

平成 21 年 6 月 4 日現在

研究種目： 基盤研究(A)

研究期間： 2006～2008

課題番号： 18204029

研究課題名(和文) 量子ホール系におけるコヒーレント現象の研究

研究課題名(英文) Study of Coherent Phenomena in Quantum Hall Systems

研究代表者

家 泰弘 (IYE YASUHIRO)

東京大学・物性研究所・教授

研究者番号 30125984

研究成果の概要：

GaAs/AlGaAs 高移動度 2 次元電子系をベースとするメソスコピック構造(平面超格子, アンチドット系など)におけるコヒーレント量子輸送現象の研究を行った。フィボナッチ格子における幾何学共鳴, 2 次元正孔系におけるスピン軌道相互作用によるベリー位相, 2 次元正孔量子ホール系におけるストライプ相, アンチドット系の AB 振動におけるスピン依存効果, などについて新しい知見を得た。また, メソスコピック超伝導体の磁束系のふるまいを調べた。

交付額

(金額単位: 円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	11,300,000	3,390,000	14,690,000
2007年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
2008年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
総計	24,100,000	7,230,000	31,330,000

研究分野： 量子輸送, 低温物理

科研費の分科・細目： 物性 (光物性・半導体・誘電体)(実験) 4304

キーワード： 半導体 2 次元電子系, 人工周期系, アンチドット, 整合振動, AB 振動, メソスコピック超伝導

1. 研究開始当初の背景

量子ホール系は1979年の発見以来, 数多くの研究が行われている系でありながら, 常に新しい展開を見せ続けてくれる「極めて懐の深い」系である。近年の新しい展開としては, 2 層量子ホール系における新しいコヒーレント状態, マイクロ波誘起ゼロ抵抗状態, 核スピンの関与する一連の現象, などの発見を挙げることができる。特に核スピンの関わる現象は基礎物理的興味とともに量子ビット

の候補として注目を集めている。

我々のグループでは GaAs/AlGaAs 半導体ヘテロ構造界面の高移動度 2 次元電子系を作成し, それらに微細加工を施すことにより人工ポテンシャル変調を付与した系を作製して, その中での電子のふるまいを調べ, 新奇的な量子輸送現象を探求してきた。これまでに, 1 次元ポテンシャル変調(平面超格子)における磁気抵抗整合振動(ワイス振動), 1 次元磁場変調下での整合振動(磁気ワイス振

動), アンチドット三角格子における AAS および AB 振動と量子ホール域の AB 振動などの実験で成果を挙げてきた。それらのゲート電圧依存性や温度依存性の解析からコヒーレント輸送に関する知見を得た。さらに最近では, 短周期ポテンシャル変調下でサイクロトロン軌道のブラッグ反射による新奇な幾何学共鳴効果を発見した。高次ランダウ準位におけるストライプ相の短周期ポテンシャルによる安定化を見出した。量子細線に磁場勾配を印加した系における非線形領域の整流効果, 普遍的伝導度ゆらぎ, 量子ホール域の磁気バリアー効果, などを明らかにした。

2. 研究の目的

本研究計画では本研究計画では, 高移動度 2 次元電子系・正孔系におけるコヒーレンス現象を特に量子ホール領域を中心として探求する。われわれはこれまで GaAs/AlGaAs 高移動度 2 次元電子系試料をベースとしたメゾスコピック構造における量子輸送の研究を進めてきた。これまでに 1 次元人工周期ポテンシャル中の 2 次元電子系について, 磁気変調による整合磁気抵抗振動や正の磁気抵抗効果, 電子電子ウムクラップ散乱による余剰抵抗, 開いた軌道のブラッグ反射による新たな幾何学共鳴効果, 高次ランダウ準位におけるストライプ相, 複合フェルミオンの幾何学共鳴などに関する研究で成果を挙げてきた。また, アンチドット格子系におけるアハロノフ・ボーム型量子振動現象に関する詳細な研究を行った。最近では 2 層系や正孔系にも研究を展開している。

正孔系は電子系に比べて大きな有効質量を有するため, クーロンエネルギーとサイクロトロンエネルギーの比が大きな値をとり, クーロン相互作用の効果が相対的により重要となる傾向がある。そのほかにも, 点における軽い正孔バンドと重い正孔バンドの縮重, 強いスピン軌道相互作用, バンドの非線型性や異方性など, 電子系にはないいくつかの特徴を有している。実際, これらのことは量子ホール系のさまざまな側面に反映され, 場合によっては質的に異なる物理が展開される。しかしながら, 高移動度試料作製の困難さもあって, 2 次元正孔系の研究は 2 次元電子系に比べてはるかに少ないのが現状である。最近われわれは, 低密度・高移動度の 2 次元正孔系試料の MBE 成長に成功し, それらを用いた量子ホール領域の実験を進めており, いくつかの新奇な現象を見出している。それらの芽を大きく育てるとともに, これまでに取り組んできた, 平面超格子, ア

ンチドット格子や 2 層量子ホール系についてもさらなる進展を目指す。一方では, 新たな研究の展開を図るべく試料作製設備および実験装置の改良を並行して行う。

応募時に見出されていたいくつかの興味深い新奇現象の物理的起源を解明するとともにさらなる新現象の探求を通じて, コヒーレント輸送現象, 電子および核スピンの自由度に関わる現象, 単電子帯電効果が関わるなどの量子現象のより根源的な理解と新奇な現象の発見を目指す。

3. 研究の方法

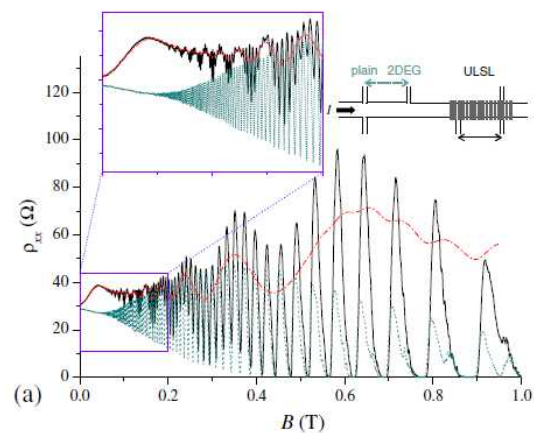
GaAs/AlGaAs 高移動度 2 次元電子系試料をベースとして, 微細加工を施すことにより, アンチドット系や微小ホール素子などの人工構造を作製し, 希釈冷凍機温度および強磁場下での測定を行う。核磁気共鳴測定のため, 高周波導入に必要な改造を希釈冷凍機に施す。

4. 研究成果

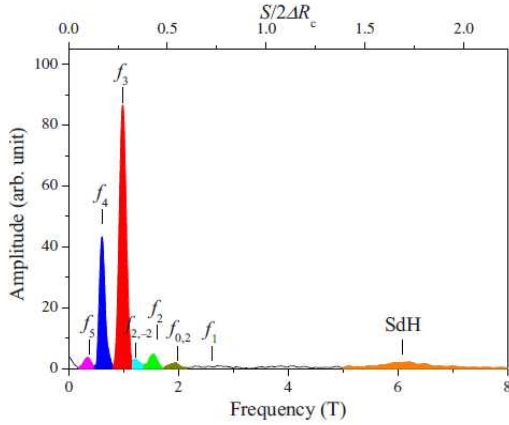
本研究で得られた主な成果を以下に列挙する。

(1) 1 次元変調における磁気抵抗効果

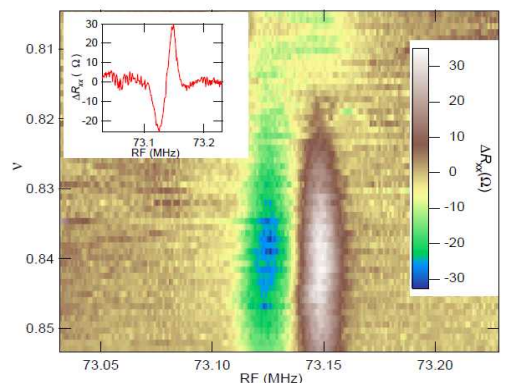
短周期平面超格子に特徴的な磁気抵抗現象の精密測定と詳しい理論解析を行なった。バンド折りたたみ/フェルミ面再構成によって生ずるオープン軌道と超周期構造との幾何学共鳴による磁気抵抗振動, 正の磁気抵抗効果, サイクロトロン軌道による通常の整合振動効果, シュブニコフ・ドハース振動, の相互関係を明らかにした。



(2) フィボナッチ超格子における整合効果
準周期性をもつ1次元フィボナッチ超格子における整合振動を観測し、その振幅とポテンシャル変調との関係を定量的に明らかにした。周期変調の場合と比較して、高次変調成分の効き方が異なることなどを明らかにした。



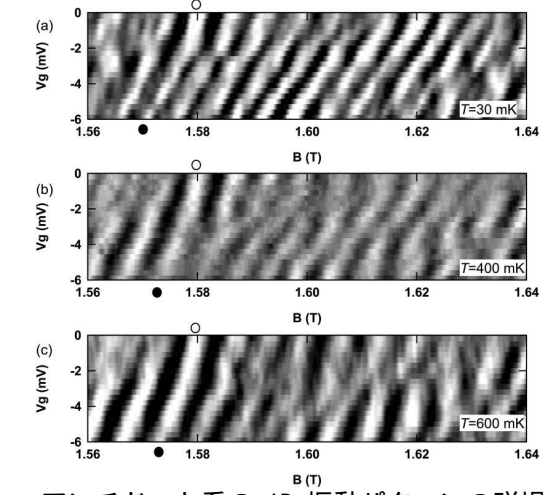
(3) 量子ホール領域における核磁気共鳴
抵抗検出核磁気共鳴の手法により量子ホール系における核スピンと電子系との相互作用を調べた。 $\nu = 1$ 近傍の核スピン緩和時間については、2つのグループから互いに矛盾する結果が報告されていたが、われわれはスカーミオン結晶の存在を支持する結果を得た。



(4) アンチドット系におけるAB振動効果
アンチドット格子系および単一アンチド

ット系におけるアハロノフ・ボーム(AB)振動を詳細に調べた。特に、 $\nu = 2$ 量子ホール状態の両側でふるまいが大きく異なることを見出し、これをスピン選択トンネリング過程に基づいて解釈した。

(5) エッジ状態の遮蔽ポテンシャルの温度依存性



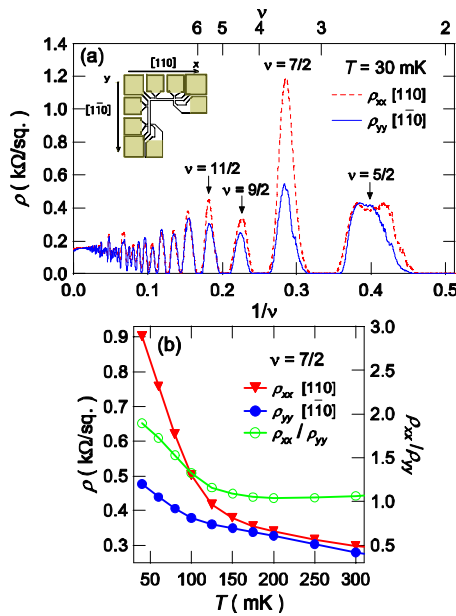
アンチドット系の AB 振動パターンの磁場およびゲート電圧温度依存性から、アンチドット周りのエッジ状態の self-consistent potential 勾配を求め、エッジ状態の screening の温度依存性を定量的に示した。

(6) 2次元正孔アンチドット系におけるベリー位相の観測

2次元正孔系のアンチドット格子における AB 振動のゲートおよび磁場依存性の解析から、振動位相にスピン軌道相互作用によるベリー位相の寄与が見出されることを示した。

(7) 正孔量子ホール系のストライプ相

2次元正孔系の高次ランダウ準位において顕著な磁気伝導度異方性を観測し、電子系の場合と類似のストライプ相の証拠を見出した。ストライプ相が生じるランダウ準位占有率や平行磁場の影響の強さなどに関して電子系との違いが見出され、有効質量の違いおよびそれに伴うクーロン相互作用の相対的強さの違いを反映したものと解釈した。

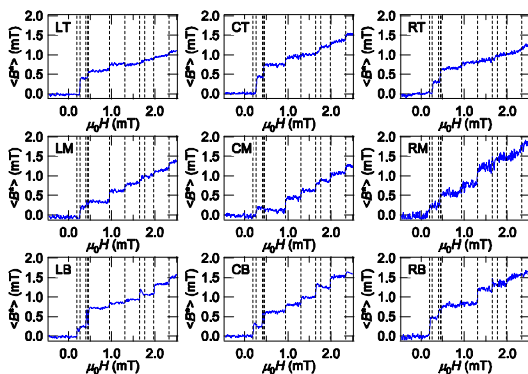


(8) 空間変調磁場下の超伝導ネットワークの相転移

超伝導ネットワークに空間変調磁場を付加した系の超伝導転移領域の $I-V$ 特性を詳細に測定した。fully frustrated XY モデルとの比較を行い、超伝導転移がキंक対の解離による擬似 KTB 転移であることを示した。

(9) 微小ホール素子を用いた少数磁束系の観測

2次元電子系をベースとして多プローブ微小ホール素子を作製し、それを用いてメゾスコピック超伝導体の磁束状態の空間分解測定を行った。正方形の四隅に孔を開けた超伝導体において、量子磁束が1本ずつのあたりに出入りするかを追跡することができた。なお、磁束量子3本のときに理論的に予想されている反渦は見出されなかった。



5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 38件)すべて査読有

1. Temperature Dependent Screening of the Edge State around Antidots in the Quantum Hall Regime: Masanori Kato, Akira Endo, Shingo Katsumoto, and Yasuhiro Iye, Phys. Rev. Lett. 102 (2009) 086802-1-4.

2. Detection of spin polarization with a side-coupled quantum dot: T. Otsuka, E. Abe, Y. Iye and S. Katsumoto, Phys. Rev. B79 (2009) 195313.

3. Aharonov-Bohm-type oscillations in antidot lattices in the quantum Hall regime: Masanori Kato, Akira Endo, Shingo Katsumoto, and Yasuhiro Iye, Phys. Rev. B77 (2008) 155318-1-7.

4. The Effect of Oscillating Fermi Energy on the Line Shape of the Shubnikov-de Haas Oscillation in a Two-Dimensional Electron Gas: Akira Endo and Yasuhiro Iye, J. Phys. Soc. Jpn. 77 (2008) 064713-1-7.

5. Modulation of the Shubnikov-de Haas Oscillation in Unidirectional Lateral Superlattices: Akira Endo and Yasuhiro Iye, J. Phys. Soc. Jpn., 77 (2008) 054709-1-9.

6. Superconducting transition in wire network under spatially modulated magnetic field H. Sano, A. Endo, S. Katsumoto and Y. Iye, Physica C468 (2008) 824-827.

7. Observation of spin-orbit Berry phase in magnetoresistance of a two-dimensional hole antidot system: Ning Kang, Kazuya Suzuki, Eisuke Abe, Yoshiaki Hashimoto, Yasuhiro Iye, Shingo Katsumoto, Physica E40 (2008) 1051-1054.

8. Potential dependent intra-dot Coulomb interaction in quantum dots side-coupled to quantum wires: Tomohiro Otsuka, Eisuke Abe, Yasuhiro Iye, Shingo Katsumoto, Physica E40 (2008) 1270-1272.

9. Evolution of $h/2e$ Aharonov-Bohm oscillation with the Zeeman energy around an antidot: Masanori Kato, Akira Endo, Shingo Katsumoto, Yasuhiro Iye, Physica E40 (2008) 1517-1519

10. Resistivity enhancement in quasiperiodic unidirectional lateral superlattices: Akira Endo, Yasuhiro Iye, *Physica E40* (2008) 1145-1148.
11. Higher order terms in the geometric resonance of open orbits in unidirectional lateral superlattices: Akira Endo and Yasuhiro Iye, *Solid State Commun.* 148 (2008) 131-134
12. Excited state spectroscopy on a quantum dot side-coupled to a quantum wire: T. Otsuka, E.Abe, Y.Iye and S.Katsumoto, *Appl. Phys. Lett.* 93 (2008) 112111.
13. Fourier analyses of the commensurability oscillations in Fibonacci lateral superlattice: Akira Endo and Yasuhiro Iye, *Phys. Rev. B* 78 (2008) 085311.
14. Resistively Detected NMR Studies of Quantum Hall Systems: Katsuyoshi Kodera, Hisashi Takado, Akira Endo, Yoshiaki Hashimoto, Shingo Katsumoto and Yasuhiro Iye, *AIP Conf. Proc.* 893 (2007) 669.
15. Anomalous Aharonov-Bohm-Type Effects in Square Array of Antidots: Masanori Kato, Akira Endo, Shingo Katsumoto, and Yasuhiro Iye, *AIP Conf. Proc.* 893 (2007) 659.
16. Diffraction from quasiperiodic unidirectional lateral superlattice observed in the geometric resonance of magnetoresistance: Akira Endo and Yasuhiro Iye, *AIP Conf. Proc.* 893 (2007) 575.
17. Phase Information from Two-Terminal Conductance of Quantum Dot Systems: T.Otsuka, H.Aikawa, M.Eto, G. L.Khym, K.Kang, Y.Iye and S.Katsumoto, *AIP Conf. Proc.* 893 (2007) 855.
18. Anisotropic Transport of Two-Dimensional Hole System in Higher Landau Levels: Effect of In-Plane Magnetic Field: H. Takado, Y.Hashimoto, A. Endo, S. Katsumoto and Y. Iye, *J. Phys. Soc. Jpn.* 76 (2007) 074712-1-5.
19. Fano Effect in a Few-Electron Quantum Dot: T. Otsuka, E. Abe, S. Katsumoto, Y. Iye, G. L. Khym and K. Kang, *J. Phys. Soc. Jpn.* 76 (2007) 084706-1-5.
20. Phase Transitions of Superconducting Wire Network under Spatially Modulated Magnetic Field: H. Sano, A. Endo, S. Katsumoto and Y. Iye, *J. Phys. Soc. Jpn.* 76 (2007) 094707-1-7.
21. Observation of Spin-Orbit Berry's Phase in Magnetoresistance of a Two-Dimensional Hole Anti-dot System: Ning Kang, Eisuke Abe, Yoshiaki Hashimoto, Yasuhiro Iye, and Shingo Katsumoto, *J. Phys. Soc. Jpn.* 76 (2007) 083704-1-4.
22. Temperature Scaling of Quantum Hall Plateau Transitions in Bilayer Systems: K.Kodera,A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye, *Physica E34* (2006) 112-125.
23. Effect of localized spins in coherent transport through quantum dots: Shingo Katsumoto, Masahiro Sato, Hisashi Aikawa, Yasuhiro Iye, *Physica E34* (2006) 36-41.
24. Aharonov-Bohm Effects in Different Arrays of Antidots: M.Kato, H.Tanaka, A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye, *Physica E34* (2006) 534-537.
25. Geometric Resonance of Bragg-Reflected Cyclotron Orbits in Unidirectional Lateral Superlattices: the Role of Harmonics of the Potential Modulation: A.Endo and Y.Iye, *Physica E34* (2006) 640-643.
26. Magnetoresistance in the Strongly Insulating Regime of GaAs Two-Dimensional Hole Systems: K.Toyama, M.Ooya, T.Okamoto, Y.Hashimoto, S.Katsumoto and Y.Iye, *Physica E34* (2006) 697-700.
27. Superconducting Wire Network under Spatially Modulated Magnetic Field: Hirotsuka Sano, Akira Endo, Shingo Katsumoto and Yasuhiro Iye, *AIP Conf. Proc.* 850 (2006) 747-749.
28. Temperature Scaling Anomalies in Quantum Hall Plateau Transitions with Ultra-Short Period Lateral Superlattice: K.Kodera, A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye, *AIP Conf. Proc.* 850 (2006) 1345-1347.

29. Quantum Hall Resistance Anomalies Observed at $\nu = 1/3$ and $1 < \nu < 2$ in Two-Dimensional Hole System: K.Kodera, Y.Hashimoto, A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye, AIP Conf. Proc. 850 (2006) 1343-1346.

30. Aharonov-Bohm-type Oscillations of Small Array of Antidots in Quantum Hall Regime: M.Kato, H.Tanaka, A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye, AIP Conf. Proc. 850 (2006) 1349-1351.

31. Novel Low Field Magnetoresistance Oscillation in Unidirectional Lateral Superlattice: A.Endo and Y.Iye, AIP Conf. Proc. 850 (2006) 1347-1348

32. Large Magnetoresistance through an Interface between a Two-Dimensional Hole System and a (GaMn)As Layer: Y.Hashimoto, T.Yamagishi, S.Katsumoto and Y.Iye, AIP Conf. Proc. 850 (2006) 1492-1493.

33. The Fano-Kondo Effect in Semiconductor Quantum Dots: S.Katsumoto, M.Sato, H.Aikawa and Y.Iye, AIP Conf. Proc. 850 (2006) 1361-1364

34. Superconducting Wire Network under Spatially Modulated Magnetic Field: Hirotaka Sano, Akira Endo, Shingo Katsumoto and Yasuhiro Iye, Proc. 8th Int. Symp. on Foundation of Quantum Mechanics in the Light of New Technology (ISQM-Tokyo '05), ed. S. Ishioka and K.Fujikawa, (World Scientific, 2006) pp.212-215.

35. Aharonov-Bohm Effects in Antidot Arrays and their Decoherence: M.Kato, H.Tanaka, A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye, Proc. 8th Int. Symp. on Foundation of Quantum Mechanics in the Light of New Technology (ISQM-Tokyo '05), ed. S.Ishioka and K.Fujikawa, (World Scientific, 2006) pp.109-112.

36. Tunable Fano-Kondo effect in a quantum dot with an Aharonov-Bohm Ring S. Katsumoto, H. Aikawa, M. Eto, Y. Iye, phys. stat. sol. (c) 3 (2006) 4208-4213.

37. Dispersive Lineshape of the Resistively-Detected NMR in the Vicinity of Landau Level Filling $\nu = 1$: Katsuyoshi Kodera, Hisashi Takado, Akira Endo, Shingo Katsumoto and Yasuhiro Iye, phys. stat.

sol. (c) 3 (2006) 4380-4383.

38. Metastable Spin Configuration of Two-Dimensional Hole System in the Quantum Hall Regime: Katsuyoshi Kodera, Hisashi Takado, Akira Endo, Yoshiaki Hashimoto, Shingo Katsumoto and Yasuhiro Iye, phys. stat. sol. (c) 3 (2006) 4255-4258.

〔学会発表〕(計 37件)

1. "Study of vortex state in mesoscopic superconductors by Hall magnetometry": Hirotaka Sano, Akira Endo, Shingo Katsumoto and Yasuhiro Iye, The 25th Int. Conf. on Low Temp. Physics (LT25) Leiden, The Netherland, 6-13, Aug., 2008.

2. "Resistivity enhancement in quasiperiodic unidirectional lateral superlattices": Akira Endo, Yasuhiro Iye: The 17th Int. Conf. on the Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-17) Genova, 15-20 July 2007.

3. "Evolution of $h/2e$ Aharonov-Bohm oscillation with the Zeeman energy around an antidot": Masanori Kato, Akira Endo, Shingo Katsumoto, Yasuhiro Iye, The 17th Int. Conf. on the Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-17) Genova, 15-20 July 2007.

〔図書〕(計 1件)

1. 「21世紀の物質科学 第5章:ナノの世界で物質を組み立てる」家泰弘(培風館, 2008)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

家泰弘 (IYE YASUHIRO)
 東京大学・物性研究所・教授
 研究者番号: 30125984

(2) 研究分担者

遠藤 彰 (ENDO AKIRA)
 東京大学・物性研究所・助教
 研究者番号: 20260515