

Differential Transmission Spectra of Terahertz Metamaterial Resonances for Sensing Microorganisms

S. J. Park and Y. H. Ahn[†]

Department of Physics and Department of Energy Systems Research, Ajou University, Suwon 16499, Korea

(Received October 6, 2016; Revised manuscript November 7, 2016; Accepted November 8, 2016)

Metamaterials operating in the terahertz frequency range show promising potential for use in highly sensitive microbial sensors that are capable of effectively detecting microorganisms in the ambient environment. We were able to detect extremely small numbers of microorganisms by measuring the differential transmission spectra (DTS) of the metamaterial resonances. This was possible because their sizes are on the same scale as the microgaps of the terahertz metamaterials. DTS depend critically on the number of microorganisms placed in the gap area, and their dielectric constant. In addition, these metamaterial microbial sensors are reusable, because the microorganisms can be completely removed by fungicide solution. Finite-difference time-domain simulations successfully reproduce our experimental data.

Keywords: Terahertz Spectroscopy, Subwavelength structures, Metamaterial

OCIS codes: (300.6495) Spectroscopy, terahertz; (050.6624) Subwavelength structures; (160.3918) Metamaterials

미생물에 의한 테라헤르츠 메타물질의 공명주파수 변화

박세준 · 안영환[†]

경기도 수원시 영통구 월드컵로 206 아주대학교
☎ 16499 아주대학교 에너지시스템학과 (물리학과)

(2016년 10월 6일 받음, 2016년 11월 7일 수정본 받음, 2016년 11월 8일 게재 확정)

마이크로 갭을 포함하는 테라헤르츠 메타물질을 이용하면 공명주파수 근방의 투과 스펙트럼 변화를 관측함으로써, 높은 감도로 마이크로 크기의 곰팡이, 박테리아 등의 미생물을 검출할 수 있다. 공명주파수의 스펙트럼 변화폭은 미생물의 굴절률 및 마이크로 갭에 위치한 미생물의 개수에 크게 의존한다. 테라헤르츠 메타물질을 통해 다양한 미생물들을 검출하였으며, 또한, 세척 과정을 통해 센서의 재사용이 가능함을 보였다. 유한차분 시간영역 전산모사를 이용하여 메타물질 공명주파수의 미생물 개수 및 굴절률 의존성을 확인하고 실험결과를 검증하였다.

Keywords: 테라헤르츠 분광학, 파장한계 구조, 메타물질

OCIS codes: (300.6495) Spectroscopy, terahertz; (050.6624) Subwavelength structures; (160.3918) Metamaterials

I. 서 론

최근 메타물질을 응용한 연구가 전 세계적으로 활발히 수행되고 있지만, 실질적인 응용가능성 측면에선 큰 진전을 보이지 않고 있다. 최근 본 연구진은 테라헤르츠 영역에서 소량의 미생물도 검출할 수 있는 고감도 메타물질 바이오 센서를 제안하였다^[1]. 메타물질(metamaterial)은 일반적인 경우 금속으로 만들어지는 인공구조이며 특정한 공진기 구조를 갖게끔 제작된다. 따라서 특정 주파수 대역에서 메타물질 공진

기와 빛이 상호작용하여 공명 특성을 나타내게 된다^[2,3]. 메타물질은 전류가 흐를 때 전하들이 모일 수 있는 전하용량(Capacitance)을 지니고 있는 Capacitor, 고리 모양을 이용해 전류가 흐를 때 자기적 반응을(Inductance) 일으키는 Inductor, 그리고 금속 자체가 지니고 있는 Resistor로 구성된다. 이 때 메타물질의 특성은 RLC 회로의 특성을 그대로 따르게 되는데 RLC 회로는 유도 리액턴스와 정전 리액턴스의 값이 같을 때 임피던스가 최소가 되어 회로에 흐르는 전류가 최대가 되게 된다. 이것을 우리는 RLC 공명이라고 부른다. 메타물질

[†]E-mail: ahny@ajou.ac.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

과 THz파의 상호작용을 통해 표면전류가 생성되면 RLC 공명이 일어난다^[4,5]. 따라서, 공명 흡수 주파수는 메타물질의 캐패시턴스와 인덕턴스에 의해 결정 되는데 이 때, 캐패시턴스는 메타물질 갭 구조(캐패시터)의 유전상수에 크게 의존한다. 즉, 메타물질 갭 구조에 유전물질이 존재하게 되면 메타물질의 공명주파수 부근에서 투과도가 크게 변하며, Differential Transmission Spectra(DTS)를 측정하면 메타물질에 도포된 미생물에 의한 변화를 매우 정밀하게 관측할 수 있게 된다^[1,6,7].

II. 시료제작 및 실험방법

본 연구에서는 Si 기판에 포토리소그래피 공정과 이빔증착 공정을 거쳐 메타물질 미생물 센서를 제작하였다. 우선 포토리소그래피 공정에 앞서 고저항 Si 기판을 Piranha 용액(황산과 과산화수소의 혼합물)에 담귀 표면 세척을 한 뒤 스펀코팅법을 통해 기판 위에 GXR-601 positive resist를 도포하였다. 포토리소그래피와 디벨롭핑 공정을 거친후 이빔증착기를 이용해 크롬 3 nm, 금 97 nm를 증착하였으며, lift off 공정을 통해 소자를 완성하였다. 제작된 메타물질 구조는 가로 세로 길이가 36 μm , 단위 구조의 주기가 86 μm , 갭 크기가 3 μm 이다. 미생물의 경우 penicillium, yeast, E.coli 3 종을 각각의 배지 위에 Streaking 기법을 통해 도포하고 섭씨 37도에서 이틀간 성장시켰다. 본 실험에서는 성장된 미생물을 메타물질 위에 면봉을 이용해 도포하고 테라헤르츠파 투과 실험을 수행하기 위해서 테라헤르츠파 시분해 분광 시스템을 사용하였다. 그림 1(a)에서 보이는 바와 같이 모드잠금된 Ti:Sapphire 펄스 레이저를 이용해 GaAs 광전도 안테나에 조사하여 테라헤르츠파를 발생 시킨 뒤 발생된 테라헤르츠파가 메타물질 센서를 통과하여 ZnTe crystal에 입사할 때 Electro-Optic 샘플링을 통해 테라헤르츠파를 검출하였다.

III. 실험 결과 및 토의

그림 1(b)는 미생물이 도포된 메타물질 센서 표면의 SEM 이미지이다. 이미지로부터 메타물질 갭 구조에 위치한 미생물들을 확인할 수 있으며, 미생물의 크기가 메타물질 갭 구조의 크기에 상응하는 것을 알 수 있다. 그림 2에서는 다양한 미생물 즉, penicillium, yeast, 그리고 E.coli에 대하여 일 반적인 Si 기판 위에 도포하였을 경우와 메타물질 센서 위에 도포하였을 경우의 검출 감도를, DTS 측정을 통해 비교하였다. T를 투과도로 정의할 때, DTS는 $-\Delta T/T$ 로 표현된다. 그림 2(a)-(c)로부터 Si 기판 위에 미생물을 도포하는 경우에는 DTS가 크게 변하지 않는 것을 볼 수 있다. 반면, 메타물질 센서 위에 미생물을 도포한 경우 그림 2(d)-(f)에서 보이는 바와 같이 공명주파수 부근에서 DTS값이 큰 폭으로 바뀌는 것을 확인할 수 있었다. 이 때, 투과도 변화량과 DTS 최대 변화 위치에서의 진동수 편이 정도는 미생물의 유전상수 값의 크기에 비례하게 된다. 이는 메타물질 센서 갭 구조에 미

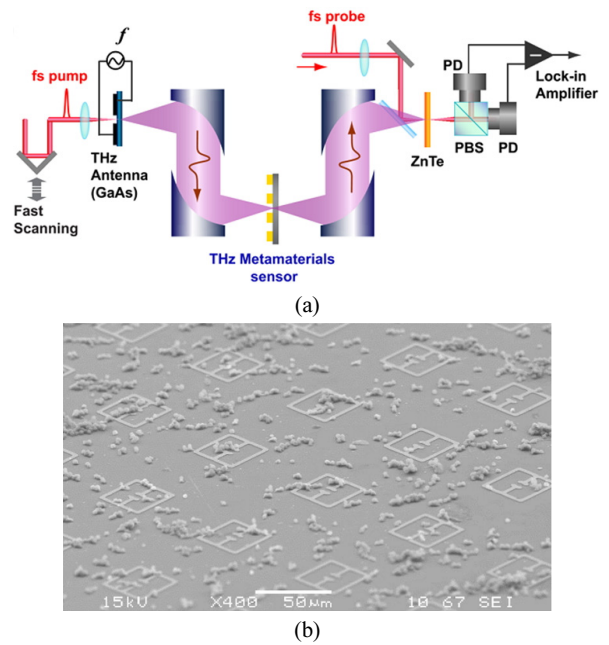


Fig. 1. (a) Schematic illustration of THz-TDS system. (PD: photodiode, PBS: polarized beam splitter) (b) SEM image of metamaterials coated by microorganisms.

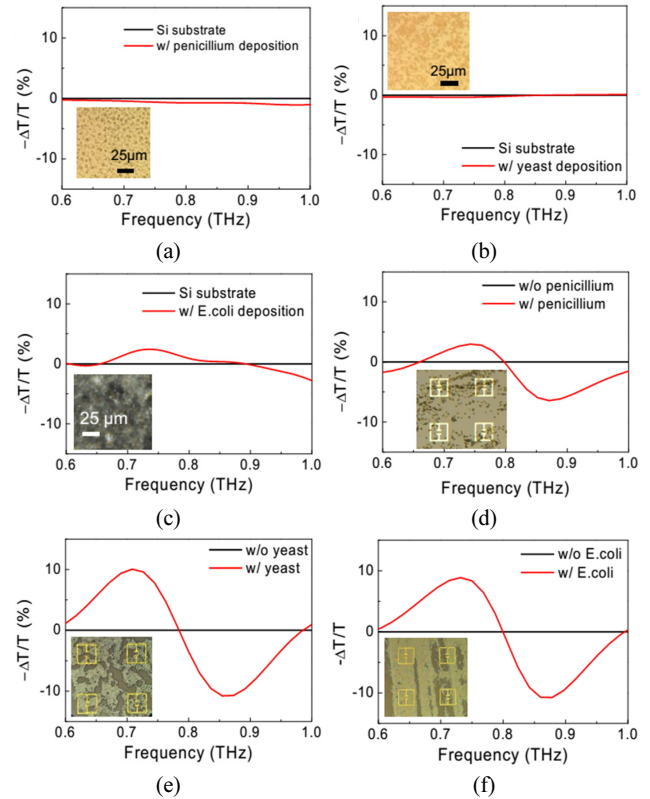


Fig. 2. DTS for Si substrate with (red solid line) and without (black solid line) the deposition of (a) penicillium, (b) yeast, (c) E.coli. DTS of metamaterial sensors measured before (black solid line) and after (red solid line) the deposition of (d) penicillium, (e) yeast, (f) E.coli.

생물이 위치하게 되면서 공명주파수가 적색편이 하기 때문이다. 따라서 그림 2(d)-(f)로부터 yeast의 유전상수가 penicillium보다 3배 정도 크다는 사실을 알 수 있다. 주지한 바와 같이 그림 2의 광학현미경 이미지로부터 메타물질 센서의 갭 구조 크기와 미생물 크기가 2 - 3 μm 정도로 비슷하다는 것을 알 수 있는데 이러한 점은 테라헤르츠 메타물질 센서가 소량의 미생물을 민감하게 검출할 수 있게 한다.

본 연구에서 사용된 메타물질 미생물 센서는 재사용이 가능하다는 장점이 있다. 그림 3(a)에서 보이는 바와 같이 메타물질 센서로 미생물을 검출한 뒤 미생물 제거제를 이용하여 메타물질 센서 표면을 완전히 세척하는데 성공하였다. 그림 3(b)에서 볼 수 있듯이 메타물질 센서의 DTS를 관찰한 결과 미생물 검출 후 제거제를 통해 표면의 미생물이 제거되어 원래의 DTS로 돌아오는 것을 볼 수 있었다.

테라헤르츠 메타물질 미생물 센서는 갭 구조에 위치한 미생물의 개수에 따라 갭 구조의 유효 유전상수가 변화하게 된다. 이를 이용하여 그림 4에서 보이는 바와 같이 갭에 위치한 penicillium의 평균 개수에 따른 메타물질 센서의 DTS를 조사한 결과 갭 구조에 위치한 penicillium의 평균 개수가 증가함에 따라서 테라헤르츠 DTS값이 커지는 것을 확인하였다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 갭 구조에 미생물 개수가 증가함에 따라서 갭 구조의 유효 유전상수가 증가하기 때문이다. DTS를 분석하면 매우 작은 변화를 관측하기 용이해 지므로 penicillium과 같이 작은 굴절률을 가지는 미생물의 경우에도 매우 큰 차이를 보여 성공적으로 미생물을 검출할 수 있었다.

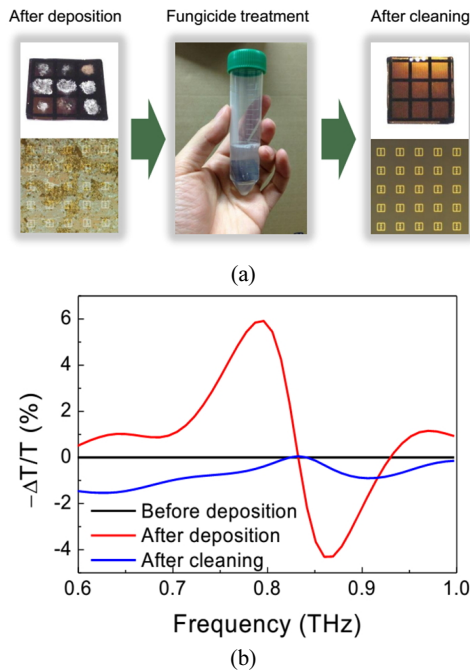


Fig. 3. (a) Fungicide treatment processes (b) DTS of a metamaterial sensor before (red solid line) and after (blue solid line) the fungicide treatment.

본 연구에서 확인된 고감도 메타물질 센서의 특성을 보다 면밀히 조사하기 위하여 본 연구진은 유한차분 시간영역 전산모사(Finite Difference Time Domain Simulation)를 수행하였다. 그림 5(a)는 테라헤르츠 메타물질의 공명주파수에서 메타물질 갭 구조에 전기장이 강하게 집중 되어 있음을 보여준다. 이러한 강한 전기장 집중은 갭 구조에 미생물이 위치해 있을 때 전기장 분포 변화를 메타물질이 강하게 느끼게 해주어 메타물질로 하여금 고감도 미생물 센서로서 역할을 할 수 있게 한다. 이 때 전기장이 강하게 집중된 부분 외의 영역에서는 실질적으로 미생물 검출에 역할을 크게 하지 않는다. 그림 5(b), (c)에서는 앞서 그림 4의 실험 결과에서 확인한 바와 같이 메타물질 공명주파수 근처 DTS값의 미생물 개수의존성을 전산모사를 통해 재현하였다. 이 때, 미생물은 구 형태로 가정되었으며 검체의 유전상수는 penicillium ($\epsilon = 2$)과

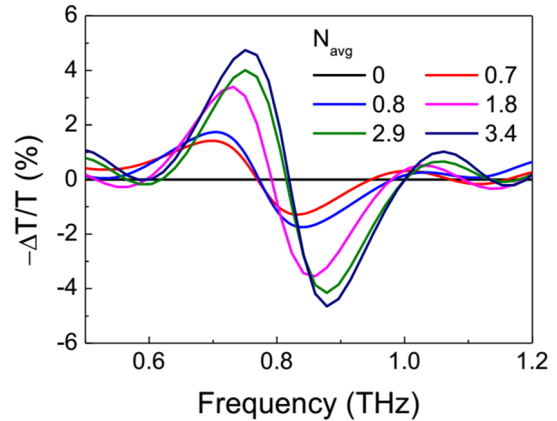


Fig. 4. DTS of a metamaterial sensor with the deposition of penicillia for various number densities.

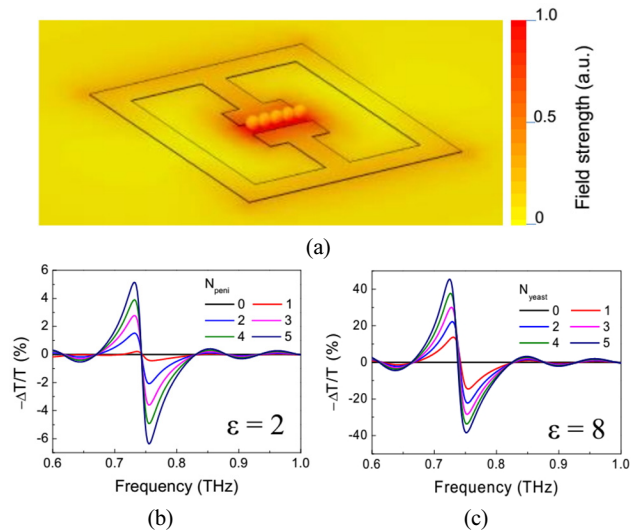


Fig. 5. (a) 3D plot of the electric field strength, when the series of five dielectric spheres (with $\epsilon = 8$) are placed in the gap of the metamaterials. DTS for the dielectric constant of spheres is at (b) $\epsilon = 2$ and (c) $\epsilon = 8$, for various number densities.

yeast ($\epsilon = 8$)의 유전상수 값을 적용하였다. 그림 2에서 확인했던 바와 같이 yeast의 유전상수를 적용한 경우, penicillium의 유전상수를 적용했을 때 보다 테라헤르츠 DTS값이 보다 큰 값으로 측정되는 것을 다시 확인 하였다. 더불어 그림 4에서 실험적으로 확인했던 DTS의 미생물 개수 의존성도 성공적으로 확인할 수 있었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 테라헤르츠 메타물질 미생물 센서를 제작하였으며 penicillium, yeast, 그리고 E.coli와 같은 다양한 미생물에 대하여 테라헤르츠 메타물질 센서의 differential transmission spectra를 분석함으로써 고감도 미생물 검출을 성공적으로 시연하였다. 테라헤르츠 DTS 크기가 미생물의 유전상수 크기에 의존함을 확인하였으며 미생물 제거제를 이용해 본 연구에 사용된 메타물질 미생물 센서가 재사용이 가능함을 보였다. 또한, penicillium에 대하여 DTS의 메타물질 갭 구조에 위치한 미생물 개수 의존성을 조사하였다. 수행된 실험들은 유한차분 시간영역 전산모사를 통해 성공적으로 재현되었으며 특히 유전상수, 미생물 개수 의존성을 성공적으로 검증하였다. 이러한 메타물질 미생물 센서를 이용하면 일반적으로 검출이 쉽지 않은 극소량의 유해 미생물들을 고감도로 검출할 수 있게 된다.

감사의글

본 연구는 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국연구재단의 연구지원 프로그램인 Midcareer Researcher Program (2014R1A2A1A11052108)을 통해 지원받았습니다.

References

1. S. J. Park, J. T. Hong, S. J. Choi, H. S. Kim, W. K. Park, S. T. Han, J. Y. Park, S. Lee, D. S. Kim, and Y. H. Ahn, "Detection of microorganisms using terahertz metamaterials," *Sci. Rep.* **4**, 4988 (2014).
2. H. T. Chen, W. J. Padilla, R. D. Averitt, A. C. Gossard, C. Highstrete, M. Lee, J. F. O'Hara, and A. J. Taylor, "Electromagnetic metamaterials for terahertz applications," *Terahertz Sci. Technol.* **1**, 42-50 (2008).
3. H. T. Chen, W. J. Padilla, J. M. O. Zide, A. C. Gossard, A. J. Taylor, and R. D. Averitt, "Active terahertz metamaterial devices," *Nature* **444**, 597-600 (2006).
4. S. J. Park and Y. H. Ahn, "Substrate effects on terahertz metamaterial resonances for various metal thicknesses," *J. Korean Phys. Soc.* **65**, 1843-1847 (2014).
5. S. J. Park, S. W. Jun, A. R. Kim, and Y. H. Ahn, "Terahertz metamaterial sensing on polystyrene microbeads: Shape dependence," *Opt. Mater. Express* **5**, 2150-2155 (2015).
6. S. J. Park, B. H. Son, S. J. Choi, H. S. Kim, and Y. H. Ahn, "Sensitive detection of yeast using terahertz slot antennas," *Opt. Express* **22**, 30467-30472 (2014).
7. J. F. O'Hara, R. Singh, I. Brener, E. Smirnova, J. Han, A. J. Taylor, and W. Zhang, "Thin-film sensing with planar terahertz metamaterials: Sensitivity and limitations," *Opt. Express* **16**, 1786-1795 (2008).