

戦略的創造研究推進事業
発展研究（SORST）

研究終了報告書

研究課題
「赤外－サブミリ波領域の光子検出器開発と
走査型顕微鏡の開拓」

研究期間：平成14年 4月 1日～
平成19年 3月31日

小宮山 進
(東京大学、教授)

1. 研究課題名

赤外-サブミリ波領域の光子検出器開発と走査型顕微鏡の開拓

2. 研究実施の概要

赤外光からサブミリ波にいたる電磁波領域は物質・生体系の研究一般にとって極めて重要なスペクトル領域であるにもかかわらず、周波数が光学領域とエレクトロニクスの中間領域にあるため従来技術が直接適用できず、測定を実行する上では最も困難な領域の一つである。本研究は、半導体量子構造の特性を積極的に利用して光子レベルの感度をもつ一連の検出器を開発し、従来の微弱信号検出技術に格段の進歩をもたらすことを第一の目的とする。また、開発した検出器を用いて超高感度性と波長限界を越える空間分解能を有する赤外光/サブミリ波領域の走査型顕微鏡を開拓することを第二の目的とする。そのことによって物質・生体の新たな計測手法を創出することを目指す。

本研究に先立つCRESTプロジェクトにおいて、研究グループでは遠赤外領域の単一光子（光子エネルギー；5-7meV、動作温度；100mK）検出に成功し、またヘリウム温度試料のための走査型遠赤外顕微鏡を開発して超微弱遠赤外光のイメージング技術開拓も合わせて進めた。本研究は、それらの成果を土台としてさらに発展させることを目指した。つまり、GaAs/AlGaAs系量子構造結晶の特質をさらに活かして新たな検出機構を開拓し、従来検出器の 10^3 倍から 10^4 倍の（単一光子レベルの）感度をもつ検出器を開発する事である。その際、単なるデモンストレーション実験で終わることなく、真の応用を目指す。そのために、波長領域の桁違いの拡大（赤外-サブミリ波全領域：光子エネルギー；100meVから1meV）を目指し、検出器構造の単純さを求め、また動作温度を含めて取り扱いの容易さも重視した。顕微鏡開拓は検出器開拓に合わせて進める方針を取った。光子検出の新たな物理的機構と仕組みについて、研究開始時点で多くの着想を得ていたが、それらの実現性は超高品質のGaAs/AlGaAs量子構造結晶を成長出来るかどうか大きく依存する筈である。そこで、研究実施体制の構築に当たっては、分子線エピタキシーにより結晶成長を行うチームの補強に意を用い、結晶成長チームと検出器開拓・顕微鏡開拓チームとが一体となって協力する体制を実現すべく心がけた。

成果として、検出器については当初の構想通り、波長域 $600\mu\text{m}$ （2meV）から $14\mu\text{m}$ （90meV）にわたって複数の超高感度検出器を開拓することに成功した。ここでは個々の素子の検出機構には触れないが、いずれの検出器も従来の高感度検出器の改良では無い。本研究独自の機構に基づいており、また、従来検出器に比べて桁違いの高感度を有する（単一光子検出可能）。まず、既開発の磁場中で動作する単一量子ドット（SQD）検出器（波長； $100\mu\text{m}\sim 150\mu\text{m}$ ）の動作温度を100mKから400mKへ上昇し、動作速度を1msecから $10\mu\text{sec}$ へ改善して共焦点顕微鏡に応用した。加えて、結合並列2重量子ドット（DQD）検出器（波長；約 $600\mu\text{m}$ ）、アルミニウム接合による単電子トランジスタと量子ドットを組み合わせた複合検出器（QD+AI-SET、波長 $>600\mu\text{m}$ ）、および2重量子井戸（DQW）による検出器（波長： $14\mu\text{m}$ ）を新たに開発した。さらに、自己組織化InAs量子ドットによる中赤外検出機構の検討を行った。これら一連の新型検出器開発により、赤外-ミリ波帯域の高感度光検出の常識を変える事が出来た。

これら検出器の中で、研究期間の最後に開発したDQW検出器（波長； $14\mu\text{m}$ ）は応用上特に重要である。2次元電子系による高移動度トランジスタ（HEMT）を用いるために素子構造が極めて単純であり、4.2Kまたはそれ以上の温度（現在、30Kまで）で動作する。また励起機構として量子井戸中の2次元サブバンド遷移を用いるため、今後、量子井戸幅の異なる（7nm~200nm）結晶を用いて波長 $8\mu\text{m}\sim 60\mu\text{m}$ の範囲にわたって容易に帯域の異なる検出器を設計する事が出来る筈である。また、素子構造が単純でC-MOSセンサーに似た電荷蓄積型の動作特性を有するため、感度が優れているばかりでなく、素子作成が容易かつ使用に当たっての取り扱いも極めて単純である。そのため、今後汎用型の高感度検出器として、従来型の多くの検出器に置き換わる可能性も高い。本研究では、小規模のアレー検出器素子（ 20×20 画素）の作成も試み、DQW検出器を用いる常温試料用の顕微鏡も作成した。DQW以外

の検出器 (SQD、DQD、およびQD+Al-SET) は、単電子トランジスタ(SET)を用いている。そのため微細な素子構造を有し、使用の動作条件を見出すために若干の経験を要する。また、熱エネルギーをSETの帯電エネルギーより十分小さくする必要上、動作温度を1K以下にしなければならないために冷却装置が若干複雑になる。しかし、動作自体は安定しており、その圧倒的な感度は、基礎研究への応用に大きく寄与する。本研究では、専用顕微鏡を作成して量子ホール電子系の研究に活用した。

顕微鏡開拓に関しては、既開発の走査型顕微鏡の光学系を改良することにより 30 倍の感度 (10fW) と 2 倍の分解能 (波長 120 ミクロンに対して 50 ミクロン) を達成した。さらに、改良した単一量子ドットによる SQD 検出器 (波長 120-150 ミクロン) と組み合わせた新たな遠赤外走査型顕微鏡を開拓し、遠赤外光のフォトンカウンティング計測を初めて実現し、光子束 10 個/秒程度の今までにない極微弱光のイメージング画像を得ることに成功した。また、その顕微鏡を量子ホール電子系からのサイクロトロン発光イメージングに応用し、電極と無散逸電子系の間での電子のやり取りの機構、端状態の非平衡分布、ポテンシャル障壁によるランダウ準位間非平衡分布の生成、電流増大に伴う量子ホール効果崩壊と、電子温度の双安定性にともなう非平衡電子分布の空間パターン自己生成等、数々の知見を得た。さらに、より汎用性ある測定法構築のために、常温試料を念頭に 2 重量子井戸 (QDQW) 検出器を用いる 2 種類の顕微鏡 (高分解能を意図する単一検出器用の共焦点顕微鏡と、高速イメージングを意図する焦点面アレー検出器用の顕微鏡) を試作した。今後、それらの応用によって、物質・生体計測に新たな可能性を示すことが出来ると考えている。

以下に研究グループ別に上記研究に於ける役割を記す。

小宮山グループ (東大 総合文化研究科)

各検出器素子 (SQD、DQD、QD+Al-SET、DQW) の作成と実験、各顕微鏡の開拓、および顕微鏡を量子ホール系に応用する実験を行った。ただし、QD+Al-SET 検出器の開発については Antonov グループと共同研究である。

平川グループ (東大 生産技術研究所)

検出器作成に用いる GaAs/AlGaAs 結晶のヘテロ構造の設計・結晶成長・分子線エピタキシー装置のメンテナンス。および、新たな検出機構探索のために、InAs 自己生成量子ドットによる SET 動作とその検出器応用に検討するための実験を行った。

陽グループ (北大)

本プロジェクトの前半期間、特に平川グループでの分子線エピタキシー装置の調整期間中に、本研究プロジェクトで使用する高純度 GaAs/AlGaAs 結晶の分子線エピタキシャル成長を行ってテスト用結晶を小宮山グループに提供した。

Antonov グループ (ロンドン大学)

アルミニウム SET と半導体量子ドットの組み合わせによる複合検出器 (QD+Al-SET) の開拓を小宮山グループと協力して行った。素子の基本的構想は小宮山グループ、素子作成はロンドン大学の設備で独自に行った。また当初、ロンドン大学には光子検出の計測のために用いる分光系が無かったため、素子を東京に持参した上で一部実験を小宮山グループと協力して行った。

3. 研究構想

赤外—サブミリ波検出器の専門家の多くは、おそらく、従来型検出器の感度は既に十分高いと感じており、より以上高感度の検出器には特殊な用途しかない——衛星に搭載する天文観測とか極低温試料の観測等の限られた用途しかない——と考えている。その根拠は、検出器を常温 (300K) 空間に向けて用いる場合、検出器に入射する 300K 熱輻射の強度が光子統計に従って必ず揺らぐからである。この揺らぎが検出器に “光子雑音” (電子のショット雑音に対応する) を与えるため、検出器自体の雑音 (電流の熱雑音、ショット雑音、1/f

雑音 etc.) をいくら小さくしても、観察対象（背景）の温度で決まる”光子雑音“以下にはならない。従って、検出器自体をある程度以上高感度にしても、どのみち対象からの光子雑音が限界を与えるので無意味である。従って、その限界感度——”背景雑音限界感度“と呼ばれる——以上の感度を持つ検出器は意味がない、と考えられ勝ちである。光子雑音の大きさは対象（背景）の温度で決まるが、事実、従来の高感度検出器の多くは 300K の背景雑音限界感度に匹敵する感度を既に有している。

本研究構想は、基本的に上記の考えとは異なる観点から出発した。顕微鏡を用いて対象の小部分（分解能領域）からの光を検出器で受ける際、到達する光の揺らぎは雑音ではない。それこそが貴重な情報である。局所的な揺らぎを長時間、または大きな領域で平均すると、自明の雑音になってしまうのだ。例として、本研究ではまだ研究の対象にはなっていないが、仮想的な観察対象として生命体を考えよう。生命体は絶対温度約 300K（熱エネルギー約 25meV）で機能するように作られている。また、生命体の基本的構成要素である分子・高分子・巨大分子が振動や回転の運動を行う振動数帯域はテラヘルツ (THz) 領域 (0.3THz から 30THz、 $1\text{THz}=10^{12}\text{Hz}$ 、エネルギーは 1.4meV から 140meV) にあり、300K の熱エネルギーは、その THz 領域のちょうど真中である。つまり、分子達は、環境 (300K) の熱エネルギーを上手に利用するために、ちょうど具合のよい固有運動のモードを持っている。生命活動は、分子達の熱的な乱雑運動からのわずかな、しかし特別によく仕組まれた、揺らぎとみなせるだろう。従って生体分子一つ一つの運動の乱雑な熱運動からのわずかな違いを調べることが重要であろう。分子のいかなる運動も固有モードの重ね合わせであり、生体高分子は電気分極を持っているのだから、運動のたびに、分子達はその生命活動の密かな情報を THz 電磁波 (0.3THz から 30THz は波長 1mm から $10\mu\text{m}$ に対応) として周囲の空間に送り出しているはずである。このように、生命体からの“熱輻射の揺らぎ”はそれ自体生命活動の秘密を担っているであろう。そのためのごく微弱な THz 電磁波を検出するためには、“背景雑音限界感度”を遙かに越えた検出器が必要だろう。生命体以外の物質系でも小さな領域から自然発光される赤外—ミリ波は、その場所で局所的に起こっている現象を忠実に反映するだろう。従って、生命体に限らず、高分解能の顕微鏡観察には高感度検出器が必要である。ほとんどの目的のために検出器感度は”背景雑音限界感度”を遙かに越えるべきである。

以上の基本的観点の元に、本研究では光子レベルの感度をもつ従来にない一連の検出器を開発して信号検出技術に格段の進歩をもたらし、かつ開発した検出器を近接場光学技術と組み合わせることによって、波長限界を越える空間分解能を実現する赤外光/サブミリ波領域の走査型顕微鏡を開拓し、そのことによって、実用に供しえる計測系を実現することを目的とした。そのことによって、少数分子の運動の揺らぎや人工的量子構造の局所的ダイナミクスを追求し得る「THz 単一光子分光学」とも言うべき新たな研究分野を創出することを意図した。

検出器開拓については本研究によって当初の目的を達することが出来た。特に、2 重量子井戸 (DQW) 検出器の開拓に成功したことは重要である。今後汎用型顕微鏡の有用性を現実を示す可能性が現実の視野に入ってきた。本研究で実際に行った顕微鏡応用は、低温試料（量子ホール電子系）の観察に止まっているが、今後は生体分子その他広範な対象に対して本研究の基本構想を適応した研究を展開することになるだろう。以上の基本的構想に類似の研究は、研究代表者が知る限る国の内外に無い。

4. 研究実施内容

4. 1 小宮山グループ（東京大学 総合文化研究科）

(1) 実施の内容

赤外/サブミリ波の光子エネルギー (1meV から数 100meV) は、半導体量子構造における特徴的エネルギー（一電子準位・サイクロトロンエネルギー・プラズマ振動エネルギー）

ギー・および2次元サブバンドエネルギー等）に対応する。これらのエネルギー準位を積極的に活用して原理的に新しい検出機構を導入することにより、従来検出器に比べて桁違いの感度を有しかつ応用に適した単一光子検出器を複数開発することを第一のねらいとし、かつ開発した検出器を近接場光学技術と組み合わせることによって波長限界を越える空間分解能と超高感度を合わせもつ赤外光/サブミリ波領域の走査型顕微鏡を開拓することを第二のねらいとして研究を実施した。

さらに、プロジェクト研究の過程において、物質や体内の電荷・スピン分布を超音波スキャンニングによってイメージングする新しい計測手法の新たな構想を得、超音波誘起電磁波の計測技術の実用化試験を行ったので以下に合わせて記す。

光子検出器開拓： 従来、主に電波・赤外線天文学の観測のために様々な機構を用いた超高感度の赤外-サブミリ波検出器が開発されてきたが、図1に示すように特性検出能 D^* は概ね $D^*=10^{13}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 以下である。[検出器の受光面積を A として $D^* = A^{1/2}/NEP$ で定義される。 NEP は等価雑音パワーとよばれ、1sec の平均時間で計測できる最小入射光パワーに対応する。つまり、パワー P の入射光による信号の対雑音比が S/N の時、 $NEP = \{P/(S/N)\}/\Delta f^{1/2}$ となる。ただし平均時間を t として $\Delta f = 1/(2\pi t)$ 。] 図1の赤太線 ($D^*_{\min}$) は、新たな赤外-サブミリ波顕微鏡に用いる検出器に要する必要最低感度の概算値を示す。[波長サイズの300K黒体領域から放射される輻射の、1K程度の揺らぎを、0.1msecの計測時間、波長分解能 $\Delta\lambda/\lambda=1\%$ 、光学系視野と損失による効率 $2\pi \times 10^{-3}$ で測定する条件の計算値。] 従来検出器で $D^* > D^*_{\min}$ の要求を満たすものは存在しない。本研究では、新たな計測方法を開拓するために、従来のあらゆる検出器に比べて桁違いの高感度 ($D^* > D^*_{\min}$) を実現する必要があった。

従来の赤外-サブミリ波検出器には増幅作用を内蔵したものが存在せず、それが感度の限界を与えている。つまり、従来型では単純に、図2(a)のように光子1個の吸収によって伝導電子または準粒子を1組み生成し、その電子（準粒子）を一方の電極から他方の電極に送り込んで信号電流とするだけであり増幅作用を内蔵していない。本研究では、桁違いの高感度を実現するために、図2(b)のように半導体の微小孤立領域から光子吸収によって電子を1個追い出して孤立領域を+eに帯電させ、その帯電効果を、近傍に配置する電荷敏感素子で検知する、という全く新しいオリジナルな枠組みを採ることにした。光子1個の吸収によって、 10^6 個から 10^{10} 個の電子が電極間を移動することになり、光→電子のきわめて大。

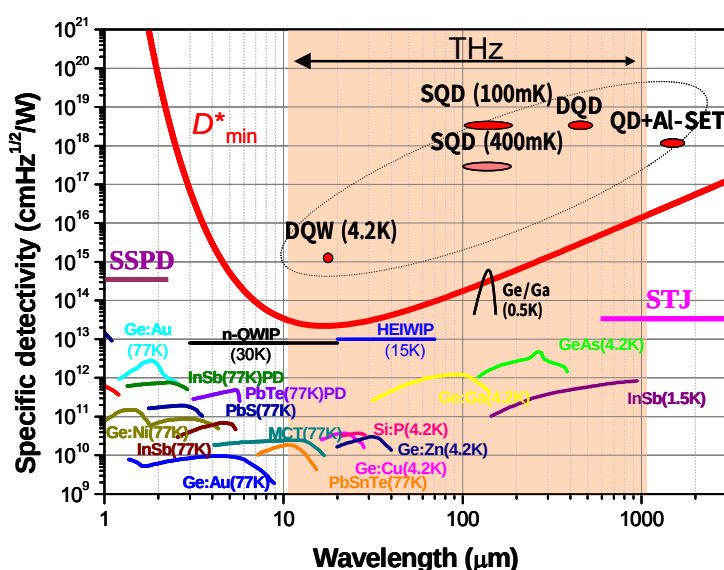
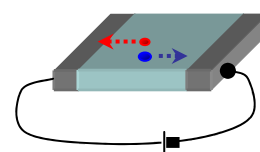
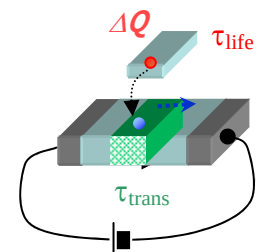


図1 さまざまな検出器の感度



(a) 従来型検出器



(b) 開発する検出器

図2 検出器概念図

きな増幅度（光利得）を得て桁違いの感度を実現する。半導体量子構造を用いる素子作成により上記の機能を実現するが、具体的には、(i)異なる波長帯域をカバーするために、孤立領域の励起のために異なる機構（サイクロトロン共鳴、プラズマ共鳴、2次元サブバンド共鳴等）を用い、(ii)電荷敏感素子として、単電子トランジスタ（Single Electron Transistor: SET）および高移動度2次元電子系トランジスタ（HEMT）を内蔵する新たな素子構造を構築する。この機構での検出速度は電荷敏感素子（SET または HEMT）の速度および駆動する外部回路の雑音によって10ナノ秒程度が予想され、十分な高速性が期待できる。

本研究に先行するCRESTプロジェクトにて、既に波長約150ミクロンの遠赤外光に対して磁場中で動作する量子ドット単一光子検出器が開発されていたが、動作温度として0.1K程度の極低温を必要とした。本研究ではさらに応用に適した検出器を求め、「より広い波長範囲に感度を持ち」「磁場を用いず」「より高温で」動作する検出器の開拓を目指した。そのために、2重量子ドット、2重量子井戸、およびアルミニウム接合によるSET等を組み合わせることにより、より実用に適した光子検出器を広い波長範囲に実現しようとした。また、広範な応用可能性開拓のため、開発した検出器を土台に新たな焦点面検出器アレー（FPA；Focal Plane Array）開拓への可能性も視野に入れて追究した。

上記の方策に従い、フォトンカウンティング可能な超高感度検出器（従来検出器に比べて千倍から1万倍の感度）を波長0.6mmから14 μ mという広い波長帯域で実現する事に成功した。図1の薄青色の楕円領域中に赤で記した数種の検出器（QD/AlSET, DQD, SQD, DQW）がそれぞれであり、以下（2）に構造と動作を記す。

走査型顕微鏡開拓： 新たに開発する検出器を搭載して光子レベルの感度と波長以下の分解能を有する顕微鏡を開拓する。本研究の前進のCRESTプロジェクトにて、従来型の量子ホール検出器と光学系を組み合わせた走査型顕微鏡を開拓したが、感度は従来型検出器の限界（1秒間に10万個程度の入射光子束強度）で抑えられていた。また、顕微鏡は⁴Heクライオスタット（温度4.2K）中に構成していたため、希釈冷凍機温度（0.1K以下）でのみ動作する光子検出器を直ちに組み合わせることが不可能だった。そこで本研究では、まず、開発した光子検出器を改良して動作温度範囲を0.3K以上まで拡大し、³Heクライオスタット（温度0.3K）中で光学系と組み合わせることにより、可視・近赤外領域のフォトンカウンティング計測に匹敵する桁違いの感度向上をめざした。

超音波誘起電磁波計測： 超音波は物質内部で優れた透過性を有するため、超音波エコー法が建造物や体内の非侵襲内部検査に極めて広く応用されている。ただし、通常用いられる手法は音響インピーダンスの違いを反映するだけであり、得られる情報は質量密度分布や弾性率などの力学特性に限られる。超音波によって誘起される電磁波（超音波誘起電磁波）を検出して被測定物の電気特性を知る実験手法は世界中で未だ試みられたことが無く、本研究では超音波を利用する全く新しい手法の開拓を目指した。画像化は通常の超音波診断装置と同様、集束ビームをスキャンすることにより、2次元画像及び断層画像を得ることができる筈である。超音波の高い内部透過性を考えると、その応用は新しい物質評価方法にとどまらず、脳活動をはじめとする体内の電氣的活性状態を無侵襲

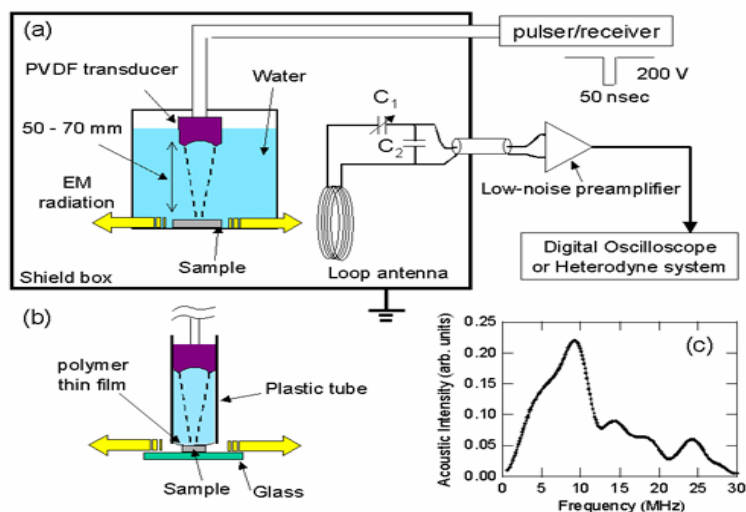


図3 超音波誘起電磁波の検出実験の概略図。

イメージングする全く新しい医療計測機器の開拓につながる可能性がある。

上記したように、この超音波誘起される電磁波の計測は文献を調べるかぎりほとんど前例がない。そこでまず、その測定方法の開発から着手した。図3(a)に測定の概略図を示す。超音波発生器は一点集束タイプの医療用 PVDF トランスデューサーを用いた。測定上重要な点は、トランスデューサーからのノイズを回避することである。そこでトランスデューサーを被測定物から音波媒体（ここでは水）を介してある一定の距離を保つ。たとえば 60mm の距離では、音波伝搬に要する時間は $40\mu\text{s}$ であるから（水の音速： 1500m/s ）、パルス超音波を用いることによりトランスデューサーノイズから目的信号を明瞭に時間分離する。また、超音波ガイドパイプを使い、被測定物を水中に沈めない方法も開発した（図3(b)）。トランスデューサーで発生する超音波周波数は 10MHz 近傍をピークとしており（図3(c)）、この周波数にチューニングした狭帯域ループアンテナにより超音波誘起電磁波を受信する。

(2) 得られた研究成果と今後期待される効果

検出器開拓

(a) 単一量子ドット検出器(SQD)の改良 (^3He 温度での動作と高速動作)

CREST で開発した光子検出器(図1中の SQD)の走査型顕微鏡への応用を可能にするため、高温および高速動作を実現した。この検出器は GaAs・AlGaAs ヘテロ構造中電子系から金属ゲートにより単一量子ドットを形成して SET 動作させる（図4a）。

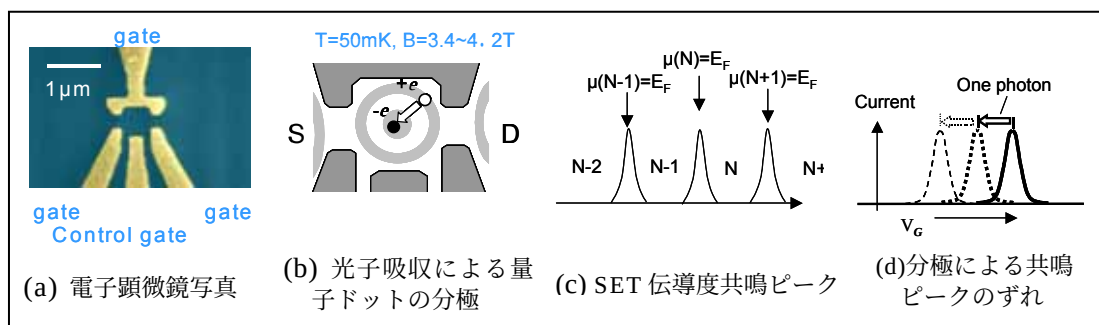


図4. 磁場中動作の光子検出器(SQD)

電子のサイクロトロン共鳴吸収により励起電子が電気分極（図4b）を起こし、SET伝導度共鳴ピーク（図4c）の移動（図4d）により電流がスイッチングする。従来、この検出器の動作のためには、電荷揺らぎを抑えるために0.1K以下の超低温を必要とし、そのため大型の希釈冷凍機を必要とした。そこで、電荷揺らぎの少ない GaAs/AlGaAsヘテロ構造基板（より高い2次元電子濃度と $100\text{cm}^2/\text{Vs}$ 以上の高移動度を持つ）を吟味して検出器を作成し、より簡便な ^3He クライオスタット(0.3K)中での動作に成功した（波長約150ミクロン）。また、検出信号の増幅回路を改善（図5a）して検出応答速度を2msecから $20\mu\text{sec}$ に向上させる（図5b）とともに、異なる電子濃度を有する複数のGaAs基板から検出器を作成することにより、フォトンカウンティング可能な波長範囲を拡大した。このことにより走査型顕微鏡に組み込むことが可能となり、以下に記すように、遠赤外領域でのフォトンカウンティング計測（イメージング画像）に成功した。

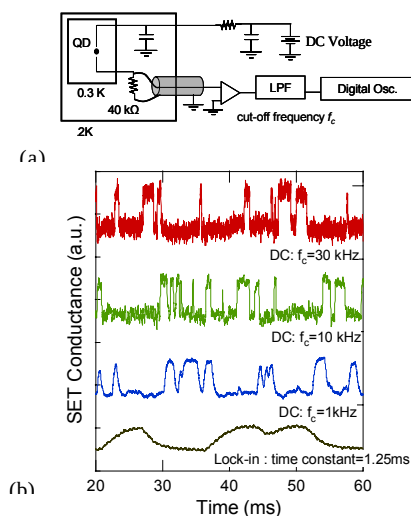


図5 (a)高速測定のための電流検出回路

(b) 光子吸収によるテレグラフ信号。応答速度

(b) 2重量子ドット光子検出器(DQD)の開拓

上記の単一量子ドット検出器(SQD)は、電子状態を数テスラの磁場によって量子化する必要がある。広範囲への応用を目指す観点からは、磁場印加を必要としない光子検出器の開発が重要である。そこで、GaAs・AlGaAs 中に並列平面方2重量子ドット(図6)を作成し、まず一方の量子ドット(D2)への単一電子トンネリングの実時間計測に成功した。これは、対象となる量子ドット(D2)に近接して配置された第2の量子ドット(D1)を単電子トランジスタ-(SET)として動作することにより、超高感度の電荷実時間検出を行ったものである。さらに、図6に示すように、この機構を応用してサブミリ波光子(光子エネルギー2meV、波長600ミクロン、周波数500GHz)の吸収による量子ドット(D2)のイオン化の実時間検出に成功した。これは、世界初のサブミリ波単一光子検出器開発の成功であり、かつ、動作に磁場を必要としない点も重要である。(図1中のDQD。)

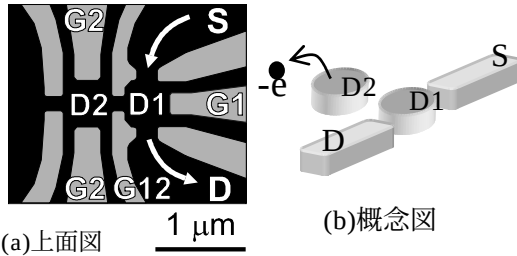


図6: 並列平面2重量子ドットによる検出器

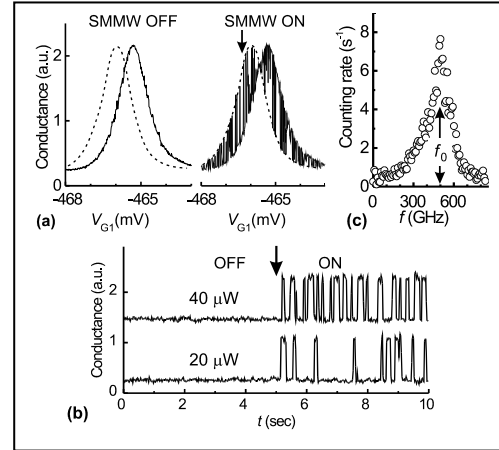


図7: 並列2重量子ドットによるサブミリ波光子検出 (a)SET(D1)トンネル伝導度ピーク。(b)固定ゲート電圧におけるトンネル伝導度の実時間変化。(c)励起スペクトル(光子計測数の入射サブミリ波周波数依存性)。プラズマ共鳴を示す。

(c) アルミニウム SET との複合検出器(QD+Al-SET)の開拓

Dr.Antonov グループ(London 大学)との共同研究。上記(a)の並列2重量子ドット検出器(DQD)は量子ドット1-2間の静電容量結合が小さいため、光子吸収のスイッチングによる伝導度変化が小さい欠点を有した。そこで、図8に示すように、量子ドット1をアルミニウム接合によるSETで置き換え、それを量子ドット2の上部に形成してより大きな静電容量結合を得てゼロ磁場中で高効率で動作する新たな素子を開発した。この素子は量子ドット(500x700nm)を金属ゲートにより形成し、そのイオン化を量子ドット上部に形成した小さなAl-SET(250x250nm)で検出する。何回かの素子構造改良を重ね、図9に示すように暗スイッチ頻度が小さく、有効感度の高い素子の開発に成功した。(図1のQD+Al-SET)

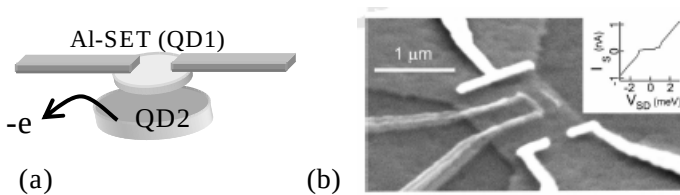
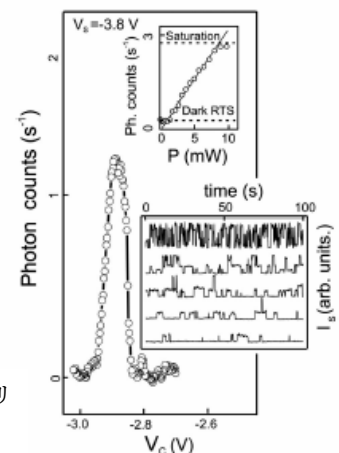


図8: Al-SET と GaAs/AlGaAs 量子ドットによる複合検出器(QD+Al-SET)。 (a)概念図 と (b)実際の素子。

図9: 光子カウント頻度のゲート電圧依存性。囲み欄はサブミリ波光子吸収によるAl-SETのスイッチング(囲み欄)。



(d) 2重量子井戸検出器(DQW)の開拓

上記の検出器、SQD, DQD, QD+AISET, はいずれも検出波長が 100 ミクロン程度より長い範囲に限定され、かつ動作温度として 1K 以下が必要である。これらはともに応用に制約を与える。検出波長領域の限界は励起機構（プラズマ振動およびサイクロトロン共鳴）が図 10(a) のように量子ドット中で電子を面内方向に振動するモードだからである。また、動作温度が 1K 以下なのは電荷敏感素子として用いる SET の動作のためである。そこで、赤外領域に至る広い波長範囲で動作し、かつ液体ヘリウム温度 (4.2K) 以上で使用できる真に応用に適した光子検出器を開発し

た。そのために、検出機構として図 10(b) のように孤立領域（量子ドット）に垂直方向の振動電場成分によって 2 次元サブバンド間励起を利用する事にした。2 次元サブバンド間の励起エネルギーは一般に大きく、量子井戸幅によって波長 100 ミクロン（井戸幅 25nm 程度）から 6 ミクロン（井戸幅約 7nm）まで連続的に自由に設計できる。（垂直方向励

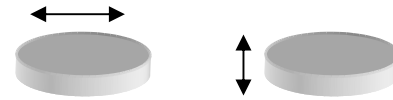


図 10: 振動電場による量子ドットの励起。面内方向(左)と垂直方向

起のためにはパッチアンテナまたは微細金属格子による近接場を用いる。) また、電荷敏感素子として SET を用いるのを止め、より高温で動作可能な量子ポイントコンタクト (QPC) または単純な高移動度 2 次元電子系チャンネルを利用する事にした。

従来、中赤外領域において多重量子井戸のサブバンド間励起を利用する量子井戸赤外検出器(QWIP, Quantum Well Infrared Photodetector)が高感度検出器として定評があり商業ベースでも利用されている (図 1 中の QWIP)。しかし、QWIP 検出器は励起電子をそのまま光電流として量子井戸面に垂直に流すため電子移動度が低く、かつ増幅作用を内蔵しないため、本研究の観点からは感度が十分でない。我々が構想する検出器は、図 11 に概念を示すように、2 重量子井戸構造を用いる。表面に近い（上部の）量子井戸を周囲と遮断して平面的に孤立させ、その直下に第二の量子井戸から作る量子ポイントコンタクト (QPC) または 2 次元電子による伝導チャンネルを配する。サブバンド間励起によって孤立した量子井戸から電子を脱出させてイオン化し (図 12(b))、イオン化による電荷蓄積を QPC または伝導チャンネルの電流変化によって検出する。このように、この素子は孤立量子井戸が光敏感な浮遊ゲートとして働く (増幅作用を有する) 電荷敏感型の赤外フォトトランジスタである。この構想に基づき、図 12(a) に示す GaAs/AlGaAs 系の二重量子井戸結晶を (量子井戸幅は 10nm、基底状態—第一励起状態のサブバンド間遷移の波

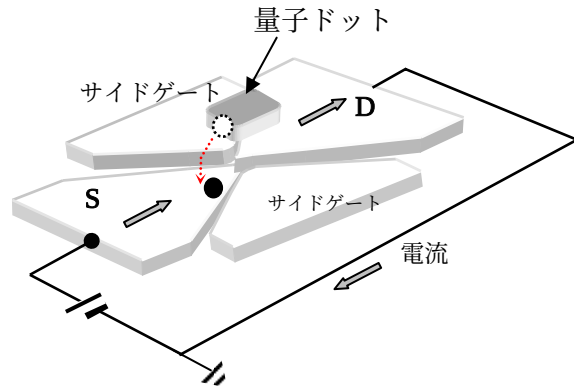


図 11: 2 重量子井戸で形成する検出器概念図。

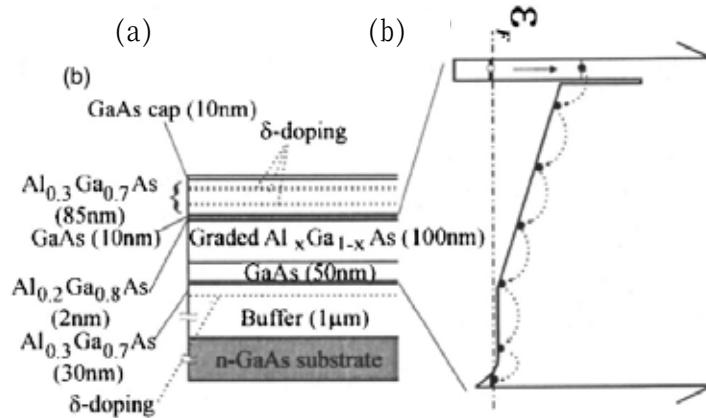


図 12 2 重量子井戸構造結晶とサブバンド間励起 (波長 14μm)

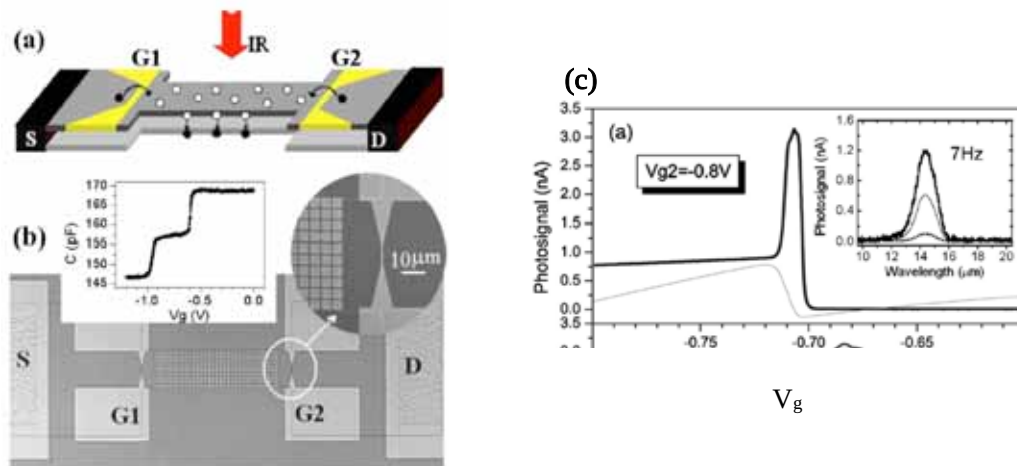


図 13 二重量子井戸検出器(DQW)： 受光面積：50 μm $\times$ 200 μm
(a)素子概念図 (b)顕微鏡写真 (c)光応答信号、囲み;励起スペクトル

長は 14 μm) を用いて多数の素子を作成し、4.2K で動作し応用に極めて適した超高感度検出器を得ることが出来た。

図 13 は量子井戸の孤立領域 (50 μm $\times$ 200 μm) が波長 (14 μm) より大きな素子での結果を示す。図 13(c) に示すように金属ゲート電極をバイアスして量子井戸が電氣的に孤立すると大きな光信号を生ずる。図 13(c) の囲みは励起スペクトルが 14 μm 付近の共鳴であり、サブバンド共鳴によることが解る。図 14 は波長サイズ以下の素子 (0.8 μm $\times$ 1.5 μm) の測定結果であり、単一光子吸収による伝導度の増大がステップとして識別でき、単一光子感度を有する事が解る。

リセット動作 図 14 で伝導度が光子吸収によってスイッチングせずステップ的に増大するのは、図 12 による励起の寿命が数分以上に及ぶためである。このことは、連続して入射する光子によって孤立領域

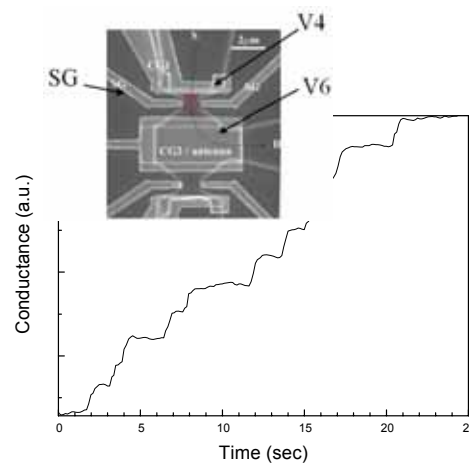


図 14 二重量子井戸検出器(DQW)：受光面積：0.8 μm $\times$ 1.5 μm

単一光子検出 (波長 14 ミクロン)。単一光子吸収によって光敏感ゲートの帯電が +e 増加する毎にソースドレイン電流がステップ的に増大する。

の帯電が時間と共に単調に蓄積する事を意味し、電荷蓄積が進行するに従って、図 15(c) のように励起電子の脱出が止まって感度が著しく減少する欠点に繋がる。(連続光入射の条件下で感度低下が実測された。) そこで、孤立量子井戸に蓄積した電荷を逃がすために、孤立量子井戸を短時間アースに接続して素子をリセットするためのゲート (図 15(a) の RG) を新たに付加した。(図 15(d) は実際に用いた素子の顕微鏡写真。) 図 16 は、RG にリセットパルス (幅 1 μs 、振幅 0.8V、60 msec 間隔) を印加することによって得た信号電流であり、時間と共に光励起によって電荷蓄積が進んで電流が増大することを示している。(異なる曲線は、異なる強度の中赤外光に対応する。入射光強度が強いと信号電流は飽和して感度を失うが、パルスイオン化によって感度が復活する事が解る。このリセット操作によって、図 1 に示すように従来の中赤外検出器に比べて 3 桁程度大きな特性感度 ($D^* = 3 \times 10^{14} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$) を実現し、かつ極めて広い入射光強度範囲 (ダイナミックレンジ 10^8 程度) での使用を可能とした。

このように、開発した 2 重量子井戸検出器 (DQW) は、超高感度性に加えて

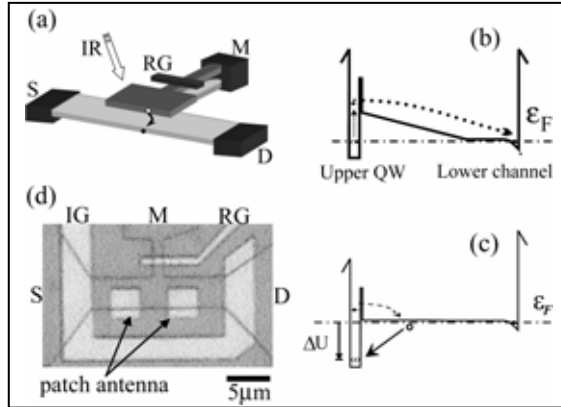


図 15 2 重量子井戸検出器(DQW) :
リセットゲート(RG)付加

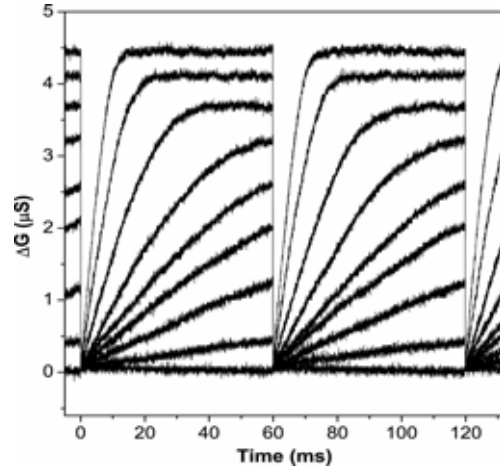


図 16 2 重量子井戸検出器(DQW)のリ
セット動作による光検出信号

- 4.2Kまたはそれ以上の温度で動作可能（30Kまで感度の顕著な低下無し）
- 検出波長域の拡大が容易（量子井戸幅の選択）
- 動作速度10ns程度
- 素子構造が単純
- 電荷蓄積型のため可視・近赤外領域のCMOSセンサーに類似してアレー化容易

といった優れた特徴を持つ。入射電磁波と電子系との結合（量子効率=1%程度）方法をさらに工夫し、また2次元電子系の電子移動度を改善することで、感度を今後さらに2桁近く向上する事が可能と考えられる。また、動作温度は現在30K以下だが、量子井戸構造の完全性を向上させることで液体窒素温度（77K）までの拡大は不可能でないかも知れない。

アレー検出器 図 16 に示す動作は CMOS センサーに似ておりアレー化に適する。赤外・テラヘルツ領域にはこのような電荷蓄積型の検出器は他に全く存在せず、開発した CSIP は優れた感度だけでなく、アレー化が容易な点でも他の多くの赤外・テラヘルツ検出器に比して優れている。今後の広範な応用を目指すために、図 15(d) に類似の素子による 20x20 画素のアレー素子を試作（図 17）し、アレー動作を試みている。行選択と読み出しを行う Si-LSI の特注回路を作成し、4.2K に置いたアレー素子と 1m 程度のツイストペア・リードで接続して動作させようとしている。

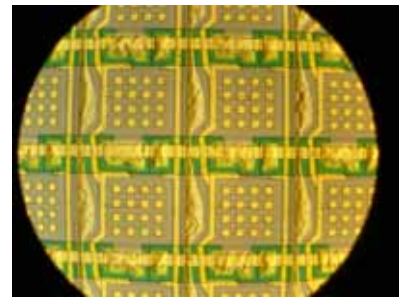


図 17 2 重量子井戸検出器(DQW)
アレー（20x20 画素の一部）

走査型顕微鏡開拓

(a) 従来型検出器を用いた顕微鏡

CREST プロジェクトで、純粋 Si のソリッドイマージョンレンズ(Si-SIL)一つだけからなる極めて単純な走査型遠赤外顕微鏡を開拓していた。感度と分解能をさらに向上させるために、図 18 に示すように Si-SIL にさらに TPX のコンデンサーレンズを追加して最適化し、既開発の顕微鏡に比べて 30 倍の感度と波長以下の分解能（感度約 10fW、分解能は波長 120 ミクロンに対して 50 ミクロン）を実現した。この顕微鏡を量子ホール効果素子中の非平衡電子イメージングに適用し、非平衡分布した量子ホール系端状態のサイクロトロン発光に

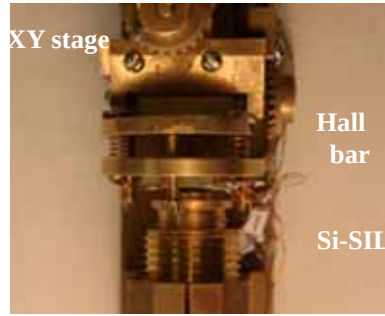
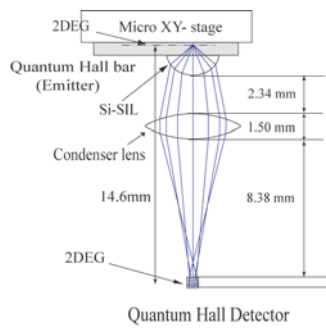


図 18：走査型 THz 顕微鏡

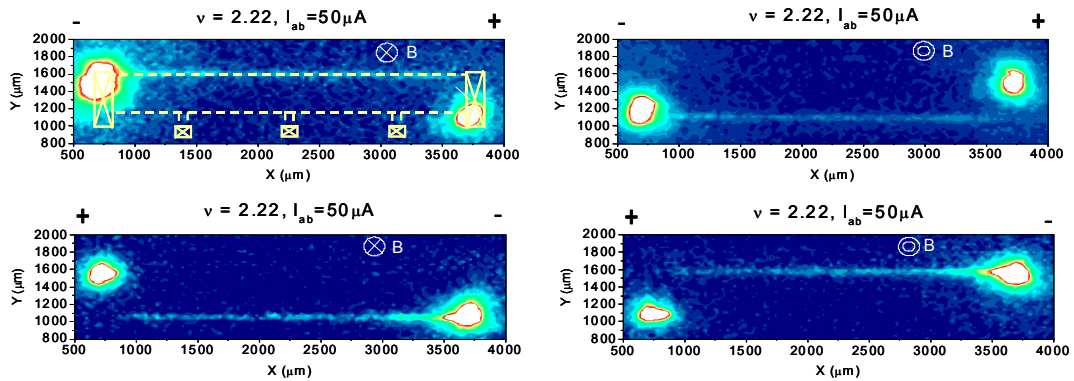


図 19：非平衡分布した端状態からのサイクロトロン発光。4つの異なる磁場・電流極性を示す。

よる画像化に始めて成功し、さらに量子ホール効果崩壊状態や量子ホール遷移領域における特徴的なサイクロトロン発光パターンのイメージング画像を得た。図 19 に端状態からの発光のみを示す。さらに、図 20 に示すようにこの走査顕微鏡で検出器磁場のみ挿引をすることにより、波長分光可能とし、量子ホール素子に適用して異なる場所からの微弱光の分光測定を行った。このことにより、今まで全く不可能だった局所的な非平衡電子のエネルギー分光を行い、非平衡電子生成のダイナミクスに関して知見を深めた。

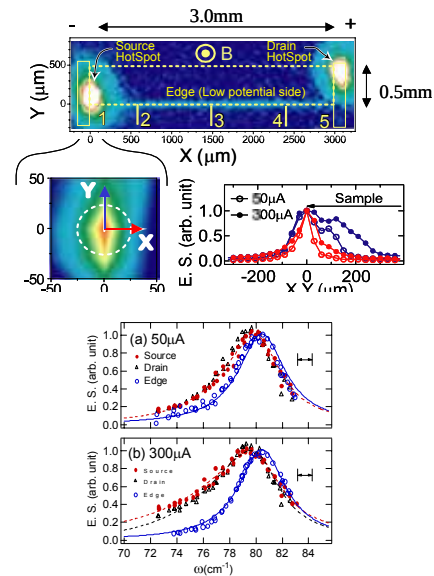


図 20 量子ホール素子のソース・ドレイン電極のホットスポットと端状態からの THz 発光スペクトル。

(b) フォトンカウンティング顕微鏡

上記の(a)に記した単一量子ドット検出器 (SQD) を組み込み、フォトンカウンティングを可能な走査型顕微鏡を開発した。検出器(3He 温度=0.3K)と試料(4He 温度=4.2K)は赤外透過窓 (純粋 Si) で隔てられ、距離約 45mm に置かれる。試料焦点位置からの光が Si-SiL と TPX のレンズによって平行光線に変換されて窓を透過して検出

器側の真空部に入射し、再度にスズレンズと Si-SIL によって量子ドット検出器に集光され光子がカウントされる。試料はピエゾ素子駆動の XY ステージで挿引されてイメージング画像を得る。従来型検出器に比べて約 1 万倍の感度向上を達成した。

図 22 はこの顕微鏡を量子ホール電子系に応用した結果である。微小電流 (1 マイクロ A) 領域での極めて微弱なサイクロトロン発光 (光子数 8 個/秒) をフォトンカウンティング計測により画像化したものであり、ホール素子の対角線角位置 (ホットスポット) からの電流注入にともなう極めて微弱な発光 (毎秒 10 個程度の光子) が始めて明確に捕らえた。図 23 はの測定で得られた 2 マイクロ A までの発光の電流依存性を示しており、理論的に予想される発光の電流閾値 0.3 マイクロ A (ソース・ドレイン電圧=サイクロトロンエネルギー/2e) を初めて明確に計測出来た。

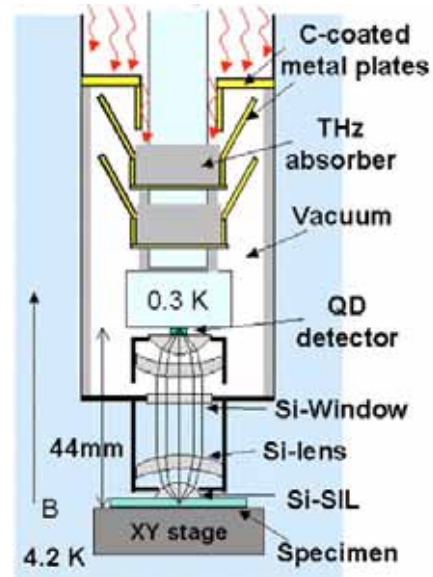


図 21 フォトンカウンティング顕微鏡 (波長 170 ~120 μ m)

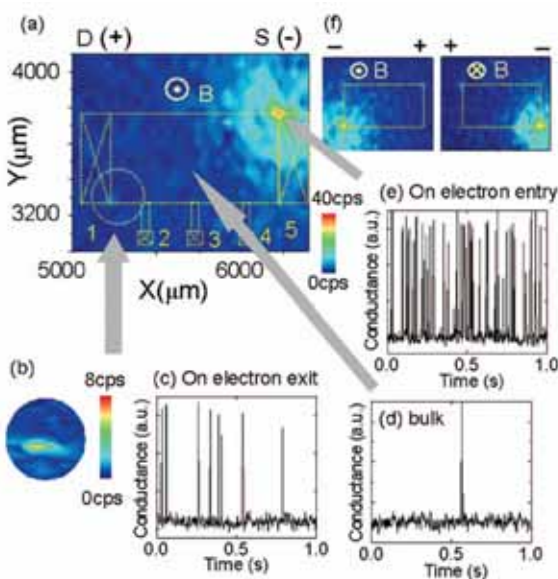


図 22 フォトンカウンティングによる量子ホール素子のサイクロトロン発光画像

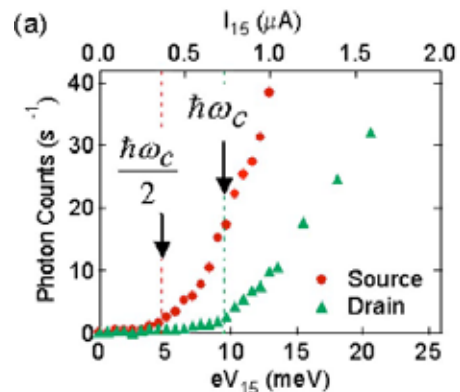


図 23 サイクロトロン発光の電流数居値

さらに、異なる電子濃度を持つ GaAs・AlGaAs 基板から量子ドット検出器を作成して波長範囲をずらすことにより、端状態の非平衡分布 (図 24) やゲートバイアスによって生ずるポテンシャル障壁 (図 25) からの極微弱遠赤外発光の詳細なフォトンカウンティング・イメージングを取得することにより、非平衡電子分布の発生機構とダイナミクスを明らかにした。

この計測成功は、遠赤外光領域において感度限界が事実上消失したことを意味し、可視・近赤外領域の計測技術に大きく近づいた点が重要である。

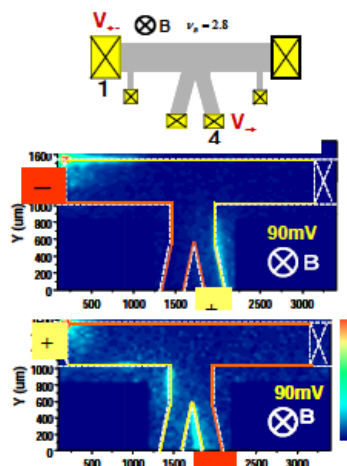


図 24 量子ホール素子の低ポテンシャル edge からの、閾値電流近傍での遠赤外発光。電流極性反転で発光位置が変わる。

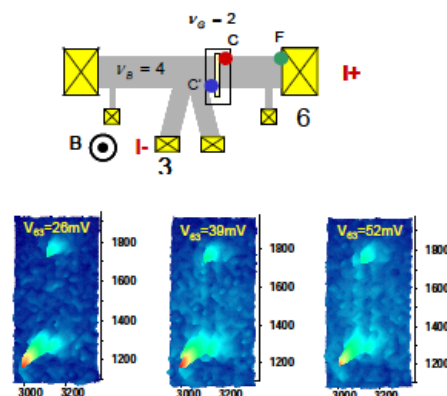


図 25 クロス・ゲートによるポテンシャル障壁からの閾値電流近傍での THz 発光。ポテンシャル障壁の対角的反対の角から発光する。

(c) 常温試料用顕微鏡

2重量子井戸検出器(DQW)の開拓成功によって、常温試料を念頭にした汎用の超高感度顕微鏡開拓へ進む準備が整った。最初の試みとして2種類の顕微鏡(波長 10~14 μm)を試作した。第一は DQW の単一素子を用いて超高分解能を目指す共焦点顕微鏡であり、第二は、FPA (20x20) を用いて高速高感度の計測を目指すアレー検出器用顕微鏡(図 26)である。今後、低温試料を越えて分子や生体へ観察の対象を広げる準備が整った。

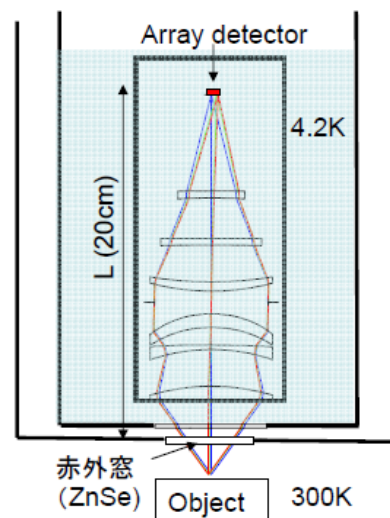


図 26 常温試料用(汎用)顕微鏡

超音波誘起電磁波の計測

超音波による電磁波誘起が期待される候補物質として、圧電効果を示す誘電体がもっとも基本的である。そこで、非圧電材料と圧電材料の代表例である Si と GaAs の測定を行った(図 27)。超音波はウェハー面の垂直方向から入射している。図 27 で時間 0s と 90s 近傍に見える大きな信号はそれぞれ超音波発の発生とエコーの到着にともなうトランスデューサーから生ずるノイズである。被測定物からの電磁波信号は、エコー信号の経過時間のちょうど半分(45s)で観測されるはずである。実際、非圧電材料の Si では超音波誘起電磁波は発生しないが(図 27(a))、GaAs ではその信号が観測された(図 27(b)と 2(c))。また、信号強度の結晶方位性は GaAs の圧電係数テンソルの対称性で説明できる。このことは、物質の選択的検知・イメージングという観点で考えると、従来の超音波エコー検査に較べてより多くの内部情報を獲得できることを意味する。

図 28 に示すように、上記計測方法を用いて骨組織(コラーゲン)や植物繊維(セルロース)、ポリエチレンなどのプラスチックなど他の多くの物質で超音波誘起電磁波の発生が確認された。生体高分子に関して、結晶は空間反転対称性を一般にもたないために、骨、筋肉、血管など多くの部位・体組織で圧電効果が報告されている。特に骨に関しては、超音波による骨成長促進効果が外科治療で注目されており、圧電効果との関連性が議論され

ている。本測定方法では、非侵襲に骨の圧電効果を調べることができるので医療研究にとって有効であると思われる。さらに図 28(d)では磁性材料からの信号も観測されている。これは磁歪効果を通して磁化の振動が誘起されたと考えられる。非破壊の磁化検査に応用できる可能性が高く今後の発展が期待できるだろう。

脳機能計測や心筋イメージングなどのさらなる興味深い応用へと発展させるためには、背景電波の抑制と圧倒的な高感度化が必要である。そこで SQUID（超伝導量子干渉素子）の導入を行う予定であり、JST の「試作・実用化試行検討」を通してそのための電磁シールド環境を整えた。

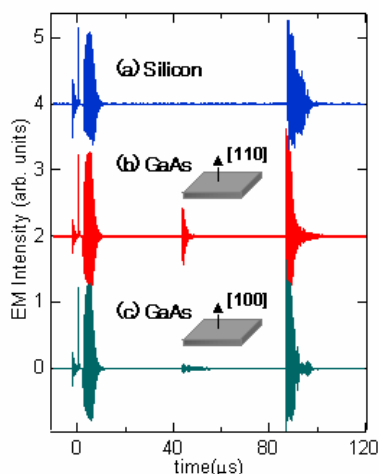


図 27 GaAs からの超音波誘起電磁波信号。(a) Si, (b) GaAs(110), (c) GaAs (100).

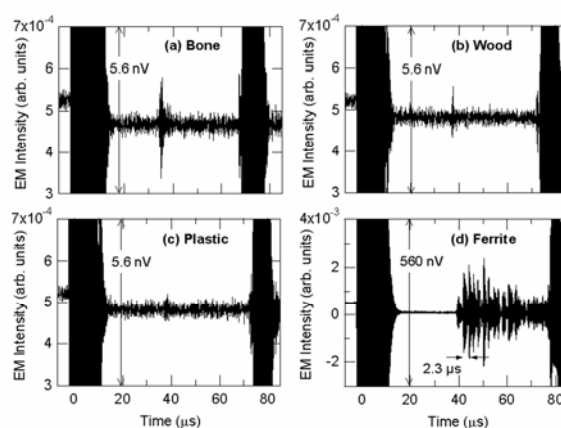


図 28 様々な物質から検出された超音波誘起電磁波。

4. 2 平川グループ（東京大学 生産技術研究所）

(1)実施の内容

小宮山部グループに於ける検出器開拓の要は良質の GaAs/AlGaAs 量子井戸結晶を成長できるかどうかにかかっていると言って良い。そのために、当グループは第一に「分子線エピタキシー (MBE) による高品質半導体量子構造の結晶成長」の役割を担い、第二に検出器開拓について「自己組織化量子ドットを用いた高感度赤外光検出の検討」を補完的に行った。

分子線エピタキシーによる高品質半導体量子構造の結晶成長

半導体量子構造を用いた高感度赤外-テラヘルツ (THz) 光検出器の作製のための基礎となる高純度半導体ヘテロ構造の結晶成長は分子線エピタキシー (MBE) 装置によって行う。高純度ヘテロ構造作製のために、通常のイオンポンプに加えて、大型のクライオポンプ 2 基を装着した。5 年間のプロジェクト期間中、予期しない停電や真空ゲートバルブの不良箇所により、多くの時間をメンテナンスに割いたが、装置稼働時には定常的に移動度・ $> 10^6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 以上の移動度が得られるよう細心の注意を払って結晶成長を行った。図 1 は、チェンバーを大気解放してメンテナンスを行ってからの移動度の成長回数依存性を表したものであり、50 枚目以降で $> 10^6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ の移動度が達成できていることがわかる。この程度の結晶が成長できる程度にまで結晶の質をキープした状態で、赤外-THz 検出器構造の成長を行った。

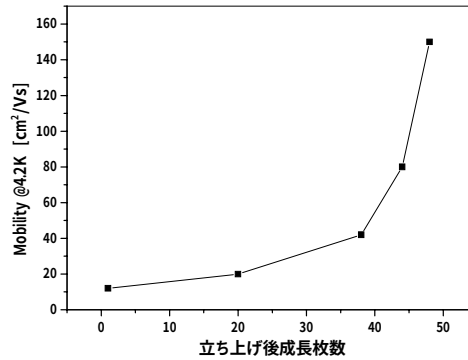


図1 分子線エピタキシー装置をメンテナンスしてからの成長回数と移動度の関係

(2)得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

分子線エピタキシーによる高品質半導体量子構造の結晶成長

(a) 逆方向ヘテロ界面成長条件の最適化

本プロジェクトの最も重要な成果である二重量子井戸検出器(DQW)は、4.1の図12に示した変調ドーピング2重量子井戸構造により得られた。この構造では、選択的にAlGaAs層にSiをドーピングした層の上面にGaAs伝導層を成長することになる。一般にSiドーピングしたAlGaAs層の上に成長したGaAs界面は、いわゆる逆ヘテロ界面と呼ばれ、(1)AlGaAsが不純物を取り込みやすく、(2)平坦な結晶成長面が得られる条件が限られており、(3)偏析効果によりドーピングしたSiのプロファイルが広がり、高純度GaAs層に不純物がドーピングされてしまう、等々の効果により、結晶成長が難しいことが知られている。本研究では、精密に基板温度やヒ素圧の条件をふるることにより、最適な条件を見つけ出す努力を行った。

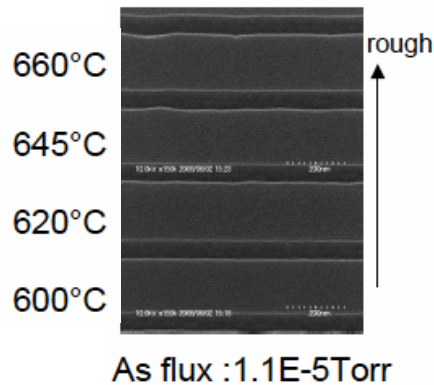


図2 様々な基板温度で成長したGaAs/AlGaAs積層構造の断面SEM写真

図2は、通常のMBE成長条件で成長したGaAs(比較的暗く見える層)とAlGaAs(灰色に見える層)の積層構造の断面SEM写真である。図からわかるように、成長したGaAs層の上面は平坦であるのに対して、AlGaAs層の上面は多段原子ステップの形成により非常に大きくうねっていることがわかる。このような結晶表面のモフォロジーとドーピングしたSiの活性化について、成長条件との関係をプロットしたものが図3である。図3からわかるように、AlGaAs層が平坦になり、かつSiが活性化し、2次元電子が存在する領域(青緑の領域)は非常に狭い。この非常に狭い成長条件の窓で成長した変調ドーピング2重量子井戸構造により、小宮山グループにおいてフォトンカウンティングレベルの中赤外光検出器(DQW)の開拓に成功した。詳細は、4.1(2)(d) 2重量子井戸検出器(DQW)の開拓を参照されたい。

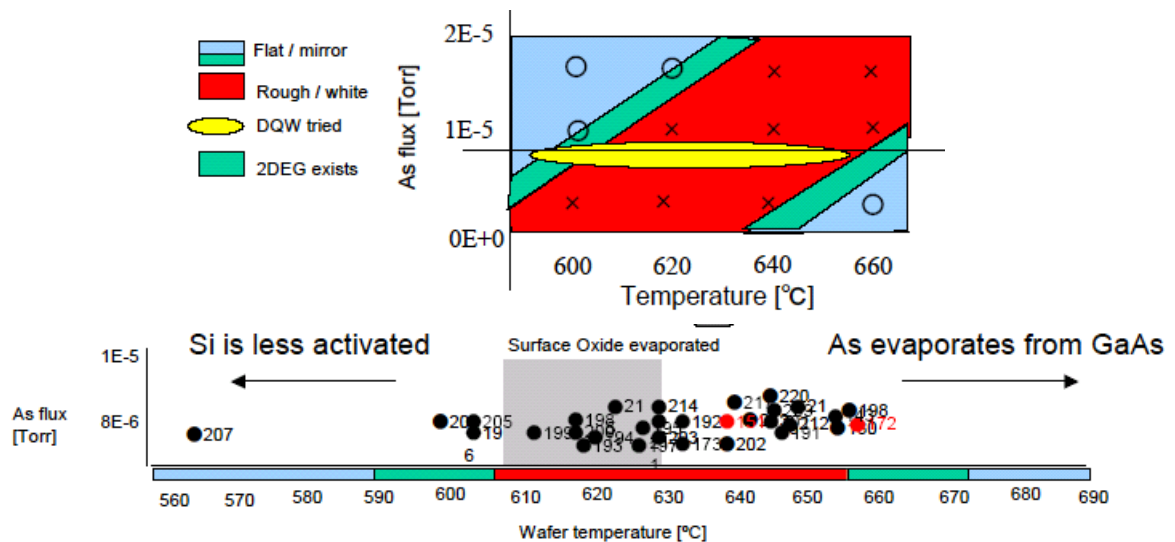


図3 MBE 成長における基板温度とヒ素圧を変化させながら成長したウェーハのモフォロジーと電气的な特性。赤いエリアは AlGaAs 層表面の凹凸が大きい領域。青および青緑の領域は、AlGaAs 層が平坦になる。さらに青緑の領域は Si が活性化し、2次元電子が存在する領域。

自己組織化量子ドットを用いた高感度赤外光検出に向けて

(a) 変調ドープ量子ドット赤外光検出器

中赤外領域の高感度光検出、および単一光子検出の新たな機構探索を目指して、自己組織化 InAs 量子ドットの光イオン化を用いた検出器の研究を行った。量子ドットは、垂直入射光に対してサブレベル間遷移が感度を持つ、光イオン化エネルギーが中赤外領域にある、量子ドットも用いた単一電子トランジスタが 4.2K でも動作する等、様々な利点を有するが、一方、光吸収断面積が小さいために量子効率が高いという問題があった。この問題を克服すべく、量子ドットの価電子帯に着目し、ドーピング方法を最適化することにより、1つの量子ドットに約 10 個の正孔を導入することができた。

また、量子ドットの光遷移が、電子の場合には量子ドット準位から濡れ層の準位への遷移が支配的であるのに対して、正孔の場合にはバンド混合効果によると思われる非常に広帯域な遷移が観測された。いずれの場合も光伝導利得が 100 程度ある検出器構造を作製することができたが、光励起キャリアの量子ドットからの脱出確率が低く（数%オーダーと見積もられる）、量子効率という観点からはさらに改善の余地がある。

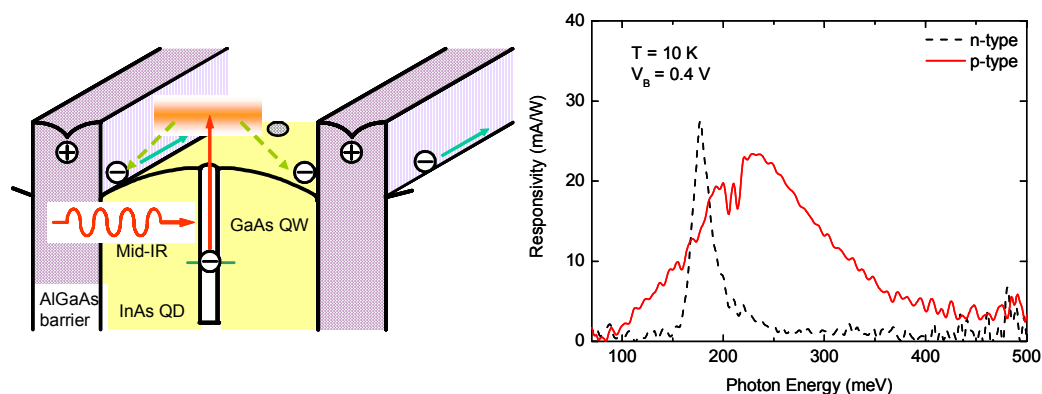


図4 量子ドットに電子を1個導入した試料と正孔を9個導入した試料の感度。

(b) 自己組織化単一量子ドットトランジスタ

“人工原子”、“人工不純物”とも呼ぶべき自己組織化 InAs 量子ドットは、量子ドットレーザ、光増幅器など、量子ドットアンサンブルとしての応用が重点的に研究されてきたが、近年、量子情報処理技術への関心の高まりとともに、単一量子ドット内の電子状態や物性を巧みに利用した単一光子発生素子が注目を集めている。図5は、小宮山チームにより開発された結合2重量子ドットTHz単一光子検出器(DQD)と同じ原理で動作することを目指した、キャパシティブに結合した2つの自己組織化 InAs 量子ドット構造である。

本研究では、単一の自己組織化量子ドットに電気的なコンタクトをとる技術の条件出しを行い、できるだけ大きな確率で量子ドット1個をプローブするように適当な寸法を持った極微細ギャップ電極を形成することにより、図6に示すような極微ギャップを有する電極を形成し、約10%程度の確率で伝導をプローブすることに成功した。図6からわかるように、伝導を示す試料は明瞭なクーロンダイヤモンドを示し、この試料が自然に単一電子トランジスタになっていることがわかる。この自己組織化単一 InAs 量子ドットトランジスタについて、その伝導特性を詳細に検討し、シェル構造や各量子準位のエネルギー間隔を決定するとともに、量子ドットと電極の間の近藤効果など、新規な物理現象を見出した。現段階では、単一量子ドットの伝導特性の解明に留まっており、赤外単一光子検出には至っていない。しかし、今後リソグラフィと結晶成長技術のさらなる向上により有望な検出の枠組みを与える可能性がある。

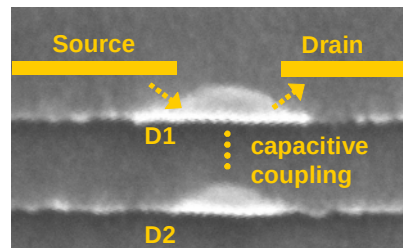


図5 結合自己組織化量子ドットを用いた単一赤外光子検出器の模式図

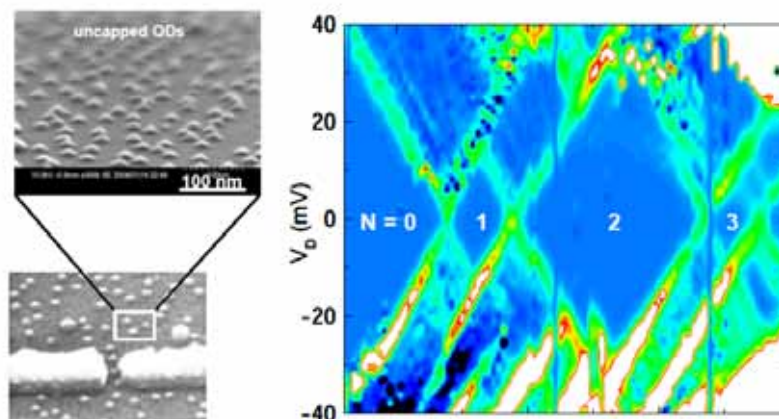


図6 単一自己組織化量子ドットに金属電極を作製して得られた単一電子トランジスタとその微分伝導度のドレイン・ゲート電圧依存性（クーロンダイヤモンド）。

4. 3 陽グループ（GaAs 単一ヘテロ構造結晶成長）

(1)実施の内容

本プロジェクトの前半期間、特に平川チームでの分子線エピタキシー装置の調整期間中に、本研究プロジェクトで使用する高純度 GaAs/AlGaAs 結晶の分子線エピタキシャル成

長を行ってテスト用結晶を小宮山グループに提供した。

4. 4 Antonov グループ (アルミニウムジャンクション SET による検出器の開拓)

(1)実施の内容 (2)得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

アルミニウム SET と半導体量子ドットの組み合わせによる複合検出器 (QD+Al-SET) の開拓を小宮山グループと協力して行った。素子の基本的構想は小宮山グループ、素子作成はロンドン大学の設備で独自に行った。また、ロンドン大学には光子検出の計測のための分光系が無いので、素子を東京に持参した上で一部実験を小宮山グループと協力して行った。(小宮山グループ: 4.1(2)(c)アルミニウム SET との複合検出器(QD+Al-SET)の開拓 を参照のこと。)

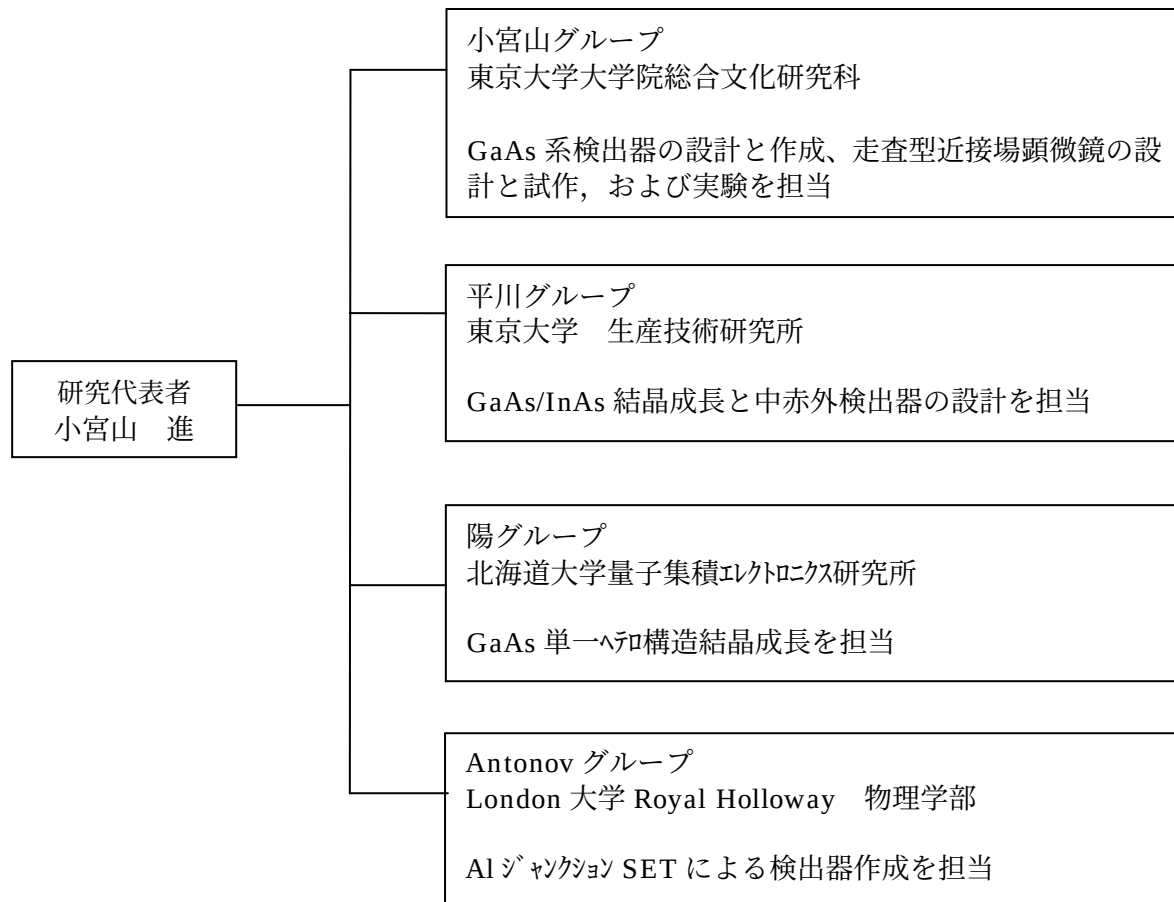
5. 類似研究の国内外の研究動向・状況と本研究課題の位置づけ

最近、テラヘルツ (THz) 領域の研究が各国で盛んになっている。しかし、本研究の検出器開拓・顕微鏡開拓双方に関して、比較すべき類似研究は国内外に存在しない。[計測手法]として見た場合、本研究での超高感度顕微鏡は非測定物が自ら発するきわめて微弱な光を光子レベルでイメージングする点が全く異なり、微小な量子素子が動作時に発する微小な電磁波や、少数の生体高分子が生体活動に伴って発する極めて微弱な電磁波をイメージングできる、という際立った特徴を持つ。一方、近年盛んになった THz 計測応用のほとんどは、外部から強い THz 光を照射する能動計測であり、研究の意図が異なる。また、通常の能動計測で扱う THz 光強度はナノワット程度以上であり、本研究で対象とする光の 1 億倍程度強い。高感度の受動計測 (赤外カメラまたはサブミリ波カメラ) の手法の開発も進んでおり、安全のために役立てることが期待されている。例えば衣類の中に隠し持った武器を検知したり、災害時に炎を通して向こう側に居る人間を検知する例が最近報道されている。しかし、それらの計測では分解能の要求が低いので、そこでの光強度も本研究で対象とする光の 100 万倍程度強い。ちなみに、電波天文での最高感度の計測に比べても、本研究で達成した感度は、さらに千倍程度高感度である。

[検出器]については、図 1 に纏めたように本研究で開発した検出器は、電波・赤外天文分野や防衛・宇宙の分野で長年開発されてきた他のあらゆる検出器に比べて桁違いに高い感度を有する。単に感度だけではなく、2 重量子井戸検出器 (DQW) は電荷蓄積型の C-MOS センサーに類似した特性を有しており、取り扱いが簡便であるだけでなくアレー化に極めて適する点も他の従来型検出器と大きく異なる優れた点である。今後、当研究で開発した検出器が赤外一ミリ波領域の代表的検出器として他の検出器に置き換わってゆく可能性が高いと考えられる。

6. 研究実施体制

(1)体制



(2)メンバー表

①小宮山グループ

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
小宮山 進	東大大学院総合文化研究科	教授	研究の総括	H14,4～
川口 康	派遣先	J S T 研究員	研究の総括 縦型 2 重量子ドット検出器の作成と実験	H14,4～H18,3
町田 友樹	派遣先	J S T 研究員	平面 2 重量子ドット検出器の作成と実験	H14,4～H14,10
生嶋 健司	東大大学院総合文化研究科	助手	走査型近接場顕微鏡の試作と実験	H14,4～H19,3

久津輪 武史	東大大学院総合文化研究科	博士課程 院 生	スピン励起検出器の実験	H14,4～H15,3
山崎 智幸	東大大学院総合文化研究科	修士課程 院 生	平面2重量子ドット検出器の作成と実験	H14,4～H15,3
佐久間 寿人	東大大学院総合文化研究科	修士・博士 課程院 生	走査型近接場顕微鏡の試作と実験	H14,4～H19,3
高木 久美子	派遣先	研究補助 員	研究資料作成、データ整理	H14,4～H19,3
吉村 育大	東大大学院総合文化研究科	修士課程 院 生	光子検出器の特性改善	H15,4～H17,3
Leonid Koulik	派遣先	J S T 研 究 員	2 重量子井戸による検出器の作成と実験	H14,9～H15,9
上田 剛慈	派遣先	J S T 技 術 員 → J S T 研 究 員	GaAs/AlGaAs 系単結晶成長	H14,2～H19,3
小林 泰子	東大大学院総合文化研究科	修士課程 院 生	希釈冷凍機メンテナンス・実験補助	H16,4～H18,3
長谷川 琢真	東大大学院総合文化研究科	修士課程 院 生	電気回路整備・実験補助	H16,4～H18,3
Chen, Jeng-Chung	派遣先	J S T 研 究 員	Al-SET の作成と実験	H16,1～H18,7
An, Zhenghua	派遣先	J S T 研 究 員	2 重量子井戸による検出器の作成と実験	H16,2～H19,3
中嶋 峻	東大大学院総合文化研究科	修士課程 院 生	希釈冷凍機メンテナンス。低温実験補助	H17,4～H19,3
佐藤琢哉	派遣先	J S T 研 究 員	常温試料用顕微鏡開拓	H18,1～H19,3
綿貫丈雄	派遣先	J S T 研 究 員	超高分解能顕微鏡開拓	H18,4～H19,3
Patrick Nickels	東大大学院総合文化研究科	博士課程 院 生	電子線描画装置メンテナンス。低温実験補助	H18,4～H19,3
綿貫俊輔	東大大学院総合文化研究科	修士課程 院 生	超音波励起電磁波検出	H18,4～H19,3

氏名	所属	役職	担当する研究項目	参加時期
平川 一彦	東大生産研	教授	GaAs/InAs 結晶成長と中赤外検出器の設計	H14,4～H19,3
佐久 規	派遣先	J S T 技術	GaAs/AlGaAs 系単結	H15,3～H19,3

		アドバイザー	晶成長のため、MBE装置の技術指導	
長井奈緒美	派遣先	J S T 技術員	GaAs/AlGaAs 系結晶成長	H18,3～H19,3
Jung, Min-Kyung	東大生産研	博士課程院 生	GaAs/InAs 結晶成長 と中赤外検出器の試 作・評価	H.17,4～H17,12

氏名	所属	役職	担当する研究項目	参加時期
陽 完治	北大量子集積エ レクトロニクス研究セン ター	教授	GaAs 単一ヘテロ構造結 晶成長	H14,4～H19,3

氏名	所属	役職	担当する研究項目	参加時期
Vladimir Antonov	London 大学 Royal Holloway 物理学部	講師	Al ジャンクション SET に よる検出器作成	H14,4～H19,3
羽柴秀臣	London 大学 Royal Holloway 物理学部	博士課程院 生	Al ジャンクション SET に よる検出器作成	H16,4～H18,3

7. 研究期間中の主な活動

(1)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

(2)招聘した研究者等

氏 名（所属、役職）	招聘の目的	滞在先	滞在期間
Aleksey V.Novikov（ロシア科学アカデミー微細構造の物理研究所・研究員）	結晶成長技術および光学特性についての技術情報交換（セミナー開催）	東大総合文化研究科小宮山研究室	H14,5,30 ~ H14,5,31
Leoid Koulik（ロシア、固体物理研究所上級研究員）	EBL を用いた量子素子作成の技術指導	東京大学大学院総合文化研究科小宮山研究室	H16,2,2 ~ H16,4,15
Haewook Han(韓国・ポハン科学技術大学・助教授)	AFM チップ ^o による近接場を用いたナノメートル分解能についての研究情報交換（セミナー開催）	東京大学大学院総合文化研究科小宮山研究室	H18,3,5 ~ H18,3,8

8. 発展研究による主な研究成果

(1)論文発表（英文論文 73 件 邦文論文 13 件）

（英文論文）

1. Y. Kawaguchi, K.. Hirakawa and S. Komiyama “High-sensitivity quantum Hall far-infrared photodetector integrated with log-periodic antenna” Applied Physics Letters **80**, 3418 (2002)
- 2. O. Astafiev, S. Komiyama, T. Kutsuwa, V. Antonov, Y. Kawaguchi, and K. Hirakawa “Single-photon detector in the microwave range” Applied Physics Letters **80**, 4250 (2002)
3. T.Machida, S. Ishizuka, T. Yamazaki, S. Komiyama, K.Muraki, and Y. Hirayama “Spin polarization of fractional quantum Hall edge channels studied by dynamic nuclear polarization” Phys. Rev. B**65**, 233304 (2002)
4. T. Machida, T. Yamazaki, and S. Komiyama “Local control of nuclear polarization in quantum Hall devices” Appl. Phys. Lett. **80**,4178 (2002)
5. T.Machida, T. Yamazaki, S. Komiyama, K.Muraki, and Y. Hirayama “Dynamic nuclear-spin polarization induce by scattering between fractional quantum Hall edge channels” Microelectronic Engineering, **63**, 63-68, August , 2002
6. S. Komiyama, O. Astafiev, V.Antonov and T. Kutsuwa “Single-Photon Detection of THz-Waves Using Quantum Dots” Microelectronic Engineering **63**, 173-178,

- (2002)
7. Y. Shimada and K. Hirakawa: "Time-resolved THz spectroscopy of miniband transport in biased GaAs/AlGaAs superlattices", *Inst. Phys. Conf. Ser. No. 170: Chapter 6*, 395-400 (2002)
 8. Y. Shimada, K. Hirakawa, and S.-W. Lee: "Time-resolved terahertz emission spectroscopy of wide miniband GaAs/AlGaAs superlattices", *Applied Physics Letters*, **81**(9), 1642-1644 (2002)
 9. K. Hirakawa, S.-W. Lee, Ph. Lelong, S. Fujimoto, K. Hirotsu, and H. Sakaki: "High-sensitivity modulation-doped quantum dot infrared photodetectors", *Microelectronic Engineering*, **63**, 185-192 (2002)
 10. S.-W. Lee and K. Hirakawa: "Lifetime of photoexcited carriers in modulation-doped quantum dot infrared photodetectors", *Physica E*, **13**, 305-308 (2002)
 11. Y. Kawaguchi, K. Hirakawa, M. Saeki, K. Yamanaka, and S. Komiyama: "Performance of high-sensitivity quantum Hall far infrared photodetectors", *Applied Physics Letters*, **80**(1), 136-138 (2002)
 12. T. Machida, T. Yamazaki, S. Ishizuka, S. Komiyama, K. Muraki, and S. Komiyama "Electron-nuclear spin interaction in edge states of quantum Hall systems" *J. Phys. Soc. Jpn., Supplement A*, **72**, 44-48 (2003)
 13. T. Machida and S. Komiyama "Hysteretic feature of quantum-Hall-effect breakdown caused by the dynamic nuclear polarization" *J. Phys. Soc. Jpn., Supplement A*, **72**, 199-200 (2003)
 14. T. Machida, T. Yamazaki, K. Ikushima, and S. Komiyama "Coherent control of nuclear-spin system in a quantum-Hall device" *Appl. Phys. Lett.* **82**, 409-411 (2003)
 15. Y. Kawaguchi and S. Komiyama "Spatial evolution of quantum Hall effect breakdown" *J. Phys. Soc. Jpn., Supplement A*, **72**, 217-218 (2003)
 16. O. Astafiev, V. Antonov, T. Kutsuwa, S. Komiyama "FIR and Microwave Photon Detection by Quantum Dots" *J. Phys. Soc. Jpn., Supplement A*, **72**, 102-105 (2003)
 17. K. Ikushima, H. Sakuma, S. Komiyama "An improved Far-infrared microscope with quantum Hall detectors" *Physica E*, **18**, 130-131 (2003)
 18. K. Ikushima, H. Sakuma, S. Komiyama "A highly-sensitive scanning far-infrared microscope with quantum Hall detectors" *Rev. Sci. Instruments*, **74**, 4209-4211 (2003)
 19. Y. Kawano and S. Komiyama "Spatial distribution of nonequilibrium electrons in quantum Hall devices: Imaging via cyclotron emission" *Phys. Rev. B* **68**, 5328 (2003)
 20. S. Komiyama, O. Astafiev, T. Machida "Application of quantum Hall edge channels" *Physica E*, **20**, 43-56 (2003)
 21. S. Komiyama, O. Astafiev and T. Kutsuwa, "Single THz-photon detection by quantum dots and control of nuclear-spin via quantum-Hall edge channels" *Institute of Physics, Conference Series Number 171 "Physics of Semiconductors 2002"* (Eds. By A.R. Long & J.H. Davies) **171**, 221-228 (2003)
 22. Komiyama S, Astafiev O, Antonov V, et al., "Single-photon detection of THz/GHz-waves using quantum dots" *INSTITUTE OF PHYSICS CONFERENCE SERIES* **171**,: 221-228 (2003)
 23. S. Komiyama, "Playing with quantum Hall effects and single-electron-tunneling effects" *Superlattices and Microstructures*, (Elsevier) **33**, 405-423 (2003)
 24. K. Jin, M. Odnoblyudov, Y. Shimada, K. Hirakawa, and K. A. Chao, "Terahertz frequency radiation from Bloch oscillations in GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As superlattices", *Physical Review B*, **68**(15), 153315-153318 (2003)
 25. K. Hirakawa, Y. Shimada, M. Odnoblyudov, and K. A. Chao, "Dynamical carrier transport and terahertz gain in semiconductor superlattices", *Proc. SPIE Int. Soc.*

- Opt. Eng., **4992**, 138 (2003)
26. N. Sekine, Y. Shimada, and K. Hirakawa, "Dephasing mechanisms of Bloch oscillations in GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As superlattices investigated by time-resolved terahertz spectroscopy", *Applied Physics Letters*, **83**(23), 4794-4796 (2003)
 27. Y. Shimada, K. Hirakawa, M. Odnoblioudov, and K. A. Chao: "Terahertz conductivity and possible Bloch gain in semiconductor superlattices", *Physical Review Letters*, **90**(4), 46806-46809 (2003)
 28. O.Astafiev and S. Komiyama "Single-photon detection with quantum dots in the far-infrared/submillimeter-wave range", "Electron Transport in Quantum Dots" (ed. by Jonathan P.Bird, Kluwer Academic Publishers) §9, pp.363-396, 2003, Aug.
 - 29. K.Ikushima, H. Sakuma, S.Komiyama, and K. Hirakawa "Imaging of cyclotron emission from edge channels in quantum Hall conductors" *Phys. Rev. Lett.* **93**, 146804(1-4) (2004)
 30. H. Hashiba, L. Kulik, V. Antonov, S. Komiyama, and C. Stanley, "Highly sensitive detector for submillimeter wavelength range" *Applied Physics Letters* **85**, 6036-6038 (2004)
 31. N. Sekine, Y. Shimada, and K. Hirakawa, "Bloch Gain in AlGaAs/GaAs Semiconductor Superlattices", *Physica E*, **21**, 858 - 862 (2004)
 32. Y. Shimada, N. Sekine, and K. Hirakawa, "Inter-miniband Resonant Zener Tunneling in Wide-Miniband GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As Superlattices Investigated by THz Emission Spectroscopy", *Physica E*, **21**, 661-665 (2004)
 33. M. Jung and K. Hirakawa, "Lateral electron transport through single InAs quantum dots", *Physica E*, **21**, 423 - 425 (2004)
 34. Y. Shimada, N. Sekine, and K. Hirakawa, "THz emission due to inter-miniband resonant Zener tunneling in wide-miniband GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As superlattices", *Applied Physics Letters*, **84**(24), 4926-4928 (2004)
 35. M. Jung, K. Hirakawa, Y. Kawaguchi, S. Komiyama, S. Ishida and Y. Arakawa "Lateral electron transport through single self-assembled InAs quantum dots" *Applied Physics Letters*, **86**(3)33106(1-3) (2005)
 36. S. Komiyama, T.Machida, K.Ikushima "Manipulating nuclear spins via quantum Hall edge channels" "Physics of Semiconductors" Proc. of the 27th Int. Conf. on the Physics of Semiconductors (ICPS 27) , **772**, Part A 505-508 (2005)
 37. K. Ikushima, H. Sakuma, S. Komiyama, K. Hirakawa "Imaging non-equilibrium edge states in quantum Hall conductors" "Physics of Semiconductors" Proc. of the 27th Int. Conf. on the Physics of Semiconductors (ICPS 27), **772**, Part A 569 (2005)
 - 38. Zhenghua An, Jeng-Chung Chen, T.Ueda, S.Komiyama "Infrared phototransistor using capacitively coupled two-dimensional electron gas layers" *Applied Physics Letters*, **86**, 172106 (2005)
 39. M. Jung, K. Hirakawa, Y. Kawaguchi, S. Komiyama, S. Ishida, Y. Arakawa "Lateral electron transport through single self-assembled InAs quantum dots" *Applied Physics Letters*, **86**, 033106 (2005)
 40. M. Jung, K. Hirakawa, S. Ishida, Y. Arakawa, Y. Kawaguchi, S. Komiyama "Shell Structures in Self-Assembled InAs Quantum Dots Observed by Lateral Single Electron Tunneling Structures" "Physics of Semiconductors" Proc. of the 27th Int. Conf. on the Physics of Semiconductors (ICPS 27) , **772**, Part A 635-636 (2005)
 41. N. Sekine, Y. Shimada, and K. Hirakawa, "Ultrafast carrier dynamics in semiconductor superlattices: terahertz gain and dephasing mechanism (invited paper)", *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5725**, 352 (2005)
 42. S.-W. Lee, C. J. Park, T. W. Kang, H. Y. Cho, and K. Hirakawa, "Photoconductivity in lateral conduction self-assembled Ge/Si quantum dot infrared photodetectors ", *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5726**, p. 146 (2005)
 43. M. Jung, N. Sekine, K. Hirakawa, S. Ishida, Y. Arakawa, Y. Kawaguchi, and S. Komiyama, "Single electron transistors using single self-assembled InAs quantum

- dots", *Inst. Phys. Conf. Ser.*, No. **184**, Section 1, pp. 31-34 (2005)
44. M. Jung, T. Machida, K. Hirakawa, S. Komiyama, T. Nakaoka, S. Ishida, and Y. Arakawa, "Shell structures in self-assembled InAs quantum dots probed by lateral electron tunneling structures", *Applied Physics Letters*, vol. **87**(20), pp. 203109-1~3 (2005)
 45. N. Sekine and K. Hirakawa, "Acceleration Dynamics of Bloch Oscillating Electrons in Semiconductor Superlattices Investigated by Terahertz Electro-optic Sampling Method", *AIP Conference Proceeding*, vol. **772**, p. 1224 (2005).
 46. A. Umeno and K. Hirakawa, "Fabrication Of Atomic-scale Gold Junctions By Electrochemical Plating Technique Using A Common Medical Disinfectant", *AIP Conference Proceeding*, vol. **772**, 1071 (2005)
 47. A. Vojvodic, A. Blom, Zhongshui Ma, Y. Shimada, K. Hirakawa, and K. A. Chao, "Zener tunneling between Wannier{Stark levels in GaAs/AlGaAs superlattices", *Solid State Communication*, **136**, 580-584 (2005)
 48. A. Umeno and K. Hirakawa, "Fabrication of atomic-scale gold junctions by electrochemical plating using a common medical liquid", *Applied Physics Letters*, **84**(14), 143103-1~3 (2005)
 49. N. Sekine and K. Hirakawa, "Dispersive terahertz gain of non-classical oscillator: Bloch oscillation in semiconductor superlattices", *Physical Review Letters*, **94**(5), 057408 (2005)
 50. H. Sakuma, K. Ikushima, S. Komiyama, K. Hirakawa "Spectral measurement of weak THz waves with quantum Hall detectors, *Infrared Physics & Technology*" in Press, **48**, 235-239 (2006)
 51. H. Hashiba, V. Antonov, L. Kulik, A. Tzalenchuk, P. Kleinschmid, S. Giblin, S. Komiyama, "Isolated quantum dot in application to terahertz photon counting", *Phys. Rev. B* **73**, 081310 (2006)
 52. S. Komiyama, H. Sakuma, K. Ikushima, K. Hirakawa "Electron temperature of hot spots in quantum Hall devices" *Phys. Rev. B* **73**, 045333(1-5) (2006)
 53. M. Jung, T. Machida, and K. Hirakawa, S. Komiyama, T. Nakaoka, S. Ishida, Y. Arakawa "Shell structures in self-assembled InAs quantum dots probed by lateral electron tunneling structures" *Appl. Phys. Lett.* **87**, 203109 (2005)
 54. Jeng-Chung Chen, Zhenghua An, T. Ueda, S. Komiyama, V. Antonov "Meta-stable excited states in closed QD" *Physical Review B*, **74**, 45321 (2006)
 55. H. Hashiba, V. Antonov, L. Kulik, A. Tzalenchuk, P. Kleinschmid, S. Giblin, S. Komiyama "Isolated quantum dot in application to terahertz photon counting" *Phys. Rev. B*, **73**, 081310(1-4) (2006)
 - 56. K. Ikushima, Y. Yoshimura, T. Hasegawa, S. Komiyama, T. Ueda, K. Hirakawa "Photon counting microscopy of terahertz radiation" accepted for publication in *Appl. Phys. Lett.* **88**, 152110 (2006)
 57. Zhenghua An, Jeng-Chung Chen, T. Ueda, S. Komiyama "A sensitive double quantum well mid-infrared phototransistor" *J. Applied Physics*, **100**, 044509, (2006)
 58. Jeng-Chung Chen, Zheng An, T. Ueda, S. Komiyama, V. Antonov "Meta-stable excited states in closed QD" *Physical Review B* **74**, 45321 (2006)
 59. H. Sakuma, K. Ikushima, S. Komiyama and K. Hirakawa "Spectroscopy of non-equilibrium electrons in Quantum Hall Conductors" *Physica E LOW-DIMENSIONAL SYSTEMS & NANOSTRUCTURES*, **34**(1-2), 168-171, (2006)
 60. K. Ikushima, H. Sakuma, Y. Yoshimura, S. Komiyama, T. Ueda and K. Hirakawa "THz imaging of cyclotron emission in quantum Hall conductors" *Physica E LOW-DIMENSIONAL SYSTEMS & NANOSTRUCTURES*, **34** (1-2), 22-26 (2006)
 61. H. Hashiba B. Das, JT Nicholls, V. Antonov, L. Kulik, S. Komiyama "A quantum dot as a sensitive terahertz detector" *Physica E LOW-DIMENSIONAL SYSTEMS & NANOSTRUCTURES*, **34**(1-2), 644-646 (2006)

62. P. Kleinschmidt, S. Giblin, A. Tzalenchuk, H. Hashiba, V. Antonov, S. Komiyama "Sensitive detector for a passive terahertz imager" J. Applied Physics, **99** (11), 114504 (2006)
63. M. Jung, K. Hirakawa, S. Ishida, Y. Arakawa, S. Komiyama "Electron transport and shell structures of single InAs quantum dots probed by nanogap electrodes" Physica E LOW-DIMENSIONAL SYSTEMS & NANOSTRUCTURES, **32** (1-2), 187-190 (2006)
64. K. Ikushima, S. Watanuki, S. Komiyama "Detection of acoustically induced electromagnetic radiation" Appl. Phys. Lett., **89**, 194103, (2006)
65. T. Unuma, N. Sekine, and K. Hirakawa, "Dephasing of Bloch oscillating electrons in GaAs-based superlattices due to interface roughness scattering", Applied Physics Letters, **89**(16), 161913-1~3 (2006)
66. Yu.A. Tarakanov, M. A. Odnoblyudov, K. A. Chao, N. Sekine, and K. Hirakawa, "Scattering-assisted terahertz gain in semiconductor superlattices", Physical Review B, **74**(12), 125321-1~8 (2006)
67. P. Han, K.-J. Jin, Y.-L. Zhou, Q.-L. Zhou, and K. Hirakawa, "Terahertz radiation in superlattices in moderate electric field", International Journal of Modern Physics B, **20**(8), 937-945 (2006)
68. K. Hirakawa and N. Sekine, "Carrier dynamics and dispersive terahertz Bloch gain in semiconductor superlattices (invited)", Physica E, **32**, 320-324 (2006)
69. S.-W. Lee and K. Hirakawa, "Lateral conduction quantum dot infrared photodetectors using photoionization of holes in InAs quantum dots", Nanotechnology, **17**(15), 3866-3868 (2006)
70. Zhenghua An, T. Ueda, S. Komiyama, & K. Hirakawa "Metastable excited states of a closed quantum dot with high sensitivity to infrared photons" Phys. Rev. B, **75** 085417(1-7p) (2007)
- 71. Zhenghua An, T. Ueda, K. Hirakawa & S. Komiyama, "Reset Operation of Quantum Well Infrared Phototransistors" in press, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement (2007)
72. M. Gel, T. Ishida, T. Akasaka, A. Umeno, K. Araki, K. Hirakawa, and H. Fujita, "Mechanically Controlled Quantum Contact With On-Chip MEMS Actuator", Journal of Microelectromechanical Systems, **16**(1), 1~6 (2007)
73. K. Shibata, M. Jung, K. Hirakawa, T. Machida, and H. Sakaki, S. Ishida and Y. Arakawa, "Electronic properties of self-assembled InAs quantum dots on GaAs surfaces probed by lateral electron tunneling structures", Journal of Crystal Growth, in press. (2007)

(邦文論文)

1. 小宮山進, Oleg Astafiev, 久津輪武史 "量子ドットを用いた超高感度テラヘルツ電磁波検出" レーザー研究, **30**(7), 385-390 (2002)
2. 小宮山 進 "遠赤外単一光子検出" パリティブックス「メゾスコピック村のアリス」, 37-50 (2003)
3. 小宮山進, オレグアスタフィエフ "量子ドットを用いた遠赤外単一光子検出" 日本赤外線学会誌 (J.Jpn.Soc.Infrared Science & Technology) **12**(2), 24-32 (2003)
4. 小宮山進 "量子ドット遠赤外検出器" 光学, **33**(11), 654-656 (2004)
5. 関根徳彦、島田洋蔵、平川一彦, "半導体超格子のブロッホゲイン", 固体物理, **39**(2), 25-36 (2004)
6. 小宮山進 "単一光子検出" 岩波「科学」, **75**, 301-303 (2005)
7. 平川一彦、関根徳彦, "テラヘルツ電磁波で見る半導体中の電子波束の超高速ダイナミクス", 光学, **34**(9), pp. 458-464 (2005)
8. 生嶋健司 "量子ホール素子からの光を見る" パリティ, **20**(9), 51-56 (2005)
9. 小宮山進 "テラヘルツ光子検出と極微弱光イメージング" 応用物理, 特集記事

- 「テラヘルツ波技術最前線」, 75(2), 171-178 (2006)
10. 小宮山進, 生嶋健司, 佐久間寿人 “テラヘルツ領域の新しい単一光子計測技術—単一光子顕微鏡システムの実現に向けて—” 生物物理, 46(1), 41-45 (2006)
 11. 生嶋健司, 長谷川琢真, 小宮山進, 佐久間寿人, 上田剛慈, 平川一彦 “量子ドットTHz光子検出器とそのイメージング応用” 信学技報(IEICE Technical Report), 105, ED2005-239 (2006)
 12. 上田剛慈, Zhenghua An, Jeng-Chung Chen, 小宮山進, 平川一彦 “キャリアライフタイム制御可能な高感度中赤外光子検出器” 信学技報(IEICE Technical Report), 105 D2005-240 (2006)
 13. 平川一彦, 関根徳彦, 島田洋蔵, “半導体超格子のブロッホ振動：非古典的振動子のテラヘルツ利得”, 応用物理, 75(6), 0702-0706 (2006)

(2)口頭発表

①学会

国内 96 件, 海外 134 件

②その他

国内 4 件, 海外 件

(3)特許出願（本研究に係わり、JST から出願したものと研究機関から出願したもの）

出願元	国内（件数）	海外（件数）
JST	8	3
研究機関		
計	8	3

(4)その他特記事項

プレス発表 2006/4/7 科学技術振興機構報 第278号

「世界初！テラヘルツ波の光の粒を捕らえて画像化することに成功（生体分子・細胞における生命活動の観察への応用に期待）」

報道： 2006 年 4 月 日刊工業新聞、化学工業新聞

Physics News Update (AIP);, Number 778 #2 “Counting Terahertz Photons”
<http://www.aip.org/pnu/2006/split/778-2.html> 2006

Physics Today 誌 SEARCH AND DISCOVERY :

2006/5/26 Physics Today 59 p.19(2006),

Physics Update “Counting Terahertz Photons”

9. 結び

赤外—ミリ波の広い波長領域にまたがって、単一光子検出可能な検出器を複数開発するという欲張った目標はほぼ完全に達成できた。特に、波長 1.4 ミクロンに対する二重量子井戸検出器(DQW)は素子構造の単純さや扱い易さ等々の優れた特徴を有しており、異なる波長の素子設計も容易であることから、当初期待以上の検出器として今後各方面に应用が広がると思われる。その端緒として、研究開始時には予定していなかったアレー検出器作成に進んだ。顕微鏡開発に関しては、スロットアンテナや AFM 深針を用いた近接場技術の導入の試みを十分行うことが出来なかったのは残念だが、検出器開拓に努力を集中した結果であり仕方がないかも知れない。方針は間違っていなかったと思う。

本研究で目指した赤外-サブミリ波の超高感度受動計測による物質・生体の新たな計測手法の重要性は、国の内外でほとんどまだ省みられていない。その理由は、計測を現実にかえることが出来る超高感度の検出器が存在しなかったためと思われる。本研究で検出器が揃ったため、今後、数年でその方向性が世の中に芽生えて来ることを期待しているが、その端緒を切り開くことが出来たのではないかと考えている。

研究代表者としてプロジェクト運営を振り返ると、CREST 終了後数ヶ月のブランクがあったために SORST 開始時に主力の博士研究員が抜けてしまった事を思い出す。そのため新たな研究員の募集から始めて、SORST 研究を全く新しいメンバーで再スタートした。新たに雇用した外国人研究員 3 のうち 2 人は既に母国の一流大学にパーマネント研究員および助教授として採用されて去り、1 人は London 大学に博士研究員として移って共同研究を続けている。日本人研究員のべ 4 名のうち東大の助手に採用された者と企業に就職した者が各 1 名、残り 2 名が現在研究を継続している。MBE のメンテナンスのために技術員を新たに SORST で雇用したが、本人は満足して仕事をしており、研究の地固めとして大変重要だった。全体を通して、若手も順調に育ったと考えている。