

THz帯Kretschmann型表面プラズモン共鳴導波 路センサ

光武, 功太 / MITSUTAKE, Kota

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

61

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

2

(発行年 / Year)

2020-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00022864>

THz帯 Kretschmann 型表面プラズモン共鳴導波路センサ

A KRETSCHMANN-TYPE SURFACE PLASMON RESONANCE WAVEGUIDE SENSOR IN THE TERAHERTZ REGION

光武功太

Kota MITSUTAKE

指導教員 柴山純

法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻修士課程

We propose a surface plasmon resonance (SPR) waveguide sensor based on the Kretschmann configuration in the THz region. First, the sensor structure is reduced to a three-layer model, and the reflectance is estimated using the Fresnel equation. The angle of incidence of the waveguide is determined to be 45° , where the reflectance of the three-layer model becomes minimum. Next, we calculate the SPR response of the waveguide sensor using the finite-difference time-domain (FDTD) method. It is shown that the absorption peak of the SPR occurs at a specific frequency. In addition, we investigate the SPR response with respect to temperature changes. The possibility of detecting water temperature is shown with high sensitivity.

Key Words : Surface plasmon resonance (SPR) sensor, Kretschmann configuration, Otto configuration, Terahertz (THz) wave

1. はじめに

表面プラズモン共鳴 (SPR) 現象は主に光学センサ分野で応用が進められている。代表的なものに Kretschmann 構造を用いた SPR センサがあり、高感度かつリアルタイムに試料を測定することが可能である [1]。しかしながら、Kretschmann 型 SPR センサはプリズムで構成されているため、一般に集積化が困難である。そこで、集積化が可能な導波路型の SPR センサも検討されている [2]。光波帯の SPR センサは、タンパク質-DNA 相互作用や抗原・抗体反応の検出などに利用されている。他方、周波数 1 THz 付近に物質固有の吸収スペクトルが多く存在するため、半導体を用いた THz 帯での SPR センサが検討されてきた [3]。本稿では、Kretschmann 構造を応用した THz 帯における SPR 導波路センサを提案する [4]- [8]。

2. 本論

(1) 構造及び入射角 θ の決定

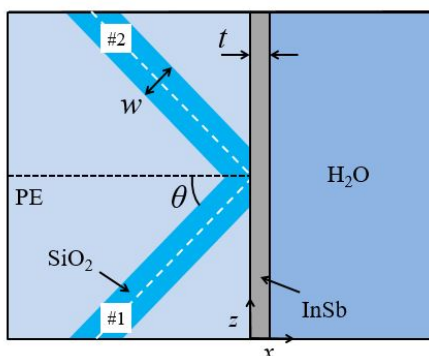


図1 構造図

Kretschmann 型 SPR 導波路センサの構造を図1に示す。コアを SiO₂、基板をポリエチレン (PE) に選び、屈折率をそれぞれ 1.94 と 1.5 とする。導波路の入射角を θ とし、コア幅を

$w = 100 \mu\text{m}$ に選ぶ。センシング部として厚さ $t = 2.0 \mu\text{m}$ の InSb を付加し、その外側には試料として水を与える。InSb の比誘電率を Drude モデル [9]、水を 2 極 Debye モデル [10] として表現する。

まず入射角 θ の決定のために、センサ構造を三層モデルに近似して反射率を見積もる。三層モデルを図2に示す。ここで領域1には図1の導波路を伝搬する TM₀ モードの実効屈折率を与える。InSb の厚さはセンサ構造と同様に $t = 2.0 \mu\text{m}$ とし、温度は 300 K に選ぶ。周波数と入射角を変化させて反射率の計算を行う。反射率の算出には以下の Fresnel の式 [11] を用いる。

$$r_{\text{SP}} = \left| \frac{r_{12} + r_{23} \exp(-j2k_{2z}t)}{1 + r_{12}r_{23} \exp(-j2k_{2z}t)} \right|^2 \quad (1)$$

ここで、 r_{SP} は三層モデルの反射率、 r_{12} は領域1の媒質と InSb の反射係数、 r_{23} は InSb と水の反射係数である。また、 k_{2z} は領域2での z 軸方向の波数ベクトルである。反射係数及び波数ベクトルは以下のように表現される。

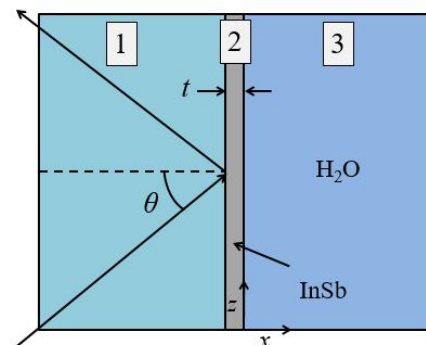


図2 三層モデル

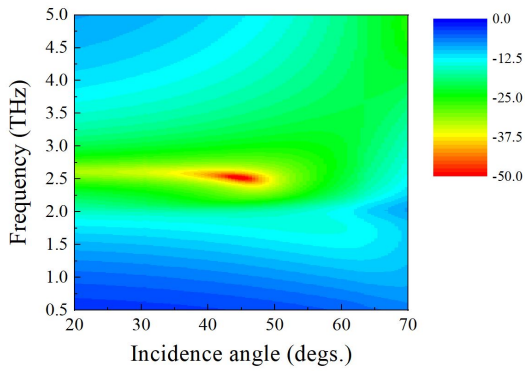


図3 入射角及び周波数に対する反射率

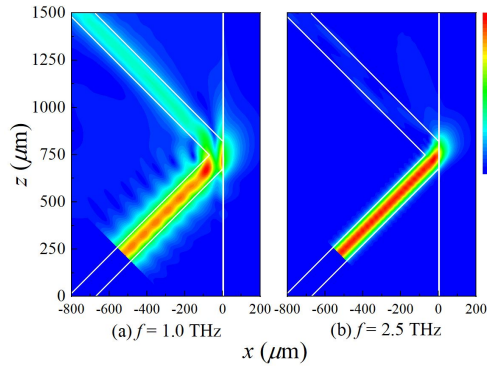


図4 伝搬界分布

$$r_{ij} = \frac{\varepsilon_i k_{jz} - \varepsilon_j k_{iz}}{\varepsilon_i k_{jz} + \varepsilon_j k_{iz}} \quad (2)$$

$$k_{iz} = \frac{\omega}{c} [\varepsilon_i - \varepsilon_1 \sin^2 \theta]^{1/2} \quad (3)$$

ここで, c は光速である.

式 (1) より得られた入射角及び周波数に対する反射率を図3に示す. 入射角を 45° に選んだとき, ピーク周波数において最も反射率の低下することがわかる. 以上よりセンサの導波路の入射角を $\theta = 45^\circ$ に決定する.

(2) FDTD 解析

FDTD 法を用いて図1の導波路センサの解析を行い, SPR 応答を評価する. 入射角は先程決定した $\theta = 45^\circ$ とする. 空間の刻み幅を $\Delta x = \Delta z = 0.2 \mu\text{m}$ に設定する. 周波数 1.0 THz と 2.5 THz における伝搬界分布を図4に示す. ここで温度は 300 K である. 1.0 THz ではパワーの吸収が弱く, 導波路#2 に界の伝搬している様子が見られる. これに対して 2.5 THz ではセンシング部において SPR が生じ, パワーが吸収され導波路#2 に界がほとんど伝搬していない. 以上よりピーク周波数である 2.5 THz において SPR が生じ, 出力パワーが低下することが確認できる.

次に水温検知への可能性を調べるため, 温度が変化した際の特性を評価する. 温度特性を図5に示し, ここで温度は 280 K から 320 K の範囲で 20 K 刻み毎に変化させている. 出力パワーの極小値が温度を上昇させることによって低下していくことがわかる. また, 温度上昇に伴いピーク周波数が高周波側へシフトしている. その変化量は 280 K から 320 K の範囲で 1.05 THz であり, 変化率は 2.63×10^{-2} THz/K である. THz SPR 導波路型センサ [3] の変化率は 7.50×10^{-3} THz/K であり, Kretschmann 型センサは従来の導波路型センサに対して約 3.5 倍の変化率を持つことがわかる. この結果より, 従来のセンサに比べ本センサは感度の高い水温検知が可能であると期待される.

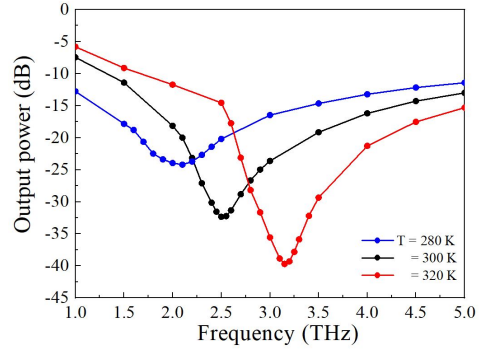


図5 温度特性

3. 結び

THz 帯における Kretschmann 型 SPR 導波路センサを提案した. はじめにセンサ構造を三層モデルに近似し, Fresnel の式を用いて反射率を見積もった. また, 得られた反射率から導波路の入射角を 45° に決定した. FDTD 法を用いて周波数に対する SPR 応答を評価した. SPR が生じることによって, 特定の周波数において出力パワーが低下することを明らかにした. また, 温度を変化させて SPR 応答を評価した. 温度上昇に伴いピーク周波数が高周波側へシフトすることを示し, 従来の導波路センサと比較して感度の 3 倍以上高い水温検知が可能であることを見出した.

参考文献

- 1) J. Homola, S.S. Yee, and G. Gauglitz, "Surface plasmon resonance sensors: Review," *Sens. Actuators B*, vol.54, no.1, pp.3-15, 1999.
- 2) R.D. Harris and J.S. Wilkinson, "Waveguide surface-plasmon resonance sensors," *Sens. Actuators B*, vol.29, pp.261-267, 1995.
- 3) J. Shibayama, K. Shimizu, J. Yamauchi, and H. Nakano, "Surface plasmon resonance waveguide sensor in the THz regime," *J. Lightw. Technol.*, vol.34, no.10, pp.2518-2525, 2016.
- 4) 柴山 純, 光武功太, 山内潤治, 中野久松, "THz 帯におけるクレッチマン型 SPR 導波路センサ," 信学総大, C-15-14, 2018.
- 5) J. Shibayama, K. Mitsutake, J. Yamauchi, and H. Nakano, "A Kretschmann-type surface plasmon resonance waveguide sensor in the terahertz region," *PIERS*, Toyama, p.62, 2018.
- 6) 柴山 純, 光武功太, 山内潤治, 中野久松, "THz 帯におけるクレッチマン型 SPR 導波路センサの FDTD 解析," 信学ソ大, C-15-2, 2018.
- 7) 柴山 純, 光武功太, 山内潤治, 中野久松, "THz 帯における Otto 型 SPR 導波路センサ," 信学総大, C-15-3, 2019.
- 8) 光武功太, 柴山 純, 山内潤治, 中野久松, "THz 帯における Kretschmann 及び Otto 型表面プラズモン共鳴センサ," 信学技報, EST2019-25, pp.101-106, 2019.
- 9) Q. Wang, Q. Tang, D. Zhang, Z. Wang, and Y. Huang, "Tunable terahertz spectral filter based on temperature controlled subwavelength InSb grating," *Superlattice Microst.*, vol.75, pp.955-961, 2014.
- 10) H.J. Liebe, G.A. Hufford, and T. Manabe, "A model for the complex permittivity of water at frequencies below 1 THz," *Int. J. Infrared Millimeter Waves*, vol.12, no.7, pp.659-675, 1991.
- 11) R. V. Andoloro, H. J. Simon, and R. T. Deck, "Temporal pulse reshaping with surface waves," *Appl. Opt.*, vol.33, no.27, pp.6340-6347, 1994.