

◆특집◆ 정밀공학에서의 광계측기술

광근접장 현미경의 원리 및 응용

윤형길*, 이준희*, 권대갑*

Theory and Application of Near-field Scanning Optical Microscope

Hyoung Kil Yoon*, Jun Hee Lee*, and Dae Gab Gweon*

Key Words : NSOM(근접장 주사현미경), diffraction limit(회절 한계), SIL(solid immersion lens), optical fiber(광섬유), topographic image(표면형상 영상), shear force(전단력), tuning fork(떨림포크), evanescent field(표면장), high N.A.(높은 개구수)

1. 서론

산업사회가 발전하면서 초정밀 분야의 측정기술 또한 시대적 요구에 걸맞게 발전을 거듭하고 있다. 광을 이용한 측정기술에 있어서 보다 작은 광 스팟의 구현은 높은 분해능을 위해서 필수 불가결한 조건이며, 광 기록분야에 있어서는 높은 기록밀도를 위해 핵심적인 기술이다. 하지만 스팟의 직경은 광의 회절한계(diffraction limit)에 의한 최소치를 갖는다. 예로서, 측정을 위한 광학 현미경 중 현재 일반적으로 널리 쓰이는 고배율 광학 현미경(high resolution optical microscope)은 측정 대상 표면에 물리적 손상을 주지 않으며, 측정 범위가 크고, 값이 싼 장점이 있다. 그러나 측정광의 회절 효과에 의해 분해능의 한계(diffraction limit)를 갖는다. 즉, 측정에 이용하는 광파장의 절반이하의 분해능은 얻을 수가 없다.

하지만 반도체 표면 조성감사, 광학적 특성감사 및 생체조직 검사등 여러 분야에서는 수십 nm

정도의 분해능이 필요하다. 따라서 이와 같은 고배율 광학 현미경으로는 측정이 불가능하다.

최근에 기존 광학계의 이러한 한계를 극복하기 위해서 근접장 광(near-field optics) 활용 기술이 부각되고 있다.¹ 이와 비슷한 수준의 기술로 STM과 AFM등이 있는데, 이들 모두 횡 방향으로의 분해능(lateral resolution)이 우수하여 회절한계(diffraction limit) 이하의 분해능을 얻을 수 있어 형상검사(Surface Topology)에 적합하지만, 측정 영역이 작고, 광학적 검사를 수행할 수 없거나, 속도가 느린 단점이 있다. 혹은 가격이 비싸거나 도체에만 국한되는 단점도 있다. 하지만 근접장을 이용한 주사 광학 현미경(NSOM)은 표면형상 및 광학적 특성을 다 같이 나노미터의 분해능으로 측정할 수 있고, STM과 AFM에 비해 장점이 많다. 이러한 근접장 광의 활용한 기술은 파장이하의 개구(aperture)나 고굴절율 매질을 활용하여 스팟 크기를 줄이고, 광학계와 샘플을 수십 nm로 근접시켜 고분해능을 구현한다. 작은 개구를 이용하는 방식은 주로 광섬유 탐침을 활용하며, 고굴절율 매질을 이용하는 방식은 SIL(solid immersion lens)이 주류를 이루고 있다. 이에 대한 개괄적인 내용 등을 소개하고자 한다.

* 한국과학기술원 기계공학과 메카트로닉스 연구실

Tel. 042-869-3265, Fax. 042-869-5225

Email lestle@kaist.ac.kr

근접장 원리를 이용한 표면형상 측정 및 정보기록 장치 연구 등에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

2. 역사적 배경

NSOM은 1928년 Edwar Hutchinson Syngge²에 의해 처음 이론적으로 제안되었다. Syngge에 의해 제안된 NSOM의 모습은 현재의 NSOM의 모습과 거의 흡사할 정도로 탁월한 아이디어였다. 이어 1972년에는 Ash와 Nichols가 microwave를 이용한 실험³을 통해 처음으로 Syngge가 제안한 이론을 실험적으로 증명하였다. 그리고 가시광선을 이용한 NSOM은 1982년 Pohl, Denk와 Lanz 의해 처음 개발되었는데, 기술적으로 모두 탐침(probe)을 이용한 실험이었다. 그후로 광섬유(optical fiber) 탐침을 이용한 실험이 계속되고 있고, 분해능 및 시스템 성능 향상을 위한 연구가 계속 되고 있다.

이러한 광섬유 탐침을 이용한 근접장 현미경과 더불어 1990년대 초에는 렌즈를 이용한 근접장 현미경이 미국 스탠포드대학의 Kino 교수에 의해 처음으로 제안되었는데⁴, 이것이 SIL(solid immersion lens) microscope 이다. 탐침을 이용한 NSOM과 마찬가지로 근접장을 이용하여 기존 광학 현미경에 비해 회절한계를 극복하는 높은 분해능을 얻은 효율적이고 안정적인 측정 장비였다.

이러한 근접장 기술을 이용한 연구는 현재 초정밀 부품 및 반도체 산업, 생명과학 및 정보기록 장치 산업 등에서 활발히 응용되고 있다.

3. NSOM의 광학적 원리

3.1 근접장 이론 (탐침형)

렌즈를 이용한 일반적인 광학계에서는 회절 한계(diffraction limit)로 인해 분해능의 한계가 발생한다. 그러나 NSOM은 이와 같은 회절의 한계를 극복하여 수십 nm이하의 분해능을 얻을 수 있다. 측정 원리는 다음과 같다.⁵ 끝단 직경이 수십-백 nm 정도의 탐침(probe)을 시편에 매우 가깝게 - 입사광의 파장보다 짧은 거리 - 근접시키고, 표면을 따라서 표면과 일정한 높이를 유지하며 스캐닝 하면서 시편 표면으로부터 광을 받아드리면 회절 한계에 의한 분해능의 한계를 극복할 수 있다. 이 현상은 푸리에 광학(Fourie optics)를 이용하여 간단하게 설명

하면 다음과 같다.

Fig. 3(a)와 같이 무한평판에 입사파장(λ)보다 작은 슬릿(길이 L)이 있고, 단색광(전기장이라 생각)이 입사할 때, 슬릿을 통과한후 far-field를 진행한 전기장은,

$$E_{o1}(x, z=Z) = \int_{-\infty}^{\infty} dk_x F_{i1}(k_x, z=0) * \exp(-ik_x x) \exp(-i(k^2 - k_x^2)^{1/2} Z) \quad (3.1)$$

E_{i1} 슬릿통과후 전기장이고, $F_{i1}(k_x, z=0)$ 은 $E_{i1}(x, z=0)$ 의 푸리에 변환이다. 파동수 $k=w/c$ 가 공간주파수 k_x 보다 큰 경우는 진행파 성분으로식이 의미를 갖고, 작은 경우는 에바네스cent 파로서 지수함수적으로 사라지므로 의미를 가지지 못한다. 즉, 진행파로서 상평면에 맺히게 된다. 반면에 Fig. 3(b)의 NSOM에서는 파장보다 작은 두 번째 슬릿(길이 ω)을 $\epsilon \ll \lambda$ 거리로 근접시킨 후, 첫 번째 슬릿을 x 방향으로 스캐닝하게 되는데, 이 파장보다 작은 거리를 진행하여 두 번째 슬릿을 통과한 후의 전기장 표현을 보면, 위와는 달리 $k < k_x$ 인 성분(k_x)도 적분구간에 포함되어 상평면으로 진행하게 된다. 즉, 회절한계를 넘어서는 공간주파수 성분(k_x)의 정보가 far-field에 전달된다.

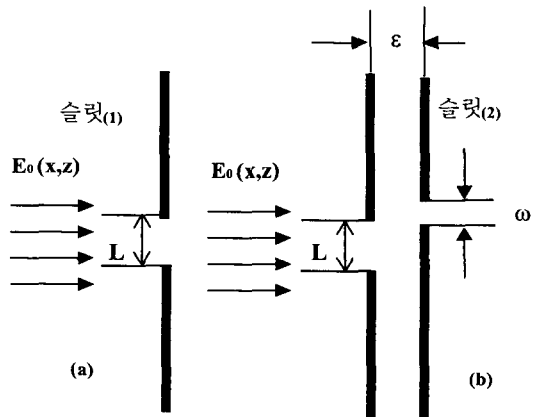


Fig 3.(a) far-field

3(b) near-field

결국 탐침과 시편사이의 거리 ϵ 와, 탐침 끝단의 직경 ω 를 사용하는 입사광의 파장이하로 작게 만들어 표면을 스캐닝하면 회절 한계이하의 분해능을 얻을 수 있다.

3. 2 에바네스트 커플링 (렌즈형)

위에 언급한 기본적인 근접장 이론에 기초를 둔다. 렌즈를 이용한 근접장 마이크로 스코프는 SIL(solid immersion lens)를 이용하여 대물렌즈에서 모아준 광을 더 높은 개구수(N.A.)를 갖도록 SIL 바닥면에 전반사 집광시켜, 파장보다 작은 초점이 생기는 것을 이용한다.⁴

Fig. 3(c)에서 대물렌즈의 초점거리에 SIL의 바닥면을 놓고 수직 입사시키면 바닥면에 초점이 맺히게 된다. 여기서 바닥면에 대하여 전반사 입사하게 되는 광들을 입사파, 투과파, 굴절파에 대하여 전자기학 경계조건과, 프레넬 방정식(Fresnel equation)을 통한 투과율과 반사율, 스넬의 법칙(Snell's law)를 적용키면, 투과파에 대한 일반적인 표현이 가능하다.⁶

$$E_t = E_{oi} e^{-\beta y} \exp i(k_x x \sin \theta_i / n_{ti} - \omega t) \quad (3.3)$$

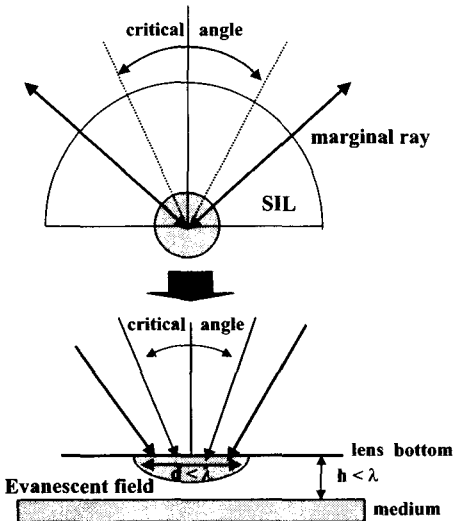


Fig. 3(c) SIL and evanescent coupling

이때, 물리적으로 허용되지 않는 양의부호를 무시하면, 진행방향으로 지수함수적으로 감소하는 파가 생기는 것을 확인 할 수 있다. 이 파를 에바네스트 파라고 하며, 수 파장이내의 거리에서 빠르게 감소한다. 이 에바네스트 파가 존재하는 범위의 거리 ($h < \lambda$)안에 측정코자하는 시편을 근접시키면, 에바네스트 파가 진행파형태로 근접된 시편과 커플링(coupling)을 일으킨다. 즉, 바닥면에 맺힌 작은 초점을 그대로 스캐닝에 이용하여 측정하게된다.

4. NSOM의 종류

앞에서 언급한 원리를 이용한 NSOM의 2가지 종류를 살펴보도록 하겠다.

4.1 탐침형 NSOM

탐침형 NSOM은 광파이버 탐침의 끝단을 샘플과 파장이하의 거리로 근접시키는 간격제어를 하게 되는데, 광파이버 탐침을 물체에 근접시키기 위해 일반적으로 사용되는 방식은 근접시 탐침의 끝에 가해지는 물체의 반력을 측정하는 것이다. 광파이버 경우 전단(shear)방향이 외력에 가장 민감하게 반응하므로 횡방향 반력인 전단력을 이용하며, 파이버를 특정 진폭의 주파수로 진동시키며 물체에 근접시켜, 물체의 반력에 의한 진폭의 감소를 측정하여 간격제어를 한다.

이러한 탐침의 진동량을 재는 방식중⁷ 가장 널리쓰이는 것은 Fig. 4(a)와 같이 광을 이용하는 방법으로, 탐침 끝에 초점을 맞춘 레이저를 PD로 감지하여 빔의 세기(intensity)의 변화를 이용하는 것이다. 이 때, 광파이버는 가진(dither) PZT를 이용하여 파이버 자체의 공진주파수로 진동시킨다. 그러나 이 방식은 레이저 광원의 불안정성에 의한 간격제어 정밀도 제약과, 낮은 파이버 공진점에 의한 스캐닝 속도의 제약이 발생하므로, 탐침의 특성분석에만 이용된다. 그리고 실제적인 물체의 표면 측정은 Fig. 4(b)와 같이 튜닝포크(tuning fork)를 이용하여 측정한다.

튜닝포크를 이용한 방법은 공진점이 높고 매우 큰 Q factor를 갖는 세라믹 튜닝포크를 이용한 것으

로, 이것을 가진 PZT에 부착하여 공진 주파수로 진동시킨다. 탐침이 샘플 표면에 근접하면 표면에 의한 전단력으로 공진점이 변화하고, 이에 따라 진폭이 급격히 변하므로 레이저 방식에 비해 매우 민감한 신호를 얻을 수가 있다.

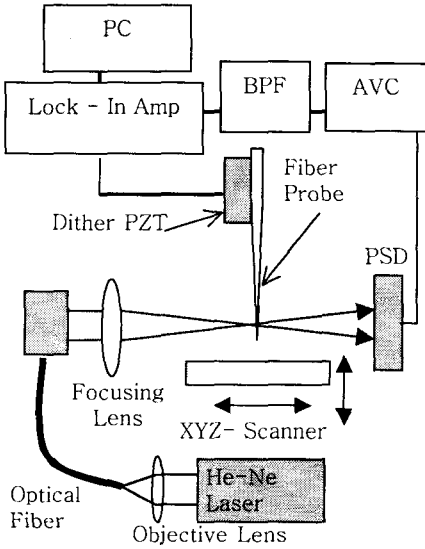


Fig. 4(a) schematic of beam deflection method

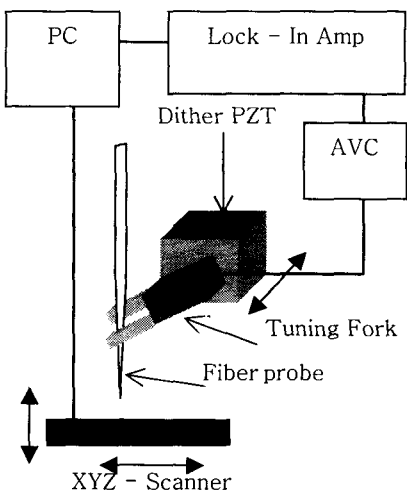


Fig. 4(b) schematic of piezoelectric tuning fork method

앞에 설명한 튜닝포크를 이용한 방법으로, 개구

100nm 정도의 광파이버 탐침을 이용하여 높이 100nm 주기 1 μm 의 기준격자(grating)를 측정 한 결과는 Fig. 4(c), 4(d)와 같다.¹¹

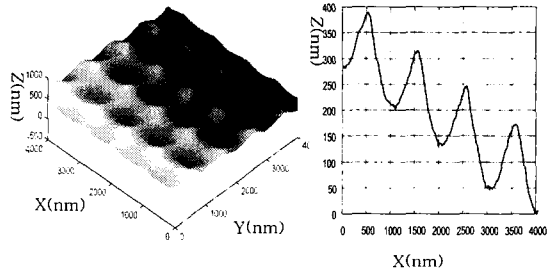


Fig. 4(c) 3-D plot & (d) cross-sectional view of the sample grating

이 결과에서 수평방향 분해능은 100nm, 수직방향 분해능은 5nm 보다 좋다는 것을 알 수가 있었다.

4.2 렌즈형 NSOM

탐침형이 작은 개구를 이용한 높은 분해능을 얻는 것이라면 렌즈형은 고굴절률을 갖는 렌즈를 이용하여 광학적인 개구수(N.A.)를 증가시켜서 작은 스팟을 만드는 것으로 분해능을 향상 시킨다. 분해능을 향상 시키기 위해 쓰는 SIL(solid immersion lens)의 형태는 Fig. 4(e), 4(f)의 두가지 형태가 있다.

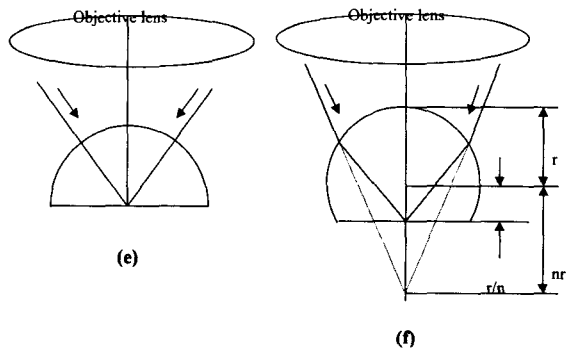


Fig. 4(e) hemispherical (f) truncated SIL

두 경우 모두 대물렌즈에서 나오는 광을 다시 한번 집광시켜주는 2차렌즈 역할을 하며 이때, 얻어지는 분해능의 한계는 다음과 같다.⁸

$$(e) \Delta d = \frac{\lambda}{2N.A.n} \quad (f) \Delta d = \frac{\lambda}{2N.A.n^2}$$

λ = 빛의 파장
 N.A. = 대물렌즈의 개구수
 n = SIL의 굴절률

이런 SIL의 효과를 이용하여 원리에서 설명한 대로 SIL 바닥면에 측정하고자 하는 물체를 파장이하의 거리로 근접시키면, SIL로 입사하는 광이 바닥면에서 전반사를 일으키면서 생기는 바닥면의 에바네스цент 장과 커플링을 일으키면서 스캐닝을 하는 것이다. 위의 분해능에 따르면 큰 개구수의 대물렌즈와 높은 굴절률의 SIL, 짧은 파장의 광원을 사용할 경우 아주 작은 스팟을 만들 수 있고, 그 작은 스팟의 크기가 그대로 스캐닝에 사용되는 것이다. 이 원리를 이용하여 처음으로 마이크로스코프가 Kino 교수에 의해 만들어졌다. Fig. 4(g)가 그것이다.

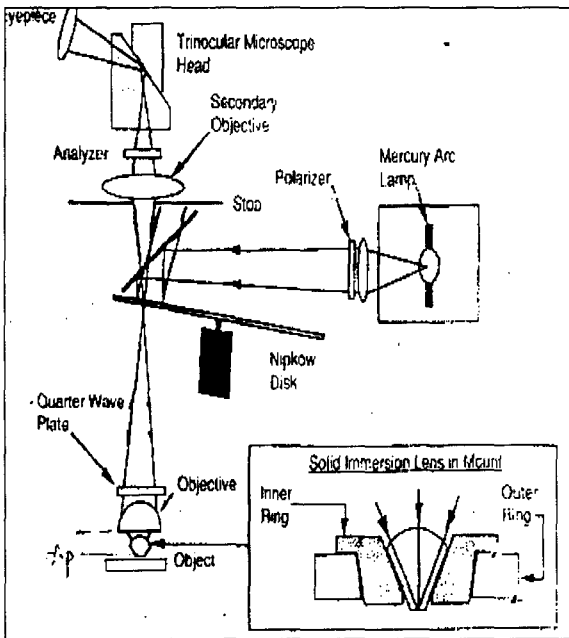


Fig. 4(g) solid immersion microscope with SIL

이 실험에서는 $n = 1.92$ 의 SIL과 436 nm의 광파장을 이용하여 실험을 하였고, 100nm 정도의 분해능으로 감광층 격자의 이미지를 확인하였다. 그 결과가 Fig. 4(h)이다.

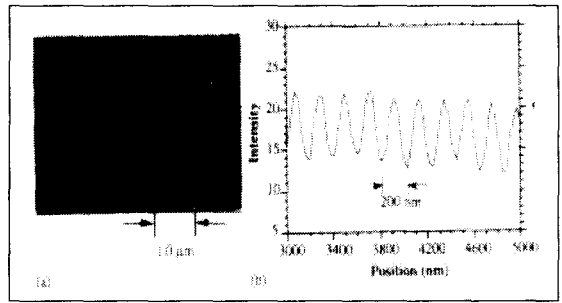


Fig. 4(h) image & corresponding line scan of 100nm lines and spaces in photoresist

5. 현재 기술 동향

앞에서 보았듯이 NSOM을 이용한 기술은 초정밀 부품의 표면형상 측정 등에 많이 이용되고 있지만, 그 외에도 근접장의 원리를 이용한 기술이 상당히 많은 분야에서 응용되고, 나날이 발전하고 있다. 탐침형, 렌즈형 모두 궁극적인 목표는 최소한의 광 스팟을 얻어내어 분해능을 향상시키고, 향상된 분해능을 이용하여 원하는 측정을 하는 것이다. NSOM이 처음 나왔던 80년대 중반에는 주로 마이크로스코프의 기술로 많이 개발되었다. D.W. Pohl에 의하면¹ 탐침의 NSOM을 이용하여 20nm 정도의 분해능을 얻었다고 보고되었다. 이서 90년대 초에 E. Betzig 등에 의하여 금속 코팅된 탐침을 이용하여 10nm 정도의 분해능을 얻었다고 보고되기도 하였다. 마찬가지로 렌즈(SIL)형 NSOM을 이용한 연구가 90년초 Kino 교수에 의해 보고된 후, 현재까지 마이크로 스코프분야에서 다각도로 분해능 및 시스템 적인 측면에서의 연구가 계속되고 있다.

또한 NSOM의 기술은 서론에서 언급했듯이 반도체 분야에서의 초정밀 검사 외에 리소그라피(lithography) 및 물체 내부구조나 조직검사 등에도 활발히 이루어지고 있다. M. K. Herdon 등에 의해 90년후반에 탐침을 이용하여 100nm 정도의 패턴 전사를 얻었다고 보고되었다. 그리고 SIL을 이용한 리소그라피 기술도 발표되기도 하였다.⁹ SIL을 이

용한 재료의 내부구조(GaAs quantum well structure)를 조사한 연구도 보고되고 있다.¹⁰

하지만 현재 근접장의 기술을 이용한 연구가 가장 활발히 이루어지고 있는 분야 중 하나가 정보 기록장치 관련분야이다. 기존의 광(optical) 정보기록 장치나 광자기(magneto-optical) 정보기록 장치에서, 기록밀도의 한계를 뛰어넘기 위하여 탐침이나 SIL을 이용하여 더 작은 기록 비트(bit)를 만들어내고 있다. Betzig의 실험에서 상당한 고밀도 기록장치의 가능성을 발견했으나, 광효율면이라든지 전송 속도 면에서의 단점등 때문에 렌즈(SIL)를 이용한 정보기록장치 연구가 활발히 이루어지고 있다. B.D. Terris 등에 의해 90년대 중반에 SIL을 부상헤드(flying head)에 올려 차세대 정보기록 장치를 위한 연구⁸ - Fig. 5(a) -가 보고된 후 현재까지 다양한 형태로 상당히 많은 연구가 보고되고 있다.

의 개발이 가능하다고 보고되고 있다. 이러한 추세에 맞춰서 본 실험실에서도, 기존의 광 픽업헤드(optical pick-up head)와 SIL을 이용하여 고밀도, 대용량 정보기록 장치의 개발에 대한 기초 가능성을 확인한 바가 있다.¹² Fig. 5(b)는 시스템 개략도이고, Fig. 5(c)는 700nm 표준시편에 대한 결과이다.

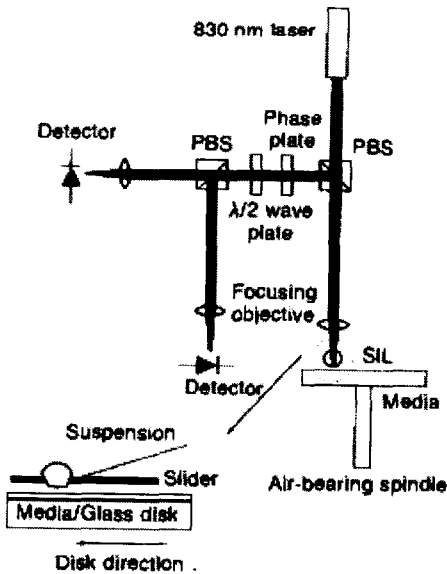


Fig. 5(a) schematic near-field optical data storage system with SIL
- obtained ~320nm spot size

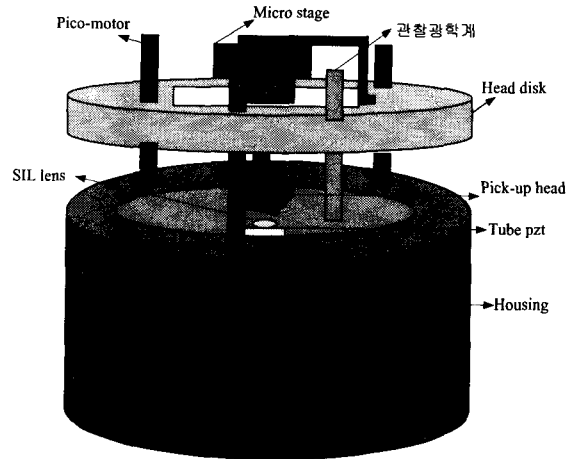


Fig. 5(b) schematic SIL microscope

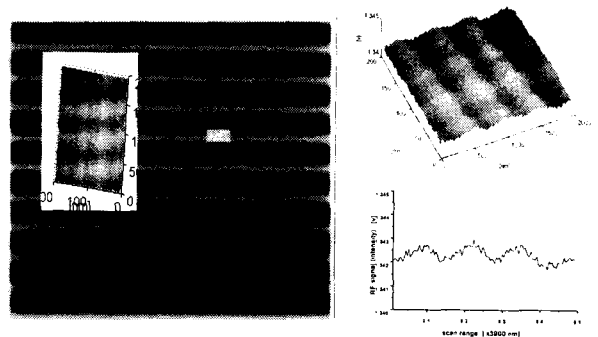


Fig. 5(c) 700nm- matching with SEM photo , 3-D plot , cross-sectional view

6. 결론

현재 많은 연구를 통해 앞으로는 더 작은 파장, 높은 굴절률의 렌즈 및 시스템적인 방법을 이용하여 현재의 광 정보기록 장치보다 20배 이상의 용량 기록밀도 수십 Gbit/sq. in 이상을 가지는 장치

지금까지 광 근접장(near-field)의 효과를 이용한 광계측 기술인 NSOM에 대하여 개괄적으로 그 원리 및 배경, 기술 현황 등을 살펴보았다. 기술의

역사가 그리 오래되지는 않았지만, 그 파급효과 및 발전가능성은 상당하다고 말할 수 있다. 80년대 중반에 처음 개발되어 현재는 많은 분야에서 연구가 활발하게 이루어져, 상품화의 가능성까지 대두되고 있고, 실제 상품화된 경우도 있는 실정이다. NSOM 부분에서는 대표적으로 미국의 TopoMetrix 라는 회사가 그 기술을 보유하고 있고, 정보기록 장치부분에서는 역시 미국의 TeraStor 라는 회사가 상품화의 가능성을 제시하고 있다.

NSOM의 기술은 앞으로, 단점을 보완하여 분해능을 더욱 향상 시키거나, 그 응용범위를 넓혀가는 방향으로 발전될 것이다.

후기

현재 세계적으로, 근접장 기술을 이용한 응용연구가 상당히 활발히 이루어지고 있다. 이 근접장을 이용한 기술은 미래 산업사회의 초정밀분야에 미치는 영향이 상당할 것이다. 따라서 우리 나라도 이에 관련된 기초 및 응용연구에 많은 노력을 기울여야 할 것이다.

참고문헌

1. U. Dürig, D. W. Pohl and F. Rohner, "Near-field optical scanning microscopy," J.Appl.Physics. Vol. 59 (10), pp. 3318-3327, 1986.
2. Michael A. Paesler, "Near-field optics-theory, instrumentation and application," John Wiley & Sons, Inc., pp. 9, 1996.
3. E. A. Ash, G. Nicholls, "Nature," Vol. 237, pp. 510-511, 1972.
4. S. M. Mansfield and G. S. Kino, "Solid immersion microscope," Appl. Phys. Lett. Vol. 57(24), pp. 2615-2616, 1990.
5. Michael A. Paesler, "Near-field optics-theory, instrumentation and application," John Wiley & Sons, Inc., 68-79, 1996.
6. E. Hecht, "Optics," Addison-Wesley, 110-128, 1998.
7. E. Betzig, P. L. Finn and J. S. Weiner, "Combined shear force and near-field scanning optical microscopy," J.Appl. Phys. Vol. 60(20), pp.

- 2484-2486, 1992.
8. B. D. Terris, H. J. Mamin, and D. Rugar, "Near-field optical data storage using a solid immersion lens," Appl. Phys. Lett. Vol. 65(4), pp. 388-390, 1994.
9. M. K. Herndon and R. T. Collins, "Near-field scanning optical nanolithography using amorphous silicon photoresists," Appl. Phys. Lett. Vol. 74(1), pp.141-143, 1999.
10. Takeaki Sasaki, Motoyoshi Baba, Masahiro Yoshita and Hidefumi Akiyama, "Application of solid immersion lens to high-resolution photoluminescence imaging of patterned GaAs quantum wells," Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 36, pp. L962-L964, Part 2, No. 7B, 1997.
11. Lee, J. H., "Shear force characteristic of NSOM and 3-Dimensional topology measurement," M.S paper in KAIST, pp. 50-51, 1999.
12. Yoon, H. K., "Design and fabrication of near-field microscope using solid immersion lens," M.S. paper in KAIST, pp. 43-54, 2000.