

第14回青葉工学振興会賞



半導体量子構造における新規スピン制御法の確立

東北大学大学院工学研究科
 知能デバイス材料学専攻
 准教授 好田 誠

電子は、電流を担う素電荷と磁性を担うスピンの2つの自由度を持つ。この電荷とスピンは、どちらも電子の性質ではあるが別々に利用され、エレクトロニクスとマグネティクスとして、今日の高度情報通信社会における情報処理と情報記録を担ってきた。

半導体において電子の持つスピン自由度を活用するには、スピンの向きが揃った状態を生成・検出すると共にスピン状態を高精度に制御することが必要不可欠となる。情報通信デバイスに利用されるInGaAsなど化合物半導体では、これまで磁場の回りでスピン歳差運動を誘起させ、スピン回転制御を行う手法が確立されてきた。しかし、電子スピンの集団として回転運動する場合、互いの回転速度の僅かな違いによりスピン位相がずれてしまう「スピン位相緩和」が生じるため、高速スピン制御とスピン緩和抑制を両立することは困難であると考えられてきた。

そこで、磁場の回りでスピンの歳差運動を誘起することなくスピン制御する方法として着目したのが、電子の運動方向に対し半導体中に存在する、内部有効磁場の向きが固定されるスピン軌道ロッキングと呼ばれる物理現象である。半導体中で電子が運動をすると、相対論効果により電子スピンの有効な磁場が働く。図1(b)に電子の運動方向(点線矢印)と有効磁場の向き(実線矢印)の関係を示す。有効磁場の向きは電子の運動方向に対し常に垂直となるため、電子スピンもこの有効磁場方向に安定化される。この原理を利用すれば、図1(c)のように、電子を半円運動させて電子軌道を曲げれば、運動方向の変化に合わせてスピンの向きも制御できる。よってスピン歳差運動を誘起せずにスピン制御が可能であると考えた。

InGaAsP/InGaAlAs半導体量子井戸構造を用いることで10テスラ以上の強い内部有効磁場を生み出し[1]、この強い有効磁場を活用したスピン制御に取り組んだ。10テスラという磁場は、超伝導マグネットを用いて研究室レベルの大型装置で実現できる磁場と同程度であり、強力な有効磁場を半導体ナノ領域に生み出せることを意味する。さらに、電子スピンの向きが揃った電流を生成するため、図1(a)に示す、ナノ狭窄構造へと微細加工し有効磁場の空間勾配を利用したスピン偏極電流生成を可能にした[2]。この基盤技術に立脚し、スピン生成とスピン検出を担うナノ

狭窄構造の間で、面直外部磁場により電子を半円運動させ(図1(a))、伝導測定によりスピン状態を調べた(図1(d))。スピンが偏極していない電流の場合と比較し(図1(d)青丸)、スピン偏極した電子では信号強度の増大が確認された(図1(d)赤丸)、半円運動後にスピンの向きが反転してナノ狭窄構造に流れ込んでいることを明らかにした。これは、電子軌道を曲げることでスピンの向きを制御したことを意味し、シミュレーション結果とも良い一致を示す(図1(e))。電子スピンは常に有効磁場方向を向きながら移動し、2.5ピコ秒後に180度回転することからスピン歳差運動を誘起せずに高速スピン制御が可能であることを示した。このスピン軌道ロッキングと呼ばれる現象は、半導体量子構造だけでなくトポロジカル絶縁体や酸化物・金属界面にも存在することから、ユニバーサルなスピン制御法になり得る。

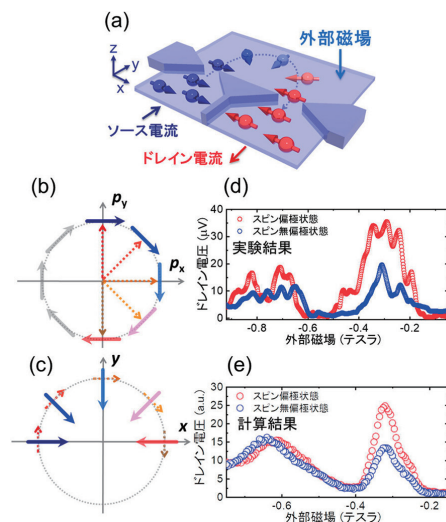


図1 スピン軌道ロッキングを用いたスピン制御法と電気伝導度を用いたスピン方向の検出結果

- [1] M. Kohda and J. Nitta, *Physical Review B* 81, 115118 (2010).
 [2] M. Kohda, S. Nakamura, Y. Nishihara, K. Kobayashi, T. Ono, J. Ohe, Y. Tokura, T. Mineno, and J. Nitta, *Nature Communications* 3, 1082 (2012).
 [3] M. Kohda, T. Okayasu and J. Nitta, *Scientific Reports* 9, 1909 (2019).