

「電子・光子等の機能制御」

平成 10 年度採択研究代表者

平山 祥郎

(日本電信電話(株)物性科学基礎研究所 グループリーダー)

## 「相関エレクトロニクス」

### 1. 研究実施の概要

分数量子ホール効果や半導体人工原子に代表されるように、半導体薄膜構造およびナノ構造においてキャリア相関が重要な役割を果たすことは物性物理では明らかになってきた。しかし、超伝導現象や超流動現象などのように工学的にも役立つ、画期的な相関効果は半導体では未だ得られていない。半導体中でのキャリア相関が工学的にも役立つ画期的な効果を生む可能性を探るために、本プロジェクトでは高品質半導体構造を中心に半導体中での新しいキャリア相関現象を追究する。具体的には、薄膜構造での強いキャリア相関による超流動現象、結合したドット間のキャリア相関を利用した量子ビットなどを目指す。H13 年度は前年度に引き続き薄膜構造、ナノ構造についてそのキャリア相関の研究を進めた。薄膜構造においては二層二次元系の量子ホール効果領域で生じる特徴的なキャリア相関を抽出するとともに、量子ビットとしても期待される核スピンの電子系による制御をはじめて実現した。量子ドットにおいては、ドット構造における代表的な電子スピン相関として近藤効果に着目して研究を進めるとともに、スピンの関係した整流特性を明瞭に示した。また、量子ビットに向けたパルス測定技術の蓄積を継続して進め、特にパルス技術を用いたキャリアダイナミクスの精密測定において、量子ドット中では電子スピンと軌道やその他の要素との相互作用が非常に弱いという結果を得た。これは電子スピンのコヒーレントデバイスへの応用を勇気づける成果である。また、より高速な評価を目指し THz 帯電磁波の応用についても積極的に研究し超格子中のブロッホ振動などについて興味ある知見を得た。さらに、ナノスケールでのキャリア相関評価の基本技術として、低温 STM、低温 SNOM の研究を行い、低温 STM に関しては InAs 表面に蓄積した二次元電子や零次元電子などの半導体中電子波の直接観察に成功し、特に零次元状態への状態密度の集中を世界で初めてナノスケールで可視化した。また、将来の量子コンピュータの設計に不可欠な量子情報理論に関しては継続して量子エンタングルメントを含む量子情報処理の基本特性の検討を行った。

薄膜構造、ナノ構造のキャリア相関に関しては、世界的に注目される新しい知見が順調にこのプロジェクトから出ている。今後も量子ドット中の電子ダイナミクス、半導体における電子スピン制御、核スピン制御など半導体量子ビットに繋がる可能性のあるものを中心に、薄膜中での強いキャリア相関も視野に入れて新しい分野である相関エレクトロニクスの確立を目指し研究を進める。

## 2. 研究実施内容

前年度に引き続き、半導体構造におけるキャリア相関の理解と、量子計算などに応用可能なキャリア相関効果の抽出を目指して研究を進めた。ここでは H13 年度の研究実施内容と成果について概説する。

薄膜構造におけるキャリア相関では、バックゲート構造を利用した二層系についてキャリア相関の研究を進め、いくつかの新しい知見を得た。特に同じ全充填率でのスピン、擬スピンの異なる量子ホール状態間の転移に相互作用が極めて大きな役割を果たすことを見出した。また、バックゲートヘテロ構造のキャリア制御性の利点を生かし、充填率( $\nu$ )=2/3の分数量子ホール効果状態で核スピンを偏極できること、電子の空乏化により長時間にわたり核スピン偏極が保持できること、逆に $\nu=1$ では電子のスピン構造を利用して数秒で核スピン偏極を消去できることを示した。これらは電子系のみによる半導体核スピン制御の可能性を世界に先駆け示したものであり、核スピンのコヒーレント時間が長いことから量子コンピュータの観点からも興味を持たれる成果である。

ナノ構造におけるキャリア相関では、キャリア相関の基本となるナノ構造についてその作製、物性解明の研究を継続して進めた。バックゲートヘテロ構造上のメゾスコピック構造としては、ナノ構造の基本となる量子ポイントコンタクトに関して、電子相関に基づく構造であることが明確な $G=2e^2/h\nu$ ( $\nu=0.7$ )の分数ステップについてその起源を実験ならびに理論面から追究した。また、結合量子ドットとして多くのキャリア相関現象が期待されるバックゲート型ドットアレイについても実験を継続し、クーロン相互作用によるピーク構造を伝導特性に見出した。半導体量子ドット構造については、スピン相関の関与する電気伝導の物理の解明と制御を目指して研究を行いパウリの排他律に起因するスピンプロケード効果を世界に先駆け明らかにした。さらに、プロケード(電流閉塞)を担っているスピン三重項状態が、電子スピンと核スピンの相互作用で崩壊する現象を見出した。これはドット系では初めての核スピンと電子系の相互作用の発見であり、量子計算の新しい概念、

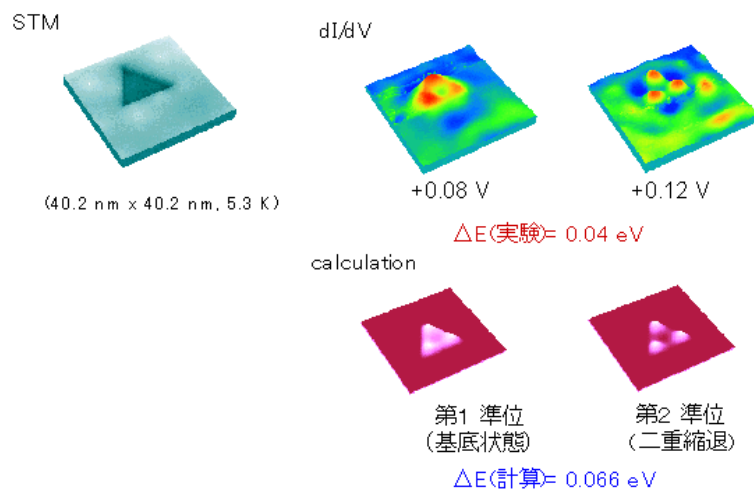


図1 微小構造のSTM像(左上)と観測された量子ドットの基底ならびに第二準位の電子分布パターン(実測されたdI/dVパターン(右上)、計算結果(右下))。

あるいは量子コヒーレンスの緩和に関係する重要な知見である。近藤効果の研究では理想的なアンダーソン不純物に相当する“電子1個を含むドット”の近藤効果、スピン二重項縮退での近藤効果の増強、近藤効果と同様な低温領域で現れる弾性的コトンネル現象の影響、などを初めて実験的に確認した。さらに、強結合二重量子ドットにおける電子状態を調べ、電子のエネルギースペクトルに対する2個の量子ドットの非対称性やクーロン相互作用の影響の詳細を明らかにした。

ナノプローブ技術はキャリア関連のナノスケールでの理解という意味から重要であるのみならず、半導体量子ビットに向けた入出力技術としても重要である。H13年度は関連効果の測定の基礎となる半導体中電子波の直接測定などを継続して研究し画期的な成果を得た。InAs(111)A表面の利点を活かした低温STMによる測定では、転位に散乱された二次元電子の電子波が作るFriedel振動に加えて、量子ドット中の電子状態の直接測定に成功した。これは、InAs(111)A薄膜中に結晶成長中に形成されるピラミッドを逆にした形の欠陥が量子ドットとして働くことを利用したもので、図1に示すように微小なドット構造で基底状態から4番目までの分離したそれぞれのゼロ次元準位に対応する電子の状態密度分布を明瞭に観察することができた。また、観察されたパターンは理論的に得られた結果と良く一致した。さらに、量子ドットに特徴的な状態密度のゼロ次元準位への集中も確認された。低温ナノプローブ技術では電氣的測定以外に光学的測定も大変興味深く、強磁場・低温で動作するSNOMによる半導体ヘテロ構造の評価を継続し、SNOMではじめて明らかになる結果を得た。また、本プロジェクトでは超高速・超微細な電子デバイスの動作解析、あるいは、半導体量子構造の電子相関現象のナノスケール高速観測を目的として、高速応答電気力顕微鏡を開発してきた。H13年度もカンチレバーの高速信号特性を改善すると共に、高速動作のテストのひとつとして半導体ナノメカニカル構造の振動特性測定に着手した。

キャリアダイナミクスの測定はキャリア関連の評価、量子ビットとしての振る舞いの測定に必要不可欠なものであり、THz領域でのキャリアダイナミクスの測定技術、量子ドット構造を用いた低温パルス測定技術の確立、さらにそれらの測定の物性研究への応用を中心に研究を進めた。特にTHz関連では半導体超格子中の電子波束のブロッホ振動を利用した超高周波発振器(ブロッホ発振器)に着目して研究を進めた。これは30年前に提案されて以来、未だに実現に至っていないもので、理論的にはブロッホ振動が電磁波に対して利得を有し、電磁波を発生・増幅するためには、電子波束の適度なコヒーレンスと散逸の両方が必要であることが示唆されている。しかし、バイアスを印加した超格子の伝導度をテラヘルツ領域まで測定する技術が無かったために、利得があることを実験的に証明することは今までできなかった。本プロジェクトでは、線形応答理論によれば、フェムト秒レーザーパルスにより励起した電子が電界により加速されるときに放射する電磁波が伝導度の情報を含んでいることに着目し、その放射電磁波スペクトルより、ブロッホ振動する電子の伝導度をテラヘルツ領域まで測定する技術を開発した。さらにその技術を用いて、超格子の伝導度を測定し、数テラヘルツまでの電磁波に対して利得を有していることを強く示唆する結果を得た。また、量子ドットのキャリアダイナミクスにおいても大きな進展があった。パルス測定を繰り返し、その平均としてキャリアダイナミクスを求める測定では、nsecオーダーまでのパルスを量子ドットのゲートに加えて、量子ドット中での電子のダイナミクスを測定した。その結果、励起状態と基底状態が異なるスピ

ン状態を有しているときには、励起状態から基底状態への電子の緩和は  $100 \mu \text{ sec}$  以上と極めて長くなり、緩和時間はコトネル現象に支配されていることが明らかになった。この成果は量子ドット中で電子が励起状態に長く留まれ、電子スピンの他の要因にかく乱されずにその状態が良く保持される可能性を示しており、量子ドット中の電子スピンを用いた量子ビットやスピントロニクスデバイスの研究を非常に勇気付けるものである。さらに、繰り返し測定の平均としてではなく一回の現象を高速で測定するパルス技術も引き続き検討した。特に高感度高速電荷計として働く RF-SET (radio-frequency single-electron-transistor (SET; 単電子トランジスタ)) 技術を改良して透過型の RF-SET を実現し、量子ドットに出入りする電子の挙動を近接する量子ドットで測定する実験をスタートした。

最後に、量子コンピューティングならびに量子情報処理において最も重要なエレメントである量子ビットについて、多量子ビットのエンタングルメントの概念や性質を明らかにすることや、多量子ビットで実現できるエンタングルメントの上限やそれを実現する相互作用、さらには量子ビットを所望の量子状態に自由に操作することを目指して提案された「quantum scissors」と呼ばれる概念について引き続き研究を進め極めて重要な成果を得た。特に多量子ビットのエンタングルメントについてはプロジェクト内の実験グループと理論グループの共同研究として進め、成果を半導体系での実験可能性の検討にまで発展させたい所存である。また、量子情報処理の基本を光による実験を用いて追究する研究も推進し、エンタングルした光子対と線形素子(ビームスプリッターなど)のみを用いて制御 NOT を実現する方法を提案し、その基礎検討を進めた。また、固体の量子コンピュータにとって一番重要な問題であるデコヒーレンスについても背景電荷ゆらぎを中心にその理論的理解を深めた。

### 3. 研究実施体制

#### 薄膜・ナノ相関構造研究グループ

- ① 研究分担グループ長: 平山 祥郎 (NTT 物性科学基礎研究所、主幹研究員(GL))
- ② 研究項目: 相関構造作成と伝道特性評価

#### 相関効果の磁場特性研究グループ

- ① 研究分担グループ長: 樽茶 清悟 (東京大学理学部、教授)
- ② 研究項目: ナノ構造相関効果の磁場特性評価

#### コヒーレンス性評価グループ

- ① 研究分担グループ長: 平川 一彦 (東京大学生産技術研究所、教授)
- ② 研究項目: 相関構造中のキャリアコヒーレンス性の評価

#### ナノ評価技術開発グループ

- ① 研究分担グループ長: 横山 浩 (産業技術総合研究所、研究部門長)
- ② 研究項目: 相関構造評価用ナノプローブ技術の開発

#### 量子演算研究グループ

- ① 研究分担グループ長: 井元 信之 (総合研究大学院大学、教授)
- ② 研究項目: 相関エレクトロニクスを量子計算につなげる理論、原理の検討

#### 4. 研究成果の発表

##### (1) 論文発表

- W. G. van der Wiel, T. Fujisawa, S. Tarucha, and L. P. Kouwenhoven, “A double quantum dot as artificial two-level system”, Japan. J. Appl. Phys. **40** (2001) 2100.
- Katsushi Hashimoto, Sen Miyashita, Tadashi Saku and Yoshiro Hirayama, “Back-gated point contact”, Japan. J. Appl. Phys. **40** (2001) 3000.
- Y. Shimada, T. Matsuno, and K. Hirakawa: “THz emission due to miniband transport in GaAs/AlGaAs superlattices”, Japan. J. Appl. Phys. **40** (2001) 3009.
- H. Yamaguchi, R. Dreyfus, Y. Hirayama, and S. Miyashita, “Excellent electric properties of free-standing InAs membranes”, Appl. Phys. Lett. **78** (2001) 2372.
- A. Kawaharazuka, T. Saku, Y. Tokura, Y. Horikoshi, and Y. Hirayama, “Transport characteristics of electrons in weak short-period two-dimensional potential arrays”, Appl. Phys. Lett. **79** (2001) 427.
- Y. Kawaguchi, K. Hirakawa, M. Saeki, K. Yamanaka, and S. Komiyama: “Performance of high-sensitivity quantum Hall far infrared photodetectors”, Appl. Phys. Lett., **80** (2002) 136.
- R. J. A. Hill, A. Patane, P. C. Main, M. Henini, L. Eaves, S. Tarucha, and D. G. Austing, “Controlling the electron tunneling through InAs self-assembled dots”, J. Appl. Phys. **91** (2002) 3474.
- Y. Kawano, S. Komiyama, and K. Hirakawa: “Suppression of electron-hole pair recombination in edge states in quantum Hall regimes”, Physica B **298** (2001) 33.
- T. Machida, S. Ishizuka, S. Komiyama, K. Muraki and Y. Hirayama, “Nonequilibrium population in fractional edge states”, Physica B **298**, (2001) 150.
- T. Machida, S. Ishizuka, S. Komiyama, K. Muraki and Y. Hirayama, “Scaling in fractional quantum Hall transitions”, Physica B **298**, (2001) 182.
- K. Hashimoto, K. Muraki, T.Saku and Y.Hirayama, “Longitudinal resistance anomaly around the  $2/3$  filling factor observed in a GaAs/AlGaAs single heterostructure”, Physica B **298**, (2001) 191.
- Y. Tokura, S. Sasaki, D. G. Austing, and S. Tarucha, “Excitation spectra and exchange interactions in circular and elliptical quantum dots”, Physica B **298**, (2001) 260.
- Toshimasa Fujisawa, Yasuhiro Tokura, and Yoshiro Hirayama, “Energy relaxation process in a quantum dot studied by DC current and pulse-excited current measurements”, Physica B **298**, (2001) 573.
- K. Suzuki, S. Miyashita, and Y. Hirayama, “Back-gate control in an InAs-based two-dimensional system”, Physica C **352**, (2001) 125.
- S. Tarucha, D. G. Austing, S. Sasaki, Y. Tokura, J. M. Elzerman, W. van der Wiel, S de Franceschi, and L. P. Kouwenhoven, “Spin effects in semiconductor quantum dot

structures”, Physica E **10** (2001) 45.

- D. G. Austing, H. Tamura, Y. Tokura, K. Muraki, S. Amaha, K. Ono, and S. Tarucha, “Single dot and strongly coupled double dots at high magnetic fields”, Physica E **10**, (2001) 112.
- K. Hirakawa, A. Oiwa, and H. Munekata: “Infrared optical conductivity of  $\text{In}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ ”, Physica E **10** (2001) 215.
- D. Austing, Y. Tokura, S. Tarucha, P. Matagne, J. P. Leburton, “Addition energy spectrum of a quantum dot disk up to the third shell”, Physica E **11**, (2001) 63.
- K. -J. Friedland, T. Saku, Y. Hirayama, and K. H. Ploog, “Electron coupling in weakly and strongly coupled quantum point contacts”, Physica E **11**, (2001) 144.
- Y. Hirayama, K. Muraki, A. Kawaharazuka, K. Hashimoto, and T. Saku, “Backgated layers and nanostructures”, Physica E **11**, (2001) 155.
- Koji Muraki, Tadashi Saku, and Yoshiro Hirayama, “Activation studies of pseudospin quantum Hall ferromagnets in double quantum wells”, Physica E **12** (2002) 8
- Tomoki Machida, Susumu Ishizuka, and Koji Muraki, “Spin polarization in fractional quantum Hall edge channels”, Physica E **12** (2002) 76
- Y. Tokura and A. Khaetskii, “Towards a microscopic theory of the 0.7 anomaly”, Physica E **12**, (2002) 711.
- S. Sasaki, Y. Kitamura, W. Izumida, K. Ono, and S. Tarucha, “The Kondo effect in a one- and two-electron quantum dot”, Physica E **12** (2002) 806.
- D.G. Austing, S. Sasaki, K. Muraki, K. Ono, S. Tarucha, M. Barranco, A. Emperador, M. Pi, and F. Garciasd, “Influence of mismatch on the addition energy spectra of vertical diatomic artificial molecules”, Physica E **12** (2002) 896.
- T. Yamamoto, M. Koashi, and N. Imoto: “Concentration and purification scheme for two partially entangled photon pairs”, Phys. Rev. **A64** (2001) 012304.
- F. Morikoshi and M. Koashi: “Deterministic entanglement concentration”, Phys. Rev. **A64** (2001) 022316.
- S. K. Ozdemir, A. Miranowicz, M. Koashi, and N. Imoto: “Quantum-scissors device for optical state truncation: A proposal for practical realization”, Phys. Rev. **A64** (2001) 063818.
- K. Hirakawa, K. Yamanaka, M. Endo, and S. Komiyama: “Far-infrared photoresponse of the magnetoresistance of the two-dimensional electron systems in the integer quantized Hall regime”, Phys. Rev. **B63** (2001) 85320.
- A. Kawaharazuka, T. Saku, C. A. Kikuchi, Y. Horikoshi and Y. Hirayama, “Free GaAs surfaces studied using a back-gated undoped  $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  heterostructure”, Phys. Rev. **B63**, (2001) 245309.

- N. Sekine, K. Hirakawa, M. Vossebuerger, P. Haring Bolivar, and H. Kurz: “Crossover from coherent to incoherent excitation of two-dimensional plasmons in GaAs/AlGaAs single quantum wells by femtosecond laser pulses”, Phys. Rev. **B64** (Rapid Communication), (2001) 201323 (R).
- P. Matagne, J. P. Leburton, D. G. Austing, and S. Tarucha, “Shell charging and spin-filling sequences in realistic vertical quantum dots”, Phys. Rev. **B65** (2002), 085325.
- K. Kanisawa, M. J. Butcher, H. Yamaguchi and Y. Hirayama, “Imaging of Friedel Oscillation Patterns of Two-Dimensionally Accumulated Electrons at Epitaxially Grown InAs(111)A Surfaces” Phys. Rev. Lett. **86** (2001) 3384.
- M. Koashi and N. Imoto: “Compressibility of quantum mixed-state signals”, Phys. Rev. Lett. **87**, (2001) 017902.
- M. Pi, A. Emperador, M. Barranco, F. Garcias, K. Muraki, S. Tarucha, D. G. Austing, “Dissociation of Vertical Semiconductor Diatomic Artificial Molecules” Phys. Rev. Lett. **87** (2001) 066801.
- Koji Muraki, Tadashi Saku and Yoshiro Hirayama, “Charge Excitations in Easy-Axis and Easy-plane Quantum Hall Ferromagnets”, Phys. Rev. Lett. **87**, (2001) 196801.
- K. Kanisawa, M. J. Butcher, Y. Tokura, H. Yamaguchi, and Y. Hirayama, “Local Density of States in Zero-Dimensional Semiconductor Structures”, Phys. Rev. Lett. **87**, (2001) 196804.
- Y. Avishai, Y. Tokura, “Resonant Electron Transmission through a Finite Quantum Spin Chain”, Phys. Rev. Lett. **87** (2001) 197203.
- K. Hashimoto, K. Muraki, T. Saku, and Y. Hirayama, “Electrically Controlled Nuclear Spin Polarization and Relaxation by Quantum-Hall States”, Phys. Rev. Lett. **88** (2002) 176601.
- A. Miranowicz, J. Bajer, M. R. B. Wahiddin and N. Imoto: “Wehrl information entropy and phase distributions of Schrodinger cat and cat-like states”, J. Phys. **A34** (2001) 3887.
- K. Kanisawa, M. J. Butcher, H. Yamaguchi, Y. Hirayama, “Imaging of Friedel oscillations at epitaxially grown InAs(111)A surfaces using scanning tunneling microscopy”, Proc. 25<sup>th</sup> Int. Conf. on Phys. Semicond. Part I (2001) 427.
- K. Hashimoto, T. Saku, Y. Hirayama, “Slow resistance enhancements in the fractional quantum Hall regime observed in a GaAs/AlGaAs single heterostructure”, Proc. 25<sup>th</sup> Int. Conf. on Phys. Semicond. Part II (2001) 937.
- K. Muraki, T. Saku, Y. Hirayama, “Effects of spin and charge profiles on the phase transition in bilayer quantum Hall systems”, Proc. 25<sup>th</sup> Int. Conf. on Phys. Semicond. Part II (2001) 983.
- S. Sasaki, D. G. Austing, Y. Kitamura, S. Tarucha, S. De Franceschi, J. M. Elzerman, W. G. van der Wiel, L. P. Kouwenhoven, “A novel Kondo effect in a vertical quantum dot”, Proc. 25<sup>th</sup> Int. Conf. on Phys. Semicond. Part II (2001) 1025.

- T. Fujisawa, Y. Tokura, Y. Hirayama, “Relaxation time of excited state in a quantum dot studied by pulse-excited current”, Proc. 25<sup>th</sup> Int. Conf. on Phys. Semicond. Part II (2001) 1031.
- M. Yamamoto, M. Stopa, Y. Tokura, Y. Hirayama, S. Tarucha, “Coulomb Drag in Parallel Quantum wires – Tomonaga–Luttinger liquid effect of Coulomb drag”, Proc. 25<sup>th</sup> Int. Conf. on Phys. Semicond. Part II (2001) 1051.
- A. Kawaharazuka, T. Saku, Y. Tokura, Y. Horikoshi, Y. Hirayama, “Transport characteristics of electrons in weak short–period two–dimensional potential arrays”, Proc. 25<sup>th</sup> Int. Conf. on Phys. Semicond. Part II (2001) 1341.
- Ph. Lelong, K. Hirakawa, K. Hirotsu, S.–W. Lee, and H. Sakaki: “Fano profiles in bound–to–continuum intersubband transitions in negatively charged InAs quantum dots”, *Proceedings of the 25th International Conference on the Physics of Semiconductors*, ed. by N. Miura and T. Ando, Springer, pp. 1163–1164 (2001).
- K. Hoshino, T. Someya, K. Hirakawa, and Y. Arakawa: “Observation of Intersubband Transition in AlGaIn/GaN Single Heterostructures”, Proc. 25<sup>th</sup> Int. Conf. Phys. Semicond. (Eds. N. Miura and T. Ando), pp. 1527–1528 (2001).
- S. Tarucha, D. G. Austing, S. Sasaki, T. Fujisawa, Y. Tokura, J. M. Elzerman, W. van der Wiel, S de Franceschi, and L. P. Kouwenhoven, “Novel Kondo anomaly in quantum dots”, *Mat. Sci. Eng. B* **84** (2001) 10.
- S. Amaha, D. G. Austing, Y. Tokura, K. Muraki, K. Ono, and S. Tarucha, “Magnetic field induced transitions in the few–electron ground states of artificial molecules”, *Solid State Communications* **119** (2001) 183.
- L. P. Kouwenhoven, D. G. Austing, and S. Tarucha, “Few–electron quantum dots”, *Rep. Prog. Phys.* **64**, (2001) 701.
- J. Bajer and A. Miranowicz: “Quantum vs classical descriptions of sub–Poissonian light generation in three–wave mixing”, *J. Optics* **B 3** (2001) 251.
- S. Katsumoto, T. Hayashi, Y. Hashimoto, Y. Iye, Y. Ishiwata, M. Watanabe, R. Eguchi, T. Takeuchi, Y. Harada, S. Shin, and K. Hirakawa: “Magnetism and metal–insulator transition in III–V based diluted magnetic semiconductors”, *Journal of Materials Science and Engineering B* **84**(2001) 88.
- S. Katsumoto, T. Hayashi, Y. Hashimoto, Y. Iye, Y. Ishiwata, M. Watanabe, R. Eguchi, T. Takeuchi, Y. Harada, S. Shin and K. Hirakawa: “Nature of Magnetism in III–V based Diluted Magnetic Semiconductors”, *IPAP Conference Series 2* Proceedings of the 10th International Conference on Narrow Gap Semiconductors and Related Small Energy Phenomena, Physics and Applications –NGS10–, (2001) 261.
- Takahito Inoue, Frank Ogletree, Miquel Salmeron, “Scanning field–emission force



microscopy and spectroscopy of chemical-vapor-deposited carbon field-emission cathodes”, J. Vac. Sci. Technol. **B19** (2001) 675.

- S. Tarucha, D. G. Austing, T. Fujisawa and L.P. Kouwenhoven, “Electron Transport in Semiconductor Quantum Dots” in “Optical and electronic process of Nano-matters”, KTK Scientific Publishers/Kluwer Academic Publishers ISBN 0-7923-6987-4(Kluwer) (2001) Chapter 2 (57-92).
- S. Sasaki and S. Tarucha, “The Kondo effect in semiconductor quantum dots”, Technical Report of IEICE (2002) ED2001-225, SDM2001-228 (in Japanese).
- K. Suzuki, S. Miyashita, and Y. Hirayama, “Correlation between electrons and holes in InAs/GaSb heterostructures”, Technical Report of IEICE (2002) ED2001-230, SDM2001-233 (in Japanese).
- K. Kanisawa, Y. Tokura, H. Yamaguchi, and Y. Hirayama, “Observation of electrons in nano-world - STM observation of the zero-dimensional electrons in semiconductors-“, Nikkei Sentangijutsu, **No.1** (2001) 5. (in Japanese)

#### Reviews

- 蟹澤聖、M. J. Butcher、都倉康弘、山口浩司、平山祥郎、“量子化された伝導電子の局所状態密度の直接観察”、固体物理 **37** (2002) 81.
- 樽茶清悟、佐々木智、“量子ドットの近藤効果”、学術月報, vol.**54**, No.10, 984(2001).
- 井元信之:「量子情報処理への道」学術月報第 54 卷第 10 号, pp.56-59 (2001).
- 小芦雅斗:「量子暗号とその背後にある原理」数理科学第 456 卷第 6 号, pp.15-23 (2001).
- 平川一彦:”新著紹介:C. Hamaguchi “Basic Semiconductor Physics”, Springer”、日本物理学会誌 (2002).
- 平川一彦:“人工原子が拓く量子情報科学”(翻訳)、パリティ 3 月号、pp. 26-35 (2002).

#### Books

- S. Tarucha, D.G. Austing, S. Sasaki, L.P. Kouwenhoven, S. Reimann, M. Koskinen and M. Manninen:Electronic states in circular and ellipsoidally deformed quantum dots, Chapter 9, p194-p216, to “Physics and Applications of Semiconductor Quantum Structure”, ed. by T. Yao, IOP Publishing Co., Bristol, UK. (2001).
- A. Miranowicz, W. Leonski, and N. Imoto: “Quantum-optical states in finite-dimensional Hilbert space. I. General formalism”, in Modern Nonlinear Optics, ed. M. W. Evans, Adv. Chem. Phys., **119** (I) (Wiley, New York, 2001) pp.155-193.
- W. Leonski and A. Miranowicz: “Quantum-optical states in finite-dimensional Hilbert space. II. State generation”, in Modern Nonlinear Optics, ed. M. W. Evans, Adv. Chem. Phys., **119** (I) (Wiley, New York, 2001) pp.195-213.
- J. Bajer and A. Miranowicz: “Quantum, classical and semiclassical analyses of photon statistics in harmonic generation”, in Modern Nonlinear Optics, ed. M. W. Evans, Adv.

Chem. Phys., **119** (I) (Wiley, New York, 2001) pp.493-515.

- A. Miranowicz, J. Bajer, M. Koashi, and N. Imoto: “Photon bunching and antibunching effects in non-stationary fields”, in Modern Nonlinear Optics, ed. M. Evans, Advances in Chem. Phys., **119** (I) (Wiley, New York, 2001) pp.515-527.
- 平山祥郎:「ナノテクノロジー — 極限の微細制御技術 —」イミダス 02 (集英社) pp818-821 (2002).
- 井元信之:「量子工学」イミダス 02 (集英社), pp.821-825 (2002).
- 井元信之:「量子情報通信」、三木・須藤編「光通信技術ハンドブック」(オプトロニクス社), pp.57-59 (2002).
- 平川一彦(分担執筆):“応用物理学ハンドブック”、丸善 (2002).
- 平川一彦(分担執筆):“電気工学ハンドブック”、電気学会 (2002).

(2) 特許出願

なし