

55. キラル超伝導体を用いたスピントランジスタの開発

分子科学研究所協奏分子システム研究センター 教授 山本 浩史

概要

キラルな超伝導体における電界誘起超伝導と CISS (Chirality-Induced Spin Selectivity)効果とを組み合わせることによって、超伝導スピントランジスタの開発を試みた。固体ゲート基板の他にイオン液体による電界効果の測定を行ったが、デバイスの均一性や化学的安定性を確保する点に困難があり、現在は固体電解質基板を用いた計測を行っている。一方でキラルな固体中のもうひとつのスピンの由来効果である EMChA (Electric MagnetoChiral Anisotropy)の検出に成功し、この効果でも巨大なスピン偏極現象が示唆されることが明らかとなった。今後はスピン検出方法の検討も含めて、当初の目的達成のためにさらなる検討を行う予定である。本助成金により、超伝導スピントランジスタ実現のための課題点を明確にすることが出来たとともに、キラル超伝導体特有の強力なスピン偏極制御の可能性を示すことが出来た。またその原因のひとつとして、三重項クーパー対の存在があることが明らかとなった。このような新たな学術的知見を得ることを可能にして頂いた三菱財団に深く感謝申し上げます。

背景および目的

キラルとは、分子や結晶の構造が人間の右手・左手のように、鏡に映した時に（いくら回転しても）元の形と重ならない性質のことを言う。近年注目されている CISS (Chirality-Induced Spin Selectivity)効果は、キラルな分子を通過した電子が、無磁場において巨大なスピン偏極を生じるという著しい現象である。CISS 効果を生じるキラル分子として、ポリペプチドや DNA などの有機分子が数多く知られているが、これまでのスピントロニクス常識では、スピン偏極制御に磁性金属や重元素が必要とされており、CISS 効果は従来の手法とは全く異なるスピン偏極制御手段として注目を集めている。本研究の目的は、代表研究者がこれまで実現してきたキラル超伝導体における CISS スピン偏極と、超伝導トランジスタにおける両極性動作とを組み合わせ、ゲート電圧によるスピン偏極制御を行うものである。このような CISS 効果の研究は、ゲート電圧によってスピン偏極の ON/OFF を切り替える新たな超伝導スピントロニクス用デバイスの開発につながるばかりでなく、CISS 効果のメカニズム解明にも寄与できると考えられる。

経過

本研究で用いたキラル超伝導体は、 κ -(BEDT-TTF)₂Cu(NCS)₂（以下、 κ -NCS と略）と呼ばれる有機二次元系超伝導体である。 κ -NCS を構成する分子にキラリティはないが、導電性の BEDT-TTF カチオンラジカルとカウンターアニオンとがイオン結晶を作ることによって、*P*2₁ の空間群を持つキラルな結晶となる。不思議なことに白金電極を用いた電気学的手法で薄膜結晶を作製すると、優先的に右手系結晶が成長し、結晶成長とともに左手系結晶が双晶ドメインとして出現してくることが分かっている。本研究では、このような薄膜微結晶を、電極パターンが施された基板上に貼り付けることによって、スピン偏極デバイスを作製した。

スピン偏極デバイスの動作を考える上で、最初に考えないといけないのは、基板の熱収縮率である。 κ -NCS のバルク結晶において、その基底状態は超伝導であるが、薄膜単結晶を基板に貼り付けて冷却した場合は、基板の熱収縮率の違いによって、低温での電子状態が全く異なることが分かっている。すなわち、シリコン基板のような熱収縮率の小さい基板を用いると、 κ -NCS は低温でギャップの小さなモット絶縁体となる。一方、プラスチック基板のように熱収縮率の大きな基板を用いると、低温の電子状態は完全に超伝導となる。本研究で用いるデバイスは、ゲート電圧をかけないときは絶縁体で、ゲート電圧をかけることによって超伝導となることが必要なため、基板としてシリコンを用いて実験を開始した。

実験では、ゲート電圧をかけない状態で、 κ -NCS の抵抗値がちょうどよい値になるデバイスを得ることが出来たが、その歩留まりは 10% 程度であり、かつゲート電圧による電界効果は結晶の場所によるばらつきが大きいことが明らかとなった。CISS 効果によるスピン偏極デバイスの測定を、抵抗率の計測と同時にを行うためには、ある面積以上のサイズを持った均一な超伝導相が必要であるが、そのような状態を現実的な歩留まりで実現するのは困難であるとの結論に至った。そこで方針を変更し、プラスチック基板に載せた κ -NCS に対して電気二重層トランジスタ(EDLT)による超伝導スイッチングを適用することとした。プラスチック基板を用いる場合は、基板を曲げることで、適切な低温相に κ -NCS を誘導することができる。しかしながら、この組み合わせによる検討では、 κ -NCS がイオン液体に溶解する速度が早く、電界効果を安定的にかけることが困難であることが明らかとなった。そこで第三の手法として、固相イオン伝導体である LICGC を基板とした計測を試みている。LICGC デバイスも EDLT を行う点は同じであるが、基板そのものが固相電解質であるために、溶解によるダメージが大幅に低減される。しかしながら、適切な冷却温度や接触界面の制御が必要なことには変わりがなく、その条件を最適化するためにさらなる検討を行っているところである。

一方、CISS 効果に関連する現象として、キラル固体が示す EMChA (Electric MagnetoChiral Anisotropy) と呼ばれる効果がある。この効果も、キラル固体中のスピン偏極を起源としていと考えられるため、CISS 効果のように直接スピンを観測しなくても、EMChA からスピン偏極に関する情報が間接的に得られる。そこで κ -NCS に関する EMChA の計測を行った。プラスチック基板を用いて κ -NCS の超伝導状態を実現し、磁場下での非相反伝導を計測したところ、その係数 γ' は理論的な予想値よりもはるかに大きいことが明らかとなった(図 1)。得られた γ' は重原子を用いた極性固体のラッシュバ系よりも一桁以上大きな数字となっており、CISS 効果の時と同様に、キラルな固体中では異常に大きな実効的スピン軌道相互作用が存在していることを示している。また、同じデバイスにおいて超伝導の臨界電流を計測したところ、2つの異なるギャップが見えることが明らかとなった(図 2)。これは、超伝導状態を構成するクーパー対に、三重項成分が混ざっていることを示唆しており、反転対称性の破れた超伝導体においてはクーパー対そのものがスピンを運ぶことが示された。今後はこのような計測を、ゲート電圧で制御しながら行うことによって、スピン偏極のゲート電圧制御の実現につなげたい。

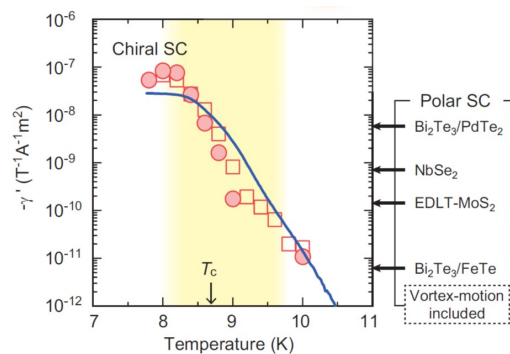


図 1. γ' の温度依存性。

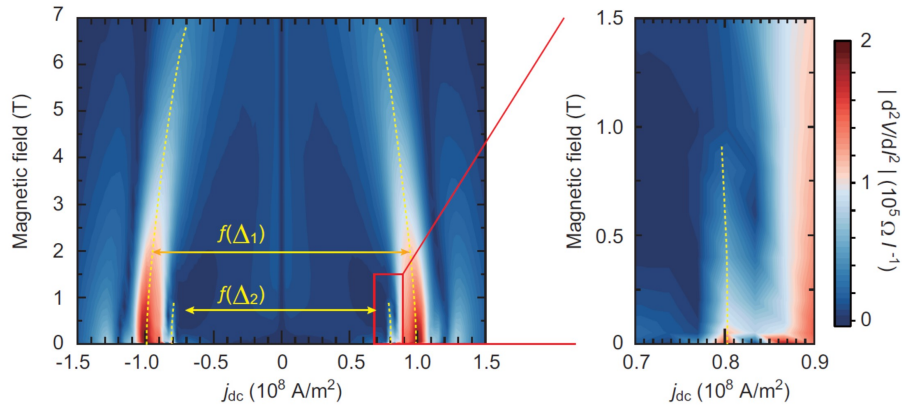


図 2. 超伝導状態における二階微分抵抗のバイアス・磁場依存性。

今後の展望および課題

CISS 効果と電界効果トランジスタを組み合わせることによって、スピントランジスタを作製する本研究では、電界誘起超伝導とスピン信号検出を同時に行う必要がある。原理的には単純であるが、その過程ではデバイスの均一な熱収縮と、高密度の電界キャリア注入を同時に達成する必要がある。デバイス最適化には、おそらく偶然に頼るだけの手法では限界があり、低温でのピエゾ素子による基板のリアルタイム伸縮や、high-k ゲート絶縁膜による高密度キャリア注入を同時に導入する必要があると思われる。今後は他の予算も獲得しながら、当初の目標を実現し、超伝導スピントランジスタの実現と、そこから得られる CISS 効果の起源に関する知見の獲得を目指す。

(完)

発表論文

- 1) T. Sato, H. Goto, and H. M. Yamamoto, "Sturdy spin-momentum locking in a chiral organic superconductor," *Phys. Rev. Res.* *in press*.