

反射高速陽電子回折の実験

Reflection high-energy positron diffraction (RHEPD): Experiment

深谷有喜¹, 前川雅樹¹, 望月出海¹, 和田健², 兵頭俊夫², 河裾厚男¹
Yuki Fukaya^{1*}, Masaki Maekawa¹, Izumi Mochizuki¹, Ken Wada², Toshio Hyodo², and
Atsuo Kawasuso¹

¹Advanced Science Research Center, Japan Atomic Energy Agency, Takasaki, Gunma 370-1292, Japan

²Institute of Material Structural Science, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

*e-mail: fukaya.yuki99@jaea.go.jp

1. はじめに

反射高速陽電子回折 (RHEPD) 法は、10-20 kV に加速した陽電子ビームを結晶表面に低角度で入射させ、回折した陽電子の強度分布から表面の原子配列を決定する手法である。RHEPD では、陽電子がプラスの電荷を持つことにより、最表面で全反射回折を起こすことが最大の特徴である[1]。この全反射回折を利用すると、最表面の原子配列や熱振動状態をバルクの影響なしに知ることができる。1992 年、一宮により表面研究における RHEPD 法の有用性が理論的に指摘された[1]。この有用性を実証するために、我々は ²²Na 線源を用いて RHEPD 装置の開発を行い[2-4]、様々な表面超構造の原子配置[5]や相転移メカニズム[6,7]、また最表面原子の熱振動状態[8]や、表面プラズモン励起過程[9]の解明に適用してきた。

RHEPD 法の更なる高度化を目指し、2010 年より、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の低速陽電子実験施設 (SPF) において、電子線形加速器 (LINAC) を利用した新たな RHEPD 装置の開発に着手した[10]。始めに、コリメーターを用いたビーム形成を行い、従来の線源法に比べ約 14 倍の反射強度を得ることに成功した[11]。2012 年より、入射陽電子ビームの高輝度化を図るため、陽電子の再放出現象を利用した輝度増強法の開発に着手した。これにより、LINAC を用いて生成した高強度陽電子のエネルギー単色化と平行化を行い、結果として、Si(111)-7×7 表面からの鮮明な回折パターンと従来の 44 倍の反射強度を得ることに成功した。

2. 実験

実験は、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 低速陽電子実験施設 (SPF) にて行った。高強度の陽電子ビームは、LINAC を用いた対生成により発生させ、ヘルムホルツコイルを用いて RHEPD チャンバーまで輸送させた。回折パターンは、マイクロチャンネルプレートと CCD カメラを用いて撮影した。ロッキング曲線は、マニピュレーターを用いて試料を 6.0°まで 0.1°間隔で回転させることにより測定した。

本研究では、テスト基板として Si(111)表面を用いた。Si(111)表面は表面科学の分野で標準的な試料であり、清浄表面では 7×7 超構造を形成するため、超構造由来の多数の回折スポットが発現する。これらの微弱的な回折スポットを観測できることが、本実験装置の性能をはかるのに必要である。Si(111)基板は鏡面研磨された *n* 型の Si(111) ウエハー (比抵抗: 1-10 Ωcm) から短冊状に切り出したものを使用した。超高真空チャンバー内にて、1200 °C で数回フラッシングを行うことにより、Si(111)-7×7 清浄表面を得た。

3. 結果と考察

3.1 陽電子ビームの高輝度化

RHEPD 強度の高精度測定には、入射陽電子ビームの高いフラックスに加えて、エネルギー幅の低減が要求される。本研究では、陽電子の再放出現象を利用して、陽電子ビームのエネルギー幅の大幅な低減を図った。電子の反粒子である陽電子にとって、結晶の仕事関数が負となるものが存在する。例えば、タングステン (W) 薄膜に陽電子が打ち込まれると、熱振動と同程度のエネルギーまで減速した後、真空中に自発的に放出される。その再放出陽電子を目的の電圧まで加速させることにより、単色化した陽電子ビームを得ることができる。

始めに、再放出陽電子の引き出しと収束を行う 3 段の電極から構成される輝度増強チャンバーを作製し、RHEPD チャンバーの前段に設置した。10 kV に昇圧させた W 薄膜 (厚さ 100 nm) に 15 kV の陽電子ビームを入射させ、ガイド磁場から解放された陽電子ビームの強度、ビーム径、エネルギー幅などの特性評価を行った。エネルギー分析器を導入し、輝度増強後の陽電子ビームのエネルギー幅を測定した。結果として、10 keV のビームエネルギーに対して、輝度増強前で半値幅 110 eV であったエネルギー幅が、輝度増強後では 8 eV まで大幅に低減することができた。可干渉距離はエネルギー幅に反比例するため、この結果は可干渉性が約 14 倍向上したことに対応する。また、輝度増強後の陽電子ビームのフラックスと

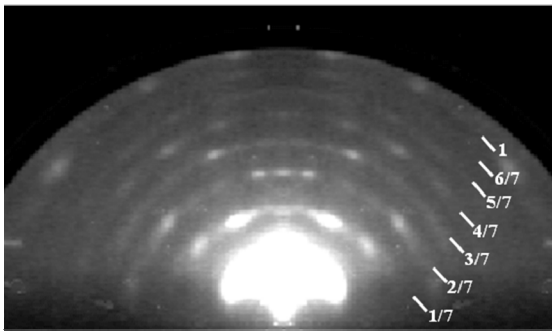


Fig. 1 RHEPD pattern for the Si(111)-7×7 surface measured by using a new RHEPD apparatus with bright and intense positron beam based on the LINAC at the Slow Positron Facility, KEK. The incident azimuth of the positron beam corresponds to the $[11\bar{2}]$ direction. The glancing angle is set at 2.2°. The indexes at the right hand side indicate the Laue zone. The pattern shows the superimposition of the left and right parts.

ビーム径はそれぞれ 10^5 e⁺/sec 台、0.9 mm (半値幅) と見積もられた。

3.2 回折パターンとロッキング曲線

輝度増強後の陽電子ビームの特性評価後、実際の回折パターンの測定を行った。図 1 は、今回開発した高輝度 RHEPD 装置を用いて測定した、Si(111)-7×7 表面からの RHEPD パターンである。これまでの線源を用いた RHEPD 実験では観測することのできなかった、高次の分数次スポットを観測できるようになった。

図 2 は、Si(111)-7×7 表面からの RHEPD ロッキング曲線の測定結果である。比較のため、以前の線源法を用いて測定した Si(111)-7×7 表面からの RHEPD ロッキング曲線も示した。RHEPD 強度は、測定時間で規格化したものを示している。今回の高輝度化した陽電子ビームを用いて測定したロッキング曲線は非常にスムーズであり、全反射領域や低視射角の 111 ブラッグピークに加え、高い視射角領域にある強度の弱い 333、444、555 ブラッグピークも精度よく測定することができた。今回得られた反射強度は、線源法の 44 倍に達した。現在、陽電子ビームの収束性の向上などを行い、輝度の更なる向上を目指している。

今後は、この高輝度化した陽電子ビームを用いて、表面科学分野で重要な表面構造の解明に適用するとともに、陽電子の単純な散乱過程を最大限に利用して、回折強度分布から実空間の原子座標を得る、表面超構造の直接決定法を開発する予定である。

References (参考文献)

- [1] A. Ichimiya: *Solid State Phenom.* **28&29**, 143 (1992/93).
 [2] A. Kawasuso and S. Okada: *Phys. Rev. Lett.* **81**, 2695 (1998).

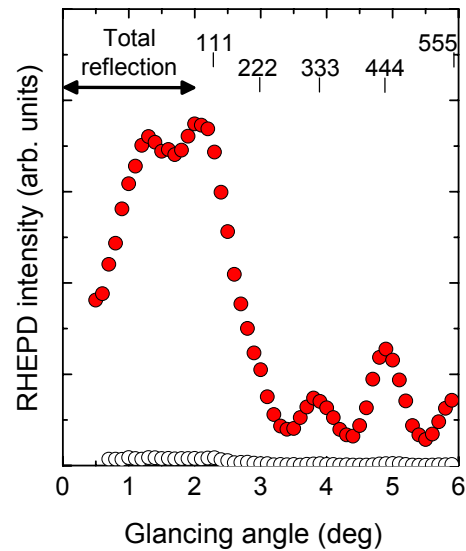


Fig. 2 RHEPD rocking curves of specular spots for the Si(111)-7×7 surfaces measured by using a ^{22}Na - and LINAC-based RHEPD apparatus. The incident azimuth of the positron beam corresponds to the $[11\bar{2}]$ direction. The indexes at the top of the figure denote the positions of the Bragg reflections. The critical angle for total reflection is estimated to be 2.0° via Snell's law.

- [3] A. Kawasuso, Y. Fukaya, K. Hayashi, M. Maekawa, S. Okada, and A. Ichimiya: *Phys. Rev. B* **68**, 241313 (2003).
 [4] A. Kawasuso, T. Ishimoto, M. Maekawa, Y. Fukaya, K. Hayashi, and A. Ichimiya: *Rev. Sci. Instrum.* **75**, 4585 (2004).
 [5] Y. Fukaya, A. Kawasuso, and A. Ichimiya: *Surf. Sci.* **600**, 3141 (2006).
 [6] Y. Fukaya, A. Kawasuso, and A. Ichimiya: *Phys. Rev. B* **75**, 115424 (2007).
 [7] Y. Fukaya, M. Hashimoto, A. Kawasuso, and A. Ichimiya: *Surf. Sci.* **602**, 2448 (2008).
 [8] Y. Fukaya, A. Kawasuso, K. Hayashi, and A. Ichimiya: *Phys. Rev. B* **70**, 245422 (2004).
 [9] Y. Fukaya, A. Kawasuso, and A. Ichimiya: *Phys. Rev. B* **79**, 193310 (2009).
 [10] 課題番号: 2010G652、実験責任者: 深谷有喜、課題名: 高輝度陽電子ビームを用いた反射高速陽電子回折実験
 [11] K. Wada, T. Hyodo, A. Yagishita, M. Ikeda, S. Ohsawa, T. Shidara, K. Michishio, T. Tachibana, Y. Nagashima, Y. Fukaya, M. Maekawa, and A. Kawasuso: *Eur. Phys. J. D* **66**, 37 (2012).