

主 論 文 要 旨

報告番号	甲 乙 第	号	氏 名	横山 知大
主論文題目： 半導体ナノ構造中の量子輸送現象におけるスピン軌道相互作用の効果				
(内容の要旨)				
<p>スピン軌道相互作用は電子の運動とスピンが結合する効果で、多彩な物理現象を誘起する。例えば、不純物によってスピンに依存した散乱が生じるが、これを外因性スピンホール効果と呼ぶ。スピン軌道相互作用はInAsやInSbなどの狭ギャップ半導体中で強くはたらく。これを利用することで電氣的なスピン制御やスピン偏極電流の生成が強磁性体を用いずに可能となるため、狭ギャップ半導体は基礎研究だけでなくスピントロニクスにおけるデバイスへの応用が期待されている。</p> <p>本論文では、半導体ナノ構造中の量子輸送現象におけるスピン軌道相互作用の効果について報告する。まずアンチドット構造、および量子ドットにおけるスピン依存伝導を調べる。これらの人工構造を電氣的に制御することで、1つの「不純物」によるスピンホール効果が、共鳴現象によって著しく増大することを指摘する。次に半導体ナノワイヤに2つの超伝導体を接続した系を考え、DCジョセフソン効果へのスピン軌道相互作用の効果を明らかにする。</p> <p>第1章では、研究の背景として先行研究などを説明し、本研究の目的について述べる。</p> <p>第2章では、半導体ヘテロ構造中の2次元電子系において、アンチドット構造によって形成される人工ポテンシャルによる外因性スピンホール効果を議論する。ポテンシャルが引力の場合、仮想的束縛状態を介した共鳴散乱が生じる。このとき、散乱のスピン依存が増大し、スピンホール効果が顕著に現れることを示す。次に、アンチドットのある3端子デバイスにおけるスピン依存伝導を調べ、共鳴散乱によって大きなスピン偏極電流が生成されることを示す。</p> <p>第3章では、3端子を接続した半導体量子ドットを考え、離散準位を介した共鳴トンネルによる外因性スピンホール効果の増大を議論する。まず最小モデルとして2準位モデルを考える。準位間隔がトンネル結合による線幅より小さいときに、電流ピークの近傍で共鳴トンネルによって大きなスピン偏極電流が得られることを示す。また、残りの端子へのトンネル結合を変えることで、スピン偏極電流を電氣的に制御できることを明らかにする。一般的な量子ドット系を数値的に調べ、2準位モデルの結果の正当性を示す。クーロンブロッケイド領域では、近藤効果による多体の共鳴現象が観測される。量子ドット中の準位間隔が近藤温度より小さいとき、多体共鳴によってスピン偏極電流が増大することを指摘する。</p> <p>第4章では、磁場中の量子ドットを調べる。軌道磁性の効果があるとき、2端子系においてもスピン偏極電流が生成することを示す。この場合、磁場によってスピンホール効果の制御が可能となる。</p> <p>第5章では、半導体ナノワイヤを用いたジョセフソン接合におけるスピン軌道相互作用の効果明らかにする。この系では、超伝導電流が半導体ナノワイヤ中に作られるアンドレーエフ束縛状態を介して流れる。その束縛状態の準位を超伝導体間の位相差の関数として計算する。磁場によるゼーマン効果とスピン軌道相互作用が共存する場合、位相差がないときに超伝導電流が流れる異常ジョセフソン効果、および臨界電流の方向依存性が現れることを示す。</p> <p>第6章では、本論文の結論を述べる。</p>				

SUMMARY OF Ph.D. DISSERTATION

School	Student Identification Number	SURNAME, First name YOKOYAMA, Tomohiro
<p>Title</p> <p style="text-align: center;">Effect of spin-orbit interaction on quantum transport phenomena in semiconductor nanostructures</p>		
<p>Abstract</p> <p>The spin-orbit (SO) interaction couples the electron motion and its spin, which results in various physical phenomena. For example, the impurity scattering depends on the electron spin in the extrinsic spin Hall effect (SHE). A strong SO interaction works in narrow-gap semiconductors such as InAs and InSb. Since the interaction enables the electrical control of spins and generation of spin-polarized current, these semiconductors has a high potential to apply to spintronic devices.</p> <p>In the present thesis, I report the effects of SO interaction on the quantum transport phenomena in semiconductor nanostructures. First, I study the spin-dependent transport in antidot structures and quantum dots. I show that the SHE is markedly enhanced by the resonance at a single “impurity” when the artificial structures are electrically tuned. Next, I examine the effect of SO interaction on the DC Josephson effect in semiconductor nanowires connected to two superconductors.</p> <p>In chapter 1, I introduce the background of this study and describe its purposes.</p> <p>In chapter 2, the extrinsic SHE is discussed in semiconductor heterostructures by an artificial potential due to the antidot structure. When the potential is attractive, the resonant scattering takes place. At the resonance, the spin-dependence of the scattering increases, and in consequence, a large SHE is observed. I examine the spin-dependent transport through three-terminal devices including an antidot and obtain a largely spin-polarized current by the resonance.</p> <p>In chapter 3, I investigate the enhanced SHE by the resonant tunneling in three-terminal quantum dots. Using a minimal model with two energy levels, I show that a largely spin-polarized current is obtained by the resonant tunneling when the level spacing is smaller than the level broadening. The spin polarization is tunable by controlling the tunnel coupling to the third lead. General situations are investigated by numerical simulation to confirm the results. In the Coulomb blockade regime, the many-body resonance is created by the Kondo effect, which enhances the SHE when the level spacing is smaller than the Kondo temperature.</p> <p>In chapter 4, the SHE is examined for quantum dots in a magnetic field. The spin-polarized current is generated in two-terminal system in the presence of orbital magnetization. The SHE is tunable by the magnetic field in this case.</p> <p>In chapter 5, the effect of SO interaction is studied on the Josephson junction of semiconductor nanowires. The supercurrent flows through the Andreev bound states in the nanowires. The bound state levels are calculated as a function of phase difference between the superconductors. The interplay between the Zeeman effect in the magnetic field and SO interaction results in the anomalous Josephson effect, in which the supercurrent flows in the absence of phase difference, and direction dependent critical current.</p> <p>The last chapter is devoted to the conclusions of the present thesis.</p>		