

### InSbクロスダイポールを用いたTHzセンサの 性能指数の改善

中野, 純 / NAKANO, Jun

---

(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/10.15002/00022855>

## InSb クロスダイポールを用いた THz センサの性能指数の改善

## IMPROVEMENT OF A FIGURE OF MERIT OF THE THz SENSOR WITH INSB CROSSED DIPOLES

中野純

Jun NAKANO

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 analyze the terahertz (THz) sensor with indium antimonide (InSb) crossed dipoles using the finite-difference time-domain method with the periodic boundary condition. The full width at half minimum (FWHM), sensitivity, and figure of merit (FoM) are used to quantitatively evaluate the sensor performance. To improve the FoM, we investigate the transmittance as a function of frequency with respect to changes in the thickness of InSb crossed dipoles. As the thickness is decreased, the peak frequency shifts to the low frequency side and the FWHM becomes narrow. Furthermore, we investigate the FoM as a function of the refractive index of analyte. It is shown that the sensor with InSb provides a high FoM, compared to the one with aluminium crossed dipoles.

**Key Words** : Indium antimonide (InSb), Terahertz (THz) wave, Finite-difference time-domain (FDTD) method, Figure of merit (FoM)

## 1. はじめに

テラヘルツ (THz) 帯 [1] において, 半導体のアンチモン化インジウム (InSb) による表面プラズモン共鳴を利用した種々のセンサが考案されている [2]-[8]. 他方, 文献 [9] ではアルミニウムを採用したクロスダイポール型 THz センサが提案されている. この文献では, 試料の屈折率変化によってピーク周波数がシフトすることが報告されている. しかし, センシング特性を向上させるために, 厚い試料が必要である. そこで, 我々はアルミニウムに代わり InSb によるクロスダイポールを用いた THz センサを提案し, センシング特性を評価した [10]. アルミニウムを用いたセンサと比べ, 高い性能指数 (FoM) が得られることを示し, InSb をセンサに用いる有効性を明らかにしてきた [11]. さらにクロスダイポールの長さ及び幅を変化させた場合も検討を行った [12]. しかし, クロスダイポールの厚さを変化させた場合の調査は行っていない. 本稿では, InSb を用いたクロスダイポールの厚さを変化させた際のセンシング特性を議論する.

## 2. 本論

InSb クロスダイポールを用いた THz センサの構造を図 1 に示す.  $x$  と  $y$  方向に周期境界条件 [13] を適用し, 構造の 1 周期 ( $\Lambda = 40 \mu\text{m}$ ) のみを有限差分時間領域 (FDTD) 法で解析する. 誘電体基板 (PE) の屈折率を  $n_{\text{PE}} = 1.5$ , 厚さを  $h_{\text{PE}} = 20 \mu\text{m}$  とする. InSb クロスダイポールの長さを  $l_c = 37 \mu\text{m}$ , 幅を  $w_c = 7 \mu\text{m}$  に固定し, 厚みを  $t_c$  と定義する. 分散性媒質である

InSb の誘電率は Drude モデルで表現し, Trapezoidal Recursive Convolution 法 [14] で FDTD 法に組み込む. センサ上部を試料で満たした状態とし, 屈折率を  $n_a$  と定義する. 構造上部の試料層より一様な振幅を持つ  $E_y$  偏波を垂直に入射し, 構造下部の空気層で透過波を観測する. 空間の刻み幅を  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.25 \mu\text{m}$  に設定する.

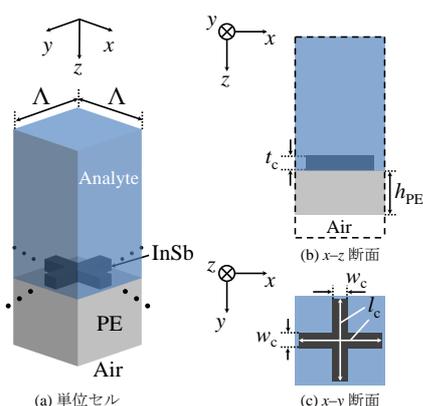


図 1 構造

特性の評価方法として用いる FoM の算出式 [9] を以下に示す.

$$\text{FoM} = \frac{S}{\text{FWHM}} \quad (1)$$

ここで,  $S$  は感度, FWHM はスペクトルの半値全幅を表している. 高性能なセンサには狭いスペクトル幅と高い感度が必要とされる.

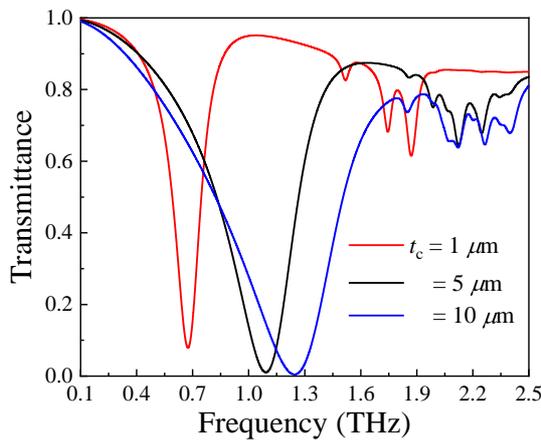


図 2  $t_c$  を変化させた際の周波数特性

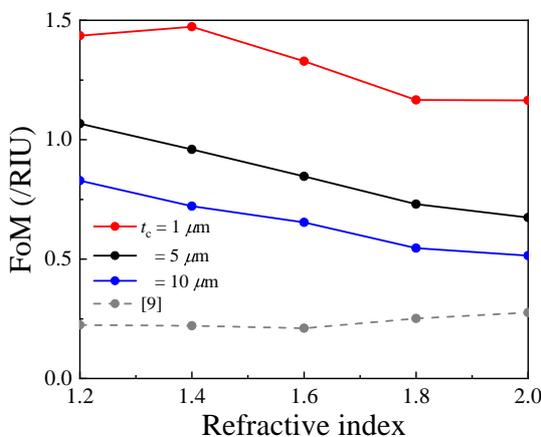


図 3  $n_a$  を変化させた際の FoM

はじめに、試料の屈折率を  $n_a = 1.0$  に固定し、透過特性を評価する。図 2 に  $t_c$  を変化させた場合の周波数特性を示す。 $t_c$  を小さくしていくとピーク周波数が低周波側へシフトすることがわかる。さらに、透過スペクトルが狭帯域となることも確認できる。FWHM は  $t_c = 1 \mu\text{m}$  で  $0.169 \text{ THz}$  であり、 $t_c = 5 \mu\text{m}$  の場合 [11] の  $0.443 \text{ THz}$  より約 60 % 狭くなる。

次に、屈折率を変化させた際のセンシング特性を調査する。図 3 に  $t_c = 1, 5, 10 \mu\text{m}$  における  $n_a$  を変化させた際の FoM を示す。比較のため、クロスダイポールにアルミニウムを用いた場合 [9] の結果を灰色の破線として併記している。厚さを薄くすることで半値全幅が狭くなり、 $t_c = 1 \mu\text{m}$  で 1.2 以上の高い FoM の得られることがわかる。また、いずれの厚さにおいてもアルミニウムを用いた場合より高い FoM の得られることが確認できる。

### 3. 結び

InSb クロスダイポールを用いた THz センサを周期境界条件を用いた FDTD 法により解析した。クロスダイポールの厚さを薄くすることで、半値全幅が狭くな

ることを明らかにした。アルミニウムを用いたセンサと比べ、InSb を用いれば高い FoM の得られることを示した。

### 参考文献

- 1) J. Shibayama, J. Nakano, J. Yamauchi, and H. Nakano, "Basic study of a terahertz absorber composed of metal and polyimide layers," in *Proc. Progress in Electromagnetic Research Symposium*, Toyama, p. 1693, Aug. 2018.
- 2) 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, Nov. 2014.
- 3) B. X. Wang and G. Z. Wang, "Temperature tunable metamaterial absorber at THz frequencies," *J. Mater. Sci.*, vol. 28, no. 12, pp. 8487-8493, Feb. 2017.
- 4) W. Li, D. Kuang, F. Fan, S. Chang, and L. Lin, "Subwavelength B-shaped metallic hole array terahertz filter with InSb bar as thermally tunable structure," *Appl. Opt.*, vol. 51, no. 29, pp. 7098-7102, Oct. 2012.
- 5) X. Luo, X. Zhai, L. Wang, W. Lin, and J. Lin, "Tunable terahertz narrow-band plasmonic filter based on optical Tamm plasmon in dual-section InSb slot waveguide," *Plasmonics*, vol. 12, no. 2, pp. 509-514, June 2017.
- 6) J. Zhu, J. Han, Z. Tian, J. Gu, Z. Chen, and W. Zhang, "Thermal broadband tunable terahertz metamaterials," *Opt. Commun.*, vol. 284, no. 12, pp. 3129-3133, June 2011.
- 7) X. Dai, Y. Xiang, S. Wen, and H. He, "Thermally tunable and omnidirectional terahertz photonic bandgap in the one-dimensional photonic crystals containing semiconductor InSb," *J. Appl. Phys.*, vol. 109, no. 5, pp. 053104-1-6, March 2011.
- 8) 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, May 2016.
- 9) P. Rodríguez-Ulibarri, S. A. Kuznetsov, and M. Beruete, "Wide angle terahertz sensing with a cross-dipole frequency selective surface," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 108, pp. 111104-1-5, March 2016.
- 10) 山崎天弥, 柴山純, 山内潤治, 中野久松, "InSb クロスダイポールを用いた THz センサの解析," 信学総大, C-15-23, March 2018.
- 11) 柴山純, 中野純, 山内潤治, 中野久松, "InSb クロスダイポールを用いた THz センサのセンシング特性," 信学総大, C-15-5, March 2019.
- 12) 中野純, 柴山純, 山内潤治, 中野久松, "InSb 素子を用いた THz センサの比較検討," 信学技報, vol. 119, no. 407, EST2019-97, pp. 91-96, Jan. 2020.
- 13) A. Taflov and S. C. Hagness, *Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method*, Norwood, MA: Artech House, 2005.
- 14) J. Shibayama, R. Ando, A. Nomura, J. Yamauchi, and H. Nakano, "Simple trapezoidal recursive convolution technique for the frequency-dependent FDTD analysis of a Drude-Lorentz model," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 21, no. 2, pp. 100-102, Jan. 2009.