レーザー解説

CCDによるX線直接撮像

常 深 博*

(1990年10月3日 受理)

The Direct X-Ray Detection with a Charge Coupled Device

Hiroshi TSUNEMI*

(Received October 3, 1990)

X-ray detection below 10 keV has made great progress with a Charge Coupled Device (CCD). The greatest advantage to use CCD is that it has a good energy resolution as well as a high spatial resolution. Several efforts are done on the development of the X-ray CCD in Europe and in U.S.A. We present the results obtained with the CCD developed in MIT/Lincoln which is scheduled to be boarded on the next Japanese astronomy satellite Astro-D. Astro-D will be the first space observatory using the X-ray CCD. We also show the results obtained with CCD available in Japan. The requirements for the future X-ray CCD are discussed.

Key Words: X-ray CCD, Energy resolution, Spatial resolution.

1. はじめに

従来まで、X線像を得るための撮像素子はそのままではエネルギー(波長)情報を得ることが出来ないため、得られる像は言わばモノクロ画像(総エネルギー流量)となる。感度は低いものの、 $10\mu\text{m}$ 或はそれ以下まで位置分解能を持つフィルムから始まって、有効面積は小さいものの感度が高く高時間分解能のマイクロチャネルプレート(MCP)¹⁾、時間分解能は悪いが大面積が可能で再使用できるイメージングプレート(IP)²⁾等が使用されている。例えば、IPは数十cm四角の大面積を実現しているが、その位置分解能はざっと $100\mu\text{m}$ で、17keVのX線に対しては少なくとも3個以上同じ場所に入らな

いと有意に検出できない³⁾等感度は余りよくない。

一方、エネルギー分解能を持つX線検出器としてはガス比例計数管、半導体検出器等がある。ガス検出器は比較的大面積に出来るがエネルギー分解能が悪く(6 keVに於て $E/\Delta E \approx 5$)、位置情報もせいぜい数百 μm である。半導体検出器は非分散型としては半値巾で150eV以下と優れたエネルギー分解能を持つものの、有効面積は小さく位置分解能も持っていない。又、優れたエネルギー分解能を達成するためには液体窒素温度まで冷却しなければならない。

現在では可視光領域での撮像にはCCDが撮像管に取って代わってしまっている。その検出原理は半導体検出器と同じであり、ピクセルサイ

*大阪大学理学部物理学科 (〒560 豊中市待兼山町1-1)

*Department of Physics, Faculty of Science, Osaka University (1-1 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560)

Fig.1 The energy resolution and the spatial resolution for various detectors in the X-ray region. IPC, IGSPC are the Imaging Gas Proportional Counter and Imaging Gas Scintillation Proportional Counter, respectively.

Fig.2 Schematic cross section of CCD. The potential inside is shown on the right.

ズが $10\mu\text{m}$ 程度であることから、X線領域においても優れたエネルギー分解能と位置分解能とを合わせ持つ素子となることが期待される。ところが、例えば可視光用の素子では受光部には可視光が入るが、蓄積部分に可視光が入らないようにするため、薄いアルミニウムでコーティングしてあるものの、これはX線に対してほとんど透明と言える。従って、蓄積部をX線に対して簡単に遮蔽するという点からも可視光で多用されているインターライン転送型素子は殆ど役に立たず、フレーム転送型素子が必要になってくる。この他にもX線と可視光との違いのため、X線用に使用するためにはいろいろ改良し

なければならない点があり、世界各地で開発研究が進められている。米国^{4,5)}や欧州⁶⁾では検出効率を格段に改良した素子や、優れたエネルギー分解能を達成するために超低雑音素子等が試作されている。しかし、CCD素子の開発にはかなりの設備と時間がかかるため、わが国では殆ど行われていない。更に、わが国でこれら諸外国で開発されたX線専用の素子を手に入れることが大層困難な状況である。

Fig.1には、各種X線検出器のエネルギー分解能と位置分解能とをまとめて比較して表示した。本稿では、CCDをX線の測定に使うための問題点を簡単に説明した後、X線天文学に関連

しX線撮像素子としての世界のトップレベルの素子を紹介し、合わせて筆者が進めている日本で利用できる素子を使った開発研究^{7,8)}の現状を報告する。

2. CCDによるX線の検出

CCDの電磁波検出原理は半導体検出器と同じである。その縦構造の模式的断面はFig.2に示すようになっており、表面のゲートを通して絶縁層を挟み空乏層が広がる。空乏層は電場の掛かっている領域で、ここで光電吸収して生じた電子はほとんど広がることなくある電極の下に集まる。空乏層の下の中性領域で光電吸収した場合には、一次電子はかなり広い範囲に広がることになるので、入射場所やエネルギーを決めるためには空乏層で検出できるようになっていることが望ましい。空乏層の厚さ d は珪素基板の比抵抗 ρ Ω cmと逆バイアス電圧 V voltとで決り、大体

$$d \cong 0.3 \sqrt{\rho V} \text{ } \mu\text{m}$$

である。可視光用に広く使用されている素子の基板の比抵抗はせいぜい数 Ω cmであり、印加電圧は10V程度だから、形成される空乏層は僅かに数 μ mにしかない。CCDを作る珪素の吸収距離を考えると、空乏層の厚さが数 μ mしかない場合には、1keV以上になると検出効率が下がって来る。例えば10keVまでの検出効率を向上させるにはこの厚さを100 μ m程度にする必要がある。しかし、1keV以下の領域では可視光用の素子でも充分に優れていると言える。ただし、1keV以下の領域になって来ると空乏層の検出効率よりもむしろその上面にあるゲート構造や絶縁層の厚さなどによる吸収が効いて来るのでやはり検出効率は下がる。この領域ではいかに絶縁層を薄くするかが問題になる。更に、X線を検出するとき可視光が入らないようにするには素子全体を薄いアルミニウム等でカバーする必要がある。尤も、X線源が全く可視光を発しない場合にはこのようなアルミニウムは不用になる。Fig.3に可視光用の素

Fig.3 Detection efficiency of various CCD structures including the absorption of SiO_2 and an aluminum filter. The lowest curve corresponds to a conventional CCD for optical use and the upper one corresponds to the pn-CCD with a depletion layer of 280 μ m. The thick curve shows the detection efficiency for the VID289 with depletion layer of about 20 μ m.

子に対する検出効率(計算値)を示すが、低エネルギー側で効率の下がっているのは絶縁層の厚さや可視光を遮蔽するためのアルミニウムの吸収による。この観点から考えると、電極の一部を省略できる仮想電極方式の素子は低エネルギー側で有利になる。

珪素を使ったCCDの場合、電子ホールペアを作るための平均エネルギーは3.7eVであるから、エネルギー E のX線が入った場合に生ずる一次電子数 N は

$$N = 1600 (E / 5.9 \text{ keV}) \text{ 個}$$

となる。又、珪素のファノファクターを考慮するとそのときの一次電子数の揺らぎ(r.m.s.) σ_N は

$$\sigma_N = 13.4 (E / 5.9 \text{ keV})^{1/2} \text{ 個}$$

となる。これはエネルギー分解能(半値巾) ΔE で表すと5.9keVで120eV弱に相当する。すなわち、珪素を使う限りこれが理論的な限界を与える。ちなみに、珪素の場合 ΔE と σ_N との関係は、 $\Delta E \text{ (eV)} = 8.74 \sigma_N$ である。CCD内では電子雪崩による増幅は起こらないので一次電子の揺ら

ぎがエネルギー分解能の上限値を決める。これらの電子は電極の下に集められるが、一つの電極に集められる電荷量は各ピクセルの電気容量で決り、ピクセルサイズに比例すると見てよい。例えば、 $12\mu\text{m}$ 四角のピクセルを持った素子の場合の飽和電荷量は電子で 10^5 個程度である。

集められた電子群は順次電極間を転送されるが、これは可視光の場合も全く同じである。X線のエネルギーを測るためには、各ピクセルに入るX線個数を下げ、一つのピクセルに複数個入らないようにしなければいけないため、X線の入ったピクセル周辺は信号のないのが普通である。従って、電荷転送効率(CTE)が信号波高の測定、つまりエネルギー分解能に強く影響する。ピクセルの数にもよるが、CTEとしては $1-10^{-5-6}$ は必要である。そのためには、クロッキングの波形やその周波数が重要である⁹⁾。なお、低温では電子の熱運動が低くなるため、クロック周波数を下げなければ良いCTEは得られない。

こうして転送された電荷は最終段の読み出し部を通して出力される。最終段の読み出し部では、転送された電荷をある静電容量に入れその電位変化が出力となる。また、読み出し雑音としてはこの容量性のものが大部分となるので、微小容量の方がSN(つまりエネルギー分解能)が良くなる。しかし、この容量を受光部のピクセルの飽和レベルよりも小さくすると検出のダイナミックレンジが狭くなるため、可視光用の素子では読み出し部の容量はあまり小さくない。従って、可視光用の素子の雑音レベルは低温で動作させても電子に換算して数十個(r.m.s.)程度となる。これに対して、X線専用開発された素子では、動作温度を下げるなどして電子1個の雑音レベル¹⁰⁾を実現している。

3. CCDによるX線検出装置

現在わが国では1993年初めの打ち上げを目指してASTRO-D衛星の準備を進めている。この衛星の搭載機器の一つにCCD¹¹⁾があり、世界で初めてX線による天体観測に使用される予定

で、その優れたエネルギー分解能を発揮するものと期待している。これは、MIT/LINCOLN研究所が開発したX線専用のCCDで、大層優れたエネルギー分解能を達成している。使用するCCDは4個の素子がモザイク状に並べられたもので、ピクセルサイズは $27\mu\text{m}$ 四角、全有効面積は23ミリ四角ある。使用している珪素基板は $6.5\text{k}\Omega\text{cm}$ で、空乏層の厚さは $90\mu\text{m}$ 程度に達している。動作温度は -70°C 程度で、読み出し速度は50kHz、達成している読み出し雑音レベルは電子に換算して数個或はそれ以下である。

これ以外にも種々試作されているが、いずれも読み出し雑音レベルが電子に換算して数個或はそれ以下である。これは、読み出し雑音レベルがエネルギー分解能に影響するのは0.1keV以下の領域であり、それ以上では一次電子の揺らぎだけで決ることを意味する。このような装置になるとX線によって生じた一次電子が素子内でどのように広がっているかが(ピクセル単位で)詳細に測定できる。空乏層の下の中性領域で一次電子が生じた場合にはかなり多数のピクセルに一次電子の分かれることが予想されるが、空乏層中で吸収されても幾つかのピクセルに広がることが分かった。つまり、一つのX線によって、いくつかの連続したピクセルに電荷が分離する。ここで、この連続したピクセルで、ある数居値(読み出し雑音レベルで決る)より大きな信号量を含むものの集まりをアイランドと呼ぶ。そうするとX線のエネルギーを測るにはアイランドに含まれる全信号量を測れば良いことが分かる。Fig.4にはそれによって取得した波高分布をアイランド毎に示す。ここで、高さ方向はアイランドの総数を示す。これは、CCDに⁵⁵FeからのX線(Mnの特性K-X線)を照射したものである。

Mnの $K\alpha$ (5.9keV)と $K\beta$ (6.5keV)との位置から大体アイランドの大きさが4くらいまでのものは正しくエネルギー値を表していることが読み取れる。しかし、アイランドの大きさがそれ以上になると、しだいに電荷量が減っており、一部の電荷が失われているのが分かる。これは、

Fig.4 Pulse height distribution of X-rays from ^{55}Fe is shown according to the island size. The X-ray peaks are not affected by the island size below 4 while they are affected above 4.

アイランドサイズ4までのものは空乏層で吸収されたものであり、一次電子の広がりは大層小さく、ピクセルの境界付近に生じたイベントが最大4ピクセルに広がって見えるだけで4ピクセルまで集めればほぼ全ての電荷を集めているからである。一方、それ以上の大きさのアイランドの場合には中性領域で吸収されたため一次電子の広がりが大きく、その周辺のピクセルにはそれぞれ僅かとは言え雑音レベル程度の電荷が染み出しているからである。従って、入射X線のエネルギーを効率よく測定するには4ピクセルの大きさのアイランドまでは処理しなければいけないことになる。空乏層でX線がどのくらいの割合で吸収されるかは、X線の空乏層での検出効率で決る。エネルギーが高い場合には厚ければ厚いほど良い。しかし、検出したX線の一次電子が単一のピクセルに集まるかどうかは空乏層の厚さよりもピクセルの大きさで決ることになる。従って、エネルギーが低い場合にも4ピクセルまでのイベントを処理することが検出効率を上げる方法である。

こうして4ピクセルまでのアイランドだけを

Fig.5 Histogram of the total events is shown by the upper curve while that of the single pixel event is shown in the lower¹¹⁾. The single pixel events show the true energy spectrum while the total events show the tail below X-ray energy due to the split events.

選び出し、各アイランドに含まれる信号量を加算すれば正しいエネルギー情報を得ることが判った。Fig.5にはアイランドサイズが1のものの波高分布と全ピクセルの波高分布との違いの例を示す¹²⁾。勿論アイランド内の総和が正

Fig.6 X-ray image of an IC moded with plastic taken with the CCD. The top picture shows the whole image with a spatial resolution of 50 μm and the bottom one shows the partial image with the best spatial resolution (12 μm). The vertical line in the whole image is due to the defect column. The X-ray used in this image is mainly from Cu-K (8 keV) lines.

しいエネルギー情報になるためには各アイランドには複数個のX線光子の入っていないことが条件である。そのためには、読み出し間隔の間に素子に入ってくるX線光子の数を制限しなければならない。こう言う理由でCCDによりX線のエネルギーを測定する場合には、X線強度に制限が付く。但し、ここで注意しなければならないのは、CCDはあくまで積分型の素子であるので、たとえ単一のピクセルに複数個のX線光子が入射した場合でも、それぞれのX線光子は区別できないけれども、その全入射エネルギーは正しく測定できるという点である。従って、エネルギー情報が得られないような場合でも画像

情報は正しく得られている。

我々はこれまで日本で手に入る各種の可視光用の素子を使用して^{7,8,13)} X線検出を試みてきた。その中で、現在は日本TI社製の素子(VID289)を使用してX線の直接撮像を行っている。この素子はピクセルサイズが $12 \times 12 \mu\text{m}^2$ で、百万個の画素からなるフレーム転送型の素子で、可視光用としてはTC213と呼ばれている。Fig.6には、これによって撮像したプラスチックモールドのICの透過X線像を示す。ICに含まれる金属基盤と、その周辺のボンディングワイヤー(15 μm の金線)とが明瞭に見えている。これは、CCDの画像面全体を使用して撮像面積を最大($12 \times 12 \text{mm}^2$)にして取得したものである。

この素子は既に述べたようにフレーム転送型素子であるので、その内の半分の画素をX線に対して不透明にして(金属板で覆う)やると、連続して画像を取得することが可能になる。この場合には、各ピクセルからの出力をデジタル化して計算機に取り込むものとする、そのダイナミックレンジから考えて12ビット/データは必要である。そうすると、ADCに要する変換時間、メモリアクセス時間等で取得速度が制限される。我々が試作した装置では毎秒百万画素のピクセルを処理することが出来る。これによって、連続画像が得られるわけであるが、画素をCCD素子内部で加算するなどある程度まとめるとか、画像取得範囲を制限するとかすればTV画面程度の動画を得ることが可能である。例えば、 15mm^2 程度の範囲の画像を12 μm の精度で読み出すなら毎秒10画面の割合で取得することが可能である。

可視光用に開発された素子は、特に低雑音を目指しているわけではないが、素子を冷却することによりエネルギー分解能を良くすることが出来る。読み出し速度にもよるが、 -50°C 程度まで冷却することにより300eV程度のエネルギー分解能を達成している。検出効率を始め、有効画像面積、読み出し速度など十分とは言えないものの、計算機処理の容易さ、ある程度のエネルギー分解能のあることなど十分有用であ

ると言える。

4. 今後の発展

今後わが国でも容易に入手できるようなX線用CCDを開発すべきであるとする、どの様な条件が必要であろうか。検出エネルギー範囲を高エネルギー側(10keV或はそれ以上)に延ばすためには、空乏層を厚くする必要がある。その一つの方法としてこれまでにあまり行われていないPN型素子の開発¹⁴⁾がある。これは印加電圧を高く出来るなど、空乏層を厚くし易いもので、280 μm 程度のもので試作¹⁵⁾されている。又、低エネルギー側の感度は空乏層上面にある電極等の構造を何処まで薄く出来るかに依存する。これを押し進めると裏面照射が好都合であることになるが、空乏層が厚いほど裏面照射を実現し易い事情もある。このようなことを考えると、今後のCCDの開発としてはPN型CCDが有望であると言える。

有効面積を大きくするために素子に含まれるピクセル数を増やすことは、CTEの問題、製作上の歩留りの問題等があり実際には難しいものと思われる。そこで小さい素子をモザイク状に並べることにより有効面積を増大するのが現実的な案となる。これは、各CCDの間をどの程度詰めて並べられるかが問題となる。実際には大きなパッケージを用意し、それに4個の素子を並べてみるなどの試作を始めたいと思っている。

可視光用の素子では、まだまだ読み出し段階の雑音レベルが高いので、これの低くなるような読み出し部分を持つ素子が必要である。このためには、ある程度検出可能な最大電荷量を制限する必要があるかも知れない。

位置分解能を更に良くするために、ピクセルサイズを小さくすることはどうであろうか。空乏層で吸収されたX線によって生じる一次電子も必ず少し広がるため、ピクセルサイズを小さくすることはアイランドサイズの大きなものが増えるだけとなる。そうすると正しくエネルギー情報を取り出すための処理が増えるし、素

Fig.7 Relative occurrence probability of the event with an island size below 4 is shown according to the pixel size in the diffusion length of the primary electron clouds (about 1 μm at 10 keV).

子外部で幾つかのピクセルを加算する必要があるためエネルギー分解能が劣化することにもなる。しかも、全体のピクセル数が増えるので読み出しにも時間が掛かり、CTEの問題も出てくる。こう考えて来ると、ピクセルサイズはあまり大きなアイランドが生じない程度に押える必要がある。図-7には空乏層中での電荷の拡散距離を単位にして測ったピクセルの大きさと、4以下のアイランドサイズの生ずる相対頻度とを示したものである。大体、アイランドサイズ2程度以下のものがよく起こる大きさを目安と考えると、ピクセルサイズは最小で5 μm 程度が有効と見なせる。

X線が光電吸収された場合、生じる一次電子はX線の電場方向に飛び出し易い。X線のエネルギーが10keV程度になると、この一次電子の珪素中での飛程が1 μm ¹⁶⁾近くになる。こうなると、ピクセルサイズが小さければその方向を測定できる可能性があり、X線偏光計として動作することになる。そのためにはアイランドサイズが2以上のイベントを検出できる必要がある。ここで注目すべきことは、これによるX線の偏光の測定は、その画像情報には何等影響を与えるものではないということである。このようなことからピクセルサイズのある程度小

さい(5 μm 程度)ものは将来開発すべき素子として魅力あるものと言えよう。

参 考 文 献

- 1) 大庭孝一郎：テレビジョン学会誌 36 (1982) 962
- 2) 宮原他：日本物理学会誌 45 (1990) 398.
- 3) 宮原諄二：私信.
- 4) R. A. Stern et al.: Rev. Sci. Instrum. 54 (1983) 198.
- 5) G. P. Garmire et al.: SPIE 597 (1985) 261.
- 6) E. G. Chowanietz et al.: SPIE 597 (1985) 381.
- 7) H. Tsunemi and K. Mizukata: Jpn. J. Appl. Phys. 27 (1988) 2404.
- 8) J. R. Janesick et al.: SPIE 501 (1984) 2.
- 9) 山下広順, 常深 博：レーザー研究, 16 (1988) 535.
- 10) G. R. Ricker: private communication.
- 11) 満田他：日本天文学会予稿集 (1990, 秋) A130.
- 12) G. A. Luppino et al.: Optical Eng. 26 (1987) 1048.
- 13) H. Tsunemi K. Mizukata and M. Hiramatsu: Jpn. J. Appl. Phys. 27 (1988) 670.
- 14) E. Gatti and P. Rehak: Nucl. Instrum. and Meth. A225 (1984) 608.
- 15) L. Struder et al.: Nucl. Instrum. and Meth. A288 (1990) 227.
- 16) J. R. Janesick et al.: SPIE 597 (1985) 364.