HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	メゾスコピックリング配列構造におけるスピン回転を伴う弱反局在の実空間シミュレーション手法の開発 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	澤田, 淳
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第12852号
Issue Date	2017-09-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/67452
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Atsushi_Sawada_review.pdf, 審査の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称　博士 (工学)　氏名　澤田　淳

審査担当者　主　査　教　授　本久 順一
副　査　教　授　髙橋 庸夫
副　査　教　授　富田 章久

学位論文題名

メゾスコピックリング配列構造におけるスピン回転を伴う弱反局在の実空間シミュレーション手法の開発
（Real space simulation of weak antilocalization with the spin precession in mesoscopic ring array）

スピントロニクスは、電子の電荷情報に加え、スピン自由度を利用し従来よりも高度・効率的な情報処理の実現を目指す、エレクトロニクスの新しい研究・応用分野の一つである。このスピントロニクスにおいて最も重要な点は電子のスピン状態の制御と輸送、ならびにそれを可能にするスピントランジスタのような素子の実現であり、そのためにも、スピン制御機構の物理を基礎から理解することが重要となる。例えば Datta らにより提案されたスピントランジタにおいては、半導体中でスピンの関与する最も基本的な現象の一つであるスピン軌道相互作用 (SOI) を Rashba 機構を通じて制御することが動作原理となっており、このためスピン軌道相互作用の大きさを実験的に精密に決定する手法が必要とされる。一方で、近年、薄膜成長技術の発展に伴い、様々な二次元原子層材料がエレクトロニクス・スピントロニクス材料として注目を集めるようになり、そのような新規材料における SOI の理解と制御も重要となっている。

これまで、Rashba 機構による SOI の制御や、その大きさ示す Rashba 係数 α の決定は、主として InGaAs 系のダブルヘテロ量子井戸構造 (InGaAs QW) のようなバルク二次元電子系 (Two-dimensional electron system, 2DES) における磁気抵抗振動や弱反局在による磁気伝導率のゲート依存性の解析によって行われてきた。一方、バルク 2 次元電子系を微細加工することによって得られるメゾスコピックリング配列構造は、干渉効果により複雑な電気伝導率の磁気振動を示すが、Rashba 効果によるスピン回転角の大きさによって干渉強度が変化することが知られている。よって、複雑な電気伝導率の磁気振動を厳密な理論計算に基づき解析できれば、Rashba 効果によるスピン回転の大きさを始め、多くの物性値の決定が期待できる。このことに着目し、本論文ではメゾスコピックリング配列構造におけるスピン回転を伴う弱反局在の実空間シミュレーション手法を開発するとともに、それを用いた電気伝導率の磁気振動の解析を行うことによって、Rashba 効果によるスピン回転の大きさや位相干渉長といった物性値やそのゲート電圧依存性等を決定することに成功している。

以下に本論文の構成を示す。

第 1 章は序論であり、本論文の研究背景・目的および論文構成が示されている。

第 2 章では、本論文で提案する解析手法の基礎となる、電子輸送現象の古典論と量子論、スピンならびスピン軌道相互作用とともに、バルク 2DES およびメゾスコピック構造における弱局在/弱反局在について解説されている。

第 3 章では、著者が本論文で提案する、電子の干渉効果に起因する弱局在/弱反局在による電気伝導率の量子補正を実空間上の電子のランダムウォーク・シミュレーションによって求める方法の理論的枠組が纏められている。電子が散乱を受けて元の位置に再帰したことによる干渉効果、という弱局在の実空間描像に基づき、再帰および再帰確率を理論的に明確に定義した上で、再帰による電気伝導率の変化、実空間シミュレーションにおける再帰の扱い方、そして、スピン回転によって生じるスピン位相差も考慮した再帰確率ならびに干渉強度の変化について詳細に論じられている。

第 4 章では、本論文の提案手法による、弱局在/弱反局在による電気伝導率の量子補正の磁場依存性のシミュレーション結果について纏められている。シミュレーションの数値計算としての妥当性とともに、本手法が既存のバルク 2DES における弱局在/弱反局在モデルの計算結果を再現すること、簡便さや高速性に優れていることだけでなく、一つひとつの再帰経路の干渉強度をそれぞれ計算するため、既存モデルでは困難な様々なスピン回転の影響を導入することができることが具体例とともに示されている。

第 5 章では、メゾスコピックリング配列構造を有する InGaAs QW における電気伝導率の磁気振動のゲート電圧依存性の測定結果に本論文で提案した解析手法を適用することによって、Rashba 効果によるスピン回転の大きさのゲート電圧依存性を決定している。さらに、メゾスコピックリング配列構造中の不純物散乱を考慮した解析手法を適用し、広い磁場範囲のフィッティング解析を行うことによって Rashba 効果によるスピン回転の大きさ以外の物理量、特に位相緩和時間の温度依存性を決定している。

第 6 章は総括であり、本論文の結論が述べられている。

以上これを要するに、著者は、既存モデルよりも遥かに簡便で拡張性の高い、弱局在・弱反局在による電気伝導率の量子補正を計算する手法を開発するとともに、提案手法をメソスコピックリング構造という複雑な干渉効果の現れる系の解析に適用することによって、スピン回転角とそのゲートによる制御の程度など、スピントロニクス素子を実現する上で重要な物性値を決定する手法を確立しており、これは半導体物性工学、半導体デバイス工学分野の発展に対して大きく寄与するものである。よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格があるものと認める。