

ラシュバ効果—2次元電子系のスピン軌道相互作用

Keyword: ラシュバ効果

1. ラシュバ効果とは

近年、結晶中の伝導電子のスピン軌道相互作用に関する現象が盛んに研究されている。ラシュバ効果はそのうちの一つで、2次元電子系におけるスピン軌道相互作用を指す。これを利用したスピン電界効果トランジスタ(FET)の提案¹⁾を契機として、半導体スピントロニクス観点から注目されてきた。最近になって表面、3次元結晶などにおいて新しい研究の広がりが見られている。

結晶中の電子状態には、時間反転対称性から $E(\mathbf{k}, \uparrow) = E(-\mathbf{k}, \downarrow)$ が要請される($E(\mathbf{k}, \uparrow)$ は波数が $\mathbf{k}$ でアップスピン $\uparrow$ の状態の電子のエネルギーを表す)。一方、空間反転対称性を有する結晶では、電子状態は $E(\mathbf{k}, \uparrow) = E(-\mathbf{k}, \uparrow)$ を満たし、よって、 $E(\mathbf{k}, \uparrow) = E(\mathbf{k}, \downarrow)$ となり、上向きと下向きのスピン状態は縮退する。なんらかの事情で空間反転対称性が破れた系では、 $\mathbf{k}=\mathbf{0}$ 等を除いて、スピン軌道相互作用によってスピン縮退が解ける。

スピン軌道相互作用は、 $\mathcal{H}_{\text{SO}} \propto (\nabla V \times \mathbf{p}) \cdot \boldsymbol{\sigma}$ と表せる($\boldsymbol{\sigma}$ はパウリ行列ベクトル、 V は静電ポテンシャル、 $\mathbf{p}$ は電子の運動量)。原子核の周りの電子に対して書き換えれば、なじみ深い $\mathcal{H}_{\text{SO}} \propto \mathbf{l} \cdot \mathbf{s}$ になる($\mathbf{l}$ は軌道角運動量ベクトル、 $\mathbf{s}$ はスピン角運動量ベクトル)。

半導体ヘテロ接合や金属/酸化物/半導体接合等には2次元電子気体が生じる。これらの系では反転対称性が破れており、面に垂直な方向に沿ってポテンシャル勾配が生じ、スピン縮退が解ける。 z 軸を面に垂直な方向にとり、 $\mathbf{k}_{\parallel}$ を面内波数ベクトルとすると、 $\nabla_z V \times \hbar \mathbf{k}_{\parallel}$ で表される有効磁場がスピンに作用すると見なせる。本物の磁場と異なるのは、有効磁場の方向が常に電子の運動方向と垂直になることである。 $\mathcal{H}_{\text{R}} = \alpha(\mathbf{e}_z \times \mathbf{k}_{\parallel}) \cdot \boldsymbol{\sigma}$ と表して、これをラシュバスピン

軌道相互作用という。²⁾ これにより、電子状態に $k_{\parallel}$ に比例したスピン分裂が生じることになる(図1)。

空間反転対称性を有する3次元結晶の内部では、原子由来のもの以外にはスピン軌道相互作用は生じない。一方、GaAsやGaNなどの化合物半導体には、その結晶構造が反転中心をもたないために結晶内電場が存在し、構成原子の s 軌道($l=0$ のため原子由来のスピン軌道相互作用は無い)からなる伝導電子に対してもスピン軌道相互作用が生じる。これはドレセルハウス効果と呼ばれる。³⁾ 閃亜鉛鉱型結晶の空間軸を $[100]$ 、 $[010]$ 、 $[001]$ 方向に取ると、ドレセルハウススピン軌道相互作用は、 $\mathbf{k}$ の3次の項を無視して、 $\mathcal{H}_{\text{D}} = \beta(k_y \sigma_y - k_x \sigma_x)$ と表される。化合物半導体のヘテロ接合ではラシュバ効果、ドレセルハウス効果、および界面原子の結合非対称性によるスピン軌道相互作用(式のうえではドレセルハウス効果と区別がつかない)が共存する。

2. 半導体スピントロニクス

半導体におけるスピン軌道相互作用のうちラシュバ効果が特に注目されている理由は、スピン軌道相互作用の大きさが2次元面に垂直な方向の外部電場によって制御可能と考えられるからである。図2はスピンFETの模式図である。強磁性体のソースとドレインの間に2次元電子系を配置し、ラシュバスピン軌道相互作用をゲート電圧により制御する。ソースから注入された電子スピンは2次元面内で有効磁場のまわりで歳差運動してドレインに達する。ゲート電圧により歳差運動の周期を制御できれば電気伝導度が変調され、トランジスタとして動作することになる。電子スピンの歳差運動は微弱なゲート電圧で引き起こされ、さらに、通常のFETと比べてゲート容量が小さいため、著しく小さな消費電力で動作可能と考えられている。

現実の物質におけるラシュバ効果の大きさは、HgTeなど高周期元素を含むもののほど大きく、空間電場のみではなく構成原子の核ポテンシャル勾配にも依存することがわかる。よって、ゲート電圧によりラシュバ効果を現実に制御

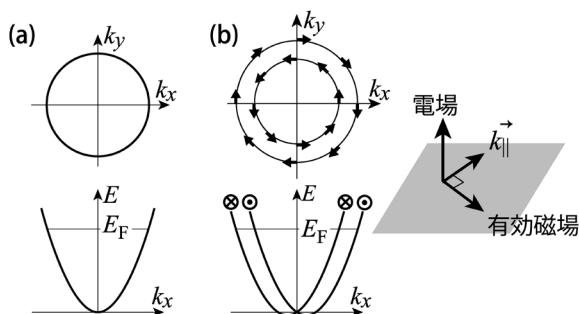


図1 (a) スピン縮退したバンドとそのフェルミ面、(b) ラシュバ効果によりスピン分裂したバンドとそのフェルミ面。矢印はスピン偏極ベクトルの方向。

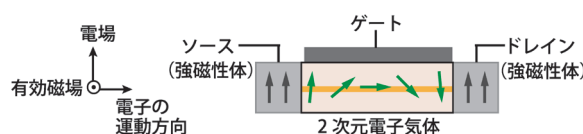


図2 スピンFETの模式図。

可能か否かは自明ではない。1997年、ラシュバ効果のゲート制御が初めて実験的に証明⁴⁾されたことで、磁性体を使わずに電子スピンを制御する半導体技術、すなわち、半導体スピントロニクスへの応用を目指す研究が本格的に展開されてきた。

物理的に興味深い応用例として、電子スピンの弁別実験がある。歴史的なシュテルン-ゲルラッハ実験では、中性の銀原子ビームのスピンの状態を不均一磁場により弁別した。電子などの荷電粒子の場合には磁場中でローレンツ力を受けるため実験が難しいが、ラシュバ効果による有効磁場を用いればスピンのみに力を作用させることができる。ラシュバ効果をゲート制御した微細半導体素子により、特定のスピンの電子を弁別することが実現されている。⁵⁾

3. 結晶表面、3次元物質におけるラシュバ効果

通常の半導体量子井戸においてはスピン軌道相互作用の大きさはフェルミ単位において高々 10 meV 程度である。そのため、より大きなラシュバ効果を発現する物質系の重要性が生じた。

半導体にかぎらず、金属を含む結晶の表面においては、バルクのバンドギャップの2次元射影中に、表面に局在した2次元電子状態が生成することがあり、これを表面状態という。表面状態は角度分解光電子分光 (ARPES) による直接観測がなされてきた。1996年、高分解能化が進んだARPESにより、以前から知られていたAu(111)表面の表面状態が実はラシュバ効果によりスピン分裂しており、その分裂幅がフェルミ単位において110 meVにも達することが発見された。⁶⁾ その後、同様の巨大ラシュバ効果が、タングステン、ビスマスなど第6周期元素の結晶表面において相次いで観測された。系によっては数100 meVにも達する分裂の大きさは、結晶-真空界面での伝導電子に対するポテンシャル勾配の大きさ程度ではまったく説明できず、原子核近傍の急峻な核ポテンシャルと、表面における並進対称性の破れがもたらす核近傍電荷分布の非対称性とに由来するものと理解された。⁷⁾ 言い換えると、巨大ラシュバ効果の発現には重元素が必要であり、しかし、その重元素は表面第1層のみにあれば充分であることになる。

軽元素表面上のビスマス単原子層において実際に巨大ラシュバ効果が観測されたのを契機として、2次元スピン輸送実験などへの応用を目指して、ケイ素、ゲルマニウムなど軽元素半導体表面上に単原子層程度の重元素を吸着させた系において、ラシュバ効果によりスピン分裂した金属的表面状態が探索された。その結果、表面上の重元素単原子

層のみに局在した自由電子的2次元電子バンドにおいて巨大ラシュバ効果が発見された。⁸⁾ 他方、表面平行方向のポテンシャル勾配に由来する非ラシュバ型の2次元スピン軌道相互作用 $(\mathbf{V}_{\parallel} \nabla \times \hbar \mathbf{k}_{\parallel}) \cdot \boldsymbol{\sigma}_z$ の寄与が無視できない例も見出された。たとえば、Si(111)、Ge(111)表面上の(1×1)構造タリウム単原子層では、パレー対称性⁹⁾を有するスピン分裂伝導バンドが形成されるが、パレー点においては対称性のために通常のラシュバ項が消失するために、面内ポテンシャル勾配による非ラシュバ項によって表面垂直方向に完全スピン偏極している。このように、金属や金属酸化物を含め、結晶の表面・界面に普遍的に存在するスピン軌道相互作用の実態が明らかになってきた。

最近ではさらに3次元半導体においてもラシュバ効果が観測されている。BiTeIは、テルル層、ビスマス層、ヨウ素層から成る3層構造を基本単位とする積層構造を有する半導体であり、空間反転対称性を持たない。このため、面垂直方向に結晶内電場が存在し、バルク結晶全体に広がる電子状態が巨大ラシュバ効果によりスピン分裂している。¹⁰⁾

4. これから

ラシュバ効果など2次元系のスピン軌道相互作用により引き起こされる現象としては、スピンFET、電流誘起スピン蓄積などスピントロニクスに関係する現象ばかりではなく、2層ラシュバ系におけるトポロジカル超伝導、近藤温度の指数関数的増大など、さまざまな興味深い予想がなされている。巨大ラシュバ効果を示す結晶表面・界面や3次元半導体、さらにはそれらを組み合わせた超格子構造は、これらの予想を検証し、スピン軌道相互作用がもたらす新たな物理現象を探索するうえで有力な素材となると期待される。

参考文献

- 1) S. Datta and B. Das: Appl. Phys. Lett. **56** (1989) 665.
- 2) E. I. Rashba: Fiz. Tverd. Tela **2** (1960) [Sov. Phys. Solid State **2** (1960) 1109]; Y. A. Bychkov and E. I. Rashba: Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz. **39** (1984) 66 [JETP Lett. **39** (1984) 78].
- 3) G. Dresselhaus: Phys. Rev. **100** (1955) 580.
- 4) J. Nitta, et al.: Phys. Rev. Lett. **78** (1997) 1335.
- 5) M. Kohda, et al.: Nat. Commun. **3** (2012) 1082.
- 6) S. LaShell, et al.: Phys. Rev. Lett. **77** (1996) 3419.
- 7) M. Nagano, et al.: J. Phys.: Condens. Matter **21** (2009) 064239.
- 8) K. Yaji, et al.: Nat. Commun. **1** (2010) 17.
- 9) 江澤雅彦: 日本物理学会誌 **69** (2014) 742.
- 10) K. Ishizaka, et al.: Nat. Mater. **10** (2011) 521.

有賀哲也(京都大学大学院理学研究科)

(2015年1月13日原稿受付)