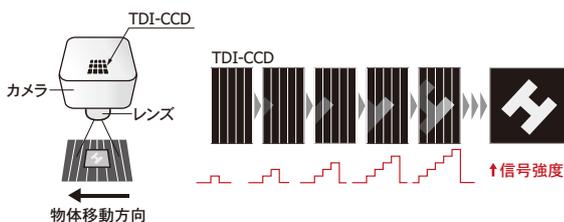


裏面入射型TDI-CCD

1 裏面入射型TDI-CCDとは

裏面入射型TDI (Time Delay Integration)-CCDは、高速撮像時などにおいて低照度下でも高いS/Nの画像が得られるセンサです。TDI動作により、移動する対象物を積分露光することで、飛躍的に高い感度を得ることができます。裏面入射型のため、紫外～近赤外の幅広い波長域 (200～1100 nm) で高い量子効率を実現しています。

[図1-1] TDI動作のイメージ



» TDI動作

CCDでは、ポテンシャルウェルに信号電荷を保持して、個々の電荷が混ざらないように転送して出力します。TDI動作は、このようなCCDの電荷転送の原理を巧みに利用して、移動する物体を撮影したり、あるいはCCDセンサ自体が移動して、静止物体をスキャンして撮影する場合に有効な方法です。

通常、センサ上に結像された画像は、その位置に対応した信号量として出力されます。この方法では、蓄積時間の間に結像された画像は必ず同じ位置にあることが必要であり、何らかの理由で結像位置にずれが生じると画像のS/Nが低下します。被写体が移動する場合、結像位置がずれることで画像にブレが発生し、場合によってはまったく画像にできないこともあります。

それに対してTDI動作は、移動する被写体に対しても画像化できるユニークな動作方法です。FFT型CCDでは、電荷読み出しの際、列単位で電荷の垂直転送を行います。その転送のタイミングと被写体の移動タイミングを合わせ、CCD画素の垂直段数分の積分・露光をする方式がTDI動作です。

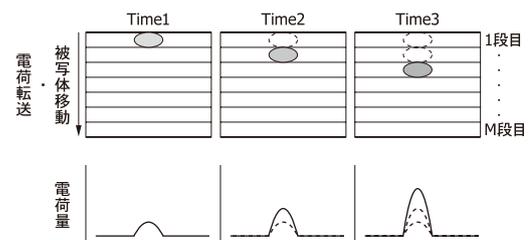
TDI動作においては、被写体の移動と同じ方向に同じ速度で電荷転送を行う必要があります。その速度は、式(1)で表されます。

$$v = f \times d \dots\dots (1)$$

v: 被写体移動速度、電荷転送速度
f: 垂直CCDの転送周波数
d: 画素サイズ (転送方向)

図1-2の1段目で蓄積された電荷が2段目に転送されると同時に2段目においても光電変換により電荷の蓄積が行われます。この動作をM段 (垂直段数) まで連続して行った場合には、M倍の電荷が蓄積されます。このため、リニアイメージセンサに比べてM倍の感度を実現できます (垂直段数が128の場合、通常のリニアイメージセンサに比べて128倍の感度が得られます)。蓄積された電荷はCCDの水平シフトレジスタから列ごとに出力され、とぎれがない2次元の画像が得られます。またTDI動作では、2次元動作モード時よりも感度のバラツキが改善されます。

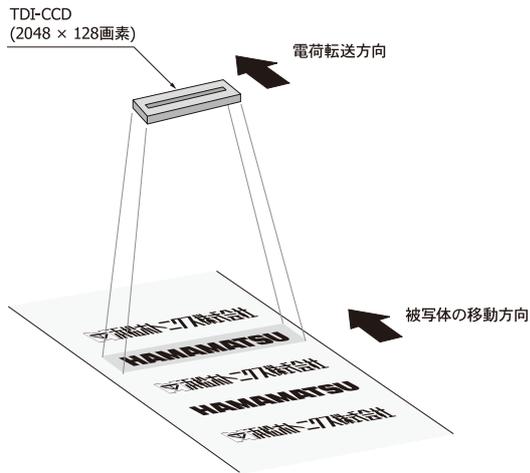
[図1-2] TDI動作による積分露光の模式図



KMPDC01393A

[図1-3] TDI動作による撮影例

(a) 高速移動する対象物の撮影



KMPDC02661B

(b) 高速回転する対象物の撮影



KMPDC02671A

図1-3 (b)においてCCDを2次元動作させてドラムが静止した状態で撮影した場合、図1-4 (a)のようにブレのない画像を取得することができますが、ドラムが回転していると図1-4 (b)のように画像はブレてしまいます。シャッタ時間を短くした場合、ブレのない画像が得られますが、画像は図1-4 (c)のように暗くなります。TDI-CCDは、ドラムの回転と同じ方向に同じ速度で電荷転送を行うため、図1-5のような明るくブレのない連続画像が得られます。

[図1-4] 2次元動作による撮影

(a) ドラム静止時



(b) ドラム回転時



(c) ドラム回転時 (シャッタ時間を短くした場合)



[図1-5] TDI動作による撮影 (ドラム回転時の連続画像)

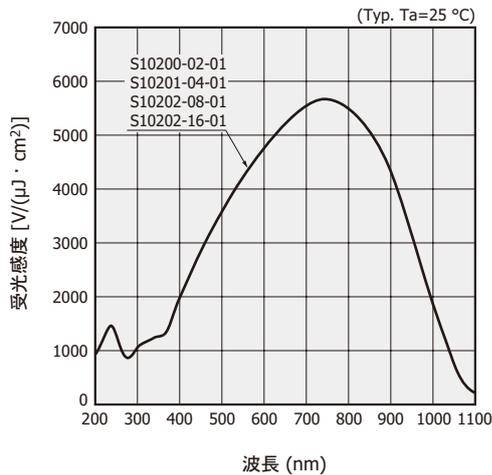


2 特長

高感度 (紫外～近赤外域)

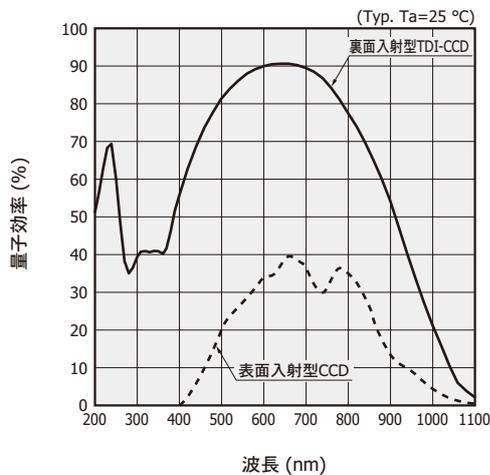
浜松ホトニクス製のTDI-CCDは、裏面入射型の構造を採用しており、紫外～近赤外 (200～1100 nm) の波長域で高感度を実現しています。

[図2-1] 分光感度特性 (窓なし時)



KMPDB0268JB

[図2-2] 量子効率-波長 (窓なし時)

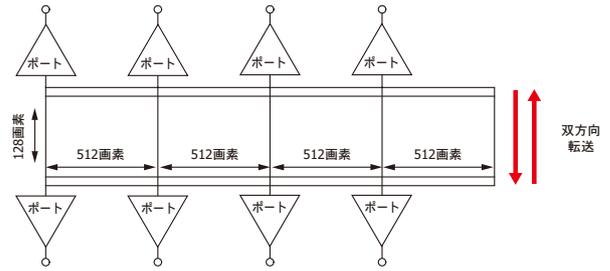


KMPDB0269JC

マルチポート化による高速ラインレート

高速移動サンプルの連続撮像をするために、TDI-CCDには複数のアンプを配置し、画像の読み出しを並列に行うことによって高速ラインレートを実現しています。ピクセルレートは30 MHz/ポートで、ラインレートは、S10200-02-01、S10201-04-01、S10202-08-01では50 kHz、S10202-16-01では100 kHzを実現しています。

[図2-3] センサ構造図 [代表例: S10201-04-01, 2048 (H) × 128 (V)画素, 片側4ポート × 2 (双方向転送)]

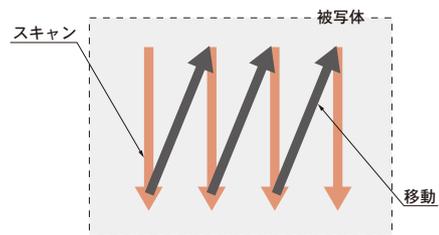


KMPDC02683A

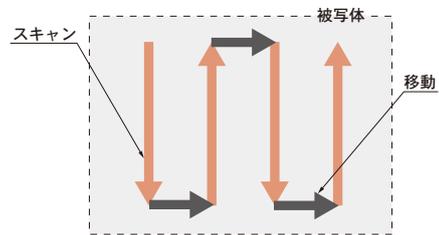
被写体を複数回にわたってスキャンする場合、TDI-CCDでは双方向転送機能によって図2-4 (a)のように戻る動作が不要なため、検査スループットを向上させることが可能です。

[図2-4] カメラのスキャン方向

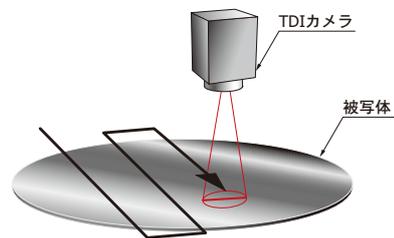
(a) 単方向転送



(b) 双方向転送



(c) 双方向転送のTDI-CCDを搭載したカメラ



KMPDC05033A

》 アンチブルーミング

受光面に強い光が入り信号電荷が特定量を超えた場合に、余剰電荷が隣接した画素や転送領域にあふれ出る現象がブルーミング（オーバーフロー）です。ドレインを設けて余剰電荷を捨てることによりブルーミングを防止することをアンチブルーミングといいます [図2-5]。

CCDのアンチブルーミング構造には大きく分けて横型と縦型があり、当社のCCDでは横型を採用しています。横型は、画素もしくは電荷転送路の脇にドレインを設けた構造で、表面入射型CCDでは開口率が小さくなる欠点があります。一方、裏面入射型CCDでは、この欠点を回避することができます [図2-6]。

なお、オーバーフロードレイン電圧 (V_{OFD})とオーバーフローゲート電圧 (V_{OFG})によりアンチブルーミング機能を制御する場合、印加電圧によりドレインから画素へ電荷が流入したり、飽和電荷量が低下することがあります。

オーバーフローゲート (OFG)のポテンシャルが、垂直画素のバリアポテンシャルよりも浅い位置にある場合、垂直画素のバリアポテンシャルを超えた電荷はオーバーフロードレイン (OFD)へは流れず、隣接の垂直画素へと溢れてブルーミングしてしまうため、アンチブルーミングは正しく機能しません [図2-7 (a)]。

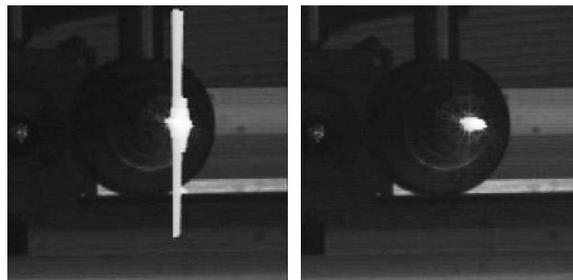
OFGのポテンシャルの深さが、OFDのポテンシャルと垂直画素のバリアポテンシャルの間に位置する場合、アンチブルーミングは正しく機能します。OFGのポテンシャルを超える電荷はOFDへと排出され、バリアポテンシャルに達することがないため、隣接する垂直画素への電荷の流入を防ぐことができます。ただし、OFGのポテンシャルが深いほど飽和電荷量が小さくなります。また、単位時間内に入射する光量が非常に多くなると、OFDへの排出が追い付かず、ブルーミングが発生する場合があるので注意が必要です [図2-7 (b)]。

OFGのポテンシャルがOFDのポテンシャルよりも深い位置にある場合、OFDの電荷が垂直画素に流れ込みます。この場合は、正しい信号を取得することができません [図2-7 (c)]。

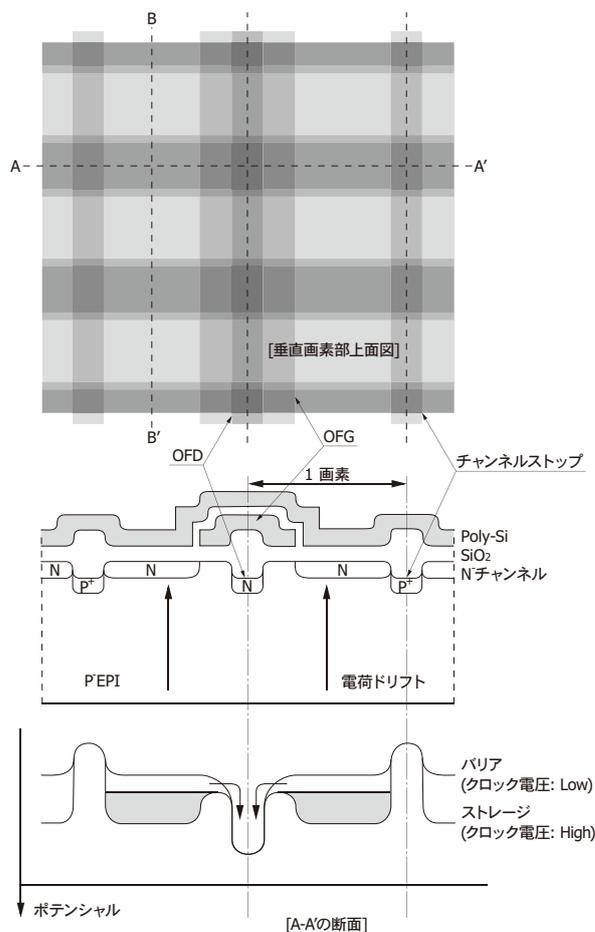
電圧設定とアンチブルーミングの関係は、図2-8を参照してください。アンチブルーミング機能を正常に動作させるためには、データシートに記載された電圧 (Typ.)で使用してください。

[図2-5] 撮像例

(a) アンチブルーミングなし (b) アンチブルーミングあり



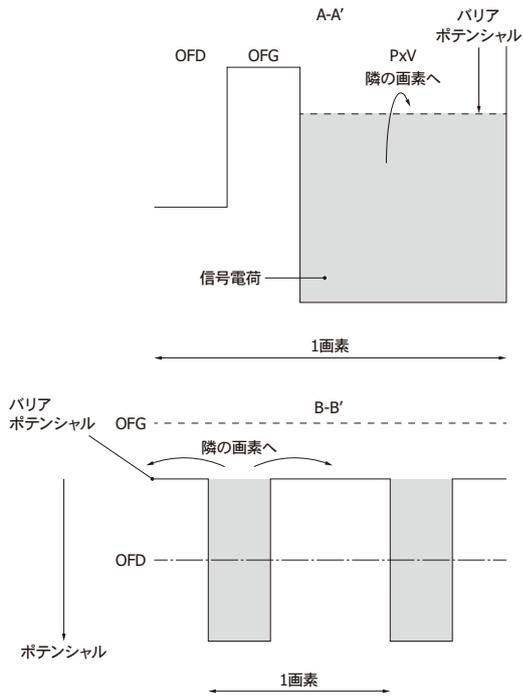
[図2-6] アンチブルーミング構造 (横型)とポテンシャル (2画素にオーバーフロードレインを設けた構造)



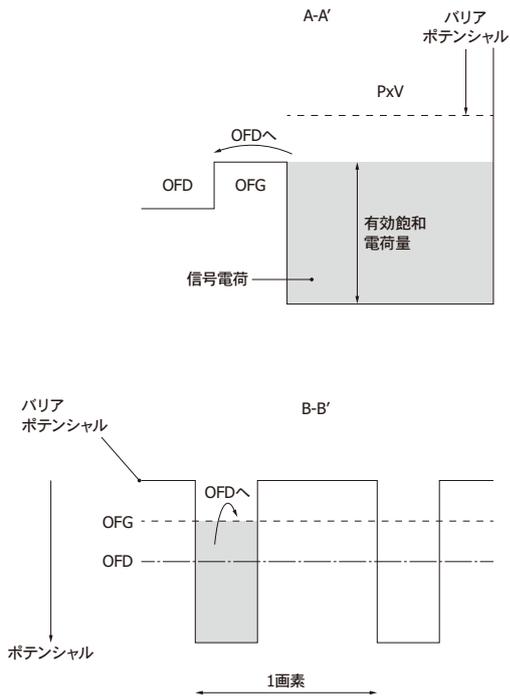
KMPDC02863C

[図2-7] アンチブルーミングの概念図 (横型)

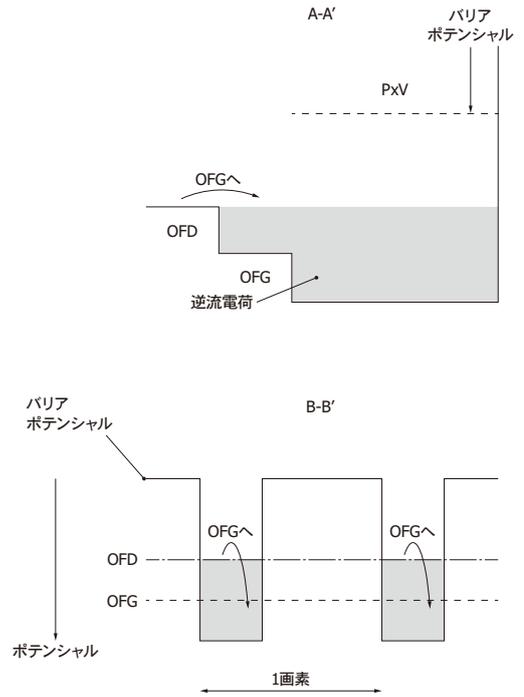
(a) ブルーミングが発生するとき



(b) アンチブルーミングが機能するとき

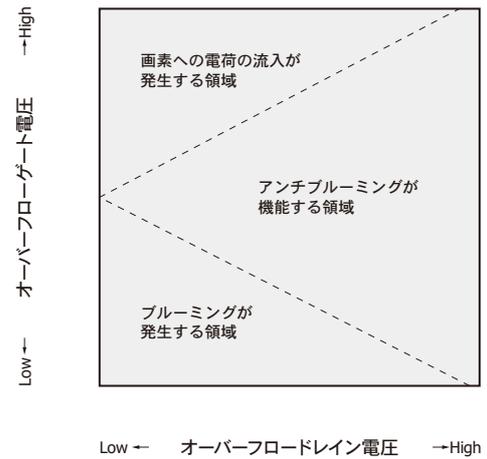


(c) 画素への電荷の流入が発生するとき (信号取得不可)



KMPDC02853B

[図2-8] 電圧設定とアンチブルーミングの概念図



KMPDC04963B

3 使い方

» 偽信号の低減

裏面入射型CCDを光入射方向から見た場合、水平シフトレジスタはSiの厚い部分（不感部分）で覆われていますが [図3-1]、長波長の光は不感部分を透過して、水平シフトレジスタで受光されて偽信号が発生することがあります。

偽信号は実際の信号に重畳され、TDI動作の蓄積時間の合計よりも水平転送時間が長い場合、偽信号の影響が大きくなります。

偽信号の影響が大きい場合には、光の照射位置の調整、水平シフトレジスタの遮光などの対策を行う必要があります。

» 暗出力の影響の低減

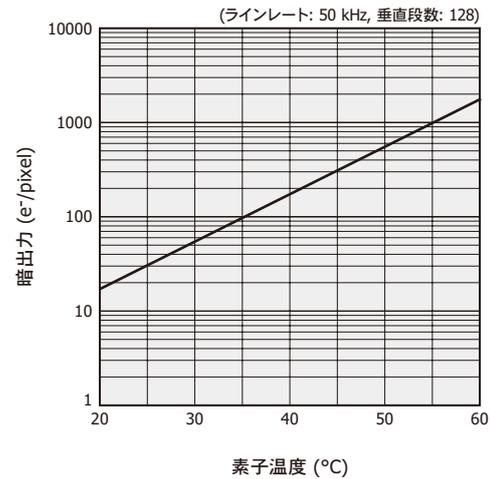
暗出力は、光入力のない状態における電流出力です。計測用CCDでは、一般に1画素当たり1秒間に発生する電子数（単位: electron/pixel/s）で表します。

TDI動作の場合、各列の画素で発生する暗出力は垂直段数分蓄積されます。そのため、1秒間当たり発生する電子数ではなく、ラインレートの逆数と垂直段数を積算した時間で発生する電子数（単位: electron/pixel）で表します。したがって、高速ラインレートで動作する、または垂直段数を少なくすることで、暗出力は小さくなります。

暗出力は、素子温度が5~7℃上昇するとほぼ2倍になります [図3-2]。素子温度が上がると、ダークショットノイズの影響が大きくなる場合があるため、適正な放熱対策を行う必要があります [図3-3]。

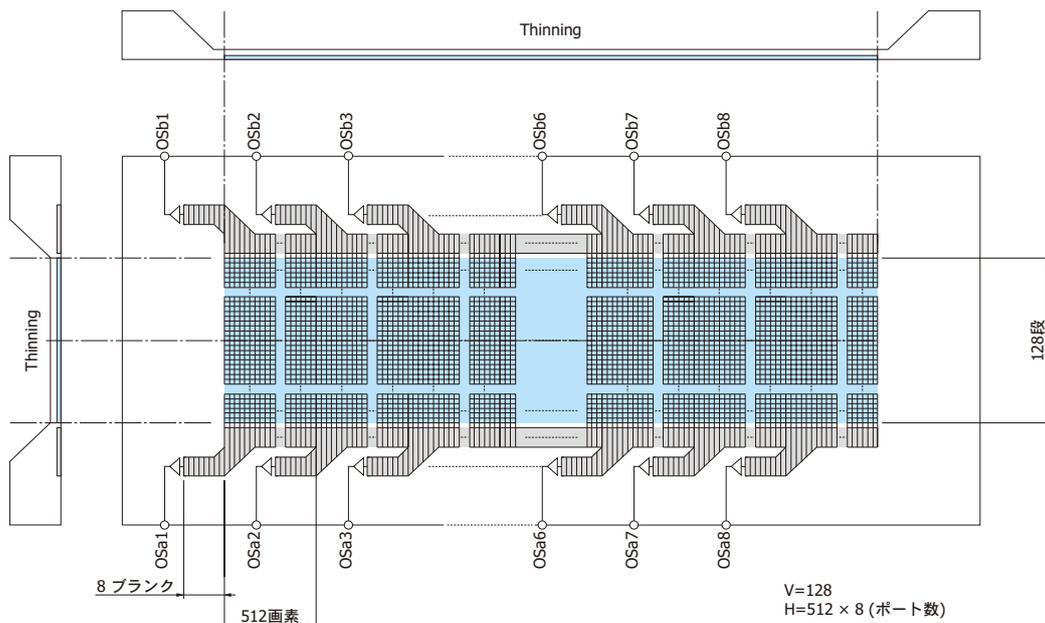
各列のダークオフセットを補正する必要がある場合は、光が入射しない状態（暗状態）にしたときの、有効画素の出力を使用してください。なお、ブランク画素出力には、垂直画素で発生する信号を含みません。

[図3-2] 暗出力-素子温度 (代表例)



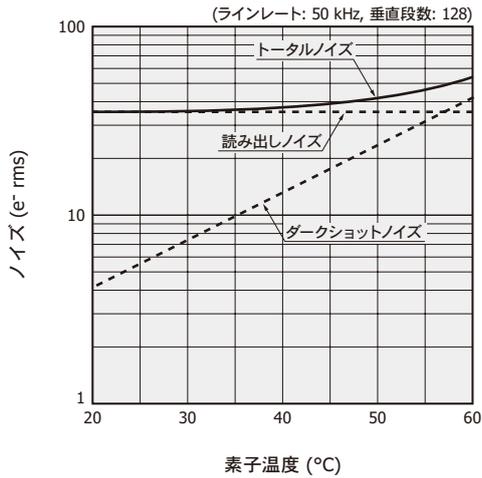
KMPD804073A

[図3-1] デバイス構造 (代表例: S10202-08-01, 外形寸法図において上面から見たCCDチップ概念図)



KMPDC02523C

[図3-3] ノイズ-素子温度 (代表例)



KMPDB04063A

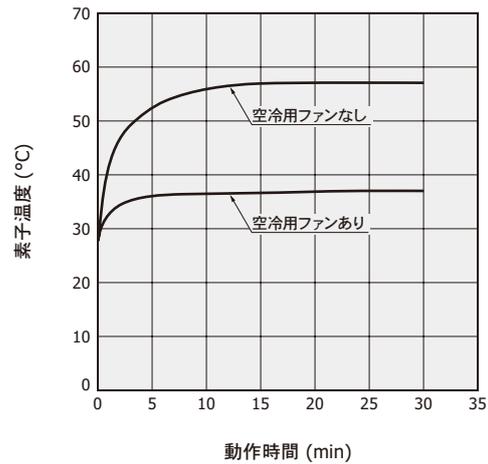
» センサの発熱

TDI-CCDは高速読み出しを行い、マルチポート構造のためセンサが高温になる可能性があります。素子温度が上昇すると暗電流が増加するため、必要に応じて適切な放熱処理が必要です。放熱の方法については、弊社HPの資料・データ集内の「イメージセンサ/使用上の注意」を参照してください。

電荷転送時における消費電力は、動作電圧振幅の2乗と読み出し周波数に比例します。この場合、読み出し周波数の大きい水平シフトレジスタにおける消費電力が支配的です。このため、読み出しを行っていない側の水平シフトレジスタでは、発熱を低減するために駆動電圧をDC電圧に設定して不要な電荷を捨てています（データシートのタイミングチャートを参照）。

当社製評価回路を用いた場合の素子温度と動作時間の関係の例を図3-4に示します（回路系は密封されており、放熱対策が施されていない状態）。

[図3-4] 素子温度-動作時間 (S10201-04-01, 当社製評価回路, 代表例)



KMPDB04063A

» タイミングチャート

TDI動作 (1×1)のタイミングチャートを図3-5(a)に示します。垂直方向に1回転送した後、水平方向に全画素読み出します。その動作を繰り返すことで、信号を出力します。被写体の移動速度と垂直方向の転送周期を同期させることで、2次元動作モード時よりも高感度な画像が得られます。

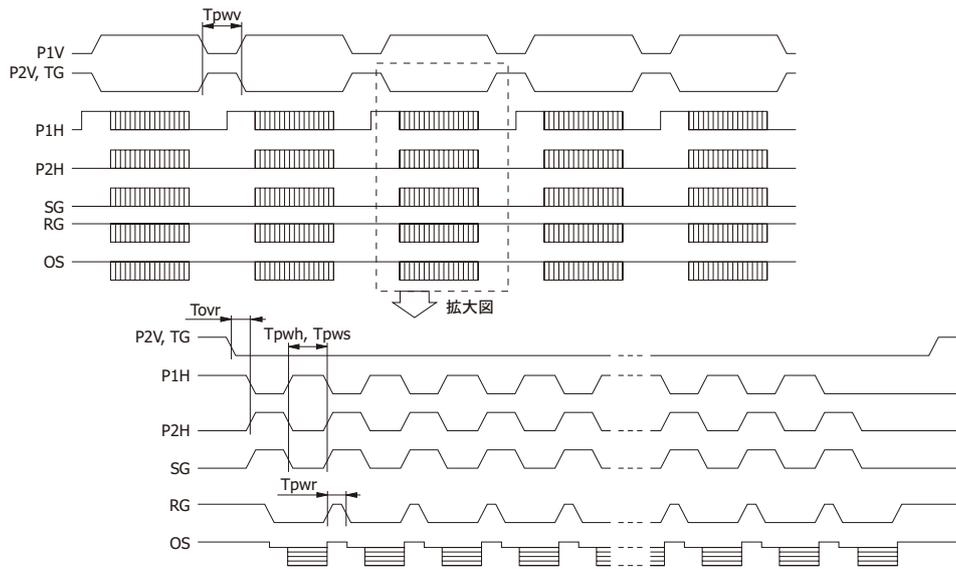
また、2次元動作モード時と同様に、TDI動作でピクセルビニングすることも可能です。

最初に、ビニングしたい画素数だけ垂直方向に転送します。これにより、対応する水平レジスタに電荷が加算されます。その後、水平方向を全て転送しますが、サミングゲートパルスを読み出す画素数だけパルスを止めると、水平方向にも電荷が加算されます。

例えば、2×2ピクセルビニングを行う場合、まず垂直方向に2回(2画素)転送します。その後、水平方向に2回(2画素)転送、サミングゲートで1回(1画素)転送という動作を、水平全画素読み出すまで繰り返すことで、2×2ピクセルビニングを行うことができます。2×2ピクセルビニングのタイミングチャートは、図3-5(b)を参照ください。

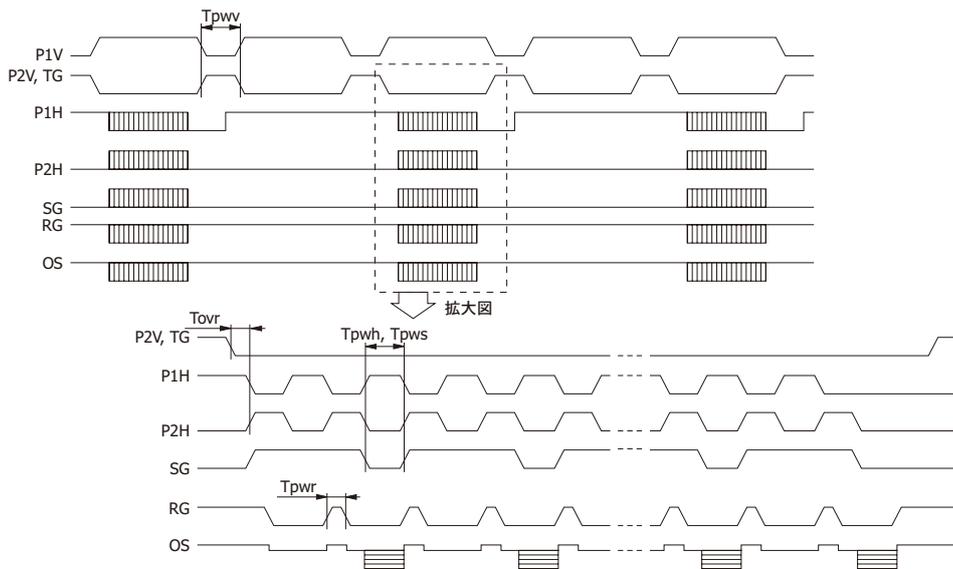
[図3-5] 動作モードごとのタイミングチャート

(a) TDI動作、1 × 1



KMPDC01473A

(b) TDI動作、2 × 2 (ピクセルビニング)



KMPDC01483A

》 端子に流れる電流

各端子に流れる電流値の例 (S10200-02-01)を表3-1に示します。

[表3-1] 各端子に流れる電流値*1

端子名	印加電圧	電流値
OD*2	+15 V	+8 mA
RD*3	+14 V	1 nA~164 μ A
OG	+6 V	+100 μ A
OFD*3	+9 V	1 nA~164 μ A
OFG	+5 V	+100 μ A
P1V, P2V, P3V*4	+6 V	+数百 mA
	-5 V	+数百 mA
P1H, P2H*4	+6 V	+数百 mA
	-5 V	+数百 mA
SG*4	+6 V	+数十 mA
	-5 V	+数十 mA
RG*4	+8 V	+数十 mA
	0 V	+数十 mA
TG*4	+6 V	+数十 mA
	-5 V	+数十 mA

*1: 標準動作電圧印加時の値

*2: 1つのノードに流れる電流値 (OSの負荷抵抗は2.2 k Ω を使用)

*3: 光照射の有無で変動
最大値はFW \times 100の光を入射した時の値

*4: クロック時の最大電流値
(当社製駆動回路での実測値。駆動回路や動作条件によって変動。)

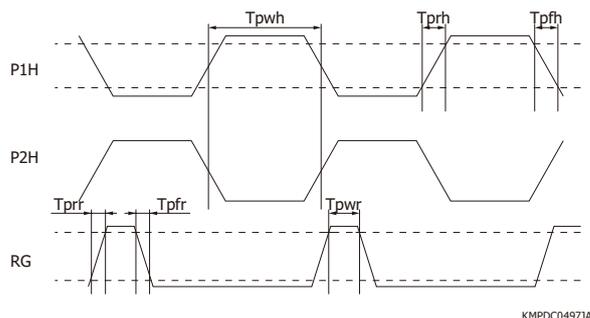
》 高速動作時のクロック、出力波形

水平シフトレジスタのクロック波形については、リングングをできるだけ低減し、クロック振幅の50% \pm 10%で交差させることを推奨します [図3-6]。

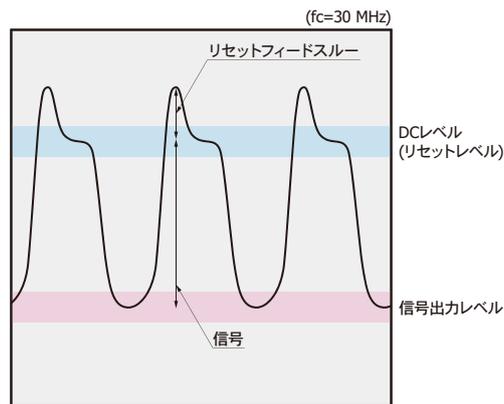
駆動条件が適正でない場合、飽和電荷量・CCD転送効率・読み出しノイズなどがデータシートに掲載された特性値を満たさない場合があります。また、リセットゲートに入力する波形は、OS出力波形のDCレベル (リセットレベル)、信号レベルに平坦な領域ができるように調整してください [図3-7]。駆動回路には、これらのクロックタイミングを微調整できる機構が必要です。

そのため、クロックタイミングの調整が可能なクロックジェネレータの使用をお勧めします。上記が推奨条件となりますので、まずはクロックタイミングの調整と基板上の容量と抵抗を調整してください。

[図3-6] タイミングチャート (水平シフトレジスタ、リセットゲート)



[図3-7] OS出力波形例



上図のような理想的な波形を得るためには、回路の最適化が必要です。

》 高速信号処理回路

数MHz以上の読み出し速度が必要とされるCCDの信号処理回路において、ディスクリート部品だけで構成された回路ではクランプの高速動作やコンデンサへの速い充放電特性を実現することは困難です。

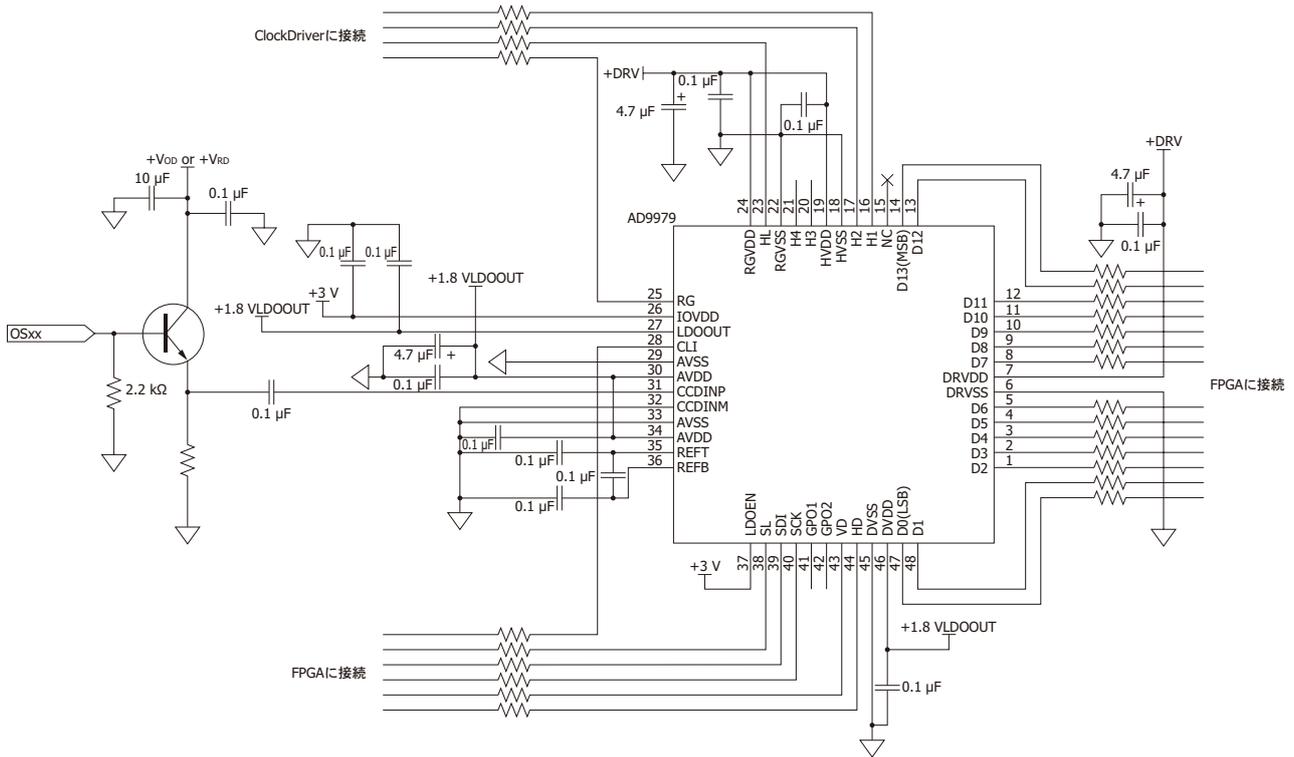
CCDの信号処理に最適化されたアナログフロントエンドIC (CDS/ゲイン/オフセット回路、A/D変換器などを1チップで構成したIC)を使用することで高速信号処理回路を構成できます [図3-8]。

》 読み出しノイズと出力信号周波数

一般的に、出力信号周波数を低くすると、CCDの読み出しノイズは小さくなります [図3-9]。なお、出力信号周波数を低くした場合ラインレートも遅くなり、電荷転送中の暗出力成分が大きくなり、そのショットノイズがトータルノイズに影響する場合があります。

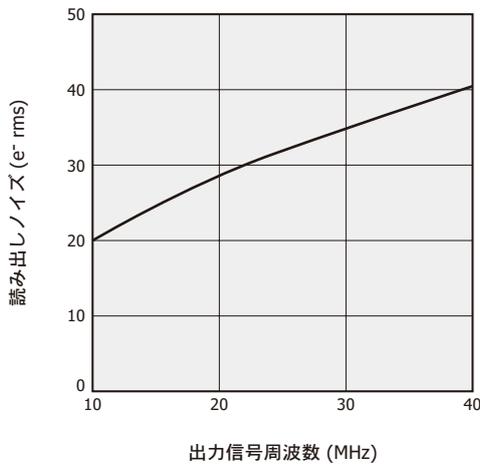
読み出しノイズは、読み出し回路などのさまざまな要因により変わります。

[図3-8] 高速信号処理回路例 (アナログフロントエンドICを使用)



KMPDC05003A

[図3-9] 読み出しノイズー出力信号周波数 (代表例)



KMPDB04103A

露光量の調整

TDI動作において、ラインレートの変更により露光量を変えることができます。また、光学系にフィルタを追加して光量を調節することも有効な方法です。なお、当社の標準品には垂直段数の切り替えによる露光量の調整機能はありませんが、カスタム対応にて垂直段数切り替え機能の追加が可能です。

2次元動作

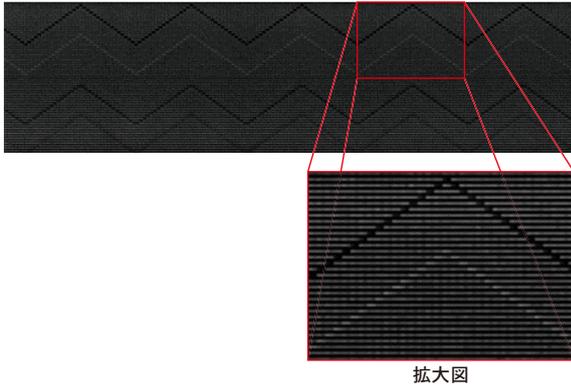
当社のTDI-CCDはTDI動作に加えて2次元動作も可能で、光学系の確認や初期の評価に使用することがあります。光を入射した場合の2次元動作の画像を図3-10に示します。

画像のコントラストを強調するとジグザグの固定パターンが見えます。この固定パターンが見える原因は、受光部にメタルをジグザグ状に配線しているためです。高速動作するCCDでは、クロック波形のなまりにより、電荷転送特性の低下が起こる可能性があります。そのため、受光部中央まで低抵抗でクロック信号を入力可能な本構造を採用しています。画素上のメタルの有無により画素ごとに感度差が生じますが、各列において、感度の異なる画素の構成は同じです。このため、TDI動作の場合は、各列の画素の平均感度は同じになります。

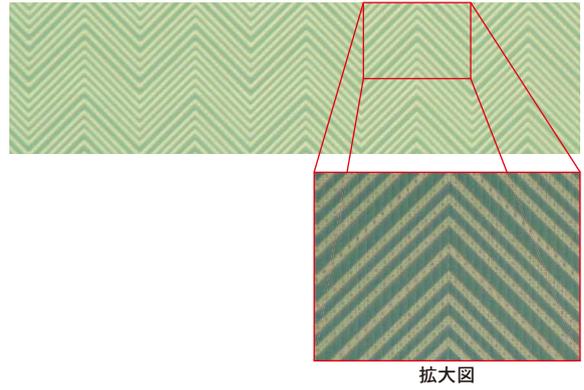
2次元動作のクロックタイミングチャートを図3-11に示します。

[図3-10] 光を入射した場合の2次元動作の画像

(a) 2次元動作の均一照射画像
(1ポート: 512 × 128画素)



(b) メタルパターン側から撮ったセンサ写真
(1ポート: 512 × 128画素)

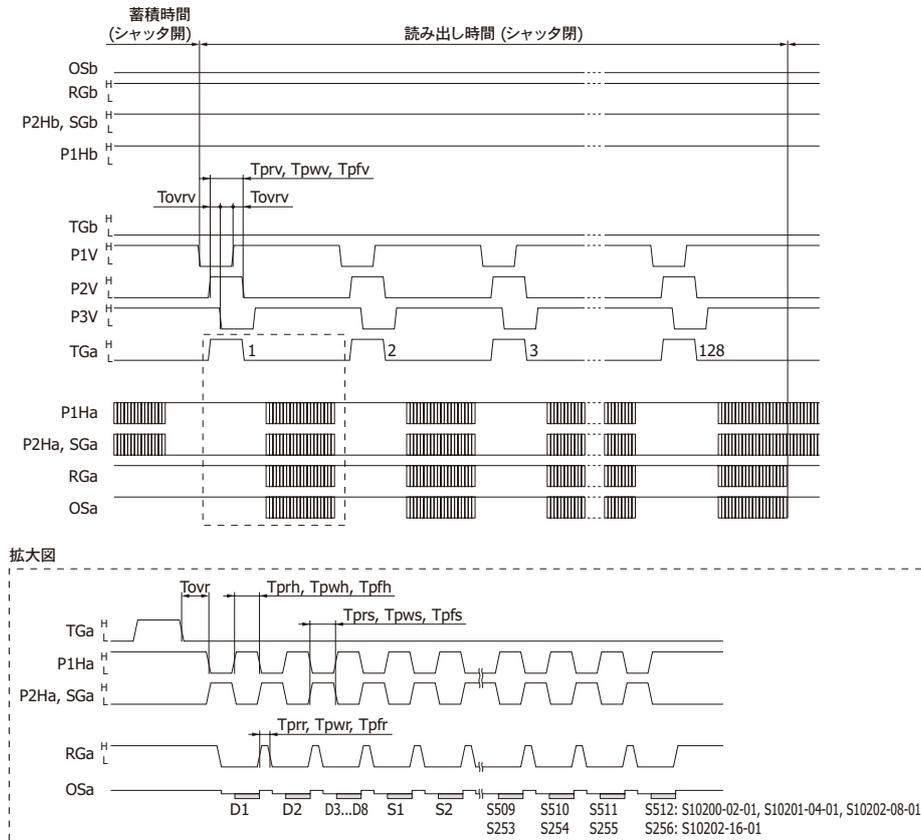


» 出力のバラツキの補正

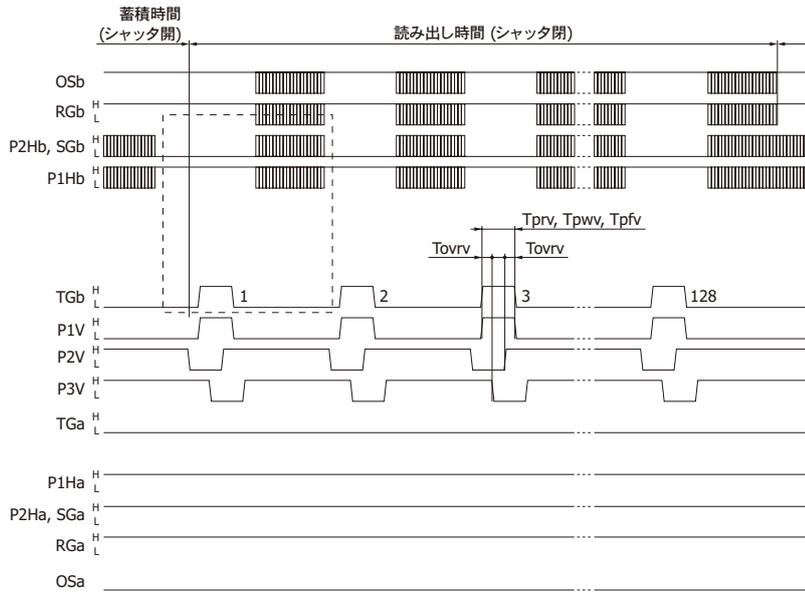
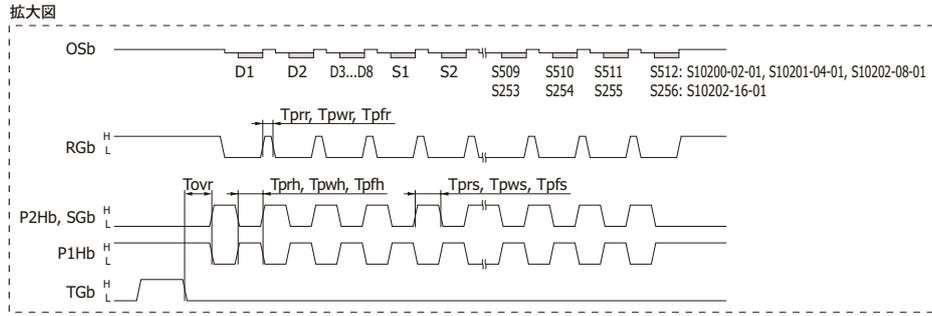
各ポートの出力には、読み出しアンプの特性の違いや、回路配線長の違いなどによってバラツキを生じます。また各列においても動作条件によっては出力のバラツキを生じる場合がありますので、必要に応じて補正機能を追加することを推奨します。

[図3-11] 2次元動作のタイミングチャート

(a) Aポート読み出し



(b) Bポート読み出し



KMPDC04983B

4 出力回路の構造

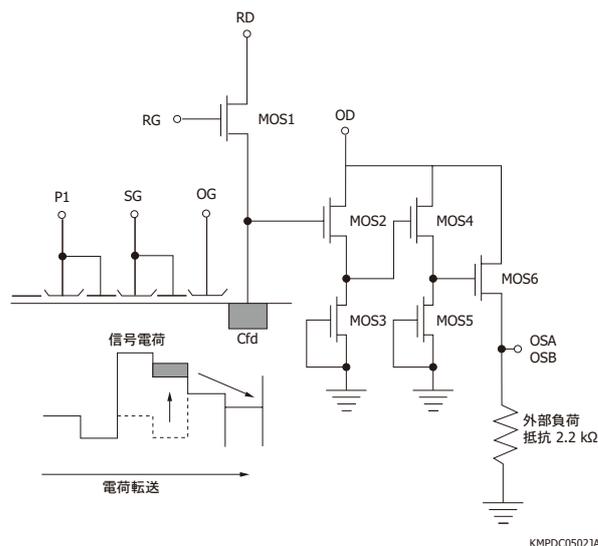
FDA (Floating Diffusion Amplifier)は、最も広く使用されている「CCDの電荷検出の方式」です。FDAは、電荷の検出ノードと、それに接続されたリセット用MOSFET (MOS1)と電荷-電圧変換用MOSFET (MOS2~6)により構成されます [図4-1]。検出ノードに転送された電荷は、電荷-電圧変換用MOSFETで、 $Q = C V$ の関係により電荷から電圧に変換されます。次の信号を読むために検出ノードは、リセット用MOSFETによりリファレンスレベル (RDの電圧)にリセットされます。

FDAでは、検出に伴うノイズはノードの容量によって決まりますが、Whiteによって提案されたCDS (Correlated Double Sampling: 相関2重サンプリング)によってほとんど除去することができます。

信号電荷が出力されるタイミングは、シフトレジスタの最終クロックゲートであるサミングゲート (SG)がHighレベルからLowレベルになるときに同期しています。

出力電圧は、3段ソースフォロワ回路でインピーダンス変換され (ゲイン<1)、OSA、OSBとして出力されます。なお、図4-1の外部負荷抵抗 (2.2 k Ω)は裏面入射型TDI-CCDには含まれていないため、外付けする必要があります。

[図4-1] FDAを採用したCCDの出力部



▶ TDIカメラ C10000シリーズ (関連製品)

浜松ホトニクスは、裏面入射型TDI-CCD S10201-04-01と駆動回路を内蔵したTDIカメラ C10000シリーズを製品化しています。



C10000-801 (S10201-04-01内蔵)

🔧 製品情報

<https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/cameras/tdi-cameras/C10000-801.html>

本資料の記載内容は、令和6年11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

仙台営業所 〒980-0021 仙台市青葉区中央3-2-1 (青葉通プラザ11階)

TEL (022) 267-0121 FAX (022) 267-0135

東京営業所 〒100-0004 東京都千代田区大手町2-6-4 (常盤橋タワー11階)

TEL (03) 6757-4994 FAX (03) 6757-4997

中部営業所 〒430-8587 浜松市中央区砂山町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 浜松市中央区市野町1126-1 TEL (053) 434-3311 FAX (053) 434-5184