

# ELECTRONIC IMAGING IN ASTRONOMY

## Detectors and Instrumentation

### 11 Electronic imaging at infrared wavelength

櫛引洸佑

理学部天文学科 4 年

2017/06/28

- 11.3 Infrared array detectors
  - 11.3.1 The infrared "array" revolution, *déjà vu*
  - 11.3.2 The hybrid structure
  - 11.3.3 Photovoltaic devices
  - 11.3.4 Impurity band conduction devices
  - 11.3.5 Far-infrared arrays based on germanium
  - 11.3.6 Other forms of infrared arrays

- 11.3 Infrared array detectors
  - 11.3.1 The infrared "array" revolution, *déjà vu*
  - 11.3.2 The hybrid structure
  - 11.3.3 Photovoltaic devices
  - 11.3.4 Impurity band conduction devices
  - 11.3.5 Far-infrared arrays based on germanium
  - 11.3.6 Other forms of infrared arrays

## 11.3.1 思い出話

- U.S. のいくつかのグループ
  - mercury-cadmium-telluride (HgCdTe, MCT) による新しい array の試み  
⇐ Jon Rode (Rockwell International Science Center)
  - 筆者も Jon には 1982 にあった ⇒ low-background な近赤外 MCT array は高価すぎて地上の装置では厳しい
- 1980 年代中盤、事態は変わり始める
  - HST の新しい装置のための資金 ⇒ 天文用 MCT array の開発が活性化
  - NICMOS (Rodger Thompson) ⇒ Rockwell array の望遠鏡での初めての成功
  - Jon とその後を引き継いだ Kadri は天文用検出器を支えてきた
- これらの検出器は  $\sim 2.5 \mu\text{m}$  の短い赤外用にカスタマイズされたり、液体窒素の温度 (77 K) で動かされたり、既存の CCD コントローラーで操作出来たりした

## 11.3.1 思い出話

- ヨーロッパでも赤外 array は発展していた
  - フランスの天文学者は  $32 \times 32$  pixels の  $\text{InSb}$  array を使っていた
- ISO 及び Spitzer の準備でヨーロッパ、アメリカともにより長波長の検出器の開発が活性化
- 1979 年に大きな発展
  - 外因性シリコン photoconductor の新しい作成法 blocked impurity band (BIB)  $\Rightarrow$  パフォーマンスが大幅改善 (Mike Petroff, Dutch Stapelbroek)
  - この array 技術が後に Spitzer や地上での応用のために発展する

## 11.3.1 思い出話

- Royal Observatory Edinburgh (ROE) での最初の赤外 array プロジェクト (1984 年 6 月より)
  - $58 \times 62$  InSb array (3,596 pixels)
  - Ian S. McLean
  - IRCAM  $\Rightarrow$  1986 年 9 月に UKIRT に輸送
  - トラブルもいくつかあった
    - 動作温度 ( $\sim 30\text{K}$ ) では使っていた InSb のせいで量子効率が下がった  
 $\Rightarrow$  ちょうど Spitzer 用の全く異なるドーピングの InSb が作られていたので、それを使って解決
  - first light: 1986 年 10 月 23 日、オリオン星雲  
 $\Rightarrow$  他にも多くのテストイメージを撮り、きちんと動いていることを確認
- 1987 年 3 月までにいくつかの新しい赤外 array のデータが出そろった  
 $\Rightarrow$  1987 年 3 月赤外線 array 検出器に関する workshop が開かれる (in Hilo, Hawaii)

## 11.3.1 思い出話

- 1989年、筆者と Eric Becklin は UCLA に移り Keck 10m 望遠鏡の赤外線装置の開発
- 6年後の1993年に "Infrared Astronomy with Arrays: The Next Generation"
  - その時点で近赤外線で  $256 \times 256$ 、中間赤外線で  $128 \times 128$
  - この会議で  $1024 \times 1024$  の array を作るプランをアナウンス
- 執筆当時 (2008)
  - 近赤外線 ( $1\mu\text{m}$ - $5\mu\text{m}$ ):  $2048 \times 2048$  pixels
  - 中間赤外線 ( $5\mu\text{m}$ - $30\mu\text{m}$ ):  $1024 \times 1024$  pixels
  - 遠赤外線 ( $70\mu\text{m}$ - $160\mu\text{m}$ ):  $32 \times 32$  pixels  
(Gallium-doped germanium)
  - これらが撮像、分光用にモザイク構造に組み合わされることも

- 11.3 Infrared array detectors
  - 11.3.1 The infrared "array" revolution, *déjà vu*
  - 11.3.2 The hybrid structure
  - 11.3.3 Photovoltaic devices
  - 11.3.4 Impurity band conduction devices
  - 11.3.5 Far-infrared arrays based on germanium
  - 11.3.6 Other forms of infrared arrays



## 11.3.2 赤外線検出器の条件

- 赤外線画像を作るために
  - 光電効果で輻射を電荷に、もしくは、bolometer でエネルギーを吸収
  - 電荷をそれが生じた位置に保存
  - それぞれの pixel の電荷を 1 つの吐き出し口に輸送 (多重輸送)
  - 電荷を電圧として連続的に取り出す
- これらは silicon CCD と類似しているので、他の半導体物質で CCD を作ろうと試みる
  - ⇒ そのような物質を加工したり、精製する経験が限られている
  - ⇒ 異なるアプローチ"hybrid" array

## 11.3.2 Hybrid infrared array

- 赤外線検出と電荷輸送が分離している
  - 上: IR sensor (InSb、HgCdTe; Si:As、Ge:Ga)
  - 下: silicon multiplexer
- Infrared part
  - IR pixels を grid 状に敷き詰めたもの
  - pixel size: 18-27  $\mu\text{m}$
- 上下の平板は indium(伝導体) で電気的につながっている ("bumps" と呼ばれる)

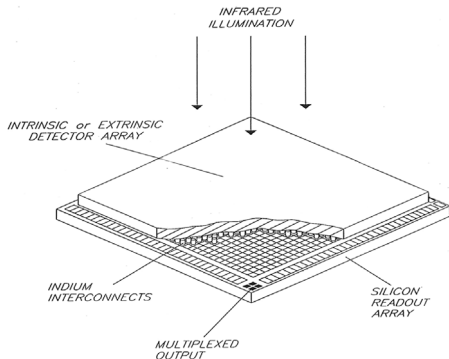


Fig 1: Mclean 教科書より

## 11.3.2 Hybrid infrared array

- それぞれの IR detector からのシグナルを取り出すために MOSFETs で出来たスイッチの array
- Charge storage は...
  - IR sensor 自身の junction capacitance で (photodiode の場合)
  - シリコン回路に結びついた separate storage capacitor で
- 呼び名
  - 全体の構造: focal plane array (FPA), sensor chip assembly (SCA)
  - silicon "readout-integrated circuit" chip: ROIC
- 読出しのための輸送の二つの方法
  - それぞれの pixel のシグナルを出力バスにつなぐことで連続的にそれぞれの pixel を読み出す (standard)(CMOS shift register)
  - 出力アンプにそれぞれの pixel がランダムに接続できる (direct readout, DRO)

## 11.3.2 赤外線 array 検出器と CCD の違い

- Infrared array detector は charge-coupling principle ではない

Table 1: IR array と CCD の違い

	IR array	CCD
サチった時の bleed	なし	あり
bad pixel の輸送への影響	なし	あり
on-chip binning	出来ない	出来る
charge shifting	出来ない	出来る

## 11.3.2 Unit cell の構造

- IR array の unit cell はシリコン FET を含んでいる
  - ⇒ source follower amplifier として使われる
  - ⇒ Infrared pixel 内で溜まった電荷に対してバッファを与える
- この構造を SFD (source follower per detector) と呼ぶ
- 右図が典型的な unit cell の構造図 (photodiode)

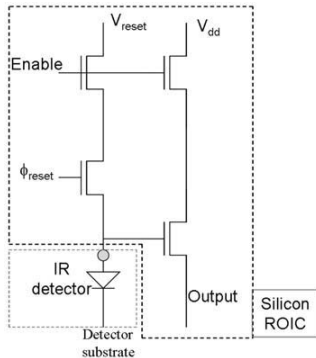


Fig 2: Mclean 教科書より

## 11.3.2 Detection process のまとめ

- detection process
  - 光電効果で electron-hole pair が生じる
  - 電場が electron と hole を分ける
  - junction に渡った electron の移動が逆バイアスを弱め、capcitor を放電させる
  - 溜まったチャージは  $Q = CV/e$  ( $e$ : 素電荷、 $V$ : 検出器にわたる電圧、 $C$ : 実効静電容量)
  - それぞれの検出器が source follower amplifier に接続され、入力電圧に従った出力電圧を与える ( $V_{\text{out}} = A_{\text{SF}}V_{\text{in}} \sim 0.7V_{\text{in}}$ )
  - source follower の出力電圧が AD converter でサンプルされる (読まれる)
  - サンプルされた後、diode に渡る電圧はリセットされ full reverse bias に戻る
- リセットは他の FET の動作によって実行される (単純な on/off switch として振る舞う)

- 11.3 Infrared array detectors
  - 11.3.1 The infrared "array" revolution, *déjà vu*
  - 11.3.2 The hybrid structure
  - 11.3.3 Photovoltaic devices
  - 11.3.4 Impurity band conduction devices
  - 11.3.5 Far-infrared arrays based on germanium
  - 11.3.6 Other forms of infrared arrays

## 11.3.3 HgCdTe array の作り方

- PACE-I (Producible Alternative to CdTe for Epaxity)
  - サファイア基盤の上に CdTe (MOVPE: metal-organic vapor phase epitaxy)
  - その上に HgCdTe (LPE: liquid phase epitaxy)
  - detector junction は boron implantation で、ZnS によって不働態化
  - 光は裏側からサファイア層を通ってくる
  - Hg と Cd の割合でカットオフ波長が決まる

Table 2:  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$

$x = 0.196$	$E_G = 0.09 \text{ eV}$	$\lambda_c = 14 \mu\text{m}$
$x = 0.295$	$E_G = 0.25 \text{ eV}$	$\lambda_c = 5 \mu\text{m}$
$x = 0.55$	$E_G = 0.73 \text{ eV}$	$\lambda_c = 1.7 \mu\text{m}$

- Newer device
  - MBE(molecular beam epitaxy) で作られる
  - 基盤が取り除かれ薄くなる
  - 可視領域まで感度が広がり (0.5-2.5 $\mu\text{m}$ )、宇宙空間での粒子によるダメージへの耐性も上がった

⇒ JWST



## 11.3.3 InSb photodiode array

- Raytheon Vision System(RVS) による
- 初期の SBRC の array では photox front-side passivation は湿りやすく、front-surface の電位を調整するための電極を必要とし暗電流が生じた  
⇒ gateless detector-side passivation によってパフォーマンス向上
- indium bump が pn 接合の上の InSb の表面上なので、照射は裏側から
- 基盤は透明ではないので、InSb array は薄くしなければならない  
⇒ 厚いうエハーだと冷やしたときに熱膨張の違いで引きはがされるが、薄ければ柔軟

- 11.3 Infrared array detectors
  - 11.3.1 The infrared "array" revolution, *déjà vu*
  - 11.3.2 The hybrid structure
  - 11.3.3 Photovoltaic devices
  - 11.3.4 Impurity band conduction devices
  - 11.3.5 Far-infrared arrays based on germanium
  - 11.3.6 Other forms of infrared arrays

## 11.3.4 IBC と BIB の登場

- As、Ga、Sb をドーピングした外因性シリコン photoconductor は多くの難点があった
  - 量子効率是不純物原子の集中度合に依存する
    - ⇔ ドーピングの効果を打ち消す望まない不純物 (boron など) も存在
  - 通常は tunneling や hopping を避けるために不純物の集中度合を低くする
    - ⇔ QE を上げるためには赤外線 active layer を厚くする
    - ⇔ 制御面で多くの問題をもたらす
- IBC detector がこれらの問題点を解消
  - IBC: Impurity band conduction
  - BIB: Blocked impurity band (by Mike Petroff and Dutch Stapelbroek at DRS Technology)  
IBC は BIB の generic term

## 11.3.4 IBC device

- 多くドープした infrared-active layer が pure epitaxial layer (blocking layer) に接している  
⇒ 全体の厚さを減らせる
- blocking layer は酸化層によって metal contact pad と分離されていて、基本的に back-illuminated
- hopping による暗電流は blocking layer によって防げる

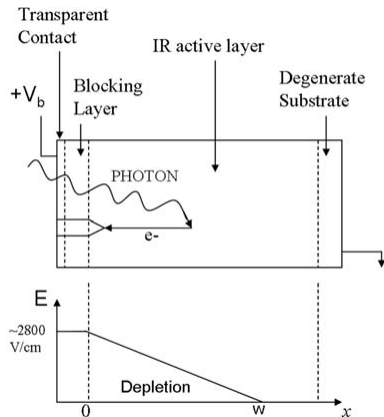


Fig 3: Mclean 教科書より

## 11.3.4 IBC device

- 同等の photoconductor に比べてかなり薄い量子効率は高い
- ドナー密度が高いため、bias 電場により hole が負に帯電した metal contact に移動し depletion region ができる  
⇒ generation-recombination noise を示さない
- 普通の bias だと photoconductive gain を示さないが、high bias では可能

## 11.3.4 Mid-IR arrays

- Raytheon(1K × 1K Aquarius Si:As IBC detector)
  - 30  $\mu\text{m}$  pixels
  - outputs in blocks of 128 columns or 32 columns(二つの side に読みだしの connection)  
⇒ 他の二つの side で close-butting
  - integration capacity は 1 million or 15 million 電子に設定可能
  - Centered windowing 可能
  - 150Hz の frame rate は 64 outputs と 3MHz pixel rates で得られる
  - input referred noise :  $\leq 1000e^-$  rms
  - 反射防止膜で、QE > 40%、動作温度は 8-10K
- DRS Thechnologies(1024 × 1024 Si:As, BIB)
  - 18  $\mu\text{m}$  pixels
  - 5 million electrons charge capacity
  - 読み出しノイズ (maximum frame rate):  $1000e^-$  rms
  - Gain は選択可能
  - 動作温度は 2-12K、6K で暗電流  $< 10e^-/s$
  - two-side buttable
  - windowing capcity for central 256×256 pixels, integration time control, 16 output があり

- 11.3 Infrared array detectors
  - 11.3.1 The infrared "array" revolution, *déjà vu*
  - 11.3.2 The hybrid structure
  - 11.3.3 Photovoltaic devices
  - 11.3.4 Impurity band conduction devices
  - 11.3.5 Far-infrared arrays based on germanium
  - 11.3.6 Other forms of infrared arrays

## 11.3.5 遠赤外線 array

- 40  $\mu\text{m}$  以上の波長に対しては外因性の Ge が Si の代わりに用いられる
- 多くの問題点
  - 暗電流を制御するためにドーピングは軽く  $\Rightarrow$  absorption lengths が長くなる (3-5 mm)
  - 散乱長も長い (250-300  $\mu\text{m}$ ) ので、混信を避けるために pixel dimensions も大きくなる (500-700  $\mu\text{m}$ )  
 $\Rightarrow$  大きな pixel は宇宙線を受けやすい  $\Rightarrow$  短い露光で background limited に達するために読み出しノイズは小さくしなければならない  
 $\Leftrightarrow$  大きな検出器の pixel は大きなキャパシタンスと大きなノイズを意味する
  - photoconductive gain は inter-electrode spacing に反比例  $\Rightarrow$  乏しい QE
  - energy bandgap が小さい  $\Rightarrow$  silicon が freeze-out するような液体ヘリウムの低温で動作



## 11.3.5 遠赤外 array

- 成功例
  - 32×32-pixels Ge:Ga array (for 70  $\mu\text{m}$  band, MIPS instrument, Spitzer)
  - smaller array of stressed Ge:Ga detector (より長波長へ)
- 斜めに光を照射することで必要な吸収経路を得て、読出し回路は検出器の裏に Z-stack or Z-plane 構造で重ねられる
- 検出器は 2 mm と長いので、電離粒子の衝突が起こる  
⇒ MIPS device では 10-15 hits/s ⇔ 電気回路は読出しアンプに feedback を使って素早くバイアスをノーマルに戻す ⇒ 近隣の pixel との混信を避ける
- ramp sampling によって hit の前後から良いデータを修復できる

- 11.3 Infrared array detectors
  - 11.3.1 The infrared "array" revolution, *déjà vu*
  - 11.3.2 The hybrid structure
  - 11.3.3 Photovoltaic devices
  - 11.3.4 Impurity band conduction devices
  - 11.3.5 Far-infrared arrays based on germanium
  - 11.3.6 Other forms of infrared arrays

## 11.3.6 PtSi array

- Schottky Barrier principle

- PtSi のような金属が p-type シリコンと接すると電子がシリコンから PtSi に流れ、結果として伝導ホールに対するポテンシャル障壁を作る
- 障壁の高さ  $\psi$  は contact potential によって決まり、半導体の bandgap より小さくなり得る
- QE は silicide 層での吸収の QE ( $< 10\%$ ) と障壁をくぐるホールが生じる確率  $\frac{1}{2}[1 - \sqrt{\psi/h\nu}]^2$  の積  $\Rightarrow$  長波長で小さくなる
- silicide 層は通常薄く、metal 表面層を持った SiO<sub>2</sub> の絶縁層でおおわれる
- p-type シリコン層に反射防止コートとともに、厚さを調整することで特定の波長の QE を上げる"optical cavity" になる
- 典型的 QE: 2-3%  $\ll$  InSb, HgCdTe

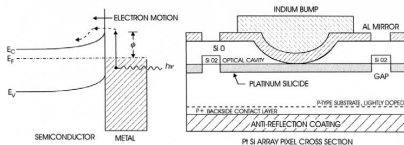


Fig 4: Mclean 教科書より

## 11.3.6 Very narrow bandgap semiconductor

- GaAs のような wide-bandgap の物質に small bandgap を作る
- GaAs と AlGaAs の接合部を使って、ポテンシャル井戸を作れる  
⇒ 量子力学の箱型ポテンシャル中粒子のように energy levels (sub-band) をもつ
- sub-band 間のエネルギー差は普通のバンドギャップより小さい  
⇒ sub-band 間の遷移が赤外線光子の検出に必要なプロセスを与える
- QWIPS