

Effective beam size at the internal target of the electron ring REFER

I. Endo^{A)}, A.V. Shchagin^{*B)}, Y. Takabayashi^{†B)}, K. Ueda^{A)},

^{A)}Graduate School of Advanced Sciences of Matter, Hiroshima University
1-3-1, Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, 739-8530

^{B)}Venture Business Laboratory, Hiroshima University
2-313, Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, 739-8527

Abstract

Vertical and horizontal sizes of the beam hitting an internal solid target were investigated at the 150 MeV electron ring REFER, Hiroshima University. The vertical size was measured by observing images on a fluorescent screen installed as an internal target. A new method for measurement of the horizontal size is proposed and its capabilities are demonstrated experimentally. For this, a set of two foils of different materials was installed as an internal target and the characteristic X-rays were measured by a Si(Li) detector as a function of the target-rotation angle. The effective beam size was found to be small enough for development of bright sources for applications and research.

広島大学電子周回装置 (REFER) の内部標的におけるビームサイズ測定

1. はじめに

広島大学ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー (VBL) の超高速電子周回装置 (Relativistic Electron Facility for Education and Research: REFER) では、1997 年の建設以来、パラメトリック X 線 (PXR) の研究が精力的に行われてきた。2001 年、Chouffani らは、Si 単結晶の多層標的に周回電子を入射させ、パラメトリック X 線の測定を行った^[1]。遷移放射の寄与により、多層標的を用いた方が、同じ厚さの単層標的よりも、X 線強度が増加することを観測した。この研究で、Chouffani らは、Si 結晶の下流側に、モリブデン (Mo) 薄膜を設置した。これは、Mo 薄膜からの特性 X 線強度を、標的に入射した電子数のモニターとして使うためである。Chouffani らは、Si の PXR と Mo の特性 X 線以外に、12.5 keV と 25 keV に起源のわからない“ミステリアス・ピーク”を観測した。その後の研究により、当初通常が多結晶とされていた Mo 薄膜は、強く配向した多結晶であることが分かった^[2]。そして、“ミステリアス・ピーク”は、配向した Mo 多結晶からの PXR によることが最近の研究で明らかになった。

PXR などの放射現象の研究では、放射源 (標的) でのビームサイズの大きさを知ることは重要である^[3]。そこで、本研究では、2つの方法を用いて、内部標的でのビームサイズを求めた^[4]。(i) 内部標的を置く位置に蛍光板を設置し、蛍光板からの発光を CCD カメラでとらえ、ビームプロファイルを測定した。(ii) 2枚の薄膜を置き、それらの特性 X 線の強度から、水平方向のビームサイズを求めた。

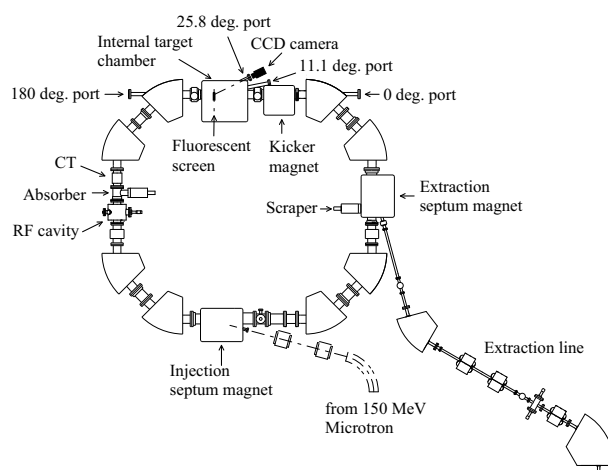


図 1: 超高速電子周回装置 (REFER) の全体図。

2. REFER におけるビームパラメーター

図 1 に、REFER の全体図を示す。周長は 13.7 m で、偏向半径は 0.75 m である。150 MeV 電子ビームは、広島大学放射光科学研究センターのマイクロトロンから 10 Hz で入射されている。入射直後のビーム全体の大きさは、横 ~10 mm、縦 ~1 mm であった。これは、後述する蛍光板を用いた方法で測定した。内部標的を用いる実験では、以下のような方法で、ビーム調整を行った。まず、ビームを中心軌道よりも外側に入射する。内部標的は、中心軌道よりも内側に設置されているので、ビームの大部分は、標的によって遮られることはないが、ビームの一部は標的に衝突し散乱されるため、その後周回し続けることはない。次に、RF の周波数を共振周波数からずらすことにより、RF 空洞に供給されるパワーを減少させる。これにより、放射損失のため電子の平均エネルギーは減

* Present address: Kharkov Institute of Physics and Technology, Kharkov 61108, Ukraine.

† Present address: SAGA Light Source, 8-7 Yayoigaoka, Tosu, Saga, 841-0005, E-mail: takabayashi@saga-ls.jp.

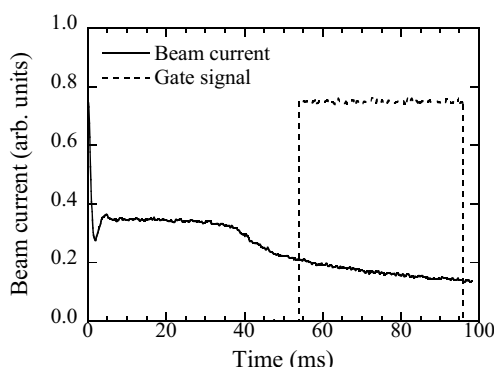


図 2: ビーム電流値の時間変化 (実線). 破線は、X 線測定のために用いられたゲート信号を示す。

少する。そして、螺旋軌道のように、電子の軌道は内部標的にあたるまで徐々に内側に移動する。CTで測定された典型的なビームの電流値を図 2(実線)に示す。0 ms の点でビームが入射されており、周期は 100 ms である。入射時の電氣的ノイズによって、0 ms 付近での電流値はあまり正確な値ではないことに注意しなければならない。図 2 に見られるように、40 ms から 100 ms の間でビームの電流値は徐々に減少している。前述したように、これは、RF パワーの減少に起因する。ビームの一部は、40 ms から 100 ms の間に標的に衝突していると考えられる。

3. 蛍光板によるビームサイズ測定

蛍光板は、内部標的用チェンバーのゴニオメーターに取り付けた (図 1)。蛍光板としてアルミナ (Al_2O_3) 蛍光板を用いた。厚さは $50\ \mu\text{m}$ で、大きさは、 $20 \times 20\ \text{mm}^2$ である。内部標的用チェンバーには、4 つのポート (0° , 11.1° , 25.8° , 180°) がある。CCD カメラは、 25.8° 方向に設置した。蛍光板からの距離は、約 70 cm である。CCD カメラで得られた画像はフレームグラバードを経由してパソコンで取得し、 640×512 ピクセルのビットマップファイルとして保存した。観測されたビームプロファイルを図 3(a) に、水平方向と鉛直方向の断面図を図 3(b) と (c) に示す。蛍光板の外端と中心軌道の距離は、7 mm である。水平方向と鉛直方向のビームサイズはそれぞれ、 $\sim 3\ \text{mm}$ と $\sim 1\ \text{mm}$ であった。図 3(a) は、主に 1 回目の衝突におけるプロファイルを反映していると考えられる。なぜなら、2 回目以降の衝突における水平方向のビームサイズは、3 mm よりもはるかに小さいと考えられるからである。標的に衝突した電子の多くは、標的で大きく散乱されるために、再び標的に衝突することなく消失してしまう。2 回目以降に主に標的に衝突するのは、はじめ標的の外側を周回して、1 周周回する間に、標的に衝突する位置まで軌道が内側に移動した電子である。この場合、1 周あたりのビーム軌道のずれがビームサイズを決めることになるが、それは、3 mm よりも十分小さいと考えられる。1 回目の衝突時におけるプロファイルを除去するために、CCD カメラのシャッタータイミングを変えて、プロファイル

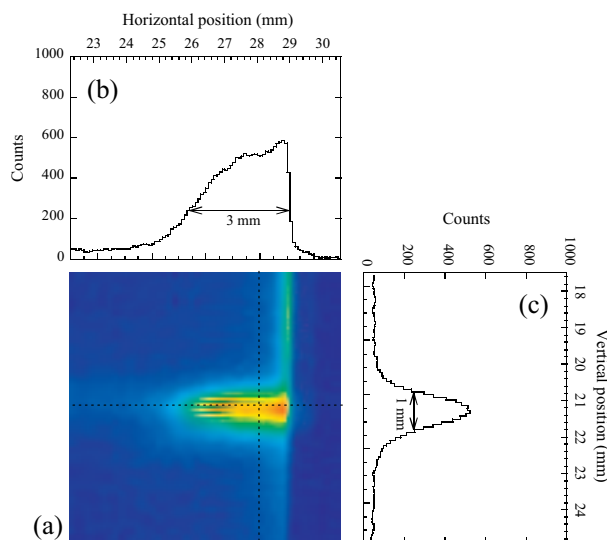


図 3: (a) アルミナ蛍光板を用いて測定したビームプロファイル. (b) 水平方向と (c) 鉛直方向の断面図. 図 (a) の破線は、それぞれの断面図の位置を示す。

の時間変化の測定を試みた。しかし、1 回目の衝突におけるプロファイルの残像の影響が強く、明瞭に観測することはできなかった。

4. 2 枚の薄膜によるビームサイズ測定

我々は、ビームの衝突時に発生する薄膜からの特性 X 線を用いて、内部標的上のビームサイズを測定した。実験装置の概念図を図 4(a) に、2 枚の薄膜の配置を図 4(b) に示す。特性 X 線の強度は、薄膜に衝突した電子数に依存する。よって、2 枚の薄膜の相対位置 (水平方向) の関数として特性 X 線強度を比較することにより、水平方向のビームサイズを求めることができる。

厚さ $163.5\ \mu\text{m}$ の Si 結晶と $10\ \mu\text{m}$ の Mo 薄膜をゴニオメーターに設置した。2 枚の薄膜の距離 d は、4.8 mm である。Si 結晶の表面は、 $\langle 100 \rangle$ 軸に垂直であり、(001) 面は水平面内にある。薄膜の外端の相対位置を変えるために、図 4(b) のように、鉛直軸まわりに 2 枚の薄膜を回転させた。X 線は、 180° 方向に設置された Si(Li) 検出器で測定した。検出器の有感領域の直径は、16 mm、Be 窓の厚さは、 $50\ \mu\text{m}$ である。内部標的から検出器までの距離は、274 cm であった。検出器の前には、内径 8 mm の鉛コリメーター (厚さ 50 mm) を置いた。X 線のスペクトルを測定するときは、ビーム入射時のノイズを避けるため、測定系にゲートをかかけた。ゲート信号を図 2 の破線で示す。ゲート信号は、55 ms から 95 ms まで開いており、この間にデータが取得される。

得られたスペクトルを図 5 に示す。強度は、Si の KX 線の収量で規格化されている。Si の KX 線、Mo の $K\alpha X$ 線、Mo の LX 線が、それぞれ、1.7 keV、17.5 keV、2.3 keV に観測された。さらに、 180° 方向に放出された PXR の観測にも成功した。図 5(b) では、ビームは標的にほぼ垂直に入射している。4.6 keV と 9.1

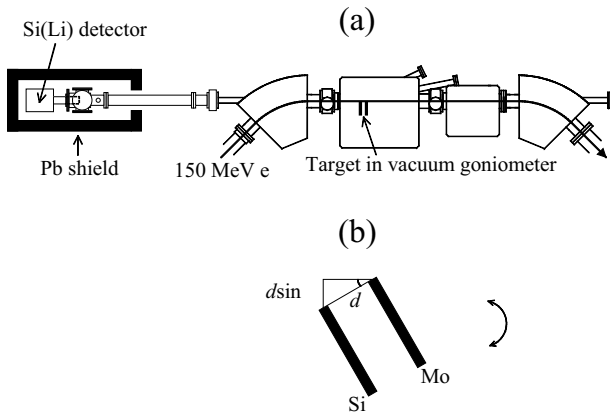


図 4: (a)180° 方向に放出された X 線を測定する実験装置の概念図. (b) 2 枚の薄膜の配置.

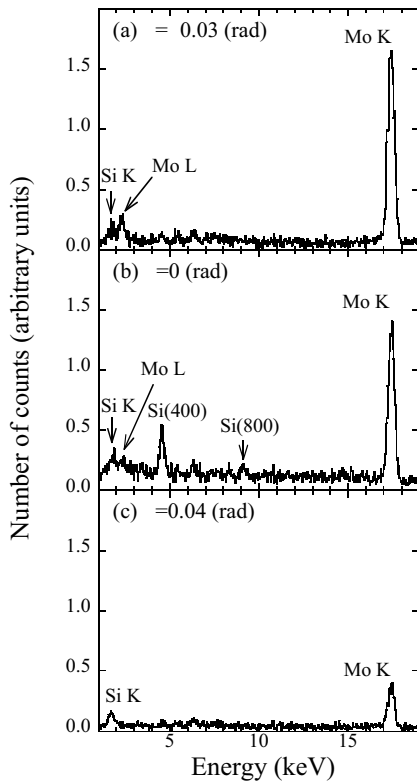


図 5: 180° 方向で観測された X 線スペクトル. (a) $\theta = -0.03$ rad, (b) 0 rad, (c) 0.04 rad.

keV のピークは、Si 結晶の (400) 面と (800) 面からの PXR によるものである。 θ がマイナスの領域では、ビームは主に Mo 薄膜と衝突し、Mo からの特性 X 線が強く観測される [図 5(a)]。一方、 θ がプラスの領域では、電子は主に Si 結晶と衝突するため、Si の特性 X 線が強く観測される [図 5(c)]。また、図 5(c) において、Mo KX 線は Si 結晶を透過しているが、エネルギーの低い Mo の LX 線は完全に吸収されていることがみてとれる。

図 6 は、X 線の強度比 $N_{\text{Mo}K\alpha}/N_{\text{Si}K}$ の θ 依存性を示す。 $N_{\text{Mo}K\alpha}$ と $N_{\text{Si}K}$ はそれぞれ、Mo K α と Si

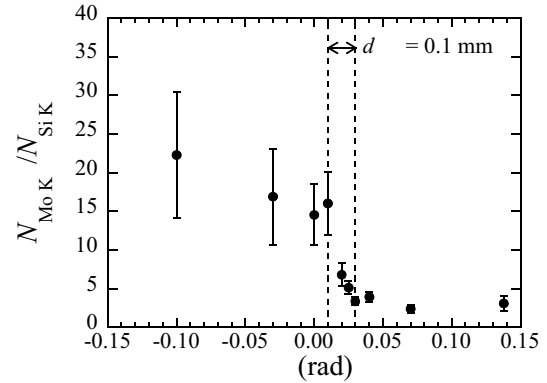


図 6: Mo K α X 線収量と Si KX 線収量の比.

KX 線の収量をあらわす。 $0.01 \leq \theta \leq 0.03$ rad の領域で、大きな比の変化があった。この角度範囲は、内部標的に衝突しているビームの水平方向の実効的な大きさに対応すると考えられる。図 6 から、大きさは、 $d \cdot \Delta\theta \sim 0.1$ mm と見積もられる。0.03 rad 以上の領域で、比が 0 にならず有限の値をとっているが、これは、一部の電子が標的に複数回衝突するためである。REFER には、リングの内側にスクレーパーが設置されており、これを挿入すれば、これらの電子を阻止することは可能である。

5. まとめ

内部標的上における実効的な水平方向のビームサイズは、周回しているビームの大きさよりもはるかに小さいことが示された。これは、リング内の内部標的を用いれば、コリメーターや 4 極電磁石などの集束装置を用いず、十分小さい PXR 源が得られることを意味する。鉛直、水平方向のビームサイズは、それぞれ ~ 1 mm と ~ 0.1 mm であった。前者は、蛍光板による測定から、後者は、2 枚の薄膜による測定から求めた。小さい放射源は、PXR の生成だけでなく、遷移放射、制動放射、コヒーレント制動放射、チャネリング放射などの生成にも重要である。また、Si 単結晶からの後方 PXR の観測にも成功した。次のステップとして、後方 PXR の角度分布の研究などが計画されている。

参考文献

- [1] K. Chouffani, M.Yu. Andreyashkin, I. Endo, S. Masuda, T. Takahashi, and Y. Takashima, Nucl. Instr. and Meth. B 173 (2001) 241.
- [2] I. Endo, D. Iseki, T. Ohnishi, C. Moriyoshi, and A.V. Shchagin, Nucl. Instr. and Meth. B 217 (2004) 666.
- [3] A.V. Shchagin, V.I. Pristupa, and N.A. Khizhnyak, Phys. Lett. A 148 (1990) 485.
- [4] I. Endo, A.V. Shchagin, Y. Takabayashi, and K. Ueda, submitted.