# McLeanゼミ

担当：寺尾（p403~410）

# 11.3.5 Far-infrared camera arrays based on germanium

- 40μm以上の波長の場合、シリコンに対する適切なドーパントがないので、ゲルマニウムを使わなければならない
- ゲルマニウムの使用には多数の問題が伴う
  - 暗電流をコントロールするために少しドープしなければならず、そのためabsorption lengthが長くなる(3-5mm)
  - 拡散距離も大きい(250-300μm)ので、クロストークを最小限にするために、500-700μmのピクセルが必要になる
  - 大きなピクセルには宇宙線が多量に当たるので、最小限の露光時間でbackground limitに達するために読み出しノイズは非常に小さくなければならないが、大きなピクセルは静電容量が大きいのでノイズも大きい
  - 量子効率が低い
  - バンドギャップが非常に小さいので、液体窒素で冷却する必要あり

- 様々な困難があるものの、32×32ピクセルのGe:Ga arrayの開発は成功した。Spitzerの70μmのバンドのMIPS
  - 長い波長をカバーするために小さなstressed Ge:Ga array
  - 検出器のピクセルに斜めに照射することで、必要な吸収経路が実現され、読み出し回路素子はZ-stackあるいはZ-plane構造と呼ばれる検出器の後ろでstackされる
- 検出器の長さは2mmなので断面積が大きくなり、MIPSは10-15秒に一度イオンの衝突を受けた
- しかし、回路は読み出し増幅器上でfeedbackを用いて素早く順バイアスに戻し、付近のピクセルとのクロストークを防ぐ
- ramp samplingを用いることで、衝突前後から良いデータを修復することが可能となる
- 同様のstressed Ge:Ga検出器のarrayが赤外線衛星あかりで用いられている

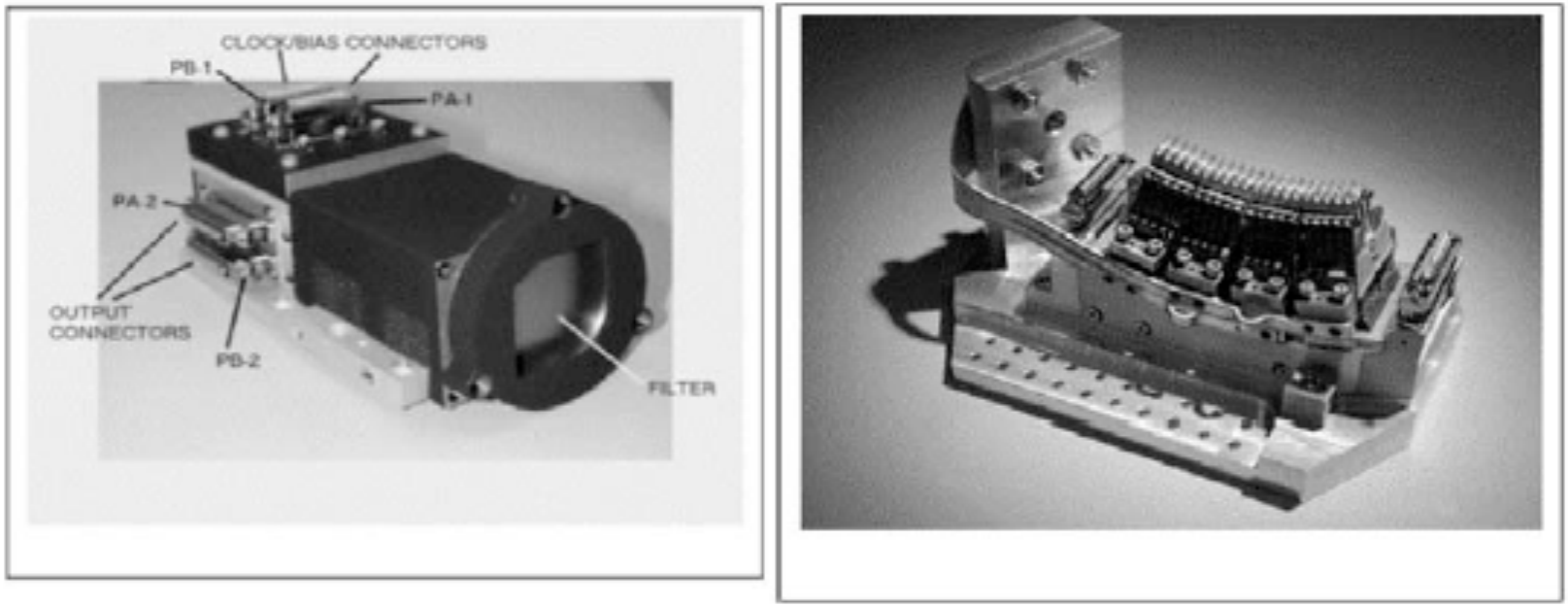


**Figure 11.7.** The Ge : Ga arrays used in the MIPS instrument in Spitzer. Credit: Erick Young.

# 11.3.6 Other forms of infrared arrays

- PtSiを用いて作られたarrayもある
- PtSi arrayはSchottky Barrier principleにもとづく
- PtSiのような金属をp型のシリコンと接触させると、シリコン中の負の電荷によって作られた電場によって止められるまで、電子は接合部を横切って流れる
- ここでフェルミ準位は等しく、結果として左右非対称なポテンシャル障壁となる
- 金属中の正孔は半導体の価電子帯に入るためにわずかに高い障壁を越えなければならない

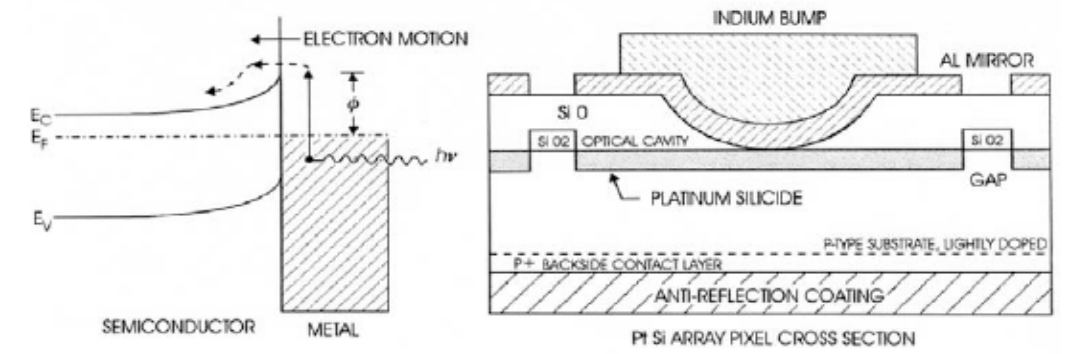


**Figure 11.8.** Principle of the platinum silicide (PtSi) device and the formation of a Schottky Barrier.

- 障壁の高さ$\psi$は接触電位差によって決まり、半導体のバンドキャップよりも小さくなることもありうる
  - PtSiの場合、$\psi$=0.22eVでありカットオフ波長は5.6$\mu$m
- 量子効率はシリコン層での吸収に対する量子効率(<10%)と障壁を越えていく正孔が作られる確率$\frac{1}{2}\left[1-\sqrt{(\psi/h\nu)}\right]^2$の積で与えれるため、カットオフ波長に近づくにつれてどんどん落ちる
- 通常シリコン層は非常に薄く、金属の表面層を持った$SiO_2$の絶縁層で覆われている
- p型シリコンの反射防止コーティングと共に、デバイス全体は干渉効果が特定の波長における量子効率を増大させるように厚みを調整された光共振器となる
- 典型的な量子効率は2-3%で、HgCdTeやInSbに比べて低すぎ
- しかしこれらのデバイスはサイズが大きくて一様なものを作れる
  - 全部シリコンでそれほど高価じゃないから

- Glass, Sekiguchi, and Nakada (1995)には日本製のPtSi array
- 非常に小さなバンドギャップを持つ半導体の結晶は大きくなりづらいので、GaAsなどの大きなバンドギャップを持つ物質のバンドギャップを小さくする方法が探された
- GaAsとAlGaAsの接合を用いることによって、伝導帯と価電子帯の両方と関連した量子井戸を作ることが可能になった
  - 量子井戸は複数のエネルギー準位あるいはサブバンドを含む
  - サブバンド間のエネルギーの差$h\nu$は通常のバンドギャップと比べて非常に小さい
- サブバンド間の遷移によって赤外線光子が検出できる
  - QWIPS

# 11.4 PRACTICAL OPERATION OF INFRARED ARRAYS

- CCDとinfrared arrayの扱い方には共通点がいろいろ
  - 電荷を集めたり取り除いたりするためにクロック電圧が必要
  - 出力信号(数$\mu$V/$e^-$)は増幅してデータ数にデジタル化
  - Pixel-to-pixel variationはfrat-fieldによって修正
  - kTCリセットノイズはdouble-samplingによって除去
  - 暗電流は冷却によって最小限に
  - 画像処理方法も同じ

# 11.4.1 Linearity

- 典型的なinfrared arrayは少なくとも2つの静電容量のソースを持つ
  - pn検出器接合($C_{det}$)、$C_{FET}$(the source follower FET)など
- コンデンサーの放電を引き起こす電子は二種類ある
  - 光電子と暗電流電子
- 光子フラックスと光起電性検出器の出力電圧の関係が非線形であるためのポテンシャルが存在
  - 検出器の静電容量は一定ではなくpn空乏層の幅に依存、すなわち逆バイアス電圧に依存するから
  - 空乏層のサイズ変動はCCDでも起こるが、影響は小さい

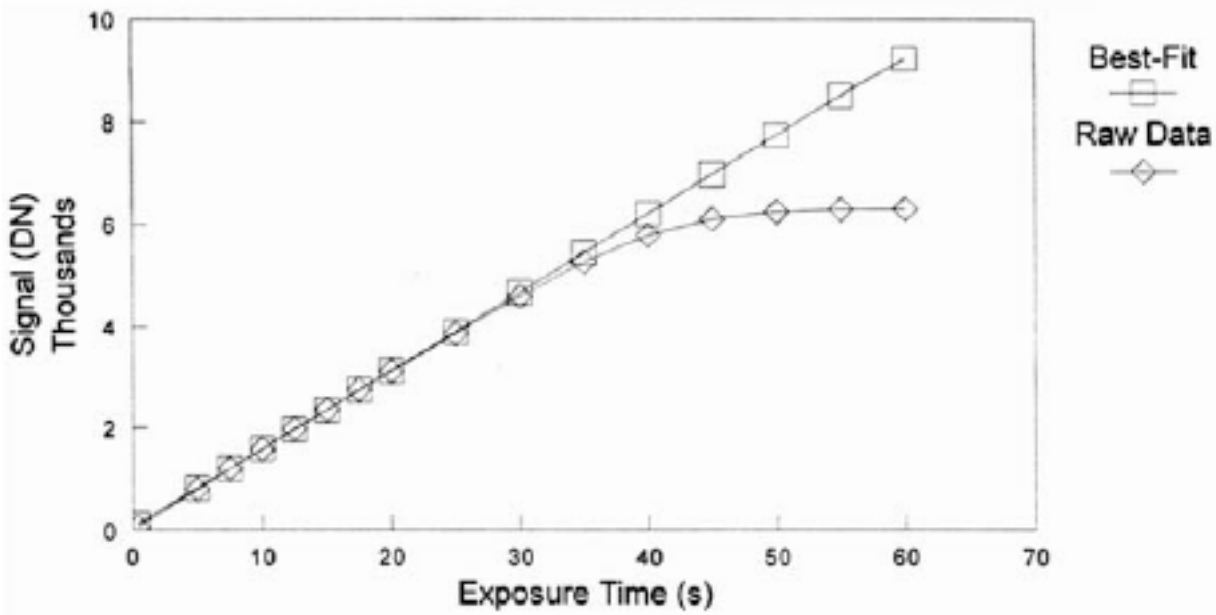


**Figure 11.9.** The non-linearity of an NIR array due to the voltage dependence of junction capacitance.

- セルが統合される際にバイアス電圧は連続的に変化する
  - 光生成電荷あるいは暗電流電荷を蓄積しているかどうかに関わらない
- 静電容量Cが電圧Vの関数であるとすると、Q=CVより

$$dQ = \left( C + \frac{\partial C}{\partial V} V \right) dV \equiv I_{\mathrm{det}} dt$$

  - 単位時間当たりの電圧変化と検出器電流の関係が非線形
- 静電容量の定数部分を$C_{fix}$で表すと、dv/dtの分母は

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

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

  - $C_0$はゼロバイアスでの接合容量、$A_{det}$は検出器の面積
  - $N_A$、$N_D$はアクセプターとドナーのドーピング集中度(atoms/cm$^3$)
  - $N_A >> N_D$のとき階段接合
  - $\varepsilon_s$は接合部の誘電率でInSbの場合17.7 $\varepsilon_0$
  - $V_{bi}$はダイオードの拡散電位であり、$n_i$はキャリアー濃度

$$V_{\mathrm{bi}} = \frac{kT}{e} \ln \left( \frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$$

# 11.4.2 Dark current and cooling

- 暗電流の主な要因は三つ
  - Diffusion
  - 半導体内での電荷のThermal generation-recombination (G-R)
  - リーク電流
- フォトダイオードの場合のそれらの和は

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

- 高温ではdiffusionが支配的であるが、100K以下では暗電流は主にG-Rである
- バンドギャップがシリコンよりはるかに小さいので、infrared arraysはCCDよりも低温に保つ必要がある
- 最大動作温度とカットオフ波長の関係はだいたい

$$T_{\max} = \frac{200\mathrm{K}}{\lambda_c(\mu\mathrm{m})}$$

# 11.4.3 Noise sources

- CCDと同様、読み出しノイズは読み出しの際に加えられる電圧のランダムな変動によって生じる

$$R = CV_{\mathrm{noise}} / e$$

- リセットノイズあるいは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、素子の電位が時定数 $R_{\mathrm{on}}C$

でリセット値 $V_{\mathrm{RD}}$まで上昇する

- 時定数よりも十分大きな時間が経つと、ノイズの実効値は電圧で$\sqrt{(kT/C)}$、電荷で$\sqrt{(kTC)}$である
- リセット前後の出力電圧の差を取ることにより、オフセットを除去できる

# 11.4.4 Quantum efficiency

- 近赤外のInSb、HgCdTe arraysは非常に高い量子効率を持つ(>80%)
  - 中間赤外のドープされたシリコンのarrayは30-40%
- 近赤外線検出器の場合、量子効率のコントロールに重要な要素はいくつかある
  - 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
- 吸収断面積は波長とともに変化するので、量子効率も変わる
  - 波長が短くなるにつれて減少する

# 11.4.5 Multiple outputs

- IR arrayとCCDの実用上の大きな違いは、望遠鏡においてみられる
- 比較的暗い天体の赤外線画像を取得すると、見えるのは全てデバイスのflat-fieldパターンとbad pixelである
  - 赤外線の背景フラックスが非常に強いから
  - backgroundを引かなければならない
  - ターゲット天体をblank areaに動かして繰り返し露光することにより最も効率よく行われる
- 2つの画像の差を取ると背景フラックスが取り除かれ、暗い天体が見えるようになる
  - 望遠鏡全体を動かしたらnodding、副鏡を動かしたらchopping
- Sky valueの観測に時間をかけすぎるとskyが変化してうまくいかなくなる
  - 背景フラックスは非常に大きいので、わずかな変動でもターゲットが見えなくなる

- Sky subtractionを行ってもピクセル間の量子効率の違いは補正されないので、flat-field correction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
- このような状況に対処するためにinfrared arrayはmultiple outputsを持つ
  - 最小で4個、多くのarrayは32個持つ
- Readout arrangementはデバイスによって異なる

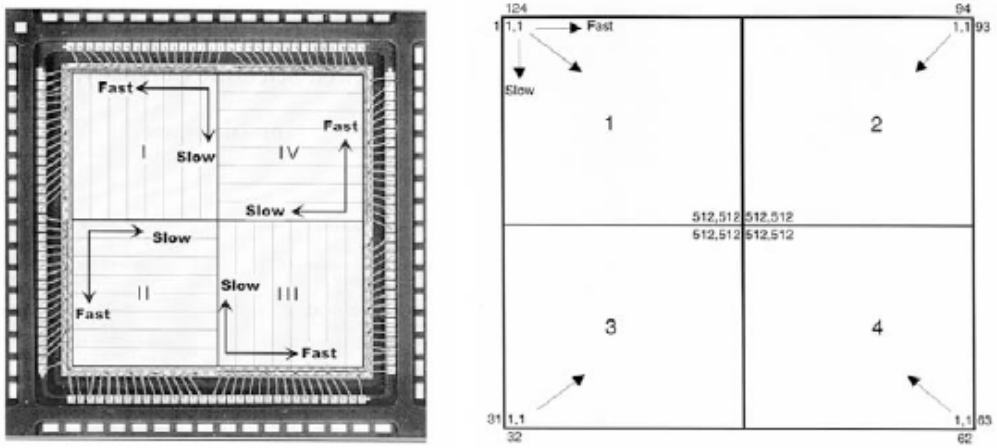


**Figure 11.10.** (Left) The HgCdTe 1,024 × 1,024 HAWAII array showing a readout scheme in each quadrant. (Right) The InSb 1,024 × 1,024 ALADDIN array showing the edge-to-center readout scheme.

## 11.4.6 Array controllers

- TeledyneのHgCdTeデバイスなどはクロックが0-5Vのシンプルなシフトレジスタを用いているが、RaytheonのInSbアレイは-3Vから-7Vのクロックを要求する
  - Level shifter回路が必要
- それにもかかわらず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
- 多くの観測施設はほとんど同じ構造のものを採用し、要求に応じて手を加える
- 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
   - ある列が処理されるときに、その列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
   - 典型的なシフトレジスタはひとつかふたつのクロック位相とスタートパルスを必要とする
2. Slow (row) register clock
   - 各列を順に扱うクロックパルス
3. Reset clock
   - 各ピクセルをリセットするのに単一電圧が必要
   - 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である
   - ピクセルを個別にリセットすることのできない検出器もあるが、一度に一列をリセットすることは不可欠であり、一度に全てのピクセルをリセットできる検出器もある
   - ピクセルが処理され信号がデジタル化されたあとにリセットパルスが送られなければ、検出器は単純に積分を続ける
     - Non-destructive readout

- 電源線に加え、最も重要な直流バイアス電圧は
  1. 基盤電圧(通常アース)と検出器の基盤電圧あるいはdetector common supply
  2. 増幅器の輝きを減らすために最小化することが望ましい出力トランジスタのドレイン電圧
  3. Unit cell drain voltage
  - ある種の検出器では、井戸の深さを作るバイアス電圧は検出器の基盤電圧と単位セルドレイン電圧の差で決まる
- 多くのarray検出器はmultiple outputを持つので、デジタル化を行うチャンネルが多数必要
- CCDとIR arrayでは読み出しレートと電子装置の処理速度も異なる
  - IR arrayは熱赤外線によりすぐに満たされる

- 天文学の革新のひとつはapplication-specific integrated circuits (ASICs)の使用
  - 検出器のエレクトロニクスを大幅に単純化し、消費電力も抑える
- 商業用のASICはH1-RGとH2-RGに用いられているTeledyneのもののみである（執筆当時）
- 最初のASICチップはJWSTのために開発された
- ASICのインターフェースはJADE-2と呼ばれるカスタムカードとのUSB接続