

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K20608

研究課題名（和文）光陽電子分光の開拓研究

研究課題名（英文）Study on photo-positron spectroscopy

研究代表者

満汐 孝治（Michishio, Koji）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員

研究者番号：10710840

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、電子の反粒子である陽電子を固体表面に入射し、表面に局在した陽電子を光で照射して引き出す、「光陽電子」放出の観測を目的とする。寿命の短い表面局在陽電子を真空中に引き出すためには、ナノ秒パルスレーザーが必要があり、これに同期可能な短パルス状陽電子ビームを開発した。さらに、得られたパルス状陽電子ビームとパルスレーザー光線を試料表面に同時照射するシステム及び光陽電子分光装置を開発し、光陽電子放出の観測に必要な実験技術を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光陽電子放出は固体最表面で起こる現象であり、光陽電子の運動量・エネルギー測定を通じて、固体表面の電子状態を調べる分析法への適用が期待される。また、この技術を応用して、励起光の波長・時間構造制御による低エネルギー・超短パルス陽電子ビームの発生が期待でき、陽電子を用いる分析技術や学術研究の発展に貢献できる。本研究課題では、光陽電子放出現象の観測に不可欠な実験技術及び光陽電子分光装置を開発した。今後、開発した実験装置を用いて、光陽電子による表面分析法や新しい陽電子ビーム制御技術が拓けると期待される。

研究成果の概要（英文）：In the present study, we have developed an experimental technique to observe the emission of photo-positrons caused by irradiating localized positrons on a surface with light. To extract the short-lived surface positrons into a vacuum, we developed a pulsed positron beam synchronized with a pulsed laser, which can serve a sufficient photon flux density for the photo-positron emission. We also constructed a system, that irradiates a surface with the positron and laser beams simultaneously, and a photo-positron spectrometer.

研究分野：量子ビーム科学

キーワード：陽電子 レーザー分光 表面状態 光電子放出

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

固体表面にあるエネルギーの光を照射すると、そのエネルギーを受け取った固体中の電子が真空中へ放出される。この現象は光電効果として古くから知られており、光センサや電子銃の光陰極、また光電子の運動エネルギーを測定して固体中の電子状態を調べる光電子分光などに用いられている。

研究代表者は、電子の反粒子である陽電子を用いて、光電子分光と類似の研究ができないかと考えた。低エネルギー(<10 keV)の陽電子を固体に入射すると、様々なエネルギー散逸過程を経た後、熱的に拡散され、その一部は表面に戻り得る。金属や半導体の場合には、バルク中での陽電子の基底準位は真空準位よりも高い場合が多く、表面近傍の陽電子が再放出されたり、また表面上の鏡像ポテンシャルに捕獲されて局在化したりする。表面に局在した陽電子を光で励起して真空中に引き出すことができれば、その陽電子(光陽電子と呼ぶ)のエネルギー・運動量分光によって表面の電子状態を調べることができる。この光陽電子分光は、「最表面」に局在する陽電子を選択的にプローブする手法であり、ユニークな表面分光法としての応用が期待される。また、励起光の波長や時間構造を変化させることで光陽電子の放出特性を制御できると考えられ、低エネルギー・超短パルス陽電子ビームの発生技術にも繋がる。

2. 研究の目的

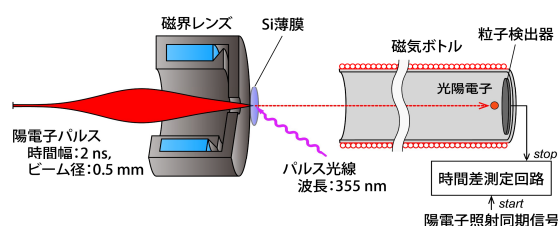
本研究では、表面に局在した陽電子を光照射によって真空中へ引き出す、光陽電子放出という新しい実験技術の実現を目的とする。このために、固体標的への陽電子とレーザー光の同時照射技術や光陽電子分光装置を新たに開発し、光陽電子放出現象の観測とその分光学的な知見を蓄積する。さらに、光陽電子の運動エネルギー測定を利用した表面分光法や、光による陽電子ビーム制御技術の応用展開についても検討する。

3. 研究の方法

(1) 短パルス状陽電子ビームの開発

光陽電子放出を観測する上での最大の技術課題は、陽電子ビームの強度が一般的に弱く(0.1 pA - 1 pA)、また表面に局在する陽電子が極めて短い寿命(0.5 ns)で電子と対消滅するため、観測に十分な光陽電子収量が得られないことである。この課題を解決するためには、ピーク出力の高いナノ秒パルスレーザーを用いて、これにナノ秒パルス状陽電子ビームを同期させる必要がある。そこで、まずはパルスレーザー光源とパルス陽電子源の開発を行った。

レーザー光源には、産業技術総合研究所(産総研)に保管されていた Q-S.W. Nd:YAG レーザー励起と色素レーザーを用いた。これらを整備して、光陽電子放出の発生に必要な紫外パルス光(波長~400 nm)の発振を確認した。また陽電子源には、産総研の陽電子ビーム施設から供給される電子加速器ベース低速陽電子ビームを用いた。この陽電子ビームのパルス幅は 2 μ s であるため、ナノ秒パルスレーザーとマッチングさせるためには短パルス化する必要がある。そこで、陽電子ビームをバッファーガス冷却式電磁トラップで蓄積して、短パルスビームとして引き出す技術を開発した。また、パルス化効率を向上させるために、バッファーガスに替わって半導体基板で陽電子を蓄積する技術の開発にも取り組んだ。



(2) 陽電子ビームの時空間圧縮

光陽電子収量の向上を目的として、電磁トラップから引き出されるパルス状陽電子ビームをさらに時空間圧縮する技術の開発にも取り組んだ。時間圧縮用のポテンシャルバンチャーと空間圧縮用の磁界レンズを設計・製作して、その性能を評価した。

(3) 光陽電子分光装置の開発

図 1 に示す分光装置の開発にも取り組んだ。当初は、反射型配置(陽電子入射面と同じ面で光陽電子を発生)での実験を計画していたが、軌道シミュレーションによる検証の結果、光陽電子の検出器への輸送効率が低いことが判明したため、薄膜標的を用いた透過型配置(陽電子入射面の裏面で光陽電子を発生)に切り替えた。この実験配置では、100%の輸送効率で光陽電子を検出器まで導くことができる。分光装置は、薄膜標的、レーザ

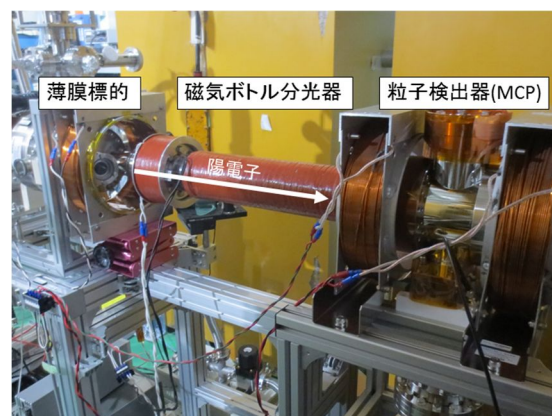


図 1. (上)光陽電子分光実験の概念図。(下)本研究で製作した透過型光陽電子分光装置。

一導入窓、磁気ボトル分光器、粒子検出器で構成した。発生する光陽電子を磁気ボトルで捕集・ドリフトさせ、粒子検出器で検出する。標的から検出器までの飛行時間を測定することで、光陽電子の運動エネルギーの情報を得ることができる。

4. 研究成果

(1) 短パルス状陽電子ビームの開発

光陽電子分光実験を実現するためには、パルスレーザーに同期可能なパルス状陽電子ビームが必要不可欠であり、まずはその発生技術の開発に取り組んだ。マイクロ秒時間幅の陽電子ビームを窒素バッファガス冷却式の電磁トラップで蓄積し、ナノ秒パルスとして引き出す技術を開発した。MOS-FET スイッチを使った高速電場操作でトラップから陽電子を引き出すことで、繰返し短パルス状ビーム(パルス幅 10 ns, 周波数 10 Hz)を発生した。また、蓄積した陽電子に回転高周波を印加することで、ビーム径を 2 mm 程度に圧縮して引き出すことも可能になった。しかし、本研究で得られた陽電子ビームのパルス化(トラップ)効率は、通常用いられる RI ベース陽電子ビームのそれと比較して、1/5 程度と低いことが判明した。調査の結果、電子加速器からの一次陽電子ビームの単色性が悪いために、窒素ガス冷却の効率が低下していたことが分かった。

パルス化効率を改善する方策として、窒素バッファガスに替わって半導体(SiC)基板を用いて陽電子を蓄積・パルス化する新手法の開発にも取り組んだ。SiC は低エネルギー陽電子(< 1 keV)に対する減速効率が高いため、単色性の悪いビームの減速材として最適である。既に、CERN の GBAR グループにより試験が行われ、高いトラップ効率が確認されている。我々も SiC を用いた陽電子蓄積法の開発に取り組み、パルス化効率を大幅に改善させることに成功した。

(2) 陽電子ビームの時空間圧縮

レーザー光と陽電子ビームのマッチングを改善するために、電磁トラップから引き出した陽電子に変調電圧を印加して、パルス圧縮(バンチング)する技術を開発した。変調電圧の振幅やタイミングを最適化することで、100%の効率でパルス幅を 10 ns から 2 ns に圧縮することに成功した(図 2(左))。また、磁界レンズを用いて、初期ビーム径 2 mm、加速エネルギー 5 keV の陽電子ビームを焦点標の上で 0.5 mm にまで圧縮することにも成功した(図 2(右))。これらの開発により、陽電子数密度が標的上で 80 倍向上し、光陽電子の収量が飛躍的に改善するものと期待される。

(3) 光陽電子分光装置の開発

光陽電子分光装置(図 1(下))を構築して、産総研の陽電子ビームラインに接続した。標的には、SiC の薄膜標的を用い、パルス状陽電子ビームの照射試験を行った。この結果、SiC から再放出された陽電子を検出することができた。検出された信号の飛行時間は予測される再放出陽電子の飛行時間と矛盾がなく、測定システムが正常に動作することを確認できた。また、陽電子とレーザーの同期システムを構築し、標的への同時照射が可能となった。

以上の通り、光陽電子分光に必要な実験技術の開発に成功した。当初の計画では、開発した装置を用いて、光陽電子放出の観測とその分光実験を展開する予定であったが、Nd:YAG レーザーの故障が頻発した影響で実験が大幅に遅延し、期間内に測定を終えることができなかった。レーザーの修理が完了し次第、引き続き測定を行う予定である。

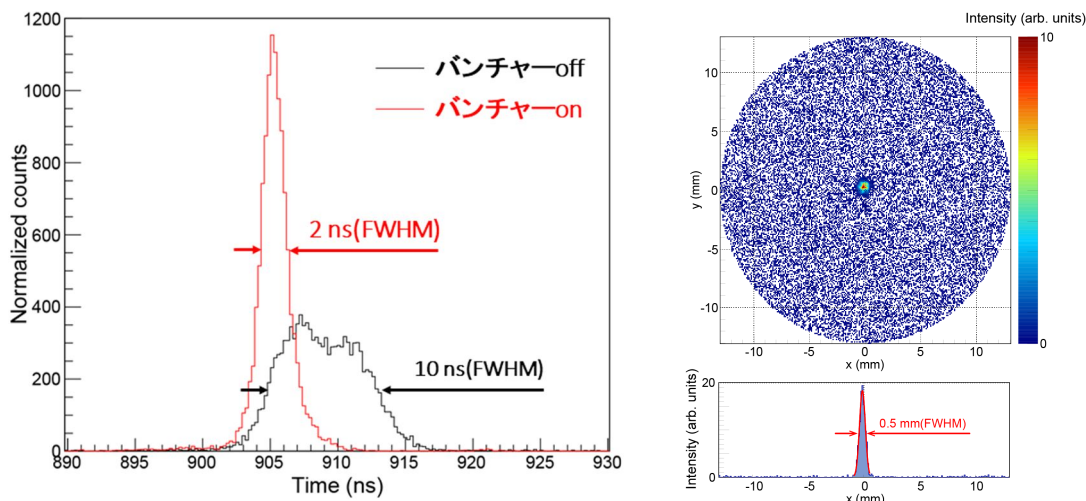


図 2. (左)ポテンシャルバンチャーによって圧縮した陽電子の時間プロファイル、(右)磁気レンズによって圧縮した陽電子の空間プロファイル。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 満汐孝治、久間晋、長嶋泰之	4. 巻 17
2. 論文標題 ポジトロニウム負イオンのしきい光脱離分光	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 陽電子科学	6. 最初と最後の頁 23-28
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 満汐 孝治	4. 巻 60
2. 論文標題 低速陽電子ビーム分析技術に関する調査研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 計測と制御	6. 最初と最後の頁 228 ~ 235
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11499/sicejl.60.228	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Higaki Hiroyuki、Michishio Koji、Hashidate Kaori、Ishida Akira、Oshima Nagayasu	4. 巻 13
2. 論文標題 Accumulation of LINAC based low energy positrons in a buffer gas trap	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 066003 ~ 066003
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1882-0786/ab939f	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 3件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 N. Oshima, K. Michishio, B. E. O'Rourke
2. 発表標題 Current status of AIST slow positron beam facility
3. 学会等名 12.5th Interational Workshop on Positron and Positronium Chemistry（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 檜垣浩之、満汐孝治、橋立佳央理、石田明、大島永康
2. 発表標題 電子線形加速器を用いた電子陽電子プラズマ実験に向けて
3. 学会等名 日本物理学会2021秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Michishio, S. Kuma, Y. Nagata, L. Chiari, T. Iizuka, R. Mikami, T. Azuma, and Y. Nagashima
2. 発表標題 Photodetachment threshold spectroscopy of the positronium negative ion -first determination of the electron affinity of positronium
3. 学会等名 12.5th International Workshop on Positron and Positronium Chemistry (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 満汐孝治、大島永康、オロークブライアン、鈴木良一
2. 発表標題 産総研 低速陽電子ビーム利用施設
3. 学会等名 京都大学複合原子力科学研究所専門研究会 「陽電子科学とその理工学への応用」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 満汐孝治
2. 発表標題 ポジトロニウム負イオンの光脱離分光と高品質ポジトロニウムビーム技術への展開
3. 学会等名 2021年度量子ビームサイエンスフェスタ (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 満汐孝治、檜垣浩之、石田明、大島永康
2. 発表標題 SiC減速材を用いた高効率陽電子トラップの開発
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大島永康、満汐 孝治、檜垣浩之、橋立佳央理、石田明
2. 発表標題 トラップを用いる電子加速器ベース低速陽電子のビーム制御技術
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 満汐孝治、大島永康、オロークブライアン、鈴木良一
2. 発表標題 産総研 低速陽電子ビーム利用施設
3. 学会等名 京都大学複合原子力科学研究所専門研究会 「陽電子科学とその理工学への応用」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 満汐孝治、檜垣浩之、橋立佳央理、石田明、大島永康
2. 発表標題 リニアックベース陽電子ビームの蓄積・制御とその応用
3. 学会等名 京都大学複合原子力科学研究所専門研究会 「陽電子科学とその理工学への応用」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Koji. Michishio, Brian Eugene O'Rourke, Yoshinori Kobayashi, Ryoichi Suzuki, Nagayasu Oshima
2. 発表標題 Current status of the AIST slow positron facility
3. 学会等名 15th International Workshop on Slow Positron Beam Techniques & Applications (SLOPOS-15) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 満汐 孝治、小林 慶規、オローク・ブライアン、鈴木 良一、大島 永康
2. 発表標題 産総研 低速陽電子ビーム利用施設の現状 -寿命測定装置開発とビームライン整備-
3. 学会等名 第56回アイソトープ・放射線研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大島 永康、満汐 孝治、オローク・ブライアン、鈴木 良一
2. 発表標題 産総研電子加速器ベース低速陽電子利用施設の現状
3. 学会等名 第16回日本加速器学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koji Michishio, Chiari Luca, Yugo Nagata, Fumi Tanaka, Taro Iizuka, Nagayasu Oshima, Yasuyuki Nagashima
2. 発表標題 A high-quality and energy-tunable positronium beam and its applications
3. 学会等名 4th Japan-China Joint workshop on Positron science (JWPS2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 桧垣浩之、満汐孝治、橋立佳央理、石田明、大島永康
2. 発表標題 線形加速器を用いた低エネルギー陽電子蓄積実験
3. 学会等名 第36回 プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 満汐 孝治、オローク・ブライアン、大島 永康
2. 発表標題 産総研・低速陽電子ビーム施設
3. 学会等名 2019年度量子ビームサイエンスフェスタ
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関