

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23561001

研究課題名(和文) プラズマ計測のためのX線検出器の高計数率化とノイズ耐性強化の研究

研究課題名(英文) Research of improvement on counting rate and noise resistance of x-ray detector for plasma diagnostics

研究代表者

武藤 貞嗣 (MUTO, Sadatsugu)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：40260054

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円、(間接経費) 1,110,000円

研究成果の概要(和文)：X線スペクトルイメージ測定用試作器を製作して較正実験を行なった。本測定法は、光源の輝度が大きいほどエネルギー分解能と時間分解能が両立して向上する。よって、高エネルギー加速器研究機構・放射光科学研究施設・ビームライン14Cに於いて放射光を用いた実験を行なった。二結晶分光器から射出される幅0.3 mmの二次光を単色光として直径1 mmのタングステンピンホールに通し、ダイナミックレンジが16 bitのX線CCDカメラを用いて画像測定を行なった。その結果、試作器の動作が設計通りであることを確認できた。また、スペクトルを求めるために必要な数値を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：In the present research a test stand for x-ray spectrum imaging has been constructed. A test performance has been carried out by using synchrotron radiation at BL-14C in KEK PF, since more intense x-ray gives rise to better energy and time resolution by means of the methods on the x-ray spectrum imaging. The secondary refracted 0.3-mm-width-x-ray beam from the tandem crystal monochromator is detected through 1-mm-diameter-tungsten pinhole with 16-bit-dynamic-range-CCD camera. The experimental result is consistent with the theoretical prediction from the geometrical configuration of the test stand. The parameters necessary for the spectrum analysis have been also obtained.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学(核融合学)

キーワード：プラズマ計測

1. 研究開始当初の背景

高温プラズマに於ける不純物の輸送がプラズマの密度に依存して変化することが半導体X線検出器による測定によって示唆された。その定量化を行なうには不純物から放射される特性X線の空間分布の時間変化を効率よく測定する必要がある。プラズマが放射するX線はもともと輝度が高い。そのX線を減光することなく鮮明な画像として測定し、同時にスペクトルもわかる原理を発見して技術化する必要がある。

2. 研究の目的

輝度の高いX線スペクトルの画像を測定する原理の検証と測定方法の確立を行なう。また、常温で長時間安定して動作することも確認する。

3. 研究の方法

物質の光吸収効果を利用した高輝度X線スペクトルの画像測定を試みる。先ず、試作器を開発する。試作器は、図.1の通りアルミニウム製のスペクトル測定用光学素子を追加したピンホールカメラである。その光学素子を回転させるとX線のエネルギーに依存した画像を求めることができる。

高輝度X線光源である放射光を用いて製作した光学素子のエネルギー較正実験を行なう。具体的には、スペクトルを得るために必要な固有の数値を実測する。

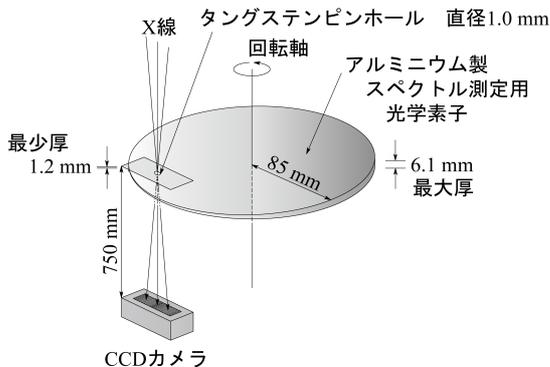


図.1 本研究の試作器の概略図。スペクトル測定用光学素子は、表面を斜めに切削したアルミニウム板である。最も厚い部分と薄い部分とでは角度が 180°ずれている。CCD カメラはピンホールと光学素子を透過したX線の像を測定する。CCD カメラのダイナミックレンジは、16 bit である。ピクセル数は、512×512 個ある。撮影する画像は、ダイナミックレンジを越えない範囲のモノクロ画像である。本試作器は、入射するX線のスペクトルと強度が一定或いはスペクトルが一定で強度が一定の割合で変化する間に光学素子を1回転させる。その1回転の間にX線画像を連写するとフィルターの厚さに依存したモノクロ画像を取得できる。尚、回転は、モーターにより行なう。回転数は1 rpmから最大10,000 rpmである。よって、最高時間分解能は6 msである。

4. 研究成果

本研究では、アルミニウム製の光学素子を製作した。(図.2) スペクトル測定に於ける光学素子のエネルギー分解能は、物質の吸収スペクトルの勾配と検出器のダイナミックレンジに依存する。図.3はアルミニウムを材料とした場合の理論計算である。ダイナミックレンジが 24 bit 以上の明るい画像検出器であれば高計数型の半導体パルス波高分析器のエネルギー分解能に近づく。図.2の通り、アルミニウムは、2 keV 以上のX線スペクトルを測定することができる。10 keV 以上の領域でエネルギー分解能が低下するのは吸収係数に於けるコンプトン散乱の寄与が大きくなるからである。

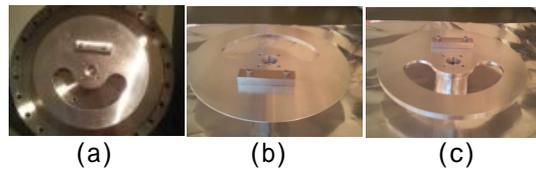


図.2 本研究で製作したアルミニウム製光学素子。(a)は、正面の写真、(b)は横方向から撮影した最も薄い部分、(c)は横方向から撮影した最も厚い部分である。回転数が大きい実験の際は真空チェンバーに封入している。(a)の通り、光学素子は真空フランジ(ICF253)に取り付けられている。

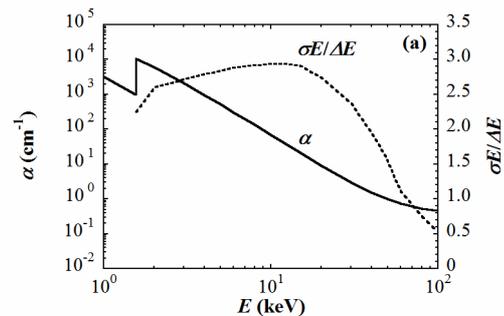


図.3 アルミニウム製光学素子のエネルギー分解能。横軸、はX線のエネルギー、縦軸(左)は、吸収係数、縦軸(右)は、エネルギー分解能である。尚、パラメーター「シグマ」は、エネルギー分解能がX線の強度に依存することを意味し、近似的にその逆数は、画像検出器のダイナミックレンジのビット数を8で割った値である。

実験は、高エネルギー加速器研究機構・放射光科学研究施設・ビームライン BL-14C に於いて行なった。試作器のX線を受光するまでの各要素は、図.4の通りハッチ内部に収容されている。

エネルギー較正の場合、X線は単色である必要があり、特に本実験ではその単色X線のエネルギーを変更する必要がある。ビームライン BL-14C では、二結晶分光器によって放

射光を分光して目的のエネルギーを持つ単色 X 線を得ることができる。放射光は、実際には、一次光と一次光の 2 倍のエネルギーを持つ二次光に分光される。本実験ではアルミニウム板によって一次光を遮断して二次光を単色 X 線とした。

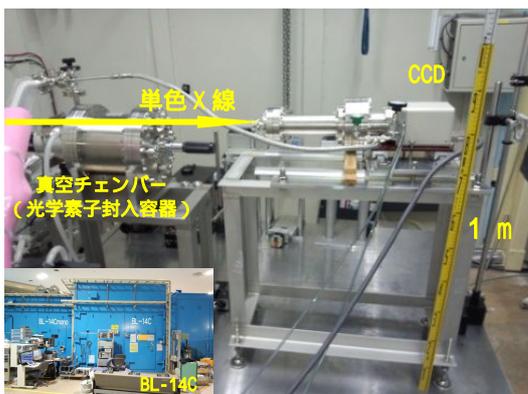


図.4 高エネルギー加速器研究機構・放射光科学研究施設・ビームライン BL-14C のハッチ内部に設置された試作器。真空チェンバーには図.2 にある光学素子とピンホールが収容されている。左下の小さな写真は、ハッチの外観である。

図.5 は、CCD によって撮影した単色 X 線である二次光の像である。BL-14C では放射光は垂直方向には長い、水平方向には、直径 1 mm のピンホールを通るほど細い。本実験では、CCD によってその二次光の像を捕らえることで光軸にずれが発生しないことを確認した。

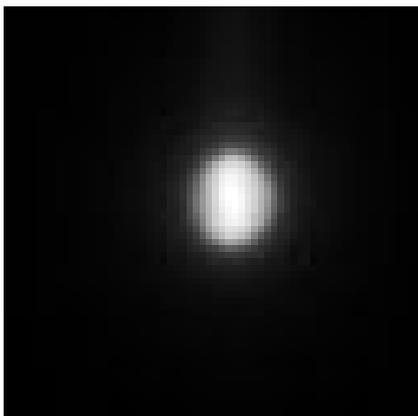


図.5 CCD によって撮影した放射光(二次光)の像。明るい部分が直径 1 mm のピンホールを抜けてきた二次光である。BL-14C では直径 1 mm のピンホールを通して見ると二次光は垂直方向には広がっており、水平方向ではピンホールの径の 1/3 程度の範囲に明るさが集中する。その二次光の最も明るいピークをピンホールの中心に合せて実験を行なった。

図.6 は、光学素子を一定の角速度で回転させて撮影した像の全体の明るさの変化である。BL-14C に於ける単色 X 線(二次光)が、

光軸、エネルギー、及び強度について長時間安定していることが図中のフィッティングからわかる。フィッティングは、単色 X 線に対してのみ可能である。従って、光学素子に固有なスペクトルを求めるための数値を実際に得ることができた。図.6 は、単色 X 線(二次光)のエネルギーが 30 keV の場合である。光学素子の製作に用いたアルミニウムの純度についても確認を行なうため実際には、20 keV から 40 keV まで較正実験を行なった。

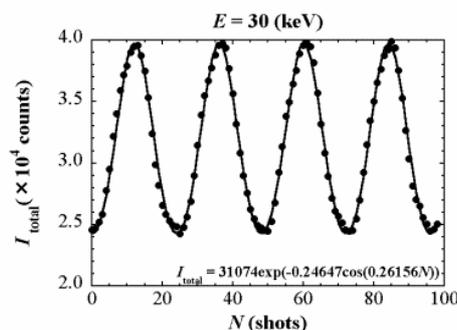


図.6 CCD の像全体の明るさの変化。山の形が 4 つ連なっているのは光学素子が 4 回転していることを示す。縦軸はその全体の明るさ、横軸は、像の番号である。点は、実測値、線は、点の並びを図中に示した周期関数でフィッティングした結果である。その周期関数は、光学素子の構造と回転周期及び単色 X 線のエネルギーから一意的に定まる。尚、CCD のダイナミックレンジは、16 bit であるため 2 の 16 乗 (65,536) カウント以下で実験を行なった。露光時間の設定は 1 s、光学素子の回転速度は、1 rpm である。

本研究によって物質の光吸収効果を利用した X 線スペクトル測定法の検証を行なうことができた。本方法により画像検出器のダイナミックレンジを最大限に活用して明るく鮮明な画像とスペクトルを求めることができる。具体的には本方法の場合、画像検出器のダイナミックレンジが 24 bit であれば 1 回の読み出しで各画素毎に 1 つの光子のエネルギーを測定する既存の方法と比べて 7 桁以上明るい画像を得ることができる。また、エネルギー分解能は半導体検出器に近い。

今後は、基礎実験のみならず単色 X 線ではない高輝度光を対象に応用実験を行い、実績を積み上げると共にシステムとしての完成度を高めたい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

S.Muto and LHD Experimental Groups, **Design for X-Ray Imaging Spectroscopy in Large Helical Device**, Plasma and Fusion Research (2013), 8, pp.2402140-1-4,

(査読有) , 10.1585/pfr.8.2402140.

[学会発表] (計 3 件)

1. 物質構造科学研究所サイエンスフェスタ
2014,

3/18,19, 茨城県つくば市

武藤貞嗣、兵藤一行、森浩一

X線スペクトルイメージングシステムの開発

2. 2013 Nuclear Science Symposium &
Medical Imaging Conference & Workshop on
Room-temperature Semiconductor X-ray and
Gamma-Ray Detectors,

Oct.27th - Nov.2nd, Coex, Seoul, Korea,

S. Muto, T. Miyoshi, N. Tamura, H.
Nakanishi, Y. Itoh, K. Tsukada, T. Tsuru,
Y. Ono, S. Sudo, Y. Arai, and LHD
Experimental Groups,

**Development of Assembly of SOI Detector
for Impurity Transport Study in LHD,**

'NSS Poster I' NP01-88.

3. International Toki Conference 2012,
22nd Nov., Toki, Japan

S. MUTO and LHD Experimental Groups,

**Application of photo-absorption for x-ray
spectroscopy in LHD,**

P4-49.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究代表者

武藤貞嗣 (MUTO Sadatsugu)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号 : 40260054

(2)研究分担者

なし。

(3)連携研究者

森田繁 (MORITA Shigeru)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号 : 80174423

舟場久芳 (HUNABA Hisamichi)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号 : 40300727