

「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)

## 「関連エレクトロニクス」

### 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である。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、この研究では高品質半導体構造を用いて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キャリア超流動現象、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等があげられる。H11年度は薄膜相関構造の基本になる二層二次元系、バックゲートノンドープ構造を用いたナノ構造、単一ならびに結合ドット構造の特性理解、ドット中の電子の動的挙動直接観察に向けた測定技術、キャリア相関の評価に向けたTHz・遠赤外技術、ナノスケールでの相関特性評価を可能にする低温ナノプローブ等の研究分野で進展があった。今後は、薄膜二層構造における独立なコンタクトの形成と相関による特異な振る舞いの確認、新しいキャリア相関が期待されるナノ構造・薄膜構造の作成と伝導特性評価、量子ビットに向けたラビ振動の測定、量子ビットに向けた理論的検討さらには低温ナノプローブ技術のキャリア特性評価への応用を進める。最終的には半導体エレクトロニクスに相関の概念を持ち込み革新的な半導体デバイスの実現を目指す、関連エレクトロニクスを提案し確立することを狙う。

### 2. 研究実施内容

H11年度は高品質薄膜・ナノ構造でキャリア相関を明らかにすることと、キャリア相関の評価の確立を目指して研究を行い、下記のような成果を得た。

薄膜相関構造については、その基本となる二層二次元系において二層の電子密度を完全に自由に制御できかつ高移動度が得られる理想的な二層構造を実現し、整数量子ホール効果領域で二層の電子密度のアンバランスがどのように特性に影響するかを明確にした。図1に磁場一定で各層の電子密度を大きく変化した時の量子ホール効果状態の出現パターンを示す。図中の白い部分が量子ホール状態が実現してい

るところである。電子密度のアンバランスに対する量子ホール効果の安定性は $n$ に対し見事に周期的に変化している。このくり返し周期  $=4$ はスピン自由度2と層自由度2を掛け合わせた値を反映しており、二層系に本質的なものである。この特性の大部分は結合状態と反結合状態の占有数差を考えることにより説明することができる。また、電子と正孔が自動的に近接するInAs/GaSb系についてもサイクロトロン共鳴吸収に電子、正孔相互作用に基づくと考えられる多峰性の吸収ピークを検出した。ただし、この系のキャリア密度制御は不完全で未だ電子密度=正孔密度も実現されていないため、電子密度の制御を目指したバックゲート構造に取り組み、不完全ながらその動作を確認した。

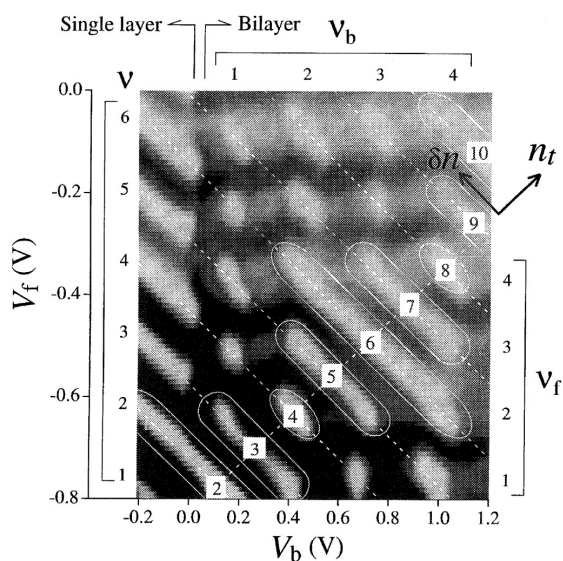


図1 .  
 $B=1.4T$ で $V_b$ 、 $V_f$ によりフロント側、バック側の二次元電子ガスの電子密度を独立に制御した二層電子系の量子ホール効果出現状況（白い部分が量子ホール効果が出ている領域）。左下から右上に向かう点線が二層の電子密度が等しいところを示し、右上に向かうにつれ全電子数 ( $n_t$ ) が増大する。これに垂直な点線 ( $n$  の方向) は全電子数一定のまま二層間の密度バランスを崩した状況に対応する。バランスを崩した時の量子ホール状態の安定性は  $=4$  で周期的に変化する。

ドット構造に関しては、ドット内でのキャリア相関、特に磁場中で二つのエネルギー準位が交差するときに見られるフロント側を確認するとともに、結合の強さを様々に変えた結合ドットの伝導特性（特に理論的特性）の研究を進めた。また、電子の挙動の実時間測定に向けて透過型Radio-frequency単電子トランジスタ（RF-SET）技術を開発し、時定数約 $1\mu s$ でドットとトラップを行き来する電子1個の挙動を測定することに成功した。また、バックゲートノドープヘテロ構造のナノ構造への応用を試み、ほぼ理想的な量子化伝導特性を示すバックゲートポイントコンタクトや微小周期構造の作成に成功した。特に、ポイントコンタクトでは量子化特性に加え新しいキャリア相関が期待される非整数（0.7）ステップが明確に確認された。

サイクロトロン共鳴等の共鳴吸収現象を通してキャリア相関評価の重要なツールとなるTHz、遠赤外についてもその測定法で進展があった。THzについては広帯域ボロメータを用いた自己相関測定法を用いて、帯域約 $20Thz$ 、時間分解能約 $50fs$ でキャリアの動きを観測できるシステムを構築した。さらに、自己組織化ドットと変調ドープ構造を組み合わせた横方向伝導型量子ドット赤外検出器を提案・試作し、

波長10 μm帯で従来の量子ドット検出器の約1000倍の感度を持つことを確認すると共に量子干渉効果（Fano共鳴）によるスペクトル変化を確認した。（図2）

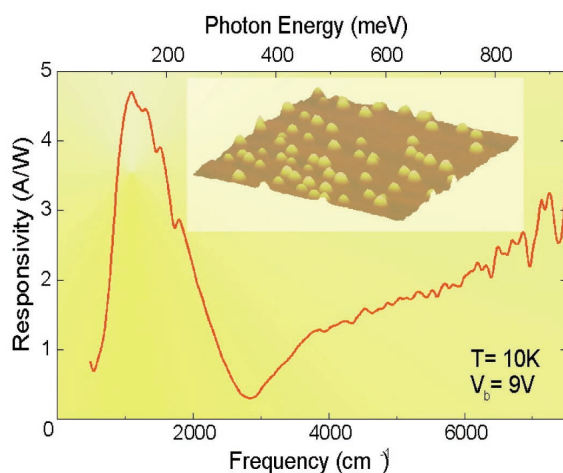


図2 .  
変調ドーピング量子ドット赤外光検出器の感度スペクトル。光エネルギー約370meVにおける感度の消失は量子干渉効果によるものである。挿入図は自己組織化InAs量子ドットのAFM像。

さらにキャリア相関のナノスケールでの評価を目指し、低温ナノプローブの検討を行った。低温・磁場下において動作する近接場光学顕微鏡（SNOM）を開発した。特に、限定された試料空間に、試料移動機構と観察用プローブを配置することを可能とする、ファイバ干渉計に基づくコンパクトなヘッドデザインを考案し、その動作を実際に確認した。一方、マイクロウェーブ領域での相関解析のための技術として、ヘテロダイン型の走査型マクスウェル応力顕微鏡を試作し、マイクロストリップライン系において、5GHz程度までの電気力振動を確認した。さらに、希釈冷凍器との組み合わせで300mK以下の温度で稼動するナノプローブの設置を行った。また、高真空でMBE装置と接続した低温STMとInAs(111)Aという表面原子の凹凸の少ない面を組み合わせることにより、半導体表面に蓄積した二次元電子の電子波干渉による局所状態密度の振動をナノスケールで捕らえることに初めて成功した。

最後に、量子計算を含む量子情報処理の理論的なアプローチにも進展があった。

### 3 . 主な研究成果の発表（論文発表）

S. Tarucha, T. Fujisawa, K. Ono, D. G. Austing, T. H. Oosterkamp, W. G. van der Wiel, and L. P. Kowenhoven: "Elastic and inelastic single electron tunneling in coupled two dot system", *Miroelectronic Engineering*, 47, p101, 1999. (No.1-4, 1999.6)

Y. Tokura, D. G. Austing, and S. Tarucha: "Single electron tunneling in two vertically coupled quantum dots", *J. Phys. Cond. Matt.* 11, p6023, 1999. (No.31, 1999.8.9)

K. Muraki, T. Saku, Y. Hirayama, N. Kumada, A. Sawada, Z. F. Ezawa: "Interlayer charge transfer in bilayer quantum hall states at various filling factors", *Solid State Communications*, Vol.112/p625, 1999.11.

N. Sekine, K. Yamanaka, K. Hirakawa, M. Vosseburger, P. Haring-Bolivar, and H. Kurz: "Observation of terahertz radiation from higher-order two-dimensional plasmon modes in GaAs/AlGaAs single quantum wells", *Applied Physics Letters*, vol.74, No. 7, p1006, 1999.

N. Sekine, K. Hirakawa, M. Vosseburger, P. Haring-Bolivar, and H. Kurz: "Excitation process of two-dimensional plasmons excited by femtosecond laser pulses", *Microelectronic Engineering*, vol. 47, p289, 1999.

N. Sekine, K. Hirakawa, M. Vosseburger, P. Haring-Bolivar, and H. Kurz: "Coherent and incoherent excitation of two-dimensional plasmons in AlGaAs/Gas quantum wells by femtosecond laser pulses", *Inst. Phys. Conf. Ser.*, No. 162, p845, 1999.

K. Tamura, K. Hirakawa, and Y. Shimada: "Drude absorption and electron localization in GaAs/AlGaAs superlattices", *Physica B*, vol. 272, p183, 1999.

S.-W. Lee, K. Hirakawa, and Y. Shimada: "Bound-to-continuum intersubband photoconductivity of self-assembled InAs quantum dots in modulation-doped heterostructures", *Applied Physics Letters*, vol. 75, No. 10, p1428, 1999.

H. Kawashima, M. Furuki, and T. Tani, "Interferometric measurement of femtosecond optical pulses emitted from a fibre probe" *J. Microscopy*, vol.194 (No.2), p516, 1999.

T. Tokizaki, K. Sugiyama, T. Onuki, and T. Tani, "Optical-fibre scanning near-field microscope for cryogenic operation" *J. Microscopy*, vol.194 (No.2), p.321, 1999.

K. Shimizu, N. Imoto, and T. Mukai: "Dense coding in photonic quantum communication with enhanced information capacity", *Phys. Rev. A*59, p.1092, 1999.

K. Shimizu and N. Imoto: "Communication channels secured from eavesdropping via transmission of photonic Bell states", *Phys. Rev. A*60, p.157, 1999.

M. Koashi and M.Ueda: "Exact eigenstates and magnetic response of spin-1 and spin-2 Bose-Einstein condensates," *Phys. Rev. Lett.* Vol.84, p.1066, 2000.

A. Kawaharazuka, T. Saku, Y. Hirayama Y. Horikoshi: "Formation of a two-dimensional electron gas in an inverted undoped heterostructure with a shallow channel depth", *Journal of Applied Physics*, Vol.87, No.2, p952, 2000.1.15.

K. Kanisawa, H. Yamaguchi, Y. Hirayama: "Two-dimensional growth of InSb thin films on GaAs(111)A substrates", *Applied Physics Letters*, Vol.76, No.5, p589, 2000.1.31.

T. Machida, S. Ishizuka, K. Muraki, Y. Hirayama, S. Komiyama: "Resistance fluctuations in integer quantum-Hall transitions", *Physica E* 6, p152, 2000.

Z. F. Ezawa, A. Sawada, K. Muraki, Y. Hirayama: "Quantum coherence and skyrmion textures in bilayer quantum Hall systems", *Physica E* 6, p640, 2000

S. Tarucha, D. G. Austing, Y. Tokura, W. G. van der Wiel and L. P. Kouwenhoven: "Exchange and direct Coulomb interactions in artificial atoms", Phys. Rev. Lett. 84, p2485, 2000. (No.11, 2000.3.13)

Ph. Lelong, S.-W. Lee, K. Hirakawa, and H. Sakaki: "Fano profile in intersubband transitions in InAs quantum dots", Physica E, vol. 7, p174, 2000.

平川一彦、川口 康、山中宏治、小宮山進: "量子ホール効果を用いた超高感度遠赤外光検出", 応用物理, vol. 68, No. 9, p1027, 1999.

樽茶清悟、藤澤利正: "半導体人工分子", 固体物理 Vol..34、No.5, 1999.

井上、伊藤、横山: "走査型プローブ顕微鏡による電子電界放射の計測", 固体物理第34巻12号, 949 (1999) .

平川一彦: "量子電子デバイス" 量子工学ハンドブック (分担執筆), 朝倉書店 (1999).

平川一彦: "半導体大辞典 (分担執筆)", 監修: 菅野卓雄、川西 剛, 工業調査会 (1999).

平山祥郎他: "半導体大辞典 (分担執筆)", 監修: 菅野卓雄、川西 剛, 工業調査会 (1999).

横山、井上、他 森田編「走査型プローブ顕微鏡?基礎と未来予測?」 丸善 (2000) .