

東京大学 教授

小宮山 進

「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」

## 1. 研究実施の概要

### 1-1 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-100meV 程度に対応し、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。

### 1-2 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。以下では、(a)-(d)それぞれの側面で得られた研究成果を網羅的に記すことはあえてしない。ハイライト的主要成果のみを取り上げ、簡潔に的を絞って記す。

#### (a) 検出器の開発

従来から、超高感度の遠赤外光検出器が各種開発されており、しばしば「光子レベルの感度」を持つと言われる。しかし、最高感度 (NEP= $10^{-18}$ W/Hz<sup>1/2</sup>) ですら1秒間に1万個程度の光子を必要とする点で、真の光子検出には遥かに及ばないレベルであった。本研究では以下に記す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発することに成功した。特に、最初の2種類の検出器は単一光子を検知することができ、従来の光子エネルギー限界(約1eV)を一挙に100倍以上破り、従来型検出器に比べれば1万倍以上大きな感度を達成したブレークスルー的成果である。

*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ーとして動作すれば、光子吸収により誘起された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。

*GHz 光子検出器 (磁場なし)*: 磁場なしで作動する検出器を得ることが極めて望ましい、という応用上の観点から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 $\mu$ m）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、ドットサイズや電子濃度を変化させ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。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2つ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 $\mu$ m 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

単電子トランジスタは、インピーダンスが 200k $\Omega$ 程度と高くかつ動作電圧が数 10 $\mu$ 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検出器を 30MHz の LC 共振器（タンク回路）に組み込んで 50 $\Omega$ 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 の熱雑音が問題となる）ことによって、THz 単一光子を時定数 10 $\mu$ 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。

#### (c) 走査型顕微鏡の開拓とその応用

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である。

その方向への第一歩として、単結晶シリコンの超半球レンズをソリッドイマージョン型の対物レンズとし、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たが、極微弱光のイメージングは本研究が初めてであった。この研究で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が大いに進んだ。さらに、常温試料に対して適応可能な遠赤外顕微鏡を上記と似た光学系を用いて開発し、50 $\mu\text{m}$  程度の空間分解能を達成した。予備的実験により 300K の水分子の電場による変調信号を検出した。

将来的には、これら光学系をベースに、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(a)-(c)の研究過程とは独立に行った量子ホール電子系の研究を通して、予想外の重要な副産物が得られた。つまり、固体量子ビット素子を量子ホール系の端状態を用いて実現する可能性を開いたのである。

具体的には、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された。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。

上記実験をさらに進め、微細加工した金属電極によって RF 磁場を端状態近傍のみに印加して核磁気共鳴 (NMR) を起こしその信号を伝導度変化により検知することに成功した。

この成果は、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、という点で基礎物性研究の観点から画期的である。しかし、より広い観点からさらに重要な点は、核スピン分極の「初期化」「演算」「読み出し」を行い得る“量

子ホール固体素子”の実現可能性を示した事である。今後、1ビット操作さらには多ビットの演算に向け挑戦する。

### 1-3 研究グループごとの成果

小宮山進グループ（東京大学総合文化研究科）

検出器開発として、2種類の遠赤外単一光子検出器の開発成功（2-2(a)）、および量子ホール効果素子による遠赤外検出器の開発。検出器高速動作のための増幅系（RF-SET）の開発（2-2(b)）。遠赤外走査型顕微鏡の開拓（2-2(c)）。基礎的物性研究として、遠赤外光イメージングによる量子ホール素子中の非平衡電子分布の同定とその生成機構の解明。抵抗揺らぎを通じた量子ホール状態間遷移における乱雑ポテンシャルの役割解明。量子ホール電子系端状態の非線形伝導による分散関係探求。非平衡分布計測による分数量子ホール系端状態の研究、特に端状態電子スピンと核スピンと微細相互作用による動的核スピン分極（DNP）の発見。

平川一彦グループ（東京大学生産技術研究所）

中赤外帯検出器の開拓（2-2(a)）：自己組織化 InAs 量子ドット中電子の光励起により、光担体の高移動度性と長寿命性により高感度を得た。遠赤外検出器として、量子ホール効果素子検出器の諸特性（雑音指数や平面型双極子アンテナの併用による効果等）を明らかにした。

上記2グループ以外に、高柳英明（NTT 基礎研究所）・白木靖寛（東京大学先端科学技術センター）・深津晋（東京大学総合文化研究科）の各グループから、MBE 結晶成長技術・電子線リソグラフィによる微細加工技術・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・協力を得た。

## 2. 研究構想

研究開始時の目標と研究計画を平成8年度「研究計画書」からの抜粋で以下に示す。

“本研究では、第一にまず遠赤外光技術のブレークスルー的發展をはかるために、量子構造を用いて単一光子検出を目指した超高感度分光検出器の開発を行うとともに、半導体多重量子井戸構造による連続発振の広帯域波長可変レーザー開発を目指す。第二に、開拓した遠赤外光技術、および既存のマイクロ波及び赤外光技術を量子ホール系および強磁場下2次元電子系の微細構造に適用し、非平衡分布した端状態間の電子遷移に伴う遠赤外発光検出、composite Fermion のサイクロトロン共鳴、位相干渉性の制御、微細構造中の電流分布のドブラー効果による直接観察等、を行い、その量子物性の理解を格段に進展させる。遠赤外光技術のブレークスルー的發展は、本研究対象だけでなく、分子分光・電波天文学、さらに通信・情報処理の分野にも大きな応用の可能性を持つと期待する。”

## I. 遠赤外光技術の開拓

(1) 単一光子検出：赤外・可視光域には様々な高感度検出器が存在し、光電子増倍管による単一光子検出すら可能であるのに、遠赤外域で利用できる検出器の性能は非常に限られている。しかし、遠赤外光子のエネルギーの大きさ（50～300K）を考えれば、低温での単一光子検出が原理的には可能な筈である。それが磁場中の半導体量子ドットによる単一電子帯電効果を利用して実現できると考えられる。…以下略…

単一光子検出の試みに並行して、量子ホール効果状態（QHE）にある二次元電子系ホー素子の縦抵抗が、CR 吸収に対して極めて敏感に変化する事を利用して、サブピコ・ワットまでの超高感度を持つ分光検出器を開発する。

(2) 広帯域波長可変レーザーの連続発振：半導体多重量子井戸構造を用いることにより、遠赤外レーザー発振の効率を飛躍的に高めて連続発振をめざす。10K 程度までの低温中で光共振器の体積  $9\mu\text{m}\times 1\text{mm}\times 5\text{mm}$  程度、入力 0.5W 程度に対して、1mW 程度の発振を目指す。

## II. 開発した技術の発展及び既存の技術を用いた基礎物性の研究

(1) 遠赤外光領域における近接場顕微鏡の開発：本研究で開発する超高感度の遠赤外検出器を金属針アンテナによる集光と組み合わせる事により、0.1 ミクロン以下の分解能を持つ遠赤外近接場顕微鏡の開発を目指す。

(2) 非平衡分布した端状態間の電子遷移に伴う遠赤外発光検出：強磁場下二次元電子系の端状態からの発光及び電流端子からの電子注入に伴う CR 発光を、超高感度検出器により空間分解及び波長分解して測定する。また、波長可変レーザーからの遠赤外光を照射して、端状態間緩和に及ぼす影響を調べる。

(3) 位相干渉性の制御：分数量子ホール効果状態での位相干渉性を調べるとともに、この位相干渉性が電波-遠赤外光の照射によりどう化するかを調べる。

5年間のプロジェクト研究の展開を通して、以上ほぼ全ての当初計画に対して、それぞれ明確な成果を得た。特に、研究の最終目標としていた、I(1)磁場中量子ドットを用いた遠赤外領域の単一光子検出に成功した事が研究に弾みをつけた。また、目標 II(1)の走査型顕微鏡の開発として、ソリッドイマージョンレンズを用いた近接場顕微鏡を開拓し、幾何光学の回折限界（50 ミクロン）の分解能を実現した。さらに II(2)として、その光学系を量子ホール電子系の研究に応用することにより、非平行電子系のダイナミクスを明らかにした。

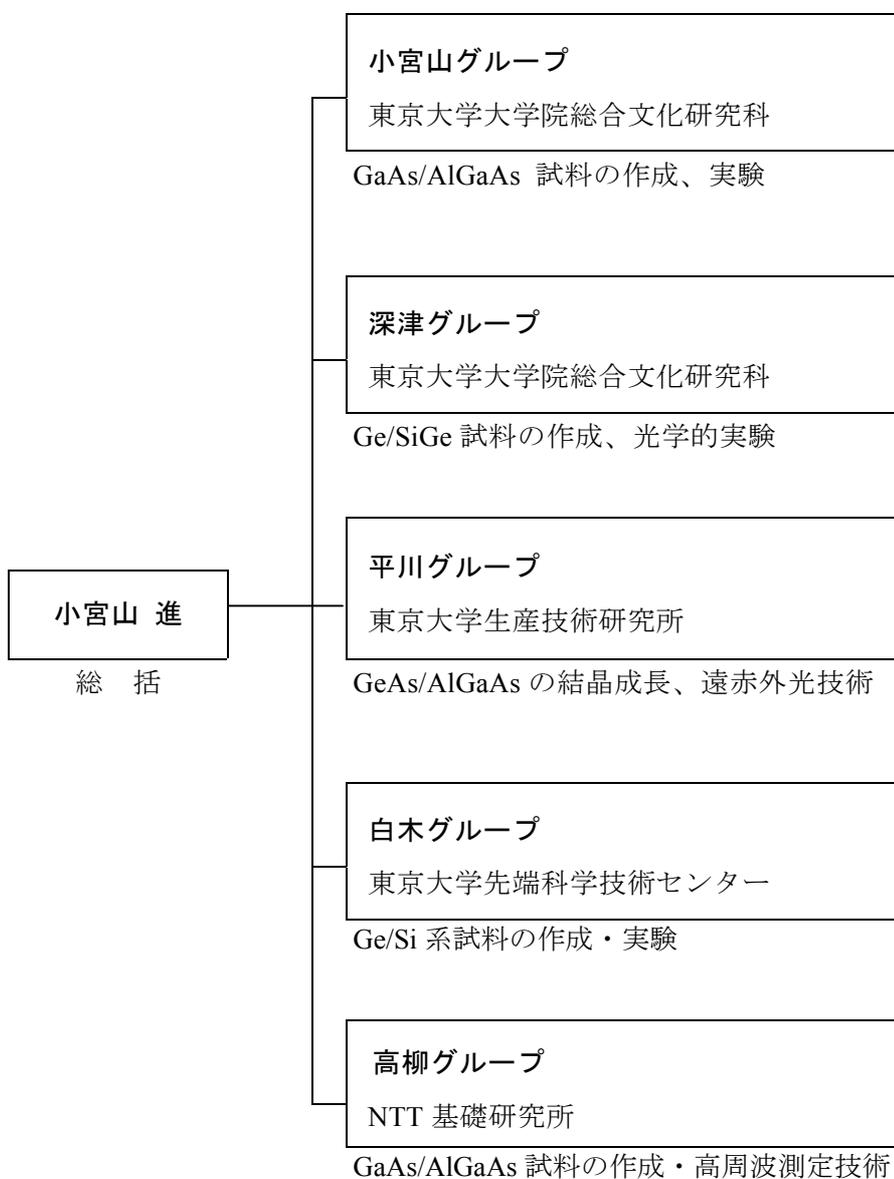
当初予想していなかった新展開、および新たに浮上した目標が3点ある。第1は当初予定していなかった零磁場中での単一光子検出機構を新たに構想し、2重量子ドットを用いてその実現に成功した事である。本プロジェクトで行った自己生成量子ドットによる中赤外領域検出器の開拓ともあわせ、単一光子検出器開拓の射程を、赤外からサブミリ波にわ

たる広大な全電磁波領域に一気に広げる可能性をもたらした。第2に、走査型顕微鏡の開拓と単一光子検出器の成功をあわせることにより、単一光子レベルの感度を持つ近接場光学測定技術の開拓がより現実的な目標となった。これらは本プロジェクト研究の方向線上の成果だが、当初は比較的狭い遠赤外波長領域のみでのブレークスルーしか念頭になかったことを考えると予想以上の収穫である。今後、極めて小数のガス分子分析、ナノスケールでの化学反応の追跡、生体高分子による生体活動の一分子計測等々、分子科学や生物物理に大きな夢と可能性を開くものである。第3は、II(3)の位相制御に関連しており、量子ホール電子系の分数端状態の研究を通して、量子ホール電子系の端状態によって核スピンを制御する、固体量子ビット素子実現の可能性を示した点である。電子系の位相制御だけでなく、核スピンを電子系により「初期化」し、パルス RF 磁場により「コヒーレントに操作」し、電子系により「読み出す」仕組みが視野に入ってきた点が新展開である。

I(2)の波長可変連続発振レーザーの開拓については、Ge/Si 系と GaAs/AlGaAs 系双方の量子井戸についてそれぞれの発振機構の検討と予備的実験を行ったが、プロジェクト期間内の発振実現は難しいと判断し、中途半端になることを避けるために以後検出器・光学系の開拓に専念した。プロジェクト終了後の現時点で、この選択は正しかったと判断している。

本プロジェクト研究を実行するにあたり、小宮山グループ（東大院総合）で中心的に半導体微細加工による試料作成と実験研究を行い、平川グループ（東大生産研）で GaAs/AlGaAs 結晶成長と補完的実験研究を行った。さらに、結晶成長技術・微細加工技術・測定技術に関して高柳グループ（NTT 基礎研）・白木グループ（東大先端研）および深津グループ（東大院総合）の協力を得た。

### 3. 研究実施体制



### 4. ワークショップ・シンポジウム等

年月日	名称	場所	参加人数	概要
平成 11 年 10 月 14 日 ～ 平成 11 年 10 月 16 日	CREST Workshop, Hakone 1999 “Physics and Applications of Quantum”	箱根・強羅 (ホテル マロウド 箱根)	24 名  (内招待講 演者: 6 名)	量子トッドについて活発に研究を進めて いる国内外の研究者を招待し、本プロジェ クトによる遠赤外単一光子検出成功の成 果を迅速に広く知ってもらうため、およ び、量子ドット研究の異なる最前線を集中 的に学び、かつ今後の発展の方向性を探る 目的にて開催

## 5. 主な研究成果

### (1) 原著論文等

1. 河野行雄、小宮山進 “量子ホール効果状態における電子系からのサイクロトロン発光 (Cyclotron Emission from Quantum Hall Systems)” 固体物理、34 (5)、142-152 (1999)。
2. 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 (Ultra-high Sensitive Detection of FIR by Using Quantum Hall Effects)” 応用物理、68 (9)、1027-1033 (1999)。
3. 小宮山 進 “遠赤外単一光子検出” パリティ、特集：メゾスコピック物理への招待 15 (6) 39-44 (2000)
4. 小宮山 進 “遠赤外単一光子の検出－新半導体量子素子の開発－” 月刊オプトロニクス、7月号、205-209 (2000)。
5. 小宮山 進 “遠赤外領域における単一フォトン検出器” 光学、29、740-744 (2000)。
6. 小宮山進、O. Astafiev、久津輪武史 “サブミリメートル波の単一光子検出器” 固体物理、35、903-909 (2000)。
7. 河野行雄、小宮山 進 “量子ホール電子系を用いた遠赤外光子検出器” 材料科学、特集号、37、206-213 (2001)。
8. 小宮山 進、O. Astafiev、河野行雄、久津輪武史 “遠赤外領域のフォトンカウンティング” 日本物理学会誌、56 (2)、98-106 (2001)。

### (海外)

1. S. Komiyama, “Edge States and Non-local Effects” Springer Verlag, “Mesoscopic Physics and Electronics” § 3,2 pp.120-131 (1998)
2. T. Machida, H. Hirai, S. Komiyama & Y. Shiraki, “Geometry-Dependent Transition between Integer Quantum-Hall States” Solid State Electronics, 42, pp.1155 - 1158 (1998)
3. 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)
4. S. Komiyama, H. Hirai, O. Astafiev, Y. Kawano, T. Sawada & T. Sakamoto, “Ultrahigh-sensitive far-infrared detection based on quantum Hall devices” Proc. of 6th Int. Symp. “Nanostructures: Physics and Technology” (St. Petersburg, Russia, June 1998) pp.140-147 (1998)
5. T. Machida, H. Hirai, S. Komiyama, T. Osada & Y. Shiraki, “Experimental Studies of the Phase Coherence in the Quantum Hall effect Regime” Solid State Commun. 103, pp441- 445 (1997)
6. S. Fukatsu, Y. Ishikawa & N. Shibata, “SiGe-based semiconductor-on-insulator substrate created by low-energy separation-by-implanted-oxygen” Appl. Phys. Lett., 73 (26), (1998)
7. Y. Ishikawa, N. Shibata & S. Fukatsu, “Creation of [110]-aligned Si quantum wires encompassed by SO<sub>2</sub> using low-energy separation-by-implanted-oxygen on a V-groove patterned substrate” Appl. Phys. Lett., 72 (20), pp.2592-2594 (1998)
8. S. Fukatsu, H. Sunamura, Y. Shiraki & S. Komiyama, “Phononless radiative recombination of indirect excitons in a Si/Ge type-II quantum dot” Appl. Phys. Lett., 71 (2), pp.258-260 (1997)
9. S. Fukatsu “Radiative Recombination in Strained SiGe/Si and Allied Group-IV Semiconducto Quantum Structures” Optical Properties of Low-Dimensional Materials

- Volume 2" Eds. T. Ogawa & Y. Kanemitsu (World Scientific, 1997, Singapore)
10. S. Fukatsu, H. Sunamura, Y. Shiraki & S. Komiyama, "Suppression of phonon replica in the radiative recombination of an MBE-grown type-II Ge/Si quantum dot" *Thin Solid Films*
  11. Y. Ishikawa, N. Shibata & S. Fukatsu, "Epitaxial Si/SiO<sub>2</sub> Low Dimensional Structures" *Thin Solid Films*
  12. K. Yamanaka & K. Hirakawa, "Far Infrared Photoresponse of the AlGaAs/GaAs Low-Dimensional Electron Systems Constricted by Split-Gates" *Solid State Electronics*, 42 (7-8), pp.1151-1153 (1998)
  13. Y. Shimada & K. Hirakawa, "Optical and Transport Properties of Single Quantum Well Infrared Photodetectors" *Jpn. J. Appl. Phys.*, 37, part 1, No.3B, pp.1421-1423 (1998)
  14. N. Sekine, K. Hirakawa & Y. Arakawa, "Terahertz emission from quantum beats in coupled quantum wells" *Jpn. J. App. Phys.*, 37, part 1, No.3B, pp.1643-1645 (1998)
  15. Y. Shimada & K. Hirakawa, "Sequential Resonant Magnetotunneling through Landau Levels in GaAs/AlGaAs Multiple Quantum Well Diodes" *Physica Status Solidi (B)*, 204, P.427 (1997)
  16. K. Yamanaka & K. Hirakawa, "Far Infrared Photoresponse of the Diagonal Magnetoresistance of the Two-Dimensional Electron System near the V=1 Spin-Gap Quantum Hall State" *Physica Status Solidi (B)*, 204, p.310 (1997)
  17. T. Machida, H. Hirai, S. Komiyama and Y. Shiraki, "Phase coherence of Edge States over Macroscopic Length Scales", *Physica B*, 249-251, 128-131 (1998).
  18. T. Machida, H. Hirai, S. Komiyama and Y. Shiraki, "Geometry-Dependent Transition between Integer Quantum-Hall States", *Solid State Electronics*, 42, 1155-1158 (1998).
  19. S. Komiyama, H. Hirai, O. Astafiev, Y. Kawano and T. Sawada, "Ultrahigh-sensitive far-infrared detection based on quantum Hall devices", *Proc. of 6th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology"* (St.Petersbur, Russia, June 1998) 140-147 (1998).
  20. S. Fukatsu, H. Sunamura, Y. Shiraki, and S. Komiyama, "Suppression of phonon replica in the radiative recombination of an MBE-grown type-II Ge/Si quantum dot", *Thin Solid Films*, 321, 65-69 (1998).
  21. Y. Kawano, Y. Hisanaga and S. Komiyama, "Cyclotron Emission from Quantized Hall Devices: Injection of Nonequilibrium Electrons from Contacts", *Phys. Rev. B*, 59, 12537-12546 (1999).
  22. H. Hirai, O. Astafiev, V. Antonov, T. Kutsuwa, S. Komiyama and T. Sakamoto, "Ultra-high Sensitive Detection of Far-infrared Radiation in Quantum-Dot Devices at High Magnetic Fields", *Proc. of The 4th Int. Symp. on Advanced Physical Fields: Quantum Phenomena in Advanced Materials at High Magnetic Fields* (Tsukuba, March 1999) pp.13-16 (1999).
  23. O. Astafiev, V. Antonov, T. Kutsuwa, H. Hirai and S. Komiyama, "Quantum dot in high magnetic field and far-infrared response", *Proc. of Workshop on Nanophotonics* (Nizhny Novgorod, Russia, March 1999) pp.31-38 (1999).
  24. M. Endo, K. Hirakawa and K. Yamanaka, Y. Hisanaga and S. Komiyama, "Negative Far Infrared Photoresponse of Diagonal Magnetoresistance due to Edge Channel Transport in the Integer Quantized Hall Regime", submitted to *Phys. Rev. B Rapid Commun.*
  25. K. Yamanaka and K. Hirakawa "Far Infrared Photoresponse of the Diagonal Magnetoresistance of the Two-Dimensional Electron System near the V=1 Spin-Gap

- Quantum Hall State”, *Physica Status Solid (B)*, 204, 310-313 (1998).
26. R. A. Hogg, K. Suzuki, K. Tachibana, L. Finger, K. Hirakawa, and Y. Arakawa, “Optical Spectroscopy of self-assembled type II GaSb/GaAs quantum dot structures grown by molecular beam epitaxy”, *Applied Physics Letters*, vol.72, No.22, pp.2856-2858 (1998).
  27. N. Sekine, K. Hirakawa, and Y. Arakawa, “Terahertz emission from quantum beats in coupled quantum wells”, *Japanese Journal of Applied Physics*, I. 37, part.1, No.3B, 1643-1645 (1998).
  28. Y. Shimada, and K. Hirakawa, “Optical and transport properties of single quantum well infrared photodetectors”, *Japanese Journal of Applied Physics*, 37, part1, No.3B, 1421-1423 (1998).
  29. K. Yamanaka and K. Hirakawa, “Far-infrared photoresponse of the AlGaAs/GaAs low-dimensional systems constricted by split-gates”, *Solid-State Electronics*, 42, No.7-8, 1151-1153 (1998).
  30. Y. Shimada, and K. Hirakawa, “Photocurrent dynamics in single quantum well infrared photodetectors investigated by using free electron laser pulses”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, vol.B 144, 166-171 (1998).
  31. 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*, 74, No.7, 1006-1008 (1999).
  32. L. K. Bera, S. K. Ray, M. Mukhopadhyay, Deepak Nayak, Noritaka Usami, Yasuhiro Shiraki and C. K. Maiti, “Electrical properties of N<sub>2</sub>O/NH<sub>3</sub> plasma grown oxynitride on strained-Si” *IEEE Electron Device Lett.* 19, 273-275 (1998).
  33. Katsuyuki Amano, Masato Kobayashi, Atsushi Ohga, Takeo Hattori, Noritaka Usami and Yasuhiro Shiraki, “Epitaxial growth and optical investigation of Si/pure-Ge/Si quantum structures on Si(311) substrates” *Semicon. Sci. and Technol.* 13, 1277-1283 (1998).
  34. Noritaka Usami, Makoto Miura, Hiroshi Sunamura and Yasuhiro Shiraki, “Photoluminescence from pure-Ge/pure-Si neighboring confinement structure” *J. Vac. Sci. Technol. B* 16, 1710-1712 (1998).
  35. Noritaka Usami, Junichi Arai, E. S. Kim, Kazunobu Ota, Takeo Hattori and Yasuhiro Shiraki, “Control of island formation using overgrowth technique on cleaved edges of strained multiple quantum wells and selective epitaxy on patterned substrates” *Physica E*, 137-141 (1998).
  36. J.H. Li, Y. Yamaguchi, Hiroo Hashizume, Noritaka Usami and Yasuhiro Shiraki, “Wavy interace morphologies in strained SiGe/Si multilayers on vicinal Si(111) substrates” *J. Phys.: Condens. Matter* 10, 8643-8652 (1998).
  37. Noritaka Usami, Karl Leo and Yasuhiro Shiraki, “Optical characterization of strain-induced structural modification in SiGe-based heterostructures” *J. Appl. Phys.* 85, 2363-2366, (1999).
  38. Y. Ishikawa, T. Saito, N. Shibata and S. Fukatsu, “SiGe-on-insulatro substrate fabricated by low energy oxygen” *NIM B*, B147, 43-48 (1999).
  39. Y. Ishikawa, N. Shibata and S. Fukatsu, “Fabrication of [110]-aligned Si quantum wires embedded in SiO<sub>2</sub> by low-energy oxygen implantation” *NIM B* 147, 304-309 (1999).
  40. J. Nitta, F. Meijer and H. Takayanagi, “Spin-interference device”, *Appl. Phys. Lett.* 75, (1998).

41. S. Komiyama, H. Hirai, O. Astafiev, Y. Kawano, T. Sawada, "Ultra-high-sensitive far-infrared detection based on quantum Hall devices. 6th Int. Symp." Nanostructures: Physics and Technology (St. Petersburg, Russia, June, 1998) Proc. 140-147, (1998).
42. S. Komiyama and Y. Kawaguchi, "Avalanche Breakdown of the Quantum Hall Effects" Supplementary issue of the Journal of Korean Physical Society 34, S131-S137 (1999)
43. S. Komiyama and Y. Kawaguchi, "Heat Instability of Quantum Hall Conductors" Phys. Rev. B61, 2014-2027 (2000).
44. V. Antonov, O. Astafiev, T. Kutsuwa, H. Hirai and S. Komiyama, "Single FIR-Photon Detection Using a Quantum-Dot", Physica E6, 367-370 (2000).
45. T. Machida, S. Ishizuka, K. Muraki, Y. Hirayama and S. Komiyama, "Resistance fluctuations in integer quantum-Hall transitions" Physica E6, 152-155 (2000).
46. Y. Kawano and S. Komiyama, "Breakdown of the Quantized Hall Effect in the Vicinity of Current Contacts" Phys. Rev. B61, 2931-2938 (2000).
47. S. Komiyama, O. Astafiev, V. Antonov, T. Kutsuwa and H. Hirai, "Detection of Single Photons in the FIR-Range" Nature 403, 405-407 (2000).
48. Y. Kawano and S. Komiyama, "Local breakdown of the Quantum Hall Effect and the correlated cyclotron emission" Physica E7, 502-506 (2000).
49. S. Komiyama, O. Astafiev, V. Antonov, H. Hirai and T. Kutsuwa, "Detection of Single FIR-Photon Absorption Using Quantum Dots" Physica E7, 698-703 (2000).
50. O. Astafiev, V. Antonov, T. Kutsuwa and S. Komiyama, "Electrostatics of Quantum Dots in High Magnetic Fields Studied by Single-Photon Detection" Phys. Rev. B62 pp.16731-16743 (2000).
51. T. Machida and S. Komiyama, "Anomalously Weak influence of Source-Drain Voltage on Inelastic-Scattering Process in Quantum Hall Systems" Phys. Rev. B62 pp.13004-13009 (2000).
52. S. Komiyama, O. Astafiev, V. Antonov, and T. Kutsuwa, "Detection of Single Sub-Millimeter-Wave Photons Using Quantum Dots" Acta Physica Plonica A98, pp.271-278 (2000).
53. Astafiev, O., Antonov, V., Kutsuwa, T., Hirai, H., Komiyama, S. "Quantum dot in high magnetic field and far-infrared response" Izvestiya Akademii Nauk 64 pp.220-226 (2000).
54. T. Machida, S. Ishizuka, K. Muraki, Y. Hirayama and S. Komiyama "Resistance fluctuations in quantum-Hall transitions: Network of compressible/incompressible regions" Phys. Rev. B63 045318 (1-6) (2001).
55. 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. B63 (8) 085320 (1-5) (2001)
56. 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)
57. T. Machida and S. Komiyama "Suppression of scattering between scattering-wave states in integer quantum Hall transitions" Physica B298 101-105 (2001).
58. T. Machida, S. Ishizuka, K. Muraki, Y. Hirayama and S. Komiyama "Nonequilibrium population in fractional edge states" Physica B298 150-154 (2001).

59. T. Machida, S. Ishizuka, K. Muraki, Y. Hirayama and S. Komiyama “Scaling in fractional quantum-Hall transitions” Physica B298 182-186 (2001).
60. Y. Kawano, S. Komiyama and K. Hirakawa “Suppression of electron-hole-pair recombination in edge states in quantum Hall regimes” Physica B298 33-37 (2001).
61. Y. Kawano and S. Komiyama “Imaging of nonequilibrium electrons in quantized Hall devices using cyclotron radiation” Proceedings of 25th International Conference on the Physics of Semiconductors (Osaka, 2000) 921-922 (2000).
62. 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. B63 (8) 085320 (1-5) (2001).
63. O. Astafiev, S. Komiyama and T. Kutsuwa “Double quantum dots as a high sensitive submillimeter-wave detector” Applied Physics Letters 79 1199-1201 (2001).
64. K. Hirakawa, K. Yamanaka, M. Endo, and S. Komiyama “Far-infrared Far-Infrared Photoresponse of the Magnetoresistance of the Two-Dimensional Electron Systems in the Integer Quantized Hall Regime” Phys. Rev. B63 85320 (2001).
65. Y. Kawaguchi, K. Hirakawa, M. Saeki, K. Yamanaka and S. Komiyama “Performance of High-sensitivity Quantum Hall Far-infrared Photodetectors” Applied Physics Letters 80 136-138 (2002).
66. S. Tanibayashi, S. Komiyama, and Y. Kawaguchi “Absence of Activation-type Conductivity in Narrow Quantum Hall Bar” J. of Physics:Condensed Matter 13 L689-L696 (2001).
67. O. Astafiev, V. Antonov, T. Kutsuwa and S. Komiyama “Far-infrared spectroscopy of single quantum dots in high magnetic fields” Phys. Rev. B65 85315 (1-4) (2002).
68. T. Machida, S. Ishizuka, and K. Muraki “Spin polarization in fractional quantum Hall edge channels” Physica E12 76-79 (2002).

(2) 特許出願（国内 4 件、海外 1 件）

① 国内

1. 発明者 : 小宮山 進、O. Astafiev、V. Antonov、平井 宏、久津輪武史  
 発明の名称 : ミリ波・遠赤外光検出器  
 出願日 : 平成 11 年 7 月 15 日  
 出願番号 : 特願平 11-202261  
 出願日 : 平成 11 年 11 月 25 日  
 出願番号 : 特願平 11-334196
2. 発明者 : 町田友樹、小宮山 進、山崎智幸  
 発明の名称 : 固体中核スピン量子演算素子  
 出願日 : 平成 13 年 12 月 6 日  
 出願番号 : 特願 2001-373146

3. 発明者 : 平川一彦、李 承雄、藤本真一  
発明の名称 : 量子ドット赤外光検出器  
出願番号 : 特願 2002-17422  
出願日 : 平成 14 年 1 月 25 日
4. 発明者 : 平川一彦、小宮山 進、川口 康  
発明の名称 : 中赤外光単一光子検出器  
事業団の整理番号 : A041P114

(出願決定)

② 海外

1. 発明者 : 小宮山 進、O. Astafiev、V. Antonov、平井 宏、久津輪武史  
発明の名称 : ミリ波・遠赤外光検出器  
出願日 : 平成 12 年 7 月 7 日  
出願番号 : 第 89113929 号

(3) 受賞、新聞報道等

① 受賞なし

② 新聞報道

- ◎ 「遠赤外単一光子の検出の成功とそのための半導体量子素子の開発」について  
(雑誌「Nature」1月27日号掲載論文に関連しての発表)

上記に関して報道(平成12年1月27日～5月)

朝日新聞、読売新聞、日刊工業新聞、日経産業新聞、科学新聞、その他地方紙