

VII-7. 量子輸送研究

教授：都倉康弘

助教：久保敏弘

研究員：Christoph Peutter

大学院生：博士前期課程1名

【1】半導体中のスピンの量子物性と量子情報処理への適用

(1) 量子ドット中の電子スピンを用いた量子ビットのコヒーレント操作 (論文[5]、国際会議[3, 7]、国内会議シンポジウム講演[7])

半導体量子ドットに閉じ込められた少数電子系は、高い制御性を持ち、電子スピンのコヒーレンスが比較的長い為、量子ビットとしての利用の可能性が検討されている。特にマイクロ波等によるコヒーレント制御に関して、近年大きな進展があった。通常電子スピン共鳴では振動磁場を用いてスピンの検出、制御が行われるが、集積化された単一電子スピンの選択的制御には困難が伴う。そこで我々が最近提案したのは振動電場を用いる「電気双極子スピン共鳴」である。通常スピンは電場と相互作用しないが、電気双極子とスピンの間に結合をもたらすと振動電場で電子スピンのコヒーレント操作が可能となる。今年度はこの量子ドット中の電子スピンのコヒーレント操作で課題となる、動的核スピン偏極のメカニズムに関して報告した。また現在まで2量子ドットのスピンの初期化は実現しているが、3量子ドット以上での初期化の可能性に関して理論的に検討した。特に3量子ドットでは、スピン選択則による初期化以外にコヒーレントポピュレーショントラッピングによるスピン無依存の初期化が起こる事を指摘した。

(2) 半導体におけるスピン・軌道相互作用とグラフェンにおける電子・フォノン相互作用 (論文[3, 6, 8]、国際会議[2, 4, 5, 8])

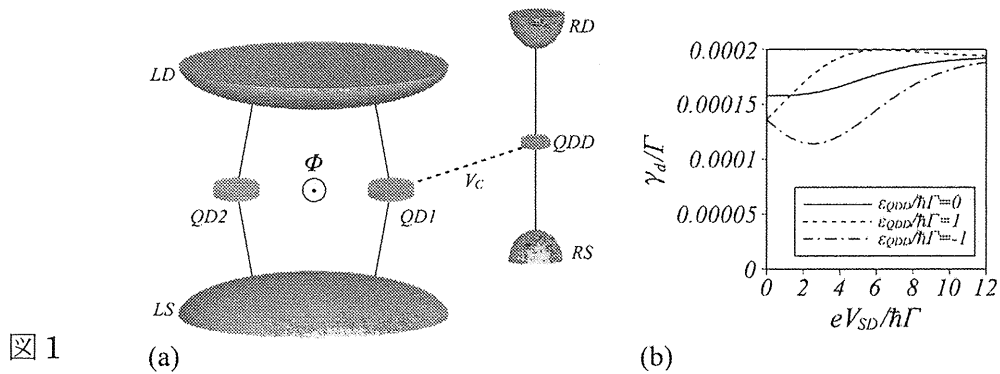
固体中での電子スピンの制御、伝導に関して検討を続けている。InGaAsを用いた微細構造である、量子ポイントコンタクトの伝導特性において、通常観測されるコンダクタンスの $2e^2/h$ を単位とする量子化に加えて、零磁場でその半分の値のコンダクタンス構造を観測した。また同時に電流ノイズを測定し、理論的モデルと合わせて検討する事により、スピン・軌道相互作用に起因する自発的スピン偏極のメカニズムを提案した。またInAs量子ドットにおけるスピン・軌道相互作用およびLandé g-因子が外部電極により制御可能である事を実証し、コヒーレントなスピン操作に適用可能である事を報告した。また新奇な材料であるグラフェンの基礎的な特性についても検討を加えた。特に電子・フォノン・光子の相互作用が絡み合ったラマン特性について解析を加え、グラフェン特有のバンド構造であるDiracコーンの寄与を詳しく取り入れると実験結果を適切に説明できる事を示した。

【2】環境が量子系にもたらすデコヒーレンスと量子統計

(1) 量子ドット電荷計による位相緩和の起源 (論文[1]、国際会議[1])

近年の半導体微細加工技術・低温技術の進展に伴って、量子力学における測定の反作用と言う概念がメゾスコピック系において議論されるようになってきた。我々は図1(a)に示すようなAharonov-Bohm(AB)干渉計の両方の経路に1つずつ量子ドット(QD)が埋め込まれた系を考え、QDが量

量子ドット電荷計(QDD)と静電的に結合することで誘起される位相緩和を議論し、その起源を理論的に明らかにした。非平衡2次摂動理論の範囲における我々の解析によれば、位相緩和の原因はQDDにおける電荷ゆらぎであることが明らかになった。一方、量子ポイントコンタクトの電荷計の場合には、位相緩和の起源は電流ゆらぎである。これらの起源の違いが、位相緩和率(γ_d)のバイアス電圧(V_{SD})依存性に現れることも示した。量子ポイントコンタクト電荷計では、バイアス電圧の増加とともに位相緩和率は単調に増加する。一方、QDDでは、印加されたバイアス電圧が小さい領域においては、バイアス電圧とともに位相緩和率は単調に増加するだけでなく、減少することもある(図1(b))。 Γ は量子ドット電荷計(あるいはQDD)と電極の結合の強さ)。QDDに対する上記のようなバイアス電圧依存性は、(1)QDDのエネルギー準位の位置、(2)QDDと電極との結合強度の対称性、(3)バイアス電圧の印加の仕方に依存することを示し、QDDにおける電荷ゆらぎの挙動から理解することが出来ることを示した。



(2) 部分的位相緩和と電圧端子を持つ系の熱電特性 (論文[9]、国際会議[6])

量子輸送の議論には電子の位相緩和過程を注意深く解析する事が必要である。今年度は環境が系のコヒーレンスに対して部分的位相緩和をもたらす条件について検討を加えた。モデルとしては、局在準位がトンネル結合した系を考え、位相緩和する系の部分空間が系と環境との結合ハミルトニアンとどのような関係に有るかを明らかにした。特に磁束による永続的電流状態は環境からの影響に非常に脆弱である事を示した。一方位相緩和を制御された形で系に導入する事は、その特性を理解する上で重要である。我々は二端子素子に電圧端子を弱く結合させたデバイスにおける、量子伝導特性について検討を加えた。量子コヒーレンスの特徴付ける AB 振動の振幅や、Onsager 相反定理に代表される統計力学的関係について電圧端子の効果を調べた。

<論文>

(査読論文)

1. Toshihiro Kubo and Yasuhiro Tokura, "Backaction Dephasing by a Quantum Dot Detector", arXiv:1210.3089 [cond-mat]. (Submitted to Phys. Rev.)
2. Hiroyuki Shibata, Tatsushi Akazaki, Yasuhiro Tokura, "Fabrication of MgB2 nanowire single-photon detector with meander structure", APEX 6, 023101 (2013).
3. Ken-ichi Sasaki, Yasuhiro Tokura, and Tetsuomi Sogawa, "The origin of Raman D Band: Bonding and Antibonding Orbitals in Graphene", Crystals 3, 120 (2013).
4. Hiroyuki Shibata, Tatsushi Akazaki and Yasuhiro Tokura, "Ultrathin MgB2 films fabricated by

- molecular beam epitaxy and rapid annealing” , Supercond. Sci. Technol. 26 035005 (2013).
5. Toshiaki Obata, Michel Pioro-Ladriere, Yasuhiro Tokura and Seigo Tarucha, “The photon- assisted dynamic nuclear polarization effect in a double quantum dot” , New J. Phys. 14, 123013 (2012).
 6. Ken-ichi Sasaki, Keiko Kato, Yasuhiro Tokura, Satoru Suzuki, and Tetsuomi Sogawa, “Dirac Cone Migration -Decay and Frequency Shift of Inter and Intravalley Phonons in Graphene-” , Phys. Rev. B (RC) 86, 201403 (2012).
 7. Nobuyuki Matsuda, Hanna Le Jeannic, Hiroshi Fukuda, Tai Tsuchizawa, William John Munro, Kaoru Shimizu, Koji Yamada, Yasuhiro Tokura, Hiroki Takesue, “A monolithically integrated polarization entangled photon pair source on a silicon chip” , Scientific Reports, 2 817 (2012).
 8. Makoto Kohda, Shuji Nakamura, Yoshitaka Nishihara, Kensuke Kobayashi, Teruo Ono, Junichiro Ohe, Yasuhiro Tokura, Taiki Mineno and Junsaku Nitta, “Spin-orbit induced electronic spin separation in semiconductor nanostructures” , Nature Communications 3, 1082, doi:10.1038/ncomms2080 (2012).
 9. Amnon Aharony, Shmuel Gurvitz, Yasuhiro Tokura, Ora Entin-Wohlman, and Sushanta Dattagupta, “Partial decoherence in mesoscopic system” , Physica Scripta T151, 014018 (2012).

(解説論文)

1. Yasuhiro Tokura, “Phonon Cavity Quantum Electrodynamics and Phonon Microlaser” , PSJ Online: News and Comments [January 18, 2013].

<講演：国際会議>

1. T. Kubo and Y. Tokura, “Backaction Dephasing Induced by a Quantum Dot Detector”, March Meeting of the American Physical Society, Baltimore, Maryland, USA, 2013. 3. 18.
2. K. Sasaki, Y. Tokura, S. Suzuki, and T. Sogawa, “Understanding of the 2D Raman Band with Shifted Dirac Cones” , APS March Meeting, Baltimore, USA, 18-22 March (2013) G7-12.
3. <招待講演> Yasuhiro Tokura and Toshihiro Kubo, “Initialization of quantum spins under non-equilibrium bias condition” , 3rd Japan-Israel Binational Workshop on Quantum Phenomena, Okinawa, Japan, 11-14, March (2013) .
4. Yasuhiro Tokura and Shun Takahashi, “Anisotropy of the Spin-Orbit interaction in an InAs Quantum Dot” , the sixth International Conference on Advanced Materials and Nanotechnology, (AMN6), Auckland, New Zealand, 11-15 February (2013).
5. Kenichi Sasaki, Yasuhiro Tokura, and Tetsuomi Sogawa, “Mechanism of the doping dependence of Raman 2D band -Dirac-cone migration-” , the International Symposium ” Nanoscience and Quantum Physics 2012” (nanoPHYS’ 12), International House of Japan, Tokyo, Japan, 2012 Dec.17-19.
6. T. Kubo and Y. Tokura, “Thermoelectric transport in partially coherent three-terminals” , International Workshop on Quantum Noise and Measurement in Engineered Electronic Systems (QNM12) Dresden, Germany, 8 - 12 October (2012).
7. <招待講演>A. Oiwa, Y. Kanai, R. S. Deacon, S. Takahashi, K. Yoshida, K. Hirakawa, Y. Tokura, and S. Tarucha, “Electrically tunable spin-orbit interaction in self-assembled InAs quantum dots” , 31st International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2012), ETH Zurich, Switzerland, July 29th to August 3rd (2012) 7.5.
8. M. Kohda, S. Nakamura, Y. Nishihara, K. Kobayashi, T. Ono, J. Ohe, Y. Tokura, and J. Nitta,

“Electronic Stern-Gerlach experiments by Rashba spin orbit interaction”, 31st International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2012), ETH Zurich, Switzerland, July 29th to August 3rd (2012) 66.2.

9. Hanna Le Jeannic, Nobuyuki Matsuda, Hiroki Takesue, Hiroshi Fukuda, Tai Tsuchizawa, Toshifumi Watanabe, Koji Yamada, Sei-ichi Itabashi, and Yasuhiro Tokura, “Monolithically-integrated polarization-entangled photon pair source on a silicon-on-insulator photonic circuit”, The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2012, San Jose Convention Center, San Jose, CA, USA, May 6-11 (2012) QF2F.2.

〈講演：国内会議〉

1. 久保敏弘、都倉康弘「量子ドット電荷計を含む環境との結合による位相緩和と位相対称性」日本物理学会 2012 年秋季大会、横浜国立大学、神奈川 2012. 9. 20.
2. 松田信幸、Hanna Le Jeannic, 福田浩、土屋泰、山田浩治、都倉康弘、武居弘樹「集積型偏光もつれ光子対源」日本物理学会 2012 年秋季大会、横浜国立大学、神奈川 2012. 9. 19.
3. 佐々木健一、加藤景子、都倉康弘、鈴木哲、寒川哲臣「グラフェンにおけるラマンスペクトルと電子スペクトルのドーピング依存性」日本物理学会 2012 年秋季大会、横浜国立大学、神奈川 2012. 9. 19.
4. 都倉康弘、A. Aharony, S. Gurvitz, O. Entin-Wohlman, S. Dattagupta, 「環境と結合した量子ドット系の部分的位相緩和」日本物理学会 2012 年秋季大会、横浜国立大学、神奈川 2012. 9. 20.
5. 都倉康弘, “Decoherence by noisy environment”, General meeting of FIRST QIP Project/Quantum Cybernetics, Tokyo, Dec. 15, 2012.
6. 久保敏弘、都倉康弘, “Backaction Dephasing by a Quantum Dot Detector & Phase Symmetry”, General meeting of FIRST QIP Project/Quantum Cybernetics, Tokyo, Dec. 15, 2012.
7. 〈シンポジウム招待講演〉都倉康弘「2 重量子ドットにおける核スピン偏極」日本物理学会第 68 回年次大会、広島大学、広島 2013. 3. 26.
8. 松田信幸、倉持栄一、武居弘樹、清水薫、都倉康弘、納富雅也「フォトニック結晶結合共振器における強束縛モード分散の観測」日本物理学会第 68 回年次大会、広島大学、広島 2013. 3. 28.
9. 佐々木健一、都倉康弘、寒川哲臣「グラフェンのトポロジカル欠陥におけるラマン D バンドの励起メカニズム」日本物理学会第 68 回年次大会、広島大学、広島 2013. 3. 29.
10. 久保敏弘、都倉康弘「量子ドット電荷計による位相緩和」日本物理学会第 68 回年次大会、広島大学、広島 2013. 3. 29.
11. 天羽真一、都倉康弘、黒澤元、久保敏弘、近藤裕佑、樽茶清悟、河野公俊、大野圭司「スピンプロックイドの電流閉塞状態の遷移と電流の 2 値的振る舞い」日本物理学会第 68 回年次大会、広島大学、広島 2013. 3. 28.
12. 都倉康弘、久保敏弘「多重量子ドットスピンの初期化の可能性」日本物理学会第 68 回年次大会、広島大学、広島 2013. 3. 29.

〈社会還元等〉

1. 都倉康弘「半導体を用いた量子情報処理」FIRST 夏期研修会 2012.8.14 ホテルブリーズベイマリーナ 宮古島、沖縄

〈外部資金〉

1. 科学研究費 新学術領域研究(研究領域提案型)課題番号: 21102003 「半導体ナノ集積構造による量子情報制御・観測・伝送に関する研究」平成24年度: 5,330 千円 (直接経費: 4,100 千円、間接経費: 1,230 千円) (平成21年度～平成25年度、研究代表者: 都倉康弘)
2. 内閣府 最先端研究開発プログラム「量子情報処理」(中心研究者: 山本喜久)「スピン量子コンピュータの理論研究」平成24年度: 16,034 千円 (直接経費: 14,710 千円、間接経費: 1,324 千円) (平成21年度～平成25年度、研究担当者: 都倉康弘)

〈その他〉

セミナー: 久保敏弘「メゾスコピック系における量子コヒーレンスの制御」超伝導エレクトロニクスグループセミナー 産業技術総合研究所、茨城 2013. 1. 18.