

画素の小さいX線検出用CCDの開発

--サブ μm の位置分解能の新技术--

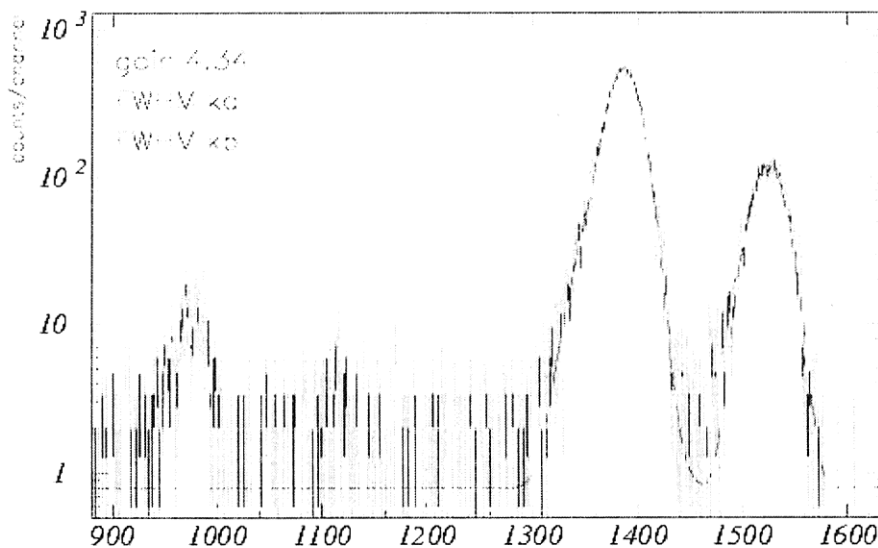
常深 博 大阪大学大学院理学研究科 教授

概要

X線検出用にデザインされたCCDで、小さな画素を持つ素子を達成し、X線偏光検出能力を持った素子を開発研究するため、従来の素子を次第に改良した。素子搭載アンプの低雑音化を計り、冷却と組み合わせ、周辺回路を含めた雑音レベルとして電子個数換算で3~4個を実現した。また、メッシュ実験を考案し、CCD素子内部で、どのような形状の電荷雲が作られているかを実測した。電荷形状を利用した入射位置決定精度を向上する技術を開発し、入射位置精度としてサブ μm を達成できるようになった。次に、高い放射線環境における使用を念頭において、放射線損傷を受けたCCDの性質を調べ、その性能回復方法を開発した。

低雑音読み出し回路とエネルギー分解能

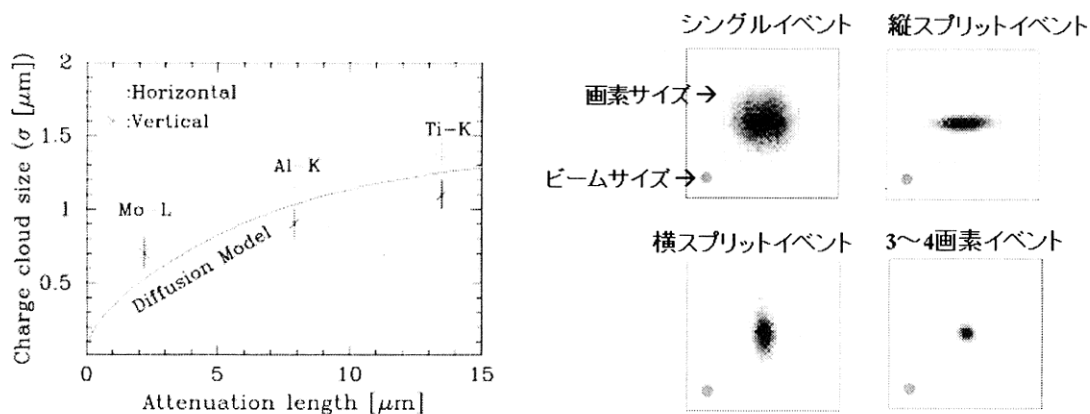
X線のエネルギーを精度良く決定するには、CCDのドライブ回路や読み出し回路などを特別低雑音に設計する必要がある。一方、CCDのドライブ回路に付いては、極めて柔軟であることも要求される。我々は、これら全ての要請に対応できる柔軟なドライブ回路、ならびにそれに対応する読み出し回路ではFPGAを使用するなどして開発した。こうして得たX線のエネルギー分解能は6keVにおいて半値幅で135eV程度になった。次図には、X線検出器で良く使われる、 ^{55}Fe からのX線にたいする波高分布を示す。横軸は信号波高に縦軸はその信号波高を持った信号数に対応する。



メッシュ実験によるCCD素子内部の詳細測定と位置分解能改善

CCD画素の大きさは $10\mu\text{m}$ 程度の大きさであるが、その中には、いくつかのゲートが重なっており、かつ印加電圧が異なるので、検出効率なども異なるが、その詳細な測定は困難であった。これを解決すべくメッシュを使う実験を考案した。この手法は、アメリカやヨーロッパの衛星搭載のCCD素子の測定にも使われた。

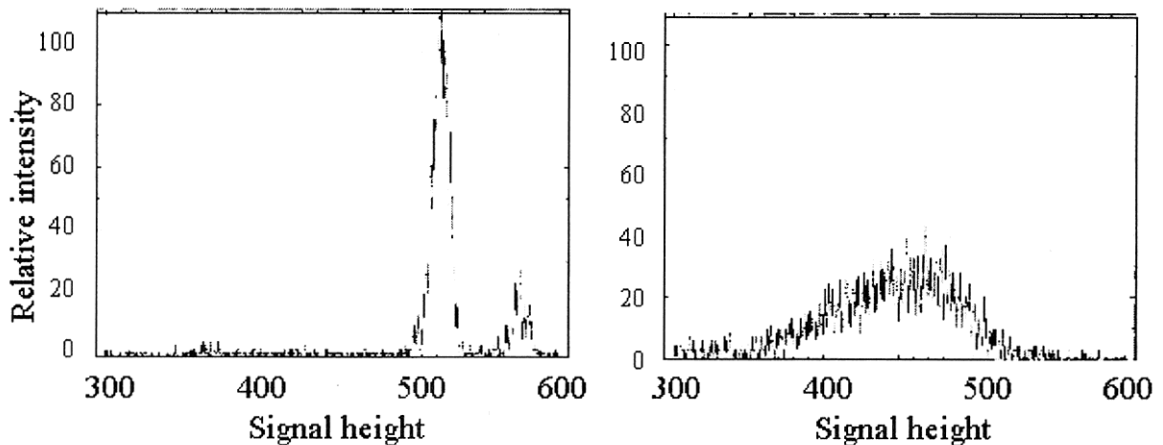
メッシュ実験の応用として、画素のどの部分に入ると、電荷がどのように周辺画素に広がるかを測定できるようになった。また、画素のどの部分に入ると、どのように周辺に広がるかが判れば、そのデータから電荷雲の大きさそのものを測定できる。電荷雲の大きさは、一次電荷雲の空乏層内部での拡散で決まる。入射したX線がどのくらいの深さで吸収されているかは、そのエネルギーに依存する。下の左図は、電荷雲の大きさを珪素中でのX線光子の平均吸収距離に対する関数として表したものである。空乏層中で、一方向の電場が掛かっていると見なしたときの単純な拡散モデル（実線）で良く表されることがわかる。



X線光子が作る電荷雲の大きさは、大体二次元ガウス関数で表されることが実験的に判った。入射位置は、電荷雲の中心であるので、電荷雲を詳細に調べると、入射位置を精度良く決定できることになる。電荷雲がある大きさを持っていると、信号はいくつかの画素に広がるので、この広がり方から入射位置精度を向上させることが可能になる。上の右図はこのような状況を示した実験データを基にした推定精度を表している。つまり、シングルイベントの場合の推定位置精度は、CCDの画素の大きさになってしまう。一方、二画素にスプリットした場合には、スプリットした方向の位置推定精度は高いものの、そうでない方向の精度は画素の大きさになってしまう。三または四画素の場合には、縦横方向にスプリットするので、位置推定精度は高くなる。こうして、我々の手法の最終的な位置推定精度の誤差(標準偏差)は $0.6\sim 0.7\mu\text{m}$ であることが判った。

放射線損傷によるCCD性能の劣化とその回復策

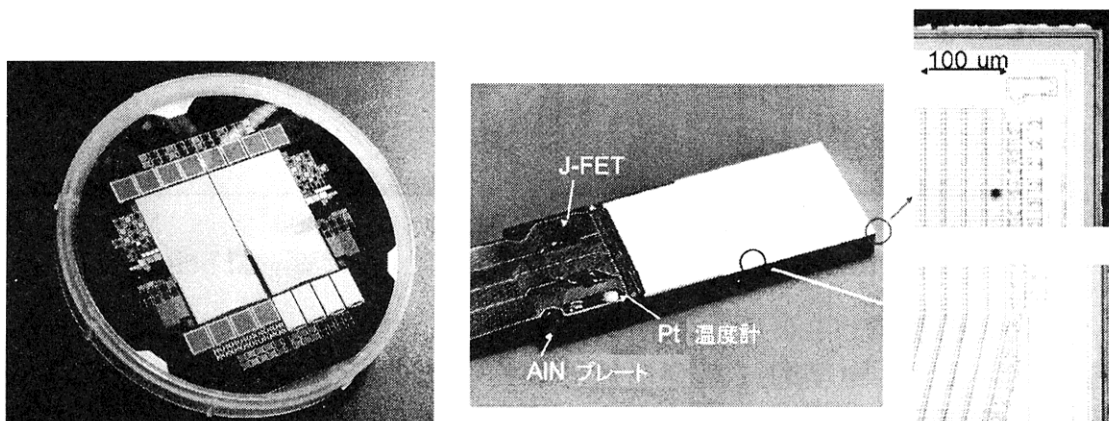
宇宙空間における環境での装置の放射線損傷は、各種の電子部品の放射線耐性に依存するので、これまでいろいろな試験方法や、耐性を上げる工夫がなされてきた。一般に、放射線耐性の低い電子部品は、周辺にシールドを設け、またエラー検出回路を付加するなどの方法が取られている。CPUや集積度の高いメモリーなどがこれに相当する。このような環境を想定して、各種の放射線耐性の試験方法が確立して来たと言える。ところが、X線を直接検出するCCDの場合には、望遠鏡で集光したX線を検出するために、視野の方向に関しては、宇宙空間に対して空乏層を保護する物質はほとんどない。従って、一般の電子部品に対する耐性を評価する方法は必ずしも役に立つわけではない。そこでこの状況を模擬する実験とそれに対する対策を講じた。衛星環境下での約10年分にあたる陽子線照射によりエネルギー分解能が140eVから1000eV(FWHM)まで劣化し、照射前は分離できていたMn-K α とK β が分離できなくなった。この様子を下図に示す。



チャンドラ衛星のCCDが放射線で直ぐに劣化してしまったことなどから、衛星軌道上では、物理的に完全に放射線を防護するのは難しい。そこで、その影響を最小限に抑え、また劣化した性能を回復する方法を開発研究した。回復方法としては、アニールや紫外線照射などがあるが、衛星上で使用するには種々問題がある。宇宙環境下にある荷電粒子は素子内部に電子トラップを作る。転送中に電荷が失われるのは、転送路中に存在するトラップに電子が捕まるからである。これを回避するには、電子が通過する前にそのトラップを別の電荷で埋めてしまえば良い。この考えからCCDに電荷注入ゲートを設け、そこから電荷を注入し、縦方向に転送させることで予めトラップを埋めてしまう方法を実行した。10年分の劣化を与えた後で、この方法による性能回復を試みた結果、エネルギー分解能が改善され、最終的に330eV程度まで回復が可能であることを実証した。

開発した素子の一例

この研究で開発した素子は多種類に上る。ウェハーを多種類用意し、読み出しアンプ部分を改良し、いろいろな大きさの画素を持つ素子を製作した。また、微少画素を製作するために、ステッパーマスクアライナーを導入し、 $1\mu\text{m}$ 以下の加工精度が可能になっている。目標の一つはフレーム転送方式で、受光部が $25\times 25\text{mm}^2$ 以上のCCD素子で、4個以上ほぼ稠密に並べられるように、3辺がバタブルな素子を開発することであった。CCD-CRESTと呼ぶ素子の例を下図に示す。これは、大面積を狙ったもので、フレーム転送方式(FT)でイメージ領域として画素サイズ $24\mu\text{m}$ 、画素数 1024×1024 を持ち、これと同じ画素数のストレージ領域が設けてある。さらにストレージ領域(下図では右)の画素サイズはイメージ領域(下図では左)より小さく設計され、CCD4つを近接して配置させることができるようにバタブル構造の設計になっている。チップ単体のデッドスペースはおおよそ3辺(図では上下と右)で $150\mu\text{m}$ であり、バタブルで並べるにも実用的には十分小さいデッドスペースに設計されている。CCDは縦半分ずつで読み出すことができるようにアンプを左右に配置しており、これにより読み出し時間も単一アンプの半分にすることもできる。X線CCDとしてエネルギー分解能 140eV 以下(^{55}Fe)で、読み出し雑音は電子換算で3~5個の高い性能が実現できた。



X線をCCDで直接検出する手法の利点は、個々の入射X線光子のエネルギーを測定できる点にある。我々は読み出し雑音レベルが電子換算で3~4個を実現し、十分なエネルギー分解を実現した。また、画素の小さい素子($8\sim 12\mu\text{m}$)で厚い空乏層($50\mu\text{m}$)を達成した。

X線が作る電荷雲形状を詳細に調べることにより、X線の入射位置精度を向上できたし、ある程度の高エネルギーX線に対してその偏光方向も測定できる。つまり、高いX線検出効率、高い入射位置精度、高いエネルギー分解能を達成し、さらに偏光測定も可能、有効面積も大きな素子を実現することが出来ている。