

プラズモニクスによる 波長選択型非冷却赤外センサ

小川新平*
木股雅章**

Wavelength Selective Uncooled Infrared Sensor by Plasmonic Absorber

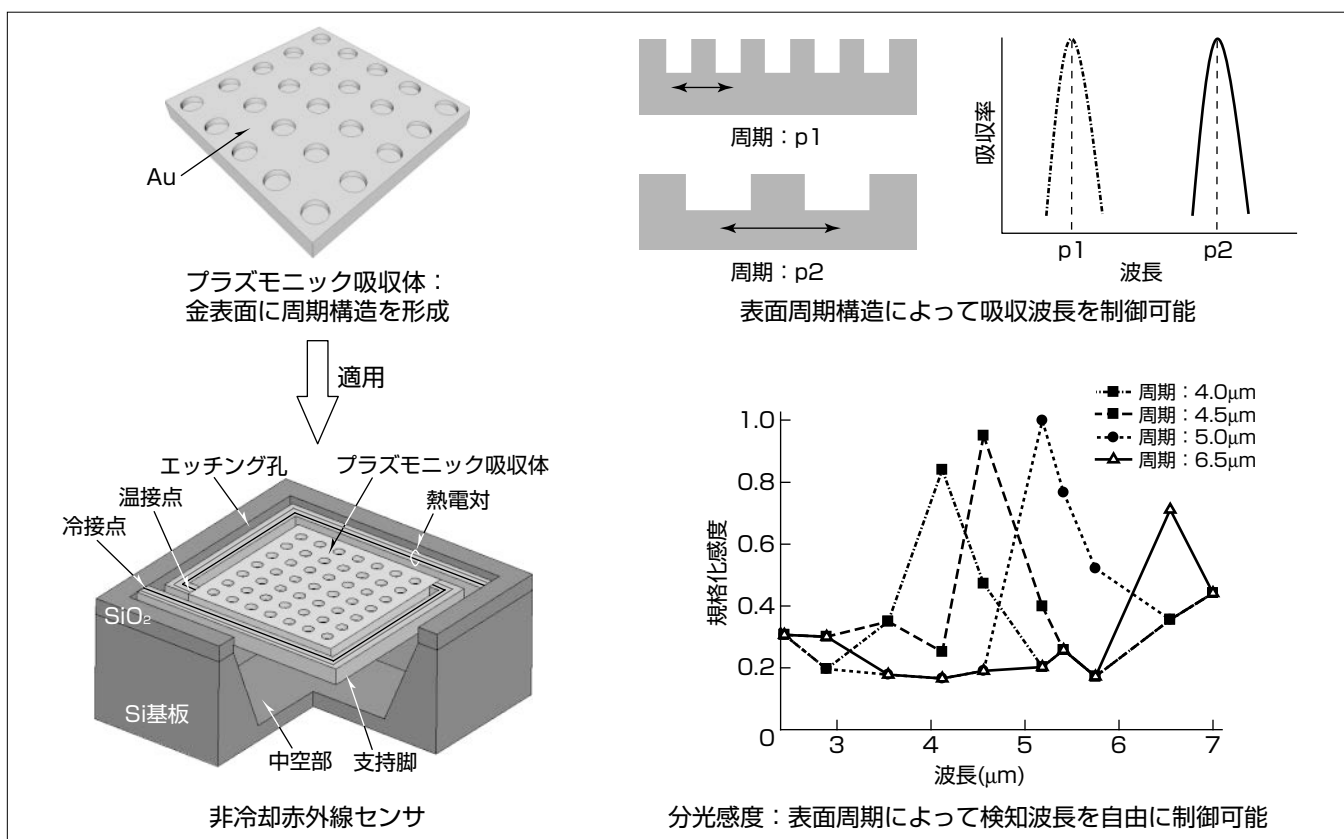
Shimpei Ogawa, Masafumi Kimata

要旨

近年、安全・安心への関心の高まりから、非冷却赤外線センサに大きな注目が集まっている。非冷却赤外線センサは、物体からの熱放射による熱エネルギーを吸収し、電気信号に変換することで物体を検知する。よって熱源として物体の有無や位置を検知することは可能であるが、形状情報以外から熱源の正体を識別することは不可能であった。しかし、熱放射エネルギーを波長分解することができれば、放射スペクトルから検知物体の正体を識別することが可能になる。

三菱電機は、近年発展著しい新たな光制御技術であるプラズモニクスを応用することで、所望の波長で赤外線を吸収する新たな吸収体(プラズモニック吸収体)を応用した非冷却赤外線センサを提案した。表面が金からなる二次元周

期構造を持つプラズモニック吸収体について電磁界解析を行い、主に周期によって吸収波長が制御可能であることを示した。次に、様々な表面周期構造を持つプラズモニック吸収体を適用した非冷却赤外線センサを作製し、分光感度を評価した。プラズモニック吸収体の周期と等しい波長で感度が増強されており、解析結果とよい一致を示した。以上の経緯から、プラズモニック吸収体によって、表面構造の制御のみで、非冷却赤外線センサの検知波長を自由に設定することが可能であることを実証した。異なる検知波長を持つ画素の集積化が容易であるため、将来的に、赤外域でも可視域におけるカラーイメージセンサに相当する多波長検知画像センサの実現が期待される。



プラズモニック吸収体を用いた波長選択型非冷却赤外線センサ

従来の非冷却赤外線センサでは、波長情報に基づく被検知物体の正体識別が不可能であった。プラズモニクスを応用することで、金表面の周期構造によって吸収波長を自由に制御することが可能になる。プラズモニック吸収体を受光部に持つ非冷却赤外線センサを作製し、分光感度を評価した結果、検知波長を周期構造によって制御できることを実証した。異なる検知波長を集積化することで、赤外画像におけるカラー化が期待される。

1. ま え が き

近年、安全・安心への関心の高まりから、非冷却赤外線センサに大きな注目が集まっており、様々な分野で応用されている⁽¹⁾。非冷却赤外線センサは、入射した赤外線を吸収することで熱エネルギーに変換し、さらに電気信号に変換することで光を検出する。MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術⁽²⁾の進展を契機とし、性能面で著しい進歩を遂げている⁽³⁾⁽⁴⁾。赤外線センサは、物体の熱放射エネルギーを検知するが、被検知物体の正体を識別することは不可能である。ただし、熱放射エネルギーの波長分解が可能になれば、放射スペクトルから熱源の正体を識別することが可能である。

当社では、波長情報を取得することで被検知物体を識別する新機能を備えた非冷却赤外線センサの開発を進めている⁽⁵⁾。異なる波長を検知する画素を集積化することによって、赤外波長域でも、可視域におけるカラー画像に相当する波長情報を持った画素が取得できる。波長情報によって熱源の正体識別が可能になるため、非冷却赤外線センサの可能性を大きく拡大することが期待される。

2. プラズモニクスによる波長選択吸収

2.1 赤外線吸収構造

波長選択を実現する試みとしては、①センサに帯域通過フィルタを付加する方法、及び②吸収体材料を制御する方法が一般的である。しかし、①では所望の波長を通過させるフィルタの設計及び製造を波長ごとに行わなければならない。多画素の場合は、さらに画素ごとにフィルタの種類を用意しなければならないため集積化が困難である。②については、所望の波長を吸収する材料を自由に制御することが難しく、特に異なる材料を画素ごとに集積することが困難である。

2.2 プラズモニック吸収体

外部光学系や材料に依存しない新たな吸収体を実現するため、プラズモニクスを応用した。プラズモニクスは、金属表面の微細構造によって光を制御する新たな光技術であり、フォトニック結晶の進展と相まって、2000年代から進歩の著しい分野である。初期段階では、可視光～近赤外域における金属内部の自由電子波としての表面プラズモンの研究を中心としていた⁽⁶⁾。近年、金属周期構造⁽⁷⁾⁽⁸⁾の導入や、メタマテリアルとの融合によって、赤外波長域～THz(テラヘルツ)波長域においてもプラズモニクスの概念は拡張されている⁽⁹⁾。

図1にこの研究で用いたプラズモニック吸収体の概念図を示す。プラズモニック吸収体は、表面が金からなり、孔が正方格子状に二次元周期的に配置された構造体である。周期構造の導入によって、周期に固有の擬似表面プラズモ

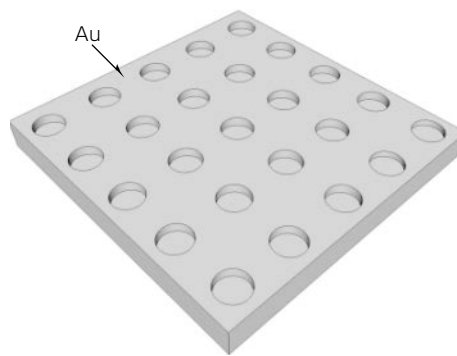


図1. プラズモニック吸収体の概念図

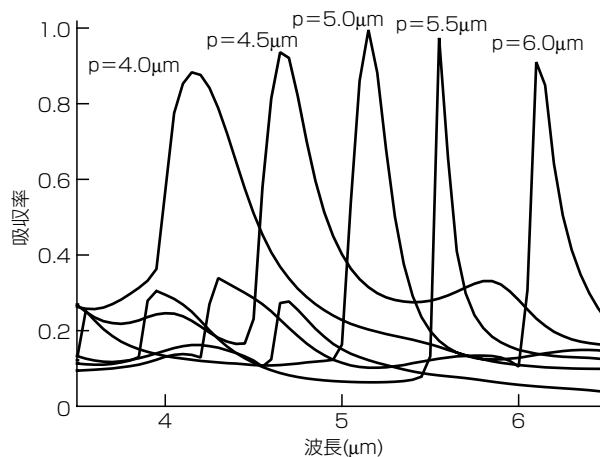


図2. 周期を変化させた場合の吸収率

ンモード⁽⁵⁾⁽⁹⁾が形成されるため、吸収波長が周期によって制御可能であることが理論的に予測される。

図1で、孔径 $3\mu\text{m}$ 、孔深さ $1.2\mu\text{m}$ に固定し、周期(p)を $4.0\sim 6.0\mu\text{m}$ の範囲で変化させた場合の吸収率を厳密結合波解析によって求めた。結果を図2に示す。

表面構造を反映して、周期とほぼ等しい波長でのみ吸収が増強されていることが分かる。また、表面プラズモンの分散関係⁽⁷⁾⁽⁸⁾を考慮すると、プラズモニック吸収体では、吸収波長に対する孔径、孔深さの影響が小さい。よって、プラズモニック吸収体では、表面構造特に周期によって吸収波長を制御することができる。

3. 非冷却赤外線センサへの適用

電磁界解析によって示された波長選択吸収をセンサで実証するため、赤外線受光部にプラズモニック吸収体を用いたサーモパイル型非冷却赤外線センサを作製した。図3、図4にプラズモニック吸収体を持つ非冷却赤外線センサの模式図及び作製過程を示す。以下、作製過程を述べる。

- (1) CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 工程によって、Siウェーハ上に赤外線受光部、支持脚、熱電対を形成する。RIE (Reactive Ion Etching) によって中空化エッチング用の孔を形成する。
- (2) RIEによって、赤外線受光部のみに二次元周期的な孔

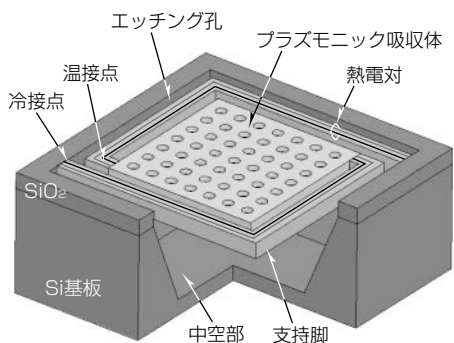
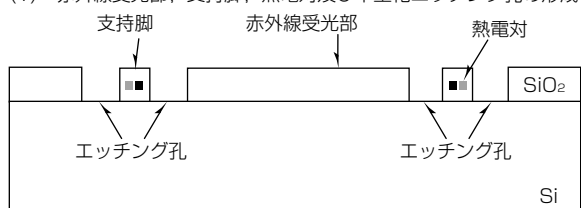
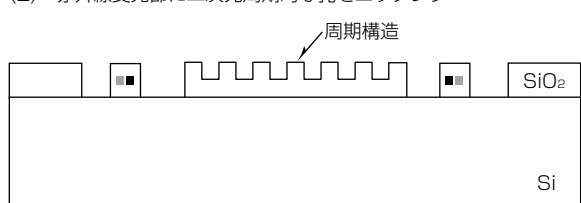


図3. プラズモニック吸収体を持つ非冷却赤外線センサ

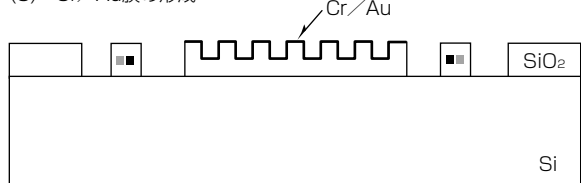
(1) 赤外線受光部、支持脚、熱電対及び中空化エッチング孔の形成



(2) 赤外線受光部に二次元周期的な孔をエッチング



(3) Cr/Au膜の形成



(4) Si基板のエッチングによる中空構造の形成

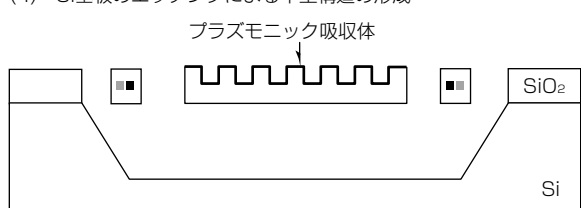
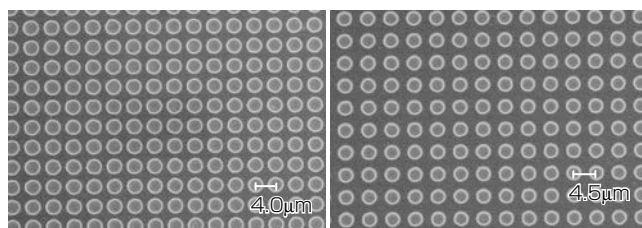


図4. 作成過程

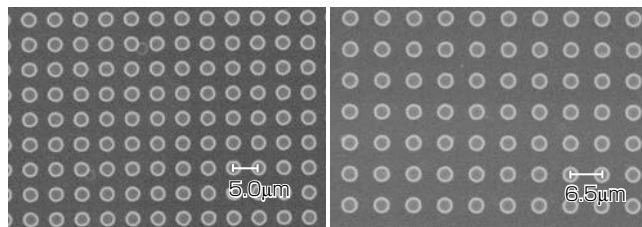
をエッチングする。孔深さは1.2μmとしている。

- (3) Cr, 及びAuをそれぞれ50nm, 250nm成膜し, 写真製版によって受光部のみにCr/Au膜を残す。金の厚さは250nmであり, 赤外波長域における表皮厚さより十分厚いため, 下部のSiO₂が入射光へ与える影響は無視できる。つまり入射光に対してはAuのみが作用するため, 図1に示すプラズモニック吸収体と等価な構造が形成できる。なお, 孔側壁についてもCr/Auが均一に成膜されてい



(a) 周期: 4.0μm

(b) 周期: 4.5μm



(c) 周期: 5.0μm

(d) 周期: 6.5μm

図5. プラズモニック吸収体の表面周期構造のSEM写真

ることを確認している。

- (4) ウェーハをチップ化し, TMAH(Tetra Methyl Ammonium Hydroxide)によってSi基板をエッチングする。エッチング孔によってプラズモニック吸収体下部のSiのみが選択的に除去されるため, 中空構造が形成される。以上によって, プラズモニック吸収体を中空に保持した非冷却赤外線センサが完成する。

図5にプラズモニック吸収体における表面周期構造のSEM(Scanning Electron Microscope)写真を示す。プラズモニック吸収体は, 周期的な凹凸を持つ薄膜構造であるが, 中空構造でも良好な形状を保っていることが分かる。孔径は3μm, 孔深さは1.2μmを共通として, 周期が4.0μmから6.5μmの4種類のセンサを作製した。以下, それぞれセンサA~Dとする。

4. 分光感度評価

センサA~Dについて分光感度を測定した。分光感度測定系を図6に示す。

光源は黒体炉(1,000K)を用いた。帯域通過フィルタを用いて所望の測定波長のみを取り出し, ピンホールによって受光部へ入射する光以外の迷光を除去することで, プラズモニック吸収体の効果のみを評価している。センサは真空槽に格納し, 外部から接続した読み出し回路によって出力電圧を測定する。センサ感度の算出は, 黒体炉のアーパチャ径, フィルタ透過率, フィルタ半値幅, 真空槽Ge窓の透過率, 光源とセンサとの距離, センサ受光部の面積, 黒体炉温度などのパラメータから算出した。

センサA~Dについて求めた分光感度を図7に示す。プラズモニック吸収体の効果を示すため, 分光感度は最大感度で規格化を行っている。

図7から, 全てのセンサA~Dの特定波長でのみ感度が増強されていることが分かる。さらに, 感度が増強される

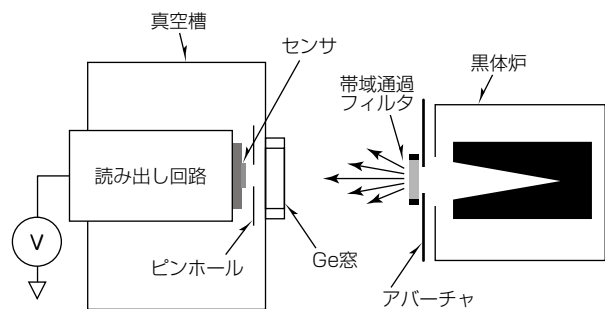


図 6. 分光感度測定系

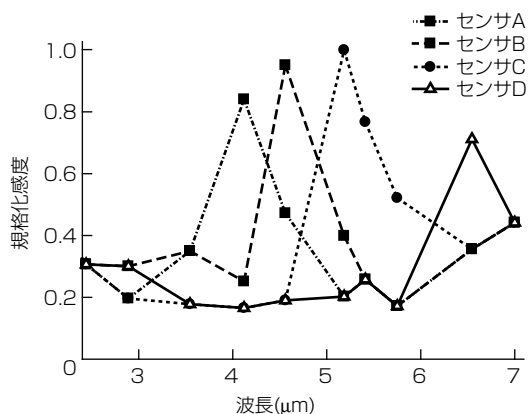


図 7. 分光感度測定結果

波長は、センサA～Dのプラズモニック吸収体における周期にほぼ等しいことが示されている。得られた分光感度特性は電磁界解析によって示したプラズモニック吸収体の吸収特性(図2)とよく一致し、検知波長がプラズモニック吸収体の周期のみによって自由に制御することが可能であることが実証された。孔深さなどの垂直方向の構造制御が不要であり、表面構造のみの制御で検知波長を制御できる。よって、異なる検知波長を持つ画素を集積化する場合は、画素ごとに周期のみを変化させればよい。周期のみを変える場合は、写真製版の工程のみで実現できるため多波長検知を実現するための集積化が容易である。

5. む す び

金属表面周期構造のプラズモニック吸収体による検知波長選択型非冷却赤外線センサを提案した。また、電磁界解析によって、プラズモニック吸収体が表面周期によって吸収波長が制御できることを示した。さらに、設計したプラズモニック吸収体を適用した非冷却赤外線センサを作製し、分光感度を評価することで、解析とよく一致した検知波長の選択性が実現されていることを示した。

提案したプラズモニック吸収体を用いた波長選択型非冷却赤外線センサの優れた点は以下のようにまとめられる。

- (1) 表面周期構造のみによって検知波長が制御可能
- (2) 集積化が容易
- (3) 多波長検知が可能
- (4) 波長分解能が高い
- (5) 構造揺らぎの影響が小さい

本稿では中赤外域を対象としたが、理論的にはさらに長波長赤外域、THz域でも同等の効果がある。赤外波長域のみならず広い波長域における多波長検知が可能と考えられる。プラズモニクスの応用から、非冷却赤外線センサの高機能化による応用範囲の拡大が期待できる。

参 考 文 献

- (1) Vollmer, M., et al.: Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications, Wiley-VHC, Weinheim (2010)
- (2) Gianchandani, Y., et al.: Comprehensive Microsystems, **3**, Elsevier, Amsterdam, 113~163 (2008)
- (3) Takamuro, D., et al.: Development of new SOI diode structure for beyond 17μm pixel pitch SOI diode uncooled IRFPAs, Proc. SPIE, **8012**, 80121E (2011)
- (4) Fujisawa, D., et al.: Two-million-pixel SOI diode uncooled IRFPA with 15μm pixel pitch, Proc. SPIE, **8353**, 83531G (2012)
- (5) Ogawa, S., et al.: Wavelength selective uncooled infrared sensor by plasmonics, Appl. Phys. Lett., **100**, 021111 (2012)
- (6) Raether, H.: Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings, Springer, Berlin (1988)
- (7) Ebbesen, T. W., et al.: Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays, Nature(London), **391**, 667~669 (1998)
- (8) Genet, C., et al.: Light in tiny holes, Nature(London), **445**, 39~46 (2007)
- (9) Pendry, J. B., et al.: Mimicking surface plasmons with structured surfaces, Science, **305**, 847~848 (2004)