

令和元年6月10日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H02011

研究課題名(和文) 量子井戸・メタ表面の融合による低毒性中赤外検出器の開発

研究課題名(英文) Development of less-toxic mid-infrared photodetectors by merging quantum wells and metasurfaces

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) 31,600,000円

研究成果の概要(和文)：波長5～10 μm の中赤外線の高感度検出には水銀カドミウムテルライド検出器が用いられているが、有毒な水銀やカドミウムを含まない低毒性検出器の登場が望まれていた。本研究では、低毒性ではあるものの垂直入射光に感度を持たないという問題を抱えていたガリウムヒ素量子井戸赤外線検出器を上下からストライプ状の金で挟むメタ表面に組み込むことにより、波長7.0 μm の垂直無偏光入射光に対して感度2.23 A/W、外部量子効率39.4%という、水銀カドミウムテルライド検出器に迫る実用レベルの性能を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

環境測定、自動運転、警備活動のために中赤外線の利用がますます注目される中、ROHS指令や水俣条約により使用が難しい水銀カドミウムテルライドに代わる中赤外線検出器の選択肢を提供できた。その上では、これまで基礎研究の対象であったメタ表面の電場回転機能と電場増機能が本質的な役割を果たした。また、プラズモン共鳴に必須の平滑性・急峻性と、微弱な光電流の取り出しに必要なオーミック性を兼ね備えた金属/半導体界面の形成方法を明らかにした。この技術も今後のメタ表面の光電子デバイス応用を加速すると期待している。

研究成果の概要(英文)：HgCdTe have long been utilized for high-sensitivity detection of mid-infrared radiation in the wavelength range of 5-10 μm . However, their replacement with less toxic materials is demanded. In this study, GaAs/AlGaAs quantum well infrared photodetectors that are less toxic but have no responsivity for normal incident light are sandwiched between Au layers to form metasurfaces, and exhibited the maximum responsivity as high as 2.23 A/W (external quantum efficiency 39.4%) for unpolarized normal incidence at the wavelength of 7.0 μm , which is sufficient for practical application.

研究分野：プラズモニクス

キーワード：マイクロ・ナノデバイス メタマテリアル メタ表面 量子井戸 中赤外光 赤外検出器

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

波長 5 ~ 15 μm の中赤外域は気体濃度計測や温度計測に重要な波長領域である。MCT (HgCdTe) 検出器はこの領域をカバーする唯一無二の量子型検出器である。MCT は RoHS (欧州連合危険物質に関する制限) 指令で使用を制限された 6 物質の内の二つを含む極めて有害な材料であるが、代替品が存在しないため、例外的に使用が容認されている。これに置き換わりうる低毒性中赤外検出器に量子井戸赤外検出器 (QWIP) がある。QWIP は多重量子井戸 (MQW) のサブバンド間遷移吸収を利用した検出器で、量子井戸層・バリア層の組成・厚さ・不純物ドーピングにより、感度波長、吸光度の他、光導電型か光起電力型かすら人工的に設計・制御できる。QWIP の市販は始まっているが、今なお MCT に置き換わる検出器とは見なされていない。その最大の理由は、垂直入射光に感度がなく、サブバンド間遷移は選択則により井戸層に垂直な電場にしか感度を有しないため、QWIP では表面に微細構造を形成し、回折や乱反射により垂直入射光に対する感度を誘起している。しかし、そうして得られる量子効率 は 10% 程度に留まり、70 ~ 90% の効率を有する MCT には遠く及ばない。数 10 ~ 100 層もの量子井戸層を必要とすること、感度波長幅が狭いこと、液体窒素温度かそれ以下の冷却が必要なことも問題である。

2. 研究の目的

本研究では、極薄エピ層移植技術を確認して III-V 族半導体多重量子井戸を Au 基板・Au ストライプから成るメタ表面に挟み込み、高感度・低雑音で高温動作可能な中赤外検出器を実現する。提案するメタ表面 QWIP の全体像を図 1 に示す。基本となるのは、Au 基板と Au ストライプを数 100nm 隔てた金属/誘電体/金属 (MIM) プラズモン共振器をサブ波長周期で配列したメタ表面である。均一な誘電体層の代わりに、分子線エピタキシー (MBE) 法にて成長した MQW 層が Au 間に挟み込まれている点が従来のメタ表面と異なる。適切な寸法の選択により、特定の波長にて共鳴し、 x 偏光した入射光を完全吸収するように設計できる。この時、垂直入射光の電場 E_x はメタ表面により 90 度回転され、本来存在しない感度が創出される。さらに MQW が薄いほどに大きな電場増強が得られ、入射光は効率よく電流に変換される。こうして、中赤外域にて、従来の MCT 検出器に匹敵する量子効率 50%、検出能 $5 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ をわずかに数層の量子井戸で実現することを目標とする。

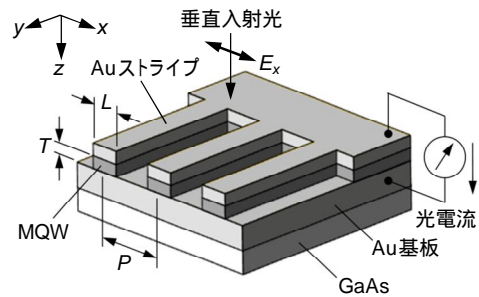


図 1 提案するメタ表面 QWIP の構造

3. 研究の方法

本研究では、QWIP のメタ表面を融合した低毒性中赤外検出器を実現するために、(I) 極薄エピ層移植技術、(II) プラズモン共鳴と両立する Ohmic 接合、(III) 量子井戸・メタ表面設計技術、という 3 つの基盤技術の確立に取り組んだ。電磁波を制御するプラズモニクス、メタ表面などの技術、III-V 族半導体量子ナノ構造を実現するエピタキシャル成長技術、両者を融合するナノ加工技術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、ナノ加工技術のスキルを持つ研究協力者 1 名を雇用し、共同利用設備を利用して推進することとした。

(I) 極薄エピ層移植技術

GaAs 基板上にエピタキシャル成長した MQW 層を Au 基板に載せ替える技術の開発が必要である。図 2 に全体工程を示す。第 1 GaAs 基板上に成長した MQW の上に Au を成膜し、Au を成膜した第 2 GaAs 基板の上に反転して載せ、Au-Au 間を接合する。第 1 基板を機械的・化学的研磨により除去し、再び Au を成膜する。こうして上下を Au 層で挟み込んだ MQW 層ができる。後は通常のメタ表面加工と共通である。同様のエピ層移植技術は、量子カスケードレーザのためにいくつかのグループが確立している。しかし、プラズモン共鳴の要請から、本研究の MQW 層厚は $T < 300 \text{ nm}$ に制限され、これは従来の例 (1 ~ 10 μm 厚) に比べると極めて薄い。この薄さでは、Au 原子の拡散や機械的応力による MQW 層の特性低下が懸念される。また、後の工程や熱膨張率

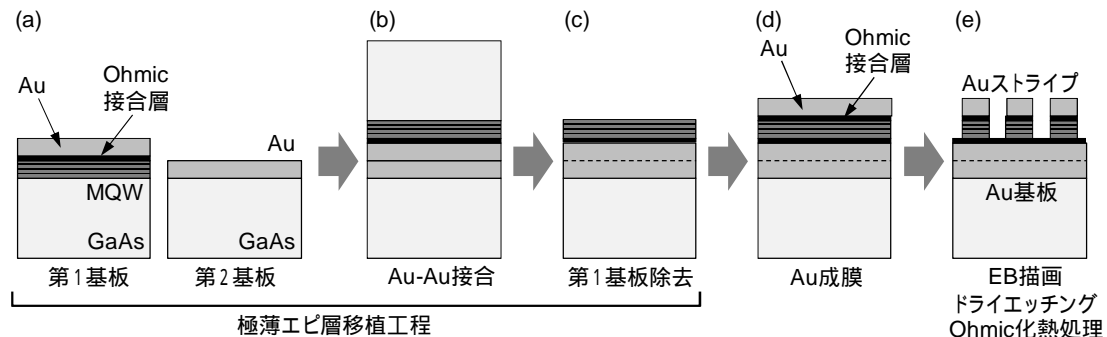


図 2 メタ表面 QWIP の作製工程

差、過度の拡散を考えると、十分低い温度、できれば 250 以下での接合が必要である。具体的には、Au-Au 拡散接合、Au-Au 間に In を介した共晶接合、Au 微粒子を介した Au 微粒子接合を比較検討することとした。

(II) プラズモン共鳴と両立する Ohmic 接合

微弱な光電流の取り出しには、Ohmic 接合による Au/GaAs 界面の接触抵抗の低減が必須である。しかし、Au/GaAs はむしろ Schottky 接合の典型例で、プラズモン共鳴と光検出器は本質的に両立しない。本研究では、堅実な基本方針として、広く知られた AuGe/Ni 層を超極薄化して挿入・熱処理して合金層を形成し、Ohmic 性と光学特性を適度に両立する条件を探ることを計画した。しかしその一方で、合金層を用いない理想的なプラズモン界面と Ohmic 性の両立の実現方法も追求することとした。

(III) 量子井戸・メタ表面設計技術

本研究では、電子波を制御する人工材料と光波を制御する人工材料を融合する。MQW のサブバンド間遷移のエネルギーと波動関数は Schrodinger 方程式と Poisson 方程式の連立解として求められる。この時の吸収係数は Fermi の黄金則から計算できる。その本来微小な吸収がメタ表面によりどう増強され、どれだけ MQW に配分されるかは Maxwell 方程式から計算できる。こうして、メタ表面 QWIP では、入射した光が電流に変換されるすべてのプロセスが数値的に把握できる。この内、Maxwell 方程式に関わる部分の設計技術は、これまでのメタ表面研究を通じて、ほぼ手元に揃っている。一方、量子井戸に関する設計技術は現時点で不十分であるので、本研究にて整備する必要があった。具体的には、まずはフリーウェア"1D Poisson/Schrodinger"を参考にしつつ、必要な計算ツールを構築していくこととした。最初は、先行例の豊富な光導電型 QWIP にて従来の研究例や実験結果の再現を実現し、最終的には、非対称ドープした光起電力型 QWIP など、先行例のない構造でも緻密な設計を可能にすることを目指した。

4. 研究成果

(1) 基盤技術の確立

(I) 極薄エピ層移植技術

In を介した共晶接合、Au 微粒子を介した Au 微粒子接合、Au-Au 拡散接合をすべて試行した。しかし、In は Au や GaAs 系材料への拡散が顕著なことが致命的であった。Au 微粒子は、最終的に残る多孔性の接合層に、その後の基板除去やナノ加工工程での様々な溶液が入り込み、工程を不安定にすることが致命的な問題であった。最終的には、同一研究機関内の低温固相接合の研究者(重藤暁津主幹研究員)から技術を習得し、250 での Au-Au 拡散接合技術の確立に成功した。Au-Au 拡散接合後、第 1 基板を 100 μm 程度を残して機械研磨した後、クエン酸：過酸化水素水溶液にて GaAs 基板を溶解する。この工程は組み込んだ AlGaAs エッチストップ層にて停止する。最後にこの AlGaAs エッチストップ層をフッ酸で溶解することにより、わずか 200nm 程度の MQW の Au 基板上への移植が完了する。AlGaAs エッチストップ層の Al 比も最適化した。

(II) プラズモン共鳴と両立する Ohmic 接合

この課題については予想外に大きな進展があった。当初はプラズモン共鳴的には不利であるものの、合金層の形成は必須で、その影響を最低限に抑える条件を見いだすつもりであった。しかし、MQW の内、金属と接するコンタクト層の n 型ドーパントである Si の濃度および結晶成長温度を最適化することにより、合金層を必要とせず、MQW 層の表側、裏側の両面とも、金属を成膜するだけで Ohmic 接合を実現する条件を発見し、確立した(論文、特許出願 1 件)。III-V 族半導体、特に GaAs 系材料と金属を組み合わせたメタ表面光電子デバイスは現在注目を集めており、本研究の非合金 Ohmic 接合技術はその際に必ず利用される根幹技術になると期待される。

(III) 量子井戸・メタ表面設計技術

様々な半導体材料の物性値が組み込まれている利点から、最初に必要になる Schrodinger 方程式と Poisson 方程式の連立による MQW のサブバンド間遷移のエネルギーと波動関数の計算については、"1D Poisson/Schrodinger"その他のフリーウェア、シェアウェアを利用することとした。そこで得られた波動関数から Fermi の黄金則に基づいて吸収スペクトルを求めたり、各準位間の電気伝導特性を計算する部分については、自前のプログラムを開発した。現在では、設計段階で推定した吸収スペクトルや各温度での電気抵抗は、実際の実験結果と概略一致する。

(2) メタ表面 QWIP の作製と評価

代表的なメタ表面 QWIP の構造を図 3 に示す。Au 基板上への MQW 移植後、電子線リソグラフィ・誘導結合プラズマエッチングによりストライプ状の MIM 共振器がサブ波長周期で配列されたメタ表面を作製した。QWIP の感度は吸収増強状態では量子井戸の層数に反比例するため [1,2]、量子井戸は単層とした。量子井戸層数 1~3 層の中で実際に単層の感度が最高であった。

MQW 層ができると、まず最初にウエハの一部を切り出して、Brewster 角 QWIP を作製した。これは従来の QWIP の 1 つの典型的な形態で、73 度という大きな角度で入射することにより、p 偏光の入射光は端面反射なく完全に MQW 中に入射し、その垂直電場 E_z により、小さいが有限の感度が生じる。これにより MQW 層そのものの波長や感度などが評価できる。図 4 上段にその結果を示す。その特性は量子井戸設計時に推定した結果とほぼ一致した。

次に、このピーク波長に合わせてメタ表面を設計した。メタ表面の吸収スペクトルは、顕微フーリエ変換赤外分光光度計にて反射測定により求めた。図4中段はその設計結果、下段は実測結果である。計算では現実には多層異方性構造であるMQW層がある有効屈折率を持った均一な媒質と仮定したために、両者は完全には一致しない。しかし、ストライプ幅 L (共振器長に相当)が大きくなるにつれて、共鳴波長が長波長に移動する様子は計算でも実験でも確認できる。量子井戸の感度ピークと吸収ピークが一致したとき、すなわち、量子井戸の電子系の共鳴と、メタ表面の光系の共鳴が一致したとき、メタ表面 QWIP の感度は最大化されると期待される。

78 Kでのメタ表面 QWIP の垂直入射光に対する感度スペクトルを図5に示す。再び、Brewster角 QWIP の感度スペクトルを参考までに示している。共振器長 L が大きくなるにつれて感度ピーク波長は長くなり、 $L=1.06\ \mu\text{m}$ にて、最大感度が得られた。これは図4から、MQWの共鳴とメタ表面の共鳴がほぼ一致する波長($7.0\ \mu\text{m}$)に相当している。感度(単位 A/W)は量子効率QEと比例関係にあり、代表的なQE値の等高線も示している。最終的に、無偏光入射光に対して $2.23\ \text{A/W}$ の感度(外部量子効率39.4%、検出能 $4.0 \times 10^{10}\ \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$)を得ることができた。直交する偏光方向(TE)にはまったく感度がなくてこの値ということは、TM偏光だけで見ると80%もの量子効率を実現していることになる。この時、Brewster角 QWIP に対して、MIMプラズモン共振器の採用により感度は540倍も増強されたことになる。

本検出器は、1つのMQWに対して、メタ表面の幾何学的構造により様々な特徴を持った検出器を実現できる。図3~5に示したのは単純なストライプ型共振器であるが、偏光依存性を解消した新構造(論文投稿中、特許出願準備中)では、本研究で目標とした量子効率50%、検出能 $5 \times 10^{10}\ \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ をいずれも超える特性を記録した。感度帯域の拡大も示した(投稿準備中)。

なお、本研究最終年度に、フランスのグループから、ほぼ同様の構造のメタ表面 QWIP が発表された[2]。しかし、我々は量子井戸層数を1層(先方は5層)としたことにより、すべての特性において、上回る結果を得ている。

今後はこの検出器に基づいて、具体的な環境計測の実証などを行っていく予定である。

参考文献

- [1] Y. N. Chen *et al.*, Appl. Phys. Lett. **104**, 031113 (2014).
 [2] D. Palaferri *et al.*, Nature **556**, 85 (2018).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計9件)

H. T. Miyazaki, T. Mano, T. Kasaya, H. Oosato, K. Watanabe, Y. Sugimoto, T. Kawazu, Y. Arai, A. Shigetou, T. Ochiai, Y. Jimba, and H. Miyazaki, 投稿中, 2019.

K. Wongpanya, T. Kasaya, H. T. Miyazaki, and W. Pijitrojana, 投稿中, 2019.

宮崎英樹, プラズモニクスを利用した熱放射制御とガスセンシングへの応用, 金属, 査読無, Vol. 89, No. 5, 2019, 392-400. 表紙掲載

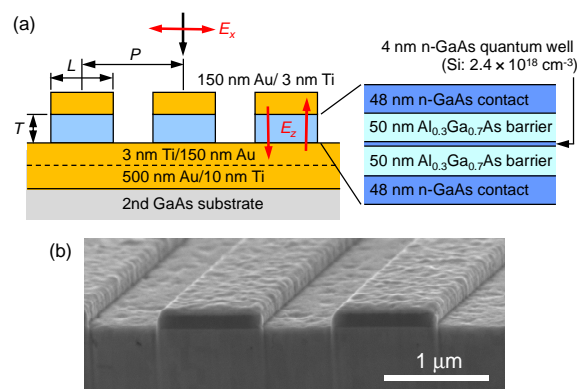


図3 (a)メタ表面 QWIP の構造の模式図。(b) 典型的なメタ表面 QWIP の断面走査電子顕微鏡写真。

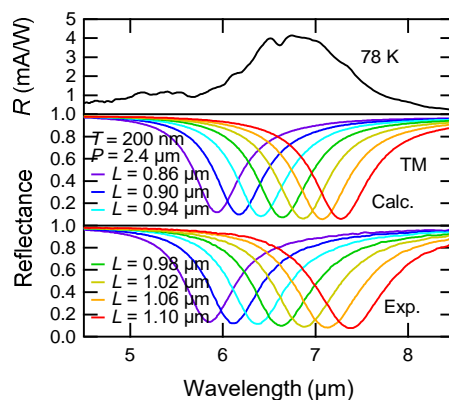


図4 QWIP の固有の感度とメタ表面の吸収の関係

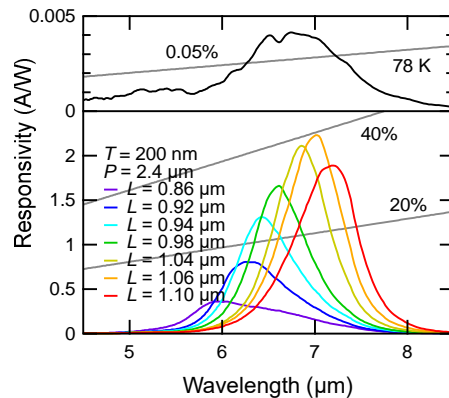


図5 様々な寸法のメタ表面に対するメタ表面 QWIP の感度スペクトル

T. Mano, H. T. Miyazaki, T. Kasaya, T. Noda, and Y. Sakuma, Double-sided Nonalloyed Ohmic Contacts to Si-doped GaAs for Plasmonic Devices, ACS Omega, 査読有, Vol. 4, 2019, 7300–7307.

<https://doi.org/10.1021/acsomega.8b03260>

宮崎英樹, プラズモン共鳴を利用したガス濃度計測用赤外光源, プラズモニク化学研究会 NewsLetter, 査読無, 2018 年度 No.1, 2018, 2-3.

<http://plasmonic-chem.net/NL/newsletter201801.pdf>

宮崎英樹, ナノフォトニクスを利用した熱放射制御材料, 日本赤外線学会誌, 査読有, Vol. 27, No. 2, 2018, 18-26.

K. Wongpanya, T. Kasaya, H. T. Miyazaki, H. Oosato, Y. Sugimoto, and W. Pijitrojana, Mass-productive fabrication of a metal-insulator-metal plasmon waveguide with a linear taper for nanofocusing, Appl. Phys. B, 査読有, Vol. 122, 2016, 238/1-7.

<https://doi.org/10.1007/s00340-016-6515-8>

宮崎英樹, 岩長祐伸, 光放射メタ表面の創製と応用, レーザー研究, 査読有, Vol. 44, 2016, 10-14.

H. T. Miyazaki, T. Kasaya, H. Oosato, Y. Sugimoto, B. Choi, M. Iwanaga, and K. Sakoda, "Ultraviolet-nanoimprinted packaged metasurface thermal emitters for infrared CO₂ sensing, Sci. Technol. Adv. Mater., 査読有, Vol. 16, 2015, 035005/1-4.

<https://doi.org/10.1088/1468-6996/16/3/035005>

〔学会発表〕(計 19 件)

H. T. Miyazaki, T. Mano, T. Kasaya, H. Oosato, K. Watanabe, Y. Sugimoto, T. Kawazu, T. Ochiai, Y. Arai, and A. Shigetou, Metamaterial quantum well infrared photodetectors based on plasmon-enhanced intersubband transition, the 7th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano2019), 2019 年 9 月 24-27 日予定, 神戸大学 (兵庫県・神戸市)

H. T. Miyazaki, Plasmonic devices for mid-infrared application, The 11th International Conference on the Science and Technology for Advanced Ceramics (STAC-11), 2019 年 7 月 9 日予定, つくば国際会議場 (茨城県・つくば市)

宮崎英樹, 光をあやつる人工ナノ構造 - フォトニク結晶からメタマテリアルまで -, 第 22 回名古屋大学 VBL シンポジウム (2018 年度)「光とナノ」, 2018 年 11 月 22 日, 名古屋大学 (愛知県・名古屋市)

宮崎英樹, CO₂ センサのためのメタマテリアル赤外光源, RIKEN-NIMS 第 2 回マテリアルズイノベーションコア Workshop, 2018 年 11 月 6 日, 物質・材料研究機構 (茨城県・つくば市)

宮崎英樹, ナノ構造をつくって光をあやつる, 千葉市科学館「大人が楽しむ科学教室 2018」, 2018 年 10 月 27 日, 千葉市科学館 (千葉県・千葉市)

宮崎英樹, 間野高明, メタマテリアルと量子井戸を融合したサブバンド間遷移型赤外線検出器, 第 14 回量子ナノ材料セミナー, 2018 年 9 月 25 日, 埼玉大学 (埼玉県・さいたま市)

T. Mano, H. T. Miyazaki, T. Kasaya, T. Noda, Y. Sakuma, Nonalloyed Ohmic Contacts to Buried n-GaAs Appearing After Reversed Wafer Transfer, 2018 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2018), 2018 年 9 月 13 日, 東京大学 (東京都・文京区)

H. T. Miyazaki, Nanophotonics: a frontier cultivated by microassembly, 2018 International Conference on Electronics Packaging and IMAPS All Asia Conference, 2018 年 4 月 21 日, ホテル花水木 (三重県・桑名市)

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, メタ表面量子井戸赤外線検出器, 2018 年第 65 回応用物理学学会春季学術講演会, 2018 年 3 月 19 日, 早稲田大学 (東京都・新宿区)

間野高明, 宮崎英樹, 笠谷岳士, 野田武司, 佐久間芳樹, メタ表面赤外線検出器のための n-GaAs へのノンアロイオーミック接合, 2018 年第 65 回応用物理学学会春季学術講演会, 2018 年 3 月 18 日, 早稲田大学 (東京都・新宿区)

宮崎英樹, 岩長祐伸, 光放射メタ表面の創製と応用, レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会, 2018 年 1 月 25 日, みやこめっせ (京都府・京都市)

H. T. Miyazaki, Manipulation of light waves by controlled nanostructures, Thailand-Japan Joint Research Meeting on Nanomaterials and Nanocomposites, 2017 年 9 月 7 日, Dusit Thani Bangkok (タイ・Bangkok 市)

宮崎英樹, プラズモン共振器を用いたガスセンシング用赤外光源, 第 12 回プラズモニク化学シンポジウム, 2017 年 6 月 23 日, 筑波大学東京キャンパス (東京都・文京区)

宮崎英樹, 金属メタ表面を用いた CO₂ ガスセンサー用中赤外光源, 日本真空学会 2017 年 1 月研究例会, 2017 年 1 月 18 日, 機械振興会館 (東京都・港区)

宮崎英樹, ナノフォトニクスによる熱輻射制御, 2016 年第 77 回秋季応用物理学学会学術講演

会, 2016年9月13日, 朱鷺メッセ(新潟県・新潟市)

宮崎英樹, 光をあやつるナノ構造 - 光のアンテナ, フォトニック結晶, メタ表面赤外光源 -, 強光子場科学研究懇談会平成27年度第2回懇談会, 2016年4月28日, 物質・材料研究機構(茨城県・つくば市)

H. T. Miyazaki, Photonics, Plasmonics & Metamaterials research in NIMS, The first NIMS-IMRE Workshop on Materials Science, 2015年10月21日, 物質・材料研究機構(茨城県・つくば市)

宮崎英樹, UV ナノインプリント法で作製した CO₂ センサ用メタ表面熱放射赤外光源, 電気学会 E 部門総合研究会マイクロマシン・センサシステム研究会, 2015年7月3日, 九州大学(福岡県・福岡市)

H. T. Miyazaki, T. Kasaya, H. Oosato, Y. Sugimoto, B. Choi, M. Iwanaga, and K. Sakoda, UV-nanoimprinted metasurface thermal emitters for infrared CO₂ sensing, The 5th Korea-Japan Metamaterials Forum, 2015年6月29日, Seoul 大学(韓国・Seoul 市)

〔図書〕(計2件)

H. T. Miyazaki, UV-nanoimprinted metasurface thermal emitters for infrared CO₂ sensing, Springer, Electromagnetic Metamaterials - Modern Insights into Macroscopic Electromagnetic Fields -, 2019, 印刷中.

H. T. Miyazaki, Unconventional thermal emission from photonic crystals, Wiley, Micro-and Nanophotonic Technologies, 2017, 51-63.
<https://doi.org/10.1002/9783527699940.ch3>

〔産業財産権〕

出願状況(計1件、準備中3件)

名称: 半導体装置、半導体装置の製造方法、赤外線光電変換素子、赤外線検出素子および赤外線発光素子

発明者: 間野高明, 宮崎英樹, 佐久間芳樹, 野田武司

権利者: 物質・材料研究機構

種類: 特許

番号: 特願 2018-37337

出願年: 2018年

国内外の別: 国内

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.nims.go.jp/research/group/plasmonics/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 間野 高明

ローマ字氏名: MANO, Takaaki

所属研究機関名: 物質・材料研究機構

部局名: 機能性材料研究拠点

職名: 主幹研究員

研究者番号(8桁): 60391215

研究分担者氏名: 川津 琢也

ローマ字氏名: KAWAZU, Takuya

所属研究機関名: 物質・材料研究機構

部局名: 機能性材料研究拠点

職名: 主任研究員

研究者番号(8桁): 00444076

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: 笠谷 岳士

ローマ字氏名: KASAYA, Takeshi