

テラヘルツ帯におけるInSb球配列のFDTD解析

黒田, 匠真 / KURODA, Takuma

(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. 理工学研究科編

(巻 / Volume)

63

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

2

(発行年 / Year)

2022-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00025328>

テラヘルツ帯における InSb 球配列の FDTD 解析

FDTD ANALYSIS OF AN INSB SPHERE ARRAY IN THE TERAHERTZ REGIME

黒田匠真

Takuma KURODA

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 investigate a periodic array of an InSb sphere on a substrate at terahertz frequencies using the three-dimensional finite-difference time-domain method. We evaluate the transmission characteristics, paying attention to the resonance frequency. It is shown that the guided mode and surface plasmon resonances occur at the frequency dips.

Key Words : Guided-mode resonance (GMR), Surface plasmon polariton (SPP), Terahertz (THz) wave, Finite-difference time-domain (FDTD) method

1. まえがき

光波帯において、金属と誘電体の境界に表面プラズモンポラリトン (SPP) の励起することが知られており、様々なデバイスへの応用が検討されている。しかし、テラヘルツ (THz) 帯では電磁界の金属への界の染み込みが極めて少ないため、SPP が励起されない。他方、THz 帯において負の誘電率を有する半導体として、アンチモン化インジウム (InSb) [1] が挙げられる。そこで、我々は THz 帯において InSb でコートされた誘電体円柱を解析し、透過特性を評価した [2]。導波モード共鳴 (GMR) 及び表面プラズモン共鳴 (SPR) が生じ、基板内に界が結合することを明らかにした。しかしながら、文献 [2] では 2 次元構造のみの検討で、3 次元構造における具体的な検討には至っていなかった。

本稿では、THz 帯における誘電体基板上に InSb 球を配置した周期構造の基本特性を調査する [3]-[12]。

2. 本論

(1) 構造と計算手法

解析する構造を図 1 に示す。x と y 方向に対する無限周期構造の 1 周期のみ ($\Lambda = 168 \mu\text{m}$) を示している。誘電体基板を SiO_2 に選び、比誘電率を 1.94^2 とする。なお、 SiO_2 は THz 帯では僅かに損失性となるが、本稿では無損失の媒質として扱う。InSb 球の半径を $r = 28 \mu\text{m}$ に選び、基板の厚さを $t = 140 \mu\text{m}$ とする。分散性媒質となる InSb の比誘電率を Drude モデル [1] で表現し、温度を 300 K に選ぶ。解析には周期境界条件を適用した FDTD 法 [13] を使用し、1 周期のみを取り扱う。構造上部より一様な振幅を持つ E_x 偏波を入射し、構造下部で透過波を観測する。空間の刻み幅を $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 1.4 \mu\text{m}$ に設定する。

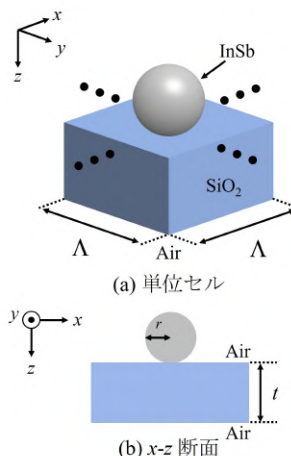


図 1 構造

(2) 透過特性

図 2 に透過特性を示す。複数の透過ディップの生じることがわかる。ディップ周波数は 0.997, 1.04 及び 1.21 THz である。次にディップ周波数における界分布を調査する。図 3 に E_x 成分の界分布を示す。0.997 THz の場合、y-z 断面において、入射された平面波が基板の導波モードに結合し、基板の厚み方向に 0 次の形状を持つ界となる。その際、y 方向に定在波が観察される。1.04 THz では、x-z 断面において、入射波が基板内で 1 次の形状を持つ界に結合する。この時、x 方向に定在波が生じる。1.21 THz では x-z 断面において InSb と空気の界面に強い SPR が生じ、界は基板内で垂直方向に振動する。y-z 断面では、GMR が生じ、基板内に結合する界は 1 次モードである。

本構造では、球により発生する空間高調波の一つが基板の導波モードの伝搬定数と同期する場合に、界は導波モードとして伝搬する。そのときの位相整合条件

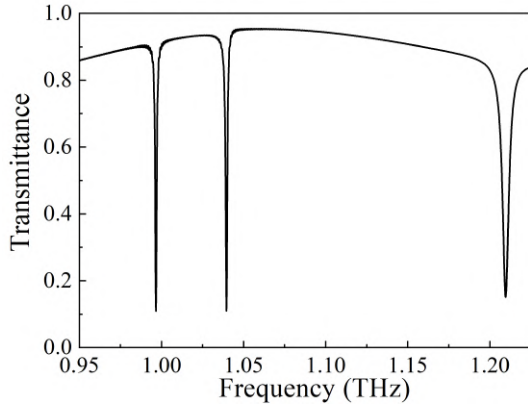


図 2 透過特性

は以下の式で表される．

$$\beta_{\text{in}} = \beta_0 + p \frac{2\pi}{\Lambda} x + q \frac{2\pi}{\Lambda} y \quad (1)$$

ここで、 β_{in} は入射波の波数ベクトル、 β_0 は基板内のモードの波数ベクトルに近い値、 p と q は回折次数、 $\frac{2\pi}{\Lambda} x$ と $\frac{2\pi}{\Lambda} y$ はグレーティングベクトルである．垂直入射の場合、 β_{in} は無視できるため、 $\beta_{\text{in}} = 0$ とする．0.997 THz では基板内の界が x 方向に伝搬しないため、式 (1) において x 方向を無視する必要がある．したがって、式 (1) は

$$\beta_0 + q \frac{2\pi}{\Lambda} y = 0 \quad (2)$$

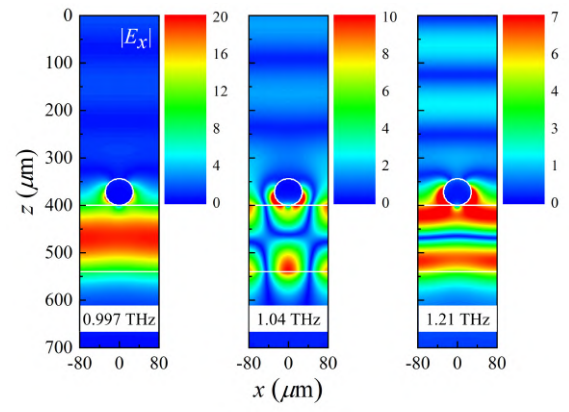
となる．ここで、 $\beta_0 = \beta_0 y$ である．0.997 THz と 1.21 THz では $q = \pm 1$ で式 (2) の位相整合条件が成立する．1.04 THz では界は y 方向に伝搬せず、 x 方向に伝搬する．この場合、基板の 1 次モードの伝搬定数は x 方向のグレーティングベクトルより小さくなる．しかしながら、図 3(a) より、球の下に局在する SPP の影響により伝搬定数の値が大きくなり、GMR が生じると考えられる．

3. 結び

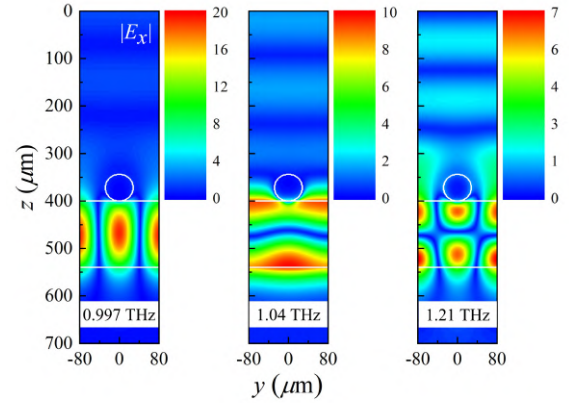
本稿では、THz 帯における誘電体基板上に InSb 球を配置した周期構造の基本特性を調査した．ディップ周波数における界分布を評価し、入射波が基板の固有モードに結合する様子を明らかにした．

参考文献

- Q. Wang, Q. Tang, D. Zhang, Z. Wang, and Y. Huang, “Tunable terahertz spectral filter based on temperature controlled subwavelength InSb grating,” *Superlattice Microsc.*, vol. 75, pp. 955-961, 2014.
- J. Shibayama, S. Takahashi, J. Yamauchi, and H. Nakano, “Fundamental investigation of a grating consisting of InSb-coated dielectric cylinders on a substrate in the THz regime,” *IEICE Trans. Electron.*, vol. E103-C, no. 11, pp. 567-574, 2020.
- 柴山 純, 黒田匠真, 高橋澄玲, 中野 純, 山内潤治, 中野久松, “テラヘルツ帯における InSb コート誘電体球配列の FDTD 解析,” 信学総大, C-15-7, 2020.
- 柴山 純, 黒田匠真, 山内潤治, 中野久松, “InSb コート誘電体球配列の THz センサへの応用,” 信学ソ大, C-15-10, 2020.



(a) x-z 断面



(b) y-z 断面

図 3 界分布

- 柴山 純, 黒田匠真, 山内潤治, 中野久松, “InSb コート誘電体球配列に対する傾斜入射特性,” 信学総大, C-15-18, 2021.
- J. Shibayama, T. Iwamoto, T. Kuroda, J. Yamauchi and H. Nakano, “DCP-FDTD analysis of an InSb-coated dielectric cylinder array in the THz regime,” *2021 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium*, pp. 1-2, Hamilton, 2021.
- 岩本哲弥, 柴山 純, 黒田匠真, 山内潤治, 中野久松, “THz 帯における InSb コート誘電体円柱配列の DCP-FDTD 解析,” 信学ソ大, CS-1-2, 2021.
- T. Kuroda, J. Shibayama, J. Yamauchi, and H. Nakano, “Analysis of an InSb-coated dielectric sphere array in the THz region,” in *Proc. Progress in Electromagnetic Research Symposium*, Hangzhou, 2021.
- 黒田匠真, 柴山 純, 山内潤治, 中野久松, “テラヘルツ帯における誘電体基板上の InSb 球配列の FDTD 解析,” 信学技報, vol. 121, no. 358, EST2021-92, pp. 173-177, 2022.
- 黒田匠真, 柴山 純, 山内潤治, 中野久松, “InSb 球配列における導波モード共鳴時のパワー評価,” 信学総大, C-15-10, 2022.
- 柴山 純, 竹谷和真, 黒田匠真, 山内潤治, 中野久松, “偏波回転角を考慮したテラヘルツ帯における InSb 球配列の FDTD 解析,” 信学総大, C-1-6, 2022.
- J. Shibayama, T. Kuroda, J. Yamauchi, and H. Nakano, “Analysis of an InSb sphere array on a dielectric substrate in the THz regime,” *IEICE Trans. Electron.*, vol. E105-C, no. 4, 2022.
- A. Taflov and S. C. Hagness, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*, Norwood, MA: Artech House, 2005.