

McLean 輪読第 9 回 p.405-415

学籍番号 05-162003 理学部天文学科 4 年 小川貴士

2017 年 7 月 12 日

11.4 Practical operation of infrared arrays

CCD と赤外線アレイには共通点

- 電荷の収集/除去にはクロック電圧が必要
- アウトプットの信号 (数 [$\mu\text{V}/e^-$]) を増幅しデジタル化
- ピクセル間の変動は flat-field で除去
- kTC ノイズは double-sampling で除去
- 暗電流は冷却することで最小化
- 同様の画像処理方法

11.4.1 Linearity

- 少なくとも 2 つの静電容量 : pn 検出器接合 C_{det} 、ソースフォロワー FET C_{FET}
- コンデンサーの放電を引き起こす 2 つの電流 : 光電子と暗電流
- 光子のフラックスと出力電圧の関係が非線形 \rightarrow ポテンシャルが存在^{*1}
- セル統合の際、バイアス電圧が連続的に変化 \rightarrow 光生成電荷/案電流を蓄積しているかどうかは関係しない

$Q = CV$ より

$$\begin{aligned}dQ &= \left(C + \frac{\partial C}{\partial V} V \right) dV \\ &= I_{det} dt\end{aligned}$$

*1 検出器の静電容量は pn 空乏層の幅、すなわち逆バイアス電圧に依存しているため。CCD でも空乏層のサイズの変化は起こるが影響は小さい。

dV/dt と I_{det} は線形関係にない。静電容量の定数部分を C_{fix} と表すと

$$C + \frac{\partial C}{\partial V} V = C_{fix} + C_0 \left(\left(1 - \frac{V}{V_{bi}}\right)^{-\frac{1}{2}} + \frac{1}{2} \frac{V}{V_{bi}} \left(1 - \frac{V}{V_{bi}}\right)^{-\frac{3}{2}} \right)$$

$$C_0 = A_{det} \left[\frac{e\epsilon_s}{2V_{bi} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

- A_{det} : 検出器の面積
- N_A, N_D : アクセプターとドナーのドーピング集中度 ([atoms/cm³]) *2
- ϵ_s : 接合部の誘電率 *3
- $V_{bi} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$: ダイオードの拡散電位
- n_i : キャリアー濃度
- 影響は比較的小さい → 図 1

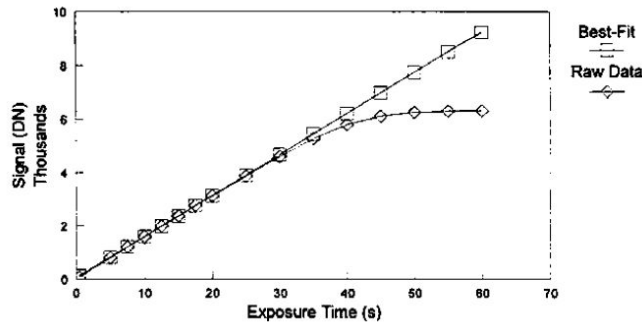


図 1 non linearity

11.4.2 Dark current and cooling

暗電流の主要原因

- 拡散 (diffusion)
- 半導体内での電荷の熱的生成再結合 (thermal generation-recombination)(G-R)
- リーク電流

フォトダイオードの場合、

$$I_{dark} = \frac{kT}{eR_{0diff}} \left(\exp \frac{eV}{kT} - 1 \right) + \frac{2kT}{eR_{0GR}} \left(1 - \frac{V}{V_{bi}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\exp \frac{eV}{2kT} - 1 \right) + I_{leak} \quad (1)$$

- V : 検出器の電圧

*2 $N_A \gg N_D$ のとき階段接合

*3 InSb の場合 $17.7\epsilon_0$

- $R_{0_{diff}}, R_{0_{GR}}$: バイアスがないときの拡散と G-R に対する検出器のインピーダンス*4 *5
- 高温では拡散が主
- 100K 以下では G-R が主 → 指数関数的に小さくなりやがてリーク電流が支配的になる
- バンドギャップがシリコンよりはるかに小さいので、CCD より低温に保つ必要がある*6
- 最大動作温度とカットオフ波長の関係は経験的に $T_{max} = \frac{200[\text{K}]}{\lambda_C \mu\text{m}}$ (Hoffman, Love, and Rosbeck, 2004) *7

11.4.3 Noise sources

読み出しノイズ

- 読み出しの際にかかる電圧のランダムな変動により生じる → $R = CV_{noise}/e \text{ electrons}$
- リセットノイズ (kTC ノイズ) は逆バイアス電圧がかけられたときに生じる
- リセットトランジスタをオンにすると、検出器の電圧が時定数 $R_{on}C$ で V_{RD} まで指数関数的に増加 (R_{on} はトランジスタの抵抗; 時定数は非常に短い)。
- 時定数よりも十分長い時間が経過すると、ノイズの実効値は電圧で $\sqrt{\frac{kT}{C}}$ 、電荷で \sqrt{kTC} である。
- CCD のように $R_{off}C$ は非常に長く、リセットノイズは凍結される
- リセット前後の出力電圧の差をとることでオフセットを除去できる*8

11.4.4 Quantum efficiency

- 近赤外で InSb, HgCdTe arrays は非常に高い量子効率 (> 80%)
- 中間赤外のドーピングされたシリコンでは 30 – 40%
- 近赤外線検出器での量子効率をコントロール: Thinning の非一様性, 表面の化学的不活性度, 基盤のドーピング密度
- 波長が短いと吸収断面積も小さくなる

11.4.5 Multiple outputs

- IR array と CCD の違いは望遠鏡 (特に長波長)

*4 典型的な値は、InSb 検出器でそれぞれ $10^5[\Omega]$ at 140[K], $10^{10}[\Omega]$ at 77[K]

*5 $\frac{kT}{e} = 4.3[\text{mV}]$ at 50[K], したがって典型的なバイアスの値 $V > 100[\text{mV}]$ と温度の値 $T < 77[\text{K}]$ に対して $\exp \frac{eV}{kT} \gg 1$ となる。

*6 HgCdTe array, 1 electron/minute/pixel: 77K
InSb array, 0.1 electron/s/pixel: 30K
IBC array では $20\mu\text{m}$ より小さいバンドギャップでは 4K 程度に冷やす必要がある。

*7 80[K]- $2.5\mu\text{m}$
40[K]- $5\mu\text{m}$
10[K]- $20\mu\text{m}$

*8 cf. double-sampling

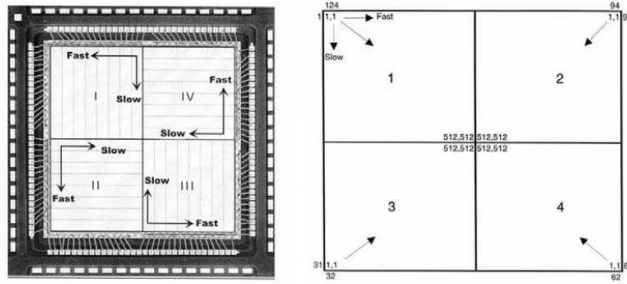


図2 multiple output

- 比較的暗い天体の赤外線画像 → デバイスの flat-field pattern と bad pixel しか見えない*9
- バックグラウンドを引く (対象天体を blank area に動かして繰り返し露光することで最も効率よく行われる)
- 2つのイメージの差をとると背景フラックスが除かれる*10
- スカイの値の観測に時間をかけすぎるとスカイが変化してしまう → 背景フラックスは非常に大きいので、わずかな変動でも天体が見えなくなってしまう
- スカイを差し引いてもピクセル間の量子効率の違いを補正するために flat-field 補正が必要である
- 背景フラックスが大きいと飽和時間が短い → multiple outputs*11

11.4.6 Array controllers

赤外線アレイ検出器の制御装置は CCD のものと非常に似ている → どんな制御装置もいくつかの基本的特徴を持つ必要がある

1. Fast(column) register clock

- ある行が処理されたときに、その行の各ピクセルが出力バスに接続できるようにするクロック
- 1,2つのクロック位相、スタートパルスが必要とする。

2. Slow(row) register clock

- 各列を順に扱う
- 各列ごとに column register clock を作動させて列をスキャンする必要がある → そのため row register clock の動作は遅い
- 1,2つのクロック位相、スタートパルスが必要とする。

3. Reset clock

*9 赤外線の背景フラックスが非常に強いため

*10 望遠鏡全体を動かしたら nodding, 副鏡を動かしたら chopping

*11 最小で 4, 多くは 32,64 のものもある

- 各ピクセルをリセットする単一電圧
- CCD と異なり、リセットされるのは出力増幅ノードではなく電荷収集ノード*12
- ピクセルが処理され信号がデジタル化されてもリセットパルスが送られなければ検出器は積分をしたまま (non-destructive readout)

電力供給線以外で最も重要な DC バイアス電圧

- 基盤電圧 (通常はアース) と検出器の基盤電圧、または検出器の共通の供給電圧
- 出力トランジスタのドレイン電圧*13
- 単位セルのドレイン電圧*14

その他

- いくつかの装置では、clamp line に 2 つのレベルの切り替えができる DC バイアスラインが必要 (V_{ddCl}, V_{ggCl}) / reset lines にパルスの形成の時定数 $RC \sim 1\mu\text{m}$ が必要 (V_{rstG}, V_{rstR})
- 検出器の出力は負荷抵抗か一定の電流源 ($\sim 100 - 200[\mu\text{A}]$) でなされる
- ほとんどの検出器は multiple output を持つので、多数のデジタル化の平行チャンネルが必要
- CCD と赤外線アレイでは読み出しレートと電子装置の処理速度も異なる
- 最も短い赤外波長でも最大積分時間は数ミリ秒
- co-adder で多くの短い on-chip 露光を足し合わせるのが習慣的
- 読み出し時間が CCD よずっと短く、correlated double-sampling にデュアルスロープ (二重積分) 動作を採用することはできない
- プリアンプはチップの出力に DC で接続/一般に速い処理速度 → システムノイズ

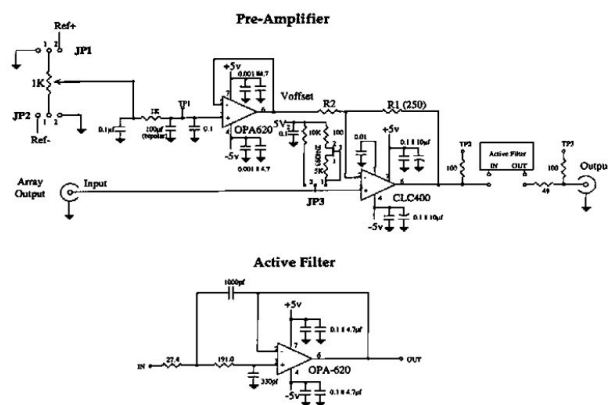


図 3 pre-amp circuit

*12

- ピクセルを個別にリセットできない検出器もある
- 一度に一行をリセットする必要がある
- 一度に全ピクセルをリセットできる検出器もある

*13 増幅器の輝きを減らすために最小化が望まれる

*14 検出器の中には、井戸の深さを決めるバイアス電圧が検出器の基盤電圧と単位セルのドレイン電圧の差で決まるものもある: $V_{detbias} = V_{detsub} - V_{dduc}$

ASIC

- application-specific integrated circuits(ASICs)
- 検出器のエレクトロニクスを大幅に単純化し、消費電力も抑えられる

11.5 Readout noise

- CCD と違い (露光時間を決める) シャッターがない
- シャッターも冷却する必要がある
- 背景光が大きいため露光時間が短い → 素早い動作
- 露光時間はリセットパルスと読み出しパルスで制御
- 読み出しにかかる時間は回路の整定時間による
- non-destructive readout を行う性能が赤外線アレイには重要 (図 4 参考)

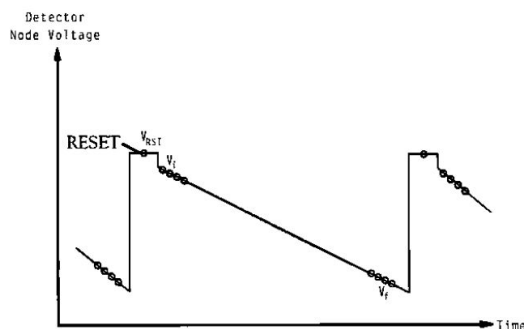


Figure 11.12. The schematic variation of the output voltage as a function of time for a typical pixel in an infrared array detector. Associated readout modes are described in the text.

図 4 the schematic variation of the output voltage

Single-sampling

- 露光時間 T_i 、読み出し時間を 66ms とする
- それぞれのピクセルの露光時間を等しくするためには、積分開始時刻に 66ms の時間差をつける → 最初のピクセルが積分を開始した時刻の T_i 後 = 最後のピクセルが積分を開始してから $T_i - 66ms$ 後に読み出しを開始
- 読み出しパルスが送られた後、command-to-convert パルスが送られる (リセットパルスではない) → 各ピクセルの値がデジタル化される
- 1 つしかサンプルをとらないため、kTC ノイズやドリフトが避けられない
- リセット/バイアスの電位との相対的な信号を直接測り、飽和が明確に分かる^{*15}

*15 バイアス/リセットレベルは読み出し時間ほどの可能な限り短い時間で、光を照射しないで測定することで決定される

Correlated double-sampling(CDS)

- 相関二重サンプリング
- 信号電荷が流入する前後の電圧レベルの差をとることで kTC ノイズを低減した出力を得る
- ピクセルをリセットして、リセットが終わった後かつ次のピクセルに移る前にすぐにデジタル化する方法もある
- しかしリセットが落ち着くにはミリ秒かかる/現在のピクセルから次のピクセルに移るために de-address することでノイズが増える → 良くない

11.5.3 Reset-read-read or Fowler sampling

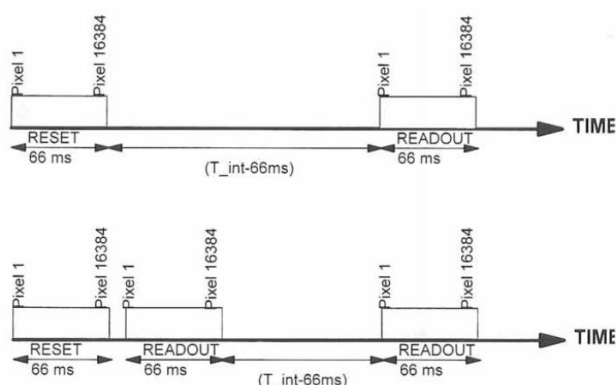


図5 reset-read-read or Fowler sampling mode

- 全体のアレイをピクセル毎にリセットし、リセットパルスを送らずに即座にアレイ全体を読み出す; それぞれのピクセルをデジタル化し、このフレームを記録する
- 積分時間 T_{int} だけ待ったら、フレーム全体を non-destructively(リセットパルスを送らずに)読み出してデジタル化する (reset-read-read mode)
- この方法は他の方法よりノイズが少ない

有効信号は二番目の読み出しから一番目の読み出しを引いたもの

$$\begin{aligned}
 S_2 - S_1 &= \left[(T_{ro} + T_{int}) \dot{N}_e + b + c \right] - \left[T_{ro} \dot{N}_e + b + c \right] \\
 &= T_{int} \dot{N}_e
 \end{aligned}$$

- b: アンプのバイアス
- c: リセットレベルからの未知の correlated offset
- \dot{N}_e : カウント率 electrons/s
- 最初の信号に負号をつけて記録し、次の信号を足して処理している
- kTC ノイズや実際のリセットレベルが除去されている
- 露光時間が長いならドリフトによる影響 → 同じ露光時間で dark frame をとって差し引く

サチュレーションの判断*16

- サチュレーションの判断が難しい:検出器は飽和していても画面にはそう表示されない
- single-sampling mode を用いて星の真のカウント率を決定する

reset-read-read process を m 回繰り返す。(m 回目のサイクルを Fowler- m という) S_1, S_2 を最初の読み出し値の合計、最終的な読み出し値の合計とする。

$$\begin{aligned} S_1 &= \sum_{n=1}^m (nT_{ro}\dot{N}_e + b) \\ S_2 &= \sum_{n=1}^m [(nT_{ro} + T_{int})\dot{N}_e + b] \\ S_2 - S_1 &= mT_{int}\dot{N}_e \end{aligned} \quad (2)$$

$S_2 - S_1$ は m 倍大きくなるが、読み出しノイズは \sqrt{m} で大きくなり、最後の積分されたフラックスの有効読み出しノイズは

$$\begin{aligned} R_{eff} &= \frac{R\sqrt{m}}{m} \\ &= \frac{R}{\sqrt{m}} \end{aligned} \quad (3)$$

この技術により、最初の読み出しノイズが高くても 5electrons rms 以下にノイズを抑えられる

11.5.4 Smapling up the ramp(UTR)

- 上記の方法では、信号は最初と最後の値を何倍かするのではなく、露光時間の間に規則的な間隔で何度もサンプリングを行う → 信号は時間に対して傾きを持っていると見ることができる。
- 露光時間の前に飽和する場合、宇宙で動く装置 (バックグラウンドが小さく、宇宙船が長い期間頻繁に衝突する状況) に役立つ
- バックグラウンドが小さな補償光学、小さなバックグラウンドかつ高感度な装置などにも役立つ
- ドリフトを減らす検出器の安定した熱的状況を生み出すのに役立つ

*16 例) 読み出し時間が 66ms でピクセル毎の飽和が 8000DN、ある星からのフラックスが 60000DN/s とする (0.1s の露光時間で 6000DN が入る)。リセットから最初の non-destructive read までに 66ms→3960DN。再度読み出して 2 回目のサンプリングをするとき、0.1s が経って 6000DN が入るとする (9960DN 溜まるはずだが、8000DN までしか溜まらない)。すると両者の差は 4040DN となって本来の 6000DN にはならない。