半導体量子ドットを用いた超伝導ダイオード

[1] 要旨

超伝導ダイオード効果とは超伝導電流の最大値(臨界電流)が向きによって異なる現象であり、エ ネルギーロスのない整流素子への応用面から注目されている。最近、半導体2重量子ドットに3個 の超伝導電極を接続したデバイスが研究され、高いダイオード効果を示すことがわかった。ダイオ ード効果の増大は、超伝導位相の2次元空間における特異点(ディラック点)に起因する。

[2] 本文

超伝導電流の最大値 (臨界電流) が向きによって異なるダイオード効果が盛んに研究されている。 従来の半導体回路でのpn接合と異なり、超伝導ダイオードではエネルギーロスがない利点がある。 空間反転対称性のない超伝導体に磁場をかけて時間反転対称性も壊すと、ダイオード効果が現れる [1]。常伝導体を超伝導体で挟んだジョセフソン接合では、スピン軌道相互作用と磁場の両者によっ てダイオード効果が生じる [2]。最近では、2つのジョセフソン接合をコヒーレントに結合させた 3端子系において、一方の接合での超伝導体の位相差を 0, π以外に固定したとき、他方の接合を流 れる超伝導電流がダイオード効果を示すことが報告されている [3]。

最近、慶應義塾大学理工学部の研究グループは、2個の半導体量子ドットに3個の超伝導電極を 接続したデバイスについて理論計算を行い、高効率のダイオード効果が生じることを見出した。ダ イオード効果の増大は、超伝導位相の2次元空間における特異点(ディラック点)に起因する。こ の成果は、日本物理学会が発行する英文誌 Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ) の2025年5 月号に掲載された。

同グループが調べたモデルを図1左に示す。このデバイス構造は文献[3]のそれに類似し、超伝導 体 *L* と *R1* 間の位相差 $\varphi_1 = \phi_L - \phi_{R1}$ 、および *L* と *R2* 間の位相差 $\varphi_2 = \phi_L - \phi_{R2}$ を独立に制御するこ とができる。文献[3]とは異なり、半導体量子ドットを採用した理由は、(i) 量子ドットではエネル ギーが離散化されるので解析計算が可能となり、ダイオード効果の増大機構を詳細に議論できる、(ii) エネルギー準位 (ϵ_1, ϵ_2) を電気的に制御できるため、実験での検証が容易であるためである。 ダイオード効果の原理は以下の通りである。超伝導体のエネルギーギャップ Δ_0 よりも低エネルギーの電子/ホールが量子ドットから超伝導体に入射するとホール/電子となって反射される (アンドレーフ反射)。2つの超伝導体に挟まれた量子ドットではアンドレーフ反射が繰り返され、「アンドレーフ束縛状態」が作られる。図1のモデルでは、超伝導体 *L*を通じて 2つのアンドレーフ束縛状態がコヒーレントに結合し「アンドレーフ分子」が形成される。超伝導体 *R1* に流れ出る超伝導電流 *L*, ϵ_2 の両者に依存する [時間反転の関係式*L*($-\phi_1, -\phi_2$) = $-l_1(\phi_1, \phi_2)$ が成立]。 $\phi_2 \neq 0, \pi$ のときに *L*($-\phi_1, \phi_2$) まなるので、*L*がダイオード効果を示し得る。では、その効率を上げる条件は何であろうか。

量子ドット中の電子間相互作用*U*が無視できるとき、Bogoliubov-de Gennes 方程式を解くと4つの アンドレーフ準位 ± E_1 , ± E_2 (0 ≤ E_1 ≤ E_2)が得られる。それを $\varphi_1 - \varphi_2$ 空間で図示したのが図1の 右図である。この図では量子ドット中のエネルギー準位を $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0$ (フェルミ準位)に選んでい るが、この時空間内の2点で $E_1 = 0$ となり、その近傍で± $E_1(\varphi_1, \varphi_2)$ が円錐状の分散関係(ディラッ クコーン)を示す。



図 1. (左図) 半導体 2 重量子ドットに 3 個の超伝導体 (*L*, *R*1, *R*2) を接続したデバイス。超伝導体のエネル ギーギャップを Δ_0 、位相差を $\varphi_1 = \phi_L - \phi_{R1}$ 、 $\varphi_2 = \phi_L - \phi_{R2}$ とする。(右図) $\varphi_1 - \varphi_2$ 空間におけるアンドレー フ準位 $\pm E_1, \pm E_2$ ($0 \le E_1 \le E_2$)。量子ドットのエネルギー準位を $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0$ 、電子間相互作用をU = 0に選ん だ。4 か所のトンネル結合の強さ(線幅Γ)がすべて等しい時、(φ_1, φ_2) = $\pm (2\pi/3, -2\pi/3)$ で $E_1 = 0$ となる。

超伝導体R1 に流れ出る超伝導電流は $I_1(\varphi_1, \varphi_2) = -(2e/\hbar)[(\partial E_1/\partial \varphi_1) + (\partial E_2/\partial \varphi_1)]$ で与えられ る。 φ_2 を固定して φ_1 を動かすとき、ディラック点の前後で $\partial E_1/\partial \varphi_1$ は負、または正の大きな値を取 る(ディラック点で不連続となり、大きな跳びが生じる)。その結果、 $\partial E_2/\partial \varphi_1$ の符号の正負に応じ て、負方向または正方向の臨界電流 $I_c^{\pm}(\varphi_2) = max_{\varphi_1}[\pm I_1(\varphi_1, \varphi_2)]$ が増大し、その結果、大きなダ イオード効果をもたらす。実際、ダイオード効率 $\eta(\varphi_2) = (I_c^{+} - I_c^{-})/(I_c^{+} + I_c^{-})$ を計算すると、 φ_2 が ディラック点の値の時に最小値、または最大値を取り、その絶対値は 30%程度となる。

慶應義塾大学のグループは、電子間相互作用Uがある場合($U < \Delta_0$)についても調べている。ディラック点の近傍で基底状態がスピンー重項から二重項に転移し、転移点においてダイオード効果が増大すること、Uが線幅 Γ (トンネル結合の強さ)の数倍程度以下であればU = 0の時と同程度のダイオード効率が得られること、を示している。

単一量子ドットに3個の超伝導電極を接続した系でもディラック点が現れるが、ダイオード効果 は見られない。したがって、量子ドット中のスピン軌道相互作用がない場合、図1のデバイスは超 伝導ダイオード効果を示す最小モデルの一つであると考えらえる。

量子ドットはエネルギー準位等の制御性に優れたデバイスである。近い将来、アンドレーフ束縛 状態やディラック点が詳細に調べられ、超伝導ダイオードへの応用につながることが期待される。

- [1] F. Ando, Y. Miyasaka, T. Li, J. Ishizuka, T. Arakawa, Y. Shiota, T. Moriyama, Y. Yanase, and T. Ono, Nature **584**, 373 (2020); 大同暁人、柳瀬陽一、小野輝男、固体物理 **58**, 511 (2023).
- [2] T. Yokoyama, M. Eto, and Yu. V. Nazarov, J. Phys. Soc. Jpn. 82, 054703 (2013).
- [3] S. Matsuo, T. Imoto, T. Yokoyama, Y. Sato, T. Lindemann, S. Gronin, G. C. Gardner, M. J. Manfra, and S. Tarucha, Nat. Phys. 19, 1636 (2023).
- 原論文(2025年4月10日公開済)

Superconducting Diode Effect in Double Quantum Dot Device

Go Takeuchi and Mikio Eto, J. Phys. Soc. Jpn. 94, 054701 (2025).

問合せ先:江藤幹雄(慶應義塾大学理工学部、教授)

電子メール: eto@rk.phys.keio.ac.jp