

学位論文の要約

題目 空間反転対称性の破れた人工格子が示す超伝導ダイオード効果の極性制御と整流素子の実現

氏名 河原崎 諒

序論

現代のエレクトロニクスにおいて、半導体ダイオードは重要な役割を担っている。従来のダイオードは p 型と n 型の半導体を組み合わせて作られており、電流が流れる方向によって抵抗の大きさが異なるため、電流を一方向にだけ流す特性（整流作用）を持っている。従来のダイオードは、このような異なる種類の半導体を接合させる必要があるが、時間反転対称性と空間反転対称性の両方が破れている系では、このような接合は必要ない。Rikken らの研究により、物質の内部電場と外部磁場が直交するとき、電流の流れる向きによって電気伝導度に変化する非相反電荷輸送現象が生じることが判明した。このような非相反電荷輸送現象が、電気抵抗がゼロとなる超伝導体において観測されれば、エネルギー損失の少ない電子回路の実現が期待できる。

最近の研究で、対称性の低い層状超伝導物質においても非相反な電荷輸送現象が生じることが確認された。この非相反性は超伝導状態から常伝導状態に移る際の揺らぎ領域で桁外れに増大することが報告された。ところが、このような非相反性が生じるのが超伝導揺らぎ領域に限られていたために、整流比は実用化されているダイオードの 1% にも満たなかった。

我々の研究グループは、ニオブ(Nb)層、バナジウム(V)層、タンタル(Ta)層から構成される、空間反転対称性の破れた $[\text{Nb/V/Ta}]_n$ 人工格子が低温で超伝導転移することを確認し、薄膜面内で測定電流と垂直方向に外部磁場を印加すると、超伝導に流せる電流の最大値である臨界電流の大きさが電流方向に依存することを発見し、超伝導ダイオード効果を実証した。実証された超伝導ダイオードの抵抗比は 2000 を超えており、これまでに報告されていたものよりも桁外れに大きいことが判明した。さらに、この抵抗比は一般的な半導体ダイオードに匹敵する大きさであり、検波素子の高感度化や低消費電力の実現につながることを期待

される。

我々のグループにおける超伝導ダイオード効果の発見を契機として、そのメカニズムに関する理論研究も進められた。それによると、空間反転対称性の破れた超伝導体においては、電流方向と直行する面内磁場を印加することでクーパ対が有限の重心運動量を獲得し、その結果臨界電流が非相反になることが示された。さらに、空間反転対称性の破れた $[\text{Nb/V/Ta}]_n$ 人工格子においてヘリカル超伝導状態が実現しているなら、高磁場下で超伝導ダイオード効果の符号が反転することが示唆された。我々は、 $[\text{Nb/V/Ta}]_n$ 人工格子の高磁場での超伝導ダイオード効果を調べることによって、 $[\text{Nb/V/Ta}]_n$ 人工格子の超伝導状態を解明することを目指した。実験結果は、理論研究が示唆した通り、超伝導ダイオード効果の磁場誘起極性反転が観測された。実験結果の詳細は 1 に示す。

次に、これまでに空間反転対称性が破れた超伝導体が超伝導ダイオード効果を示すことは報告されてきたが、実際に整流素子として利用できるかどうかを検証した研究は存在しなかった。そこで、我々は空間反転対称性が破れた $[\text{Nb/V/Ta}]_n$ 人工格子に外部から交流電流を印加したときの整流作用を調べた。本研究により、空間反転対称性の破れた超伝導体を整流素子として活用できることが判明した。実験結果については 2 に詳述する。

1. 超伝導ダイオード効果の磁場誘起極性振動

本研究では、理論研究で提案されたヘリカル超伝導状態が実現しているかどうかを確認するために、以前の研究よりも低温かつ高磁場下での超伝導ダイオード効果の磁場依存性を調べた。測定方法は、空間反転対称性の破れた $[\text{Nb/V/Ta}]_n$ 人工格子の薄膜面内で、測定電流と垂直方向に外部磁場を印加したときの臨界電流の大きさを調べた。その結果、理論研究が示唆していた通り、磁場の増加に伴って超伝導ダイオード効果の極性が反転することが明らかになった。

しかしながら、ヘリカル超伝導状態に起因して符号反転が生じるのであれば、推定上のパウリ限界磁場である 6 T 付近で起こるが、これは実験で観測された磁場よりもはるかに大きい。したがって、観測された符号の反転は、理想的な二次元ヘリカル超伝導超伝導状態のクロスオーバーでは説明できない。しかし、多層ラシュバ系では軌道対破壊効果によって様々な有限運動量ペアリング状態が生じることも知られており、その場合クロスオーバー磁場はパウリ限界磁場よりはるかに低い可能性は十分に考えられる。もう一つの可能性として、渦ラチェ

ット効果も考えられる。実際に、高磁場においては磁束フローに起因する電気抵抗の増大が観測された。したがって、超伝導ダイオード効果の極性振動には、多層ラッシュバ系での軌道対破壊効果と超伝導磁束渦のダイナミクスの両方が関与している可能性がある。本研究は、空間反転対称性の破れた超伝導 $[\text{Nb/V/Ta}]_n$ 人工格子の電子状態を解明するための重要な一歩として位置づけられる。

2. 空間反転対称性の破れた $[\text{Nb/V/Ta}]_n$ 超伝導人工格子の整流効果

本研究では、超伝導ダイオード効果を示す空間反転対称性が破れた超伝導体が、実際に整流素子として利用できるかどうかを検証した。測定には、これまで超伝導ダイオード効果の研究に使用してきた $[\text{Nb/V/Ta}]_n$ 超伝導人工格子を用いた。本測定では、空間反転対称性が破れた $[\text{Nb/V/Ta}]_n$ 超伝導人工格子に外部から100kHzの交流電流を印加したときの整流電圧について調べた。その結果、外部磁場を印加することで、 $[\text{Nb/V/Ta}]_n$ 超伝導人工格子が整流素子として利用可能であることが確認された。また、1の結果を裏付けるように、整流電圧の大きさと極性は印加する磁場の大きさによって変調できることが判明した。本研究は、空間反転対称性の破れた超伝導体を検波素子の高感度化や低消費電力デバイスとして活用するための一助となると考えられる。