオード赤外線センサは、温度センサが、Si-LSI技術で製造できるため、低価格化及び量産化に適した方式と言える。このセンサの用途としては、防犯、見守り、空調・照明・機器制御、人数カウント、体温測定・監視などに適用できる。今後、安価な赤外線センサは、民生分野で、ますます重要になってくると考えられ、サーマルダイオード赤外線センサが赤外線センサの新たな用途を作り出すキーデバイスになることが期待される。

参 考 文 献

- (1) Takamuro, D., et al.: Development of new SOI diode structure for beyond $17\mu\text{m}$ pixel pitch SOI diode uncooled IRFPAs, Proc. SPIE, **8012**, 80121E (2011)
- (2) Fujisawa, D., et al.: Two-million-pixel SOI diode uncooled IRFPA with $15\mu\text{m}$ pixel pitch, Proc. SPIE, **8353**, 83531G (2012)
- (3) Fujisawa, D., et al.: Multi-color imaging with silicon-on-insulator diode uncooled infrared focal plane array using through-hole plasmonic metamaterial absorbers, Proc. MEMS, 905~908, IEEE (2015)
- (4) Fujisawa, D., et al.: Implementation of SOI diode uncooled IRFPA in TEC-less and shutter-less operation, Proc. SPIE, **10624**, 1062421 (2018)
- (5) Fujisawa, D., et al.: Development of shutter-less SOI diode uncooled IRFPA for compact size and low power consumption, Proc. SPIE, **11002**, 110022C (2019)
- (6) Fujisawa, D., et al.: Development of new pixel structure for beyond $12\text{-}\mu\text{m}$ pixel pitch SOI diode uncooled IRFPAs, Proc. SPIE, **11407**, 114071A (2020)