

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：82502

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K13692

研究課題名(和文) スピン偏極低速陽電子回折による表面磁気構造の研究

研究課題名(英文) Study on surface magnetic structure by spin-polarized low-energy positron diffraction

研究代表者

和田 健 (Wada, Ken)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 先端機能材料研究部・主幹研究員(定常)

研究者番号：10401209

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：アイソトープから放出されるスピン偏極陽電子を利用したスピン偏極低速陽電子ビーム装置を開発した。陽電子のエネルギーの単色化に固体希ガスモデレータを使用し、透過型リモデレータ設置予定位置にて、直径 0.2 mm (半値全幅) の 5 keV のスピン偏極低速陽電子ビームが得られた。また、加速器ベースの非スピン偏極陽電子ビームを透過型リモデレータ及びレンズ系で輝度増強したビームを用いることで、Ge(001)-2x1構造の低速陽電子回折(LEPD)パターンの観測に成功した。

研究成果の概要(英文)：A slow-positron beam apparatus, which uses spin-polarized positrons emitted from a radioisotope, has been developed. By using a solid rare gas moderator for obtaining mono-energetic slow-positrons, it generates a spin-polarized slow-positron beam with a diameter of 0.2 mm (FWHM) at a position for transmission-type remoderator. A low-energy positron diffraction (LEPD) pattern from a Ge(001)-2x1 structure has been observed with an accelerator-based non-polarized slow-positron beam, whose brightness was enhanced by a transmission-type remoderator and optics we had developed.

研究分野：陽電子科学

キーワード：表面 界面 磁性 陽電子 回折 構造解析

1. 研究開始当初の背景

スピントロニクス関連物質の表面に発現する特異な現象が注目を集めている。これらの物質の表面及び表面近傍の原子配置と磁気構造を原子分解能で解明することができれば、現象を正しく理解し効率的に材料開発を進めることに貢献できるが、未だその決定打と言えるような測定法は存在しない。

2. 研究の目的

スピン偏極低速電子回折 (Spin-Polarized Low-Energy Electron Diffraction, SPLEED) の電子をその反粒子である陽電子にかえたスピン偏極低速陽電子回折 (Spin-Polarized Low-Energy Positron Diffraction SPLEPD) 装置の開発を目的とする。

3. 研究の方法

陽電子線源からの β^+ 崩壊によって得られるスピン偏極陽電子を固体希ガスモデレータにより単色化して静電輸送し、透過型リモデレータによりこのビームの輝度を増強する。得られた高輝度のスピン偏極低速陽電子ビームを試料表面に垂直に入射し、後方弾性散乱による SPLEPD パターンを観測し、解析する。

4. 研究成果

線源ベースのスピン偏極低速陽電子の小径ビーム発生装置を作成した。直径 1.0 mm、深さ 0.6 mm の孔をカーボンに穿ち、その孔に 74 MBq の $^{22}\text{NaCl}$ 水溶液の入ったアンブル 3 本分 (合計 222 MBq) を遠隔操作によりマイクロシリンジで 1~2 μl ずつ滴下・乾燥して線源を作成した。この線源を無酸素銅で作成した容器で密閉した。ただし、陽電子を取り出す側はチタン薄膜で密閉し、高速陽電子が透過できるようにした。固体希ガスモデレータは、2 段からなるコーン状の孔に形成する。このコーン形状の開口部の直径がビーム質を決定するため、できるだけ小さな径と

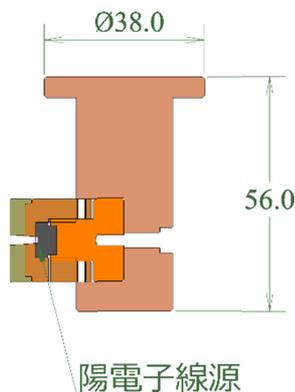


図 1: 陽電子線源付近の断面図

したいが、線源作成時の $^{22}\text{NaCl}$ 水溶液滴下に用いるマイクロシリンジの仕様及び固体希ガスモデレータを介しての陽電子の引き出し効率などについて総合的に判断し、出口開口部の直径は 2.4 mm とした。

固体希ガスモデレータを利用するための冷却システムと希ガス導入システムを構築した。作成した線源は、無酸素銅の円柱にあけた孔に図 1 のようにネジ止めし、この円柱の上部の 38.0 mm の面に厚さ 2 mm のサファイア円板と金箔を介して GM 冷凍機にマウントし、ピークネジで固定した。線源部からビームを電場により引き出すためのグリッドを取り付けた。線源部に 5 kV 程度の高電圧をかけても放電しないよう、接地電位部との距離を十分に保った。

スピン偏極低速陽電子ビームを静電輸送するためのアインツェルレンズ 3 組と、陽電子のスピンの向きをかえずにビームの進行方向だけを 90°を偏向する静電ミラーからなるビームラインを構築した。線源部は冷凍機により 10 K 以下に冷却し、冷却した状態で、線源と光学系の中心軸が精度良く一致するよう位置の微調整を行なった。これらのシステムにより輸送するスピン偏極低速陽電子ビームの透過型輝度増強システム用のチャンバーを作成した。

5 keV 程度のエネルギーの陽電子ビームを数 m の距離静電輸送する場合、そのビーム軌道は地磁気の影響を著しく受ける。そのため、ビーム装置全体を覆うように地磁気補

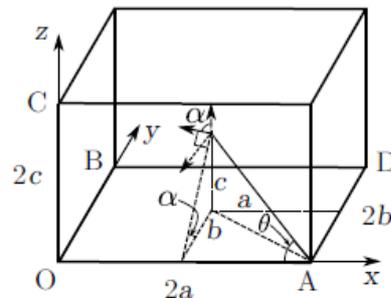


図 2

正コイルを設置した。図 2 に示すように、各辺の長さ $2a, 2b, 2c$ の直方体に組んだフレームの各面に、それぞれ x, y, z の各軸の正の方向に磁場が発生するよう n 巻きのループ電流 nl_x, nl_y, nl_z を流した場合、この直方体の中心に発生する磁束密度 B [μT] は、

$$B = \frac{0.8}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \begin{pmatrix} nl_x bc \left(\frac{1}{c^2 + a^2} + \frac{1}{a^2 + b^2} \right) \\ nl_y ca \left(\frac{1}{a^2 + b^2} + \frac{1}{b^2 + c^2} \right) \\ nl_z ab \left(\frac{1}{b^2 + c^2} + \frac{1}{c^2 + a^2} \right) \end{pmatrix}$$

となる。ループ電流を流すケーブルは、2 mm² の 4 芯のケーブルをフレームに 2 回巻き、ケーブル両端の芯線を互い違いに接続することで、8 ターンにして電流を流した。本ビーム装置を設置した建物近辺の地磁気の向きと強

度については、国土地理院で公表されているデータを用い、それをキャンセルするために必要となる各辺のループ電流値を計算した。

透過型リモデレータを設置する場所にマイクロチャンネルプレート (MCP) を置き、実際にスピン偏極陽電子ビームを出してビーム試験を行なった。線源から放出された高速陽電子を固体希ガス (Ne, Ar, Kr 等) モデレータで減速・単色化 (エネルギー幅は 10 eV 程度) し、5 keV 程度のエネルギーでビームを輸送した。MCP でビームを観測し、同時にその近くに置いた γ 線検出器を用いてビーム強度を評価した。固体希ガスモデレータとして Ne を用いた場合、ビーム径は半値全幅で 0.2 mm 程度、ビーム強度は毎秒 1 万個程度であった。

また、透過型リモデレータより下流側の輝度増強後のビーム輸送レンズ系については、既存のレンズ系を改良した設計とシミュレーションを行なった。このレンズ系は、リモデレータからの再放出陽電子をいったん 800 eV 程度まで加速し、60 cm ほど輸送した後に減速して試料に入射するものである。陽電子ビームはリモデレータ付近で 9 割方消滅するが、ビームをより遠くに輸送してから回折実験装置に導入することで、陽電子消滅に伴って放出される線由来の回折パターンにおけるバックグラウンドを低減することができる。

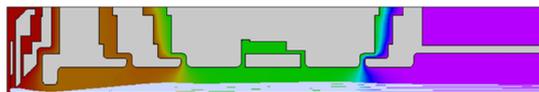


図 3: 改良したレンズ系(上流部)のシミュレーションの様子

実際の陽電子回折パターンの取得については、加速器ベースの非スピン偏極陽電子ビームを既存の透過型リモデレータ及びレンズ系で輝度増強したビームを用いて行ない、Ge(001)-2x1 構造の低速陽電子回折パターンの観測に成功した。図 4 は、120K に冷却した Ge(001)表面からの LEPD 回折パターンで、明瞭な回折パターンが得られた。

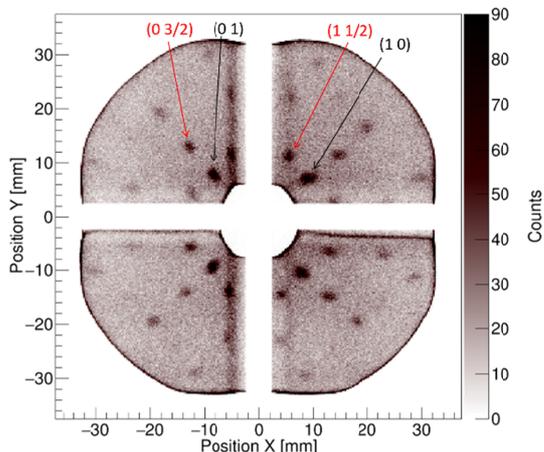


図 4: Ge(001)-2x1 構造の LEPD パターン (120K, 143.5 eV)。

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 4 件)

- [1] K. Wada, T. Shirasawa, I. Mochizuki, M. Fujinami, T. Takahashi, M. Maekawa, A. Kawasuso, M. Kimura, and T. Hyodo, “Progress report on construction of a low-energy positron diffraction (LEPD) experiment station at KEK”, *JJAP Conf. Proc.* (印刷中)
- [2] K. Wada, T. Shirasawa, I. Mochizuki, M. Fujinami, T. Takahashi, M. Maekawa, A. Kawasuso, and T. Hyodo, “Observation of low-energy positron diffraction patterns with a linac-based slow-positron beam”, *e-J. Surf. Sci. Nanotech.* (印刷中)
- [3] T. Hyodo, I. Mochizuki, K. Wada, N. Toge, and T. Shidara, “Slow positron applications at slow positron facility of institute of materials structure science, KEK”, *AIP Conf. Proc.* **1970**, 040004-1-10 (2018).
- [4] T. Hyodo, K. Wada, I. Mochizuki, M. Kimura, N. Toge, T. Shidara, Y. Fukaya, M. Maekawa, A. Kawasuso, S. Iida, K. Michishio, and Y. Nagashima, “Research progress at the Slow Positron Facility in the Institute of Materials Structure Science, KEK”, *J. Phys.: Conf. Ser.* **791**, 012003-1-8 (2017).

[学会発表] (計 14 件)

- [1] 和田健, 白澤徹郎, 望月出海, 藤浪真紀, 前川雅樹, 河裾厚男, 高橋敏男, 兵頭俊夫, Ge(001)-2x1 表面における低速陽電子回折パターンの観測, 日本表面科学会第 3 回関東支部講演大会 (2018).
- [2] 和田健, 白澤徹郎, 望月出海, 藤浪真紀, 前川雅樹, 河裾厚男, 高橋敏男, 兵頭俊夫, 低速陽電子回折 (LEPD) による表面ホログラフィ実験の進捗状況, KEK 物構研 PF 低速陽電子実験施設 (SPF) 第 2 回陽電子回折研究会 (2018).
- [3] 和田健, 低速陽電子ビームによる局所表面構造解析の展望, 物質構造科学研究所設立 20 周年記念シンポジウム「物質構造科学の過去・現在・未来」(2017).
- [4] 和田健, 白澤徹郎, 望月出海, 藤浪真紀, 前川雅樹, 河裾厚男, 高橋敏男, 兵頭俊夫, 低速陽電子回折実験装置の開発, 京都大学原子炉実験所専門研究会「陽電子科学とその理工学への応用」(2017).
- [5] K. Wada, T. Shirasawa, I. Mochizuki, M. Fujinami, M. Maekawa, A.

- Kawasuso, and T. Hyodo, A Low-Energy Positron Diffraction Experiment System with a Linac-Based Slow-Positron Beam, the 8th International Symposium on Surface Science (ISSS-8) (2017).
- [6] T. Hyodo, I. Mochizuki, A. Ichimiya, M. Kimura, N. Toge, T. Shidara, Y. Fukaya, S. Shamoto, K. Wada, M. Maekawa, A. Kawasuso, M. Fujinami, T. Shirasawa, T. Takahashi, H. Ariga, K. Asakura, S. Iida, and Y. Nagashima, Positron Surface Studies at KEK: Positron Diffraction and Positronium TOF, the 8th International Symposium on Surface Science (ISSS-8) (2017).
- [7] 和田健, 白澤徹郎, 望月出海, 藤浪真紀, 前川雅樹, 河裾厚男, 兵頭俊夫, 加速器ベース低速陽電子ビームを用いた低速陽電子回折実験装置の開発, 日本物理学会 2017 年秋季大会 (2017).
- [8] T. Hyodo, I. Mochizuki, A. Ichimiya, M. Kimura, N. Toge, T. Shidara, Y. Fukaya, S. Shamoto, K. Wada, M. Maekawa, A. Kawasuso, M. Fujinami, T. Shirasawa, T. Takahashi, H. Ariga, K. Asakura, S. Iida, and Y. Nagashima, Surface Studies at SPF, KEK: Positron Diffraction and Positronium TOF, 12th International Workshop on Positron and Positronium Chemistry (PPC12) (2017).
- [9] K. Wada, Development of low-energy positron diffraction systems in Japan, The 3rd China-Japan Joint Workshop on Positron Science (JWPS2017) (2017).
- [10] K. Wada, Positron Diffraction Experiments in Japan, Lecture at Wuhan University (2017).
- [11] 兵頭俊夫, 和田健, 白澤徹郎, 望月出海, 藤浪真紀, 前川雅樹, 河裾厚男, 低速陽電子回折法による表面構造解析, 2016 年度量子ビームサイエンスフェスタ (2017).
- [12] 兵頭俊夫, 和田健, 望月出海, 一宮彪彦, 小菅隆, 斉藤裕樹, 濁川和幸, 峠暢一, 大沢哲, 池田光男, 白川明広, 古川和朗, 本間博幸, 設楽哲夫, 岩瀬広, 深谷有喜, 前川雅樹, 河裾厚男, 長嶋泰之, 満汐孝治, 藤浪真紀, 白澤哲郎, 高橋敏男, 低速陽電子実験施設報告, 2016 年度量子ビームサイエンスフェスタ (2017).
- [13] 和田健, 白澤徹郎, 望月出海, 藤浪真紀, 前川雅樹, 河裾厚男, 兵頭俊夫, 加速器ベース低速陽電子ビームを用いた低速陽電子回折(LEPD)実験装置の開発状況, 陽電子回折研究会 (2017).
- [14] 兵頭俊夫, 望月出海, 和田健, KEK 物質

構造科学研究所低速陽電子実験施設の低速陽電子ビームと陽電子回折ステーション, 陽電子回折研究会 (2017).

〔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〕

無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

和田 健 (WADA, Ken)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 先端機能材料研究部・主幹研究員(定常)

研究者番号: 10401209

(2) 連携研究者

河裾 厚男 (KAWASUSO, Atsuo)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 先端機能材料研究部・上席研究員(定常)

研究者番号: 20354946

(3) 連携研究者

前川 雅樹 (MAEKAWA, Masaki)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 先端機能材料研究部・主幹研究員(定常)

研究者番号: 10354945

(4) 連携研究者

白澤 徹郎 (SHIRASAWA, Tetsuroh)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・物質計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号: 80451889