

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

～量子井戸の電流をアンテナの共鳴で増強 室温動作する高感度検出器の実現に道～

配布日時：2020年2月4日14時

国立研究開発法人 物質・材料研究機構

概要

1. NIMS は、多数の光アンテナ⁽¹⁾をジグザグ配線で接続した独自の構造を用い、実用レベルの高い感度を持ち、毒性の低い赤外線検出器を実現しました。長い間用いられてきた水銀やカドミウムを含む冷却式の高感度検出器に置き換わり、ガス分析や赤外線カメラに応用されることが期待されます。

2. ガス分子の多くは赤外域に分子固有の吸収スペクトルを持つため、赤外線は、大気環境中に含まれるガスの分析において重要な役割を果たしています。特に NO_x、SO_x など、大気汚染ガスの計測に重要な波長 5～10 μm の赤外線の高感度検出には、これまで水銀カドミウムテルライド検出器が用いられてきました。しかし、欧州連合の RoHS 指令⁽²⁾や近年発効した水俣条約⁽³⁾により、有毒な水銀やカドミウムを使い続けることは困難になっており、毒性が低く高感度な赤外線検出器が求められていました。

3. 今回、研究チームは、低毒性材料でできた量子井戸⁽⁴⁾を組み込んだ光アンテナをジグザグ配線で接続することにより、従来の検出器に匹敵する高い感度を持つ赤外線検出器を実現しました。本検出器では、厚さわずか 4 nm の量子井戸が赤外線を電流に変換します。光アンテナが入射光で共鳴すると、その電流を大きく増強できますが、電流を取り出すために配線を接続すると、アンテナの共鳴状態は乱されてしまいます。本研究では、配線をジグザグに折り曲げて、電磁場が配線を伝わる時間を正確に調整することで、すべてのアンテナの共鳴を維持したまま大きな電流を取り出すことに成功しました (図1)。

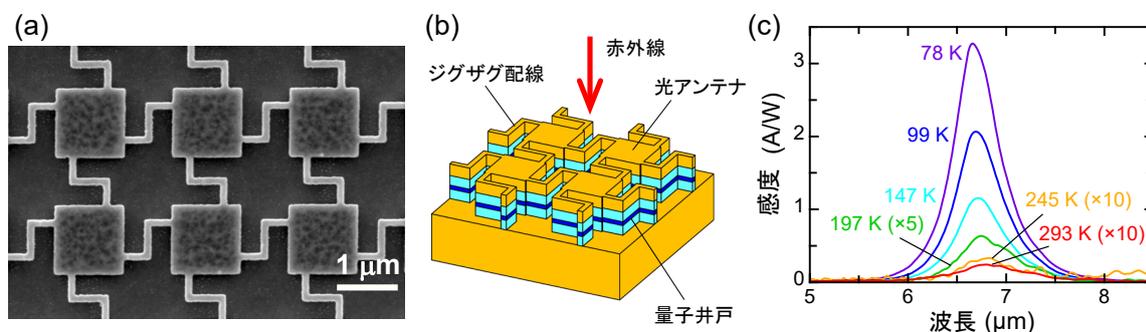


図1. (a) 開発した赤外線検出器の走査電子顕微鏡写真。(b) 構造の説明図。中央に量子井戸層を有する半導体層の上下を金で挟み込んでいる。(c) 様々な検出器温度での感度スペクトル。

4. 本検出器では、量子井戸も光アンテナも各部の寸法で特性が決まりますので、設計に大きな自由度があります。今後、高感度で室温動作する究極の赤外線検出器の実現を目指して、開発を加速して行きます。また、ジグザグ配線をつないだ光アンテナは、赤外線検出器に留まらず、赤外光源など様々なデバイスの重要な基盤構造になるものと期待されます。

5. 本研究は、物質・材料研究機構 機能性材料研究拠点 宮崎英樹グループリーダー、間野高明主幹研究員らの研究チームと、日本大学、東北大学の共同研究によるものです。本研究は、日本学術振興会 (JSPS) 科学研究費助成事業 (15H02011, 17H01275, 19H00875)、池谷科学技術振興財団の支援により行われました。

6. 本研究成果は、Nature Communications 誌にて日本時間 2020 年 1 月 28 日にオンライン掲載されました。また、応用物理学会春季学術講演会 (上智大学、2020 年 3 月 13 日) にて口頭発表します。

研究の背景

赤外線は、分子固有の吸収スペクトルや物体からの熱輻射が現れる波長域で、ガスの濃度を測るセンサ、物質の組成を調べる分析装置、温度分布を非接触で画像として計測するサーモグラフィ、熱源の可視化などに大きな役割を果たしています。環境問題やセンシング技術の重要性の高まりに伴い、赤外線計測への期待は高まる一方ですが、その基盤を揺るがす大きな問題が迫っています。赤外線の高感度検出には冷却式の検出器が用いられます。中でも NO_x 、 SO_x など、大気汚染ガスの計測に重要な波長 $5\sim 10\mu\text{m}$ の領域の高感度検出には、これまで、水銀カドミウムテルライド検出器が独占的に用いられてきました。この検出器は、欧州連合の RoHS 指令が定める 10 の規制物質の内の 2 つを含みます。さらに、水銀の使用を規制する水俣条約の発効により、これ以上、水銀やカドミウムを含む検出器に依存していくことは困難です。

これに置き換わる低毒性で高感度な赤外線検出器がいくつか開発されてきましたが、その 1 つに量子井戸赤外線検出器があります。量子井戸とは、原子 1 層レベルの精度で 2 種類の半導体結晶を交互に積層して作る高度な人工材料で、設計により検出感度のピーク波長を自在に作り分けられます。けれども、入射光を吸収する能力が低く、1990 年代に盛んに研究されたものの、広く普及するには至りませんでした。

研究内容と成果

今回、研究チームは、量子井戸赤外線検出器にメタマテリアル⁶⁾の概念を組み合わせることにより、検出器温度 78 K にて 3.3 A/W (量子効率 61%) という高い感度を持ち、室温ですら動作する (検出器温度 20°C にて感度 24 mA/W) 赤外線検出器を実現することに成功しました。

メタマテリアルとは、光の波長よりも微小な光アンテナを無数に並べることにより、特異な光学特性を実現する新しい概念の材料 (マテリアル) です。特に、緻密に設計された幾何学的形状が機能の発現において重要な役割を果たす点に特徴があります。

本研究では、正方形アンテナをジグザグの配線でつなぐ NIMS 独自のメタマテリアル構造が、高い性能の実現に重要な役割を果たしました。光アンテナには様々な形態のものがありますが、誘電体を金属基板と金属パッチとの間に挟んだ構造はその代表的なものです。本研究では、厚さ 4 nm の量子井戸層を含む総厚さ 200 nm の半導体層を金の基板と金の正方形パッチとで挟み込んだ光アンテナを用いました。アンテナが共鳴して入射光を高効率に吸い集める働きを担うため、量子井戸が入射光を吸収する能力は劇的に向上しました。

量子井戸にバイアス電圧を印加したり、赤外線の入射により生じた電流を取り出すためには、個々の光アンテナに配線を接続する必要があります。ところが、電流を取り出そうとしてアンテナに配線を接続すると、共鳴状態が変化してしまいます。本研究では、その配線を、単に電流を取り出すだけでなく、隣り合うアンテナの共鳴タイミングを一致させるための位相遅延素子として利用しました。アンテナ間を接続する配線のジグザグ形状や長さを最適に設計して、量子井戸の感度ピーク波長にて全アンテナの共鳴のタイミングを一致させることにより、入射した赤外線を大きな電流信号に変換することに成功しました。

なお、ジグザグ配線の折り曲げ方には様々な形状が考えられます (図 2)。それぞれの形状ごとに最適な長さがあり、また、形状により赤外線検出器の種々の特性に特徴が生じます。

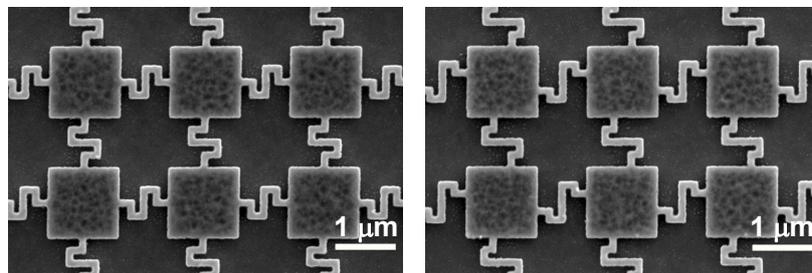


図 2. 様々な形状のジグザグ配線の例。

本研究で用いた量子井戸構造は、厚さ 4 nm のガリウムヒ素量子井戸層 1 層とアルミニウムガリウムヒ素バリア層とで構成されています。なお、ヒ素の毒性は水銀やカドミウムに比べると低く、RoHS 指令での規制対象ではありません。

本研究にはメタマテリアルの採用以外に、もう一つの重要な基盤技術がありました。これまでガリウムヒ素と金属の界面は電気抵抗が高く、電流が流れにくいことが知られていました。本研究チームは、この検出器の作製に先立って、ガリウムヒ素上に金属を成膜するだけで電流が自在に流れるようにする独自の結晶成長方式を世界で初めて開発しました [T. Mano, H. T. Miyazaki, T. Kasaya, T. Noda, and Y. Sakuma, "Double-sided nonalloyed ohmic contacts to Si-doped GaAs for plasmoelectronic devices", *ACS Omega* **4**, 7300–7307 (2019)]. これにより、光アンテナとガリウムヒ素を組み合わせる上での障害がなくなりました。

また、メタマテリアル、半導体結晶成長、ウエハ接合、ナノ加工、電磁気学理論など、NIMS の様々な分野の研究者が協力して取り組んだことも成功の重要な一因でした。

今後の展開

NIMS センサ・アクチュエータ研究開発センターでは、この赤外線検出器をこれまでの毒性の高い検出器の代わりに用い、大気汚染ガスを計測するセンサに応用することを目指しています。本検出器では、電子の波を制御する量子井戸構造も、光の波を制御する光アンテナ構造も、すべて緻密な設計に基づいて製造した人工構造物です。従って、各部の寸法を変更するだけで、感度ピーク波長を自在に変化させることができ、様々なガス分子に最適化した検出器を実現することができます。

さらに量子井戸構造を巧妙に設計すると、同じ感度をこれまでよりも高い温度で実現することが可能になります。本検出器は、現在既に室温でも感度がありますが、その値は小さく、実用に十分とは言えません。今後、量子井戸構造の最適設計により、毒性が低く、室温でも高い感度を持つ究極の赤外線検出器の実現に向けて、開発を進めていきます。

また、ジグザグ配線をつないだ光アンテナも、大きな設計自由度を持ち、様々な可能性を秘めた構造です。例えば、場所によって少しずつ配線の長さを変化させることにより (図3)、レンズなどの光学系の機能を組み込んだ赤外線検出器など、これまで考えられなかったような高機能な検出器が実現できると期待しています。さらに、赤外線検出器に留まらず、光源や光変調器など、今後のメタマテリアルデバイスの重要な基盤構造になるものと期待されます。

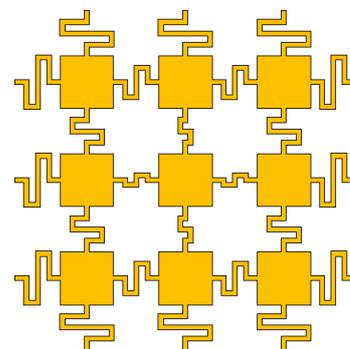


図3. レンズ機能を組み込んだジグザグ配線光アンテナの例。

掲載論文

題目 : Synchronously wired infrared antennas for resonant single-quantum-well photodetection up to room temperature

著者 : Hideki T. Miyazaki, Takaaki Mano, Takeshi Kasaya, Hirotaka Osato, Kazuhiro Watanabe, Yoshimasa Sugimoto, Takuya Kawazu, Yukinaga Arai, Akitsu Shigetou, Tetsuyuki Ochiai, Yoji Jimba (Nihon Univ.), and Hiroshi Miyazaki (Tohoku Univ.)

雑誌 : Nature Communications

掲載日時 : 英国時間 2020 年 1 月 28 日 10 時 (日本時間 28 日 19 時)

DOI : <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14426-6>

用語解説

(1) 光アンテナ

アンテナとは電波を送受信するための構造物ですが、光も電波と同じ電磁波ですので、光を送受信するアンテナも原理的に実現可能です。ナノ加工技術の進歩と、ナノ領域での光の振る舞いが詳しくわかってきたことにより、最近では光のアンテナを緻密なシミュレーションに基づいて設計し、正確に製造することが可能になってきました。アンテナには様々な形態のものがありますが、本研究で利用するのはマイクロ波領域でパッチアンテナやマイクロストリップアンテナと呼ばれて広く用いられている平面型のアンテナです。アンテナで重要なのは棒の長さや辺の長さが送受信したい電磁波の波長に対して特別な寸法に作られていることです。本研究では、赤外線の波長に合わせて設計した微細なパッチアンテナを、ナノ加工技術を利用して正確に作りしました。

(2) RoHS 指令

欧州連合 (EU) が電気・電子機器に含まれる特定有害物質の使用制限を定めて発令したもので、現在は、水銀、鉛、カドミウムなど 10 種類の規制物質が定められています。電気・電子産業においては、欧州向けの機器に限らず、RoHS 対応であることが広く求められるようになってきました。ただし赤外線検出器については、有望な代替材料が存在しないため、現在、例外的に規制物質の使用が容認されています。

(3) 水俣条約

水銀を含む製品の製造や輸出入を規制するために日本が中心になって制定した国際条約で、2017 年 8 月に発効しました。今後、水銀を含む赤外線検出器の使用は次第に困難になるため、代替品の探索の動きが急加速しています。

(4) 量子井戸

厚さ数 nm~10 nm 程度のバンドギャップの小さな半導体材料 (量子井戸層) をバンドギャップの大きな半導体材料 (バリア層) で挟み込むと、量子井戸層に閉じ込められた電子は厚さ方向に量子化され、飛び飛びのエネルギー準位しか持たなくなります。このエネルギー準位は材料の選択や厚さの制御により設計した通りに作ることができますので、量子井戸は高効率な半導体レーザなどに広く用いられています。その製造には、原子の配列を維持したまま結晶を成長するエピタキシャル成長技術が必要です。基板材料としてはガリウムヒ素、インジウム燐、窒化ガリウムなどが用いられます。量子井戸を発展させて 3 方向すべてから電子を閉じ込めると量子ドットとなります。本研究では、ガリウムヒ素基板上に成長した厚さ 4 nm の量子井戸層を含む総厚さ 200 nm の半導体層を、ウエハ接合技術を用いて金基板の上に転写することにより、上下を金で挟んだアンテナ構造を実現しました。

(5) メタマテリアル

従来の材料工学では、元素の組成に注目して新しい性質を持った材料を開発してきましたが、微細構造の幾何学的な形状に注目して新しい機能を発現させようとする新概念の材料がメタマテリアルです。特に光やマイクロ波などの電磁波を扱うメタマテリアルが盛んに研究されています。当初は負の屈折率を示す材料にのみ注目が集まりましたが、現在では波長よりも微小な構造により様々な光機能を制御するものが幅広く議論されています。一般に、波長よりも十分に小さなアンテナを単位構成要素 (メタ原子) とし、それを波長よりも小さな間隔で配列した形態が取られます。このような材料に光が入射すると、光には微細構造を認識できないので、何か風変わりな均一な材料 (マテリアル) に入射したかのように振る舞います。そのため、実態としては構造体ですが、メタマテリアルと名付けられました。当初は十分な厚みを持った材料を指向する概念でしたが、近年では、アンテナを 2 次元的に敷き詰めたメタサーフェス (メタ表面) の開発がとりわけ活発になっています。本研究もその一例です。本研究の構造は正方形アンテナの辺の長さが検出する光の波長の 1/6 以下、アンテナの周期が波長の 1/3 以下という小さなものです。

本件に関するお問い合わせ先

(研究内容に関すること)

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 光機能分野 プラズモニクスグループ グループリーダー (センサ・アクチュエータ研究開発センター併任) 宮崎 英樹 (みやざき ひでき)

E-mail: MIYAZAKI.Hideki@nims.go.jp

TEL: 029-860-4716

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

(報道・広報に関すること)

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 経営企画部門 広報室

〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1

TEL: 029-859-2026, FAX: 029-859-2017

E-mail: pressrelease@ml.nims.go.jp