

4P105 次世代軟 X 線発光分光器の高度化:サブピクセル CCD 検出器の開発

(分子研^A・総研大^B・Brunel 大^C・XCam Ltd.^D)

○初井宇記^{AB}、A. Holland^C、R. Ingle^C、K. Holland^D、小杉信博^{AB}

【序】液体などの通常の光電子分光では電子構造に迫ることが困難な系について、近年軟 X 線発光分光による局所電子状態研究が報告され、改めて軟 X 線発光分光が注目されている。しかし軟 X 線領域では軟 X 線発光確率は 0.1 %程度と小さく、実験は容易でない。我々は、高エネルギー分解能でかつ明るい分光器を目指し、新しい設計思想に基づいた次世代軟 X 線発光分光器を開発した。現在、この分光器のエネルギー分解能を制限している因子に、検出器の空間分解能がある。本発表では、この次世代軟 X 線発光分光器を更に高度化させるために開発した、サブピクセル空間分解能を持つ軟 X 線用電荷増倍型 CCD(Charge-coupled device)検出器の性能評価結果について報告する。

【原理】軟 X 線を検出するためには、電極構造の反対側から光を入射する裏面照射型の CCD 素子が一般に用いられる。光子が光電効果によって吸収されると多数の電子を放出する。放出された電子はシリコン内部の電場勾配の小さい field free 領域、電場勾配の大きな空乏層(depletion region)を経て、電極近傍の埋め込みチャンネル(buried channel)に集められる。軟 X 線領域は吸収係数が大きいので、照射面近傍(深さ 1 μm 程度)で吸収される。このため放出された電子は、field free 領域で大きく拡散したのち、空乏層でやや拡散ながら埋め込みチャンネルに近づく。拡散によって電荷雲の大きさはピクセルサイズ程度となるため、最終的に複数のピクセルにまたがった信号を与える。通常の使用方法では、この複数ピクセルにまたがった信号によって検出器の空間分解能が悪くなる。一方十分早く読み出すことによって、光子それぞれが生成する電荷雲の形状を計測し、形状から逆算して光子が吸収された位置を推定することができれば、サブピクセル空間分解能が実現できると期待される。実際、このようなイベント解析をおこなうことにより、サブピクセル分解能が実現できることは、硬 X 線領域(4.5 keV)で報告されていた[1]。硬 X 線領域では、一光子が生じる電子ホール対(ω)が 1000 以上であるので、読出ノイズを 10 electron rms/pixel 以下に押さえることができれば、隣接画素の電荷を定量的に評価できるためである。しかし本研究で利用する軟 X 線領域では $\omega=100$ 程度と小さいため、電荷雲の測定精度を飛躍的に上げなければならない。最近、実効的に読出ノイズを 1 electron rms/pixel 以下にすることができるアバランシュ効果を利用した電荷増倍 CCD 素子が実用化されている。そこで、本研究では電荷増倍型 CCD を用いることにより、読出ノイズを飛躍的に低減することで、サブピクセル空間分解能を持つ軟 X 線 CCD 検出システムの構築を目指した。

【実験】画素サイズ 16 μm の CCD 素子 97-00

(e2v)に、14 bit CCD 読出回路、増幅レジスター用高電圧クロック回路を取り付け、検出システムを構築した。軟 X 線を用いた空間分解能の評価実験を分子科学研究所 UVSOR アンジュレータービームライン BL3U にて行った。CCD 素子の 1.6 mm 上に、スリットを取り付けた。スリットは、SiN(厚さ 70 nm)と金(厚み 300 nm)からなるメンブレンのうち金層にスリット構造を設けたものを利用し、スリットが CCD の平行転送(縦)方向と平行になるように取り付けた。幅 0.71 μm と 10 μm のスリットを SEM で測長するとメンブレン側の幅が真空側に比

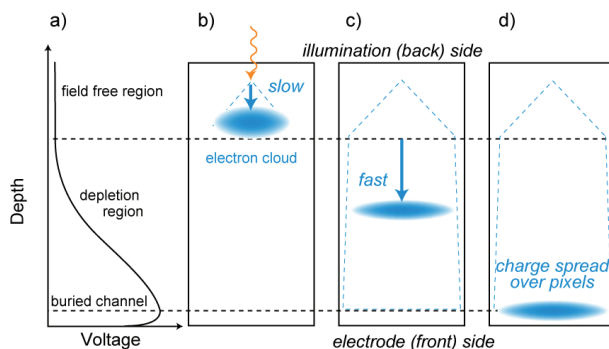


Fig. 1 Schematic absorption process in typical back-illuminated CCDs.

べ $0.55 \mu\text{m}$ 狭くなっていた。このスリットを透過する軟 X 線を計測し、空間分解能を評価した。読み出し速度 400 kHz/pixel 、電荷増倍率約 100 倍とした。発光分光器では 1 方向のみの空間分解能が要求されるため、 4×1 binning モードでデータを取得し、シリアル(横)方向の空間分解能を評価した。CCD 素子は約 -70°C に冷却した。

【結果】 380 eV の軟 X 線を照射したときのイベント解析前の画像を Fig.2 に示す。水平方向の幅 $0.71 \mu\text{m}$ 、 $10 \mu\text{m}$ いずれのスリットでも、シリアル方向に複数ピクセルにまたがった信号となっていて、幅の違いを検出できない。次に、イベント解析を行った。しきい値を読み出しノイズの標準偏差の 5 倍に設定した。しきい値を超えた信号がシリアル方向に 1 ピクセルにのみ広がっているイベントは、信号強度から暗電流に由来する信号であると判断できた。そこで、2-4 ピクセル広がっているものを軟 X 線によるイベントと判断し、これらについて重心位置を求めた。得られた画像のシリアル方向のプロファイルを図 3 に示す。幅 $0.71 \mu\text{m}$ のスリットを透過すると回折によってビームプロファイルが広がる。得られた結果はこのプロファイルを反映していると考えられる。そこで、スリット形状、スリット検出期間の距離、スリットと CCD の平行度を考慮してビームプロファイルを Fresnel 回折近似によって求めた。次に、検出器の Point spread function (PSF) が Gaussian 関数で記述できると仮定し、実験結果を再現する検出器の PSF を算出した。その結果、PSF の FWHM は $0.24 \pm 0.07 \text{ pixel}$ ($3.8 \pm 1.1 \mu\text{m}$) と評価できた(Fig. 3)。

【考察】 電荷増倍型 CCD 検出システムを構築し、サブピクセル空間分解能($3.8 \pm 1.1 \mu\text{m}$)を実現することに成功した。我々が開発した次世代軟 X 線発光分光器の検出器上の PSF の FWHM は、 $5\text{--}8 \mu\text{m}$ と見積もられている。今回の検出器の PSF はこれよりも小さいため、エネルギー分解能が検出器の空間分解能に制限されないシステムへ高度化できると期待している。また、他の光学デザインを採用した軟 X 線発光分光器においても、近年の放射光技術の進歩により微小ビームが利用可能となり、検出器の空間分解能が装置の性能を制限する場合が増えてきている。本研究で得られた技術は、これらの分光器にも直ちに適用可能である。また、これまで他の解析手法によりサブピクセル空間分解能を軟 X 線領域で実現した結果が最近報告されているが[2]、実効的な量子効率が損なわれる弱点があった。本方法は CCD 検出器本来の高い量子効率をそのまま利用できるため、微弱軟 X 線検出で特に有利であると期待される。

【謝辞】 スリットを製作いただいた浜村寛氏(Nikon 株)、AR コートを除去した CCD 素子を供給いただいた Peter Pool 氏および e2v 社に感謝します。本研究は、科学技術振興調整費・若手任期付研究員支援、科学研究費補助金、分子科学研究所国際共同研究の支援を受けました。

Ref [1] J. Hiraga, et. al., Jpn. J. Appl. Phys. **40** (2001) 1493. [2] T. Tokushima et. al., Rev. Sci. Instr., **77** (2006) 063107.

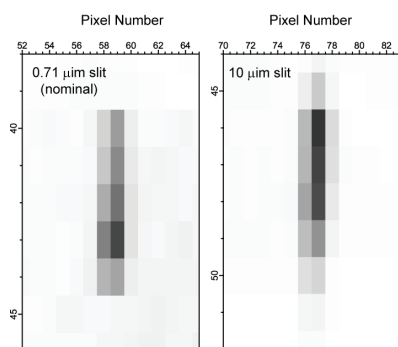


Fig. 2 Raw image data obtained at 380 eV for slit with horizontal width of nominal $0.71 \mu\text{m}$ (left) and $10 \mu\text{m}$ (right).

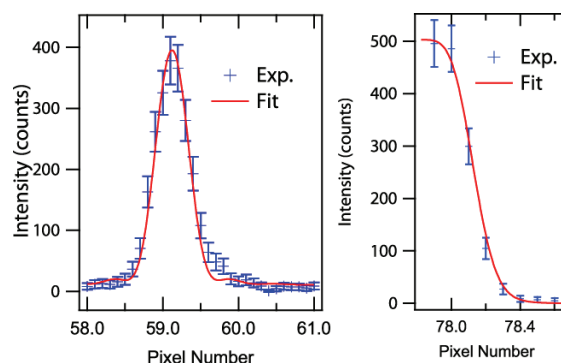


Fig. 3 Analyzed line profiles (+) along the serial transfer direction for slit with horizontal width of nominal $0.71 \mu\text{m}$ (left) and $10 \mu\text{m}$ (right). Best fit results are also shown (-).