

ELECTRONIC IMAGING IN ASTRONOMY

Detectors and Instrumentation

8 Practical operation of CCDs

櫛引洸佑

理学部天文学科 4 年

2017/5/24

- 8.2 Dark current and cooling
- 8.3 Cosmic rays and luminescence
- 8.4 Bad pixel and charge transfer efficiency
- 8.5 Noise sources

- 8.2 Dark current and cooling
- 8.3 Cosmic rays and luminescence
- 8.4 Bad pixel and charge transfer efficiency
- 8.5 Noise sources

8.2 暗電流

- 室温でのシリコン原子のランダム運動
 - ⇒ 光がなくても electron-hole pair を生じるのに十分なエネルギーを出す
 - ⇒ この「熱的」仮定で「暗電流」が生じる
- 室温の non-inverted CCD で...
 - 100,000 electrons/sec/pixel ($1.8 \times 10^{-9} \text{ A/cm}^2$ for $30 \mu\text{m CCD}$)
 - ⇒ 数秒のうちに暗電流だけで CCD storage が飽和してあふれてしまう
 - 読出しが素早く継続的なら暗電流はこまめに消える
 - but... 天文では光源が暗いので長い時間の露光が必要
- 解決方法は単純に CCD を冷やすこと！！
 - 温度を下げると急激に減少する
 - ドライアイス (-78.5°C) と液体窒素 (-196°C) の間くらいでよく消える

8.2 暗電流

- 暗電流の原因は主に三つ
 - 空乏化していないシリコンでの熱励起と拡散
 - 空乏層 (depletion region) での熱励起
 - Si-SiO₂ 境界面での surface region による熱励起
- multi-phase CCD では三つ目が支配的 (interface state の密度とそこでの free carrier 密度によって決まる)
 - valence → interface → conduction band と励起
 - free carrier が interface state を埋められれば良いが CCD ではそうはいかない
 - inversion mode で CCD を動かすことでも暗電流減 (残像を消すにも良い)
 - MPP CCD も暗電流減 (冷やしすぎないので輸送効率も良い)

8.2 暗電流の温度依存性

- 大雑把には 10°C 下がるとに $1/3$ になる
- 正確には以下の式で表される

$$N_{dk} = 2.55 \times 10^{15} N_0 d_{\text{pix}}^2 T^{1.5} e^{-\frac{E_G}{2kT}} \text{ [electron/s/pixel]}$$

$$E_G = 1.1557 - \frac{7.021 \times 10^{-4} T^2}{1,108 + T} \text{ [eV]}$$

- N_0 : 室温 T_0 での暗電流 [nA/cm^2]
- d_{pix} : ピクセルサイズ [cm]
- T : 動作温度 [K]
- E_G : バンドギャップエネルギー (温度依存性があるので注意)
- k : ボルツマン定数 8.62×10^{-5} [eV/K]

8.2 暗電流の温度依存性

- 天文用 CCD での動作温度は 223K~150K
(使う状況や MPP を採用しているかないかによる)
- 冷却によって暗電流は数 electrons/pixel/hour にもなる

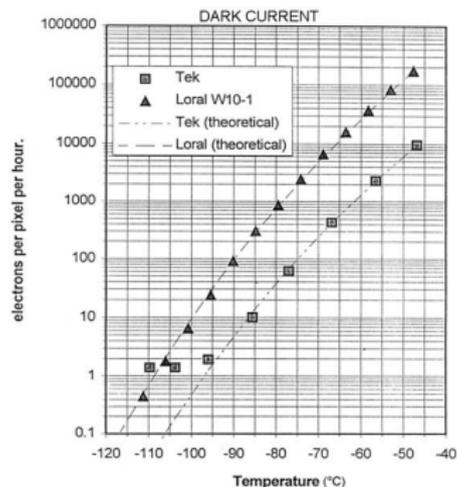


Fig 1: Mclean 教科書より

Contents

- 8.2 Dark current and cooling
- 8.3 Cosmic rays and luminescence
- 8.4 Bad pixel and charge transfer efficiency
- 8.5 Noise sources

8.3 High-energy sub-atomic particle の影響

- 暗電流を除いて長時間露光が出来るようになった！
⇒ 新たな問題発生
- 宇宙空間から入ってきた高エネルギー素粒子 (protons) が muon のシャワーを大気で生じさせる
⇒ muon はシリコンが十分に厚いとそこで止められる
⇒ 80 electrons/pixel/ μm の電子を出すだけのエネルギー (ここでの μm はシリコンの厚さ)
- 20 μm の collection layer を持つものでは muon の影響が 2,3 千の電子の spot となって見える
- 薄い CCD(back illuminated CCDs など) では影響は少ない
- 高地観測所では影響がより大きい

8.3 宇宙空間の CCD

- 宇宙空間では電離粒子の高いフラックスによって影響がより大きい
- 宇宙空間の CCD の例
 - Galileo, Cassini, Hubble: 影響を小さくするため動作温度を変えた
 - Chandra: proton 放射による影響を受けて輸送効率が悪くなった
- ionization damage
 - CCD の絶縁体層 (SiO_2) 内での電離放射による electron-hole の発生
⇒ hole がトラップされて clock と出力増幅のバイアスレベルに電圧のシフトが生じる
 - Si-SiO₂ 境界での電離放射による結合の破壊と interface state の発生
⇒ 暗電流の大幅な増加
- bulk damage
 - 高エネルギー粒子がシリコン原子核と衝突し、その位置をずらしてしまう
⇒ 電荷輸送効率の低下、暗電流の増加、出力増幅器への影響

8.3 cosmic ray event の取り除き方 UV and blue-transmitting glass

- cosmic ray event の取り除き方
 - 同じ領域の画像を複数撮って比較する
 - 同じ場所に宇宙線が二回も当たるとはないと考える
 - 教科書 Fig8.7. がその例 (二枚目の明るい点が黒くなっている)
- 宇宙線に関わる現象は宇宙線と UV、blue を透過する glass からの低エネルギー X 線放射の組み合わせ (X 線は 5:1 で支配的)
⇒ muon event rate の理論的予測が実際の CCD での観測 rate より数倍低いという謎を解いた

8.3 luminescence

- 電極での部分的なショートなどによる半導体内での普通より低い抵抗の電気経路は LED のように振る舞う
- 機器内の特定の場所 (特に出力トランジスタ増幅器) に間違った電圧をかけることも同様に振る舞う
- これらは積分時間を数分に制限してしまう
- 解決策
 - デバイスの選び方
 - かける電圧の active control
 - 長時間露光中は出力トランジスタを電源オフ、pixel ごとの clock レベルも下げる
 - 露光終了の直前にトランジスタのスイッチを入れ、輸送効率のために clock 振幅も上げる
 - CCD の読出しの前に horizontal register もきれいにしておく

Contents

- 8.2 Dark current and cooling
- 8.3 Cosmic rays and luminescence
- 8.4 Bad pixel and charge transfer efficiency
- 8.5 Noise sources

8.4 CCD の電荷輸送の障害

- 輸送がうまくいくにはいくつかの障害がある
 - ポテンシャル井戸がほとんど空の時
 - ポテンシャル井戸がほぼ満杯の時
 - 欠陥のあるピクセルが障害になる時
- CCD の井戸が埋まった場合
 - 溜められた電荷がポテンシャルの形をゆがめる
 - ⇒ 電荷輸送の質が落ちる
 - saturation すると column 方向の隣接した pixel に電荷が漏れ出してしま
う (row 方向は深刻ではない)
 - ⇒ saturation を引き起こす光源が非常に明るいとその column 方向の隣
接した pixel も saturation
 - ⇒ column 方向の縦の線ができる (charge bleeding)

8.4 電荷輸送効率 / pre-flash

- それぞれの pixel 間の輸送で電荷がトラップされる
 - ⇒ 輸送方向に伸びた点像の尾のようになる
 - ⇒ deferred charge (仮想のポテンシャルポケット、不純物による電荷トラップ)
- 近年の CCD では悪い輸送効率の影響は $\sim 10\text{electron/pixel}$
 - ⇒ 短時間露光や分散背景光が 100electrons に満たない分光で影響あり
- 解決策 pre-flash (adding "fat zero")
 - 露光の前に array 全体を一様に LED で照らす
 - 各 pixel に 100electrons を超える一定の電荷を与える
 - $\sqrt{100} = 10\text{electrons}$ のノイズが生じてしまうことには注意

8.4 CCD の欠陥による難点

- 製造過程での電極帯板の 1 つの故障は電荷の停止や深刻な遅れをもたらす (blocked column)
- シリコン基板の結晶欠陥が製造過程で depletion region まで広がることがある
⇒ この欠陥はそのエリアの電荷を吸い取るスポンジのようにふるまう
- 遅れて離される電荷は幅広い時定数 (ミリ秒から数時間まで) も持っている
- この振る舞いをする column はどうしようもない
- surface-channel CCD で深刻 (buried-channel device ではそこまで)
- water-in-a-well analogy (traps behave like a pothole at the base of the well)

8.4 Charge transfer efficiency (CTE)

- 輸送一回当たりの CTE は 0.99999
- 100% → 99.999% → 99.998% → 1000 回の輸送で 99%
- 1% は間にあった pixel に広がっている
- CTE は温度や clock frequency、clock 電圧の上昇下降時間、その重なり度合に依存する
- parallel (column) 方向の CTE と serial (horizontal) 方向の CTE は異なり column 同士でも違いがある

8.4 CTE の測り方

- そんなに簡単ではない
- 最も率直な方法 Extended pixel edge response (EPER)
 - CCD を光でさせるあふれさせる
 - 普通の CCD より数 pixel 大きな画像を作るために両 register を overscan する (いくつかの CCD では overscan 実験を困惑させる余分な pixel が serial register にある)
 - imaginary pixel に生じた実際の CCD の最後の row と column に従うシングルを dark level や illuminate level と比較することで deferred charge を引き起こすトラブルがわかる
 - 一様に照らされた overscan 画像を検証することで column 同士の変化がわかる
- CTE の式

$$CTE(e^-) = 1 - \frac{Q_d}{NQ_0}$$

- Q_d : net deferred charge
- Q_0 : 最後の real pixel の charge
- N : 輸送した pixel 数

8.4 spurious potential pocket

- 現在ではよく理解されている
- 例) isolated single-pixel trap (CTE に局所的に影響する pocket)
- これらの trap は pixel 内のポリシリコン電極の 1 つの準位に制限されていることがわかった
- 二つの糸口
 - 大きな single-pixel trap はなく、ボロン不純物が製造過程の高温段階で buried channel の n-type の薄い層に拡散することがわかった ("p⁺ epitaxial diffusion tail")
 - 絶縁体層として SiO₂ ではなく、NO の二重層を使うようになったことが関連
 - ⇒ ポリシリコン電極間のショートを大幅に減らすことにつながり製造歩留まりが改善した
 - ⇒ oxide-growing stage での表面の汚染によって作られた pinhole によってニトリドが酸化物を通過して n-type 半導体まで拡散する

8.4 CTE のまとめ

- 最終的に CTE を制限するのはバルクシリコン結晶内の trap
- 半導体シリコンの技術は非常によくなっておりこれからも良くなるはず
- "bulk trap" のみで制限される CCD の CTE は 0.9999995 per pixel
- 512 回の輸送で 10,000 の電子のうち 3 つだけ取り残される

Contents

- 8.2 Dark current and cooling
- 8.3 Cosmic rays and luminescence
- 8.4 Bad pixel and charge transfer efficiency
- 8.5 Noise sources

8.5 CCD での増幅

- image area から output amplifier へと charge packet (電荷 Q) を輸送
⇒ 出力トランジスタで電圧へと変換される ($V = Q/C$)
⇒ 出力 node での容量 C が小さければ同じサイズの charge packet に対して大きな電圧
- 近年の CCD では $C < 0.1$ pF で > 16 $\mu\text{V}/\text{electron}$
- いくつかの CCD では非常に小さな出力 MOSFET を使っているが、MOSFET が小さくなると他のノイズ源が大きくなるので slow-scan 状況下での全体ノイズが 10electron より大きくなる

8.5 ノイズ源

- CCD の output transistor のみによってノイズが決められるのが理想的
- 色々なノイズ源を理解してそれらを最小にする手順を踏む必要がある (この最小値が最終的な読み出しノイズ R)
- 色々なノイズ源
 - fat-zero offset での background charge
 - transfer loss fluctuations
 - reset or kTC noise
 - MOSFET noise
 - fast interface state noise

8.5 各ノイズについて

- fat-zero charge での background charge
 - 輸送効率を改善するが、結果的に電荷の合計数の平方根でノイズに
- transfer loss fluctuation
 - 電荷輸送で電化の一部が取り残される
⇒ この割合が変動する
 - 信号ノイズに加わる"transfer noise" は

$$\sigma_{tr} = \sqrt{2\varepsilon n N_0}$$

- $\varepsilon = 1 - CTE$
- n : 輸送回数
- N_0 : original charge の数
- 2: Poisson 分布ノイズは捕まるときと離されるときに二回生じる
- surface-channel CCD で 70 electron であり、buried-channel CCD や天文での光のレベルではより良い

8.5 各ノイズについて

- reset noise
 - output node の recharging にかかわるノイズ

$$\sigma_{rn} = \sqrt{kTC}/e = 284\sqrt{C}$$

- 再右辺は $T = 150 \text{ K}$ で、 C は容量 [pF]
 - 多くの場合で支配的なノイズ源
- one-over- f noise
 - およそ $1/\text{frequency}$ で変化するノイズ
 - 質の高い製造によって数 electron ほどに小さくなる

各ノイズについて

- fast interface state noise
 - 非常に短いタイムスケールで電荷を捕まえ離すトラップ: fast interface state
 - 各 pixel 内の電荷を変化させる
 - この時のノイズは

$$\sigma_{ss} = \sqrt{2kTnN_{ss}A}$$

- k : ボルツマン定数
 - T : 絶対温度
 - n : 輸送回数
 - N_{ss} : トラップの表面密度
 - A : 表面積
- surface-channel CCD で深刻、buried-channel CCD では非常に小さい (5 electron かそれ以下)
- 読み出しノイズを 5electron 以下に作れるのは多くの研究者、技術者の貢献によるもの