

表面プラズモン共鳴の電流検出による 内視鏡先端に搭載可能な超小型分光器の研究

Miniaturized near-infrared photodetector by electrical detection of SPR

2171006



研究代表者

電気通信大学大学院
情報理工学研究所

准教授

菅 哲 朗

[研究の目的]

本研究提案では、これまでにない小型な分光器の実現に取り組む。内視鏡の小型高機能化は、侵襲性の低い病理診断や腹腔鏡手術など、医療の高度化を大きく後押ししており、機械と人間が調和して生活の質を高める技術といえる。さらに近年では、正確迅速ながん特定方法として、内視鏡でがんを蛍光識別する技術が期待を集めている。この方法では、蛍光フィルタを内視鏡先端に付けて、がん化した細胞の蛍光を計測して領域を特定する。しかし、これらの方法は簡便であるものの波長分解能が低く、組織同定に限界がある。そこで、内視鏡の識別能力向上をはかるため、高波長分解能でスペクトル計測可能であり、内視鏡先端に搭載可能な、小型分光器の実現を目的とする。

具体的には、可視～近赤外波長帯を対象として、数 mm 角の小型分光器の実現を目標とする。これにより、市販簡易分光器と同等の波長数 nm のスペクトル分解能の実現を目標として、研究に取り組んだ。従来型の分光器は回折により光を波長ごとに分けるため、波長分離能を得るためには一定の光路長が必要であり、小型化に限界があった。本提案では、表面プラズモン共鳴が特定の共鳴条件（波長・入射角度）のみでシャープに生じる特性を利用して、光スペクトルを電流計測する半導体 MEMS センサを考案した。この方法を用いれば、センサ表面のみ

で分光計測が完結するため、光路を要せず、大幅な小型化が可能となり、目標達成を見込むことができる。

[研究の内容, 成果]

本研究では、まず分光用デバイスと測定回路の一体化を行い、低ノイズでの信号測定を実現し、1200 nm から 1600 nm までの広範囲な近赤外計測の実現可能性を評価した。本研究で使用した分光器の構成を図 1 に示す。周辺の媒質は空気を想定している。分光器は n 型シリコ

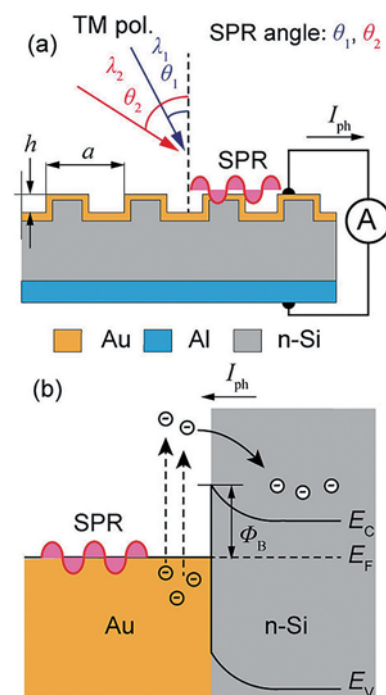


図 1 デバイス動作原理

ン基板と、その上に形成された金の一次元回折格子からなる。デバイスに波長 λ のTM (Transverse Magnetic) 光が入射すると、入射光は回折格子により回折を受ける。これにより、回折した入射光は以下の式 (1) のSPRの共鳴条件を満足し、SPRを励起可能となる。

$$\frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_{\text{air}}} \sin \theta + \frac{2n\pi}{a} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_{\text{air}}\epsilon_{\text{Au}}}{\epsilon_{\text{air}} + \epsilon_{\text{Au}}}} \quad (1)$$

ここで、 ω は入射光の角振動数、 c は光速、 n は回折光の次数、 ϵ_{air} は空気の誘電率、 ϵ_{Au} は金の誘電率である。回折により入射光とSPRの振動数と波数が合致したとき、金表面にSPRが励起される。この関係から、入射波長 λ が違えば、異なる別の入射角度 θ においてSPRが発生する。さらに、SPR発生時に入射光のエネルギーは自由電子の振動に吸収されるので、金の中に高いエネルギーを持つ電子が生じる。金回折格子はn型シリコン上に形成されるので、金とn型シリコンの界面にショットキー障壁が構成される。通常、金とn型シリコンの界面には、高さ $\Phi_b \sim 0.7$ eV (検出限界波長 $1.8 \mu\text{m}$)のショットキー障壁が形成されるので、SPRによって励起された自由電子は障壁を乗り越えて、金回折格子からn型シリコンに流れ込み、電流 I_{ph} はピーク値を示す。

デバイスへの入射角度 θ を変化させると、式 (1) の共鳴条件に変調をかけることができるので、共鳴する波長 λ を変えることができる。強度 P_{λ_i} の単色光照射したとき、あるSPR角 θ_{SRP_j} において計測される電流 i_{ij} から、電流感度 $R_{\lambda_i\theta_{\text{SRP}_j}} = i_{ij}/P_{\lambda_i}$ を定義できる。ピーク値の入射角度 θ_{SRP_j} において計測される光電流 I_{SRP_j} は、入射光に含まれる各波長成分に対応する光電流の和とみなすことができるので、この関係を拡張して、以下の式 (2) の行列表現で示すことができる。

$$\begin{bmatrix} I_{\theta_1} \\ \vdots \\ I_{\theta_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{\lambda_1\theta_1} & \cdots & R_{\lambda_n\theta_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{\lambda_1\theta_k} & \cdots & R_{\lambda_n\theta_k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{\lambda_1} \\ \vdots \\ P_{\lambda_n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

今回、分光対象となる波長帯を近赤外全体に広げたので、従来の方法を拡張して、一般化逆行列を用いると、次の式で入射スペクトルを導出可能となる。

$$\mathbf{P} = (\mathbf{R}^T \mathbf{R})^{-1} \mathbf{R}^T \mathbf{I} \quad (3)$$

なお、 \mathbf{P} は各波長で離散化した強度ベクトル、 \mathbf{R} は応答性行列、 \mathbf{I} は各SPR角度の電流値からなる電流ベクトルである。

この方法を用いて、分光の実現可能性を評価した。まず、 \mathbf{R} マトリクスを作成するために、1200 nm から 1600 nm まで、25 nm 刻みで波長の異なる単波長光を分光器デバイスに照射してその特性を測定した。回転ステージ上にデバイスを固定し、TM 偏光の赤外光を白色レーザー光源から照射し、電気応答測定を行った。スペクトルから導出された \mathbf{R} マトリクスを用いて、1250 nm と 1450 nm の二つの波長からなる光を照射したときのスペクトルを測定した。図 2 (a) は本研究方式で測定したスペクトルであり、図 2 (b) は市販の分光器による測定結果である。強度値にばらつきはあるものの、明瞭に二つの波長が分離して測定されていることが確認でき、提案方法の妥当性が示された。

次に、素子のMEMS化に取り組んだ。図 3 (a) にデバイスの構成図を示す。金回折格子を薄いn型Siの板の上に構成する。そして、その板を蛇腹状の2本の足で支えるカンチレバー構造とする。これにより、外部から力を印可することにより、剛性の低い足の部分を回転軸と

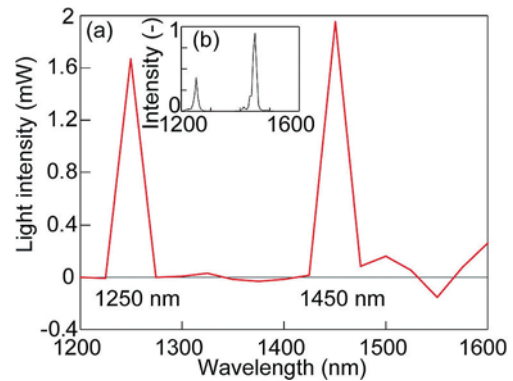


図2 デバイス動作原理 (成果 [6] より改変)

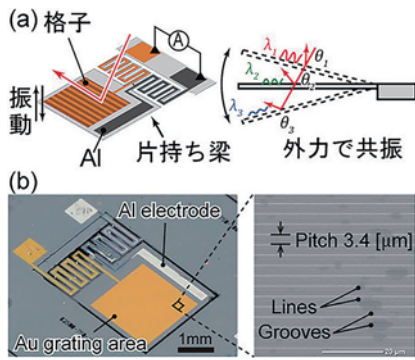


図3 デバイス構造と写真 (成果 [1] [2] より改変)

して、カンチレバーがチルトするので、入射角度を変調可能とすることができる。

試作には、SOI (Silicon On Insulator) 基板 (デバイス層 25 μm , ボックス層 1.5 μm) を用いたバルクマイクロマシニングの技術を用いた。まず、デバイス層に RIE (Reactive Ion Etching) により、ピッチ 3.4 μm , 高さ 100 nm の矩形断面の格子を構成した。その上から金を 100 nm 成膜することで、格子表面を覆い、SPR 励起可能な金属回折格子を製作した。次に、金パターンの脇に、アルミニウム薄膜を成膜し、カソード電極とした。デバイス層を RIE によりカンチレバー構造に形成し、背面のハンドリング層とボックス層をそれぞれ Deep RIE とフッ酸蒸気エッチングにより取り除き、カンチレバー構造を得た。試作したデバイスの写真を図 3 (b) に示す。回折格子の区画は 2 mm \times 2 mm である。蛇腹状の足の上には、アノード電極である金、カソード電極であるアルミニウムの配線が形成されている。

片持ち梁構造の変形により、SPR 励起が変調可能であるかを確認するために図 4 (a) (b) の実験系を構築した。背面からカンチレバーの機械的共振周波数の音波をスピーカで照射することにより、カンチレバーを駆動した。予備的な実験により、共振周波数が 610 Hz であることがわかった。足の部分を蛇腹状にすることにより、数 100 Hz の低い共振周波数が得られている。角度振幅を大きくとることが可能となり、共振周波数における最大角度振幅は $\pm 15^\circ$ が得

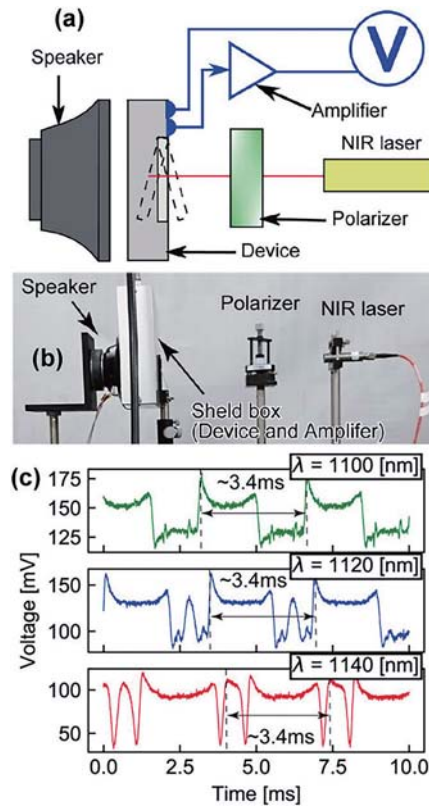


図4 デバイス構造と写真 (成果 [1] [2] より改変)

られることがわかった。これは、SPR の走査角としては十分な幅である。

この時、単一波長の近赤外レーザー光を照射し、電気的応答を計測した。実験の結果を図 4 (c) に示す。異なる波長の光を照射した場合、時間軸に対して異なる位置にピークが位置することがわかり、SPR に特有の応答が得られている。また、その時間周期は、照射している音波の周期と一致している。以上により、MEMS デバイスにおいて SPR を励起する入射角度を変調可能であることがわかった。

[今後の研究の方向, 課題]

本研究によって、分光を近赤外領域全体に広げることが可能となり、また、小型デバイス化が実現可能であることの確認ができた。今後は、研究の最終的な目的である超小型分光器を実現するために、MEMS 素子における分光実験を進める。また、分光性能を上げるためには、素

子の光感度を高める必要があることが判明した。半導体構造再設計を含めた最適化を図り、感度とS/Nを向上させて、より実用的な素子を実現したいと考えている。

本助成金により、非常に充実した研究を進めることができた。ここに感謝を申し上げ、今後のさらなる研究につなげたい。

[成果の発表, 論文等]

- [1] M. Oshita, H. Takahashi, and T. Kan, "Miniaturization of a grating-based SPR type near-Infrared Spectrometer by using vibration of a MEMS cantilever," Proc. of IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2018), Belfast, UK, January, 2018
- [2] 大下雅昭, 高橋英俊, 菅哲朗: SPR 検出のための Au 回折格子を備えた MEMS カンチレバーの振動を用いた近赤外分光器の小型化, 日本機械学会関東支部 第 24 期総会・講演会, 講演番号 OS0301, 調布 (March, 2018)
- [3] 出納優, 大下雅昭, 菅哲朗, "金回折格子を有するショットキー型光検出器による赤外分光システム," 日本機械学会関東学生会 第 57 回学生員卒業研究発表講演会, 講演番号 1214, 調布 (March, 2018)
- [4] 出納優, 大下雅昭, Gaulier Thomas, 安食嘉晴, 菅哲朗: 近赤外域を対象としたプラズモン光検出型分光法, 第 9 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 30am3-PN-29, 札幌 (Nov., 2018) 日本機械学会若手優秀講演フェロー賞
- [5] 大下雅昭, 高橋英俊, 菅哲朗, "プラズモニック金回折格子を備えた振動 MEMS による近赤外分光器," 第 9 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 30pm4-PN-60, 札幌 (Nov., 2018) 日本機械学会マイクロ・ナノ工学部門若手優秀講演表彰
- [6] Y. Suido, Y. Yamamoto, G. Thomas, Y. Ajiki, T. Kan, "Extension of the Measurable Wavelength Range for a Near-Infrared Spectrometer Using a Plasmonic Au Grating on a Si Substrate," Micro-machines, vol. 10, no. 6, art. no. 403, 2019.