

1. 背景

半導体技術の進歩は主に集積回路の微細化によって支えられてきましたが、今後 10 年～20 年のうちにトランジスタのサイズはもはや原子サイズにまで縮小すると考えられており、従来の半導体技術は限界を迎えつつあります。そこで、これまでとは全く異なる原理に基づいたデバイス開発によるブレークスルーが試みられています。その一つとして注目されているのが、電子の磁気的特性である「スピン」を用いた「スピントロニクス」です。スピントロニクスでは、「上向き」と「下向き」の 2 通り存在する電子のスピンを、デジタル回路で用いられる 2 進法の「0」「1」として利用します。例えばハードディスクドライブの記録密度はスピントロニクスにより飛躍的に向上しました。また、電流を全く使わずにデジタル情報を伝達することもできるため、電力消費を大幅に減らせる電子機器の開発が期待されています。スピントロニクスで注目される最先端の磁性材料は、電子デバイスへの応用を念頭に薄膜として利用されることが多いため、材料表面や異なる材料同士を接合した界面といった特定部位に存在する電子スピンの検出手法を開発することが重要視されています。これまでも各種の中性子やイオンビーム、放射光などの量子ビームを用いた方法が開発されてきましたが、測定条件や材料のさらなる多様化に対応すべく、新しい検出手法が開発が望まれていました。

電子の反粒子である陽電子は、物質中の電子と結合するとガンマ線を放出して消滅します。このガンマ線を観測することで、消滅相手の電子の運動状態を調べることができます。これは「陽電子消滅法」として従来から材料の研究に利用されています。ところで、陽電子も電子と同様にスピンを持っています。放射性同位元素から発生した陽電子の場合、スピンの向きは上向きと下向きとで同数ではなく、偏りをもっているため、これを利用すると陽電子のスピンの向きを一方向に揃えた陽電子ビームを作ることができます(スピン偏極)。陽電子と電子の結合の起こり易さは互いのスピンの向きによって異なるという現象を利用すると、電子の運動状態に加えてスピンの向きも知ることができます。さらに照射する陽電子のエネルギーを制御することで、打ち込み深さを調節できるため、材料の表面や異なる物質との接合界面に存在する電子スピンの検出が可能になります。このように、陽電子を電子スピンの研究に使えるようにするためには、陽電子のスピンがなるべく一方向に揃っている「スピン偏極陽電子ビーム」の開発が課題でした。

2. 研究手法と成果

陽電子ビームは、放射性同位元素(一般的にはナトリウム-22 が使われる)から飛び出してくる陽電子を集めて形成しますが、高いスピン偏極率のスピン偏極陽電子ビームを開発するには次のような困難がありました。

強いビームをつくるためには、できるだけ多くの陽電子をスピンの向きに関係なく集める必要があるため、スピン偏極率が損なわれてしまいます。逆に、スピン偏極率を向上させようとスピンの向きを選別すると、陽電子ビームの強度が減ってしまいます。これまで、アメリカの研究グループが、陽電子ビーム強度の減少をいとわなければ、ナトリウム-22 線源を用いた場合にスピン偏極率を 66%まで増強することができるという報告していましたが、その強度は実用的なレベルではありませんでした。ナトリウム-22 線源を用いた場合の標準的な陽電子ビームの偏極率は、20%程度に留まっています。

そこで原子力機構では、十分なビーム強度を確保しながらも高いスピン偏極率のビームを得る方法として、もともとスピン偏極率の高い陽電子を放出する放射性同位元素を用いる方法を検討しました。様々な核種を検討した結果、最も適当なものがゲルマニウム-68 であることが判明しました。これはサイクロトロンと呼ばれる加速器によって、水素イオンビームを窒化ガリウムという材料に照射して生成するこ

とができます。ガリウム自体は融点の低い(29°C)金属ですが、これを窒化物にすることによって照射の熱にも十分耐えるように工夫し、図1に示すようなターゲットを組み上げて照射することで、ゲルマニウム-68 を生成しました(図 2)。これを線源として用いた結果、47%という高いスピン偏極率をもった陽電子ビームの開発に成功しました。また、ゲルマニウム-68 の半減期は 280 日と比較的長いため、水素イオンビームを照射し続けることで大量にゲルマニウム-68 を蓄積させ、陽電子ビームの強度をさらに向上させることも可能となりました。

実際に開発したスピン偏極陽電子ビームを、磁場によってスピンの向きを一方向に揃えた純鉄に打ち込み、ガンマ線を観測しました(図 3)。電子と陽電子は、スピンの互いに反対向き(反平行)の場合には結合して消滅し易く、逆に、互いのスピンの同じ向き(平行)のときには結合し難くなります。このように陽電子と電子のスピンの向きを変えてガンマ線の強度を調べたところ、スピンが平行な場合と反平行な場合では差が生じることが検出できました。この結果は、スピン偏極陽電子ビームを用いることで、物質中にある電子のうち、磁性を担う電子からのみスピンの情報を抜き出すことが可能であることを示しています。

3. 今後の期待

加速器で合成した放射性同位元素ゲルマニウム-68 を用いることで、通常の減速材を用いながらも高いスピン偏極率を持つ陽電子ビームの発生に成功しました。今後、スピン偏極陽電子ビームを用いた陽電子消滅法が、スピントロニクス開発に必要な新たな評価手法となることが期待されます。

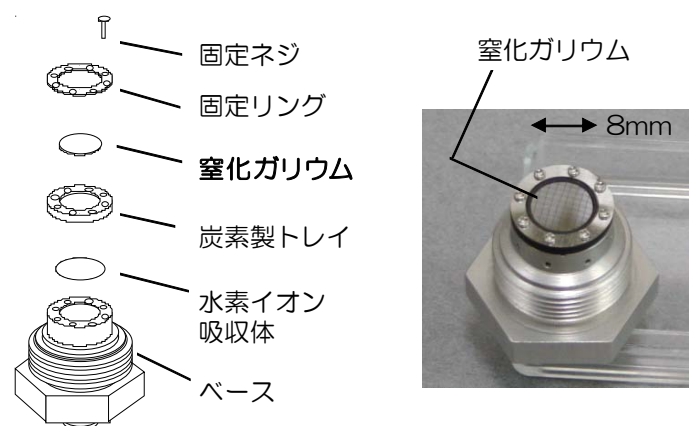


図1 開発したゲルマニウム-68 生成用窒化ガリウムターゲット

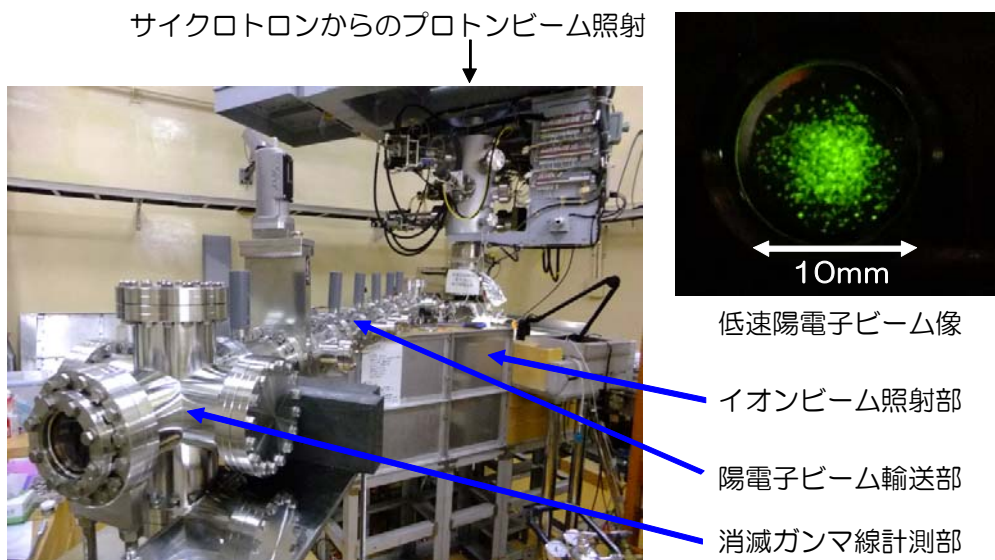


図2 開発したスピン偏極陽電子ビーム発生装置と、発生した陽電子ビーム像

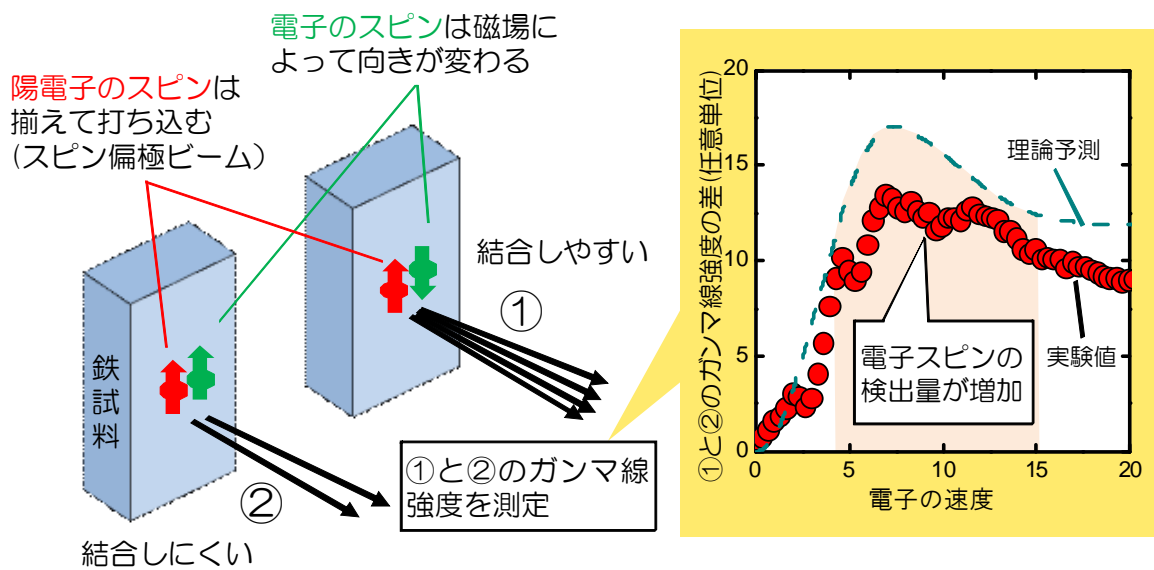


図3 磁化した鉄のガンマ線強度を測定した結果。磁場によってスピンの方向が変わる電子は、右のグラフのオレンジ色の部分の速度成分を持っている。結合しやすいスピンの向きに磁場をかけた場合には、その部分のガンマ線強度が増大した。これは磁性に関する電子スピンの検出量が増加したことを意味している。

本研究は JSPS 科研費 24310072 の助成を受けたものです。