

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：82626

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24651110

研究課題名(和文) 実時間観察可能な陽電子顕微鏡の開発

研究課題名(英文) Development of a positron microscope for real-time imaging

研究代表者

小川 博嗣(Ogawa, Hiroshi)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測フロンティア研究部門・主任研究員

研究者番号：60356699

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：電子線形加速器による高強度陽電子ビームを用いた再放出型の陽電子顕微鏡(PRM)の開発を行った。光電子顕微鏡の静電レンズ系を用いてPRMを構築するとともに、電子線形加速器で生成した低速陽電子ビームをPRMに適用するため、磁場終端デバイスを用いた陽電子ビーム集束システムを開発した。その結果、過去のPRM研究の方法と比較して、PRMへの陽電子入射ビーム強度を増大でき、PRMの画像取得時間を短縮できることを示した。

研究成果の概要(英文)：A positron re-emission microscope (PRM) was developed in combination with a high intensity slow-positron beam produced by using an electron linear accelerator (LINAC). The PRM was constructed using the electrostatic lens system of a photoelectron emission microscope. In order to apply the slow positron beam generated using the LINAC to the PRM, the positron beam focusing system with a magnetic field termination device was also developed. The result indicated that the positron incident beam intensity to the PRM can be increased, and the acquisition time of the PRM can be shortened as compared with the previous PRM studies.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：量子ビーム科学・量子ビーム科学

キーワード：陽電子 顕微鏡 格子欠陥

1. 研究開始当初の背景

材料中のサブ nm サイズの格子欠陥は特性に大きな影響を与えるが、その分布を実時間で観察できる分析法があれば、材料劣化現象の解明や次世代機能材料の開発に非常に有用である。原子レベルの空孔型欠陥分布の測定に関して陽電子顕微鏡は電子顕微鏡に比べて優位性があり、他の計測手法では観察できない顕微鏡像が取得できる。陽電子顕微鏡には、3つのタイプ(走査型、再放出型、透過型)があるが、特に走査型陽電子顕微鏡では実用的な開発が行われ、欠陥の空孔サイズ情報のマッピングによる材料評価の応用研究が展開されている。

一方、再放出型の陽電子顕微鏡 (PRM ; Positron Re-emission Microscopy) は、走査型と比較して空間分解能が1桁以上良く、結像光学系のため撮像時間の高速化が可能で、陽電子仕事関数を反映したコントラスト像が取得できるという特徴をもつ。しかしながら、過去のPRMの研究では、陽電子源として放射性同位元素 (RI : Radioisotope) を用いていたため陽電子源強度が不十分で画像を取得するのに長時間必要であり、実用化のためには画像取得時間の大幅な短縮が求められている。この技術課題を解決するため、本研究では、電子線形加速器による高強度陽電子パルスビームを用いたPRM装置の開発を行った。

2. 研究の目的

(1) PRM装置を光電子顕微鏡の静電レンズ系を用いて開発する。光電子顕微鏡の結像光学系で電荷の符号が異なる陽電子を結像させるためにPRMの各電極への最適な印加電圧の条件を軌道計算により求め、PRMのシステムを構築する。

(2) 電子線形加速器で生成した低速陽電子ビームをPRMに適用するため以下の研究を行う。

本研究で開発するPRMの最大視野 (~ 0.3mm) に比べ、電子線形加速器により生成した低速陽電子ビーム径は直径約 10mm と大きいため、ビームを集束して陽電子フラックス密度 ($e^+/\text{sec}/\text{mm}^2$) を如何に増大できるかが重要な開発要素の1つである。

電子線形加速器により低速陽電子ビームを発生させる場合、陽電子発生部周辺では、放射線バックグラウンドのレベルが高いためソレノイド磁場を用いて低バックグラウンドの実験室まで低速陽電子ビームを輸送している。無磁場空間に置かれたPRM装置の試料にソレノイド磁場から陽電子ビームを引き出す時に引き起こされるエミッタンスの増大を抑制し、陽電子ビームの集束径を最小にする手法を開発する。

ソレノイド磁場で輸送された低速陽電子 ($E \sim 10\text{eV}$) をPRM装置の試料に加速して入射するため、試料を ~5kV にフローティング

する。この時、PRM装置全体もフローティングさせる必要があるため、PRMの各電極への高圧電源等を含むPRMシステム全体をフローティングして構築する方法を開発し、当装置によりPRMの画像取得を行う。

3. 研究の方法

(1) PRM装置の陽電子軌道計算を行う。具体的には、PRMの試料表面から再放出された陽電子が対物レンズ、投影レンズで構成される静電レンズを通過し、マイクロチャンネルプレート (MCP) に結像するまでの陽電子軌道を計算し、各静電レンズへの最適な印加電圧を探索する。この結果に基づき、PRMの高圧電源のシステムを構築する。

(2) PRMの開発を効率的に推進するため、既存の低速陽電子ビームラインを分岐してPRM専用のビームラインを設計し構築する。

(3) 陽電子の試料上でのフラックス密度を増大させるために、陽電子集束レンズおよび磁場終端デバイスで構成される陽電子集束システムを陽電子軌道計算により設計および製作する。

陽電子集束システムを用いて低速陽電子ビームを集束し、試料位置に設置したMCP検出器により集束ビーム径の評価を行う。

(4) PRM装置を低速陽電子ビームラインおよび真空排気系からフローティングさせ、PRMの結像光学系が陽電子集束システムの電場および磁場の影響を受けない様にPRMのシステムを設計し、構築する。

4. 研究成果

(1) PRM装置の陽電子軌道計算をイオン光学系シミュレーションソフト SIMION を用いて行った (図1)。静電レンズ系は STAIB 社製光電子顕微鏡 PEEM350-10 を基に計算した。試料表面から再放出された陽電子 (図1青線) を 10keV に加速し、陽電子像を対物レンズおよび投影レンズにより拡大し MCP に結像する条件を探索し、各レンズへの印加電圧を決定

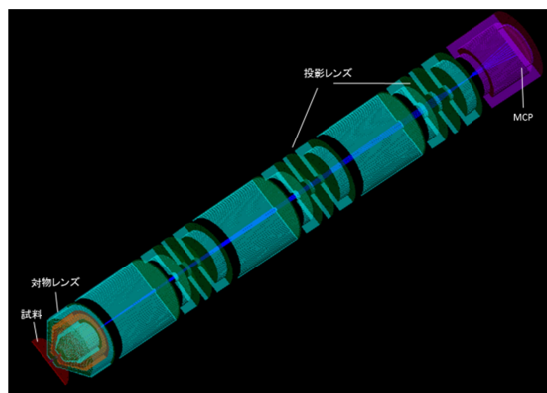


図1 再放出型陽電子顕微鏡 (PRM) の SIMION による陽電子軌道計算例

することができた。この結果にもとに各静電レンズへの高圧電源システムを構築した。

(2) 本研究を推進するため既存の低速陽電子ビームラインに分岐ポートを設置し、PRM 専用のビームラインを構築した(図2)。ソレノイド磁場中を輸送された陽電子を偏向角 25 度で既存の陽電子ビームラインとビーム輸送をスイッチングできることを MCP 検出器により確認した。

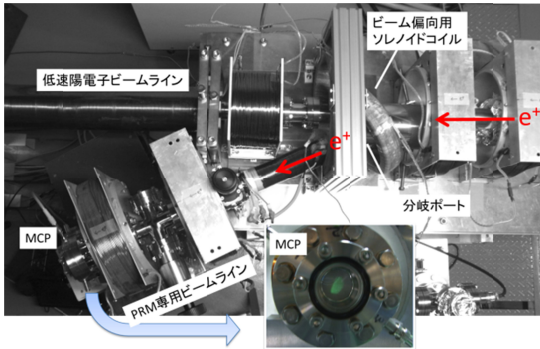


図2 PRM 専用低速陽電子ビームライン

(3) ソレノイド磁場($B = 7\text{mT}$)中を輸送された低速陽電子を無磁場空間に設置されたPRM の試料に加速して集束する時に、ソレノイドの終端磁場によりキックされ、横方向のエネルギー広がり E が増加される。陽電子ビーム集束径を小さくするためには、 E の増大を抑制する必要がある。そこで、ソレノイド終端磁場の集束ビーム径に与える影響が最小になる様に軟磁性体スリットで構成される磁場終端デバイスおよびビーム集束レンズを設計した(図3)。 E の増加量は、磁場終端デバイスのスリット間隔 w と引き出し磁場 B で与えられる(図4)。

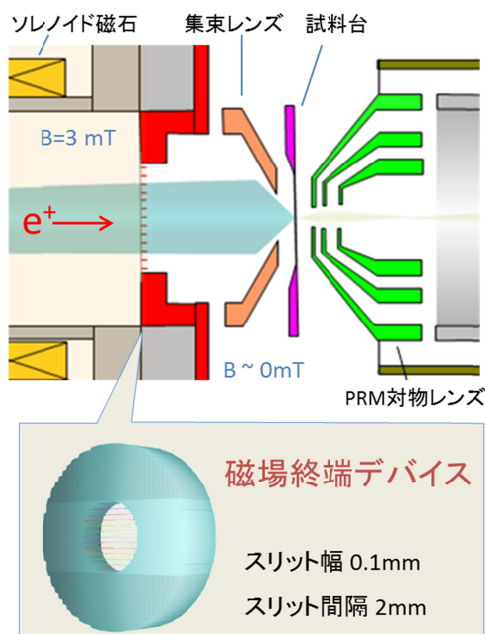


図3 磁場終端デバイスおよびビーム集束レンズ

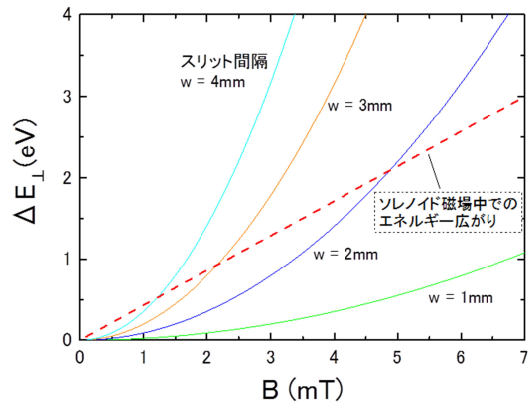


図4 磁場終端デバイス(スリット間隔 w) 通過時の引き出し磁場 $B(\text{mT})$ と横方向エネルギー広がり E の関係

ソレノイド磁場中での横方向のエネルギー広がりと比較して、 E の増加量が小さいスリット間隔 2mm (スリット幅 0.1mm 、厚み 2mm) の磁場終端デバイスを用いて得られるビーム集束径を3次元有限要素法解析ソフトウェア Amaze を用いて計算した(図5)。ソレノイド磁場から 3mT でビームを 5keV に加速して引き出した時に、 1mm 以下のビーム径で集束できることが分かった。このことは、本研究の PRM 装置の最大視野($\sim 0.3\text{mm}$)への陽電子入射強度を従来の PRM 研究と比較して、1桁以上増加出来ることを示唆している。

この設計を基に、軟磁性体スリットをレーザー加工により製作した。また、集束レンズおよび磁場を 7mT から 3mT に断熱的に減少させるソレノイドコイル系を作成し、PRM 装置の入射部に設置した。低速陽電子ビームを磁場終端デバイスによりソレノイド磁場から引出し、静電レンズにより集束した。PRM の試料位置に設置した蛍光面付 MCP によりビーム集束を測定し(図6)、入射ビーム径の約 $1/10$ に集束できることを確認した。

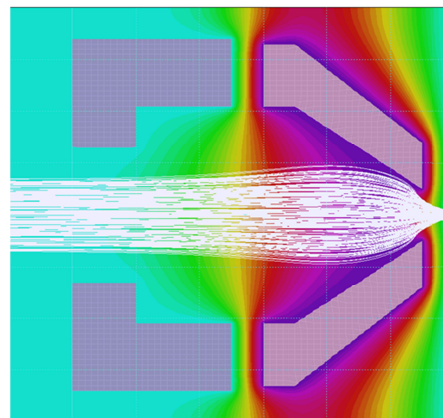


図5 陽電子ビーム集束系の軌道計算

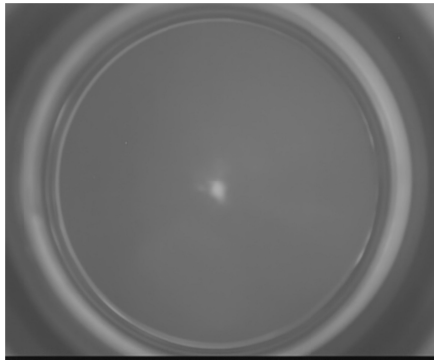


図6 集束陽電子ビームのMCPによる観察

(4) PRM 装置をフローティングするために、真空ポンプ系および陽電子ビームラインと絶縁フランジを介して接続した。また、PRM 装置の架台を碍子を用いて絶縁し、約 10kV の耐圧でフローティングできるシステムを構築し、陽電子ビームラインに接続した(図 7)。

陽電子ビーム集束の実験データをもとに PRM 装置の最大視野(~0.3mm)への陽電子ビーム強度を換算すると、本研究で開発した装置により、過去の PRM 研究と比較して数倍以上のビーム強度が得られることが分かった。今後、ビーム輸送系のソレノイドコイルからの PRM 装置への漏洩磁場対策等の改良を行うことにより、ビーム集束径をシミュレーション結果に近づけることが出来ると考えられ、従来と比べて PRM 画像取得時間の 1 桁以上の短縮が期待できる。

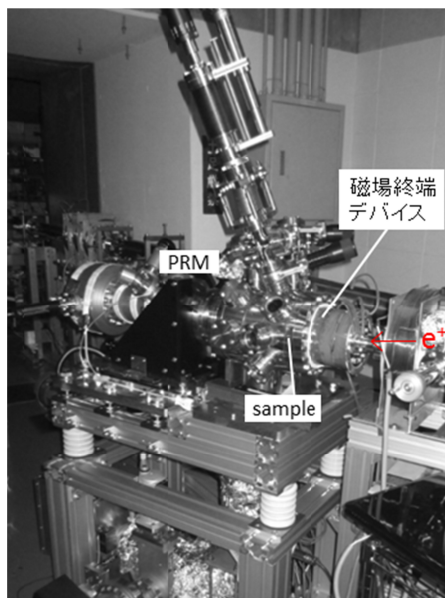


図7 本研究で構築した再放出型陽電子顕微鏡 (PRM)

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)

H. Ogawa, A. Kinomura, N. Oshima, R. Suzuki, B. E. O'Rourke, Design Study of Linear Accelerator-based Positron Re-emission Microscopy, JPS Conference Proceedings, 査読有, Vol. 1, 2014, 014006-1-014006-4, DOI: 10.7566/JPSCP.1.014006

〔学会発表〕(計 4 件)

小川 博嗣, 木野村 淳, 大島 永康, 鈴木 良一, B. E. O'Rourke, 陽電子/光電子顕微鏡の開発, 第 26 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 2013 年 1 月 12 日, 名古屋大学 (名古屋市)

小川 博嗣, 木野村 淳, 大島 永康, 鈴木 良一, B. E. O'Rourke, 電子リニアックを用いた再放出陽電子顕微鏡の開発, 第 50 回アイソトープ・放射線研究発表会, 2013 年 7 月 4 日, 東京大学 (文京区)

小川 博嗣, 木野村 淳, 大島 永康, 鈴木 良一, B. E. O'Rourke, Design Study of Linear Accelerator-based Positron Re-emission Microscopy, The 12th Asia Pacific Physics Conference of AAPPs (APPC12), 2013 年 7 月 18 日, 幕張メッセ国際会議場 (千葉市)

小川 博嗣, 木野村 淳, 大島 永康, 鈴木 良一, B. E. O'Rourke, Development of a beam focusing device for positron re-emission microscopy, 2nd Japan-China Joint Workshop on Positron Science (JWPS 2013), 2013 年 12 月 21 日, 産業技術総合研究所 (つくば市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小川 博嗣 (OGAWA, Hiroshi)

(独)産業技術総合研究所・計測フロンティア研究部門・主任研究員

研究者番号: 6 0 3 5 6 6 9 9

(2) 研究分担者

木野村 淳 (KINOMURA, Atsushi)

(独)産業技術総合研究所・計測フロンティア研究部門・上級主任研究員

研究者番号: 9 0 2 2 5 0 1 1

(3) 連携研究者

鈴木 良一 (SUZUKI, Ryouichi)

(独)産業技術総合研究所・計測フロンティア研究部門・上席研究員

研究者番号: 8 0 3 5 7 3 0 0

(4) 連携研究者

大島永康 (OSHIMA, Nagayasu)

(独)産業技術総合研究所・計測フロンティア研究部門・主任研究員

研究者番号: 0 0 3 9 1 8 8 9