

X線を探るCCDの開発研究(カラーX線画像)



夢はバラ色

常 深 博*

Development of the CCD for X-ray use

Key Words : Charge-coupled device, image, spectrum, small pixel

1. はじめに

ビデオカメラでおなじみのCCDは、可視光線が硅素基盤内で光電吸収を起こし、生じる光電子を集めて信号としている。光電吸収の起こしやすさは、波長(エネルギー)に依存するわけで、硅素基盤の場合には肉眼で感じる波長よりも長い方にも感度を持つ。例えば、家電製品に使われるリモコン(目では見えない950 nm付近が使われている)をビデオカメラで撮影すると白く見えるので、目で見えない電磁波に感じていることが実感できる。こうなると、当然X線にも感じていそうである。

X線光子がCCDに入射した時には、硅素内で光電吸収を起こして最終的に生じる電子数は、光子のエネルギーによる。可視光($\sim 2\text{eV}$)や赤外($\sim 1\text{eV}$)の場合には、せいぜい電子を一個作るだけだが、X線の場合には数百から数千個の電子が作られる。素子を冷却するなどして読み出し雑音を下げれば、電子数を数個の精度で測定できるようになる。こうなると、X線のエネルギー(波長)を測定できることになる。つまり、CCDでX線を検出すると、入射場所(画像)

とそのエネルギー(波長)が判る。波長が判るということは、可視光で言えば、色が判ることに相当するので、正にX線カラー画像¹⁾と言うことになる。これまで、X線画像と言え、エネルギー流量だけを測定するX線モノクロ画像であった。モノクロ画像とカラー画像の違いは、情報量が単に増えたと言うに留まらず、情報の質が向上していると言うことで、その有用性は可視光の例からでも容易に想像できる。

硅素基盤中の電子は、空乏層内部にあれば全て電極に集まるが、空乏化していない領域(中性領域)では拡がってしまい、一部しか電極には集まらない。中性領域で生じた電子は、部分的には画像を作る役には立つが、X線のカラーを決める役には立たない。X線では、どれだけ空乏層を厚くできるかが重要になる。可視光の硅素内での平均吸収距離は $1\mu\text{m}$ もないが、X線のそれは、例えば10 KeVで $100\mu\text{m}$ と大変長い。つまり、X線が可視光と一番異なる点は、空乏層内で光電吸収を起こしやすいかどうかと言う点にある。一方、エネルギーの低いX線の硅素内での吸収距離は、例えば0.1 KeVでは 500\AA と大変短い。しかも、空乏層上面の二酸化硅素の保護膜(可視光用の素子では $1\sim 2\mu\text{m}$ あるが、可視光には透明である)、あるいは硅素で作られるゲート($0.5\sim 1\mu\text{m}$ ある)のX線に対する吸収は、空乏層の硅素とほとんど変わらない。つまり、X線は、保護膜や電極を通して、空乏層で吸収されねばならないから、低エネルギーのX線を検出するには、保護膜などをいかに薄くできるか²⁾で決まる。X線を効率良

*Hiroshi TSUNEMI

1951年8月31日生
1978年東京大学大学院理学系研究
科物理博士課程中退
現在、大阪大学理学部、宇宙地球
科学科、教授、理学博士、X線天
体物理学、CREST
TEL 06-850-5477
FAX 06-850-5539



く検出しようとするには、空乏層を厚く、その上面にある各種構造を薄くする必要がある。

こうして見ると、X線カラーの検出原理は易しいが、効率良く実現するとなるといろいろ難しい点が出てくる。私達は、科学技術振興事業団(もとの新技術事業団)から戦略的基礎研究推進事業(平成8年度発足)の援助を受け、X線カラー検出を効率良く行える素子の開発、さらにこれまでにない性能を持つX線検出用のCCD素子の開発を進めている。

2. CCDによるX線画像

X線フィルムの代わりにCCDを置けばX線

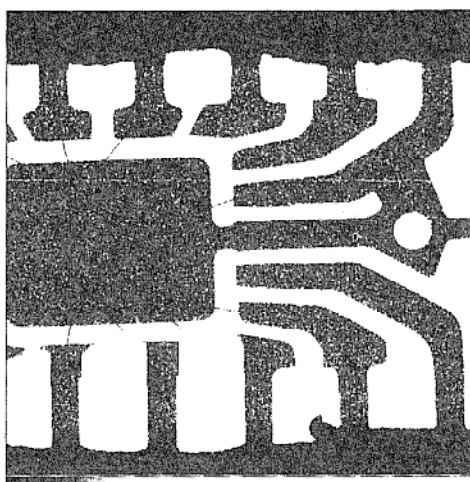


図1 ICの内部構造を示したX線透過像。可視光用の素子(12 μm 画素)で撮像

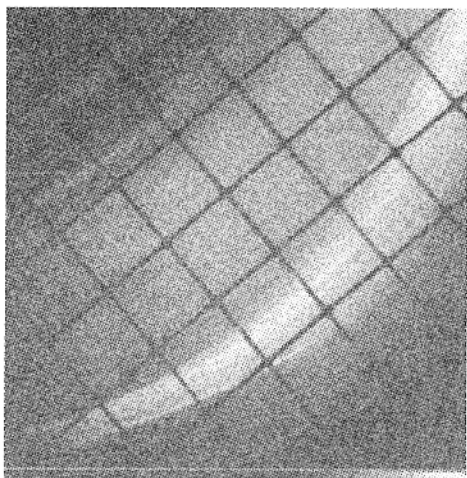


図2 UVSORにあるグラスホッパー分光器からのX線像。低エネルギー感度を向上させた素子(18 μm 画素)で撮像。図中に見えるメッシュ構造はX線以外を遮断するために置いたアルミ薄膜のサポートである。

画像が得られる。図1は、可視光用のCCD(12 μm 四角の画素で、12ミリ四角の大きさ)の直前にICを置いて平行X線ビームを照射したものである。ICはプラスチックフラットパッケージだが、厚さは2ミリほどある。図2には岡崎の分子研にあるUVSORのグラスホッパー分光器からのビーム(150eV)のCCD(18 μm 四角の画素で、18ミリ四角の大きさ)による画像である。分光器の収束点から外してあるので、グレーティングに起因する詳細な構造が見える。

ここで得た画像は、X線が光電吸収された結果生じた電子を全て出力しているの、フィルムによる像と変わらない。そこで、(集まった電子数) \times 3.65eVのX線エネルギーフラックス検出したとみなし、入射したエネルギーフラックスとの比を取れば「画像を得るときの検出効率」を得る。この効率を光電吸収を起こす珪素基盤の厚さに換算すると、可視光用に作られた素子に対して、約14 μm を得る³⁾。空乏層の厚さは2~4 μm だから残りの部分は中性領域の実効的に検出に役だった部分の厚さである。

3. CCDによるX線のエネルギー分解能

X線がCCDの空乏層内で光電吸収した場合には、X線のエネルギーに比例した個数の電子が作られる。例えば、6keVのX線が入射すると、1,600個あまりの電子が1~2 μm の領域にかたまると電子雲を作る。CCDの入射面にX線が入る様子は、窓ガラスに雨粒がかかる様子に似ている。ガラス面はCCDの受光面に、雨粒の大きさはX線のエネルギーに対応する。普通、X線で作る電子雲の大きさは、CCDの画素よりも小さいので、電子雲は1画素か、せいぜい2~4画素にまたがるだけである。つまり、画像1枚当たりに入射するX線が十分に少なく、それぞれの電子雲が重ならなければ、それぞれの電子の塊は、一個のX線光子による電子雲と言えるから、そこにある電子数を数えれば、入射したX線のエネルギーを決定できる。

CCDの空乏層内でのX線検出原理は珪素の半導体検出器と同じなので、エネルギー分解能も優れている。CCDから信号を読み出す時に付随する揺らぎを低減するには、ゆっくりした

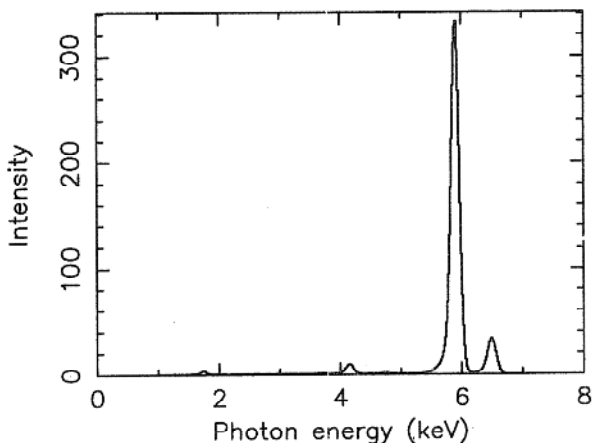


図3 最近我々が開発した素子による⁵⁵FeからのX線スペクトル. Mn-K α , Mn-K β , 珪素のエスケープ, Si-K等が見えている.

読みだし(数十ないし数百kHz), 低い動作温度(-60℃~-100℃)などが避けられない. これらを組み合わせれば, 読み出しに付随する揺らぎは, 電子に換算して数個にすることが可能である. 図3には⁵⁵FeのX線に対して, 我々が開発し始めたCCDで取得したX線スペクトルを示す.

4. X線検出用の素子の開発を目指して

CCDでX線を直接撮像する場合には, できる限り空乏層を厚くしたい. 可視光で使われるCCDはX線用としては不十分で, 特別に空乏層の厚い素子の開発が進められている. 外国で開発されたものでは, 空乏層の厚さが30~60 μ m⁴⁾, 場合によっては100 μ m⁵⁾近いものもある. しかし, これら空乏層の厚い素子は, X線用には有用でも, 可視光用としては, 暗電流が増えるだけで役に立たない. X線用となると, どうしても, 科学研究など用途に限られるので, 日本ではほとんど開発されなかった.

X線カラー画像は, 天文学の分野で広く使われている⁶⁾. 星からのX線スペクトルを測定することは, 星の物理状態を決定する重要な情報だからである. これは, 蛍光X線分析と同じで, 元素の存在量や分布を調べることができる. また, 月表面や固体型惑星の表面の物質分布測定にも応用可能である.

蛍光X線分析は, 室内実験への良い応用とな

ろう. 例えば, 珪素基盤の微量汚染測定には, 半導体検出器による蛍光X線分析が使われている. もちろんX線光学系開発の問題はあるものの, 直接X線撮像型CCDが使えれば, 汚染物質の基盤上での分布を知ることができるので, 汚染源を特定するのに有効と思える.

X線が直接CCDで検出される様子は, 窓ガラスに雨粒の当たるのに似ていることは既に述べた. さらに詳しく見ると, ガラスに当たった雨粒に相当する電子雲の形は, 楕円形で少し歪んでいる. この歪みは, 入射X線の偏光面で決まる. つまり, CCD素子の画素サイズが十分小さくなり, 電子雲の形状を知ることができれば, X線の偏光面が判る⁷⁾ことになる. 画素の十分に小さな直接X線撮像型CCD素子は, X線の入射位置, エネルギー, 時刻, さらには偏光まで測定可能である. 外国では, 比較的画素の大きな素子⁸⁾ばかり開発されているので, 画素の小さなX線検出用CCDの有用性はほとんど知られていない.

以上のような観点から, X線カラー画像, をわよくばX線偏光も測定できるような科学計測用の画素の小さな素子を開発することを目的として研究を進めている. 筆者の長年の夢が, ようやく実現しかけたところである.

参 考 文 献

- 1) 常深, 1993 応用物理 62 718
- 2) H. Tsunemi et al., 1993, Applied Physics, B57 331
- 3) K. Hashimoto et al., 1997, JJAP submitted
- 4) B. E. Burke et al., 1994, IEEE Trans. NS41 375
- 5) D. H. Lumb, 1990, Nucl. Instrum. and Meth. A288 219
- 6) Y. Tanaka et al., 1994, Publ. Astron. Soc. Japan 46 L37
- 7) H. Tsunemi et al., 1992, Nucl. Instrum. and Meth. A321 629
- 8) L. Struder et al., 1989, Nucl. Instrum. and Meth. A288 227