

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H00875

研究課題名(和文)熱放射に代わる新原理赤外光源 - 共鳴量子アンテナ光源 - の開発

研究課題名(英文)Development of novel infrared emitters: resonant antenna emitters

研究代表者

宮崎 英樹 (Miyazaki, Hideki)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・グループリーダー

研究者番号：10262114

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,700,000円

研究成果の概要(和文)：波長3～10 μm の中赤外域はLEDが原理的に低効率なため、今なお熱放射光源の独壇場である。本研究では熱放射を超える発光強度を実現しうる加熱不要な新原理光源として、共鳴量子アンテナ光源を提案した。これは量子井戸の共鳴準位により巨大電流を透過する共鳴トンネル構造を金属/誘電体/金属型光アンテナに挟み込んだ構造である。熱放射との完全分離のために試料を3Kまで冷却し、帯域3～5 μm に注目して様々な共鳴トンネル構造について調べた結果、共鳴電流に対応した発光ピークに加えて、非共鳴電流に対応した発光も観測された。共鳴発光は光学フォノン散乱の低減効果により、共鳴トンネル電子の飛行距離が短いほど増大した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

共鳴トンネル構造は1980年代に盛んに研究されたが、当時はこれを光アンテナと結び付け、発光素子として利用する構想はなかった。その後、プラズモン共鳴を人工的に顕著に発現させる光アンテナの開発が進み、本研究にて、共鳴トンネル構造の弾道電子による発光を初めて調べることができた。発光には共鳴電流だけでなく非共鳴電流も寄与すること、弾道電子の飛行距離が短いほど共鳴電流発光が顕著であること、場合によっては非共鳴電流による発光だけが観測されることなど、未解明の現象を含めて多彩な現象を観測することができた。これらの結果は、電子波も光波も制御するメタ表面デバイスの可能性を示唆している。

研究成果の概要(英文)：The dominant light source at the mid-infrared region from 3 to 10 microns remains classical thermal emitters, because of a poor energy efficiency of LEDs which is theoretically limited. In this work, we proposed resonant quantum antenna emitters as non-thermal high-intensity emitters based on a novel principle. A resonant quantum antenna emitter is made of a resonant tunneling structure, in which a giant current can flow through a resonant energy level in a quantum well between two barriers, incorporated into a metal-insulator-metal optical antenna. For perfect separation of thermal emission, the specimen was cooled down to 3 K, and infrared emission from 3 to 5 microns were measured for numbers of resonant tunneling structures. We observed emission corresponding to non-resonant current, in addition to emission peak due to resonant tunneling current. Resonant emission increased for shorter path length of resonant tunneling electrons by the reduction of optical phonon scattering.

研究分野：メタマテリアル

キーワード：メタマテリアル 光アンテナ トンネル発光 赤外光源

1. 研究開始当初の背景

波長 3~10 μm の中赤外域は、可視域では姿を消した熱放射光源の独壇場であり、100 年間本質的に進歩していない。開発の盛んな量子カスケードレーザは今なお高価で応用は限られる。問題の本質は、紫外~近赤外域の主力光源である発光ダイオード (LED) の効率が、中赤外域では原理的に極めて低いことにある。これは原理的な限界に起因している。LED の効率を表す自然放出遷移確率は周波数の 3 乗に比例する。周波数が可視域の 1/10 の中赤外域での効率は 2~3 桁低くなる。これに対し、プランク則に従う熱放射は 1000 $^{\circ}\text{C}$ 以下では可視域より中赤外域の方が高輝度で、中赤外域では熱放射が原理的に高効率である。しかし、熱放射は材料を高温にさらす必要があり、高速な応答が難しい。そのため、中赤外域で可視域の LED に相当する新原理単色光源の登場が待望されている。

本研究では、量子井戸の共鳴準位により巨大電流を透過する共鳴トンネル構造を光アンテナ構造に挟み込んだ「共鳴量子アンテナ光源」を開発し、熱放射光源を代替できるかを問う。発光の起源は負性抵抗ではなく、共鳴トンネル構造の高い電子透過率と長い相互作用時間である。申請者は光アンテナを用いた熱放射光源や量子検出器の開発を通じて、輻射場系・電子系双方の共鳴の利用が、非加熱の実用的な中赤外単色固体光源実現の鍵になると着想した。

2. 研究の目的

金属/誘電体/金属 (MIM) 型の光アンテナ (プラズモン共振器) の発光方法には 3 つある (図 1)。(i) 熱放射: アンテナを加熱すると、電子のランダムな運動がアンテナの共鳴を誘起し、単色光を放射する。(ii) 電子ビーム発光 (カソードルミネッセンス): 電子顕微鏡によりアンテナの適切な位置に電子ビームを局所照射すると、共鳴波長の単色光が放射される。(iii) トンネル電流発光: 数 nm の極薄絶縁体層で隔てたアンテナ電極間にバイアス電圧を印加すると、微弱なトンネル電流で単色発光する現象が報告されている [1]。本研究では、総厚さ数 100 nm の共鳴トンネル構造を、Au 基板と

Au ストライプ (またはパッチ) で挟んで光アンテナを形成し、トンネル電流で励起されたプラズモン共鳴により垂直方法にその共鳴波長の中赤外光を放射するメタマテリアル中赤外検出器を実現する。

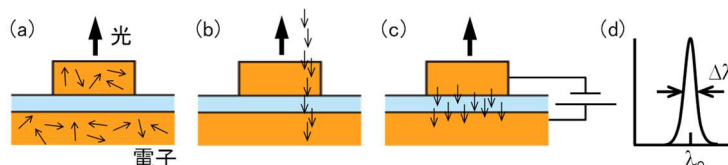


図 1 光アンテナの主な発光原理。(a) 熱放射、(b) 電子ビーム発光、(c) トンネル電流発光、(d) 典型的な発光スペクトル

提案する共鳴トンネル光源の全体像を図 2 に示す。上下を Au で挟まれた共鳴トンネルダイオード (RTD) のストライプがサブ波長周期で配列したメタ表面である。アンテナの寸法を適切に

選べば、x 偏光した特定の波長の入射光を完全吸収するように設計できる。その逆過程として、電流励起されたプラズモン共鳴により垂直方法に x 偏光の光を放射する。こうして、中赤外域にて、短波長域での

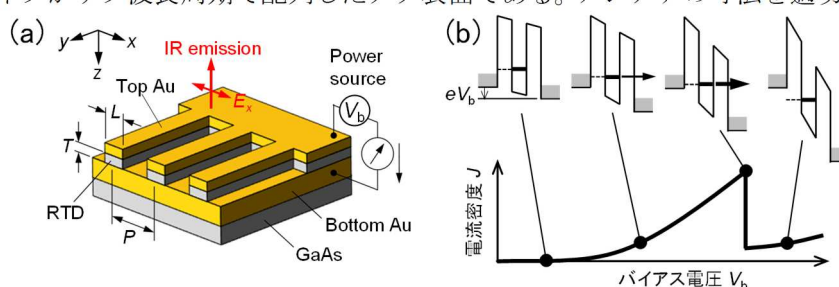


図 2 (a) 提案する共鳴量子アンテナ光源、(b) 共鳴トンネルダイオードの素子特性

LED に相当する単色性の光を電流励起により発生することを目標とする。

従来、同様の光アンテナ構造は熱放射光源に多用されてきた。我々自身、過去 10 年以上その開発に携わってきた。しかし、ナノ構造は容易に熱で崩れるため動作温度は制限され、最大強度も制約される。熱応答は本来緩慢である上に光アンテナにより熱が狭い波長域でしか逃げなくなるため、冷却はさらに遅くなり、変調速度は光アンテナの適用によりむしろ遅くなる。

ここで、熱放射とトンネル発光の発光強度を理論的に比較してみる。図 1 (d) において $\lambda_0 = 4 \mu\text{m}$ 、 $\Delta \lambda = 1 \mu\text{m}$ の典型的な光アンテナからの発光を考える。熱放射は単純にプランク則により単位面積あたりの発光量 (時間あたりフォトン数) が与えられる。仮に理想的な耐熱性を持つプラズモン材料が実現したとして、温度 3000 K で動作させることを考えると、発光量は $3.2 \times 10^{20} \text{ ph/cm}^2/\text{s}$ となる。しかしこれほどの高温に耐えるナノ構造は考えにくく、これが原理的な限界と言える。一方、共鳴トンネルダイオード [図 2 (b)] で典型的な電流密度 1 kA/cm^2 の単位面積あたり、時間あたり電子数は $6.2 \times 10^{21} \text{ el/cm}^2/\text{s}$ である。仮に量子効率 5% でトンネル電子を光子に変換できれば、トンネル発光が熱放射を原理的に超えることになる。実際には熱放射はずっと低い温度に留まり、一方、共鳴トンネル電流密度はそれよりさらに 2 桁大きな 100 kA/cm^2 くらいまで一般的であることから、トンネル電子の発光変換効率が数桁低くても、トンネル発光

が優位となる可能性が高い。

単一障壁のトンネル発光時の電流密度は典型的に $10^{-5} \sim 10^{-2} \text{ kA/cm}^2$ ($10^{17} \sim 10^{20} \text{ el/cm}^2/\text{s}$) に過ぎない[1]。従って、熱放射に代替可能な発光強度を得るには二重障壁が必須である。本来、トンネル発光は運動量保存則を満たさない。それが極薄絶縁体層中での運動量保存則の緩和によりわずかに許容された効率の低い現象である。その電流密度が数桁増大することに加え、共鳴トンネル現象では電子にも共鳴準位を導入して相互作用可能なトンネル寿命を fs から ps に増大し、遷移確率をさらに数桁高める効果があると期待される。

3. 研究の方法

RTD を光アンテナに組み込むために、**図 3** の工程を用いた。これは先行して行ったメタ表面量子井戸赤外検出器の開発のために確立した工程で、今回は量子井戸赤外検出器 (QWIP) の代わりに RTD を用いれば、そのまま検出器の代わりに光源になる。

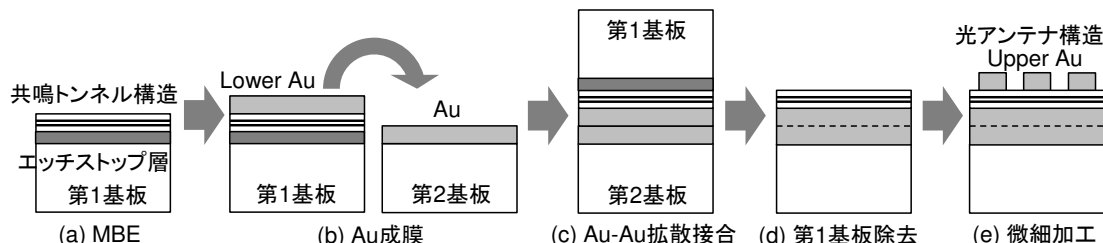


図 3 共鳴量子アンテナ光源の作製工程

電磁波を制御するプラズモニクス、そのための数値計算、RTD を実現するエピタキシャル成長技術、その設計技術、全体の理論的検討が必要な学際的な研究であるので、プラズモニクスを専門とする研究代表者が、半導体量子ナノ構造の MBE 成長や理論を専門とする研究分担者と共同で、ナノ加工や光学評価などのスキルを持つ研究協力者を適宜雇用し、共同利用設備を利用して推進した。また、アンテナ構造の最適化においては、適宜挟み込む量子ナノ構造を QWIP と入れ替え、既に確立している赤外検出器を題材としてその特性検証を進めた。

4. 研究成果

(1) 光アンテナの開発

既に手法が確立していたことから、まずは**図 4** に示す多様な光アンテナ構造の開発を進めた。

基本は x 偏光だけに応答するストライプか偏光依存性のないパッチアンテナで、半導体部分をそのまま残す連続型か除去する分断型かの選択肢がある。分断型パッチアンテナの個々のアンテナの共鳴を乱さずに電流を供給できるよう、共鳴波長に合わせて適切な形状、長さに調整した導線でアンテナ間を接続した位相同調アンテナは本研究独自の構造で、特許出願・プレス発表を行った。さらにフォトンソーティング現象の検証のため、2 波長、4 波長アンテナも動作検証した。

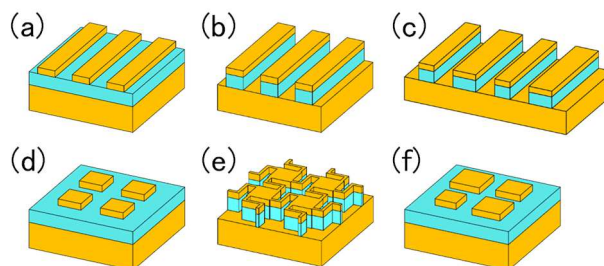


図 4 種々のプラズモン共振器。(a) 連続型ストライプ、(b) 分断型ストライプ、(c) 2 波長型ストライプ、(d) 連続型パッチアンテナ、(e) 位相同調型パッチアンテナ、(f) 4 波長型パッチアンテナ。

(2) 共鳴トンネル構造(RTD)の開発

RTD の材料系には GaAs/AlGaAs を選び、その発光特性の検証には最も基本となる連続型ストライプアンテナを用いた。**図 5** に試料の基本形態を示す。共鳴バイアス電圧とプラズモン励起エネルギーの関係は自明ではないので、2~12 μm の範囲で共鳴波長の異なる多数のアンテナを作り、相互比較した。本研究で最も苦勞し、時間を要したのが RTD の設計であった。これまで検出器設計に利用してきたポアソン方程式とシュレジンガー方程式の連立解法では、バイアス電圧を印加し、大きな電流が流れる非平衡状態を扱うことができなかつた。そこで、バイアス印加により共鳴的なトンネル電流が流れる状況も計算できる非平衡

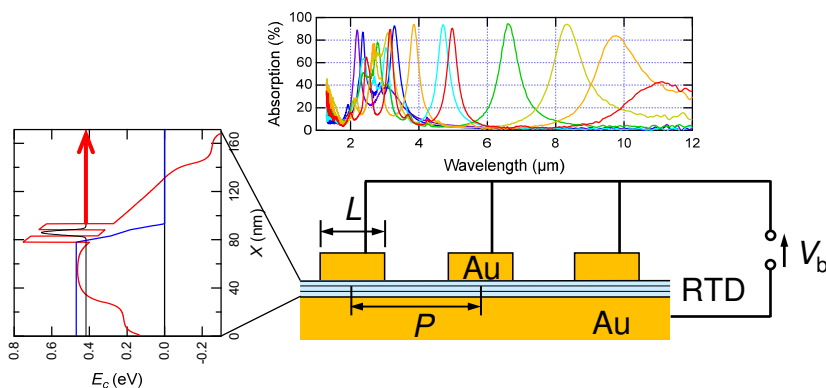


図 5 代表的な試料。RTD のバンド図、ストライプ共振器の反射スペクトル

グリーン関数 (NEGF) 法による数値計算を新たに導入した。しかし、商業的に入手可能なプログラムは、量子カスケードレーザのような周期系に特化して開発されており、本研究のような共鳴トンネル構造が1個だけ存在する有限系には機能が不十分であった。最終的にメーカーから専用の評価版プログラムの提供を受けたが、今なお、バンド図と共鳴電流の両方について信頼できる結果は得られていない (図 6)。

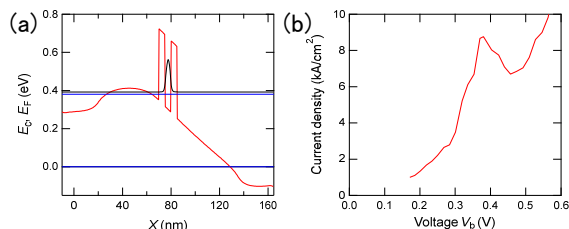


図 6 RTD の NEGF 計算による共鳴特性

共鳴時には大密度の電流が流れるため配線の抵抗による電圧降下や、測定系自体の限界が問題となる。そこで、素子サイズは $80\sim 160\ \mu\text{m}$ 角と小さく抑え、ピーク電流密度もおおよそ $1\ \text{kA}/\text{cm}^2$ になる程度にバリア厚さを制限した。

(3) 評価光学系の開発

はじめに予備的に室温での発光を測定したところ、共鳴トンネルの起きている電圧において赤外光が放射され、その波長が光アンテナの共鳴波長に合致していることを確認した。しかし、どの波長に合わせた光アンテナでも同様に発光することから、観察しているのは共鳴トンネル電流によるジュール熱による熱放射を観測しているものと判断された。そこで $3\ \text{K}$ まで冷却可能な GM 式クライオスタットを導入し、 $3\ \text{K}$ で熱放射を完全に除外した純粋なトンネル電流発光だけを観測できる環境を整えた。発光計測にはフーリエ変換赤外分光光度計 (FTIR) を用いるべく 4 年の期間を通じて光学系の改良を続けたが、電流密度の制限から素子サイズを微小化せざるを得なかったため、最終的に微弱な共鳴トンネル電流発光のスペクトルを FTIR で記録するには至らなかった。代わりに 78K への冷却により高感度な最高グレードの InSb カメラを用いて画像として発光を計測した。このカメラの波長帯域は $3\sim 5\ \mu\text{m}$ であり、その領域の積分発光強度を観測したことになる。これは $3\ \text{K}$ であっても明瞭に観測することができ、さらに、適宜バンドパスフィルタや偏光子を挿入してより詳細な情報を得ることができた。

(4) 発光特性の基本的検証

計測帯域 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ にピーク波長が収まるか否かにかかわらず、全素子について $3\ \text{K}$ にて電圧をスキャンし、共鳴トンネル効果が起こる時の発光輝度の変化を調べた。その結果、本研究を通じて作製したすべての素子で電圧に対応した赤外発光を観測できた。発光は計測帯域 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ にピーク波長が収まる素子で顕著であったが、それ以外の素子でも $1/5$ 程度の発光量で、これは発光の裾や高次ピークが計測帯域に収まっていたものと思われる。予想外であったのが、共鳴トンネルに対応するコヒーレント電子のピーク以外の、インコヒーレント電子と言われるバックグラウンド電流 (非共鳴電流) に対応する発光が無視できない大きさであったことである。しかし、素子温度は $3\ \text{K}$ に冷却していることから、この発光は熱放射ではない。共鳴、非共鳴にかかわらず、光アンテナの電極間を通過する電子はいずれも発光に寄与していることになる。発光は x 方向に直線偏光しており、確かに光アンテナから放射されているプラズモン共鳴によるものであり、RTD から直接放射されているものではない。従って、RTD 単独では観測できず、RTD と光アンテナの組み合わせにより初めて観測可能となる発光である。

(5) RTD シミュレーションに基づいた構造の改良

RTD 構造を通過した電子は GaAs バルク結晶の中をあたかも有効質量を持って真空中を飛行するかのよう振る舞う弾道電子であると表現される[2]。ところが、様々な散乱過程を取り込んだ NEGF 法では、その電流は一定ではなく減衰していく。それは主に光学フォノン散乱のためである。本研究で出発点としたのは Brown らの構造[3]であるが、その初期構造は弾道電子の飛行行程が $78\ \text{nm}$ の設計であった。ここに LO フォノン散乱の散乱頻度 ($\sim 10^{13}\ \text{s}^{-1}$) を考慮すると、そのままのエネルギーを保ってアンテナ下流電極に達するときには電子は 4×10^{-4} にまで減衰している。これではコヒーレントな共鳴トンネル電子による発光は期待できない。そこで、本研究では RTD を非対称化し、弾道電子の飛行距離の短縮を追求した。これは単に GaAs 層を薄くすればよいという単純な問題ではなく、GaAs と Au の界面の Ohmic 特性を維持したまま厚さを低減するには精密な設計が必要である。我々はこれまでに本来 Ohmic のためには合金 (アロイ) 化が不可欠とされている GaAs/Au 界面をノンアロイで Ohmic 化する独自のドーピング方法を明らかにし、本研究の構造でも Au との接合部 (コンタクト層) に用いている[4]。これをさらに改良することで総厚さを短縮し、最終的には飛行距離 $20\ \text{nm}$ の構造を実現した。

(6) 代表的な発光特性

得られた数多くの結果は複雑で混沌としており、本研究の範囲内では共鳴トンネル効果によるプラズモン発光現象の明快な理解には至っていない。ここでは代表的な 4 つの結果に絞って、比較しつつ示していく。

代表的な系として、 $x = 0.42$ 、厚さ $5\ \text{nm}$ の AlGaAs バリア層と厚さ $5\ \text{nm}$ の量子井戸からなり、それらを $2\times 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$ の低ドーピング GaAs で挟んだ Brown らの RTD を選んだ。両側のコンタクト層を含んだ総厚さ $171\ \text{nm}$ は共通とし、その中央に RTD を配置した RTD-A と右端に配置した RTD-B を比較する。RTD から右 (下流) 電極までの距離はそれぞれ $78\ \text{nm}$ 、 $20\ \text{nm}$ である。右側の厚い低ドーピング領域が空乏化し、大きな電圧降下を示すため、RTD-A の方が高いバイアス電圧で共鳴を示す。共鳴トンネル効果では、よく知られているように、RTD 以外の部分の

抵抗のために電流電圧特性には顕著なヒステリシスが現れる。従って電圧の掃引方向によって共鳴バイアス電圧・電流は異なるが、ここでは正方向スキャンについてのみ議論する。

図7には計測帯域中に共鳴ピークが収まる等価素子 [図7(a)] について、両者のバンド図 [図7(b), (e)]、電圧に対する発光強度 [図7(c), (f)、カメラ輝度]、電圧に対する消費電力 [図7(d), (g)、電流と電圧から算出] を示す。IV 特性から観察される共鳴トンネルピークは消費電力に現れるが、それと同時に発光ピークが見られる。しかし赤丸で示した共鳴トンネル電流による発光ステップはRTD-Bの方が大きい。それぞれの消費電力と比べても、RTD-Aは発光ピークの方がコントラストが低く、RTD-Bは電力以上に高コントラストで発光ピークが現れている。これは弾道電子飛行距離の短縮により、弾道電子が減衰せずに電極に到達したためと考えられる。しかしこのピーク以外の非共鳴電流による発光が相当の大きさであることも重要である。

本研究で遭遇した最も興味深い現象を図8に示す。これは計測帯域中に共鳴ピークがほとんど収まっていない(短波長側にピークが半分かかっているが、共鳴自体が弱く、また短波長側は計測感度が低い)等価素子 [図8(a)] についての同様のデータである。消費電力はいずれも共鳴時にピークを示しているにも関わらず、飛行距離の長いRTD-Aでは共鳴が弱いどころか、ちょうど共鳴成分を除外したような非共鳴電流成分に対応した発光だけが観測されている。光学フォノン散乱による共鳴トンネル電流の減衰の大きさを示すものとも理解できるが、図7ではRTD-Aの共鳴はこれほどの減衰ではなかったこと、非共鳴電流成分だけは変わりなく発光を生じていることなど、多くの理解できない点がある。作製した試料の内、複数の素子が同様の特性を示したが、本研究の期間中にどのようなケースでこのような発光特性になるのか、その法則性を解明することはできなかった。

(7) 総括

本研究に先立ち開発した赤外検出器では、量子井戸の微弱な検出特性を光アンテナにより800倍増強でき、その特性は量子井戸単体についても、光アンテナの効果についても、それぞれシュレジンガー方程式、マックスウェル方程式により非常に正確に予測できた。本研究も、その時と同様に量子井戸と光アンテナの融合により実用的な光源を実現することを目指して開始したが、観察された現象は予想外に複雑で、前例のないものばかりであった。RTD自体、1980年代に研究され尽くしたと思われるが、共鳴電流・非共鳴電流の関係など、必ずしも明確に議論されないまま今に至っている側面も多い。当時RTD単体では観測できなかった現象が、本研究で、量子井戸と光アンテナを融合したからこそ初めて観測できるようになったものと思われる。RTDのような単純な半導体ナノ構造において、手付かずで未解明の領域が今なお大きく広がっていることを確認できたことが本研究の最大の成果かもしれない。研究期間中に解明できなかった多くの課題は、今後も継続して研究を進めて行く。

参考文献

- [1] M. Parzefall *et al.*, Nature Nanotechnol. **10**, 1058 (2015).
- [2] M. Heiblum *et al.*, Phys. Rev. Lett. **55**, 2200 (1985).
- [3] E. R. Brown, VLSI Electronics Microstructure Science **24**, 305 (1994).
- [4] T. Mano *et al.*, ACS Omega **4**, 7300 (2019).

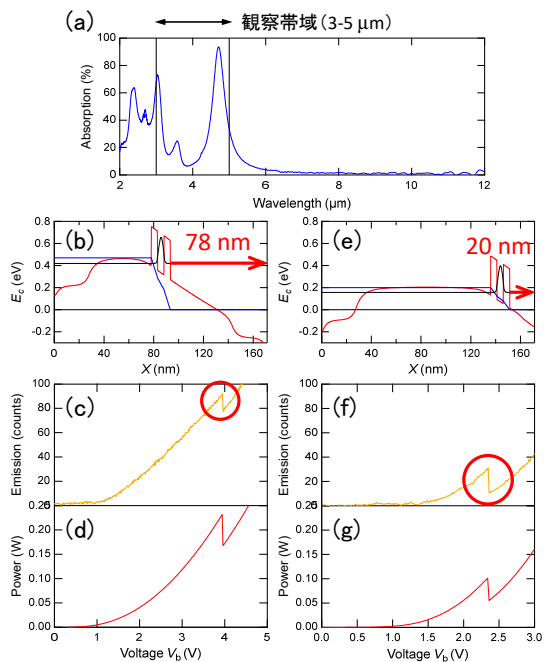


図7 弾道電子飛行距離の短縮による共鳴トンネル発光の増大

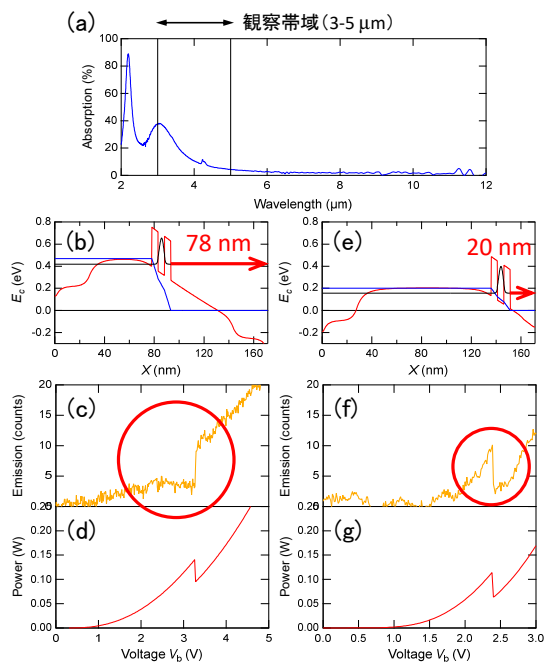


図8 弾道電子飛行距離の長距離化により観察された非共鳴電流による発光

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Hailey Mel F., Mano Takaaki, Kasaya Takeshi, Jimba Yoji, Miyazaki Hiroshi, Ochiai Tetsuyuki, Osato Hiroataka, Sugimoto Yoshimasa, Kawazu Takuya, Shigetou Akitsu, Miyazaki Hideki T.	4. 巻 29
2. 論文標題 Breaking the interband detectivity limit with metasurface multi-quantum-well infrared photodetectors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 43598 ~ 43598
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.444223	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hailey Mel F., Mano Takaaki, Kasaya Takeshi, Ochiai Tetsuyuki, Osato Hiroataka, Watanabe Kazuhiro, Sugimoto Yoshimasa, Kawazu Takuya, Arai Yukinaga, Shigetou Akitsu, Miyazaki Hideki T.	4. 巻 9
2. 論文標題 Systematic studies for improving device performance of quantum well infrared stripe photodetectors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nanophotonics	6. 最初と最後の頁 3373 ~ 3384
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1515/nanoph-2020-0095	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hailey Mel F., Mano Takaaki, Kasaya Takeshi, Ochiai Tetsuyuki, Osato Hiroataka, Watanabe Kazuhiro, Sugimoto Yoshimasa, Kawazu Takuya, Arai Yukinaga, Shigetou Akitsu, Miyazaki Hideki T.	4. 巻 9
2. 論文標題 Near-field resonant photon sorting applied: dual-band metasurface quantum well infrared photodetectors for gas sensing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nanophotonics	6. 最初と最後の頁 4775 ~ 4784
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1515/nanoph-2020-0456	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hainey Mel F., Mano Takaaki, Kasaya Takeshi, Jimba Yoji, Miyazaki Hiroshi, Ochiai Tetsuyuki, Osato Hiroataka, Watanabe Kazuhiro, Sugimoto Yoshimasa, Kawazu Takuya, Arai Yukinaga, Shigetou Akitsu, Miyazaki Hideki T.	4. 巻 29
2. 論文標題 Patchwork metasurface quantum well photodetectors with broadened photoresponse	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 59 ~ 59
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.408515	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Miyazaki Hideki T., Mano Takaaki, Kasaya Takeshi, Osato Hiroataka, Watanabe Kazuhiro, Sugimoto Yoshimasa, Kawazu Takuya, Arai Yukinaga, Shigetou Akitsu, Ochiai Tetsuyuki, Jimba Yoji, Miyazaki Hiroshi	4. 巻 11
2. 論文標題 Synchronously wired infrared antennas for resonant single-quantum-well photodetection up to room temperature	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 565-1, 565-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-14426-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 10件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 宮崎英樹
2. 発表標題 プラズモン共振器を用いた量子井戸赤外検出器
3. 学会等名 東大シャープコロキウム (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. T. Miyazaki
2. 発表標題 Metasurface quantum-well infrared photodetectors
3. 学会等名 2021 International Conference on Electronics Packaging (ICEP 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮崎英樹
2. 発表標題 メタマテリアル量子井戸赤外検出器
3. 学会等名 一般社団法人レーザー学会学術講演会第42回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮崎英樹
2. 発表標題 メタサーフェスを利用した高効率赤外光源、赤外検出器
3. 学会等名 第10回電磁メタマテリアル講演会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. F. Hainey, Jr., T. Mano, T. Kasaya, T. Ochiai, H. Osato, K. Watanabe, Y. Sugimoto, T. Kawazu, Y. Arai, A. Shigetou, and H. T. Miyazaki
2. 発表標題 Resonant Photon Sorting Applied: Dual-band Metasurface Quantum Well Infrared Photodetectors for NO ₂ Sensing
3. 学会等名 2020年第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. F. Hainey, Jr., T. Mano, T. Kasaya, Y. Jimba, H. Osato, K. Watanabe, Y. Sugimoto, T. Kawazu, Y. Arai, A. Shigetou, T. Ochiai, H. Miyazaki, and H. T. Miyazaki
2. 発表標題 Broadened Photoresponse of Metasurface Quantum Well Infrared Photodetectors Using a Patchwork of Cavities Within a Subwavelength Period
3. 学会等名 2020年第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名	M. F. Hainey, Jr., T. Mano, T. Kasaya, Y. Jimba, H. Miyazaki, T. Ochiai, H. Osato, K. Watanabe, Y. Sugimoto, T. Kawazu, Y. Arai, A. Shigetou, and H.T. Miyazaki
2. 発表標題	Metasurface Quantum Well Photodetectors with Broadened Photoresponse Using Patchwork of Cavities within a Subwavelength Period
3. 学会等名	14th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena-Metamaterials 2020 (国際学会)
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	宮崎英樹, 間野高明
2. 発表標題	位相同調アンテナを用いたメタ表面量子井戸赤外検出器
3. 学会等名	日本学術振興会テラヘルツ波科学技術と産業開拓第182委員会第43回研究会 (招待講演)
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	宮崎英樹
2. 発表標題	中赤外メタマテリアルデバイス: アンテナで光を制御する
3. 学会等名	有機エレクトロニクス材料研究会第241回研究会 (招待講演)
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	M.F. Hainey, Jr., T. Mano, T. Kasaya, T. Ochiai, H. Osato, Y. Sugimoto, T. Kawazu, A. Shigetou, Y. Jimba, H. Miyazaki, and H. T. Miyazaki
2. 発表標題	Giant Responsivity in Metasurface Quantum Well Infrared Photodetectors at High Applied Bias
3. 学会等名	2021年第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年	2021年

1 . 発表者名 H. T. Miyazaki
2 . 発表標題 Plasmonic devices for mid-infrared application
3 . 学会等名 The 11th International Conference on the Science and Technology for Advanced Ceramics (STAC-11) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 H. T. Miyazaki, T. Mano, T. Kasaya, H. Oosato, K. Watanabe, Y. Sugimoto, T. Kawazu, T. Ochiai, Y. Arai, and A. Shigetou
2 . 発表標題 Metasurface Quantum-well Infrared Photodetectors
3 . 学会等名 The Fourth A3 Metamaterials Forum (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 H. T. Miyazaki, T. Mano, T. Kasaya, H. Oosato, K. Watanabe, Y. Sugimoto, T. Kawazu, T. Ochiai, Y. Arai, and A. Shigetou
2 . 発表標題 Metamaterial quantum well infrared photodetectors based on plasmon-enhanced intersubband transition
3 . 学会等名 The 7th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano2019) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 宮崎英樹
2 . 発表標題 メタマテリアルを利用した高効率赤外光源、赤外検出器
3 . 学会等名 NIMS WEEK 2019 Day3: 最新成果展示会
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 宮崎英樹
2. 発表標題 プラズモン共振器を利用した中赤外光源 / 検出器
3. 学会等名 光とレーザーの科学技術フェア2019分光セミナー（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮崎英樹, 間野高明, 笠谷岳士, 大里啓孝, 渡邊一弘, 杉本喜正, 川津琢也, 新井志大, 重藤暁津, 落合哲行, 神馬洋司, 宮崎博司, M. F. Hainey, Jr.
2. 発表標題 位相同調アンテナを用いたメタ表面量子井戸赤外検出器
3. 学会等名 2020年第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. F. Hainey, Jr., T. Mano, T. Kasaya, H. Osato, K. Watanabe, Y. Sugimoto, T. Kawazu, Y. Arai, A. Shigetou, T. Ochiai, Y. Jimba, H. Miyazaki, and H. T. Miyazaki
2. 発表標題 Morphology Considerations for Optimizing Metasurface Quantum Well Photodetector Performance
3. 学会等名 2020年第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 宮崎英樹	4. 発行年 2021年
2. 出版社 化学同人	5. 総ページ数 200
3. 書名 赤外線の利用	

1. 著者名 宮崎英樹	4. 発行年 2022年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 508
3. 書名 メタマテリアルの設計、作製と新材料、デバイス開発への応用	

1. 著者名 宮崎英樹	4. 発行年 2020年
2. 出版社 R&D支援センター	5. 総ページ数 14
3. 書名 メタマテリアル、メタサーフェスの設計・作製と応用技術	

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 赤外光用検出素子および発光素子	発明者 宮崎英樹	権利者 物質・材料研究機構
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-230505	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 光検出器およびその使用方法	発明者 宮崎英樹	権利者 物質・材料研究機構
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-72830	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

<p>光アンテナで赤外線を巧みに操る https://www.youtube.com/watch?v=6vK1jmQKAHc ジグザグ配線した光アンテナで環境に優しい高感度赤外線検出器を実現 https://www.nims.go.jp/news/press/2020/02/202002040.html</p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	間野 高明 (MANO Takaaki) (60391215)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・主幹研究員 (82108)	
研究分担者	井上 純一 (INOUE Junichi) (90323427)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・主幹研究員 (82108)	
研究分担者	神馬 洋司 (JIMBA Yoji) (00246844)	日本大学・工学部・准教授 (32665)	
研究分担者	野田 武司 (Noda Takeshi) (90251462)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・エネルギー・環境材料研究拠点・上席研究員 (82108)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関