

スピン軌道有効磁場によるゼロ磁場スピン歳差運動を利用した 永久スピン旋回高速伝播メカニズムの解明

Fast Propagation of Persistent Spin Helix Observed Using Zero-Field Spin Precession by
Spin-Orbit Effective Fields

M20助自11

代表研究者 石 原
Jun Ishihara

淳 東京理科大学 理学部第一部 助教
Assistant Professor, Faculty of Science Division 1, Tokyo University of Science

A persistent spin helix (PSH) state, in which the two types of spin-orbit (SO) interaction of Rashba and Dresselhaus are balanced, has attracted much attention because the D'yakonov-Perel' spin relaxation is suppressed and a helical spin mode with a long lifetime is formed. Besides, when the electron motion is ballistic, the coherent spin oscillation signal is observed and the spatial spin precession information is converted into the coherent spin precession information in the time domain. In this study, the spatiotemporal evolution of high mobility two-dimensional electron spins with ballistic motion in a modulation-doped GaAs/AlGaAs quantum well is measured by the time- and spatially-resolved Kerr rotation technique. The experimental results show that the spins diffuse as a group, indicating that the spins move without scattering. The spins moving along $[1-10]$ direction rotate with time, while the spins moving along $[110]$ direction maintain their spin state after a spin-flip. This indicates the existence of the anisotropic SO field due to the coexistence of Rashba and Dresselhaus SO interactions exist. From the result of the anisotropic time evolution of spin distribution depending on the crystal axis originating from the PSH field, the spin diffusion velocity and the strength of SO field is estimated. In addition, the excitation density dependence of the spin dynamics is also measured. At higher excitation density, because the electron spin motion transits from ballistic to diffusive due to enhanced electron-electron scattering, the spin diffusion velocity becomes slow, and the spin states at a certain position remain in their states.

研究目的

電子の持つ電荷とスピンの自由度を利用するスピントロニクスの分野においては、巨大磁気抵抗効果やトンネル磁気抵抗など、すでに実用化された現象がある一方、依然としてスピンを能動的に活用したデバイスを創生するための基礎的な研究が盛んに行われている。デバイス中でスピンを利用するためにはスピンの生

成、操作、検出といった要素技術の確立が必要であるが、そのすべてにおいて重要な役割を担うのが電子のスピンと軌道運動間に働くスピン軌道相互作用である。スピン軌道相互作用は運動する電子スピンに有効磁場として作用するため、スピン状態を外部磁場なしに操作できるが、その異方的な有効磁場は急速にスピン緩和を引き起こす原因となる。この諸刃の剣を克服する特異な状態として「永久スピン

旋回」状態が注目を集めている。この永久スピン旋回状態ではスピン緩和が抑制され、スピンの長寿命化とスピン制御の両立が可能となる。これまで注目されてきたのは空間的なスピン歳差運動情報だけであったが、パリティックな電子運動系では空間的なスピン状態だけでなく時間的にコヒーレント歳差運動する高速伝播スピン状態を情報として活用できると考えられる。本研究では、スピン空間状態の時間領域への置き換えを利用して永久スピン旋回状態を評価し、スピン集団の時間変化をスピン情報として活用するための高速伝播ダイナミクスを明らかにする。

概 要

電子の持つ磁気的性質であるスピン自由度は電荷とは異なる新たな情報担体として期待されているが、それだけでなくスピンは光の偏光や音、熱といった多数の物理量とも相関しており、多くの情報担体と変換可能という点でも有望である。例えば半導体においては光の偏光をスピン状態に転写することが可能であり、任意の時間、空間にスピン情報を生成、利用することが可能である。一方で、非磁性体中で非保存量であるスピンは、そのままでは容易に情報を消失してしまうためその利用には大きな制限があった。しかし近年、化合物半導体量子構造においてスピン状態が空間的に周期的に配列し長時間保持される永久スピン旋回状態が観測されたことで、半導体デバイス中のスピン利用を考える際のスピン寿命の制約が大幅に緩和された。永久スピン旋回の達成には半導体中で作用する二種類のスピン軌道相互作用による有効磁場の釣り合いが利用されている。このスピン軌道相互作用は運動する電子スピンの有効磁場として作用するため、スピン状態を外部磁場なしに操作できるという点で

も都合がよい。永久スピン旋回状態の大きな特徴は空間的なスピン回転が保存されることであるが、散乱の少ない電子の弾道運動を利用すれば空間的なスピン状態だけでなく時間的にコヒーレント歳差運動する高速伝播スピンを活用できると考えられる。

そこで我々は、永久スピン旋回を達成する高移動度の二次元電子系を作製し、そこに光励起した電子スピンの時空間ダイナミクスを調べた。試料には分子線エピタキシー法を用いてGaAs (001) 基板上に成長した井戸幅20 nmの片側変調ドーブGaAs/AlGaAs単一量子井戸を用いた。この試料構造では量子井戸内に電界がかかることでラッシュバースピン軌道相互作用が増強されることで、ドレッシェルハウススピン軌道相互作用とその大きさが等しくなり、永久スピン旋回状態が達成される。また、それと同時に変調ドーブによって井戸内での不純物散乱が抑制され、高移動度二次元電子系が達成される。スピンの時空間発展はパルスレーザーを用いた時間-空間分解カー回転測定によって観測した。

光励起したスピンの一次元空間分布の時間発展を直交する二方向に対して測定した結果、スピン時空間ダイナミクスの異方性が観測された。これは、ラッシュバースピン軌道相互作用の有効磁場方向の波数依存性がそれぞれ異なり、合計した有効磁場が強め合う方位と弱め合う方位が直交するためである。有効磁場が強め合う方位のスピン空間分布は時間とともにその中心位置を変えながらスピン状態が回転していることがわかった。つまりこれは励起された電子スピンの弾道運動しながら有効磁場周りを歳差運動していることを示しており、その信号の中心位置を追った拡散速度はフェルミ速度に近い値となった。一方で、直交する方向では同様の拡散の様子は観測されるも

のスピンの状態はほとんど回転しないことがわかり、この試料が永久スピン旋回状態に近いことが示された。拡散速度と歳差運動周波数から求めたスピン軌道相互作用係数は、従来の高空間分解測定系を用いた拡散的な電子運動の場合に観測されるスピンの空間反転距離から求めた値と一致した。したがって本手法を用いることでスポットサイズが歳差運動長と同程度に大きい場合でもスピン軌道パラメータを算出できることが示された。

また、スピン励起時の励起光強度を上げて同様のスピン時空間発展を測定した。励起光強度の増加は電子-電子散乱を増強することになるため、光励起スピンの運動を弾道的な運動から拡散的な運動に変化させる。測定の結果、高励起光強度では明らかな拡散速度の低下が観測されたとともに、低励起密度時とは異なる時空間マップが観測された。この異なる時空間マップがスピン拡散の低下で説明可能か確認するため、モンテカルロ法によるスピンシミュレーションをスピン拡散係数を変えながら実施した結果、実験結果の時空間発展の差異をよく再現した。これは弾道運動系から拡散運動系の移行領域ではスピンの時空間発展が大きく変化するというを示しており、スピンの拡散緩和メカニズムや光励起電子スピンの時空間マップの制御に関して重要な知見となる。

－以下割愛－