41 万画素 PtSi ショットキー型赤外線 CCD イメージセンサ

正会員 正 田 昌 宏[†], 赤 川 圭 一[†], 風 間 常 行[†]

A 410k pixel PtSi Schottky-Barrier Infrared CCD Image Sensor

Masahiro Shoda[†], Keiichi Akagawa[†] and Tsuneyuki Kazama[†]

Abstract A 811×508 pixel PtSi Schottky-barrier infrared CCD image sensor which has the greatest number of pixels for a Standard TV format was developed. We achieved a 38% fill-factor of 18×21 μm size pixel for this image sensor by using 1.0 μm design rules. The noise equivalent temperature difference with f/1.2 was 0.06 K at 300 K. The responsivity nonuniformity with a 300 K background signal was estimated at 0.45%. The sensor obtained excellent thermal imaging without uniformity correction.

1. ま え が き

物体の熱現象の観察や、夜間の監視などに赤外線カメラが用いられる。赤外線カメラ開発の歴史は、機械的な走査機構を持ついわゆるミラースキャン型から始まり、現在では、種々の赤外線検出方式による赤外線イメージセンサの開発が進められている。

その中でも、CCDなどの固体撮像素子を作製するシリコン半導体プロセスと整合性が良いPtSiショットキーバリアダイオード(PtSi-SBD)を受光部とするPtSiショットキー型赤外線イメージセンサがいち早く実用に供され、512×512画素¹⁾、648×487画素²⁾と開発が進み、最近では、656×492画素³⁾の発表が行われている。また、標準テレビ方式以外では1040×1040画素の赤外線イメージセンサの報告⁴⁾もなされている。

筆者らは、赤外画像の表示・記録・解析などに用い

る周辺機器を考慮し、標準テレビ方式で高画質な赤外画像を撮像するために、41万画素(811×508)PtSiショットキー型赤外線CCDイメージセンサ(IRCCD)を開発した。

2. IRCCDの素子構成

本IRCCDは、インターライントランスファ方式を採用している。図1に素子構成を示す。画素構成は、水平811画素、垂直508画素である。そして、今回試作したIRCCDは、標準テレビ方式とのマッチングを考慮し、38万画素(水平768画素、垂直494画素)の撮像部と約3万画素のダミー部とで構成した。

3. デバイス開発

3.1 PtSi-SBDの赤外感度

光電変換部であるPtSi-SBDはシリコンプロセスとの整合性が良いが、光電変換効率が低い。感度を向

キーワード：赤外線 CCD, イメージセンサ, PtSi, ショットキー接合
1994年3月4日, テレビジョン学会技術報告, Vol.18, No. 17に発表
1994年6月23日受付, 1994年10月14日再受付

[†] 株式会社ニコン 開発本部 中央研究所デバイスセンター(〒140 東京都品川区西大井1-6-3, TEL 03-3773-1111)

[†] Main Research Laboratory, Nikon Corporation (6-3, Nishi-Ohi 1-Chome, Shinagawa-ku, Tokyo 140, Japan)

図 1 素子構成
Device configuration.

図 2 Pt デポ基板温度と Φ_b .
Dependence of Φ_b on Pt deposition substrate-temperature.

上させるために、光電変換部の感度を上げることと、開口率(単位画素に占める受光部の面積割合)を大きくすることが必要である。

そこで、まず IRCCD と同じ断面構造を持った 2×2 mm のモニター用 PtSi-SBD を作成し、PtSi シリサイドの形成条件と赤外感度の関係を詳細に検討した。

Pt 膜厚と赤外感度の関係では、Pt 膜厚が薄くなるほど感度が向上すると報告されている⁵⁾が、さらに薄くすると感度が下がることを確認し、赤外感度を最良にする Pt 膜厚の範囲が $15 \sim 20 \text{ \AA}$ にあることを確認した。

PtSi-SBD の感度を表す係数として Φ_b (SBD のバリアハイト)と C_1 (量子効率係数)があり、 Φ_b は低いほど、 C_1 は大きいほど感度が良くなる。この Φ_b が、Pt 薄膜を成膜する時のシリコン基板温度により変化することを見いだした。一例を図 2 に示す。なお、この測定はショットキーダイオードの順方向特性からバ

図 3 画素部平面図
Pixel layout of 811×508 element IRCCD.

図 4 画素部断面図
Cross-sectional view of the pixel.

イアス電圧が 0 V 時の Φ_b を外挿して求めた⁶⁾。

3.2 SBD 受光部の形成方法

本素子の単位画素の平面構造を図 3 に、画素の断面構造を図 4 に示す。

光電変換部の感度を上げるために、従来の PtSi ショットキー型赤外線イメージセンサと同様、受光部にはオプティカルキャビティ構造を採用した。これは、シリコン基板の裏面側からの入射光を PtSi-SBD 受光部で光電変換し、光電変換されずに PtSi 層を透過した赤外光を受光部上に配置したアルミニウム薄膜で反射させ、再度 PtSi-SBD 受光部に導く構造である。

IRCCD の製造プロセスを紹介している論文は少ないが、CCD のポリシリコン電極を形成し、ポリシリコン電極上に形成するアルミニウム配線が断線しないように素子表面の凹凸を軽減する平坦化処理を行ってから SBD を形成する手法が報告⁵⁾されている。この場合、光電変換部上の厚い平坦化膜をフォトエッチングの手法によりエッチングし、シリコン表面を露出させ、Pt 薄膜の成膜と熱処理を行い、PtSi シリサイド層を形成する。厚い膜をウェットエッチングすると、エッチングが等方的に進むため、サイドエッチング量

図 5 PtSi-SBD 形成工程
PtSi-SBD fabrication process step.
(a) Conventional, (b) improved Method.

が大きくなり、図 5(a)に示すように、PtSi-SBD 受光部と受光部周辺に配置されるポリシリコン電極との間隔 (L_1) を狭めることが難しい。一方、ドライエッチングにより異方性エッチングすると、上記サイドエッチングの問題を解消できる。ところが、実際に試作評価したところ、ドライエッチングでエッチングし PtSi-SBD を形成したサンプルでは、ウェットエッチングでシリコン表面を露出し PtSi-SBD を形成したサンプルよりも、赤外感度が約 25% 低下した。これは、エッチングが、Pt 成膜前のシリコン表面状態に影響を与えているためと考えている。

本素子では、図 5(b)に示すように、ポリシリコン電極を形成し、平坦化前の絶縁膜の薄い段階で PtSi-SBD を形成することにした。おおよそ 1500 Å の酸化膜をエッチングするだけなので、ウェットエッチングでエッチングしてもサイドエッチングの影響を少なくでき、最小加工寸法 1.0 μm で、垂直転送路の幅 5 μm を確保しながらも、画素ピッチ 18×21 μm で開口率 38% を達成した。

さらに、この後、オプティカルキャビティ用の絶縁膜形成、アルミニウム反射膜形成、絶縁膜形成、平坦化、アルミニウム配線形成の手順を採用した。先にも述べたように、平坦化とは、ウェハ表面の凹凸を滑らかにする処理であるが、平坦化を行うと段差部分に絶縁膜の「たまり」ができる。今回採用した手順では、この「たまり」ができる前にアルミニウム反射膜を形成するので、アルミニウム反射膜を平板化できる。したがって、PtSi-SBD 上全面にわたって均一なオプティカルキャビティ構造を実現でき、後述する感度均一性の向上にも効果があったと考えている。

3.3 実効開口率

感度を向上するには、PtSi-SBD 周辺を取り囲むガードリング拡散の不純物濃度と拡散深さを最適化することが重要である。一般的に、PtSi ショットキー型

図 6 IRCCD 感度とガードリング幅、拡散不純物種、拡散量の関係

Thermal responsivity as function of Guard-Ring width, implantation species, and implantation dose.

赤外線イメージセンサでは、受光部のプリチャージ電圧(数 V)により、PtSi シリサイド周縁で電界集中が起こり、N 型のガードリング拡散がないと、P 型シリコン基板との耐圧が著しく低くなる。したがって、ガードリング拡散は、受光部をプリチャージした状態で、PtSi シリサイド周縁での電界集中を防ぐだけの不純物濃度が必要である。そして、必要以上に高濃度化すると、拡散深さが深くなり、それに伴い横方向拡散が大きくなり、実効の開口率が低下し、感度が低下する。逆に、ガードリングの不純物濃度を低くすると受光部容量が減り⁴⁾、感度が低くなると予想される。これは、PtSi-SBD 受光部はバイアス電圧が低くなると感度が低下する特性を有し、受光部容量が小さくなると蓄積期間内での SBD 受光部のバイアス電圧低下が大きくなるためである。

そこで、1 素子内でガードリング拡散の幅を 0.1 μm ピッチで 0.5 ~ 1.4 μm の 10 段階に縦のストライプ状に変えたレチクルを設計し、ガードリングの幅・不純物濃度・ガードリングを形成する不純物種をパラメータとした実験を行った。評価用素子では、画素の素子分離領域は一定のまま、ガードリングとショットキー受光部開口用のレチクルを変更した。なお、ガードリング形成の熱拡散が最小となるように、ガードリング形成は短時間の熱処理で行った。

このレチクルを用いて作成した素子で 25°C と 35°C の黒体を観測した。この 2 つの温度に対する IRCCD の出力差を感度と考え、この感度を縦軸にとり、ガードリングへの不純物注入量を横軸とし、ガードリング幅をパラメータとした評価結果を図 6 に示す。この実験結果からは、ガードリング幅が狭く、ガードリングの不純物濃度が低いほど感度の良いことがわかった。

この実験とは別に行った画質評価結果および、半導体プロセスの安定性を考慮して注入種として「リン」を採用し、ガードリング幅 $1.0\ \mu\text{m}$ 、注入量はグラフに示した最小の値を採用した。

3.4 感度均一性

一般的に赤外線カメラでは、画像の補正を行い画像表示や温度計測を行うことが多い。これは可視画像と比較すると、赤外画像は背景光出力が大きいいため、画像として表示するには背景光をバイアス成分として差し引く必要があり、また、画素毎の感度ばらつきを補正しないと FPN(固定パターンノイズ)が大きく、画像としては好ましくない場合があるからである。画素毎の感度補正を行う場合であっても、素子本来の感度ばらつきが少ない方が望ましい。

そこで、感度ばらつきを低減させるために、エピタキシャル基板を採用し、シリコン基板に直接 IRCCD を作成した場合に発生する同心円状の FPN を防いだ。

3.5 転送効率

水平 CCD のデータレートは $14.3\ \text{MHz}$ である。CCD の転送効率は駆動周波数が高くなると劣化する傾向にあり、さらに、IRCCD の場合は低温環境における CCD の転送効率劣化が問題となる⁷⁾。この対策

として、埋込みチャンネルの拡散深さを深くすることにした。図 7 に示したように、素子分離を形成する前に CCD の埋込みチャンネルを形成した。この手法により、素子分離拡散の横方向拡散を抑えながら、転送効率が最大となる埋込みチャンネルの拡散深さを得た。そして、水平 CCD の転送効率 99.97% を得て、画質の上でも問題ないレベルとなった。

3.6 発熱対策

PtSi ショットキー型の赤外線イメージセンサでは、イメージセンサを真空容器内に配置し、液体窒素温度 ($77\ \text{K}$) に冷却して使用する。そのため、出力アンプの負荷容量が大きくなる。また、総画素数を 41 万画素と高解像度化したことによりデータレートが高速であり、出力アンプでの発熱が大きくなることが懸念された。そこで、イメージセンサチップ内での発熱防止のために、最終ソースフォロアの負荷抵抗を外付けとした。さらに、水平 CCD を駆動する際に消費されるエネルギーは、イメージセンサチップ上とイメージセンサチップ外部にある駆動回路とで消費される。そこで、駆動回路の出力インピーダンスを必要以上に下げないようにし、イメージセンサチップでの発熱が少なくなるようにした。

4. IRCCD の性能

PtSi-SBD 特性を詳細に測定するために、単体の PtSi-SBD を用いた分光特性の測定を行った。実際の IRCCD では蓄積モードで動作するため、必要に応じてバイアス電圧を変えて測定を行っている。図 8 に、 $5\ \text{V}$ バイアス時の分光感度特性を示す。ここで分光特性は下式で表される⁸⁾。

図 7 BCCD 形成工程

BCCD fabrication process steps.

(a) BCCD ion-implantation, (b) thermal diffusion, (c) channel stop ion-implantation, (d) field oxidation, (e) CCD electrode formation, (f) metallization.

図 8 分光感度特性

Measured spectral responsivity for PtSi SBD with $C_1=0.28\ \text{eV}^{-1}$ and $\Phi_b=0.22\ \text{eV}$.

図 9 感度特性

Measured thermal responsivity of 811×508 pixel IRCCD.

図 10 出力均一性

Output uniformity. (Horizontal direction)

$$R = C_1(1 - \lambda\Phi_b/1.24)^2 \quad (1)$$

ただし, R は分光感度

λ は波長

図 8 の測定値より C_1 , Φ_b を計算し求めると

$$C_1 = 0.28 \text{ eV}^{-1}$$

$$\Phi_b = 0.22 \text{ eV}$$

となる。

次に, IRCCD の感度特性を, リセットドレイン端子に直流電流計を接続し, 信号電流を測定する方法で測定した。

図 9 に, この方法で測定した 41 万画素 IRCCD の感度特性を示す。なお, 測定は $f/1.2$ のコールドシールドを装着し, レンズは使用していない。横軸は黒体炉の温度, 縦軸は 1 画素あたりの信号電子数 N_{AVE} を

表している。この測定から, 300 K の背景信号電荷量は 3.6×10^5 電子で, 感度は 1.00×10^4 電子/K であり, 垂直 CCD で決まる飽和電子数は 7.5×10^5 電子であった。また, 今回の評価に用いた赤外線カメラのノイズは 614 電子であった。これはショットノイズと同等であり, 300 K の黒体炉を観察した時の NETD(雑音等価温度差)は 0.06 K であった。

次に, 素子内の均一性の評価例として, 1 水平ラインの出力電圧分布を図 10 に示す。この測定例は, アドバンテスト社製 R 2322 H テレビシグナルアナライザを用い, ハイパスフィルタで光学系のシェーディングを取り除いてある。300 K 黒体炉輻射に対する全画素での FPN は -46 dB であった。この FPN が感度ばらつきに起因すると仮定すると, 感度ばらつきは 0.45%rms であった。

本デバイスを用いた赤外線カメラの撮像例を示す。光学系は $f/1.2$ の標準レンズ ($F=45 \text{ mm}$) を用い, 標

写真 1 撮像例(a)男性の顔(感度補正なし)
Uncorrected thermal image of man's face.

写真 2 撮像例(b)日中の市街(感度補正なし)
Uncorrected thermal image of landscape under the daylight.

表 1 素子性能
Device characteristics.

Detector	PtSi Schottky-barrier Diode
Number of elements	811(H)×508(V)
Display area	768(H)×494(V)
Chip size	17.5(H)×13.7(V)mm
Pixel size	18(H)×21(V)μm
Fill factor	38.2%
Frame rate	30 Hz
Horizontal C. T. E.	0.9997
C_i	0.28 eV ⁻¹
Φ_b	0.22 eV
$R\lambda$ (at 4 μm)	22.6 mA/W
NETD (at 300 K)	0.06 K (f/1.2 cold shield, 7 MHz LPF)
FPN	-46 dB (without correction)
Uniformity (σ /AVE.)	0.45% (without correction)
VCCD charge capability	7.5×10^6 electrons

準テレビ方式の 30 フレーム/秒で撮像した。写真 1 は、室内で人物を撮像した例であり、写真 2 は、建築物を日中に撮像した例である。本素子の場合、感度の補正を行わなくても FPN が少なく、解像度の高い良好な画像を得ることができた。

5. む す び

41 万画素 (811×508) PtSi ショットキー型赤外線 CCD イメージセンサ (IRCCD) を開発した。素子特性の一覧を表 1 に示す。デザインルールとプロセス条件の整合性を最適化することにより、標準テレビ方式では最高レベルの画素数と感度均一性を実現し、NETD=0.06 K を得た。

最後に、本研究の機会を与えて頂いた高橋陽介中央研究所前所長に感謝いたします。また、御指導、御援助を頂いた関係各位、さらに試作を担当していただいたデバイスセンター関係各位に心より感謝いたします。

〔参 考 文 献〕

- 1) M. Kimata, M. Denda, N. Yutani, S. Iwade and N. Tubou-

chi: "A 512×512 element PtSi Schottky-Barrier Infrared Image Sensor", ISSCC Digest of Tech. Papers, pp. 110-111 (1987)

- 2) 小沼, 遠山, 田辺, 寺西, 増淵, 斎藤, 村松: "648×487 画素ショットキー型赤外線 CCD イメージセンサ", テレビ学技報, **15**, 16, pp. 13-18 (Feb. 1991)
- 3) Youssef S. Abedini, Oliver R. Barrett, Jae S. Kim, David D. Wen and Shirley S. Yeung: "A 656×492-element Platinum Silicide Infrared Charge Coupled Device Focal Plane Array", SPIE, **2020**, pp. 36-40 (1993)
- 4) N. Yutani, H. Yagi, M. Kimata, J. Nakanishi, S. Nagayoshi and N. Tsubouchi: "1040×1040 element PtSi Schottky-Barrier IR Image Sensor", IEDM Digest of Tech. Papers, pp. 175-178 (1991)
- 5) Walter F. Kosonocky, Frank V. Shallcross, Thomass S. Villani and Joseph V. Groppe: "160×244 Element PtSi Schottky-Barrier IR-CCD Image Sensor", IEEE Trans. Electron Devices, **ED-32**, 8, pp. 1564-1573 (Aug. 1985)
- 6) S. M. Sze: Physics of Semiconductor Devices, pp. 393-400, New York: Wiley (1969)
- 7) M. Kimata, M. Denda, N. Yutani, N. Tsubouchi and S. Uematsu: "Low-Temperature Characteristics of Buried-Channel Charge-Coupled Devices", Jpn. J. Appl. Phys., **22**, 6, pp. 975-980 (June 1983)
- 8) H. Elabd and W. F. Kosonocky: "Theory and Measurements of Photoresponse for Thin Film Pd₂Si and PtSi Infrared Schottky-Barrier Detectors with Optical Cavity", RCA Rev., **43**, pp. 569-589 (Dec. 1982)

しょうだ まさひろ
正田 昌宏 昭和 53 年, 東京理科大学理学部 I 部応用物理学卒業。(株)東光を経て, 昭和 57 年, 日本光学工業(株)(現(株)ニコン)に入社。以降, 半導体デバイスの設計, プロセス開発に携わり, 現在, 赤外線固体撮像素子の研究に従事。正会員。

あかがわ けいいち
赤川 圭一 昭和 54 年, 東京工業大学工学部電気電子工学科卒業。昭和 56 年, 東京工業大学大学院総合理工学研究科物理情報工学修士課程修了。同年, 日本光学工業(株)(現(株)ニコン)に入社。以降, 半導体デバイスの研究開発に従事。現在, 赤外線固体撮像素子の研究を担当。

かざま つねゆき
風間 常行 昭和 45 年, 東北大学理学部物理学卒業。昭和 47 年, 東北大学理学研究科修士課程修了。同年, 日本光学工業(株)(現(株)ニコン)に入社。昭和 56 年以降, 半導体デバイス研究開発に従事。現在, 中央研究所デバイスセンターマネージャー。