

테라헤르츠 공초점 현미경에 대한 섭동분석

Perturbation analysis of terahertz confocal microscopy

임미현, 김정희, 한연호, 문기원, 정은아, 한해욱

포항공과대학교, 전자전기공학과

hhan@postech.ac.kr

1957년 하버드 대학의 연구원인 Marvin Minsky에 의해 처음 소개된 공초점 현미경 기술은 초기에는 산업적 용도로 시료의 표면 관찰을 목표로 개발되었으나 최근에는 시료의 구조적인 이해뿐만 아니라, 생체 시료를 대상으로 생리학적인 기능 연구에 활용되고 있다⁽¹⁻²⁾. 공초점 현미경은 기존의 형광 현미경과는 달리 원하는 초점 평면 밖에서 방사되는 형광에 의한 이미지 왜곡을 pin-hole을 이용하여 감소시키기 때문에 고해상도의 이미지를 얻을 수 있는 방법이다⁽³⁾. 이 같은 장점을 가진 공초점 현미경의 원리는 최근에 각광을 받고 있는 테라헤르츠(terahertz; THz) 전자파 영역에서도 적용할 수 있다. 테라헤르츠파는 일반적으로 0.1~10 THz의 주파수를 가지는 전자파로 최근 획기적인 기술발달과 더불어 다양한 분야에서 응용 연구가 활발히 진행되고 있다. 주요 측정 기술로 꼽히는 테라헤르츠 시영역 분광학(THz time-domain spectroscopy; THz TDS)은 시료에 테라헤르츠파를 입사시켜 반사하거나 투과되는 신호를 시영역에서 분석하여 시료의 특성을 기술한다⁽⁴⁾. 이러한 THz TDS기술은 테라헤르츠파의 전계를 직접 측정하기 때문에 전계의 크기와 위상에 대한 정보를 동시에 얻을 수 있는 장점이 있고 이 기술을 사용하여 시료의 분광학적 물성을 측정할 수 있다.

본 연구에서는 기초 연구로서 단차를 가진 시료에서 반사된 신호를 섭동론(perturbation theory)을 이용하여 계산하고, 그 신호의 기저주파수 성분의 크기만을 추출하여 시료의 이미지를 얻는 방법에 대하여 논하고자 한다. 그림 1은 계산에 적용된 공초점 현미경의 구조를 개략적으로 보여준다. 광원으로부터 나온 테라헤르츠파는 렌즈 1을 통과하여 평행광이 되고 빔 분할기를 지나 렌즈 2에 의해 시료 표면에 focusing이 되어 시료에서 다시 반사된다. 반사된 테라헤르츠파는 다시 렌즈 2, 빔 분할기, 그리고 렌즈 3을 거쳐 렌즈 3의 초점 위치에 놓인 pin-hole을 통과한 후 검출기에 입사된다. 검출기에서 측정되는 전계는 pin-hole의 크기에 해당하는 영역을 적분함으로써 얻어진다. 여기에서 시료 표면으로부터 거리 d 만큼 떨어진 렌즈 2를 특정한 진동 주파수에서 $\delta_0 (\ll d)$ 의 진폭으로 진동시키면, 거리 d 가 δ_0 에 의해 주기적으로 변화하게 된다. δ_0 에 의한 섭동에 의해 변조된 전계가 검출기에서 측정된다.

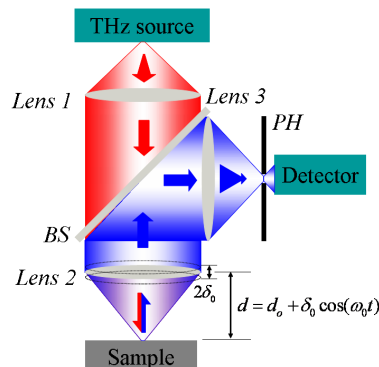


그림 1. 공초점 현미경의 개략도 (BS: beamsplitter, PH: pin-hole)

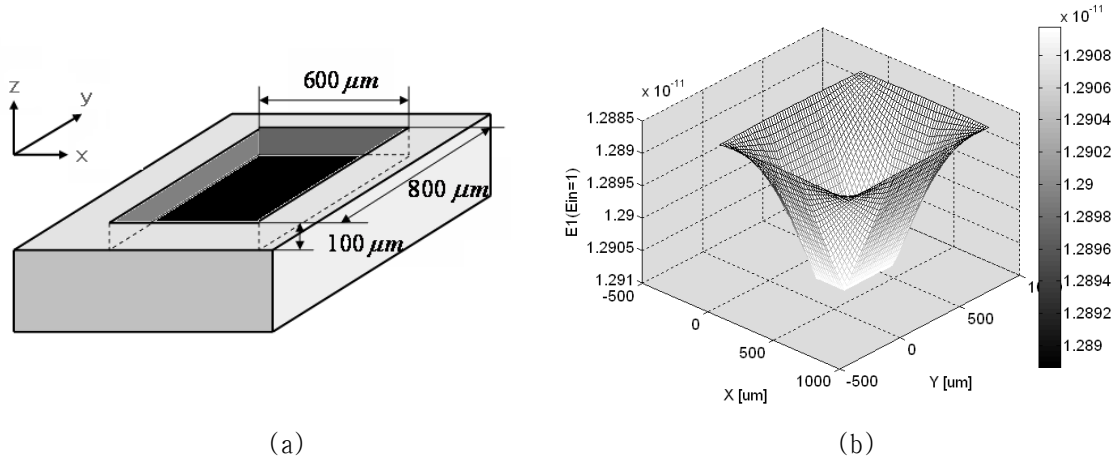


그림 2. 사각형 모양의 단차를 가진 시료 (a)와 동일한 시료에 대해 계산된 E_1 로부터 얻어진 입체이미지 (b).

계산에 사용한 시료는 사각 모양의 단차를 가졌고 광원은 $300 \mu m$ 의 파장에 해당하는 1 THz를 사용하였다. 렌즈 2가 정해진 기저주파수(ω_0)로 시료 표면에 수직방향으로 δ_0 의 크기로 진동하기 때문에, 검출된 신호는 진동하는 렌즈 2의 기저주파수 성분뿐 아니라 2차, 3차 등의 고조파 성분을 갖는다. 원하는 주파수 성분을 측정하기 위해 Lock-in 검출기술을 적용할 수 있다. 그림 1에 보인 시스템에 대해 δ_0 에 의한 섭동효과를 고려하여 검출기에서 측정되는 신호를 정확한 수식을 통해 계산하였다. 계산된 최종적인 전계, E_{tot} 는 아래와 같이 표현된다.

$$E_{tot} = E_0 + E_1 \cos(\omega_0 t) + E_2 \cos(2\omega_0 t) + E_3 \cos(3\omega_0 t) + \dots$$

공간상으로 시료를 주사(scanning)하면서 기저주파수 성분인 E_1 을 구하여, 사각형모양의 단차를 가진 시료의 표면 이미지를 2차원으로 얻었다. 그림 2의 (a)는 계산에 사용된 시료의 표면 구조이다. 대물렌즈가 1 KHz의 기저주파수로 진동할 때 그림 2의 (a)와 같은 시료에 대해 계산한 결과를 그림 2의 (b)에 보였다. 이 결과로부터 pin-hole에서 측정된 신호의 섭동 분석은 실제 시료의 표면 이미지를 반영함을 알 수 있다.

본 연구에서는 공초점 현미경의 원리를 테라헤르츠 전자파 영역에 적용하여 시료의 표면 이미지를 계산하였다. 대물렌즈의 진동에 의한 섭동효과를 고려하여 변조된 신호의 전계를 정확한 수식을 적용해 구하였고, 시료 위에 놓인 pin-hole을 통과한 전계의 기저주파수 성분을 통해 시료의 표면 이미지를 정확하게 예측할 수 있음을 확인하였다.

1. M. A. Sala, "Confocal microscopy applications in the materials industry : an introduction," AIP. Conference Proceedings, **894**, 1577–1584 (2007).
2. A. M. Villa and S. M. Doglia, "Mitochondria in tumor cells studied by laser scanning confocal microscopy," J. Biam. Opt. **9**, 385–394 (2004).
3. A. G. White and W. B. Amos, "An evaluation of confocal versus conventional imaging of biological structure by fluorescent light microscopy," J. Cell Biol. **105**, 41–48 (1987).
4. H. Han, H. Park, M. Cho, and J. Kim, "Terahertz pulse propagation in a plastic photonic crystal fiber," Appl. Phys. Lett. **80**, 2634–2636 (2002).