

비파괴 측정을 위한 근접장 마이크로파 현미경 연구

The Study of Near-field Scanning Microwave Microscope for the Nondestructive Detection System

김주영*, 김송희*, 유현준*, 양종일*, 유형근*, 유경선, 김승완, 이기진*[†]

Jooyoung Kim*, Songhui Kim*, Hyunjun Yoo*, Jongil Yang*, Hyungkeun Yoo*,
 Kyong-Son Yu, Seung-Wan Kim, and Kiejin Lee*[†]

초 록 근접장의 특성과 근접장 마이크로파 현미경의 배경이론을 설명하였고 유전체 공진기 제작에 앞서 HFSS (high frequency structure simulator)를 이용한 모의 시뮬레이션을 기술하였다. 이것을 바탕으로 원통형 유전체 공진기를 제작하여 금속탐침과 결합한 근접장 마이크로파 현미경(near field scanning microwave microscope : NSMM)을 구성하였다. 제작한 유전체 공진기의 특성은 HFSS를 이용하여 모의 실험한 결과와 비교하였다. Tip의 기하학적 모양에 따른 공간분해능과 감도(sensitivity)를 연구하였고 contrast가 가장좋은 hybrid tip을 개발하였다. 전도도가 서로 다른 금속시료에 따른 NSMM의 반사계수의 변화를 측정하였고 실험결과와 이론적 시료의 임피던스를 비교하였다. 마지막으로 유전체 공진기를 이용한 NSMM으로 공간 분해능이 $1\mu\text{m}$ 의 Cr과 NiFe 패턴의 이미지를 비접촉, 비파괴방법으로 얻었다.

주요용어: 근접장, 마이크로파, 유전체공진기, 섭동이론, Dipole-dipole 상호작용

Abstract We described a near-field scanning microwave microscope which uses a high-quality dielectric resonator with a tunable screw. The operating frequency is $f=4.55\text{ GHz}$. The probe tip is mounted in a cylindrical resonant cavity coupled to a dielectric resonator. We developed a hybrid tip combining a reduced length of the tapered part with a small apex. In order to understand the function of the probe, we fabricated three different tips using a conventional chemical etching technique and observed three different NSMM images for patterned Cr films on glass substrates. We measured the reflection coefficient of different metal thin film samples with the same thickness of 300 nm and compared with theoretical impedance respectively. By tuning the tunable screw coming through the top cover, we could improve sensitivity, signal-to-noise ratio, and spatial resolution to better than $1\mu\text{m}$. To demonstrate the ability of local microwave characterization, the surface resistance of metallic thin films has been mapped.

Keywords: near field, microwave, dielectric resonator, perturbation, dipole-dipole interaction

1. 서 론

전자산업의 급속한 발전으로 비접촉, 비파괴 방식의 높은 분해능을 가지는 image기술은 매우 중요

해지고 있다. 시료의 표면 구조를 측정할 수 있는 가장 간단한 방법은 광학현미경이다. 그러나 일반적으로 광학현미경은 회절현상에 의해 분해능의 제한을 받는다. 이러한 한계는 E. Abbe의 회절이론[1]

에 따르며 가시광선 영역에서 분해능이 ~ 200 nm 이상을 넘지 못한다. 현재 반도체의 선폭이 마이크론 단위 이하로 작아지고 있고, 분자 생물학이나 세포학에 있어서도 나노단위 이하로 작아지는 경향성을 고려한다면 광학현미경을 이용한 미세구조 관측에는 한계가 있다. 전자의 파동성을 이용한 SEM(scanning electron microscope)[2]이나 전자의 양자적 터널링 현상을 이용하여 상대적으로 분해능이 뛰어난 STM(scanning tunneling microscope)[3]이 현재까지 미세표면구조 관찰에 이용되고는 있으나 시료의 전자기적 구조를 분석할 수 없다는 단점을 가지고 있다.

마이크로파를 이용한 근접장 현미경은 1972년에 런던대학의 Ash와 Nicholls[4]에 의해 처음으로 이루어졌으며 이들은 시료와 탐침의 사이의 거리를 줄여서 공간적으로 진행하지 않는파(evanescent wave or near-field)를 이용하여 고전 광학분해능의 한계를 뛰어넘는 ~ $\lambda/60$ 의 분해능을 얻었다. 현재에는 근접장 마이크로파 현미경(near field scanning microwave microscope : NSMM)은 발전을 거듭하여 공진기의 형태에 따라 동축선 공진기[5-7], 도파관 공진기[8-11], 유전체 공진기[12]가 사용되고 있다.

최근 연구가 활발히 진행되고 있는 근접장 마이크로파 현미경은 비접촉, 비파괴적인 방법을 통하여 나노구조를 연구하는 방법으로 매우 유용하다. 특히 마이크로파에서 밀리미터파 파장영역을 이용한 NSMM은 도체, 반도체, 유전체와 생물학적 시료까지 주파수 특성에 따라 시료의 특성 측정이 가능하므로 정밀진단 응용면에서 기대가 되고 있다.

NSMM에서 분해능은 금속탐침의 끝단의 곡률반경에 의해 결정되기 때문에 고전적 회절 한계를 극복할 수 있고, 금속탐침 끝단에 형성된 근접장 효과를 이용하기 때문에 초분해능의 영상을 얻을 수 있다. 공진주파수와 Q인자는 tip과 시료사이거리, tip의 곡률반경외에 시료의 유전율, 투자율, 전도도, 전자의 농도에 따라 변하기 때문에 표면 구조특성 뿐만 아니라 전자기적 구조 이미지까지 얻을 수 있다는 장점도 가지고 있다.

본 연구에서는 유전체 공진기와 결합된 금속탐침의 구조 및 근접장 효과의 변화특성을 공진기 섭동 모델을 통하여 설명하였고 근접장 이미지의 분해능을 결정하는 요소인 금속탐침 및 공진기와의 특성 결합에 대하여 연구하였다. 유전체 공진기 제작에 앞서 HFSS(high frequency structure simulator)를

이용한 모의 시뮬레이션을 기술하였고 이것을 바탕으로 원통형 유전체 공진기를 제작 금속탐침과 결합한 NSMM을 구성하였다. 또 유전체 공진기의 특성을 알아보기 위하여 여러 물질의 시료를 가지고 실험 하였으며 또 커플링 루프의 모양에 따른 TE모드와 TM모드를 여기서 실험하였다.

2. 이 론

2.1. Dipole-dipole 상호작용

근접장 마이크로파 현미경은 마이크로파 파장보다 아주 짧은 거리에서 팁과 샘플과의 상호작용에 의하여 이미지를 얻을 수 있다. 따라서 팁과 샘플과의 상호작용을 이해하는 것은 NSMM의 분해능을 높이고 감도를 높이는 데 아주 중요한 일이다. Tip은 아래 Fig. 1과 같은 구조로 되어 있다.

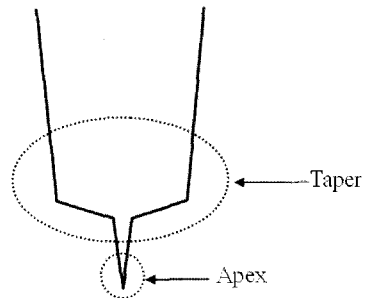


Fig. 1 Schematics of probe-tip of NSMM

NSMM에서 분해능은 apex의 반경에 좌우되고 감도는 taper에 의해 결정되어 두 부분 모두 중요하다[13]. Fig. 2는 apex와 샘플을 a_a 와 a_s 의 반지름을 가지는 구라고 가정하였다. 외부 전기장에 의해 두 쌍극자가 α_a 와 α_s 의 편극률을 가지고 있다면 dipole-dipole 커플링에 의해 섭동이 주어진 편극률은 다음과 같다[13].

$$\Delta\alpha = \frac{\alpha_a \alpha_s}{R^3} \quad (1)$$

여기서 R은 두 쌍극자 구 사이의 거리이다. 여기서 편극률 α 는 다음과 같다.

$$\alpha_i = \frac{\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} - 1\right)}{\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} + 2\right)} a_i^3 \quad (2)$$

여기서 i 는 a, s이고 ε 는 쌍극자의 유전율이다. 우리가 측정하는 전기장의 크기는

$$\begin{aligned} |E_s + \Delta E_s|^2 &\propto [(\alpha_a + \Delta\alpha) + (\alpha_s + \Delta\alpha)]^2 |E|^2 \\ |E_s|^2 &\propto (\alpha_a + \alpha_s)^2 |E|^2 \end{aligned} \quad (3)$$

이고 $E_s + \Delta E_s$ 와 E_s 는 쌍극자 커플링에 의한 섭동 후의 전기장과 섭동 전의 전기장이다. 또 공진주파수의 변화($\Delta\omega$)는 섭동전 전기장 에너지와 섭동후 전기장 에너지 변화의 차이로 다음과 같이 나타낼 수 있다[13].

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\omega}{\omega} &= \frac{|E_s + \Delta E_s|^2 - |E_s|^2}{|E_s|^2} \\ &= \frac{[(\alpha_a + \Delta\alpha) + (\alpha_s + \Delta\alpha)]^2 |E|^2 - (\alpha_a + \alpha_s)^2 |E|^2}{(\alpha_a + \alpha_s)^2 |E|^2} \\ &= \frac{4\Delta\alpha}{(\alpha_a + \alpha_s)} \end{aligned} \quad (4)$$

이것을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{4}{R^3} \left(\frac{\alpha_a \alpha_s}{\alpha_a + \alpha_s} \right) \quad (5)$$

Dipole-dipole 상호작용에 의한 NSMM에서 tip 끝단의 곡률반경이 작아지면 분해능은 좋아지겠지만 식 (5)에서 보듯 바와 같이 tip과 샘플사이의 거리가 가까울수록, 편극률이 클수록 감도가 향상된다. 편극률은 팁과 샘플의 effective area가 넓으면 커지기 때문에 tip 끝단의 곡률반경이 커야 좋은 감도를 가진다. 따라서 팁끝단이 무조건 작으면 분해능은 좋아지지만 감도가 떨어지기 때문에 분해능과 감도가 모두 좋은 tip의 곡률반경의 선택이 필요하다.

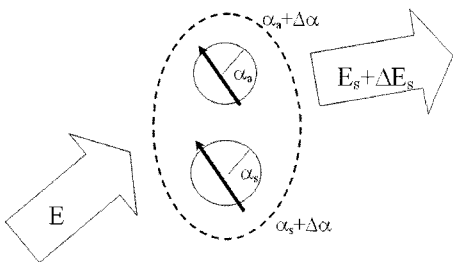


Fig. 2 Simplified configuration of interaction between tip and sample

2.2. 섭동이론

NSMM에서 가장 중요한 요소 중 하나는 공진기이다. 공진기의 성능에 의해 분해능과 감도가 결정되기 때문이다. 공진기의 부피 변화가 있거나 유전체나 금속물질을 삽입하여 공진기내의 매질의 변화가 있을 때 공진주파수와 Q인자가 변화한다. 이것은 공진기 안에 존재하고 있는 전기장과 자기장의 변화를 가지고 와서 전기장에너지와 자기장에너지가 변화하면서 공진주파수와 Q인자가 변화한다. NSMM에서는 시료의 전자기적 변화를 tip을 통하여 공진기 내부로 전달되고 이것이 공진기내의 섭동을 일으키는 것이다. 공진기의 섭동은 Maxwell 방정식에 의해 다음과 같이 유도된다[14].

$$\Delta\omega = \frac{\omega_2 \int [\Delta\mu H_1^* \cdot H_2 + \Delta\varepsilon E_1^* \cdot E_2] dv - i \int [E_1^* \cdot J_2 + E_2 \cdot J_1] dv}{\int [\mu H_1^* \cdot H_2 + \varepsilon E_1^* \cdot E_2] dv} \quad (6)$$

여기서 E_1, H_1 은 섭동전 전기장과 자기장이고 E_2, H_2 은 섭동후의 전지장과 자기장이다. 만약 $\Delta\varepsilon$ 와 $\Delta\mu$ 가 작다면 우리는 섭동후 전자기장 E_2 및 H_2 는 섭동전 전자기장 E_1 및 H_1 거의 같다고 가정한다면 식은 다음과 같이 간단히 정리된다.

$$\Delta\omega = \frac{\omega_2 \int [\Delta\mu |H_1|^2 + \Delta\varepsilon |E_1|^2] dv - i \int [E_1^* \cdot J_2 + E_2 \cdot J_1] dv}{\int [\mu |H_1|^2 + \varepsilon |E_1|^2] dv} \quad (7)$$

그리고 섭동전의 유도되는 자유전류(J_1)는 영이고 섭동후 유도되는 자유전류(J_2)는 magnetization(J_M) 전류와 polarization(J_P) 전류로 나누어 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$J_2 = J_M + J_P = \nabla \times M_2 + P_2 \quad (8)$$

이것을 식 (7)에 적용하면 다음과 같다.

$$\Delta\omega = \frac{\omega_2 \int [\Delta\mu |H_1|^2 + \Delta\varepsilon |E_1|^2] dv - i \int [E_1^* \cdot (\nabla \times M_2) + E_1^* \cdot P_2] dv}{\int [\mu |H_1|^2 + \varepsilon |E_1|^2] dv} \quad (9)$$

식 (9)의 $E_1^* \cdot (\nabla \times M_2)$ 은 $\nabla \cdot (A \times B) = B \cdot \nabla \times A - A \cdot \nabla \times B$ 을 이용하면 $E_1^* \cdot (\nabla \times M_2) = M_2 \cdot (\nabla \times E_1^*) - \nabla \cdot (E_1^* \times M)$ 로 쓸 수 있고 여기에 Maxwell 방정식

$(\nabla \times E_1^* = -i\omega B_1^*)$ 을 이용하면 식 (9)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta\omega = \frac{\omega_2 \int [\Delta\mu |H_1|^2 + \Delta\epsilon |E_1|^2] dv + \int [\omega_2 M_2 \cdot B_1 + iP_2 \cdot E_1] dv}{\int [\mu |H_1|^2 + \epsilon |E_1|^2] dv} \quad (10)$$

여기서 M_2 는 시료의 magnetization이고 P_2 는 시료의 polarization($P_2 = \alpha E_1$)이다. 이것은 Tip 끝단의 쌍극자와 시료의 쌍극자사이의 상호작용에 의해 유도된다. α 는 편극률이고 E_1 는 Tip 끝단에 공진기로부터 유도되는 전기장이다. 동시에 Tip 끝단에 유도된 E_1 에 의해 시료에 쌍극자가 유도되고 이 시료의 쌍극자에 의해 다음과 같은 전기장이 Tip 끝단에 다시 유도된다.

$$E_1'' = [3\hat{d}(\hat{d} \cdot P_2) - P_2] \frac{1}{d^3} \quad (11)$$

이러한 Tip 끝단에서의 변화는 공진기내의 커플링 루프를 통하여 공진기 내부의 전기장과 자기장에 섭동을 일으키고 우리는 이 전자계의 변화를 측정하는 것이다.

2.3. HFSS (High Frequency Structure Simulator)를 이용한 공진기 모의실험

유전체 공진기에서 공진모드에 따라 공진기 내부의 전자계가 바뀌어 공진기내의 전력 전달 특성과 공진주파수가 변화하므로 공진주파수의 모드를 구분하는 것이 중요하다. coupling loop의 각도에 따라 loop의 단면적을 가로지르는 전계와 자계의 선속의 양이 달라져서 특정모드가 강하게 여기되거나 약하게 여기되어 모드의 선택이 가능하게 된다. 이것을 확인하기 위하여 Ansoft HFSS(High Frequency Structure Simulator)을 이용하여 모의 실험을 하였다. 시뮬레이션은 4 ~ 6 GHz 영역에서 fast frequency sweep solution방법으로 이루어졌으며 coupling loop의 각도에 따른 공진주파수와 공진모드의 변화를 알아 보았다. 여기서 사용한 유전체의 비유전율은 29 이고 직경 14 mm 그리고 높이 5.8 mm이다. Fig. 3의 (a)는 HFSS로 Coupling loop의 각도가 수평일 때의 설계 그림이고 Fig. 3의 (b)처럼 공진주파수는 4.5 GHz였다. Fig. 3의 (c),

(d)는 공진 주파수에서 전계와 자계의 field 분포이다. Fig. 4의 (a)는 HFSS로 coupling loop의 각도가 수직일 때의 설계 그림이고 Fig. 4의 (b)처럼 공진 주파수는 5.6 GHz였다. Fig. 4의 (c), (d)는 공진 주파수에서 자계와 전계의 field 분포이다. Fig. 5의 (a)는 HFSS로 coupling loop의 각도가 45° 일 때의 설계 그림이고 Fig. 5의 (c)와 (d)는 공진주파수는 4.5 GHz에서 전계와 자계의 field 분포이고 Fig. 5의 (e)와 (f)는 공진 주파수가 5.6 GHz에서 자계와 전계의 field 분포이다. HFSS의 시뮬레이션을 통하여 coupling loop가 수평으로 유전체 공진기와 커플링 되었을 때 4.5 GHz에서 공진이 일어나고 이때의 모드는 전계와 자계의 field 분포 해석을 통하여 TE₀₁ 모드가 여기되는 것을 확인하였다. 그리고 coupling loop가 수직으로 유전체 공진기와 커플링 되었을 때는 5.6 GHz에서 공진이 일어나고 이때의 모드도 마찬가지로 전계와 자계의 field 분포 해석을 통하여 TM₀₁ 모드가 여기되는 것을 확인하였다. 또 coupling loop가 45° 일때는 4.5 GHz와 5.6 GHz에서 모두 공진이 일어났으며 4.5 GHz에서 TE₀₁ 모드가 5.6 GHz에서 TM₀₁ 모드가 모두 여기 되었다. Coupling loop의 각도에 따라 TE모드와 TM모드를 선택적으로 여기시킬 수 있었다. 이것은 coupling loop의 각도에 따라 유전체 공진기에서 전기장의 여기방향이 결정되기 때문이다.

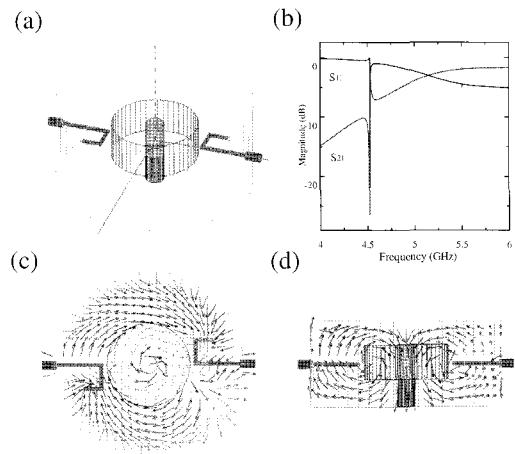


Fig. 3 HFSS simulation result in coupling loop with 0 degree (a) the cylindrical dielectric resonator layout (b) resonant frequency (c) E-field (d) H-field at 4.5 GHz

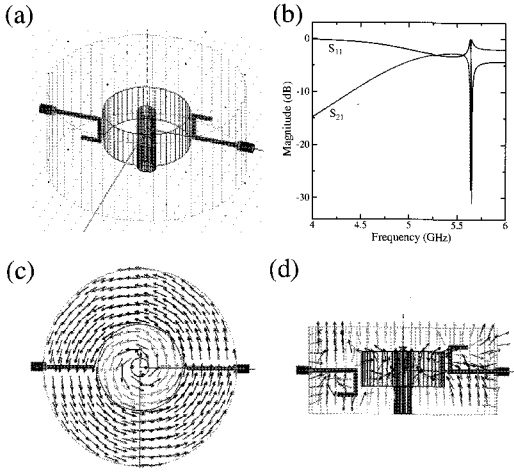


Fig. 4 HFSS simulation result in coupling loop with 90 degree (a) the cylindrical dielectric resonator layout (b) resonant frequency (c) H-field (d) E-field at 5.6 GHz

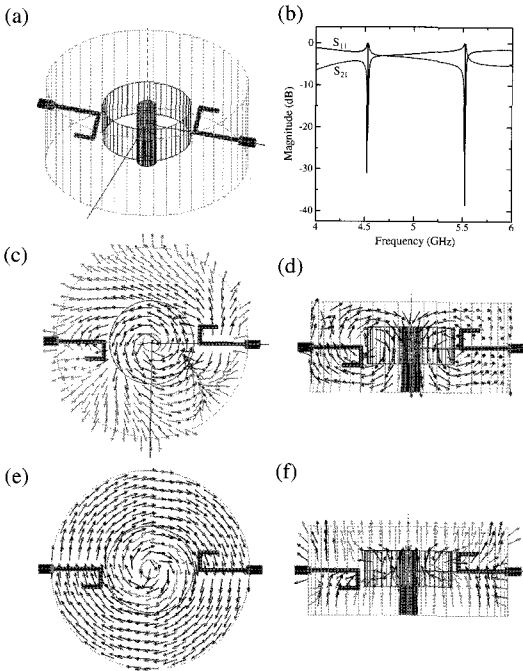


Fig. 5 HFSS simulation result in coupling loop with 45 degree (a) the cylindrical dielectric resonator layout (b) resonant frequency (c) E-field (d) H-field at 4.5 GHz and (e) H-field (f) E-field at 5.6 GHz

3. 실험장치 및 방법

3.1. 유전체 공진기를 이용한 근접장 마이크로파 현미경 제작

유전체 공진기는 Fig. 6과 같이 구성하였다. 유전체 공진기는 비유전율이 29인 Ba(ZrTa)O₃를 사용하였다. 그리고 내경은 2 mm이고 외경은 14 mm이고 높이는 5.8 mm이다. 유전체 공진기를 싸고 있는 금속 공진기의 반경은 32 mm이고 높이는 14 mm로 제작되었다. 제작한 유전체 공진기는 HFSS의 시뮬레이션의 공진주파수와 거의 일치한 TE₀₁ 모드가 4.5 GHz에서 공진이 일어났다. 제작한 공진 주파수의 무부하 Q인자는 24000였다. 공진기의 Q인자는 network analyzer로 얻어진 S₂₁에서 최대값(공진주파수, f_r)에서 3 dB 아래의 주파수 폭선의 너비(Δf) 잡으면 부하가 걸린 Q_L인자는 얻을 수 있다. 여기서 무부하 Q_U인자는 다음의 식을 통해서 얻을 수 있다[14].

$$Q_U = \frac{Q_L}{(1 - 10^{-loss/20})} \quad (12)$$

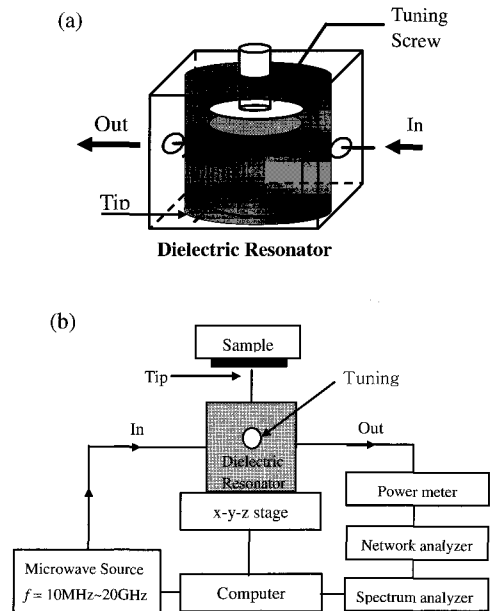


Fig. 6 (a) Schematic structure of a dielectric resonator with a tunable screw and (b) diagram of the experimental configuration

여기서 loss는 공진기의 삽입 손실이다. 삽입손실은 network analyzer에서 측정된다. 또 금속 공진기 위에 나사모양의 screw를 설치하여 유전체 공진기를 튜닝 가능하도록 제작 하였다. 사용한 마이크로 파 소스는 10 MHz에서 20 GHz까지 안정된 마이크로파를 제공하는 HP83620A를 사용하였다. 그리고 output power은 power meter(HP 437B)를 사용하여 측정하였다. 그리고 유전체 공진기의 일반적인 특성은 network analyzer(Agilent 8753ES)을 이용하여 측정하고 튜닝하였다.

3.2. 실험적 모드선택

HFSS의 시뮬레이션을 통하여 우리는 coupling loop의 각도에 따라 TE모드와 TM모드가 선택적으

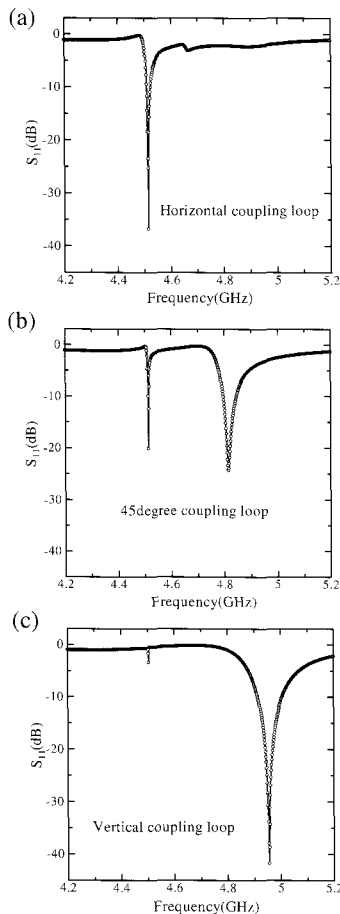


Fig. 7 The resonance peaks depending different degree of coupling loop. (a) TE mode, (b) TE and TM mode (c) TM mode

로 여기가 되는 것을 확인 할 수 있었다. 이번에는 제작한 유전체 공진기를 가지고 직접 실험을 하였다. Fig. 7은 유전체 공진기의 coupling loop의 각도에 따른 공진주파수를 Network analyzer로 얻은 그래프이다. Fig. 7(a)는 coupling loop를 수평하게 하였을 경우 4.5 GHz에서 TE_{01} 모드가 여기 되었고 Fig. 7(c)는 coupling loop가 수직일 때 TM_{01} 모드가 여기 되었다. Fig. 7(b)는 coupling loop를 45° 로 하였을 경우 TE_{01} 모드와 TM_{01} 모드가 모두 여기되는 것을 확인 할 수 있었다. TM_{01} 모드는 시뮬레이션 결과보다 주파수가, 500 MHz 낮아졌는데 이는 시뮬레이션에서는 모델을 간단히 하기위해서 Tuning Screw를 생략했기 때문이다.

Coupling loop가 수평일 때 TE_{01} 모드가 여기되었는지 HFSS의 시뮬레이션과 비교하여 확인 할 수 있겠지만 실험을 통하여 확인 할 수도 있다. 우리가 제작한 유전체 공진기는 금속 cavity 위쪽에 tuning screw가 있는데 TE_{01} 모드는 tuning screw가 금속 cavity내로 삽입되어지면 유전체 공진기의 공진주파수는 일반적으로 증가하게 된다.

Fig. 8은 tuning screw를 0.5 mm씩 삽입하면서 얻은 공진주파수의 변화이다. Tuning screw가 삽입될수록 공진주파수가 증가하고 있다. 이것은 coupling loop가 수평으로 coupling 되었을때 TE_{01} 모드가 여기 되었음을 의미한다[15].

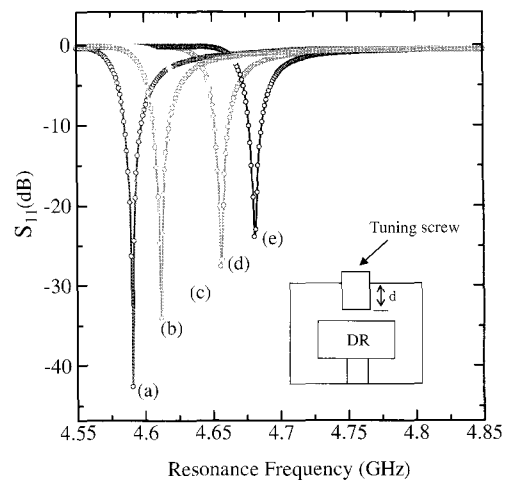


Fig. 8 The resonance peaks depending on the tuning screw depth d with (a) 0mm, (b) 1mm, (c) 2mm, (d) 3mm and (e) 4mm

3.3. Tip 모양에 따른 공간분해능과 감도

NSMM의 감도는 공진기의 Q인자가 높으면 증가한다. 그러나 tip의 기하학적 모양에 의해서도 영향을 받는다[16]. 그리고 NSMM의 공간분해능은 tip 끝단의 곡률반경에 직접적인 영향을 받는다. 따라서 NSMM의 감도와 공간분해능을 향상시키기 위하여 tip의 연구는 필수적이다.

Fig. 9은 tip 모양에 따라 NSMM의 공간 분해능 (spatial resolution)을 알아보기 위하여 폭이 $13\mu\text{m}$ 인 크롬의 라인을 스캔한 그림이다. 시료와 tip사이의 상호작용에 의해 공진주파수와 공진주파수에서의 신호의 크기가 모두 변화하는데 Fig. 9은 공진주파수에서의 신호의 크기의 변화를 Network Analyzer를 이용하여 측정한 것이다. Tip은 화학적 식각 방법을 이용하여 식각하였다. 식각용액은 증류수에 KOH를 무게비로 10% 녹인 용액을 사용하였고 완성된 금속탐침은 증류수와 무수 알코올을 사용하여 세척 후 사용하였다. Tip은 thick-tip과 thin-tip은 식각하는 시간을 조정하여 만들었고 thick-tip과 thin-tip을 합친 hybrid-tip은 tip중간을 테프론으로 감싸서 tip 끝단만 식각되고 윗부분은

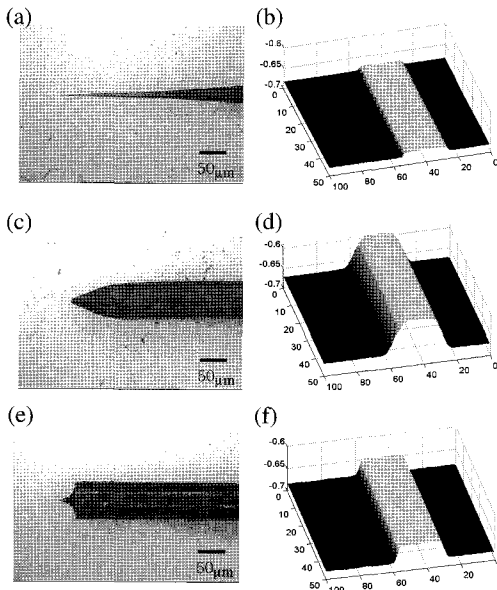


Fig. 9 Line scan depending on different tips shape : (a) thin tip, (b) line scan using the thin tip, (c) thick tip, (d) line scan using the thick tip, (e) hybrid tip, and (f) line scan using the hybrid tip

식각되는 것을 막았다. NSMM에서 tip곡률반경이 커지면 시료와 상호작용은 면적이 넓어지면서 감도는 증가하게 된다. 또 공진기에서 tip으로 나오는 전자기장도 tip이 두꺼울수록 많이 전달되게 된다. 그러나 NSMM의 곡률반경은 tip의 곡률반경이 작으면 작을수록 증가하기 때문에 tip의 크기는 작아야 한다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 thin-tip은 공간분해능은 좋아졌으나 감도는 떨어지는 것을 볼 수 있고 thick-tip은 공간분해능은 떨어지나 감도는 증가한 것을 볼 수 있다. hybrid-tip은 공간분해능과 감도 모두 증가함을 확인하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 금속시료에 따른 반사계수

앞에서 살펴보았던 것처럼 두꺼운 ($d \gg \delta$) 금속시료의 경우 표면 임피던스는 다음과 같다.

$$Z_s = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\sigma}} = \sqrt{i\omega\mu\rho} \quad (13)$$

따라서 금속시료의 표면 임피던스는 금속의 전도도에 의해 결정되게 된다. Fig. 10은 NSMM의 물질에 따른 감도를 알아보기 위하여 서로 다른 전도도를 가지는 물질에 대한 NSMM의 반사계수 변화를 살펴 보았다. 실험은 4.5 GHz의 마이크로파를 사용하였기 때문에 이들의 침투깊이($1\sim 2\mu\text{m}$)보다 두꺼운 Au, Ag, Co, Cr의 시료를 사용하였다. 시료와 tip사이의 거리는 $1\mu\text{m}$ 에서 network analyzer로 반사계수 S_{11} 을 측정하였다. 공진주파수와 Q인자는 금속시료의 전도도에 따라 유전체 공진기를 섭동시키는 양이 달라지므로 물질에 따라 변화하는 양이 다르게 된다. 또 반사계수 S_{11} 은 금속시료의 표면 임피던스에 따라 변화하는데 이것은 전송선로 이론을 이용하여 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$S_{11} = \frac{Z_s - Z_p}{Z_s + Z_p} \quad (14)$$

여기서 Z_s 는 시료의 표면 임피던스, Z_p 는 tip의 임피던스이다. Fig. 10의 삽입그림은 시료에 따라 측정한 반사계수를 재규격화 한 것이고 실선은 시료 표면 임피던스의 이론적 반사계수이다. 이때 사용한 tip의 임피던스, Z_p 는 50Ω 이다.

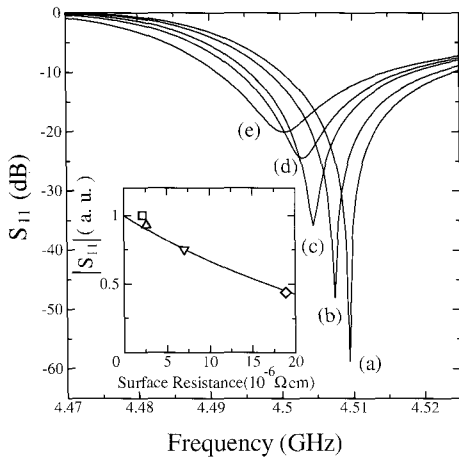


Fig. 10 Measured reflectivity S_{11} of different metal thin film samples with the same thickness of 300 nm: (a) air, (b) Cr, (c) Co, (d) Al, and (e) Au. The inset shows the ω measured reflectivity S_{11} plotted against thin film resistances of Cr(\diamond), Co(∇), Al(\triangle), and Au (\square) taken from a material handbook. A solid line shows a fit to Eq. (2) with $Z_p = 50 \Omega$

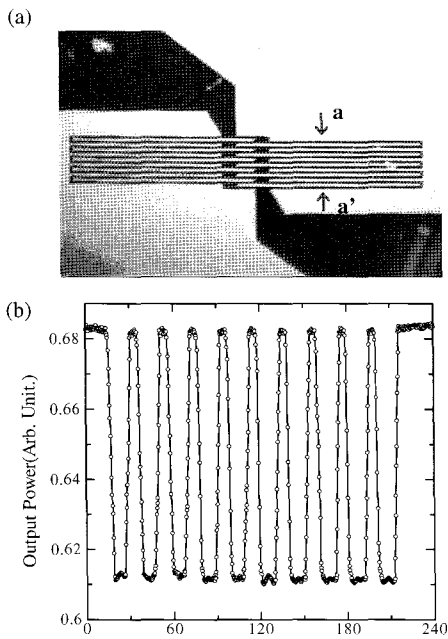


Fig. 11 (a) Optical image of a patterned Cr thin film on a MgO substrate and (b) one-dimensional intensity variations of detector along the line a-a' in (a)

4.2. 근접장 마이크로파 현미경을 이용한 시료영상

유전체 공진기는 높은 Q인자를 가지고 있기 때문에 높은 분해능을 가지고 시료의 이미지화가 가능하다. Fig. 11은 glass 기판위에 Cr 패턴을 유전체 공진기의 TE_{01} 모드의 4.5 GHz를 이용하여 얻은 1차원 이미지이다. Fig. 12는 강자성체인 NiFe의 패턴의 3차원 이미지이다. 유전체 공진기는 금속 패턴 뿐만 아니라 자성체 또한 높은 분해능을 가지며 이미지화가 가능하였다.

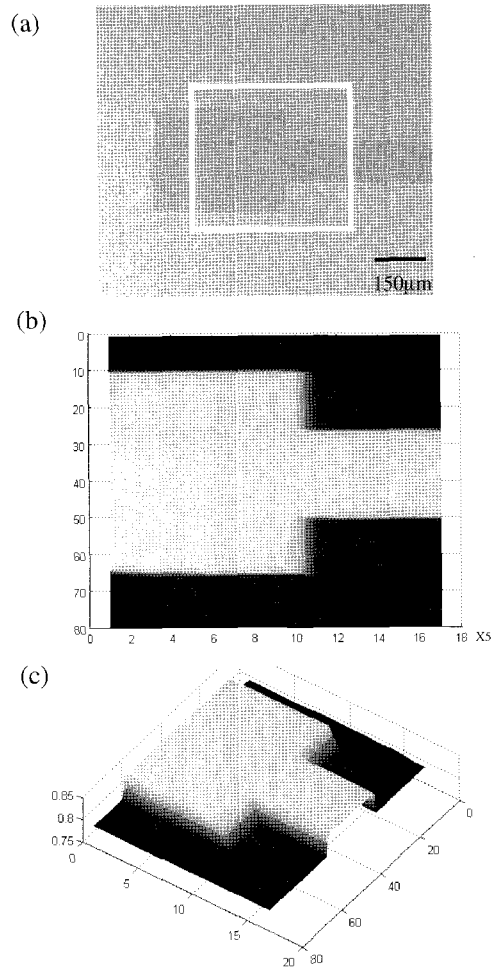


Fig. 12 (a) Optical image of a patterned NiFe thin film on a glass substrate, (b) two-dimensional near-field scanning images of a NiFe thin film, and (c) three-dimensional near-field scanning images of a NiFe thin film

4.3. 근접장 마이크로파 현미경(NSMM)의 분해능

분해능이란 일반적으로 어떤 거리만큼 떨어져 있는 두 대상체를 구별할 수 있는 능력으로 정의된다. 레일리의 기준(Rayleigh's criterion)에 따르면 스크린에 두개의 상이 맺힐 수 있는 광원간의 최소 거리는 한 광원의 상의 세기가 최대인 부분이 다른 광원의 상의 세기의 첫 번째 최소부분과 겹칠 때이다. 만약 이미지가 광원이 아니고 라인이라면 이들의 분해능은 이미지의 output power의 최대점에서 반이되는 지점의 폭(the width of the observed full width at half maximum)에서 실제 라인의 폭을 뺀 것을 분해능으로 정의한다[12,17]. 공간분해능은 NSMM의 성능을 나타내는 지표로서 감도와 함께 중요한 요소이다. 이 공간분해능은 tip 끝단의 곡률반경 뿐만 아니라 공진기의 임피던스 매칭에 의해 결정되어진다.

Fig. 13 (a)는 시료(Cr)의 광학적 사진이고 (b)는 NSMM으로 얻은 2차원 이미지이다. 실험은 공진기로부터 투과되어 나오는 power를 power meter로 측정할 것이다. 이때 사용한 주파수는 4.46 GHz이다. 물론 실험에 앞서 tuning screw를 이용하여 임피던스 매칭을 하고 실험하였다. Fig. 13의 (c)와 (d)는

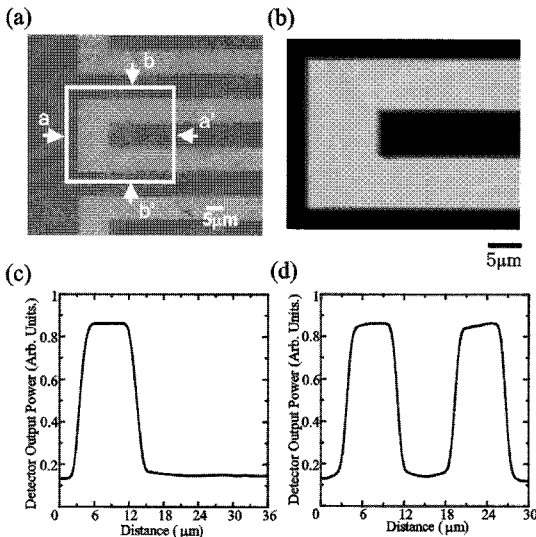


Fig. 13 (a) Optical image of a patterned Cr thin film on a glass substrate and (b) two-dimensional near-field scanning images of a Cr thin film, (c) one-dimensional intensity variations of detector along the line a-a' in (a). and (d) one-dimensional intensity variations of detector along the line b-b' in (a)

Fig. 13의(a)의 a-a'와 b-b' 단면 그림이다. 이때의 공간분해능은 a-a'에서 보면 측정된 output power의 반이 되는 지점에서의 폭이 7.6 μm이고 Cr 패턴의 라인의 폭이 6.6 μm 이므로 측정된 폭에서 크롬 라인의 폭을 뺀 1 μm가 공간분해능이다.

5. 결론

근접장 마이크로파 현미경(NSMM)의 원리에 대하여 Dipole-dipole의 상호작용과 공진기의 섭동모델을 사용하여 설명하였다. 유전체 공진기 제작에 앞서 Ansoft사의 HFSS를 사용하여 mode 해석과 기본적인 특성을 분석하고 시뮬레이션 하였다. 이것을 바탕으로 유전체 공진기를 이용하여 공진주파수가 4.5 GHz인 근접장 마이크로파 현미경(NSMM)을 제작하였다. 이때 HFSS를 통하여 얻은 시뮬레이션 결과와 제작한 유전체 공진기의 실험결과와 잘 일치하였다. 또 NSMM의 공간분해능과 감도를 높이기 위하여 hybrid-tip 개발 제작하여 실험을 통하여 공간분해능과 감도 모두 향상되었음을 확인할 수 있었다. 전기전도도가 서로 다른 금속시료의 반사계수를 측정할것과 시료 표면의 임피던스의 이론적 반사계수와 일치함을 확인하였다. 근접장 마이크로파 현미경(NSMM)의 유전체 공진기의 튜닝을 통한 임피던스 매칭과 hybrid-tip을 사용하여 비접촉 비파괴 방법으로 1 μm의 공간분해능을 갖는 근접장 이미지를 얻었다.

감사의 글

본 논문은 2002년 학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음.(KRF-2002-015-CS0018)

참고문헌

- [1] E. Hecht, "Optics," Addison-Wesley, (1987)
- [2] Ch. Sikorsi and U. Merkt, "Spectroscopy of electronic states in InSb quantum dots," Phys. Rev. Lett., Vol. 62, p. 2164 (1989)
- [3] D. K. Biegelsen, R. D. Bringans, J. E. Northrup and L. E. Swartz, "Reconstructions of GaAs surfaces observed by scanning tunneling microscopy," Phys. Rev. Lett., Vol. 65, p. 452 (1990)

- [4] E. A. Ash and G. Nicholls, "Super-resolution aperture scanning microscope," *Nature*, Vol. 237, p. 510 (1972)
- [5] C. Gao and X.-D. Xiang, "Quantitative microwave near-field microscopy of dielectric properties," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 69, p. 3946 (1998)
- [6] D. E. Steinhauer, C. P. Vlahacos, S. K. Dutta, B. J. Feenstra, F. C. Wellstood and S. M. Anlage, "Quantitative imaging of sheet resistance with a scanning near-field microwave microscope," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 72, p. 861 (1998)
- [7] Tabib-Azar, D.-P. Su, A. Pohar, S. R. Leclar and G. Ponchak, "0.4 μm spatial resolution with 1 GHz ($\lambda = 30$ cm) evanescent microwave probe," *Rev. Sci. Instrum.* Vol. 70, 1725 (1999)
- [8] 김주영, 홍성혁, 박원균, 이기진, "동조 가능한 동축선 공진기를 사용한 마이크로파 근접장 현미경 제작", *새물리* Vol. 42. No. 6. p. 281 (2001)
- [9] M. Golosovsky and D. Davidov, "Novel millimeter-wave near-field resistivity microscope," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 68, p. 1579 (1996)
- [10] A. F. Lann, M. Golosovsky, D. Davidov and A. Frenkel, "Combined millimeter-wave near-field microscope and capacitance distance control for the quantitative mapping of sheet resistance of conducting layers," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 73, p. 2832 (1998)
- [11] J. Bae, T. Okamoto, T. Fujii, K. Mizuno and T. Nozokido, "Experimental demonstration for scanning near-field optical microscopy using a metal micro-slit probe at millimeter wavelengths," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 71, p. 3581 (1997)
- [12] Park Wonkyun, Kim Jooyoung and Lee Kiejin, "Millimeter-wave scanning near-field microscope using a resonant waveguide probe," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 79, p. 2642 (2001)
- [13] M. Ohtsu, "Near-field nano/Atom Optics and technology," Springer, (1998)
- [14] H. M. Altshuler, "Handbook of Microwave Measurements II," Polytechnic Institute of Brooklyn, Brooklyn, NY, (1963)
- [15] Kim Jooyoung, Barry Friedman, Deokjoon Cha, and Kiejin Lee "Near-field scanning microwave microscope using a dielectric resonator," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 83, p. 1032 (2003)
- [16] Kim Jooyoung, Myungsick Kim, Hyun Kim, Doohee Song, Barry Friedman and Kiejin Lee "Improving images from a near-field scanning microwave microscope using a hybrid probe," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 83, p. 1026 (2003)
- [17] C. P. Vlahacos, R. C. Black, S. M. Anlage, A. Amar and F. C. Wellstood, "Near-field scanning microwave microscope with 100 μm resolution," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 69, p. 3272 (1996)