

## 赤外イメージング技術の現状

木 股 雅 章

赤外イメージングにとって重要な波長帯は 8~14  $\mu\text{m}$  帯 (long wavelength infrared: LWIR), 3~5  $\mu\text{m}$  帯 (medium wavelength infrared: MWIR), 1~3  $\mu\text{m}$  帯 (short wavelength infrared: SWIR) の 3 つの大気の窓に対応する波長帯である。このうち LWIR 波長域では室温で動作する熱型検出器を用いた赤外イメージセンサー (focal plane array: FPA) が実用レベルとなり最近の大きな話題となっているが, MWIR と SWIR の波長帯では量子型検出器を用いた FPA が実用レベルに達してからすでに 10 年前後が経過しており, 完成度の高い技術を比較的手軽に利用できる状況になっている。

MWIR と SWIR 波長域の量子型 FPA の中で, PtSi ショットキーバリアーを用いた方式<sup>1,2)</sup>では Si ULSI 用に開発された大きな Si 基板と微細加工技術を活用して非常に高い解像度が実現されており, 高い量子効率を特長とする化合物半導体 FPA と競いながら独自の地位を築きつつある。

本稿では赤外イメージング技術のなかで特に PtSi ショットキーバリアー FPA 技術に焦点を絞り, MWIR および SWIR 波長帯への具体的適用例などを示しながら, 高解像度化, 高感度化の動向を解説する。

### 1. PtSi ショットキーバリアー FPA 技術

ショットキーバリアー検出器は内部光電子放出というメカニズムで光検出を行う。内部光電子放出機構では入射した赤外線はショットキーバリアー・ダイオードを構成する金属電極部分で吸収され, 光により励起されたキャリアー (n 型半導体では電子, p 型半導体では正孔) がショットキ

ーバリアーを超えて半導体中に放出されて光を検出する。ショットキーバリアー検出器で検出可能な光の最低エネルギーはショットキーバリアーのバリアー高で決まるが, バリアー高は基板である半導体のバンドギャップエネルギーより小さいので, ショットキーバリアー検出器を用いて基板半導体では検出できなかった波長の光を検出することができる。本稿の主題である p 型 Si と PtSi (Pt と Si が作る合金で白金シリサイドと呼ばれる) のショットキーバリアー・ダイオードはバリアー高が 0.2 eV 前後で, カットオフ波長が約 6  $\mu\text{m}$  となるので SWIR から MWIR の波長域の赤外イメージングに用いることができる。

図 1 は PtSi ショットキーバリアー赤外線イメージセンサーの代表的な構造を示した断面図である。この例は赤外線が Si 基板裏面側から入射する裏面入射方式を示しており, 赤外線を吸収する薄い PtSi 膜の上に誘電体膜を介して Al の反射膜を配置し, 光学的共振構造を構成することで光吸収の効率を高めている。光電変換で正孔が Si 中に放出されると金属電極側 (PtSi 側) には実効的に電子が蓄積されることになり, 蓄積された電子が一定の蓄積期間後トランスファーゲート (TG) を通して CCD に読み出される。

PtSi ショットキーバリアー FPA の最も重要な特長は図 1 に示したモノリシック構造が Si ULSI 技術を利用して製造できることである。Pt は古くから Si 技術の中で使用されてきた材料であり, 汚染を嫌う Si プロセスへも容易に導入できる。PtSi 形成は Si 基板上に蒸着した Pt と基板 Si を 300~500°C で固相反応させることで行われ, 高温処理に対する耐性はないが, 読み出し回路形成の高温プロセスをすべて終了した後 PtSi 形成を行うようにプロセス・フローを組むことができるので, 図 1 に示すようなモノリシック構造を通常の Si 量産ラインで製造することは難し

三菱電機(株)先端技術総合研究所 (〒661-8661 尼崎市塚口本町 8-1-1)  
E-mail: kimata@med.edl.melco.jp

くない。競合技術である狭バンドギャップ化合物半導体を用いたFPAではモノリシック構造の実現はきわめて難しく、PtSiショットキーバリアーFPAが多画素化の面で常に優位性を保ち続けているのはこの特長によるところが大である。

高い感度均一性もPtSi FPAの重要な特長である。PtSi FPAでは大規模FPAでも感度ばらつき1% rms以下を実現することは可能であり、ある程度の温度範囲であればオフセット補正を行うだけで十分な性能が得られる。競合する化合物半導体FPAと比較して量子効率の面で不利なPtSiショットキーバリアーFPAが、得られる画質の面で十分な競争力をもっているのは、赤外イメージングでは感度均一性が画質を決める重要な要因のひとつになっているためである。

## 2. MWIR用FPA

MWIR波長帯のイメージングを行うPtSiショットキーバリアーFPAとしては1978年に報告された25×50画素のFPA<sup>3)</sup>から始まり1991年末の1,040×1,040画素の

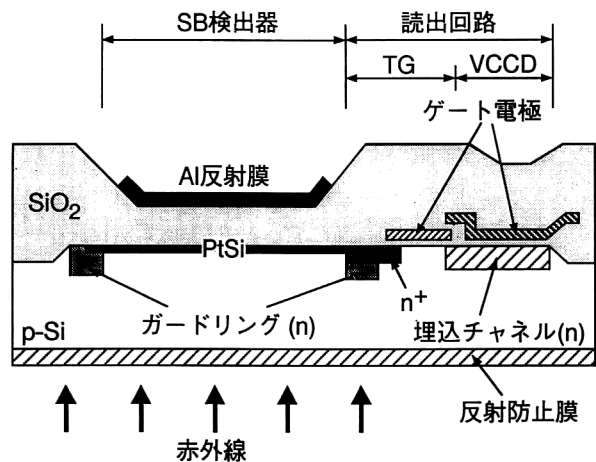


図1 PtSiショットキーバリアーFPAの画素構造。

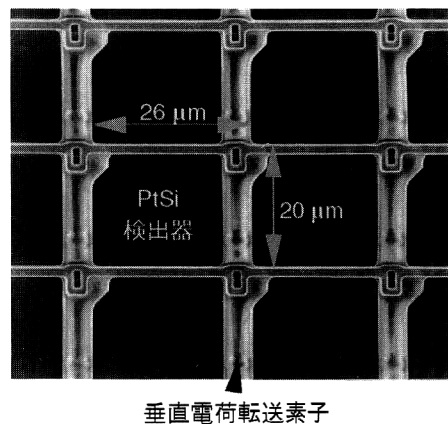


図2 高開口率PtSiショットキーバリアーFPAの画素。画素サイズは26×20 $\mu\text{m}^2$ で開口率は71%。

表1 代表的なMWIR用PtSiショットキーバリアーFPA。

画素数	方式	画素サイズ( $\mu\text{m}$ )	開口率(%)	飽和(M電子)	NETD(mK)	文献
512×512	CSD	26×20	39	1.30	70 [f/1.2]	5
512×488	IL-CCD	31.5×25	36	0.55	70 [f/1.8]	6
512×512	LACA	30×30	54	0.40	100 [f/1.8]	7
640×486	IL-CCD	25×25	54	0.55	100 [f/2.8]	8
640×480	MOS	24×24	38	1.50	60 [f/1.0]	9
640×488	IL-CCD	21×21	40	0.50	100 [f/1.0]	10
640×480	HB/MOS	20×20	80	0.75	100 [f/2.0]	11
1,040×1,040	CSD	17×17	53	1.60	100 [f/1.2]	4
512×512	CSD	26×20	71	2.90	33 [f/1.2]	12
811×508	IL-CCD	18×21	38	0.75	60 [f/1.2]	13
801×512	CSD	17×20	61	2.10	36 [f/1.2]	14

NETD: 雑音等価温度差 (noise equivalent temperature difference). NETD欄の [ ] 内は光学系のf値 (レンズの明るさ) を示している。CSD: Charge sweep device, IL-CCD: interline transfer CCD, LACA: line-addressed charge accumulation, HB: hybrid.

アドレス読み出しと高速垂直転送の組み合わせにより、非常に狭いチャンネル幅の垂直電荷転送素子で多量の信号電荷を転送できるようにして開口率を改善している。図2に示した例は1.2  $\mu\text{m}$  の設計基準で設計された26 $\times$ 20  $\mu\text{m}^2$  の画素で、開口率は71%とモノリシック構造では最大である。高背景のMWIR 波長域のイメージングではFPAの飽和電子数が最大感度を決定してしまうことがあるが、この高開口率FPAでは飽和電子数を $2.9\times 10^6$  電子まで高め、雑音等価温度差33 mK ( $f/1.2$ ) を達成している<sup>12)</sup>。

赤外FPAとして最も高い解像度を実現しているのは1,040 $\times$ 1,040画素のPtSiショットキーバリアーFPAで



図3 PtSiショットキーバリアーFPAを搭載した赤外カメラ。

表2 PtSiショットキーバリアーFPAを搭載した赤外カメラの仕様。

項目	仕様
赤外線検出器	PtSiショットキーバリアーIRCS
画素数(画素)	41万(水平801 $\times$ 垂直512)
フィールドレート	60フィールド/秒
波長帯( $\mu\text{m}$ )	3~5
素子冷却方式	スターリングサイクルクーラー
NETD	0.08 K以下
視野角	14 $^{\circ}$ $\times$ 11 $^{\circ}$
電源入力	DC 18~30 V, 45 W
寸法(mm)	128(W) $\times$ 250(D) $\times$ 131(H)
質量(kg)	5

表3 衛星搭載PtSiショットキーバリアーリニアFPA。

	JERS-1/OPS-SWIR	EOS-AM1/ASTER
衛星/放射計	JERS-1/OPS-SWIR	EOS-AM1/ASTER
画素数(画素/バンド)	4,096	2,100
バンド数(バンド/チップ)	4	6
検出器サイズ( $\mu\text{m}$ )	10(CT) $\times$ 10(AT)	20(CT) $\times$ 17(AT)
画素ピッチ( $\mu\text{m}$ )	10(CT) $\times$ 20(AT)	16.5(CT) $\times$ 33(AT)
画素配列	スタガ	スタガ
バンドピッチ(mm)	1.33	1.33
チップサイズ(mm)	49.4 $\times$ 7.0	48.0 $\times$ 10.5
信号読み出し方式	4相BCCD 2 CCD/バンド	4相BCCD 2 CCD/バンド
出力数	2出力/バンド	2出力/バンド
製造プロセス	2 Poly/2 Al	2 Poly/2 Al
設計基準( $\mu\text{m}$ )	3	3
パッケージ	SiC-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiC	SiC-AlN-SiC
検出バンド( $\mu\text{m}$ )	1.60~1.71, 2.01~2.12, 2.13~2.25, 2.27~2.40	1.600~1.700, 2.145~2.185, 2.185~2.225, 2.235~2.285, 2.295~2.365, 2.360~2.430

ある<sup>4)</sup>。このFPAもCSD方式を採用している。こうした大規模なFPAでは読み出し周波数が問題となるが、このFPAでは画素アレイを4つのサブアレイに分割し、各サブアレイからの信号を別々の出力端子から読み出すことによって、10 MHzのクロック周波数でのテレビフレームレート動作を可能にしている。こうした構成にしても各サブアレイ間に光学的に不連続な領域を設ける必要はなく、画像としては実質的に単一のFPAから得られるものと全く変わりはない。

PtSiショットキーバリアーFPAを搭載した赤外カメラはすでに多機種販売されている。化合物半導体FPAを用いたものや非冷却FPAを用いたものが6万~8万画素の解像度レベルであるのに対し、PtSiショットキーバリアーFPAを用いた赤外カメラでは26万~41万画素の解像度をもったものが生産されている。図3、表2に41万画素PtSiショットキーバリアーFPAを搭載した赤外カメラの外観と仕様を示す<sup>15)</sup>。このカメラに用いられているFPAの感度不均一性は0.3% rmsと小さく、カメラレベルの雑音等価温度差は $f/1.2$ の光学系を用いた場合80 mKと高感度である。

### 3. SWIR用FPA

SWIR 波長域では、人工衛星からのリモートセンシングと天文観測で大規模なPtSiショットキーバリアーFPAが活用されている。

人工衛星からのリモートセンシングではプッシュブルームという観測手法が採用されている。この手法は地上数百kmの太陽同期準回軌道を周回する衛星で地球表面からの太陽光反射を捉えるもので、衛星進行方向の走査は衛星の運動を利用して行うので、これと直角方向に画素を1次元に並べたFPAが用いられる。資源探査などの目的では数

十 km の範囲を 20~30 m という分解能で観測する必要があるので、数千画素という大規模 FPA が必要とされ、Si 技術を基盤とした PtSi ショットキーバリアー FPA が特長を生かせる応用分野である。

表 3 に衛星搭載を目的に開発された PtSi ショットキーバリアー FPA の仕様を示す。この中のひとつは 1992 年に打ち上げられた JERS-1 (Japanese Earth Resources Satellite-1) に搭載されたもので<sup>16)</sup>、もうひとつは 1998 年夏に打ち上げを予定されている EOS-AM1 (Earth Observing System-AM1) に搭載される FPA<sup>17)</sup> である。これらの衛星の搭載される観測システムは SWIR 波長域内で分光観測を行うように設計されているが、表に示した 2 つの FPA は冷却やバンド間のレジストレーションを容易にするためそれぞれ 4 バンド、6 バンドを 1 つの FPA チップ上に集積しており、チップ面積は 400 mm<sup>2</sup> 前後と非常に大きくなっている。表 3 に示した 2 つの FPA では、こうした大きな面積の中で欠陥数ゼロ、感度ばらつきを 5% p-p 以下を達成している<sup>17)</sup>。

衛星搭載リニア FPA のような大きな素子では、温度サイクルに対する信頼性と低温動作状態での FPA の反り (パッケージと FPA チップの膨張係数の差による反り) が

大きな問題になる。この問題を解決するために FPA の実装には特に注意が払われている。図 4 は EOS-AM1 用リニア FPA の実装方法を示す図である。パッケージの主要部分である蓋とベース板には Si に近い膨張係数を持ち熱伝導率も大きな SiC を使用しており、この 2 つの部品で高い電氣的絶縁性を要求される配線板をはさむ構造になっている。配線板には AlN を用いている。分光は Si 基板上に蒸着した干渉フィルターで行っており、干渉フィルターは保持構造体を介してパッケージに接着されている。この構造により動作温度である 80 K 前後で長さ 50  $\mu$ m 近い FPA チップ全体にわたって反り 15 mm 以下を達成しており、350 K と 77 K との間の 4,000 回の温度サイクルに耐えることが確認されている。

天文観測で観測波長を可視光域から SWIR 域に延ばすことで、より低温の星の観測や可視光を散乱する宇宙のダストを通した観測が可能となる。天文観測には高解像度の 2 次元 FPA が用いられる。国内ではこれまでに 512×512 画素および 1,040×1,040 画素の PtSi FPA を使った天文観測用カメラが開発されており<sup>18,19)</sup>、すでに実際の観測に使用されている。FPA は 2 章で示した MWIR 用のものを流用しているが、カメラ設計は MWIR 用とは大きく異なり、非常に低い暗電流と雑音が達成できるよう工夫がされている。図 5 は東京大学木曾観測所の 105 cm シュミット望遠鏡の主焦点に天文観測用 1,040×1,040 画素 PtSi FPA カメラを取り付けた様子を示している。このカメラは読み出し雑音は 30 電子以下で、58 K の動作温度で暗電流は 6 電子/秒と非常に小さい<sup>19)</sup>。このカメラに使用されている FPA の飽和電子数は  $1.6 \times 10^6$  電子であるので、原理的には光入射のない状態でフルウェルになるまで 74 時間もの蓄積が可能であり、実際の観測では微弱な星の光を捉えるために長時間の蓄積を行うことで S/N を改善している。

PtSi ショットキーバリアー FPA を搭載したイメージン

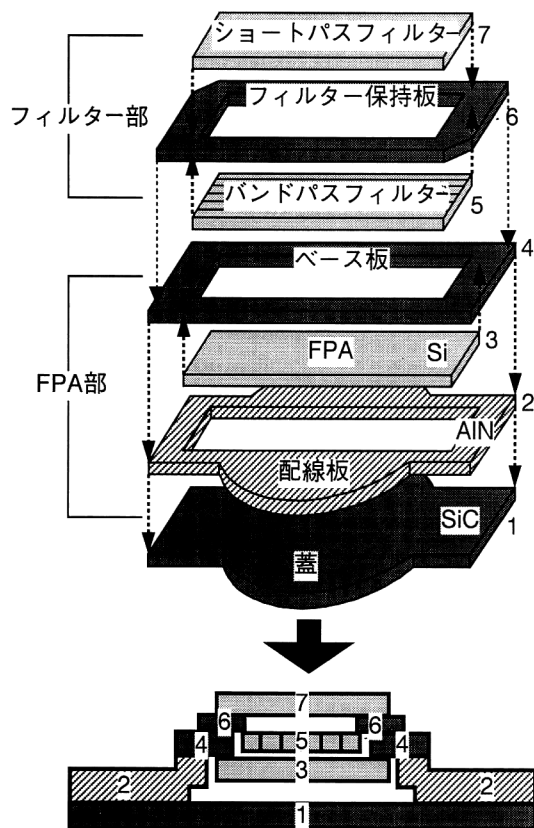


図 4 衛星搭載用 PtSi ショットキーバリアーリニア FPA の実装方法。



図 5 天文観測用赤外カメラがセットされた東京大学木曾観測所 105 cm シュミット望遠鏡内部。使用されているのは 1,040×1,040 画素 PtSi ショットキーバリアー FPA (東北大学市川隆氏写真提供)。

グシステムは MWIR, SWIR 両波長域で活躍を続けている。2次元 FPA としては 100 万画素を超える集積度をすでに実現しており、リニア FPA も 4096 画素まで高解像度化が進んでいる。量子効率は化合物半導体を用いたものに比べ低いが、開口率の改善等の努力でイメージングシステムの性能指標である雑音等価温度差は 33 mK まで向上しており、ほとんどの応用に対応できるレベルに達している。今後も PtSi ショットキーバリアー FPA 技術は Si ULSI 技術の発展の恩恵を受けながら着実に進歩してゆくものと考えられる。

## 文 献

- 1) F. D. Shepherd and A. C. Yang: "Silicon Schottky retinas for infrared imaging," *IEDM—International Electron Devices Meeting* (IEEE, 1973) pp. 310-313.
- 2) M. Kimata and N. Tsubouchi: "Schottky-barrier photoemissive detectors," *Infrared Photon Detectors*, ed. A. Rogalski (SPIE Press, Bellingham, 1995) pp. 299-349.
- 3) B. Capone, L. Skolnik, R. Taylor, F. Shepherd, S. Roosild, W. Ewing, W. Kosonocky and E. Kohn: "Evaluation of a Schottky IRCCD staring mosaic focal plane," *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **156** (1978) 120-130.
- 4) N. Yutani, H. Yagi, M. Kimata, J. Nakanishi, S. Nagayoshi and N. Tsubouchi: "1040×1040 element PtSi Schottky-barrier IR image sensor," *IEDM—International Electron Devices Meeting* (IEEE, 1991) pp. 175-178.
- 5) M. Kimata, M. Denda, N. Yutani, S. Iwade and N. Tsubouchi: "A 512×512 element PtSi Schottky-barrier infrared image sensor," *IEEE J. Solid-State Circuits*, **SC-22** (1987) 1124-1129.
- 6) H. Elabd, Y. Abedini, W. Shieh, J. Kim, M. Shih, J. Chiu, F. Nicol, W. Petro, J. Lehan, M. Duron, M. Manderson, S. Otto, C. Diaz, S. Lam, H. Balopole, P. Coyle, P. Cheng and R. Marin: "488×512- and 244×256-element monolithic PtSi Schottky IR focal plane array," *SPIE Symp. Int. Soc. Opt. Eng.*, No. 1107-29 (1989).
- 7) W-L. Wang, R. Winzenread, B. Nguyen and J.J. Murrin: "High fill factor 512×512 PtSi focal plane array," *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1161** (1989) 79-95.
- 8) E. T. Nelson, K. Y. Wong, S. Yoshizumi, D. Rockafellow, W. DesJardin, M. Elzinga, J. P. Lavine, T. J. Tredwell, R. P. Khosla, P. Sorie, B. Howe, S. Brickman and S. Refermat: "Wide field of view PtSi infrared focal plane array," *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1308** (1990) 36-43.
- 9) D. J. Sauer, F. L. Hsush, F. V. Shallcross, G. M. Meray and T. S. Villani: "A 640×512-element PtSi IR sensor with low-noise MOS X-Y addressable multiplexer," *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1308** (1990) 81-87.
- 10) K. Konuma, S. Tohyama, A. Tanabe, K. Masubuchi, N. Teranishi, T. Saito and T. Muramatsu: "A 648×487 pixel Schottky-barrier infrared CCD image sensor," *ISSCC—International Solid-State Circuits Conference* (IEEE, 1991) pp. 216-217.
- 11) J. L. Gates, W. G. Connelly, T. D. Franklin, R. E. Mills, F. W. Price and T. Y. Wittwer: "488×640-element hybrid platinum silicide Schottky focal plane array," *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1540** (1991) 262-273.
- 12) H. Yagi, N. Yutani, S. Nagayoshi, J. Nakanishi, M. Kimata and N. Tsubouchi: "Improved 512×512 IRCSD with large fill factor and high saturation level," *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1685** (1992) 37-47.
- 13) M. Shoda, K. Akagawa and T. Kazama: "A 410 K pixel PtSi Schottky-barrier infrared CCD image sensor," *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2744** (1996) 23-32.
- 14) H. Yagi, T. Shiraishi, K. Endo, Y. Kosasayama, M. Kimata and T. Ozeki: "High-performance 801×512-element PtSi Schottky-barrier infrared image sensor," *Trans. Inst. Electr. Eng. Jpn.*, **117** (1997) 588-593.
- 15) M. Inoue, T. Seto, S. Takahashi, S. Ito, H. Yagi, T. Shiraishi, K. Endo and M. Kimata: "Portable high performance camera with 801×512 PtSi-SB IRCSD," *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3179** (1997) 212-223.
- 16) M. Denda, M. Kimata, S. Iwade, N. Yutani, T. Kondo and N. Tsubouchi: "Schottky-barrier infrared linear image sensor with 4-band×4096-element," *IEEE Trans. Electron Devices*, **38** (1991) 1131-1135.
- 17) M. Ueno, T. Shiraishi, M. Kawai, Y. Yonada, M. Kimata and M. Nunoshita: "PtSi Schottky-barrier infrared focal plane array for ASTER/SWIR," *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2553** (1995) 56-65.
- 18) M. Ueno, M. Itoh, Y. Kasaba and S. Sato: "Astronomical application of 512×512 PtSi infrared image sensor," *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1762** (1992) 423-426.
- 19) K. Yanagisawa, N. Itoh and T. Ichikawa: "Evaluation of the 1040×1040 PtSi CSD for astronomical use," *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2744** (1996) 92-103.

(1998年3月27日受理)