

連載 (講義)

反射高速陽電子回折による結晶表面の研究：装置編

一宮 彪彦*

〒114-0003 東京都北区豊島 5-5-9-415

* ichimiya@nagoya-u.jp

(2012年2月9日受理)

陽電子回折装置は、陽電子源、ビーム減速部、ビーム加速部、ビーム収束部、試料室、観測系で構成される。ここでは、それらの各部の説明と、回折測定のために要求されるビームの質、すなわち可干渉性と平行性について述べる。

Reflection High-Energy Positron Diffraction for Surface Analysis: Apparatus

Ayahiko Ichimiya*

5-5-9-415 Toshima, Kita-ku, Tokyo 114-0003, Japan

* ichimiya@nagoya-u.jp

(Received: February 9, 2012)

A reflection high-energy positron diffraction apparatus consists of several elements such as a positron source, a beam moderator, a beam accelerator, a monochromator, lenses, a specimen holder and an observation system. Here, features of these elements are explained and quality of positron beams required for diffraction experiments, such as parallel quality and coherence length of positron beams, is described.

1. はじめに

前回の高速陽電子回折の基礎編に引き続き、今回は、陽電子回折測定のための装置について述べる。陽電子回折を行うためには、質のよい陽電子源が必要である。質が良いとは、輝度が高い、すなわち点光源に近く、干渉性の良い単色の陽電子が得られることである。陽電子の発生には β^+ 崩壊を起こす放射性同位元素 (RI) を用いるか、加速器により、高エネルギー電子を重元素ターゲットに照射し、 γ 線からの対生成を用いる方法がある[1]。どちらの方法でも、発生した陽電子は高エネルギーの連続スペクトルを持つ白色陽電子線であり、これをそのまま利用することは出来ないため、減速材を必要とする。更に回折を起こさせるためには可干渉長を大きくする必要がある。本稿では、これらの装置の要素を含

めて、陽電子回折に必要な装置の構成について述べる。

2. 陽電子発生源

陽電子発生源としては、上にも述べたように β^+ 崩壊をする RI を用いる場合と加速器を用いる場合がある。 β^+ 崩壊をする RI は非常に多く、炭素以上の原子番号を持つほとんどの RI が当てはまる。しかしその多くは1時間以下の半減期であり、安定した陽電子源としては使いにくい。したがって、回折装置の陽電子源として使えるのは半減期の長い核種に限られる。その中でもっとも一般的に使われている各種は ^{22}Na である。半減期は2.8年であり、実験に用いるのにも十分長い寿命を持ち、安定した陽電子源として最適である。RI を使う場合で、サイクロト

ロンなどの加速器で短寿命核種を連続的に生成して、加速器からのビームラインで陽電子ビームを得る方法もあるが、ここでは触れないことにする[2].

加速器を利用する陽電子源としては、加速器により電子を 100 MeV 以上で加速し、タングステンなどの重金属標的に照射することにより、制動輻射によって γ 線を発生させ、対生成によって、電子と陽電子が作られることを利用している[1]. 高エネルギーに加速された電子ビームは Fig. 1 のように加速器の壁を通して外部に取り出し、タングステンやタンタルなどの高融点重金属で出来た陽電子発生コンバータに入射する。入射した電子は制動輻射により γ 線を発生させ、対生成によって陽電子が発生する。

Fig. 1 は原子力研究所（現、原子力研究開発機構）の電子線線形加速器（LINAC）によって陽電子を発生する機構の模式図である[1]. コンバータは数枚のタンタル板でできており、板の厚さは計 12mm である。高エネルギーの電子線により、タンタル板は高温になるため、水冷によって冷却される。これらのコンバータからはガンマ線が発生し、最後のタンタル板で対生成により陽電子が発生する。なお最後のタンタル板は真空隔壁となっているのでここで発生した陽電子は真空中に放出される。このようにして陽電子は発生し、この後、質の良い陽電子ビームとして取り出されることになる。加速器を用いた陽電子源は高い強度のビームを取り出せるメリットがある反面、実験室を高い放射能領域から隔離する必要があり、次に述べるソレノイドコイルを用いるなどの工夫が必要になる。

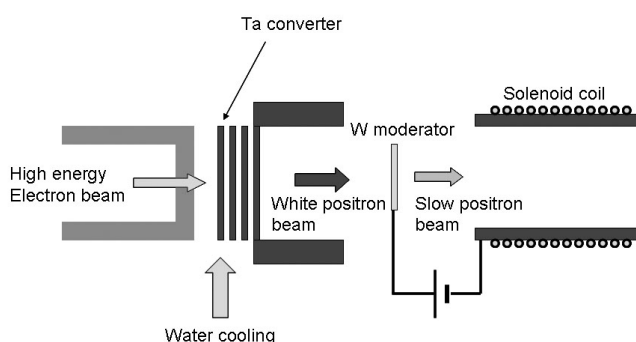


Fig. 1 Schematic diagram of a positron source by an electron accelerator.

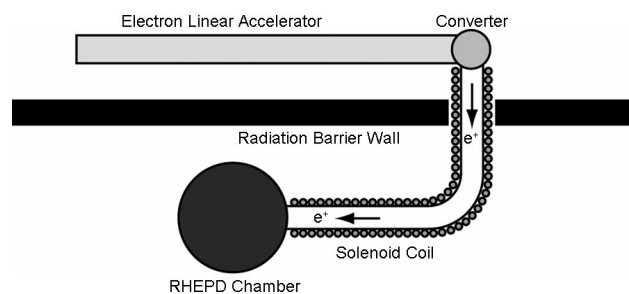


Fig. 2 Schematic diagram of a RHEPD facility with an electron linear accelerator.

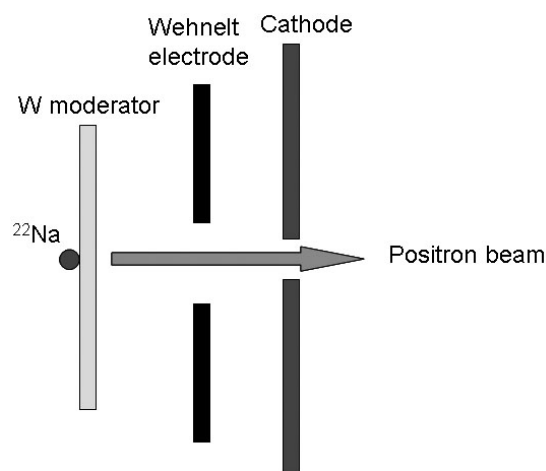


Fig. 3 Schematic diagram of a positron beam source by an RI.

3. 陽電子ビーム

RI やコンバータで発生した陽電子は高いエネルギーを持っているため、これを減速させる必要がある。そのために、RI やコンバータの背後に減速材として厚さ数 $10 \mu\text{m}$ のタングステン箔を置いて、数 eV まで減速する。加速器を利用した場合はコンバータの後のタングステンの減速材には Fig. 1 に示すようにソレノイドコイルが巻かれた陽電子移送管との間に 30 から 60 V の正電位が印加されており、陽電子はこの電位で引き出される。その後 Fig. 2 のように加速器室から移送管中をソレノイドコイルによって、RHEPD 装置のある実験室まで導かれる。ソレノイドコイルで移送された陽電子ビームの質はよくないために、静電場系で移送した後、タングステン表面にビームを収束させて輝度強化する必要がある[1].

輝度強化した後のビーム形成は、RI を用いた陽電子ビームの形成と同等なので、ここでは、より一般

的な RI によるビーム形成について述べることにする。Fig. 3 は RI を用いた陽電子源の模式図である。非常に小さい RI 陽電子源をタングステンの減速材に近接させて置くことにより、点光源に近い陽電子源を作ることが出来る。陽電子に対して物質は負の仕事関数を持つので、タングステン減速材の中で減速された陽電子は負の仕事関数により真空中に自然放出される。この陽電子は電場によってタングステンの表面から引き出され、ウェーネルト電極によって収束され、陰極および静電レンズおよびモノクロメータを通過してビームとして形成される。



Fig. 4 RHEPD pattern from the Si(111) 1×1 -H surface.

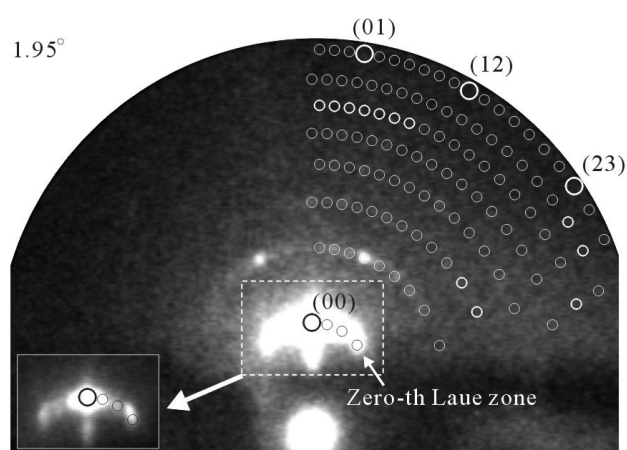


Fig. 5 RHEPD pattern from the Si(111) 7×7 surface.

このようにして得られた 20 keV の陽電子ビームによる Si(111) 1×1 -H の反射高速陽電子回折 (RHEPD) 図形を Fig. 4 に示す[3]。これによって、RHEPD のロッピング曲線を測定し、解析した結果、水素終端した Si(111)表面の構造を決定できた[3]。

このように、回折強度を解析できるビームが得られたが、Si(111) 7×7 のように大きい単位胞を持つ表面に対しては、回折スポットが十分に分離せず、可干渉性に関してまだ不十分であった。可干渉距離はビームに垂直方向はビームの開き角 $\Delta\theta$ と波長 λ で決まり、 $l_{\perp} = \lambda/\Delta\theta$ 、ビームに平行な方向は波数の幅 Δk できまり、 $l_{\parallel} = 2\pi/\Delta k = 24.5\sqrt{E/\Delta E}$ である。ここで E は陽電子のエネルギー、 ΔE は陽電子ビームのエネルギー幅である。したがって、ビームの平行性を良くし、エネルギー幅を小さくするために単色性をあげる必要がある。このため、磁場による 90° 偏向モノクロメータを挿入することによって、可干渉性を上げることに成功した。Fig. 5 は、Si(111) 7×7 表面からの反射高速陽電子回折 (RHEPD) 図形である。7 \times 7 の分数スポットが明確に分離され、また分数次ラウエゾーンのスポットも見えている[4]。

4. 反射高速陽電子回折装置

Fig. 6 は RHEPD 装置の模式図である。初期の装置は静電型のレンズ系を用いたのに対し、ここでは、磁気レンズ系を用いているのが特徴である。タングステン減速材から放出された陽電子はウェーネルト電極で絞られた後、陰極で加速され引き出される。その後、磁気レンズで収束され 90° 偏向型磁場モノクロメータによって単色化され、磁気レンズとアパーチャを通して超高真空チャンバーに置かれた試料表面で反射し、スクリーンに導かれる[5]。試料台は陽電子ビームの入射角を精密に制御できるように設計されている。RHEPD パターンを観測するスクリーンは多重チャンネルプレート (MCP) を用いている。また、RHEPD パターンは CCD カメラを用いて、撮影される。Fig.7 にこの装置の全景を示す。全体のサイズは 1 m \times 1 m に収められていて、かなりコンパクトである。この装置では、ビームのエネルギー幅が約 0.1%、ビームの開き角が 0.1° 以下に抑えられており、横方向に 7nm 以上、入射方向に 24 nm 以上と十分な可干渉距離が得られている。

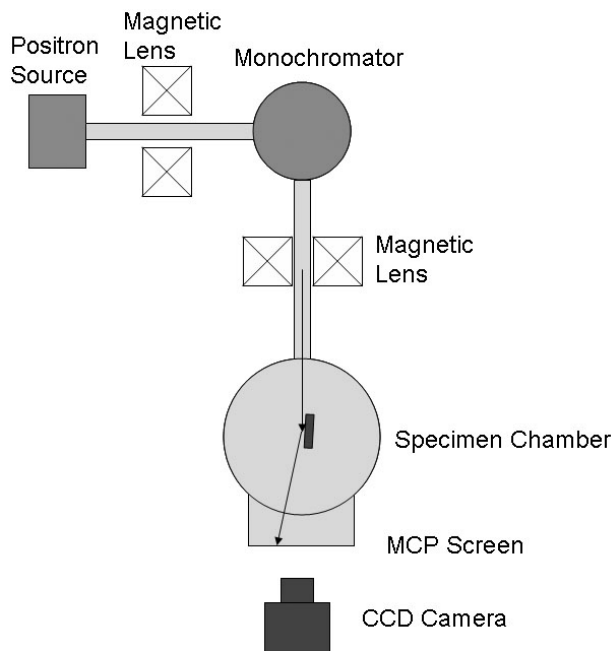


Fig. 6 Schematic diagram of RHEPD apparatus.

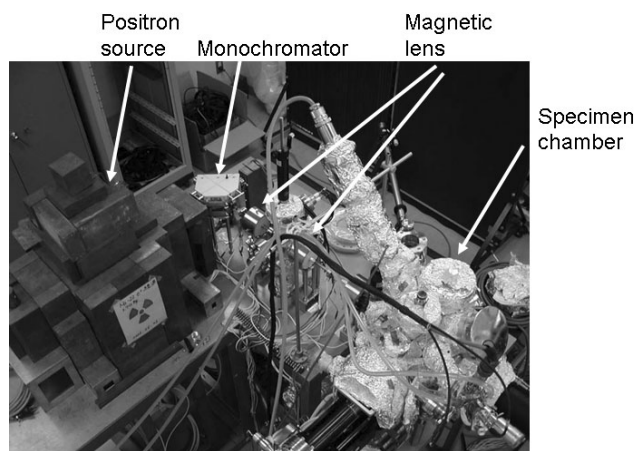


Fig. 7 An RHEPD apparatus.

5. まとめ

以上述べたように、RHEPD 装置は陽電子源を除けば、反射高速電子回折 (RHEED) 装置などの通常の回折装置とほとんど差異が無いことがわかる。RHEED 装置との違いは、電子ビームに比べてビーム強度が非常に弱いために、観測系に MCP を使うなど工夫が必要であることと、陽電子源が RI による β^+ 崩壊やガンマ線による対生成によっているために、初期のビームは高エネルギーの連続スペクトルを持っているので、減速材で減速させた後モノクロメータによる単色化が必要となることである。また、RI や加速器を使うために、どうしても放射線管理区域に装置を置く必要があることである。しかし、ビームが弱いことや、放射線というハードルがあっても、前回述べたような陽電子回折のメリットや、次回以降で述べる応用例から、陽電子回折は表面物性の測定機器として十分有効であると思われる。

謝辞

本稿を書くに当たり、図等の使用を快く承諾いただいた日本原子力研究開発機構の河裾厚男博士に感謝いたします。

参考文献

- [1] 例えば, Y. Ito, M. Hirose, S. Takamura, O. Sueoka, I. Kanazawa, K. Mashiko, A. Ichimiya, Y. Murata, S. Okada, M. Hasegawa and T. Hyodo, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A305, 267 (1991). 廣瀬雅文, 伊藤泰男, 金沢育三, 末岡 修, 高村三郎, 村田好正, 一宮彪彦, 岡田漱平, 放射線, 18, No.2, 13 (1992).
- [2] サイクロトロン等による短寿命核種の生成は医学診療における陽電子カメラに使われている。
- [3] A. Kawasuso, M. Yoshikawa, K. Kojima, S. Okada and A. Ichimiya, Phys. Rev. B61, 2102 (2000).
- [4] A. Kawasuso, Y. Fukaya, K. Hayashi, M. Maekawa, S. Okada and A. Ichimiya, Phys. Rev. B 68, 241313 (2003).
- [5] A. Kawasuso, T. Ishimoto, M. Maekawa, Y. Fukaya, K. Hayashi and A. Ichimiya: Rev. Sci. Inst. 75, 4585 (2004).