# 法政大学学術機関リポジトリ

## HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-01-14

# 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 SiO<sub>2</sub>, 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 µm に選ぶ. センシング部として厚さ t = 2.0 µm 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  $\theta$  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 TM<sub>0</sub> 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  $t = 2.0 \ \mu m$ 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.

$$r_{\rm sp} = \left| \frac{r_{12} + r_{23} \exp(-j2k_{2z}t)}{1 + r_{12}r_{23} \exp(-j2k_{2z}t)} \right|^2 \tag{1}$$

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

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

$$k_{iz} = \frac{\omega}{c} [\varepsilon_i - \varepsilon_1 \sin^2 \theta]^{\frac{1}{2}}$$
(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° 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°とする. 空間 の刻み幅を  $\Delta x = \Delta z = 0.2 \ \mu m$  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 カ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<sup>-2</sup> THz/K である. THz SPR 導波路型センサ [3] の変化率は 7.50 × 10<sup>-3</sup> 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.



#### 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

- J. Homola, S.S. Yee, and G. Gauglitz, "Surface plasmon resonance sensors: Review," *Sens. Actuators B*, vol.54, no.1, pp.3-15, 1999.
- R.D. Harris and J.S. Wilkinson, "Waveguide surfaceplasmon resonance sensors," *Sens. Actuators B*, vol.29, pp.261-267, 1995.
- J. Shibayama, K. Shimizu, J. Yamauchi, and H. Nakano, "Surface plasmon resonace 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.
- 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.
- 等山 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- R. V. Andaloro, H. J. Simon, and R. T. Deck, "Temporal pusle reshaping with surface waves," *Appl. Opt.*, vol.33, no.27, pp.6340-6347, 1994.