

테라헤르츠 근접장 현미경의 수치해석

Numerical analysis of terahertz near-field microscopes

김정희, 이경인, 박흥규, 한연호, 정은아, 한해욱

포항공과대학교 전자전기공학과

hanulkjh@postech.ac.kr

테라헤르츠파(terahertz; THz)는 0.1 ~ 10 THz의 주파수를 갖는 전자기파로서 마이크로파와 가시광선 영역의 중간에 위치하며 낮은 주파수 대역의 투과성과 높은 주파수 대역의 직진성을 동시에 갖고 있다. 이러한 테라헤르츠 기술이 최근에 많은 주목을 받으며 발전하여 응용분야가 확대되고 있고, 테라헤르츠 시영역 분광학(THz time-domain spectroscopy; THz TDS)과 테라헤르츠 이미징 분야에서 많은 연구가 수행되고 있다⁽¹⁾. 특히 THz TDS는 시료에 테라헤르츠파를 입사시켜 투과되거나 반사되는 신호를 시간영역에서 측정하여 시료의 특성을 분석하는 기술로서 테라헤르츠파를 시료에 입사시키는데 광학적인 방법을 이용하게 되고 회절한계로 인한 분해능의 이론적인 한계를 갖게 된다. 이러한 기존의 THz TDS 시스템의 회절한계를 해결하기 위한 방법으로 테라헤르츠 근접장 현미경 (THz near-field microscopy; THz NFM) 기술이 제안되었다⁽²⁻⁵⁾. 이러한 THz NFM 시스템은 근접장에서 신호를 측정하기 때문에 광원의 파장에 무관한 해상도를 얻을 수 있다. 특히 apertureless 탐침은 근접장 현미경에서 주로 사용되는 유공(aperture) 탐침보다 더 우수한 분해능을 갖기 때문에, apertureless THz NFM은 나노기술과 바이오기술 분야에서 유용한 측정 시스템으로서 많은 관심을 받고 있다. 본 연구에서는 유한요소법(finite element method)을 적용한, Ansoft사의 HFSS 상용프로그램을 이용하여 apertureless THz NFM에 대한 전산모사를 수행하였다. 금속 기관위에 놓인 두개의 구로 이루어진 구조에 대한 해석이 이루어졌으며, 유효 쌍극자 모멘트 (dipole moment)를 바탕으로 이론적인 해상도를 도출하였다.

THz NFM은 일반적인 THz TDS 시스템에 원자현미경(atomic force microscopy; AFM) 기술을 접목한 시스템으로, 시료 표면의 topography뿐 아니라 THz 근접장에 대한 분광 이미지의 정보를 동시에 얻을 수 있다⁽²⁻⁵⁾. 이러한 THz 근접장은 시료 표면에 가깝게 놓인 나노미터 크기의 탐침에 의해서 산란된다. 산란된 THz 신호를 측정하기 위해서 탐침을 진동시키고, 탐침의 진동에 의해 변조된 THz 신호는 lock-in 측정법으로 측정된다. 이러한 lock-in 측정법은 상대적으로 큰 잡음 신호를 제거하고 작은 산란 신호를 측정하기에 적합하다.

Apertureless NFM을 해석하기 위해 시료 표면 가까이에 위치한 탐침을 편광 특성이 있는 유전체 (dielectric) 구로 가정하였다. 입사하는 THz 전계에 의해 구의 중심 위치에 쌍극자 모멘트가 유기되고, 유기된 쌍극자 모멘트의 이미지 쌍극자 모멘트가 시료 내부에 발생하게 된다^(4, 6). 이러한 쌍극자 모멘트들 사이의 상호작용에 의해 산란되는 THz 근접장이 공간적으로 집중된다. 무한 반평면의 유전체나 금속 기관 가까이에 위치한 나노크기의 구에 의해 산란되는 근접장을 서로 다른 시료와 탐침 사이의 거리에 대해 HFSS 상용프로그램을 이용해 전산모사하였다. 이로부터 탐침과 시료 사이의 상호작용에 의해 산란되는 근접장이 증가됨을 확인하였다. 이러한 유효 쌍극자 모멘트 이론을 바탕으로 하여, 금속 기관 위에 놓인 나노크기 물질과 금속 기관 가까이에 위치한 금속 탐침에 대해 나노미터 크기의 측방향

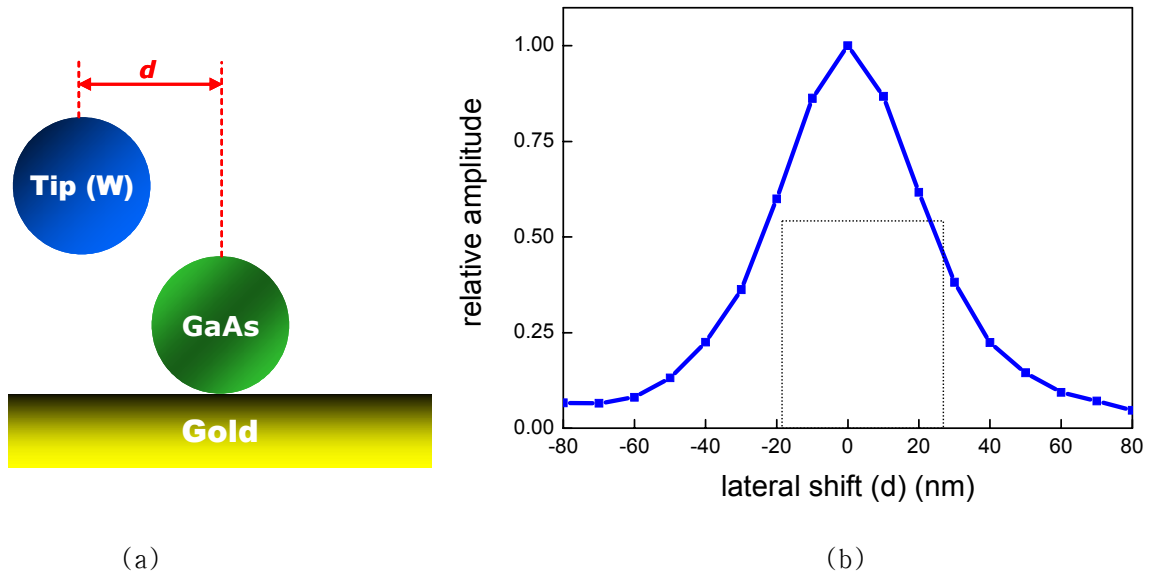


그림 1. 테라헤르츠 근접장 현미경의 측방향 해상도

(lateral) 해상도를 계산하였다. 나노크기 물질로는 GaAs가, 금속 탐침으로는 텅스텐이 사용되었다. THz 전계가 텅스텐 구와 GaAs 구에 입사될 때, 유효 쌍극자 모멘트가 구의 중심에 유기되고 원격장(far-field)은 전체 유효 쌍극자 모멘트에 의해 계산된다. 그림 1에 도시된 바와 같이 40 nm 크기의 텅스텐 구가 측방향으로 10 nm의 간격으로 이동한다. 결과적인 THz NFM의 측방향 해상도는 텅스텐 구의 각 위치에서 구한 원격장의 상대적인 크기에서 얻어진다. 이를 바탕으로 40 nm의 지름을 갖는 GaAs 구에 대해 계산된 반치폭(full width at half maximum; FWHM) 측방향 해상도는 약 45 nm이다.

본 연구에서는 금속 기판 위에 놓인 두 구 사이의 상호작용 메커니즘이 유한요소법에 의해 분석되었다. 또한 원격장에 대한 계산으로부터 제안된 THz NFM 시스템이 수십 나노미터의 측방향 해상도를 가짐을 확인하였다.

1. 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).
2. H. -T. Chen, R. Kersting, and G. C. Cho, "Terahertz imaging with nanometer resolution," *Appl. Phys. Lett.*, 83, 3009-3011 (2003).
3. K. Wang, D. M. Mittleman, N. C. J. van der Valk, and P. C. M. Planken, "Antenna effects in terahertz apertureless near-field optical microscopy," *Appl. Phys. Lett.*, 85, 2715-2717 (2004).
4. B. Knoll and F. Keilmann, "Enhanced dielectric contrast in scattering-type scanning near-field optical microscopy," *Opt. Commun.*, 182, 321-328 (2000).
5. T. Yuan, H. Park, J. Xu, H. Han, and X. -C. Zhang, "Field induced THz wave emission with nanometer resolution," *Proc. SPIE*, 5649, 1-8 (2005).
6. F. Formanek, Y. De Wilde, and L. Aigouy, "Analysis of the measured signals in apertureless near-field optical microscopy," *Ultramicroscopy*, 103, 133-139 (2005).