

내부 전반사 홀로그램을 이용한 미세 패턴의 결상*

김대준 · 박기수 · 권진혁

영남 대학교 물리학과

(1995년 3월 8일 반음)

내부 전반사(total internal reflection; TIR) 홀로그램을 이용하여 마스크의 미세 패턴을 기록, 재생 결상을 하였다. 직각 프리즘과 쇄기 살 다발 가르개(wedge beam splitter), 반사경을 이용하여 광학계를 구성하였으며 TIR 홀로그램의 특성을 조사하였다. 본 실험에서는 5 mW의 출력과 633 nm의 파장을 가진 He-Ne 레이저를 이용하여 Agfa 8E75 홀로그램 전판에 TIR 홀로그램을 기록하고, 기준파의 복소 공액파인 재생파로써 홀로그램을 재생하였다. 홀로그램 전판과 마스크와의 간격을 200 μm 로 유지했을 때 약 3 μm 의 분해능을 가진 재생상을 얻었으며, 70 μW 의 기록 광으로써 홀로그램을 기록하여 0.45%의 에너지 효율(difraction efficiency)을 얻었다. 본 실험을 통하여 렌즈를 쓰지 않는 TIR 홀로그래피의 평판 표시 소자 리소그라피 기술에 응용 가능성을 알아 보았다.

I. 서 론

복잡한 전자 회로의 미세 패턴을 웨이퍼 위에 옮기는 리소그라피(lithography)에서 현재 가장 많이 사용되는 방식은 크롬 마스크와 투영 렌즈, 반사경의 조합으로 이루어진 광 리소그라피이다. 반도체 집적 회로의 리소그라피 기술은 사용 광원의 단파장화, 개구수(numerical aperture)의 증대 등 단위 면적당 집적율을 높이는 방향으로 발전되어 왔다. 광 리소그라피 방식은 반도체 집적 회로뿐만 아니라 평판 표시 소자(flat panel display)에도 적용되고 있다. 그러나 평판 표시 소자는 화소(pixel)의 집적율을 높여서 해상도를 높이는 것과 함께 표시 면적을 크게 하는 것이 중요 과제이다. 대표적인 평판 표시 소자인 LCD(liquid crystal display)에서 트랜지스터 스위치로 된 화소를 얇은 필름 상에 옮기는 리소그라피는 높은 분해능과 넓은 면적을 동시에 갖기 위해서는 기존의 광 리소그라피로서는 기술적인 한계가 있다. 그것은 사용하는 투영 렌즈의 크기와 개구수의 제한에 의하여 기존의 8인치 이상의 크기의 표시 면적을 정렬과 노광하는데 어려움이 있기 때문이다^[1].

0 광 리소그라피와 달리 크롬 마스크를 쓰지 않고

홀로그램 마스크로써 위상 공액파를 이용한 리소그라피 기술의 가능성이 제시되어 왔다. 이 방식은 렌즈에 의한 결상 방식과는 달리 광학계에 존재하는 수차에 의한 상의 왜곡이 없는 등의 여러 가지 장점이 있다^[2]. 특히, TIR 홀로그램을 이용한 평면 표시 소자의 리소그라피 기술이 주목받고 있다. 내부 전반사 홀로그램은 1967년 Karl A. Stetson에 의해서 처음으로 고안이 되었으며^[3] 1980년대 후반 리소그라피에의 적용 가능성이 부각되어서 R.N. Ross 등에 의해서 연구가 활성화되었다^[4]. 1992년에는 이 TIR 홀로그램을 이용한 스위스 Holtronic사의 리소그라피 시스템이 개발되어 상용화되기 시작했다^[5]. TIR 홀로그램 리소그라피는 렌즈계를 쓰지 않아서 시스템의 기하학적인 수차가 없으며, 웨이퍼와 홀로그램 마스크가 근접(proximity)노광 방식이기 때문에 높은 개구수가 가능하고, 재생 면의 면적을 홀로그램 마스크의 면적에 따라 크게 할 수 있으며, 광 경로가 간단하고, 홀로그램과 웨이퍼의 간격과 기타 기계적 정밀도로도 높은 분해능의 상을 얻을 수 있는 등 많은 장점을 가지고 있다^[6]. TIR 홀로그램은 리소그라피 뿐만 아니라 내부 전반사에 의해 정보가 전달되는 광 컴퓨터의 홀로그램 광학 소자(holographic optical element; HOE)로써의 가능성도 제시되는 등 여러 가지 응용 방법이 연구되고 있다^[7]. 본 실험에서는 실용화된 장비의 개발에 앞서 선행 과제인 내부 전반사 홀로그램의 기초적인 연구로써 미세한 마스크의

*본 연구는 1994년도 영남 대학교 자유 공모 과제로 수행하였습니다.

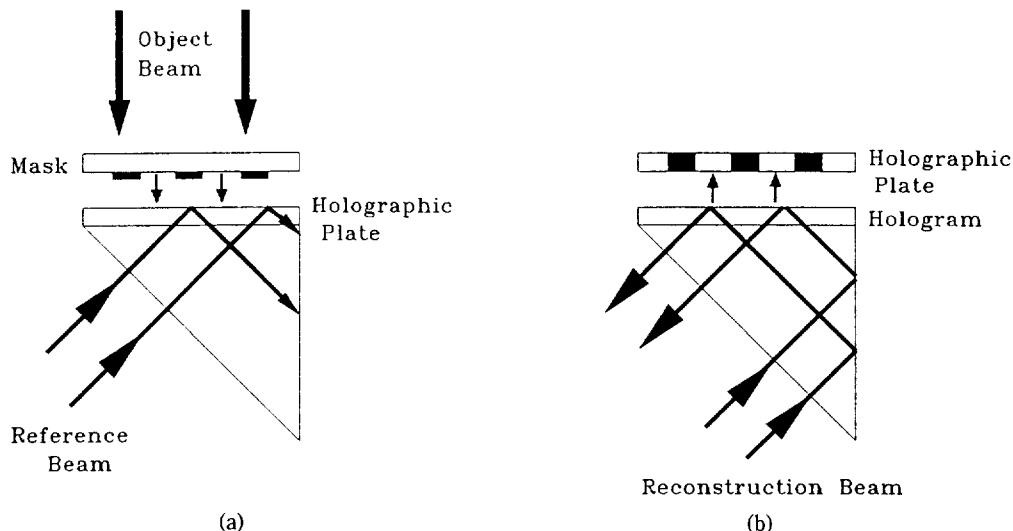


그림 1. TIR 홀로그램의 원리

(a) 기준파와 물체파의 간섭에 의한 TIR 홀로그램의 기록, (b) 재생파에 의한 TIR 홀로그램의 재생

패턴의 TIR 홀로그램 기록과 1:1 재생을 하였다.

II. TIR 홀로그래피의 원리

내부 전반사 홀로그램을 기록하기 위해 그림 1(a)와 같이 투과형 마스크를 통과시켜 만든 물체파를 홀로그램 전판에 입사시킨다. 이때 물체파는 마스크의 위상과 진폭 정보를 가지고 있다. 기준파는 프리즘을 통과하여 홀로그램 전판의 감광 유제층 뒷면에서 입사된다. 기준파가 홀로그램 전판의 공기와 감광 유제 층의 경계에 도달했을 때, 입사각을 임계각 보다 크게 하여 내부 전반사를 일으키게 한다. 이때 홀로그램 전판과 프리즘을 굴절률 정합액(index matching liquid)으로 접합하여 불필요한 내부 반사를 방지한다. 홀로그램 전판 위에서 기준파와 물체파가 간섭을 일으켜 마스크의 정보를 가진 홀로그램에 돌이 발(diffraction grating)이 기록된다.

기록된 홀로그램을 재생하기 위해서는 그림 1(b)와 같이 원래의 프리즘 위치에 현상 처리한 홀로그램을 정렬하고 원래의 기준파에 시간 반전된 재생파를 내부 전반사 되도록 입사시킨다. 이때, 홀로그램에 입사된 재생파에 의해서 실상이 원래의 마스크 위치에 결상된다. 여기서 에돌이 되지 않는 광은 공기와 감광 물질 층에서 전반사를 일으키므로 결상된 재생상에는 나타나지 않는다.

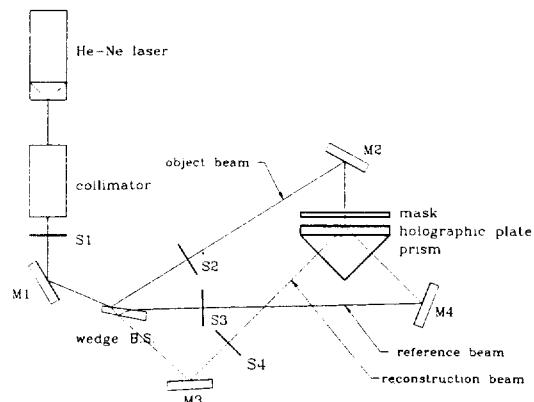


그림 2. TIR 홀로그램 기록, 재생 실험 장치도(M; mirror, S; shutter)

III. 실험 장치 및 방법

1. TIR 홀로그램의 기록과 1:1 재생

그림 2는 TIR 홀로그램을 기록하기 위한 실험 장치도이다. 외부의 진동을 줄이기 위해 실험 장치는 무 진동 광학 테이블 위에 장치되었다. 홀로그램을 기록하기 위한 광원은 5 mW의 출력과 선형 편광(p-polarization)된 He-Ne 레이저(633 nm)를 사용하였다. 홀로그램의 기준파는 내부 전반사를 거치기 때문에 S 편광 보다 P 편광이

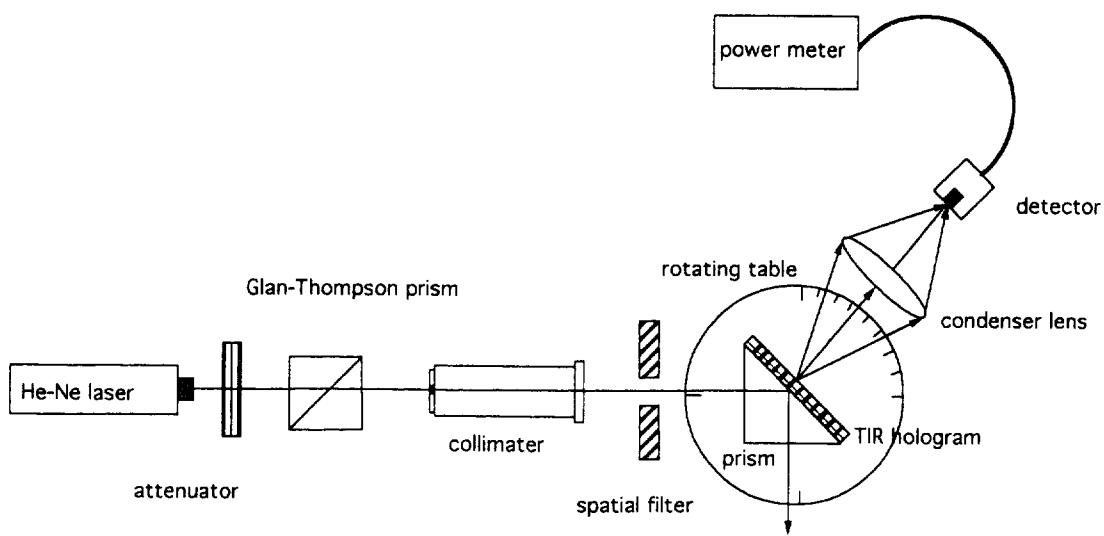


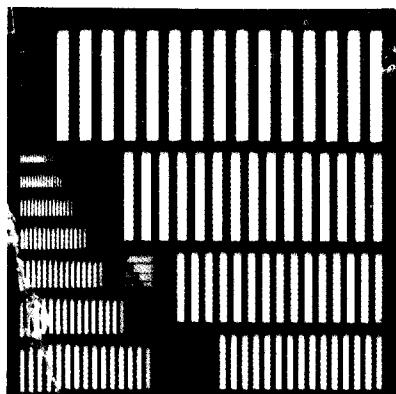
그림 3. TIR 홀로그램 에돌이 효율 측정 장치도

기준파의 위상 변화를 줄일 수 있다^[8]. 이 광은 시준기를 거쳐 빼기 살 다발 가르개에 입사된다. 홀로그램을 기록하기 위해서 셔터 2와 마스크를 지나는 물체파를 만든다. 물체파의 근원인 마스크로는 고분해능 시험 표적(High Resolution Test Target; Earing Co.)을 사용하였고, 기록 물질로는 Agfa 8E75 HD plate를 사용하였다. 기준파는 셔터 3과 반사경 4를 지나 프리즘의 아래에서 입사되어, 프리즘의 표면에 접합되어 있는 홀로그램 건판의 뒷면에서 45°로 입사되어 공기 층과 감광 유제 층의 경계에서 내부 전반사를 일으킨다. 이때, 기준파와 물체파의 광경로를 같도록 하여 간섭 거리 안에 들어오도록 조정한다. 홀로그램 건판과 프리즘 사이의 불필요한 내부 반사를 막기 위한 굴절률을 정합 액으로써 벤젠을 바른다. 벤젠은 독성은 있지만, 굴절률을 정합 기름에 비해서 점도가 낮아 암실 환경에서 제거가 용이한 장점이 있다. 이 기준파와 물체파가 간섭되어 물체의 위상과 강도 정보를 가지는 홀로그램 에돌이 발이 형성된다. 여기서 홀로그램 건판과 마스크의 간격을 200 μm로 조절하여 홀로그램을 기록하였다. 이 홀로그램은 20°C의 Kodak D-19 용액에서 5분간 현상하고 흐르는 물에 세척한 다음 고속 정착액(rapid fixer)에서 3분간 정착하여 현상하였다. TIR 홀로그램을 재생할 때는 셔터 2와 셔터 3을 닫고, 마스크 위치에 홀로그램 건판을 두고, 프리즘 위에 기록된 홀로그램에 굴절률을 정합 기름을 빌라 접합시킨다. 여기서 정확히 원래의 마스크 위치에 기록 할

홀로그램 건판을 정렬하는 것이 중요하다. 홀로그램의 재생에 있어서, 홀로그램에서 에돌이 되어 결상되는 광은 위상 공액파로 원래의 위치에 정확히 파면이 결상된다. 홀로그램의 촛점심도는 다른 광학 소자보다는 큰 값을 가진다^[9]. 그러나, 약간의 정렬 오차도 상 전체가 상점에 맞지 않게 된다. 실험에서는 이 상을 같은 위치에서 결상하기 위하여 위치 분해능이 0.5 μm 마이크로미터를 사용하여 원래의 위치에 정렬하였다. 셔터 4를 통과한 재생파는 홀로그램에 입사되어 원래의 마스크 위치에 재생상을 결상한다. 재생된 상은 현상 처리 후 광학 현미경으로 관찰하였다.

2. TIR 홀로그램의 에돌이 효율

TIR 홀로그램의 에돌이 효율을 구하기 위한 실험 장치도는 그림 3과 같다. He-Ne 레이저(20 mW, unpolarization)에서 나오는 광은 감쇄기(attenuator)에 의해서 강도가 조절되고, Glan-Thompson 프리즘에 의해서 편광의 방향이 조절된다. 이렇게 P 편광과 S 편광된 광원은 시준기에 입사되어 직경이 큰 평면파로 바뀌어 회전판 위의 프리즘에 입사된다. 이 광은 프리즘 위에 굴절률 정합 기름으로 접합되어 있는 TIR 홀로그램을 재생시킨다. 재생된 이미지를 집광 렌즈로 모아서 강도 측정 기로 강도를 측정하였다. 여기서 편광 방향을 P 편광과 S 편광으로 조절하고 홀로그램에 입사되는 각을 변화시켜, 이에 따른 에돌이 효율을 구하였다.



(a)

GROUP GROUP GROUP

1	2	3
1.00	10.00	100.0
1.26	12.59	125.9
1.58	15.85	158.5
2.00	19.96	199.6
2.51	25.12	251.2
3.16	31.63	316.3
3.98	39.82	398.2
5.01	50.14	501.4
6.31	63.13	631.3
7.98	79.48	794.8
10.00	100.00	1000.0

(b)

그림 4. 고 분해능 시험표적과 분해능 표

- (a) 실험에서 사용한 고분해능 시험표적
(b) 숫자는 mm당 패턴 수를 나타낸다.

IX. 실험 결과 및 토의

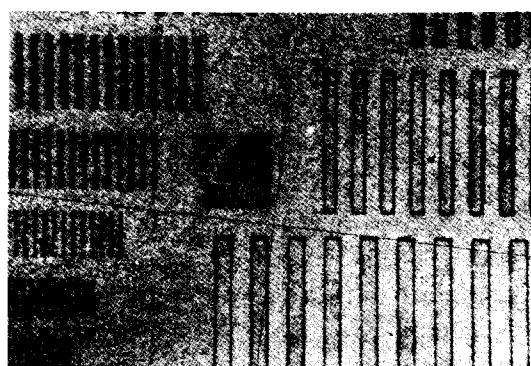
1. TIR 홀로그램의 1:1 재생결과

그림 4(a)는 TIR 홀로그램의 기록시 물체로 사용한 고분해능 시험 표적의 사진과 line/mm 도표이다. 시험 표적은 선폭 1 mm에서 0.5 μm까지 각각 다른 11개의 선폭을 가진 3개의 그룹으로 나누어져 있다.

그림 5(a)는 물체파와 기준파의 광의 총입사 강도 150 μW로 1/60초 동안 노출하고, 굴절율 정합액으로는 벤젠을 사용하고, 홀로그램 견판과 마스크를 200 μm 정도 근접시켜 기록한 홀로그램 사진이다. 마스크로 사용한 부분은 고 분해능 시험 표적의 2 그룹과 3 그룹의 패턴이다. 우측의 패턴 쪽에는 약간의 노출 부족 현상과 좌측의 패턴 쪽에는 노출 과다 현상이 보인다. 이것은 광의 강도가 균질하지 않아 일어나는 현상이다. 그림 5(b)는 그림 4(b) 홀로그램의 재생상이다. 큰 패턴 부분은



(a)



(b)



(c)

그림 5. 기록된 TIR 홀로그램과 1:1 재생상

- (a) 총 입사광 강도 150 μW, 노출 시간 1/60초, 마스크와 홀로그램 견판 간격 200 μm로 기록한 TIR 홀로그램의 100배 확대상
(b) 기록된 홀로그램의 재생상의 100배 확대상
(c) 재생상의 3그룹만의 500배 확대상

테두리 부분만 나왔다. 이것은 Karl A. Stetson이 언급한 TIR 홀로그램의 비선형성과 노출 과다로 인한 상으로

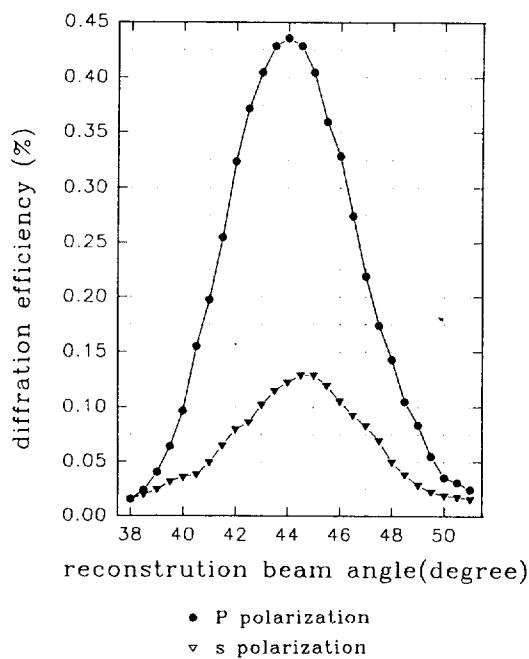


그림 6. 재생광의 입사각과 편광에 따른 TIR 홀로그램의 에들이 효율

보여 진다^[10]. 그림 5(c)는 3 그룹만을 500배 확대한 재생상이다. 선폭이 약 $2.5 \mu\text{m}$ 인 패턴까지 구분됨을 알 수 있다. 그리고 상 전체에 많은 양의 스펙클 잡음광을 볼 수 있다. 이 잡음광은 물체파가 수직 입사에 의한 결과 감광 물질층의 은 입자의 비선형적인 산란으로 인한 것으로 보여진다.

2. 입사각과 편광에 따른 에들이 효율

TIR 홀로그램의 에들이 효율은 재생파의 입사각과 편광에 의해서 많은 영향을 받는다. 실험에서 우리는 약 0.45%의 에들이 효율을 얻었다. 낮은 에들이 효율은 물체파와 기준파의 불완전 평면성, 기록 물질의 비선형 효과, 굴절률 정합액과 프리즘 사이의 굴절률 접합의 불량 등의 요인과 기준파와 재생파의 입사각의 오차 등으로 인한 것이라고 생각된다. 그래서 재생시 재생광의 입사각에 따른 에들이 효율을 구하였다. 이 측정을 위한 홀로그램은 총입사강도 $70 \mu\text{W}$, 기준파와 물체파의 강도비(k) 1로 기록된 홀로그램을 재생하였다. 그림 6은 재생광의 각에 따른 에들이 효율이다. P 편광된 재생파로 재생된 에들이 효율이 S 편광된 재생파로 재생한 에들이 효율보다 3배 이상 높음을 알 수 있다. 이것은 P 편광된

재생광은 S 편광된 재생광보다 상대적으로 내부 반사율이 낮아서 재생에 기여하는 광 강도가 큰데서 기인한 것으로 생각된다^[11]. 그리고 재생상의 입사각에 있어서 원래의 기준파의 입사각인 45° 근방에서 최고치의 에들이 효율이 나타남을 알 수 있다.

V. 결 론

시준기와 쇄기형 살 다발 나누개, 프리즘을 이용하여 TIR 홀로그램 광학계를 구성하여 $70 \mu\text{W}$ 의 입사 강도로 TIR 홀로그램을 기록하고, P 편광된 $400 \mu\text{W}$ 의 재생광으로 재생하여서 약 0.45%의 에들이 효율을 얻었다. 또, 고 분해능 시험 표적을 물체로 하여 홀로그램 전판과 $200 \mu\text{m}$ 의 간격을 유지하고 기록 재생하여서 약 $3 \mu\text{m}$ 의 분해능을 가진 재생상을 얻었다. 이론적으로는 사용한 광원의 파장 한계인 $0.6 \mu\text{m}$ 까지의 분해능을 가진 재생상을 얻을 수 있다. 본 실험에서 얻은 이론치보다 낮은 분해능과 많은 잡음광은 실험적 조건에 의해 발생하는 것으로 생각된다.

먼저 TIR 홀로그램을 재생할 때, 렌즈를 사용하지 않고 높은 개구수를 얻기 위해서 필수적으로 근접 노광에 의한 재생을 한다. 이에 따라 TIR 홀로그램과 홀로그램 전판 사이의 간격을 $200 \mu\text{m}$ 정도로 유지했을 때는 많은 잡음광이 재생상에 기록된다. TIR 홀로그램 재생시 발생되는 잡음광의 원인은 다음과 같다. 첫째로 본 실험에서 TIR 홀로그램의 에들이 효율이 약 0.45%로 다른 종류의 홀로그램과 비교해 볼 때 에들이 효율이 낮아 5 mW 의 출력 강도를 가진 He-Ne 레이저로는 1분 이상의 노출 시간이 필요하다. 노출 시간이 길면 길수록 잡음광은 많이 발생된다. 둘째로 실험에서 사용한 Agfa 8E75 전판은 미시적으로 보아 기록 매질로 쓰인 약 50 nm 은염 분자가 젤라틴 층에 골고루 퍼져 있는 것이다. 은염 분자의 산란에 의해서 불필요한 잡음광이 많이 발생한다. 또 현상 과정이 습식 처리인 관계로 현상 과정 중에 감광 물질 층의 부풀림과 줄어듦에 의해 상의 분해능이 떨어지고 현상후 안정도도 낮다. 세째, 굴절률 정합의 불완전에 의해서 프리즘과 홀로그램 경계에서 불필요한 내부 반사가 발생된다. 이러한 잡음광의 원인을 제거하면 선명한 재생상을 얻을 수 있을 것이다. 그리고 가우시안 분포의 물체파의 균질한 노광을 위해서 조사광을 scanning 조사하고, 프리즘에 기록물질을 직접 코팅하여 굴절율 정합액을 사용하지 않음으로써 상의 질을 향상시킬 수 있을 것이다. 앞으로 잡음광이 적은 가시광 영역에

감광되는 포토레지스트, 전식 처리방식으로 처리후 변형이 적은 포토 폴리머, 회절 효율이 높은 DCG(dichromated gelatin)전판 등과 같은 다른 기록 매질과 고출력과 단파장의 아르곤 레이저를 사용하여 더욱 미세한 패턴을 효율적으로 재생할 수 있는 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] A. R. Nobari, Semiconductor International, Dec., (1992).
- [2] M. D. Levenson et al., J. Opt. Soc. Am., **71**, 737 (1981).
- [3] Karl A. Stetson, Appl. Phy. Lett. **11**, 225(1967).
- [4] I. N. Ross, G. M. David, D. Klemitz, Appl. Opt. **27**, 967(1988).
- [5] Francis Clube et al., Opt. Eng. **32**, 2403(1993).
- [6] John Brook, Ren D. ndliker, Solid State Technology, **32**, 91(1989).
- [7] Damien Prongue, Hans Peter Herzog, Opt. Eng. **33**, 636(1994).
- [8] P. Ehbets et al., Opt. Commun. **89**, 5(1992).
- [9] 김 시옥 외 4명, 새물리, **34**, 43(1994).
- [10] Karl A. Stetson, Appl. Phy. Lett. **12**, 362(1968).
- [11] Max Born, Emil Wolf, *Principles of Optics*(Pergamon press, Oxford, 1977).

Lensless Imaging of Fine Patterns by TIR Holography

Dae Jun Kim, Ki Soo Park and Jin Hyuk Kwon

Department of Physics, Yeungnam University, Kyung San 712-749, Korea

(Received: March 8, 1995)

A TIR hologram was recorded on a Agfa 8E75 holographic plate by using 5 mW, 633 nm He-Ne laser beam. The resolution of the TIR holographic imaging was measured by 3 μm , when the imaging was 200 μm . The diffraction efficiency of 0.45% was obtained from a 400 μm , P-polarized reconstruction beam.