

# 解説

## X線撮像素子としての CCD

常田 佐久

東京大学東京天文台 〒181 三鷹市大沢 2-21-1

(1987年8月18日受理)

### CCDs as X-Ray Imaging Devices

Saku TSUNETA

Tokyo Astronomical Observatory, University of Tokyo,  
2-21-1, Osawa, Mitaka 181

#### 1. 序

CCD (charge-coupled device, 電荷結合素子)<sup>1-4)</sup>は、1970年にベル研究所の Boyle によって発明された。CCD はシリコン (Si) のバンドギャップエネルギー ( $E_g = 1.1 \text{ eV}$ ) に対応する波長、

$$\lambda = hc/E_g = 12400 \text{ \AA} / E_g = 11300 \text{ \AA} \quad (1)$$

より短い波長に感度があり<sup>\*1</sup>、可視光撮像素子としてのみならず、X線撮像素子としても使用が可能である。

X線の波長 ( $1 \text{ keV} = 12.4 \text{ \AA}$ ) として、 $100 \text{ \AA}$  ( $0.1 \text{ keV}$ ) から  $1 \text{ \AA}$  ( $12 \text{ keV}$ ) 程度を考えると、X線 CCD は科学衛星に搭載して天体からのX線を検出するX線望遠鏡の焦点面検出器、X線顕微鏡、核融合プラズマの計測、非破壊検査、医学検査等に応用が可能である。技術的には、 $5 \sim 80 \text{ \AA}$  でのX線の撮像はほぼ実用段階にあるが、より短い波長での撮像、半導体検出器なみのエネルギー分解能での入射光子のエネルギー分析 (imaging spectroscopy) はまだ開発段階にあるといえる。

本稿ではX線 CCD の基礎的事項、市販の CCD センサーがどの程度X線撮像用に使用可能か、CCD によるX線スペクトロスコピーの問題点等について、おもに CCD をX線計測に応用する立場から述べてみたい。

#### 2. CCD の 構 造

##### 2.1 CCD の原理

CCD は Si 基板に厚さ数百  $\text{\AA}$  の  $\text{SiO}_2$  の絶縁層を介して多数の電極 (ポリシリコン) をつけた MOS 構造

をしている (図 1)。p 型半導体の場合、電極に正の電圧を加えることにより空乏層 (depletion layer) が電極下に形成される。この空乏層は  $1 \sim 2 \text{ s}$  で熱励起によって生じた電子で埋められてしまうが、熱平衡状態に達するまでの過渡的期間内に光を照射すると、光励起された電子-正孔対のうち電子が電圧のかかっているゲート下に集められる。電極に加える電圧を図 1 のように順次変えていくと、ポテンシャルの井戸も横にずれていき、電荷群の転送が行なえる (アナログシフトレジスター)。最後に電荷は出力用ノード (floating diffusion) に注入され電圧信号に変換される。(出力ノードは 1 ピクセル分の電子が読みだされるごとに基準電位にリセットされる。) 電圧信号は on-chip のフォロワーを通して外部にとりだされる。

上記の電荷群の転送方式は空乏層を絶縁層の直下につくる surface channel CCD (SCCD) の場合であるが、Si-SiO<sub>2</sub> 境界付近でのトラップ等による転送効率の低下を避けるため、現在は buried channel CCD (BCCD) が広く利用されている。BCCD では、p 型 Si 基板上に n 型の薄い層を ion implantation 法か epitaxial 法でつくる。n 層に逆バイアスを加えると空乏層が Si-SiO<sub>2</sub> 界面から離れた n 層中にでき、Si バルク中の転送動作が可能となる。

##### 2.2 CCD の電荷転送方式

CCD の露光と電荷の転送の方式は frame transfer (FT) 方式と interline (IL) 方式に分けられる。FT CCD (図 2) は、撮像部と蓄積部、および水平レジスターよりなる。撮像部に入射した光により生成された電荷群は、垂直シフトレジスターにより素早く蓄積部にフ

\*1 ただし  $1000 \sim 3000 \text{ \AA}$  の紫外域では、ほとんど感度が無い。

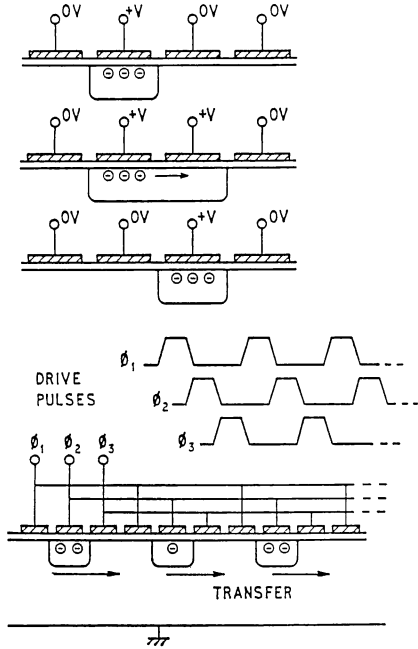


図 1 CCD の垂直構造と電荷転送の原理

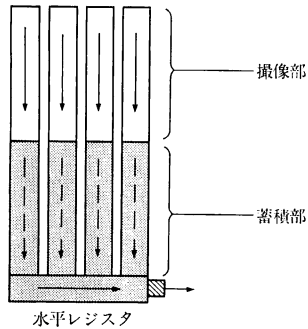


図 2 Frame transfer (FT) CCD の動作原理

レーム転送され、撮像部で次の露光をしている間1行ずつ水平シフトレジスタを通して読み出される。蓄積部は光が当たらないよう遮蔽されている。

一方 IL CCD では、図 3 のように受光部（フォトダイオード）と垂直シフトレジスタが交互に配列されている。シフトレジスタ上には光が入射しないようアルミニウムの遮光膜が置かれている。フォトダイオードで生成された電荷はいっせいにシフトレジスタに転送された後、次の露光をフォトダイオード部で行なっている間、水平シフトレジスタを通して読み出される。出力部は、FT 方式と同じである。IL CCD は、FT CCD のように蓄積部を必要としないためチップのサイズは小さいが構造は複雑で高分解能化には FT 型のほうが適している。

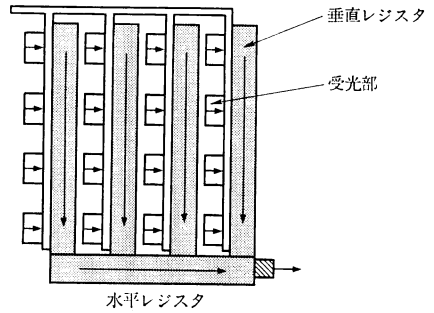


図 3 Interline (IL) CCD の動作原理

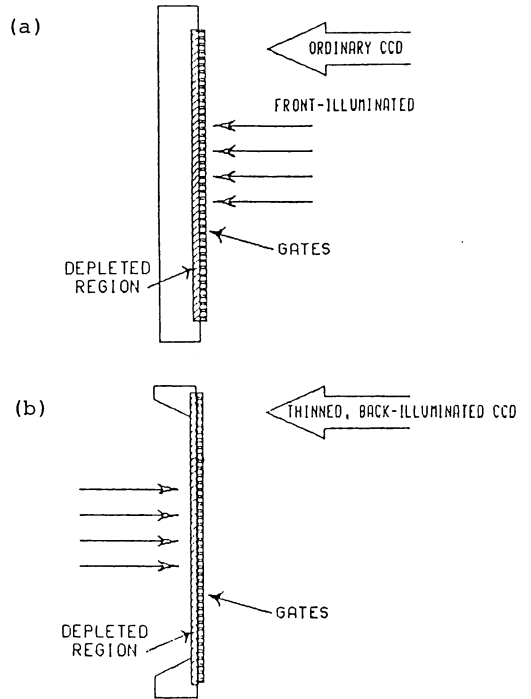


図 4 CCD の照射モード

(a) 表面照射, (b) thinned CCD に裏面照射

このほか機械的シャッターと組み合わせて用いることを想定して、FT CCD の蓄積部をなくして CCD 全面を撮像部とした full frame imager (FF) もつくられている。

### 2.3 CCD の露光方式

CCD の露光方式は、図 4 (a) のように電極側から光を当てる場合（表面照射）、と図 4 (b) のように基板をエッチングにより  $10\mu\text{m}$  程度に薄くして裏側から当てる場合（裏面照射）の 2 種類がある。裏面照射の場合、空乏層がほとんど露出しており、電極等の dead layer がないため量子効率が高い。

### 3. X 線 CCD<sup>7-13)</sup>

#### 3.1 X 線撮像素子としての CCD

2章で述べた CCD の各種方式について、X線での撮像を行なう場合に有利な方式について検討してみる。(表 1 に X 線領域で使用可能な CCD の一覧を示す.)

IL CCD は、シフトレジスタの遮光用アルミ膜が X 線領域ではほとんど透明のためそのままでは使用できない。1~2 keV の X 線で使用するためには 100  $\mu\text{m}$  程度の遮蔽膜が必要であるが、このような厚い遮蔽層を各ラインごとに設置するのは容易でなく、X 線用には FT 方式のほうが優れている。

また使用波長によっても、最適な照射方式が異なってくる。これを 10  $\text{\AA}$  より長波長側と短波長側に分けてもう少し詳しく見てみよう。

##### 3.1.1 長波長側 (>10 $\text{\AA}$ ) での撮像

図 5 に Si および SiO<sub>2</sub> の X 線紫外領域での吸収長を示す。CCD が X 線域で感度をもつには、入射光子が空乏層中で光電吸収される必要があるが、長波長側では光子が CCD 表面の dead layer により吸収されてしまい

空乏層にたどりつけない。表面の電極等の厚みの合計を 1  $\mu\text{m}$  とすると、図 5 より 30  $\text{\AA}$  より波長の長い X 線は表面で吸収されてしまう(図 6 (a) に表面照射 3-phase CCD の量子効率を示す)。したがってこれより長い波長で X 線撮像を行なう場合には、薄くした CCD (thinned CCD) に裏面照射を行なう必要がある(図 4 (b))。Thinning の技術は Tektronix, RCA 等により開発、実用化されているが、入手のしやすさ、価格、取扱いの容易さから考えてまだ一般に手ごろとはいえない。これに対して、三洋電機の cross gate 方式<sup>14)</sup>の CCD は、通常の frame transfer 型 CCD が電極構造が表面をびっしりと覆っているのに対し、図 7 のように 4 相の電極が 2 相ずつ直交してはわしてあり、開口率にして約 25% の部分は絶縁層が露出している。また、日本 TI の virtual phase (VP) CCD<sup>15,16)</sup>は、1 相クロックで動作し 1 ピクセルサイズ内の半分しか電極で覆われていない(開口率 50%)。これらの方式は元来ポリシリコン電極による青色感度の低下を防ぐ目的で開発されたものであるが、5~80  $\text{\AA}$  の X 線域での撮像にもたいへん都合がよいと思われる。

表 1 X 線領域で使用可能な CCD

メーカー	ピクセルサイズ ( $\mu\text{m}$ )	画素数	転送方式	照射方式	用途
日本 TI	12×27	788×244	FT/virtual phase	表面	TV
三洋電気	16×27	572×242	FT/crossed 4 phase	表面	TV
米 TI	18×18	1024×1024	FF/virtual phase	表面	科学
RCA	15×15	512×1024	FT/3 phase	表面/裏面	TV/科学
GEC	22×22	578×385	FT/3 phase	表面	TV
Tektronix	27×27	1024×1024	FF/3 phase	表面/裏面	科学

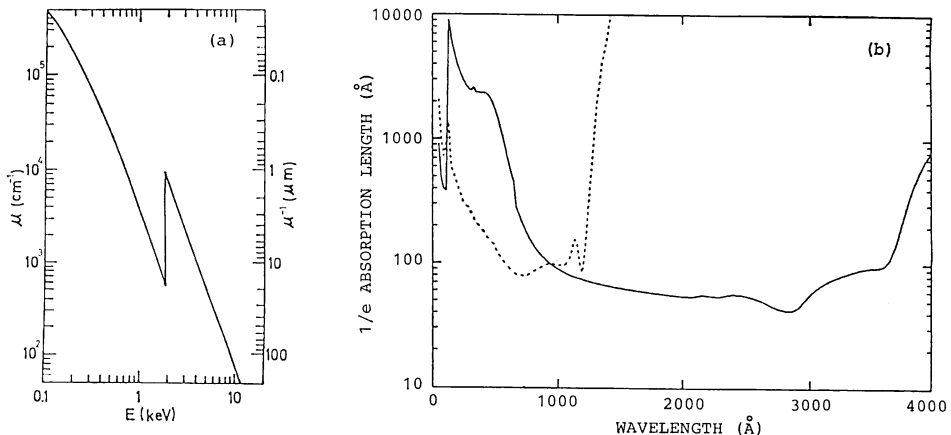


図 5 Si/SiO<sub>2</sub> の吸収長  
(a) 軟 X 線領域, (b) EUV/UV 領域 (実線: Si, 破線: SiO<sub>2</sub>)<sup>19)</sup>

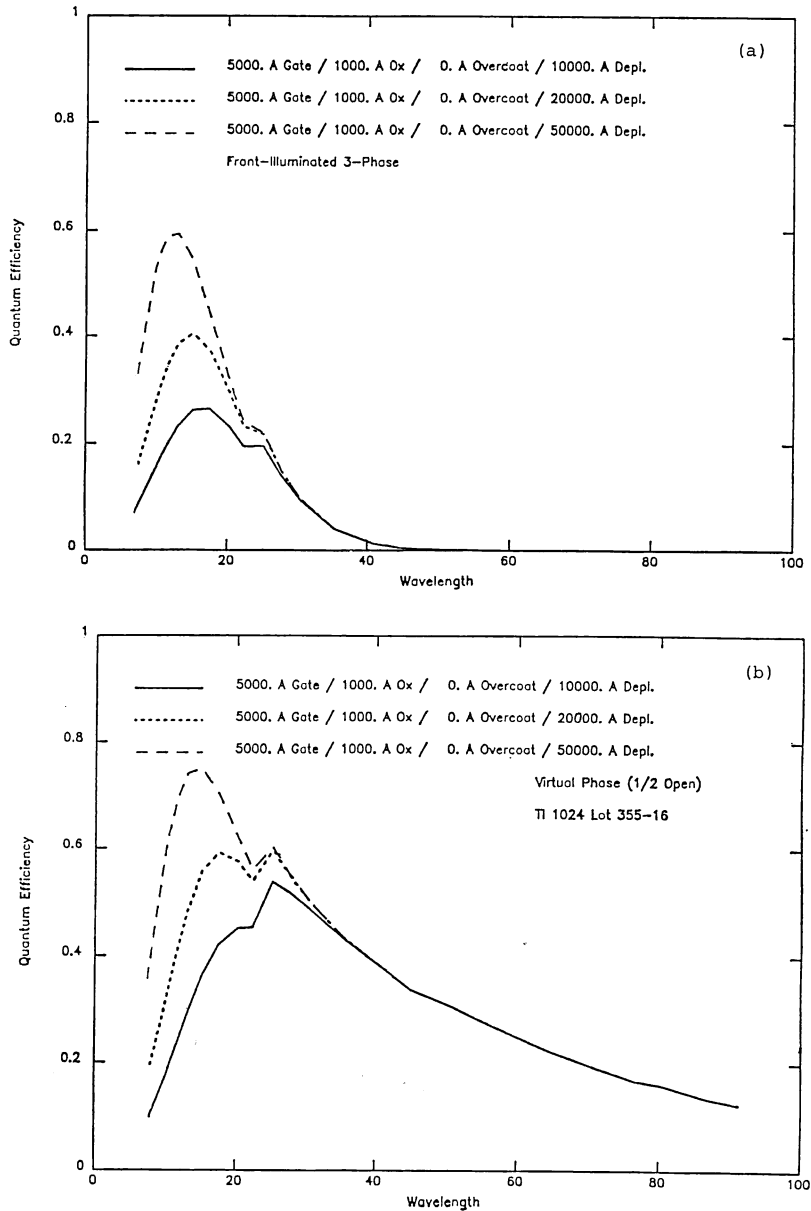


図6 CCDの量子効率

(a) 3相 CCD に表面照射した場合, (b) virtual phase CCD に表面照射した場合

100 Å より長い波長になると thinned CCD に裏面照射を行なう必要がある。数百 Å より波長が長くなると, Si 基板の表面の厚さ 30~50 Å の酸化膜により裏面照射でも十分な量子効率が得られていない<sup>19)</sup>。

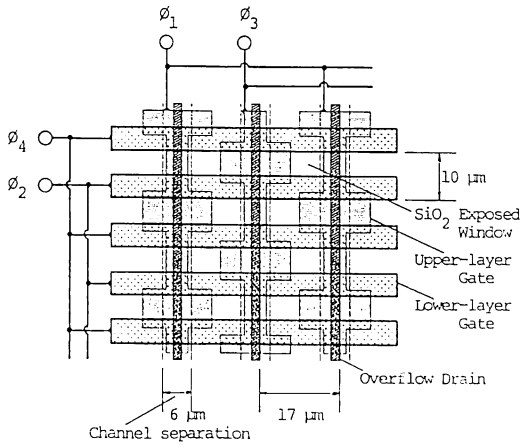
### 3.1.2 短波長側 (<10 Å) での撮像

一方 10 Å より短波長の X 線に対しては表面電極の影響は問題にならなくなるが, 逆に X 線が光電効果を起こさずに空乏層を通過してしまい量子効率が低くなる。空乏層の厚み  $L$  は<sup>5)</sup>

$$L = \sqrt{2\epsilon\phi/eN} \quad (2)$$

で表わせる。ここで  $\epsilon$ : Si の誘電率,  $\phi$ : ゲート電圧,  $N$ : 不純物濃度, である。典型的な値として  $\epsilon = 11.8 \epsilon_{\text{vacuum}}$ ,  $\phi = 10 \text{ V}$ ,  $N = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  (比抵抗  $\sim 10 \Omega \cdot \text{cm}$ ) を代入すると  $L = 4 \mu\text{m}$  となる。このため 6 Å 以下では空乏層内での X 線の吸収が起こりにくくなり, 中性領域での吸収が目立ってくる。

高エネルギー側での量子効率を上げるには空乏層の厚みを増せばよい (deep depleted CCD) が, このために

図 7 Cross gate 構造の CCD<sup>14)</sup>

は(1)gate 電圧を上げる<sup>18)</sup>, (2)Si の不純物濃度を下げ的方法<sup>17)</sup>がありうる。前者は MOS ドライバーの能力, 絶縁層の耐性等からあまり現実的とは言えない。後者については, すでに比抵抗  $\sim 4 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$  の Si を用いたデバイスが試作されている<sup>17)</sup>。この場合, 空乏層の厚みは約  $60 \mu\text{m}$  になり, 図 5 より  $2 \text{ \AA}$  の X 線にも十分の感度がある。

### 3.2 CCD による X 線撮像

X線領域での撮像には, 使用波長域に応じて市販の CCD が使用可能でありすでに実用化段階にきていると考えられる。撮像するエネルギー領域を制限したり, 入射光子のエネルギーの情報をある程度得るには適当なフィルターを用いばよい。フィルターは原子番号と厚みでカットオフエネルギーが異なるため, たとえば高温プラズマの撮像と同時に大まかな温度分布を得るには 2 種類のフィルターを交互に入れて撮像し, 各ピクセルにおける強度比を求めればよい。

フィルターを用いて特定の波長域に選択的に感度をもたせるには, Ross の方法が有力である。K あるいは L edge エネルギーのわずかに異なる 2 枚のフィルターで別々に撮像し強度の差をとることにより edge エネルギーの幅にあたる部分のみに感度をもたせることができる。この方法で得られるエネルギー分解能は  $\Delta\lambda/\lambda=10 \sim 20\%$  である。

### 3.3 CCD による入射光子のエネルギー分析<sup>7-13)</sup>

1 回の露光時間中に 1 ピクセル当たり 1 個以下の光子しか検出されなければ, 個々の光子のエネルギーの測定が可能になる。入射光子数を  $n$  photons/pixel/frame とすると 1 ピクセル当たり露光時間中に 2 photon 以上検出される確率は,

$$P(n) = 1 - (1+n) \cdot \exp(-n) \quad (3)$$

である。正確なエネルギー分析を行なうために, photon confusion の確率を 1% 以下にする必要があるとすると ( $P(n) < 0.01$ ), 最大計数率は  $0.1$  photons/pixel/frame に制限される。最大計数率を上げるためには, CCD の高速読み出しを行なう必要があるが, (1)MOS 容量の高速ドライブ, (2)アナログ処理系の速度, が実際的な制限となろう。(1)については, 垂直シフトレジスターの MOS 容量が TV 用 CCD では  $3000 \text{ pF}$  程度であるが,  $1024 \times 1024$  ピクセル CCD になると  $30000 \text{ pF}$  にもなる。電極の抵抗が  $100 \Omega$  程度であるとする,  $\text{CR} \sim 3 \mu\text{s}$  より十分遅くしかドライブできず, 最大計数率の問題は使用目的によっては強い制限となる。

次にエネルギー分解能について見てみよう。X線検出器のエネルギー分解能は, おもに励起された電子, 正孔対の数のゆらぎで決まるので, 励起エネルギーが小さくて生成される電子, 正孔対の数が多いほど相対的なゆらぎは小さくエネルギー分解能はよい。半導体結晶の励起エネルギーは, 入射エネルギーによらず  $W = 1.95 E_g + 1.4 \text{ eV}$  で表わされ<sup>6)</sup>, Si では  $3.6 \text{ eV}$  である。電子, 正孔数の分散雑音は,

$$\sigma = \sqrt{E \cdot F \cdot W} \quad (\text{electrons}) \quad (4)$$

と表わせる。ここで  $E$  は入射光子エネルギー,  $F$  は Fano 因子で物性によって決まり Si では,  $F = 0.12$  である。たとえば  $1 \text{ keV}$  の光子 1 個に対しては, 平均 278 個, 分散が 7 個程度のばらつきをもつ電子, 正孔対が生成される。このため CCD のエネルギー分解能は半導体検出器とならんでたいへん良いことが予想される。

しかし実際には, CCD のエネルギー分解能を決める因子は, このほかにも中性領域(空乏層以外の領域)で生成されたキャリアの影響, 出力ノードの浮遊容量 ( $0.1 \text{ pF}$  程度)に伴う雑音, 出力アンプのノイズ, 電荷転送のロスによるノイズ等がある。このうち, 出力ノードのノイズ, 出力アンプノイズの低周波成分は, CCD の出力信号が reset level, signal level の繰返しであるので reset level を電氣的に signal level から減算することによりかなり除くことができる(二重同期サンプリング)。中性領域で生成されたキャリアによる分解能の悪化は, 入射光子エネルギーが高いとキャリアがおもに中性領域で生成され, 中性領域内で再結合し消滅したり, 拡散によりとなりのピクセルに入りこむため生じるもので, スペクトル分布に low energy tail が生じる。これを防ぐには, epitaxial 法を用い中性領域の不純物濃度を空乏層の  $10^4$  倍程度にして中性領域で生じた電荷をす

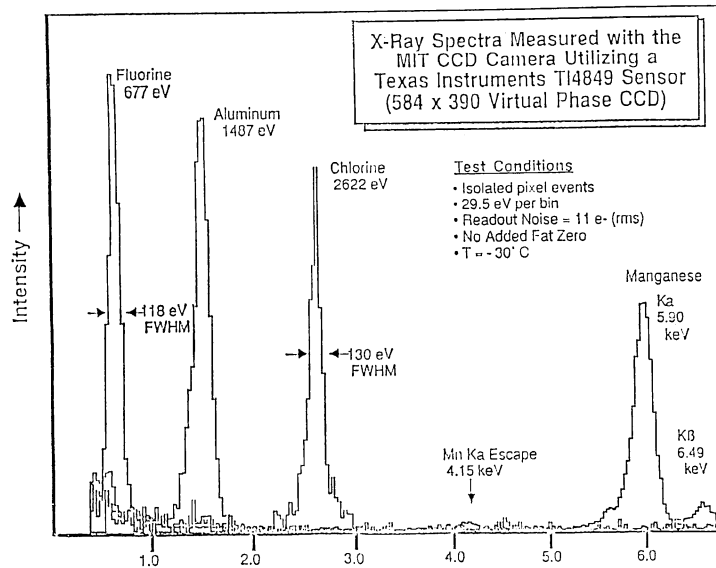


図8 Virtual phase CCD で測定したいろいろな特性X線のスペクトル<sup>13)</sup>

べて、中性領域内で再結合させてしまう方法が考えられている。

図8にMITのグループのvirtual phase CCDを用いた実験結果を示す<sup>13)</sup>。5.9 keVで半値幅 $\sim 200$  eVが得られているが、半導体検出器と同程度の性能を發揮するには上記の問題を解決する必要がある。

#### 4. 放射線耐性<sup>20-24)</sup>

CCDをX線波長で使用する際に問題になるものの一つとしてX線耐性がある。人工衛星に搭載して使用する場合はさらに宇宙線(電子, 陽子)の影響も評価する必要がある。一般に放射線を当てると、Si-SiO<sub>2</sub>界面に中間準位が形成されるため暗電流が増大したり、trapped chargeによるバイアス電圧の変化が生じたりする<sup>20)</sup>。

3相CCDでは1ピクセル当りの総照射量が $10^9$  photons/cm<sup>2</sup> (6 keV)を越えると暗電流の増加が始まったという報告がある<sup>21)</sup>。Co<sup>60</sup> (1.3 MeVガンマ線)の照射では、3相CCDの場合 $10^8$  radで影響が出始めるが、VP CCDでは $2 \times 10^5$  radでも影響がない<sup>20)</sup>。

#### 5. おわりに

X線CCDは民生用、科学用の広い潜在的応用があると考えられ、今後各種のX線用CCDが利用可能になっていくと思われる。これまで見たように、 $5 \sim 80$  Åの波長での撮像には市販のCCDが使用できる。しかしX線天文学等で要求される $\sim 10$  keVまたはそれ以上のエネルギー域での撮像、半導体検出器なみのエネルギー分解

能での光子のエネルギー分析にはなお開発努力を必要とする。

わが国が1991年に打ち上げる太陽観測衛星Solar-A<sup>25)</sup>では初めてvirtual phase CCDと斜入射ミラー望遠鏡を用いて太陽の軟X線( $5 \sim 60$  Å)撮像が行なわれる。CCDの前面には各種のフィルターを置くことができ、太陽コロナプラズマ( $10^6 \sim 3 \times 10^7$  K)の温度診断も行なうことができる。一方NASAが計画中の大型X線天文衛星AXAF<sup>26)</sup>では、斜入射ミラー望遠鏡の焦点面検出器群の一つに単一光子のエネルギー分析(imaging spectroscopy)を目的としてvirtual phase CCDが採用されており、本稿で述べたような問題点を克服するための基礎開発が続けられている。

#### 文 献

##### CCD全般

- 1) 塚本哲男: "CCDの基礎" (エレクトロニクス文庫, オーム社, 1980). CCDの基礎的事項について、小冊子であるが重要事項が要領よくまとめられている。
- 2) J.R. Janesick, *et al.*: "The future scientific CCD," Proc. SPIE, **501** (1985) 1. 科学用CCDについての現状報告。
- 3) *EEV/GEC CCD Data Book/Technical Notes* (EEV/GEC, England). GEC CCDの技術解説書であるが、CCD技術全般にわたっての原理的解説がある。
- 4) 頼 泰樹, 箕谷宣広: "個体撮像デバイス", 電子材料, **1** (1984) 82.
- 5) S. M. Sze: *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd ed. (John Wiley and Sons, New York, 1981).
- 6) S. F. Kozlov, *et al.*: IEEE Trans. Nucl. Sci., **NS-22**, (1975) 160.

半導体物性

## X線 CCD 全般

- 7) D. H. Lumb: "Maximisation of X-ray energy resolution in GEC CCD's," Proc. IEEE Nuclear Symposium (1984).
  - 8) R. E. Griffiths, *et al.*: "Single photon X-ray imaging with CCDs," Proc. SPIE, **290** (1981) 62.
  - 9) D. A. Schwartz, *et al.*: "Enhancement of X-ray performance with new GEC CCD," Proc. SPIE, **570** (1985).
  - 10) D. H. Lumb, *et al.*: "Performance of CCDs for X-ray imaging and spectroscopy," Nucl. Instr. Methods Phys. Res., **221** (1984) 150.
  - 11) J. R. Janesick, *et al.*: "CCD advances for X-ray scientific measurements in 1985," Proc. SPIE, **597** (1985) 364.
  - 12) E. G. Chowanietz: "CCDs for X-ray spectroscopic applications," Proc. SPIE, **597** (1985) 381.
  - 13) G. P. Garmire, *et al.*: "The AXAF CCD imaging spectrometer," Proc. SPIE, **597** (1985) 261.
- Cross gate 構造の CCD
- 14) N. Mitani, *et al.*: "A single chip 1/2'' frame transfer CCD color image sensor," *Proc. of IEDM-84*, **2.7** (1984).
- Virtual phase CCD
- 15) J. Hynccek: "Virtual phase technology: a new approach to fabrication of large-area CCD's," IEEE Trans. Electron Devices, **ED-28** (1981) 483.
  - 16) J. R. Janesick, J. Hynccek and M. M. Blouke: "Virtual phase imager for Galileo," Proc. SPIE, **290** (1981) 165.
- Deep depletion CCD
- 17) D. Watson, *et al.*: "Deep-depletion CCD for X-ray astronomy," Proc. SPIE, **501** (1984) 306.
  - 18) 斎藤宏文, 渡部 博: "厚い空乏層をもったX線用撮像素子の検討", 電気通信学会論文誌, **J 67-C** (1984) 203.
- EUV CCD
- 19) R. A. Stern: "UV and EUV response of CCD detectors," Opt. Eng. (1987) in press.
- 放射線耐性
- 20) 文献 16) と同じ.
  - 21) 東山禎夫, 榎本茂正, 西岡正二: "低エネルギー X線照射による CCD ラインセンサの劣化", 電気学会論文誌 C, **106-9** (1986) 18.
  - 22) 渡辺喜久雄, ほか: "SiO<sub>2</sub>/Si 構造の放射線照射効果", 電気情報通信学会論文誌 C, **J 170-C** (1987) 972.
  - 23) L. N. Koppel: "Direct soft X-ray response of a charge-coupled image sensor," Rev. Sci. Instrum., **48** (1977) 669.
  - 24) A. J. Kennedy: "Determination of the total X-ray dose in the SiO<sub>2</sub> layer of backside electron irradiated ICCD imagers," IEEE Trans. Nucl. Sci., **NS-26** (1979) 4885.
- 天文学への応用
- 25) Y. Ogawara: "Solar-A mission," Solar Phys. (1988) in press.
  - 26) M. C. Weisskopf: "The advanced X-ray astrophysics facility," Proc. SPIE, **597** (1985) 228.