



軟 X 線イメージング測定に向けた 高速読み出しフォトンカウンティング 2D 検出器の基礎評価

井上 朋直, 柳原 邦俊, 久慈 惇史, 作村 拓人, 三楠 聡
株式会社リガク

キーワード : 2次元検出器, フォトンカウンティング, 軟 X 線イメージング

1. 測定実施日

2023 年 8 月 8 日 BL7U (2 シフト)
2023 年 10 月 17 日 BL7U (2 シフト)
2023 年 10 月 18 日 BL7U (2 シフト)

2. 概要

試作したフォトンカウンティング型 2次元検出器を用いて 1 keV 以下の軟 X 線領域の実用性を評価した。このエネルギー帯において軟 X 線を計数することができ、入射エネルギーとピーク位置も線形であった。低エネルギー帯では、やや信号と雑音の分離に課題はあるものの、500-600eV 近傍まで検出可能である事を示した。

3. 背景と研究目的

エネルギーが 250 eV~2 keV の軟 X 線は、スピン・電荷および軌道の自由度に対してより敏感なプローブであり[1]、新規材料研究のための重要なツールとして着目されている。加えてこの領域の研究は自由電子レーザー施設(FEL)やシンクロトロンでも高い需要があるため、近年では軟 X 線をもちいたイメージング等、軟 X 線領域における研究分野の関心が急速に高まっている。世界各国で軟 X 線領域のビームラインも増加傾向であり、日本でも軟 X 線領域に特化した次世代放射光施設ナノテラスが本格運用開始となる。このような光源の高輝度化や新たな解析手法の発見によって、X 線検出器にもこれまで以上に高いスペックが要求されるようになってきた。しかしながら、軟 X 線は硬 X 線と比べて物質に入射したときに生成する電荷が少ないため、雑音に埋もれやすいなどの課題も存在する。

現在、軟 X 線を検出できる 2次元検出器のほとんどは CCD または CMOS モノリシックセンサー型の積分検出器[2]であるが、ダイナミックレンジが狭い、読み出し速度が比較的遅い、放射線耐性が弱いなどのほかに“雑音と微弱信号の分離性が悪い”という大きな欠点を有しており、まだまだ最適化すべき課題が多いのが実情である。一方で、微分型(フォトンカウンティング型)検出器は積分型検出器の持つ

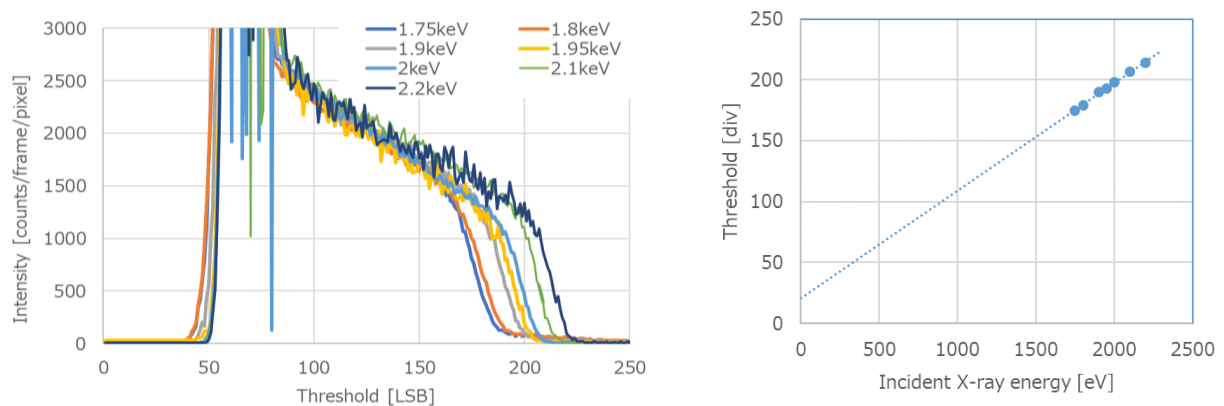


Fig. 1 テンダー X 線 Threshold scan(左)及び peak position の linearity plot(右)

欠点を補完できるうえ、パルス波高値の違いから雑音と信号をほぼ完全に分離することができるために、微弱な信号でも雑音に埋もれることなく真の電荷量(光子)を検出することが出来るという魅力的な特性を有している。こういった背景から次世代放射光の研究分野では軟 X 線計数に順応した微分型検出器の早期実現が強く望まれている。

現在我々は軟 X 線領域で使用可能なフォトンカウンティング型 2 次元検出器の開発を進めており、昨年の実験でテnder領域(1.7~2.2 keV@BL6N1)において X 線計数が可能である事を示した(Fig.1)。本実験では BL7U の軟 X 線分光ビームラインを使用して更なる低エネルギー軟 X 線が検出可能であるか検証をおこなった。

4. 実験内容

検証には 1 keV 以下の単色化した軟 X 線が必要なため、BL7U 真空紫外・軟 X 線分光のビームラインを使用した。今回試作した検出器ユニットとビームライン側のチャンバーでは到達圧力に大きな隔りがあるため、Fig. 2 に示すような差動排気システムを構築し接続した。

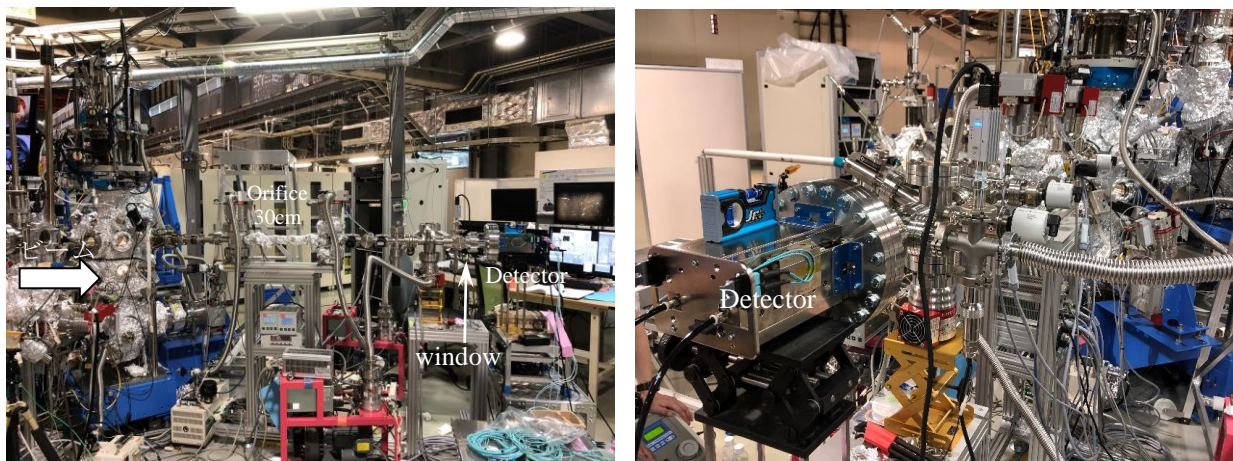
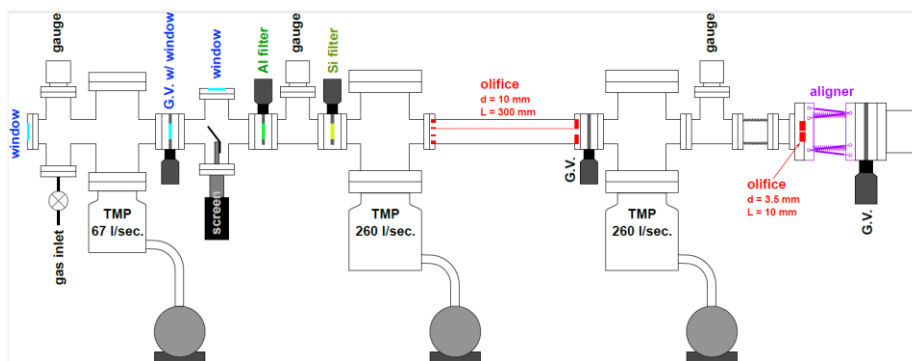


Fig. 2 BL7U 差動排気システムと検出器接続

軟 X 線を吸収させないようにビームラインから検出面までをすべて真空にし、放射光からのダイレクトビームを検出面に対して 90°の角度で入射させた。X 線強度が高すぎる場合、検出器内部のカウンターが飽和してしまい、ゲインが著しく落ちる等の問題が生じて検出器の特性を十分に評価することができない。その為、必要に応じて検出面~入射源間にアッテネータとして高分子フィルム(Kapton)や Be 箔などを挿入することで入射強度を調節して評価を行った。また、入射光のエネルギーを変化させるとアッテネータの透過率も変わるため、複数のアッテネータを用意し、実験を行った。検出器のエネルギー閾値を可変させながら 2 次元画像を取得し、得られたスペクトル形状から、雑音と信号の分離性を評価した。

5. 結果および考察

Fig. 3 に各エネルギーの入射光を照射した際の積分プロファイルを示す。横軸は計数するパルスの波高閾値(エネルギー閾値と等価)をデジタル変換した値、縦軸は 1 ピクセルで計数したフォトン数を表している。エネルギーによりビーム強度やアッテネータなどが変わるため、実際に得られた強度はそれぞれ異なることから、強度を規格化しプロファイル形状を比較した。横軸 25~100 div.の領域は検出器の読み取り回路に起因する雑音である。これより右に出現した信号が X 線信号の領域である。この積分プロファイルを微分することでパルス波高値(≒エネルギー)ごとの強度、すなわちエネルギースペクトルを得ることができる。アッテネータによる減衰率との兼ね合いから一部計数強度が低く、微分プロファイルを推定するのが困難であったため、スムージング処理(Savitzky-Golay 法)を施した(Fig. 4)。ピーク形状はやや崩れているものの 600~1000 eV では雑音と X 線ピークが明瞭に分離できている。加えて 500 eV のときは X 線ピークと雑音の境界があいまいではあるものの、雑音の形状を推定し減算することができれば、信号のみを抽出することは可能であると考えられる。

Fig.5 に入射エネルギーとそれに対するピーク位置をプロットした。本実験では各エネルギー X 線入射時に常に検出面の同じ位置(ピクセル)に光を当てることが困難であったため、それぞれのエネルギーにおいて X 線入射部分 60 ピクセルを抽出し平均したものをピーク位置と定義した。図からも明らかなように 500~1000 eV の領域において良い線形性を示す事が分かる。また半値幅および Fig.5 の傾きからエネルギー分解能を試算する(~8.5eV/div)と凡そ 340 eV となり、極めて高いエネルギー分解能を保持していることがわかった。

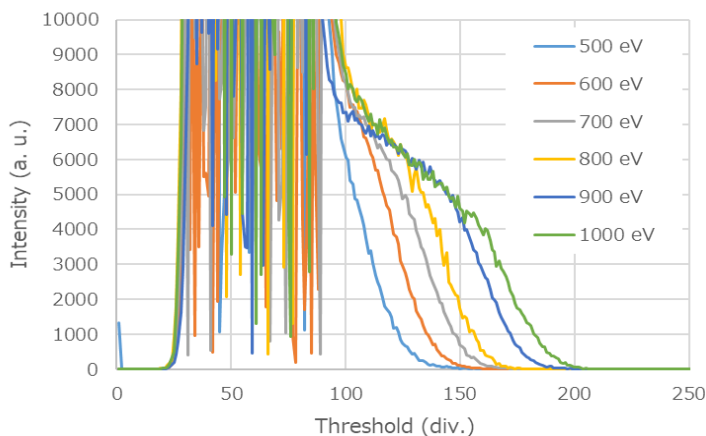


Fig. 3 積分プロファイル

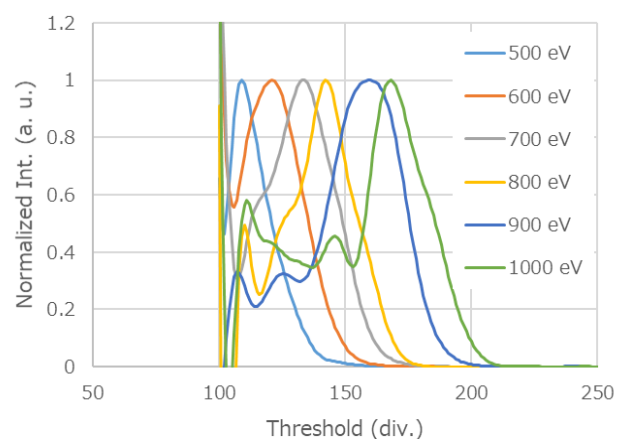


Fig. 4 微分プロファイル

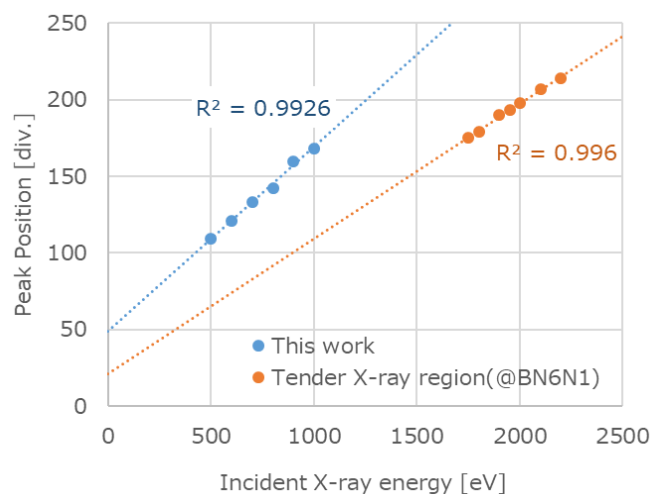


Fig. 5 入射エネルギーに対する X 線ピーク位置

6. 今後の課題

Fig.5に示すようにBN6N1にて得られた実験結果と比較するとやや傾きが異なる事が見て取れる。これはX線が入射している(=ピーク位置を推定した)ピクセルの位置が異なる事に因るものが大きい。今後この“各ピクセルの性能差”に由来するバラツキをどのように合わせこんでいけるかが軟X線領域イメージング適用における一つの課題となろう。また従来の受光素子(Si)は受光面側にAl等の金属層が薄く配置されるほか不感層を有する為、低エネルギー領域では光子が減衰し、検出効率が制限されるという課題がある(検出効率は凡そ50% @ 1000eV, 4% @ 600eV)。この課題については受光側のn++電極の直下に高濃度のp+層を形成したLGAD (low-gain avalanche diode)素子を用いる事が解決策として有望で、信号量が増えることに加えSN比が向上するメリットも有する。更に信号形成が薄いp-n接合部で局所的に増幅が起きるため時間分解能も飛躍的に向上する事が期待されるなどLGADを採用する事による付帯効果は大きい。今後、LGAD採用を模索すると共に従来素子の不感層膜を低減させるなど検出素子構造の最適化を進めて行く予定である。

7. 参考文献

- [1] J. Fink et al., Resonant elastic soft X-ray scattering, Rep. Prog. Phys. 76, 056502 (2013)
- [2] V. Hinger et al., JINST 17, C09027 (2022)