

Photoresist을 이용한 Thin relief 위상형 홀로그래프 격자에 관한 연구.

신 광 용 최 도 형 김 남 박 한 규

연세대학교 전자공학과

A Study on thin relief phase holographic grating using photoresist.

K. Y. Shin D. H. Choi N. Kim H. K. Park

Dept. of Electronics Yonsei Univ.

< ABSTRACT >

There are various holographic recording materials, such as Dichromated Gelatin, Silver Halide, Thermoplastic, Photoresist. In this paper especially, we used Photoresist to make the phase holographic grating.

Deep-groove diffractive grating formed in relatively thin holographic recording material is to express high diffraction efficiency. Phase holographic grating recorded in photoresist can be used very practical because it has the high diffraction efficiency, and it is possible to make a replication easily. So, it has the merit in recording the optical holographic grating than any other materials.

1. 서론.

홀로그래프 스케너를 제작하기 위한 holographic recording material 은 Silver halide, Dichromated gelatin, Inorganic Photochromic, Thermoplastics, Photoresist 등이 있다. 1970년대에 발표된 논문에서는, PR의 물리적 특성으로 인한 회절 효율은 이론적, 실험적으로도 33% 이상을 넘지 못하였다. 그러나, 1980년대에 들어, M.G. Moharam과 T.K. Gaylord는 dielectric surface-relief 홀로그래프 격자의 회절 현상에 대한 컴퓨터 시뮬레이션값이 98% 이상될 수 있음을 입증했다.

본 논문에서는 hologram을 제작하기 위하여 thin relief 위상 홀로그래프 기록 물질인 PR을 사용하였다. 이 thin relief 위상 hologram은 금속으로 원판을 제작하고 이 원판을 비닐(vinyl)같은 적당한 물질에 압연(embossing), contact-printing 방법을 통해서, 대량 복사 (mass production)가 가능하다.

또한, photoresist는 감광 물질 두께가 1 μm 정도의 얇은 층으로도 thick 형태가 되어, 1차 회절파의 효율을 상당히 증가시킬 수 있다.

2. Photoresist의 특징.

일반 photographic film의 특성이 H-D curve로 나타나는 것과는 달리, PR 물질의 특성은 노출에 의한 감광물질의 두께 변화량 d로써 표시된다. 즉,

$$\Delta d = f(e) \quad \text{---(1)}$$

감광물질 내의 depth가 x인 지점에서의 positive PR에 흡수되는 빛 에너지는

$$I(x) = I \exp(-dN, x) \quad \text{---(2)}$$

d = 흡수에 의한 분자 cross section 영역(cm²)

N = 흡수분자의 밀도(cm⁻³)

이고, PR층이 수 μm 정도의 얇은 막이라면, 흡수가 적으므로 감광 물질에 흡수될 수 있는 전체 photon 의 수(N)는

$$N = I_0 / hf \quad \text{---(3)}$$

h = planck's 상수 (6.23×10⁻³⁴ MJ-sec)

f = 빛주파수 (frequency of light) (sec⁻¹)

이다. positive PR의 비흡수된 분자(unabsorbed molecules)를 흡수된 분자(absorbed molecules)의

생성비율과 같다하면

$$-\left\{ \frac{d}{dt} N_1(t) \right\} = \eta_q (I_0/hf) \alpha N_1(t) \quad \text{---(4)}$$

이다. 모든 분자가 excited molecules가 되는 것은 아니므로 photon을 흡수하면 quantum efficiency 가 흡수 photon의 숫자에 대한 excited 분자의 수로써 정의될 수 있다. (4)식을 $N_1(t)$ 에 대해서 풀면,

$$N_1(t) = N_0 \exp[-(\eta_q \alpha / hf) I t] \quad \text{---(5)}$$

$$Du = [N_1(t)] / N_0 = \exp[-cE] \quad \text{---(6)}$$

$D = Du$; 비흡수된 PR분자의 부분

$N_0 =$ 전체 PR분자에 대한 처음밀도(cm^{-3})

$c =$ positive photoresist의 노출 상수 ($\text{cm}^2 \cdot \text{mj}^{-1}$)

$E = I_0 t$ PR노출 세기 밀도 (mj/cm^2)

또한, $Da = N_2(t) / N_0$ 로 정의하고 이때

$Da =$ 흡수된 PR분자의 부분

$N_2(t) =$ photon을 흡수한 positive molecules의 밀도(cm^{-3})

이다. 따라서 $Da + Du = 1$ 이므로

$$Da = 1 - Du = 1 - \exp(-cE) \quad \text{---(7)}$$

positive PR의 현상 처리에서 노출된 부분(photon의 흡수)과 비 노출된 부분(photon의 비흡수)이 다른 속도로 Developer에 반응하므로 PR상의 한 점에서 $\Delta d(\mu\text{m})$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta d = (Da r_1 + Du r_2) \cdot T \quad \text{---(8)}$$

$r_1 =$ 현상처리 상태에서의 흡수된 분자의 제거(etching)속도 ($\mu\text{m} \cdot \text{sec}^{-1}$)

$r_2 =$ 현상처리 상태에서의 비 흡수된 분자의 제거(etching)속도 ($\mu\text{m} \cdot \text{sec}^{-1}$)

$T =$ 현상시간(sec)

식(6)과 (7)을 식(8)에 대입하면, $r=r_1-r_2$ 이므로

$$d = (r_1 - \Delta r \exp(-cE)) \quad \text{---(9)}$$

만일, $E = 0$ 이면 $\Delta d = r_2 T$, 즉 Δd 는 비흡수 etching 속도상수에 의해서만 결정된다. 또한 E 가 매우 크다면 $d \approx r_1 T$ 즉, Δd 는 흡수 etching 속도상수에 의해서 결정된다.

만일 $cE \ll 1$ 이면, $\Delta d \approx r_1 c E + r_2 T$ ---(10)

이러한 선형 특성(linear characteristic properties)에 의해 d 는 상수 $r_2 T$ 와 노출 $\Delta r T c E$ 에 의해서 결정된다.

노출세기 E 와 노출시간 T 의에 결정되는, 감광 물질 두께 변화량과 공간주파수에 의해 결정되는 격자주기(grating period)의 비는 1차 회절파의 회절효율을 결정하는 중요한 요소가 된다. 최대 회절을 얻기위한 같은 격자 profiles에 따라 변화해 된다. 표 1)은 격자 모양(grating profiles)의 변화함에 따라 최대 회절효율이 발생하는 d/λ 의 값을 나타내고 있다.

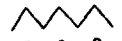

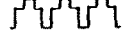

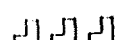
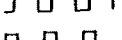
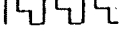

	$(1/P_{0,1})_{max}$	$\frac{d}{\lambda}$
	99.6	2.10
	95.9	1.75
	89.4	1.60
	88.6	1.55
	71.8	1.62
	67.7	1.67
	61.0	2.10
	50.6	2.10

표 1) 여러 격자 profiles에 대한 최대 1차 회절효율

3. 실험 및 결과 고찰.

그림 1)과 같이 두 beam이 θ_1 과 θ_2 로 감광 물질에 입사될 때, 공간 주파수 (spatial frequency) f 는

$$f = 1/d = 1/\lambda \times (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) \quad \text{---(11)}$$

이다.

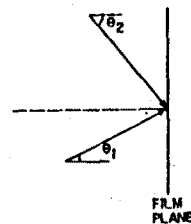


그림 1) Recording Geometry.

높은 1차 회절 효율을 얻기 위해서는 오직 하나의 회절파만을 생성시킬 수 있도록 공간주파수 f 를 높여야 한다. 공간주파수 f 가 너무 커지면, 1차 회절파가 substrate로 전파하지만, 대체로 $f > 1/\lambda$ 를 만족하는 공간주파수를 가져야 회절 효율을 높일 수 있다.

이때,

$$Q = 2\pi\lambda \cdot fD / n \quad \text{---(12)}$$

D: 격자 두께(μm)

n: 감광물질의 굴절율

로 주어지는 격자의 유효 두께 Q factor는 공간 주파수 f^* 에 비례하게 된다.

즉, Q 값이 10 보다 적으면 thin 형태가 되고, 10 보다 크면 thick 형태가 된다.

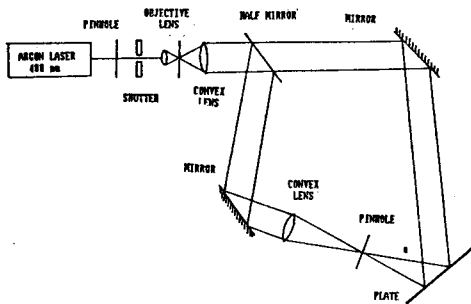


그림 2] Holographic 격자(grating)을 생성하기 위한 광학 시스템(system)

사용된 광원은 파장(λ)이 488 nm 인 Argon laser 이며, 광원에서 나온 빔은 Pinhole을 거쳐 상대적으로 균일한 세기를 갖는 빔이 된다.

Objetive Lens 와 Convex Lens에 의해 Pinhole을 통과한 빔은 확대된 평행광이 되어 Half Mirror에 입력된다. Half Mirror는 입사한 빔을 같은 세기의 두개의 빔으로 나누며, 이중 한 빔은 평행광 상태로 Holographic 감광물질에 입사되며, 다른 한 빔은 볼록 렌즈를 통과하여, 초점 a의 Diverging 구면파가 된다. 즉, 평면파는 Reference beam(기준파)가 되고, 구면파는 Objective beam(물체파)이 된다. 입사하는 두빔의 각도는 감광물질의 수직축에 대해 각각 θ_1 과 θ_2 가 된다.

θ_1 과 θ_2 로 입사된 beam은 그각도에 따라서 공간 주파수 f 를 갖는 격자를 생성하게 된다. 높은 공간 주파수 f 를 얻기 위해서는 Substrate에 Photoresist를 매우 고르게 입혀야 한다.

이러한 정확도를 갖기 위해서, 본 실험에서는 유리 기판(Glass Substrate)위에 Spin-coating을 하였다.

표 2]은 Shipley MP-1400 series PR을 사용할 때, PR의 종류와 모터(Motor)의 회전 속도에 의한 PR의 Coating 두께를 나타낸다.

STANDARD MICROPOSIT S1400 SERIES PHOTO RESISTS					
Product Type	Approximate Viscosity (cSt)	Resist Thickness (μm)			
		3000 rpm	4000 rpm	5000 rpm	6000 rpm
S1400-17	5	0.53	0.46	0.41	0.36
S1400-21	8	0.81	0.71	0.62	0.56
S1400-23	11	1.01	0.88	0.77	0.69
S1400-24	12	1.12	0.95	0.85	0.77
S1400-25	14	1.22	1.05	0.92	0.84
S1400-26	16	1.38	1.16	1.04	0.94
S1400-27	18	1.51	1.29	1.14	1.03
S1400-29	24	1.80	1.53	1.37	1.23
S1400-30	27	1.94	1.66	1.47	1.32
S1400-31	32	2.10	1.83	1.64	1.46
S1400-33	44	2.57	2.20	1.96	1.75
S1400-37	71	3.29	2.85	2.54	2.25

표 2] 회전 속도에 대한 PR의 Coating 두께

본 실험에서는 S1400-27을 사용하여, 원하는 두께를 얻기 위해 Thinner와 PR을 적절히 배합하여, Spin-coating 하였다.

Spin-coating을 하는 일련의 과정은 다음과 같다.

- 1) 유리 기판(Glass substrate)을 흐르는 물에 깨끗이 씻는다.
- 2) 초음파 세척기를 사용하여 5분간 세척한다.
- 3) 완전히 물기를 제거한 후, 유리기판을 150°C 에서 10분간 Hard Baking 한다.
- 4) Acetone을 사용하여 유리기판을 깨끗이 닦는다.
- 5) 유리기판위에 PR을 Spin-coating 한다.
- 6) PR을 Coating 한 유리기판을 80°C 에서 5분간 Soft-Baking 한다.

두 빔을 $\theta_1 = 45^\circ$ 와 $-\theta_2 = 45^\circ$ 로 입사할때 형성되는 hologram spatial frequency는 ($\lambda = 488\text{nm}$) 인 Argon laser를 사용하여 $f = 1/\lambda d = (1/488) \times 10^3 \times [\sin 45^\circ - \sin(-45^\circ)] = 2898 \text{ line} / \text{mm}$ 이다.

반도체 공정에서 PR을 사용해서 얻을 수 있는 정확도가 1 μm이상인 것과 비교하면, PR의 광학적 처리에 의한 정확도는 0.2 μm 이상이다. 즉, PR이

홀로그램을 제작하기 위한 감광 물질로 이용될 때는 매우 높은 공간주파수(High spatial frequency)를 갖는다.

회절과정을 결정하는 중요한 요소인 노출시간은 얻고자 하는 hologram의 크기에 따라 변하게 된다. 따라서 hologram의 크기가 변함에 따라, 노출시간은 변하게 된다. 본 실험에서 단계적으로 얻은 hologram의 크기는 축의 길이가 1.5 cm, 1.1cm인 타원이다. 이 크기에 대한 노출시간은 13분 일때 최대 회절효율을 갖는다. 즉 13분을 전 후로하여 회절효율은 감소한다.

Developing 시간은 developer 용액과 증류수 (DI water)와의 희석 정도에 따라 변화하게 된다. developer용액과 증류수가 1 : 2 로 희석하였을때의 적절한 developing 시간은 15 - 20초이고, 1 : 3 의 희석에서는 30 - 40초 이다.

즉, 증류수에 대한 developer 용액의 희석이 상대적으로 높아짐에 따라 최적의 developing 시간은 순간적으로 발생한다.

본 실험에서 얻은 hologram 중에서 노출시간과 developing 시간을 가장 적절한 실험 데이터 값은 다음과 같다.

노출시간 : 13분, developing 시간 : 15초
 developer 용액 : 증류수 (DI water) = 1 : 2

홀로그램 감광판에 수직으로 입사되는 기준빔 (평행광)과 물체빔(물체광)의 세기는 3.00 mW이다. 이러한 세기의 빔이 13분 동안 노출되었을때 감광판에 노출되는 빔의 세기는 4.68 J/cm²이다.

이 hologram의 회절효율을 측정하기 위하여 입사빔의 세기를 0.62 μW로 할때, 입사빔 세기는 0.14 μW, 1차 회절 비임의 세기는 0.23 μW 를 가진다. 따라서, 입사빔의 세기에 대한 1차 회절파의 세기는 37.1 % 이며, 반사빔의 세기를 뺀 회절 효율은 48 % 이다.

0.62 μW의 입사 세기가 반사빔 세기 0.14 μW, zero order 세기 0.16 μW, 1차 회절 빔 세기 0.23 μW의 합과 같지 않는 것은, glass의 표면에 생긴 2차

격자에 의한 회절때문이다. 즉, glass의 두께를 t 라 할때 glass 뒷면에서 반사된 빔이 입사되는 빔과 2t의 path차이에 의해 격자가 형성 된다. 따라서 f = 2898 line/mm 에 대한 1차 회절빔이 다시 여러 order를 가지게 되므로, detector에 모든 term이 입사되지 못하므로, 세기의 차이를 가지게 된다.

높은 회절효율을 얻기 위해서는 하나의 회절파(-1차 order)만을 형성하는 높은 공간 주파수를 가져야한다. 즉, 공간 주파수 f가 1/λ. 보다 큰 값을 갖도록 두 빔의 각도를 넓혀야 한다.

4. 결론

Holographic Recording Material로 Photoresist을 이용하여, 공간주파수 f가 2898 lines / mm 인 격자의 회절 효율이 48 % 이상을 얻어 냈다.

즉, 격자 주기 λ 와 노출량에 따라 격자 두께 d 의 비가 적절한 값을 갖게 되면 회절 효율이 높아짐을 알수 있다.

Developer 온도, Developing 시간, Fixing 시간등도 회절 효율을 결정하는 중요한 요소임을 알수 있다.

Glass 면에서 반사되는 Noise를 Index Matching Oil등을 사용하여 제거하게 되면, 상당히 높은 회절 효율을 얻을 수 있다.

< 참고 문헌 >

1. S.L. Norman & M.P. Singh, Appl. Opt., Vol.14, No. 4 pp818-820, Apr., 1975
2. R.C. Enger & S.K. Case, JOSA, Vol.73, No.9, pp1113-1118 Sept., 1983
3. M.C. Moharam & T.K. Gaylord, JOSA, Vol.72, No.10 pp1385-1392, Oct., 1982
4. R.A. Bartolini, Appl. Opt., Vol.14, No.13, pp129-139 Jan., 1974
5. F. Iwata & J. Tsuliuchi, Appl. Opt., Vol.13, No.6 pp1327-1336, June, 1974