

2-4 量子構造を用いた遠赤外光技術の開拓と 量子物性の解明

小宮山進 (東京大学大学院総合文化研究科)

単電子トランジスタ(SET)素子を用いて、磁場中および零磁場で動作する2種類の遠赤外・サブミリ光子検出器を開発し、従来型検出器に比べ共に数桁程度優れた感度を実現した。SETの高周波動作により光子検出速度を10倍高めるとともに、走査型遠赤外顕微鏡を開発して半導体量子素子に応用し、非平衡電子の画像化に成功した。これにより、開発した検出器の応用可能性を拓いた。分数量子ホール電子系の端状態スピンと核スピン間の相互作用を見だし、核スピン操作による量子ビットの可能性を拓いた。

Exploration of Far-infrared-radiation Techniques Based on Quantum Structures and Investigation of Quantum Phenomena

Susumu Komiyama (The University of Tokyo)

Two types of far-infrared/sub-millimeter-wave photon detectors, operated respectively in the presence and in the absence of magnetic fields, have been developed by using single electron transistors (SETs). The achieved sensitivity exceeds that of conventional detectors by several orders in magnitude. Higher speeds of the photon detection were achieved through the radio frequency operation. A scanning microscope has been developed in the far-infrared range, and applied to semiconductor quantum devices, which yielded imaging of non-equilibrium electrons. In fractional quantum Hall edge channels, hyperfine interaction was found between the electron spins and nuclear spins, suggesting possible Q-bit using the fractional quantum Hall edge channels.

1. 研究テーマ

「量子構造を用いた遠赤外光技術の開拓と量子物性の解明」

研究代表者： 小宮山進 (東京大学)

2. 研究の概要

2-1. 研究構想

赤外光からサブミリ波にいたる電磁波領域は、光子エネルギー1meV-数10meVに対応し、分子の振動・回転準位、固体の格子振動、半導体の不純物準位、人工ナノ構造の量子準位、超伝導体のエネルギーギャップ等々、物質の極めて多くの重要なエネルギースケールに対応する。そのため、物質研究における最も魅力あるスペクトル領域である。その一方で、皮肉にも測定を実行する立場からは、最も難しい領域の一つであった。従来の光学技術の波長限界よりずっと長波長側にあるために光として取り扱うことが困難であり、かといって現在のエレクトロニクス技術の高周波限界よりさらに高周波側(数100GHz以上)であり、電気信号として扱う事も困難だったからである。研究構想の第一は、このように光学とエレクトロニクスという現代の二大技術がいまだに克服できずにいる電磁波領域の計測技術に、斬新な着想のもとに微細加工技術を導入してブレークスルー的展開をもたらすことであり、第二はそれに関連して基礎物性研究に新たな展望をひらくことであった。

2-2. 研究体制

以下の研究グループの協力で研究が進められた。小宮山進グループ(東京大学総合文化研究科)、平川一彦グループ(東京大学生産技術研究所)、高柳英明グループ(NIT基基礎研究所)、白木靖寛グループ(東京大学先端科学技術センター)、深津晋グループ(東京大学総合文化研究科)。ただし、各研究室で平行して研究を進める態勢はとらず、高柳・白木・深津の各グループからは、主にMBE結晶成長技術、微細加工技術やRF-SETの高周波・低雑音測定技術等に関して(人的交流を含めて)援助と指導を受けつつ、もっぱら小宮山グループと平川グループが実験を進めた。以下の2-3成果(a)の3番目の中赤外検出器開拓が平川グループの成果であり、その他の研究は小宮山グループで行われた。

2-2. 研究成果

研究は(a)検出器の開発、(b)回路系の開拓、(c)光学系の開拓とその応用、および(d)基礎物性研究、の4つの側面から進めた。(a)-(c)の研究展開により、フォトンカウンティング+イメージング計測という、今まで夢の世界に属していた技術が現実的可能性を帯びてきたことを強調したい。(d)としては、本研究の予想外の副産物、量子制御の新たな可能性を示す成果、について記す。

(a) 検出器の開発

以下に記す3種類の全く新しい検出器を、それぞれ異なる波長領域で開拓した。

[THz光子検出器(磁場中)] 半導体量子ドットに強い磁場を印加して電子状態をラン

ダウ準位に分裂させ、そこに遠赤外光子を入射させて電子・正孔対をサイクロトロン共鳴励起により生成すれば、量子ドットの閉じ込めポテンシャルの影響で電子と正孔が分離し、量子ドット内部に電気分極を生成すると予測した。さらにその際、量子ドットを単電子トランジスタとして動作しておけば、分極が伝導度のスイッチングに結びつくことにより単一光子検出が可能になると予想した。GaAs/AlGaAs ヘテロ構造中に金属ゲート電極により平面型量子ドットを作成して実験を行うことにより、この予測を実証することができ、遠赤外単一光子（光子エネルギー6meV-7.5meV、波長0.17mm-0.2mm、周波数1.5THz-1.8THz）の検出に成功した。単一光子検出の従来の光子エネルギー限界（約1eV）を一挙に100倍程度破ったことは大きなブレークスルー的出来事である。また検出器としての感度は従来型の1万倍程度以上に達した。本プロジェクト以前には量子ドット作成の経験すらなかった我々が、プロジェクト期間のちょうど半ばにこの成果を達成できたことは、その後の研究展開への大きな励みとなった。

[GHz 光子検出器（磁場なし）] 上記の磁場中の検出器はそれ自体画期的だが、検出器としての応用上からは、磁場なしで作動するほうが望ましい。そこで、さらに新たな励起機構を着想した。磁場による準位分裂の代わりにもともと2つの隣接する量子ドットを用意し、2つのうち一方の量子ドット(D2)に光子を入射させて励起電子を一つ追い出す。その結果生ずるD2のイオン化による静電ポテンシャル変化を他方の量子ドット(D1)に及ぼして、単電子トランジスタをスイッチングする、という構想である。GaAs/AlGaAs ヘテロ構造に平面型2重量子ドットからなる単電子トランジスタを作成し、実験によりこの予測を実証した。すなわち、ゼロ磁場での単一光子検出（光子エネルギー約2meV、波長約0.6mm、周波数約500GHz）に成功することができた。さらに、検出スペクトルは量子ドットのサイズ（直径0.5 μm ）と電子系濃度（ $2.7 \times 10^{15}/\text{m}^2$ ）によって定まるプラズマ振動で決まることが明らかになった。この素子により、フォトンカウンティングの技法が、100GHz オーダーという、エレクトロニクスとの境界領域まで拡張されたことを強調したい。また、この検出器は磁場を必要としない点以外に、さらに将来的には、ドットサイズや電子濃度を大幅に変化することによってスペクトル域を制御できること、また、オール・シリコン素子の実現が可能であること等、素子設計に大きな自由度がある点が応用上重要である。以上の2種類の検出器を適切に設計することで、将来的にはサブミリメートル波から遠赤外光のスペクトル領域の大半をカバーできる可能性が高い。

[中赤外検出器（磁場なし）] 上記の平面型量子ドットを用いる限り、ドットサイズの制約のために、より短波長の中赤外域を視野に入れることはできない。そこで、より小さな自己組織化 InAs 量子ドット（直径0.004 μm オーダー）を用いることにより、中赤外光領域の高感度検出器（光子エネルギー62meV-250meV、波長0.005mm-0.02mm、周波数15THz-60THz）を実現した。開発した素子は、量子ドット中の束縛電子を量子井戸に励起

する単純な機構を用いており、感度は単一光子レベルには達しないが、それでも従来の量子井戸検出器に比べて数十倍の感度を持つ。現在、単一光子検出を可能とする改良型素子構造の構想を持っており、実験の準備を始めている。

(b) 検出器高速動作のための増幅系の開拓

検出器は信号処理の電気回路系と一体になって初めてその力を発揮する。特に本研究で用いる単電子トランジスターは、インピーダンスが $200\text{k}\Omega$ 程度と高くかつ動作電圧が数 $10\mu\text{V}$ と極めて小さいため、高速動作が容易でない。常套的な駆動・増幅回路を用いた場合、時定数は 1ms 程度が限界であった。そこで、高速の光子検出を可能にするために、(a)項の単電子トランジスター検出器を 30MHz のLC共振器（タンク回路）に組み込んで 50Ω にインピーダンス変換し、さらに、低周波からマイクロ波領域にいたる雑音を徹底的に除去する（ 4.2K の熱雑音すら問題となる）ために、独自に極低音で動作する小型高性能の雑音フィルターを開発した。それらを組み合わせることによって、 THz 単一光子を時定数 $10\mu\text{s}$ で検出することに成功した。従来に比べて 100 倍の改良を得たこの実験では、従来と同様の常温動作の低雑音増幅器を用いている。しかし、ヘリウム温度動作の（より低音の）増幅器を用いれば、時定数をさらに 10 倍以上短縮できると期待される。このように、検出器性能に見合った優秀な信号処理系を開発できたことは、今後の応用展開に確実性を与えるものである。

(c) 走査型顕微鏡の開拓とその応用

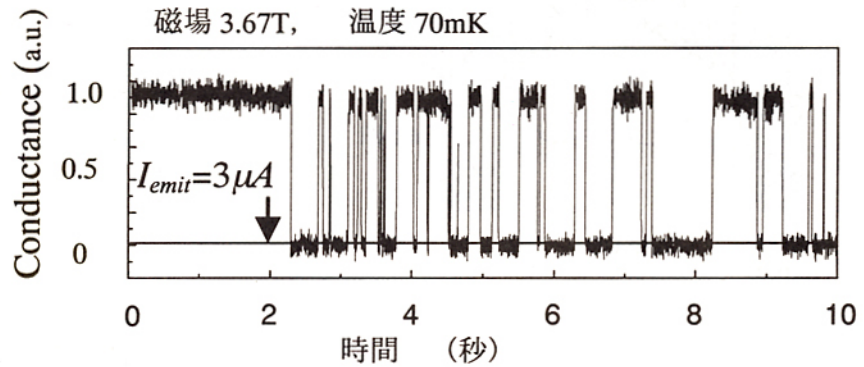
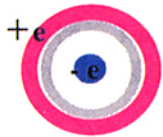
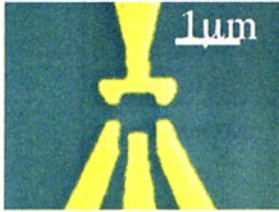
実際の応用のためには、検出器・電気回路系に加えて光学系が必要である。本研究の光子検出器群のもっとも魅力的な応用分野は、半導体ナノ構造や少数分子といった、極微領域から放出される極微弱な電磁波を光子レベルで捉えてイメージングを可能にする事だと考える。その方向に近づく第一歩として、単結晶シリコンの超半球レンズを対物レンズとし、試料をXY-ステージで挿引する走査型顕微鏡を開拓した。試料として量子ホール効果素子の2次元電子系を用い、検出器として高感度の量子ホール検出器を用いることにより、 1pW 以下の微弱な遠赤外光（波長 $150\mu\text{m}$ ）のイメージング画像を、空間分解能 $60\mu\text{m}$ で得ることができた。従来、遠赤外レーザーやフェムト秒パルスによる強力な光源を用いて同程度の空間分解能が達成されているが、極微弱光のイメージングは本研究が初めてである。この研究で初めて得られた非平衡電子の空間分布の直接画像により、量子ホール電子系のダイナミクス理解を大いに進めることができた。将来的にはこの光学系をベースにして、微細加工したスロットアンテナまたはSTM・AFM技術による短針アンテナを対物レンズに付与し、かつ単一光子検出器と組み合わせることにより、サブミクロン空間分解能と単一光子レベルの感度を持つ走査型顕微鏡に発展させる展望が開けた。

(d) 基礎物性研究： 新たな量子ビット素子の可能性

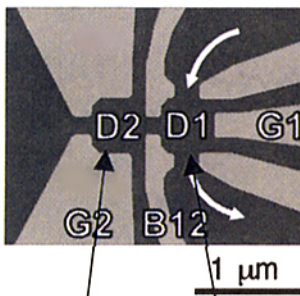
上述の電磁波検出を軸とする研究過程からは予想外の重要な副産物が得られた。分

数量子ホール電子系の端状態間遷移によるスピン・フィリップ散乱が、超微細構造相互作用を通して核スピン(GaとAs)を分極する事を見出したのである。誘起された核スピン分極が、電子スピンに対する有効ゼーマンエネルギーを大きく変化させるために、核スピン分極により伝導度が大きく変化するのである。基礎物性研究の観点からは、分数量子ホール電子系端状態のスピン状態を調べる極めて高感度の短針が初めて得られた、という点で画期的である。しかし、より広い観点からは、量子ホール電子系を基礎に、核スピン分極の初期化・演算・読み出しを端状態を用いて行う量子ビット素子の可能性を示す点が重要である。予備的実験として既に、微細加工した金属電極を用いて局所的にRF磁場を印加し、端状態近傍のみの核磁気共鳴(NMR)による核磁気分極の変化を端状態による伝導度変化を通して検知することに成功した。関与する核スピンは、 $1\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}$ 程度の端状態に沿う領域に限られ、将来、1ビットから多ビットへの展開に期待をもたせる。

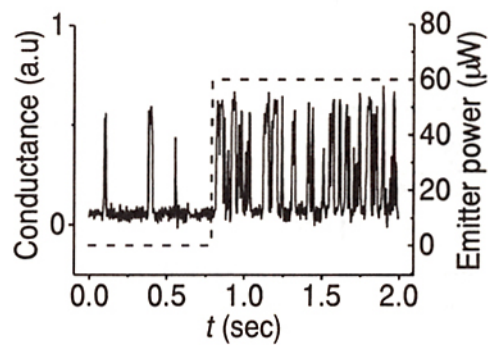
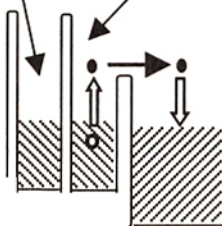
3. 主要成果の図表による説明



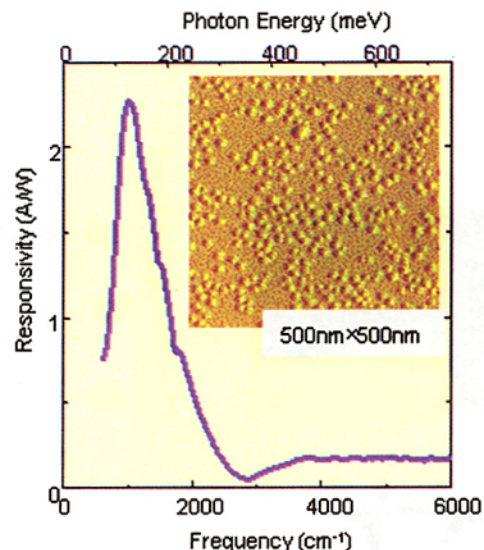
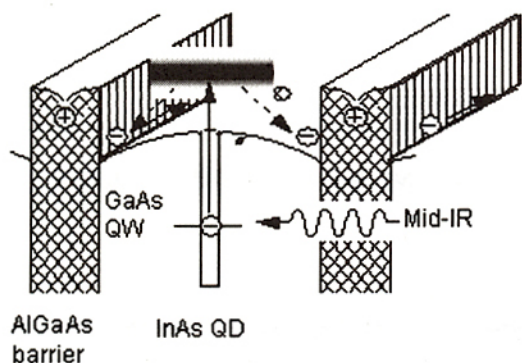
磁場中で動作する THz 単一光子検出器: GaAs/AlGaAs ヘテロ構造基板上に金属ゲートにより生成される量子ドットに強磁場を印加する。ランダウ準位間の励起が量子ドットを分極し、一光子吸収ごとに単電子トランジスタがスイッチングする。



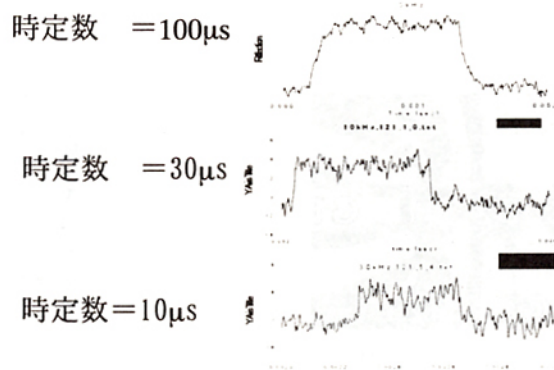
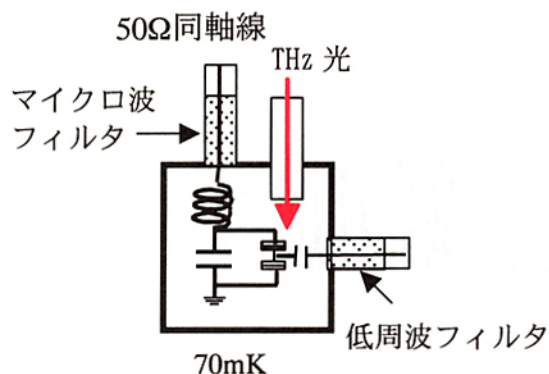
量子ドット 1 量子ドット 2



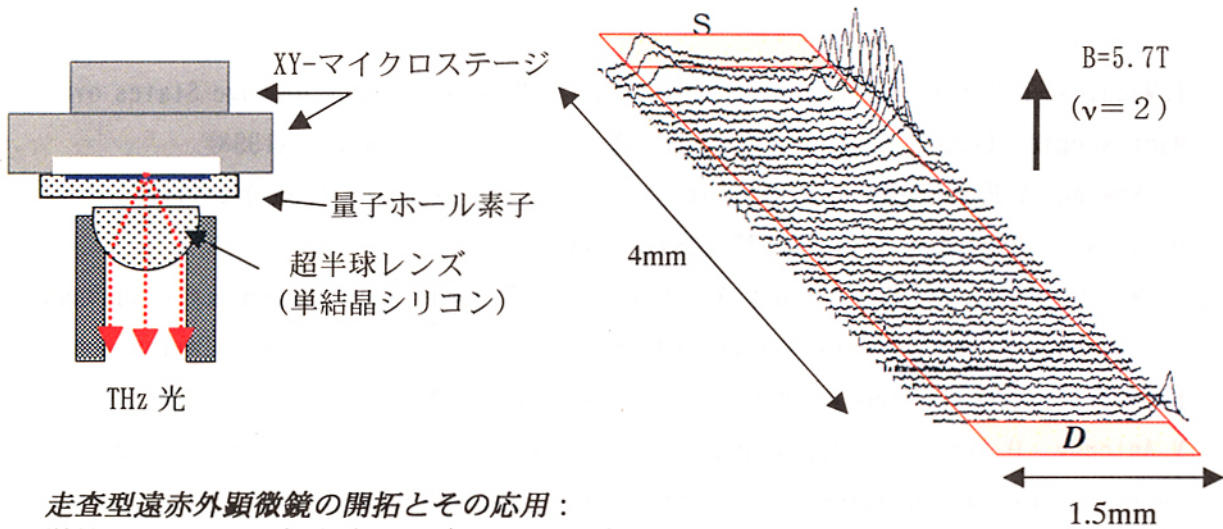
磁場なしで動作する GHz 単一光子検出器: GaAs/AlGaAs ヘテロ構造基板上に作成された並列の2つの量子ドットのうち一方(D2)が光子吸収によりイオン化され、他方の量子ドットによる単電子トランジスタをスイッチングする。



中赤外検出器：自己組織化 InAs 量子ドットを高移動度変調ドープ量子井戸中に埋め込んだ横方向伝導型量子ドット赤外光検出器構造 (modulation-doped quantum dot infrared photodetector; MD-QDIP) において、量子ドットの光イオン化を利用して高感度の中赤外光検出器が実現した。

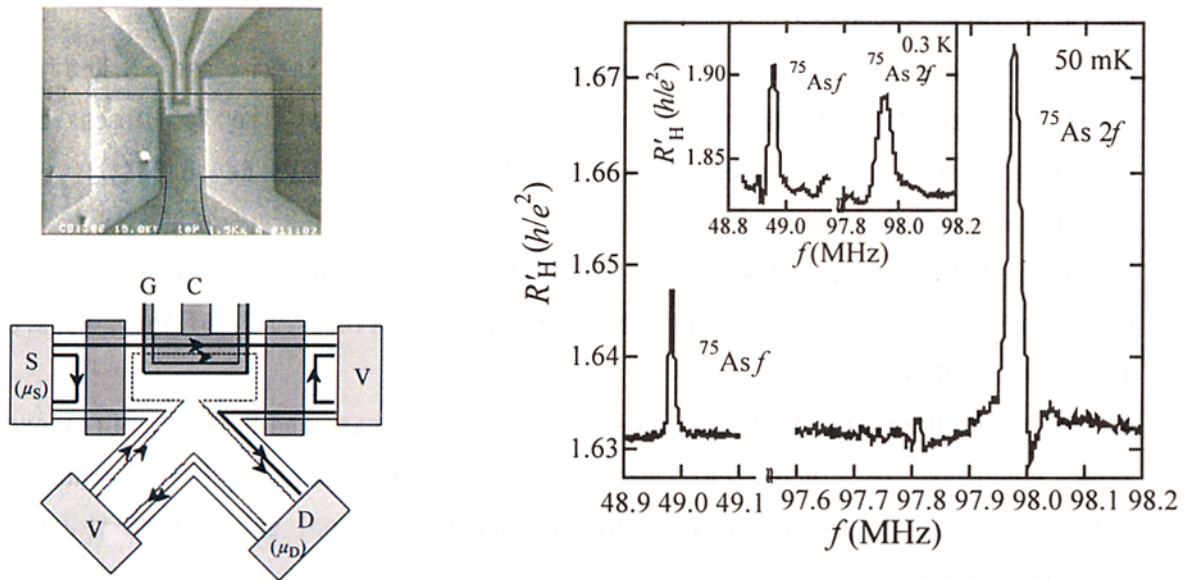


高速光子検出：30MHz の LC 共振器により検出器 (単電子トランジスタ) のインピーダンス変換を行い、外部からの雑音進入を低温の低周波・マイクロ波フィルターで除去して高速動作を行った。右の図は磁場中での THz 光子検出信号。異なる増幅器の帯域幅 (時定数) を設定し、それぞれ一つの光子検出によるスイッチング波形 (テレグラフ信号) を記録した。時定数の短縮とともに波形の S/N 比は低下するが、10 μ s でも十分スイッチングが識別できる。



走査型遠赤外顕微鏡の開拓とその応用：

単結晶シリコンの超半球レンズによって試料からの THz 光を平行光線にして検出器に導く。試料は XY-マイクロステージにより移動することによりレンズの焦点が試料平面上を走査して 2次元画像を得る。シリコンの屈折率分 (3.4) だけ回折限界で決まる分解能が改善する。右図は量子ホール素子中の 2次元電子系からのサイクロトロン発光の強度分布を測定した結果。波長 0.15mm の THz 光に対して 0.06mm の分解能を得た。ホール素子の対角コーナーの 2点から、およびソース側からの発光領域がそこで非平衡電子が生成していることを示す。



量子ホール系端状態による核スピン制御：新たな量子ビット素子の可能性：

左右のクロスゲート電極によって量子ホール電子系の端状態に非平衡分布を生成すると、スピンフリップ散乱によって母体結晶 (Ga と As) に核スピン分極が誘起される。右の図は、そのような端状態に沿う核スピン系に微小電極 (G、C) によって RF 磁場 (または電場) を局部的に印可することにより、端状態の伝導度を通して NMR 信号を得たもの。通常の NMR に比べて遙かに微小な領域において核スピンの制御と読み出しができる。

4. 主要論文リスト

1. T.Machida, H.Hirai, S.Komiyama & Y.Shiraki, "Phase Coherence of Edge States over Macroscopic Length Scales" *Physica B*, 249-251, pp.128-131 (1998).
2. Y.Kawano, Y.Hisanaga and S.Komiyama, "Cyclotron Emission from Quantized Hall Devices", *Phys.Rev.B*, 59, 12537-12546 (1999).
3. 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, pp. 1428-1430 (1999).
4. V.Antonov, O.Astafiev, T.Kutsuwa, H.Hirai and S.Komiyama, "Single Fir-Photon Detection Using a Quantum-Dot", *Physca E* 6, 367-370 (2000).
5. Y.Kawano and S.Komiyama, "Breakdown of the Quantized Hall Effect in the Vicinity of Current Contacts", *Phys. Rev. B* 61, 2931-2938 (2000).
6. S.Komiyama, O. Astafiev, V. Antonov, T. Kutsuwa and H. Hirai, "Detection of Single Photons in the FIR-Range", *Nature* 403, 405-407 (2000).
7. S.Komiyama, O. Astafiev, V. Antonov, H. Hirai and T. Kutsuwa, "Detection of Single FIR-Photon Absorption Using Quantum Dots" *Physica E* 7, 698-703 (2000).
8. O. Astafiev, V. Antonov, T. Kutsuwa and S. Komiyama, "Electrostatics of Quantum Dots in High Magnetic Fields Studied by Single-Photon Detection" *Phys. Rev. B* 62 pp.16731-16743 (2000).
9. K.Hirakawa and K.Yamanaka, Y.Kawaguchi, M.Endo, M.Saeki and S.Komiyama "Far-Infrared Photoresponse of the Magnetoresistance of the Two-Dimensional Electron Systems in the Integer Quantized Hall Regime" *Phys.Rev.B* 63(8) 085320(1-5) (2001).
10. Y.Kawano, Y.Hisanaga, H.Takenouchi, and S.Komiyama "High-sensitive and Tunable Detection of Far-infrared Radiation by Quantum Hall Devices", *J. of Appl. Phys.* 89 4037-4048 (2001).
11. N. Sekine, K. Hirakawa, M. Vosseburger, P. Haring Bolivar, and H. Kurz, "Crossover from coherent to incoherent excitation of two-dimensional plasmons in GaAs/AlxGal-xAs single quantum wells by femtosecond laser pulses", *Physical Review B (Rapid Commun.)*, 64(20), 201323 (2001).
12. O. Astafive, S. Komiyama, and T. Kutsuwa, "Double quantum dots as a high sensitive submillimeter-wave detector", *Appl. Phys. Lett.* 79(8), 1199-2001 (2001).
13. T.Machida, S. Ishizuka, S. Komiyama, K. Muraki, and Y. Hirakawa, "Resistance fluctuations in quantum Hall transitions: Network of compressible-incompressible regions" *Phys. Rev. B* 63, 045318(1)-(6) (2001)

5. 外部発表件数

論文 65件

口頭発表

国内発表 114件

国際会議発表 68件

特許出願 2件