

VII-5. 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：博士後期課程2名、前期課程2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[8]、国際会議[7, 11, 14, 20]、国内会議シンポジウム講演[2]）

これまで半導体量子ドットに閉じ込められた少数電子系のスピンを量子ビットとして利用する可能性を検討して来ている。我々が最近提案した微小磁石と振動電場を用いる「電気双極子スピン共鳴」によるこれまでの実験では、ラビ振動数が数 MHz に留まっていた。ところが核スピんに起因する位相緩和時間 T_2^* が数10nsecであるため、コヒーレント操作の精度は低い状態であった。今回デバイスの改善により 100MHz を越えるラビ振動数を実現する事ができ、高い精度でコヒーレント操作が可能となった。一方で、従来印加振動電場の振幅とラビ振動数は比例関係にあったが、この様な大きなラビ振動の条件ではこの比例関係から大きくずれてくる事が分かった。その原因について検討したところ、(1)量子ドットの閉じ込めポテンシャルの非放物性、(2)微小磁石による磁場勾配の非線形性、が原因である事を指摘した。

(2) 半導体量子ドット系の非平衡量子伝導（論文[2, 9]、国際会議[5, 10]）

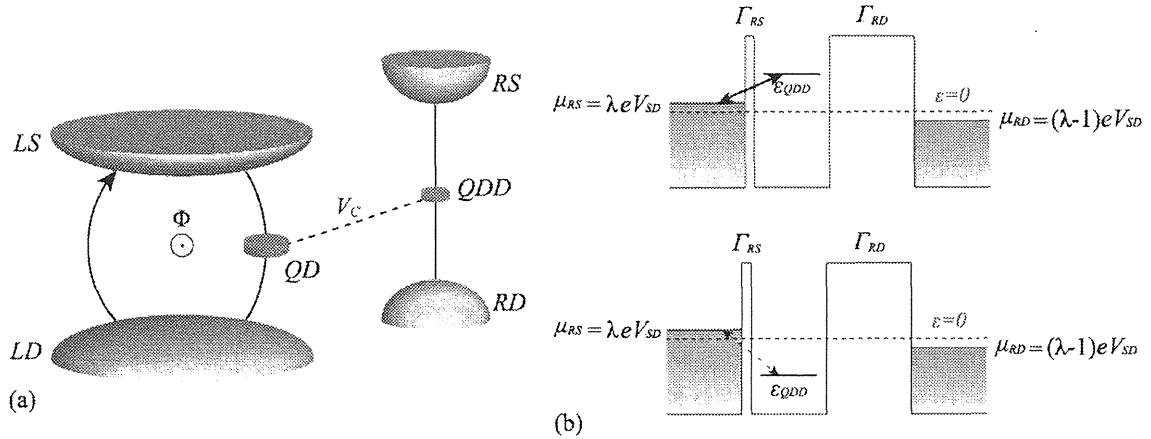
半導体量子ドットを介した量子伝導について検討を加えた。二重量子ドット系の二電子及び三電子状態の励起スペクトルを計算し、縦型構造の結合量子ドット系の非線形伝導の実験結果と比較を行った。その結果、二電子状態では理論と実験は良く整合した。しかし三電子状態では通常はスピン選択則から禁制遷移である励起状態も観測されたが、これは非平衡条件の元で実現した励起状態間の遷移で説明出来る事が分かった。一方電極間に温度勾配を持つ系の熱伝導の問題に着目し、平均熱流と熱電流のゆらぎの関係に代表される「ゆらぎの定理」を理論的に調べた。特に量子ドットに浮遊電極が付いている系を考察した。浮遊電極に流れ込む実質的な熱流は零、その温度は自己無撞着に決まる。関係する時間スケール（トンネル時間と浮遊電極内でのエネルギー緩和時間）が大きく異なる場合に限り、二端子系の「ゆらぎの定理」を確認する事ができた。

【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（論文[6]、国際会議[1, 18]）

近年、半導体微細加工技術・低温技術の進展に伴い、量子力学における基本概念が半導体メゾスコピック系においても議論されるようになってきた。我々は特にハイゼンベルグの不確定性原理や粒子・波動二重性と深く関係した測定の反作用という概念について、図1(a)に示すような Aharonov-Bohm (AB) 干渉計の片方の経路に量子ドット(QD)が1つ埋め込まれた系を想定して議論した(図1(a))。特に、QDが量子ドット電荷計(QDD)と静電的に結合することによって誘起される位相緩和を議論し、非平衡2次摂動理論を用いて、その起源がQDDにおける電荷揺らぎであることを明らかにした。一方で、

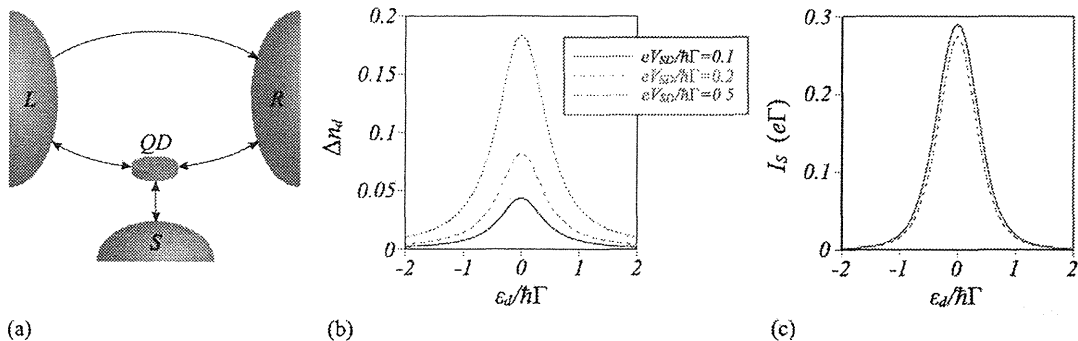
量子ポイントコンタクトと呼ばれる電荷計の場合には、位相緩和の起源は電流揺らぎであることが既に示されているが、これらの起源の違いが位相緩和率のバイアス電圧依存性に現れることも議論した。量子ポイントコンタクト電荷計の場合には、バイアス電圧の増加とともに位相緩和率は単調に増加する。しかし、QDD の場合には、バイアス電圧が小さい領域においては、バイアス電圧の増加とともに位相緩和率は単調に増加するだけでなく、減少することもあることを示した。QDD の上記のような特性は(1)QDD のエネルギー準位の位置 (ϵ_{QDD})、(2)QDD と電極との結合強度 ($\Gamma_{RS(RD)}$) の対称性、(3)バイアス電圧 (V_{SD}) の印加の仕方の3つの条件で決定されることを示し、QDD の電荷揺らぎの挙動から理解することができることを示した (図1 (b)) λ は実験的に制御できるパラメタで $0 \leq \lambda \leq 1$ を満たし、 $\mu_{RS(RD)}$ は電極 RS (RD) の電気化学ポテンシャル)。



(2) 超伝導電極を用いたスピン分極の検出 (国際会議[4])

近年、スピン・軌道相互作用を利用することで、磁性体や磁場を用いずに電子スピンを制御することができるために、スピン・軌道相互作用を用いたスピン制御の研究が盛んに行われている。2端子常伝導電極(L, R)を用いたスピン干渉計の片方の経路に量子ドット(QD)が埋め込まれた系において、(1)スピン・軌道相互作用が有限で、(2)干渉計が非平衡である、これらの条件が満たされているときには、QD中の電子スピンスピンが分極することが知られている。しかしながら、このような2端子常伝導電極を用いたセットアップでは、スピン分極が生成されていることを実験的に直接測定することはできない。そこで、我々は超伝導電極(S)を導入して (図2 (a))、アンドレーエフ反射を利用することによって、スピン分極が生じていることを実験的に調べることができないかということ議論する。

Nambu-Gor'kov形式に基づくKeldyshの非平衡グリーン関数法を用いて解析を行った。非平衡な状況が、2つの電極に印加されるバイアス電圧によって実現されたものか、温度勾配によって実現されたものかによって、生じるスピン分極に差ができることを示した。さらに、スピン分極が増大するにつれて、超伝導電極から量子ドットへのアンドレーエフ電流(I_S)が減少することを示した (図2 (b), (c))。



【3】量子ポンプと時間依存伝導現象 (国際会議[8, 9, 15, 17])

時間依存するポテンシャルの下での量子伝導現象は重要なテーマである。特に周期的に変化する外部パラメタによる「量子ポンプ」は原理的に重要な物理を含むだけでなく電流標準などの応用面でも重要な課題である。今回量子ドット間のトンネル位相を変調するモデルを提案し、これによる量子ポンプ電流を計算した。直列二重ドットの場合は位相の変調幅と共に電流が線形に増大した。特に二重ドット間のトンネル自体が非常に小さい場合は、近似的に有効バイアスの掛かった二電極間のトンネル電流のモデルと同一視できる。またリングを形成した三重ドットの場合はトンネル位相はリングを貫く磁束で制御可能であり、量子ポンプ電流は近似的に量子化された。これらの解析は、「散乱理論」を用いていたため、相互作用が無い条件に限定されていたが、一般化された量子マスター方程式を用いる方法では、相互作用の効果もトンネルの最低次で取り入れる事が可能である。特に電極の磁場を変調した際に誘起される量子ポンプ電流、スピン流を調べた。従来の研究では見逃されて来た電流成分の寄与を明らかにし、また得られた(スピン)電流の挙動に微視的な考察を加えた。

〈論文〉

(査読論文)

1. Nobuyuki Matsuda, Hiroki Takesue, Kaoru Shimizu, Yasuhiro Tokura, Eiichi Kuramochi, and Masaya Notomi, “Slow light enhanced correlated photon pair generation in photonic-crystal coupled-resonator optical waveguides”, *Optics Express* **21**, 8596-8604 (2013)
2. T. Hatano, Y. Tokura, T. Kubo, S. Amaha, S. Teraoka, and S. Tarucha, “Excitation spectroscopy of few-electron states in artificial diatomic molecules”, *Phys. Rev. B* **87**, 241414(R) (2013).
3. Stella Bevilacqua, Sergey Cherednichenko, Vladimir Drakinskiy, Hiroyuki Shibata, Yasuhiro Tokura and Jan Stake, “Study of IF Bandwidth of MgB2 Phonon-Cooled Hot-Electron Bolometer Mixiers”, *IEEE Trans. Terahertz Science and Technology*, **3**, 409 (2013).
4. Hiroyuki Shibata, Kaoru Shimizu, Hiroki Takesue and Yasuhiro Tokura, “Superconducting Nanowire Single-Photon Detector with Ultralow Dark Count Rate Using Cold Optical Filters”, *Appl. Phys. Express* **6**, 072801 (2013).
5. Nobuyuki Matsuda, Hiroshi Fukuda, Tai Tsuchizawa, William John Munro, Kaoru Shimizu, Koji Yamada, Yasuhiro Tokura and Hiroki Takesue, “Monolithic Integration of Polarization-entangled Photon Pair Source Using Silicon Photonics”, *NTT Technical Review*, Vol.11 No.8 Aug. 2013.
6. Toshihiro Kubo and Yasuhiro Tokura, “Backaction Dephasing by a Quantum Dot Detector”, *Phys. Rev. B* **88**, 155402 (2013).
7. Takahiro Yokozuka, Kota Ido, Richard Clark, Kyozauro Takeda and Yasuhiro Tokura, “Reconsideration of the relativistic corrections for an electron confined in 2D quantum dot. I. spin-orbit coupling and Rashba effect”, *Jpn J. Appl. Phys.* **53**, 031801 (2014).
8. Yasuhiro Tokura, Toshihiro Kubo and William John Munro, “Power dependence of electric dipole spin resonance”, *JPS Conference Proceedings* **1**, 012022 (2014).
9. Y. Utsumi, O. Entin-Wohlman, A. Aharony, T. Kubo and Y. Tokura, “Fluctuation theorem for heat transport probed by a thermal electrode”, accepted for publication to *Phys. Rev. B*.
10. Ken-ichi Sasaki, Yasuhiro Tokura, and Hideki Gotoh, “Valley-asymmetric potential in graphene under dynamical deformation”, arXiv:1404.1170 [cond-mat]. (Submitted to *Phys. Rev. Lett.*)

(解説論文)

1. 都倉康弘、量子もつれ 量子暗号への道、数理科学, No. 608, vol. 2, pp.27-32 (2014).

〈講演：国際会議〉

1. Toshihiro Kubo and Yasuhiro Tokura, “Non-Local Aharonov-Bohm Effects in Transport through a Quantum Dot Capacitively Coupled to an Aharonov-Bohm Interferometer out of Equilibrium”, Workshop on Interferometry and Interaction in Non-equilibrium Meso- and Nano- systems”, ICTP Trieste, Italy, 8-12 April (2013).
2. N. Matsuda, E. Kuramochi, H. Takesue, K. Shimizu, Y. Tokura and M. Notomi, “Ultra- Narrowband Nonlinear Wavelength Conversion Using Coupled Photonic Crystal Nanocavities”, CLEO/EUROPE-IQEC 2013, CK-1.5 SUN, 12-16 May 2013, Munich, Germany. (招待講演)
3. N. Matsuda, H. Takesue, K. Shimizu, Y. Tokura, E. Kuramochi and M. Notomi, “Slow-Light- Enhanced Correlated Photon Pair Generation in a Silicon Photonic Crystal Coupled-Resonator Optical Waveguide”, CLEO/EUROPE-IQEC 2013, IA-6.4 WED, 12-16 May 2013, Munich, Germany.
4. T. Kubo and Y. Tokura, “Spin current and asymmetric Andreev bound state in an interferometer containing a quantum dot with superconducting lead”, 16th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS-16), WeOM5, 1-5 July 2013, Wroclaw, Poland.
5. Y. Tokura and T. Kubo, “Initialization of multiple quantum spins with non-equilibrium bias”, 20th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS- 20), MoP53, 1-5 July 2013, Wroclaw, Poland.
6. Nobuyuki Matsuda, Hanna Le Jeannic, Hiroshi Fukuda, Tai Tsuchizawa, William John Munro, Kaoru Shimizu, Yasuhiro Tokura, Koji Yamada and Hiroki Takesue, “Monolithic source of telecom-band polarization entanglement on a silicon photonic chip”, CLEO-Pacific Rim & OECC/PS 2013, ThM1-1, 30 June-4 July, Kyoto, Japan. (招待講演)
7. Yasuhiro Tokura, “Power Dependence of Electric Dipole Spin Resonance”, The 12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12), July 14-10 2013, Int Conf. Halls, Makuhari Messe, Japan.
8. S. Nakajima, M. Taguchi, T. Kubo, and Y. Tokura, “The spin current induced by a geometric pump in quantum dots: Quantum master equation approach”, 2013 Tsukuba Nanotechnology Symposium (TNS’ 13), AIST Tsukuba Innovation Arena Hall, Tsukuba, July 26, (2013).
9. M. Taguchi, S. Nakajima, T. Kubo, and Y. Tokura, “Nonequilibrium Green’s function approach to photon-assisted tunneling in quantum dot system”, 2013 Tsukuba Nanotechnology Symposium (TNS’ 13), AIST Tsukuba Innovation Arena Hall, Tsukuba, July 26, (2013).
10. Yasuhiro Utsumi, Ora Entin-Wohlman, Amnon Aharony, Toshihiro Kubo, and Yasuhiro Tokura, “Fluctuation theorem for a two-terminal conductor connected to a voltage or a thermal probe”, Frontiers of Quantum and Mesoscopic Thermodynamics, 29 July - 3 August 2013, Prague, Czech Republic.
11. Yasuhiro Tokura, Toshihiro Kubo and William John Munro, “Strongly driven spin qubit in a magnetic field gradient”, IXth Rencontres du Vietnam (VietNam 2013), Nanophysics: from fundamentals to applications (the return), August 4-10, 2013. Quy-Nhon Vietnam.
12. Yasuhiro Tokura, Xiaobo Zhu, Shiro Saito, Robert Amsuss, A. Kemp, K. Kakuyanagi, S. Karimoto, H. Nakano, William. J. Munro, M. S. Everitt, Kae Nemoto, M. Kasu, Y. Matsuzaki, Norikazu Mizuochi

- and K. Semba, “Coherent Coupling of a Superconducting Flux Qubit”, IXth Rencontres du Vietnam (VietNam 2013), Nanophysics: from fundamentals to applications (the return), August 4-10, 2013. Quy-Nhon Vietnam. (招待講演)
13. Ken-ichi Sasaki, Yasuhiro Tokura and Tetsuomi Sogawa, “Dirac-cone Migration: Self-energies of Phonons in Graphene”, 5th Int. Conf. on Recent Progress in Graphene Research (RPGR2013), Sep. 9-13, 2013, Tokyo, Japan, 11p-P2-33.
14. Yasuhiro Tokura, “Electron spins and magnetic field”, FIRST Quantum Spin Information and Technology, School for spin and quantum information, Sep. 24, 2013, Takeda Hall, Univ. of Tokyo. (招待講演)
15. S. Nakajima, M. Taguchi, T. Kubo and Y. Tokura, “Spin current induced by an adiabatic pump of quantum dots”, Int. Symp. on Nanoscale Transport and Technology (ISNTT), Nov. 27 2013, Atsugi, Japan.
16. C. M. Peutter, S. Konabe, Y. Hatsugai, K. Shiraishi, and Y. Tokura, “Semiclassical electron dynamics in grapheme-like materials”, Int. Symp. on Nanoscale Transport and Technology (ISNTT), Nov. 27 2013, Atsugi, Japan.
17. M. Taguchi, S. Nakajima, T. Kubo and Y. Tokura, “Quantum pumping in quantum dot system”, Int. Symp. on Nanoscale Transport and Technology (ISNTT), Nov. 26 2013, Atsugi, Japan.
18. T. Kubo and Y. Tokura, “Non-local Aharonov-Bohm effects in transport through a quantum dot capacitively coupled to a non-equilibrium interferometer”, Int. Symp. on Nanoscale Transport and Technology (ISNTT), Nov. 26 2013, Atsugi, Japan.
19. H. Shibata, K. Shimizu, T. Honjo, H. Takesue, and Y. Tokura, “Fabrication of ultraslow noise SSPD and long distance QKD experiment”, Int. Symp. on Nanoscale Transport and Technology (ISNTT), Nov. 26 2013, Atsugi, Japan.
20. Yasuhiro Tokura, “Strongly excited electric dipole spin resonance with field gradient”, APS March Meeting, T36.03, March 6, 2014, Denver, Colorado, USA.

〈講演：国内会議〉

1. 松田信幸、武居弘樹、清水薫、都倉康弘、倉持栄一、納富雅也, “フォトリック結晶結合共振器光導波路におけるスローライト効果による光子対生成効率の増強”, 第74回応用物理学会秋季学術講演, 同志社大学、京都、2013/9/17.
2. 都倉康弘, “半導体量子ドットの量子ビット操作”, 第74回応用物理学会秋季学術講演会, 同志社大学、京都、2013/9/17 (Invited).
3. 山下真、井桁和浩、清水薫、都倉康弘、井元信之, “不均一広がりをもつ量子ビット系に対する量子 Bang-Bang 制御”, 日本物理学会 2013年秋季大会、徳島大学 25pBB-4, 徳島, 2013/9/25.
4. 松崎雄一郎、下岡孝明、田中弘隆、都倉康弘、仙場浩一、水落憲和, “ダイヤモンド中の単一NV中心における電子スピン及び核スピンを用いた磁場検出器”, 日本物理学会 2013年秋季大会、徳島大学 25pBB-15, 徳島, 2013/9/25.
5. 中嶋慧、田口真彦、久保敏弘、都倉康弘, “量子ドット系の断熱ポンプによるスピン流：量子マスター方程式による解析”, 日本物理学会 2013年秋季大会、徳島大学 27aKL-6, 徳島, 2013/9/27.
6. 内海裕洋、O. Entin-Wohlman, A. Aharony, 久保敏弘、都倉康弘, “電圧または温度プローブと結合した2端子量子導体の揺らぎの定理”, 日本物理学会 2013年秋季大会、徳島大学 27aDD-1, 徳島, 2013/9/27.

7. 都倉康弘、久保敏弘, “磁場勾配を用いた電場誘起スピン共鳴の励起強度依存性”, 日本物理学会 2013年秋季大会、徳島 27pDD-5, 徳島, 2013/9/27.
8. 田口真彦、中嶋慧、久保敏弘、都倉康弘, “AB リング・量子ドット複合系における量子断熱ポンプの解析”, 日本物理学会 2013年秋季大会、徳島大学 27pDD-10, 徳島, 2013/9/27.
9. 久保敏弘、都倉康弘, “非平衡な AB 干渉計と結合した量子ドット系における非局所 AB 効果”, 日本物理学会 2013年秋季大会、徳島大学 27pDD-11, 徳島, 2013/9/27.
10. 中嶋慧、田口真彦、久保敏弘、都倉康弘, “一般化量子マスター方程式による量子断熱ポンプの解析”, 日本物理学会 第69回年次大会、27aBD-12、東海大学, 2014/3/27.
11. 久保敏弘、都倉康弘, “超伝導電極を含むスピン干渉計におけるスピン依存伝導”, 日本物理学会 第69回年次大会、27pAW-3、東海大学, 平塚, 2014/3/27.
12. 清水賢次、野口篤史、松井健太、田中歌子、都倉康弘、占部伸二, “永久磁石付きプレーナートラップを用いたイオンの操作と磁場の評価”, 日本物理学会 第69回年次大会、29pCF-8、東海大学, 平塚, 2014/3/29.

<学位論文>

(博士論文) 数理物質科学研究科・物理学専攻

1. 大日向正志

“Quantum teleportation for continuous variables via a partially entangled state and nonorthogonal measurement” (部分的エンタングルド状態と非直交測定をもちいた連続量量子テレポーテーション)

(修士論文) 数理物質科学研究科

1. 中嶋慧

「一般化量子マスター方程式による量子断熱ポンプの解析」

(学位論文)

1. 森田大地

「光格子中の冷却原子を用いた量子ウォークに関する研究」

<集中講義>

1. 都倉康弘：大阪市立大学

凝縮系物理学特別講義 IB 「半導体量子物性」(2013年12月2~3日、大阪市立大学、大阪府)

<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25年度：直接経費：5,450千円(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25年度：8,500千円(平成21年度~平成25年度、研究担当者：都倉康弘)

<社会還元等>

1. 都倉康弘、国立情報学研究所 客員教授 2010年3月~2014年3月
2. 都倉康弘、教員免許更新講習 7月28日

<外国人招聘>

1. Prof. Amnon Aharony (Ben-Gurion University, Tel Aviv University), Prof. Ora Entin-Wohlman (Ben-Gurion University, Tel Aviv University, Weizmann Institute) 2014年1月26日～2月11日.

<その他>

1. 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制御」QMS セミナー 早稲田大学、東京 2013. 4. 26.