InGaAsエリアイメージセンサ



人の目には見えない近赤外線を感知して画像化することが可能なInGaAsエリアイメージセンサです。高い量子効率の裏面入射型InGaAsフォトダイオードの2次元アレイと、高ゲインで低ノイズのCMOS読み出し回路(ROIC: Readout Integrated Circuit)をInバンプで接続したハイブリッド構成です。1画素は、1素子のInGaAsフォトダイオードと1つのROICから構成されています。ROICにはタイミング発生器が内蔵されており、外部からマスタークロック(MCLK)とマスタースタートパルス(MSP)を入力するだけで、アナログビテオ出力が得られます。InGaAsエリアイメージセンサは、以下の特徴をもっています。

- [▲] カットオフ波長: ~2.55 µm
- ▲高い量子効率: 65% max.
- 高感度: 1 μV/e⁻ min.
- ☑ 読み出しモード: グローバルシャッタモード、ローリングシャッタモード

⇔ 浜松ホトニクスのInGaAsエリアイメージセンサ

タイプ		カットオフ波長 (µm)	画素数 [H × V]	画素ピッチ (µm)	ROIC	メタルパッケージ
	小型	- 1.7	64 × 64	50	CTIA	- TO-8
抽 淮			128 × 128	20	SF	
标华	多画素		320 × 256	20	差動CTIA	- 28L
			640 × 512		SF	
	小型	1.9	64 × 64	50	CTIA	TO-8
巨法巨		1.9	320 × 256	20	差動CTIA	28L
RIKK	多画素	2.15				
		2.55				





InGaAsエリアイメージセンサに内蔵した裏面入射型 InGaAsフォトダイオードの2次元アレイは、近赤外域で高 い量子効率を実現しています [図1-1]。なお、フォトダイ オードの温度制御を行うために電子冷却素子を内蔵し たタイプも用意しています。

[図1-1] 分光感度特性 (代表例)



1-2 ROIC

InGaAsエリアイメージセンサのROICは、InGaAsフォト ダイオードの特性に合わせCMOS技術を用いて作製さ れています。信号処理を行うアナログ回路と、タイミング 発生器のデジタル回路を同一のチップ上に搭載して、多 機能・高性能とともにシステムの低コスト化を実現してい ます。

ROICには、CTIA (Capacitive Trans-Impedance Amplifier)タイプ、差動CTIAタイプ、SF (Source Follower)タイプの3種類があります。用途に適したROIC のタイプを選ぶ必要があります。それぞれのタイプのブ ロック図を図1-2に示します。

CTIAタイプのメリットは、電荷-電圧変換部がアンプ 構成であることと、InGaAsフォトダイオードへの印加電 圧を一定に保持できるため優れた直線性をもつことで す。デメリットは、アンプに供給する消費電流が大きいこ とと、消費電力が大きくセンサの温度上昇があるため電 子冷却素子による温度制御が必要であることです。

差動CTIAタイプでは、受光部のアノードとカソードの 電圧差をゼロに近づける駆動方式によって暗電流を低 減することができます。また、ゲインが高いため、微弱光 の検出に適しています。

SFタイプは電荷-電圧変換部がシンプルな構成で、 CTIAタイプに比べると低消費電力ですが、直線性の範 囲が狭いというデメリットもあります。



信号の読み出し方式にはグローバルシャッタモードを 採用しています。なお一部の製品(G12242-0707W)で は、グローバルシャッタモードとローリングシャッタモード の切り替えが可能です。グローバルシャッタモードでは、 全画素が同時にリセットされ、全画素同時に積分が開始 されます。このため、同じ時間に蓄積されたデータが全 画素から出力されます。ローリングシャッタモードは、1行 ごとにリセットを行い、出力後、直ちに積分を開始します。 フレームレートを優先する場合には、ローリングシャッタ モードを選択する必要があります。撮像の同期性を優先 する場合は、グローバルシャッタモードを選択する必要 があります。

ここで読み出し回路 (G14671~G14674-0808W)の 一連の動作について説明します。

フレームスキャン信号であるマスタースタートパルス (MSP)のLow期間を蓄積時間として、全画素同時に出 力電圧をサンプルホールドします。その後、画素の走査と ビデオ出力を行います。

垂直シフトレジスタが上→下へと走査し、各行を順に 選択します。選択された行の各画素において、①~③の 動作が行われます。

- 画素内でサンプルホールドされた光信号情報を信号 電圧として信号処理回路へ転送し、サンプルホールド します。
- ② 信号転送後、各画素をリセットし、リセット信号電圧を信号処理回路へ転送し、サンプルホールドします。
- ③水平シフトレジスタにより順次走査され、信号電圧・リ セット信号電圧がシリアルデータとして出力されます。 センサ外部で、この差分を取ることにより、画素ごとの オフセット電圧を除去することが可能です。

続いて垂直シフトレジスタが1行分シフトして次の行を 選択し、①~③の動作を繰り返します。

垂直シフトレジスタが256行目まで進んだ後は、フレー ムスキャン信号であるマスタースタートパルス (MSP)が Lowになってから全画素同時にリセットスイッチがOFFと なり、次フレームの蓄積動作が始まります。

[図1-3] ブロック図 (G14671~G14674-0808W)



G14671~G14674-0808Wは、部分読み出し機能を もっています。読み出し領域数は、1フレーム当たりで1領 域です。読み出し領域の座標の始点座標 (m, n)と終点 (p, q)を指定します [図1-4 (b)]。読み出し画素数が少 ないとフレームレートが向上します。G14671~G14674-0808Wには、読み出しポート数の切替機能 (4ポート/1 ポート)がありますが、部分読み出し機能は1ポートの場 合だけ有効です。

図1-5は、1ポートのときのフレームレートと読み出し画 素数の関係を示します。1ポートで149×149画素読み出 しの場合のフレームレートは、4ポートで全画素読み出し の場合のフレームレートに相当します。

[図1-4] 読み出し領域 (G14671~G14674-0808W)

(a) 全画素読み出し: 256 × 320画素



KMIRC0127JA

(b) 部分読み出し: (m, n)~(p, q)





部分読み出しのタイミングチャートを図1-6に示し ます。パルスジェネレータからの制御信号 [表1-1]を G14671~G14674-0808Wに入力します。

[図1-6] タイミングチャート (部分読み出し)

[表1-1] パルスジェネレータからの制御信号 (G14671~G14674-0808W)

	制御信号	説明
	MCLK	マスタークロック。クロック周波数によってビデオデータ レート (12.5 MHz max.)が決まります。
	MSP	フレームスキャンを行うために各制御信号をスタート するための信号。MSPがLow (0 V)からHigh (3.3 V) になり、MCLKが下降した時点から各制御信号をス タートさせます。MSPがHigh (3.3 V)の期間にフレー ムスキャンを行います。部分読み出し時には、MSPの Low期間を50 MCLK以上にする必要があります。
	en_add	アドレス入力信号パルスのイネーブル信号電圧
	add	アドレス入力信号パルス。読み出し領域の始点座標 (m, n)と終点座標 (p, q)をen_addのHigh期間中に 入力します。 m:水平方向 (0~319), 9ビットで入力 (SHO~SH8) n: 垂直方向 (0~255), 8ビットで入力 (SVO~SV7) p:水平方向 (0~319, m以上), 9ビットで入力 (EH0~EH8) q: 垂直方向 (0~255, n以上), 8ビットで入力 (EV0~EV7)



KMIRC0130JA

項目	記号	Min.	Тур.	Max.	単位
クロックパルスト見/下降時間	tr(MCLK)	0	5.5	6	ne
	tf(MCLK)				115
クロックパルス幅	tpw(MCLK)	4	-	-	ns
	tr(MSP)	0	5.5	6	20
入了一下())入工升/	tf(MSP)				115
スタートパルス幅	tpw(MSP)	1	-	-	μs
スタート (上昇)タイミング*	t1	4	-	-	ns
スタート (下降)タイミング*	t2	4	-	-	ns
出力セトリング時間	t3	-	-	30	ns

* Min. 値よりも短く設定すると、動作が1 MCLK分遅延する恐れがあり、誤動作の原因となります。

◆ 部分読み出しの例 [読み出し画素数: 2560 (160列 × 16行)]

m=100 (101列目), n=120 (121行目), p=259 (260列目), q=135 (136行目)

■ 読み出し領域

G14671~G14674-0808Wのインデックスマークを左下にした場合 [図1-7]、左上が始点となり、右下が終点となります [グレー: 有効画素領域 (320 × 256画素)、赤:部分読み出し領域 (160 × 16画素)]。部分読み出し領域の信号は、1ポート [Video_s1 (No. 6ピン), Video_r1 (No. 7ピン)]から出力されます。

[図1-7] 読み出し領域



▶ フレームレートの算出

G14671~G14674-0808Wのフレームレートを以下の ように算出します。

 フレームレート = 1/(MSP Low期間 [s] + 1フレーム走査期間 [s]) ……… (1-1)
 1フレーム走査期間 [MCLK] = {MSP立ち上がりエッジ〜始点画素までのブランク期間 60 [MCLK]} + (画素読み出し期間 4 [MCLK] × 読み出し画 素数 [ch]) + (行間ブランク期間 63 [MCLK]/行) × (行数 -1) + フレーム間ブランク期間 6 [MCLK] ……… (1-2)
 1フレーム走査期間 [s] = 1フレーム走査期間 [MCLK] × MCLK周波数 [s] ……… (1-3)

- ▶ m=100 (101列目), n=120 (121行目), p=259 (260列目), q=135 (136行目) [読み出し画素数: 2560 (=160列 × 16行), MCLK=50 MHz (0.02 µs), MSP Low期間=1 µs]
 - 1フレーム走査期間 = 60 [MCLK] + (4 [MCLK] × 2560 [ch])+ {63 [MCLK] × (16 - 1)} + 6 [MCLK]=11251 [MCLK] 1フレーム走査期間 = 11251 [MCLK] × 0.02[µs] = 225.02 [µs] フレームレート = 1/(1 [µs] + 225.02 [µs]) = 4424.38 fps

<u>1-3</u> Inバンプ

Inバンプは、InGaAsフォトダイオードとROICを電気的 に接続しています。Inのヤング率は、Au・Cu・Alと比較す ると低く、融点は157°Cのため熱的歪みを抑えられるた め、熱膨張係数が異なる金属や半導体の接続に適して います。

[図1-8] InGaAsエリアイメージセンサの概念図



[表1-2] add信号の入力信号配列

SHO SH1 SH2 SH3 SH4 SH5 SH6 SH7 SH8 EH0 EH1 EH2 EH3 EH4 EH5 EH6 EH7 EH8 SV0 SV1 SV2 SV3 SV4 SV5 SV6 SV7 EV0 EV1 EV2 EV3 EV4 EV5 EV6 EV7

0 0 1 0 0 1 1 0 0	1 1 0 0 0 0 0 0 1	0 0 0 1 1 1 1 0	1 1 1 0 0 0 1		
m=100	p=259	n=120	q=135		



2-1 入出力特性

入出力特性は、イメージセンサの入射光量と出力の 関係を示す特性です。InGaAsエリアイメージセンサは チャージアンプ方式で動作するため、露光量(単位:J) は、光量(単位:W)と蓄積時間(単位:s)の積で表され ます。図2-1に入出力特性の概念図を示します。斜線部 分は式(2-1)で表されます。

[図2-1] 入出力特性の概念図 (対数グラフ)



y = ax^γ + b ……… (2-1) y: 出力電圧 a: 感度 (露光量に対する出力比) x: 露光量 y: 傾き係数 b: 暗出力 (露光量=0のときの出力)

出力電圧の上限はROICの出力電圧範囲で決まるた め、入出力特性は屈曲点をもちます。この屈曲点にお ける露光量を飽和露光量、出力電圧を飽和出力電圧、 チャージアンプに蓄えられた電荷量を飽和電荷量と呼 びます。

当社のデータシートでは、飽和出力電圧(Vsat)は、光 入射による出力の飽和電圧から暗出力を引いた差と定 義しています。飽和電荷量は、飽和出力電圧からQ=CV により算出されます。積分容量(Cf)0.1 pF、飽和出力電 圧 2.0 Vの場合、飽和電荷量は0.2 pCとなります。



InGaAsエリアイメージセンサには多数のInGaAsフォ トダイオードが配列されていますが、それぞれのフォ トダイオードの感度にはバラツキがあります。これは、 InGaAs基板内の結晶欠陥や製造工程における加工や 拡散のバラツキ、ROICのゲインのバラツキなどに起因 しています。当社のInGaAsエリアイメージセンサでは、 フォトダイオードの有効受光面に均一な光を入射した ときの全画素出力のバラツキを感度不均一性 (PRNU: Photoresponse Nonuniformity)として、式 (2-2)で定義 しています。

 $PRNU = (\Delta X/X) \times 100 [\%] \dots (2-2)$

X :全画素の出力の平均値 ΔX:最大または最小出力画素の出力とXとの差の絶対値

感度不均一性についての製品出荷時の検査は、飽和 出力電圧の約50%、光源はハロゲンランプで行っていま す。InGaAsエリアイメージセンサは、光電変換部に化合 物半導体結晶を用いているため、フォトダイオードアレイ 中に結晶欠陥が存在し、異常出力信号を示す画素(不 良画素)があります。また、受光窓上の傷や汚れによって 感度均一性が悪化することがあるため、素子の取り扱い には注意が必要です。図2-2に感度不均一性の測定例 (ランダムサンプリング)を示します。

[図2-2] 感度不均一性 (G14671-0808W, 代表例)



2-3 暗出力

暗出力は、光が入射していない状態の出力です。フォ トダイオードの暗電流(拡散電流・再結合電流・表面 リーク電流の合計)とROICのオフセット電圧の和として 出力されます。ビデオ出力の上限は飽和出力電圧で制 限されるため、暗出力が大きいと出力信号のダイナミック レンジが狭くなります。暗出力と光出力の和が出力信号 となるため、画素ごとに暗出力を減算する信号処理を行 うことにより、出力信号の純度を高めることができます。 暗出力は式(2-3)で表されます。蓄積時間は、暗出力の 大きさを考慮して決める必要があります。

 $Vd = I_D \times (T_S/C_f) + Voff \cdots (2-3)$

Vd : 暗出力 [V] I□ : 暗電流 [pA] Ts : 蓄積時間 [s]

```
Cf :積分容量 [pF]
Voff: ROICのオフセット電圧 [V]
```

温度が低いほどバンドギャップが広がり、伝導帯から 価電子帯に励起するキャリアの数が減るため、暗電流は 指数関数的に減少します。当社のInGaAsエリアイメージ センサの場合、暗電流の温度係数(β)は1.06~1.1であ り、ある温度 T1(単位: °C)における暗電流をIDT1(単 位: A)とすると、任意の温度 Tにおける暗電流 IDTは式 (2-4)で表されます。

IDT = IDT1 × $\beta^{(T - T_1)}$ [A] (2-4)

図2-3は、G14671-0808Wの暗電流の温度特性 (ラン ダムサンプリング)を示します。

[図2-3] 暗電流の温度特性 (G14671-0808W)



2-4 ノイズ

InGaAsエリアイメージセンサのノイズは、固定パターン ノイズとランダムノイズに大別されます。固定パターンノ イズには、ROICのDCオフセット電圧やフォトダイオード の暗電流などがあります。暗電流はDC成分の電流性ノ イズです。固定パターンノイズは外部信号処理によって キャンセルすることができます。

ランダムノイズは、センサ内部で信号が出力される過 程に起こる「電圧・電流・電荷の揺らぎ」によって生じま す。固定パターンノイズを外部信号処理でキャンセルし た場合、ランダムノイズがInGaAsエリアイメージセンサの 微弱光に対する検出限界、すなわちダイナミックレンジの 下限を決定します。ランダムノイズには次の4種類の成分 があります。

① 暗電流によるショットノイズ (Nd)

- ② 光入射時の信号電流によるショットノイズ (Ns)
- ③ チャージアンプをリセットする際のリセットノイズ (Nr)
- ④ CMOSチャージアンプの読み出しノイズ (NR)

①の暗電流によるショットノイズは、電荷の不規則な揺 らぎによって生じます。このノイズは暗電流による出力電 荷量とともに増加するため、蓄積時間・温度などの動作 条件によって値が異なります。②のショットノイズは、入射 フォトンが不規則に到達することによる揺らぎによって生 じます。トータルノイズ (N)は、式 (2-5)で表されます。

 $N = \sqrt{Nd^2 + Ns^2 + Nr^2 + Nr^2}$ (2-5)

当社では、InGaAsエリアイメージセンサのノイズ量(単位: Vrms)を各画素の出力電圧の揺らぎで定義しています。

3. 駆動回路

InGaAsエリアイメージセンサ G14671~G14674-0808Wの推奨駆動回路を図3-1に示します。

>> 回路作成上の注意

(1) バイアス生成回路

- ・アンプでバッファした電圧を印加する回路構成を推奨 します。アンプの帯域を適切に制限するとノイズを抑制 できます。アンプ出力の後段にRCフィルタを挿入するこ とを推奨します (例: 10 Ω, 0.1 μF, f=約160 kHz)。
- ・抵抗分圧で生成した電圧だけでもInGaAsイメージセンサを駆動できますが、応答速度・インピーダンスに起因して直線性などの特性が劣化するため、推奨していません。
- ・位相余裕が十分にあるオペアンプ(AD8031など)を使 用してください。位相余裕が十分にないと、バイパスコン デンサによってオペアンプが発振する場合があります。

- ・リニアレギュレータは、電流を引き抜く能力が不足して 直線性などの特性が劣化するため、推奨していません。
- ・バイアス電圧の安定性はセンサノイズに影響するた め、オシロスコープで確認してください。
- ・バイアス生成回路には、比較的大きな電流が瞬間的 に流れることがあります。データシートに記載された供 給電流の10倍以上を供給できる電圧源を使用してく ださい。

(2) 電源

- ・安定した外部電源や電源回路から電源を供給してく ださい。
- ・センサ端子直近でコンデンサ (0.1 μF)にてデカップリ ングしてください。
- ・比較的大きな電流が瞬間的に流れることがあり、 チョークコイルなどを使用すると電圧降下が発生する ことがあるため注意してください。

(3) 読み出し回路

- ・センサの出力インピーダンスが比較的高いため、セン サ出力端に近い箇所でバッファしてください。
- ・ノイズ低減のため、読み出し回路の帯域をピクセル レートの3~10倍に抑えてください(5倍程度を推奨)。



[図3-1] 推奨駆動回路 (アナログフロントエンド回路)

KMIRC0134JA

4. 応用例

近赤外線検出素子としてInGaAsエリアイメージセン サは、単素子InGaAs PINフォトダイオード・InGaAsリニ アイメージセンサよりも、検出によって得られる情報が格 段に増加します。その応用分野は広がりつつあり、セキュ リティなどに利用されるナイトビジョン、プラスチック選別 (ペットボトルなどの廃棄物)、農作物選別(穀類など)、 半導体解析装置、天文・衛星などの学術研究など多岐 にわたります。

以下の4-1~4に、InGaAsリニアイメージセンサ G13393-0909Wを搭載したInGaAsカメラ (当社製C12741-03U)と 近赤外LEDを用いた近赤外画像を示します。

4-1 農産物検査

トマトの傷んだ部分は、水分量が多くなります。水の吸収 スペクトルの波長が1.45 µmであることを利用して、可視 では分かりにくい「傷んだ部分」の検出が可能となります。

[図4-1] トマトを押して傷んだ部分を検出

(a) 可視

(b) 近赤外 (LEDのピーク発光波長: 1.45 μm)







可視光はSiウエハを透過しませんが、近赤外線(1.1 µm以上)は透過します。この性質を利用して、貼り合わ せウエハなどにおいて、可視光では確認できないウエハ パターン面のアライメントマークの検出が可能です。

[図4-2] Siウエハのパターン検出

 (a) 可視
 (b) 近赤外 (LEDのピーク発光波長: 1.2 μm)

4-3 カップ麺の検査

近赤外線がカップを透過することを利用して、カップ内 のかやくの有無や異物混入を確認することができます。

[図4-3] カップ内のかやくの有無、異物の混入を確認

(b) 近赤外 (LEDのピーク発光波長: 1.2 µm)



(a) 可視



4-4 セキュリティ

近赤外線は可視光よりも波長が長いため、霧や煙など の微粒子による乱反射の影響を受けにくくなります。霧 や煙がある場合にも近赤外画像を取得しやすいため、 InGaAsエリアイメージセンサは監視カメラなどで利用さ れています。

[図4-4] 煙が充満した中で対象物を確認 (a) 可視 (b) 近赤外

・ ユニボット (LEDのピーク発光波長: 1.55 µm)



4-5 ハイパースペクトルイメージング

ハイパースペクトルイメージングは、物体の撮影の際 に、画素ごとのスペクトル情報も同時に取得するイメージ ング方法で、肉眼では見分けにくい物質の特定に有効 です。

通常のラインカメラと同様に、対象物(またはカメラ) を移動させてスキャン撮影します。入射光はスリットを通 り、プリズム、グレーティングでセンサのY軸方向に分光 されて測定されるため、エリアイメージセンサが用いられ ます。プラスチックの種類 (PVC, アクリル, PET, PS)に 応じて特徴のある近赤外スペクトルが得られるため、近 赤外エリアイメージセンサを搭載したカメラを用いると高 精度な識別が可能になります。



本資料の記載内容は、令和2年10月現在のものです。

製品の仕様は、改良などのため予告なく変更することがあります。本資料は正確を期するため慎重に作成されたものですが、まれに誤記などによる誤りがある場合が あります。本製品を使用する際には、必ず納入仕様書をご用命の上、最新の仕様をご確認ください。

本製品の保証は、納入後1年以内に瑕疵が発見され、かつ弊社に通知された場合、本製品の修理または代品の納入を限度とします。ただし、保証期間内であっても、 天災および不適切な使用に起因する損害については、弊社はその責を負いません。

本資料の記載内容について、弊社の許諾なしに転載または複製することを禁じます。

浜松ホトニクス株式会社

www.hamamatsu.com

仙台堂業所	= 980_0021	仙台市書笹区中中3-2-1 (書笹通プラザ11階)	TEL (022) 267-0121	FAX (022) 267-0135
	1 300 0021			TAX (022) 207 0135
筑波宮茉所	⊤305-0817	つくば市研究学園5-12-10 (研究学園スクウェアビル7階)	TEL (029) 848-5080	FAX (029) 855-1135
東京営業所	〒105-0001	東京都港区虎ノ門3-8-21 (虎ノ門33森ビル5階)	TEL (03) 3436-0491	FAX (03) 3433-6997
中部営業所	〒430-8587	浜松市中区砂山町325-6 (日本生命浜松駅前ビル)	TEL (053) 459-1112	FAX (053) 459-1114
大阪営業所	〒541-0052	大阪市中央区安土町2-3-13 (大阪国際ビル10階)	TEL (06) 6271-0441	FAX (06) 6271-0450
西日本営業所	〒812-0013	福岡市博多区博多駅東1-13-6 (いちご博多イーストビル5階)	TEL (092) 482-0390	FAX (092) 482-0550

固体営業推進部 〒435-8558 浜松市東区市野町1126-1 TEL (053) 434-3311 FAX (053) 434-5184

Cat. No. KMIR9004J01 Oct. 2020 DN

10