

## 2차원 및 3차원의 주기적인 구조 제작을 위한 2차원 이진 위상마스크의 설계와 분석

김남식 · 원영희 · 고근하 · 조두진<sup>†</sup>

이주대학교 물리학과

Ⓣ 442-749 경기도 수원시 팔달구 원천동 산5번지

(2000년 10월 23일 받음, 2001년 1월 18일 수정본 받음)

엄밀한 결합과 해석(rigorous coupled-wave analysis)을 이용하여 2차원 및 3차원의 주기적인 구조 제작을 위한 2차원 이진 위상 회절격자를 설계 및 분석하였다. 이 회절격자는 근접장 홀로그래피를 위한 위상 마스크로서 수직 입사하는 빛에 대하여 여러 개의 회절파들을 발생하고 이들은 공간상에 주기적인 간섭무늬를 형성한다. 입사파의 편광상태, 파장, 표면 양각형태, 요철 깊이와 duty cycle을 바꿈으로써 회절된 빛들을 조절할 수 있는데, 2차원 구조의 경우 0차 회절효율이 최소가 되고 1차 회절효율이 최대가 될 때 최적의 결과를 보인다. 한편 0차 회절효율이 상당한 크기를 가지거나 심지어 다른 차수의 회절효율 보다 높을 때, 마이크로 미터 이하의 미세구조를 갖는 tetragonal-body-centered 구조와 hexagonal 구조의 포토닉 결정을 제작할 수 있는 다양한 형태의 3차원 공간 간섭무늬가 형성된다.

Keywords : DI.010, DI.020.

### I. 서 론

홀로그래피를 이용하여 제작된 회절격자는 분광기, 음향광학, 집적광학, 광정보처리, 광계산 등 광범위한 분야에서 핵심적인 역할을 담당해오고 있으며 최근에는 전계 방출 디스플레이(Field Emission Display), 광학 필터, distributed feed-back 레이저, 광섬유 격자 등에서도 중요한 역할을 해오고 있다.<sup>[1,2]</sup> 또한 마이크로 미터 이하의 미세 구조를 갖는 가시광선 영역의 포토닉 결정을 제작하는데 적합한 하나의 방법으로 주목을 받고 있다.<sup>[3-7]</sup> 가장 간단한 형태인 1차원 배열의 홀로그래픽 회절격자의 경우 2 beam을 사용한 홀로그래픽 리소그래피 방법이 사용되어 왔고, 2차원 평면에 점 배열로 이루어진 2차원 구조를 갖는 홀로그래픽 회절격자의 경우에는 1차원 회절격자와 마찬가지로, 2 beam을 사용하여 한번 노출시킨 후 90°를 회전시켜 다시 노출을 시키는 다중 노출 방식을 사용하여 제작하거나 4 beam을 사용한다. 그리고 가시광선 영역의 포토닉 결정을 제작하기 위하여 3차원 공간상의 간섭무늬를 원하는 형태로 얻기 위해서는 3~6개 정도의 가간섭성 레이저 빛이 사용된다.<sup>[3-7]</sup> 그러나 이와 같은 방법은 번거롭고 정렬상태를 유지하기가 어려워 제작에 많은 문제가 있다. 한편 그림 1에 보인 근접장 홀로그래피를 이용하면 낮은 공간 및 시간 간섭성의 광원을 사용할 수 있고 위상 마스크로부터 회절된 상대적으로 일정한 세기, 방향과 위상을 갖는 빛을 사용하기 때문에 정렬상태를 유지하는데 이상적이며 스캐닝에 의한 노광이 가능하고 높은 안정성을 필요로 하지 않는다. 또한 제작비용이 저렴하고 신속히 제작 할 수 있으며 대량생산이 가능하고 재현성이 뛰어나다.<sup>[8]</sup>

본 논문에서는 2차원 구조 및 3차원 공간상의 구조를 구현하는데 있어서 기존의 홀로그래픽 리소그래피가 갖는 문제점을 해결할 수 있는 근접장 홀로그래피에 사용될 2차원 이진 위상 회절격자를 엄밀한 결합과 해석(rigorous coupled-wave analysis, RCWA)을 이용하여 설계 및 분석하였다. 직육면체 요철과 원통형 요철의 정사각형 배열, 원통형 요철의 벌집 배열의 3가지 표면 양각 형태에 대하여 입사파의 편광상태, 파장, 주기, 요철 깊이와 duty cycle을 변화시키며 회절된 빛들의 세기와 이들의 간섭에 의하여 발생하는 2차원 및 3차원 간섭무늬를 분석하였다.

### II. 엄밀한 결합과 해석(RCWA)

2차원 이진 위상 회절격자 마스크 설계를 위해 표면양각 회절격자에 대한 RCWA를 사용하였다.<sup>[6]</sup> 일반적인 2차원 회절격자에 의한 3차원 회절 현상을 그림 2에 보였는데, 여기에서는 사용되는 기호들을 설명하는 정도로 RCWA에 대하여 매우 간략히 살펴 보고자 한다. 회절격자는  $xy$ -평면에 있으며 그 회절격자 벡터는  $\vec{K} = (K_x, K_y)$ 이고 요철 부분의 깊이는  $z$ 축 방향으로  $d$ 이다. 여기에서 2차원 회절격자의 주기적인 배치각 직사각형인 경우를 고려하였는데

$$K_x = \frac{2\pi}{\Lambda_x}$$

$$K_y = \frac{2\pi}{\Lambda_y}$$

로서  $\Lambda_x$ 와  $\Lambda_y$ 는 각각  $x$  방향과  $y$  방향의 주기를 나타낸다.

회절격자는  $z < 0$ (입사파 영역, I),  $0 \leq z \leq d$ (요철 영역, II),  $z > d$ (투과파 영역, III)의 세 영역으로 나누어지는데, I과 III영

<sup>†</sup>E-mail: djcho@madang.ajou.ac.kr

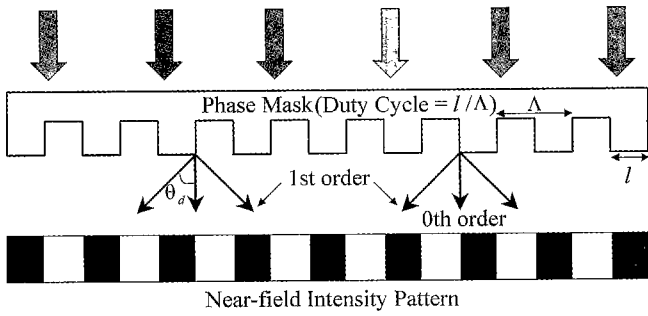


그림 1. 근접장 홀로그래피를 사용한 회절격자 제작.

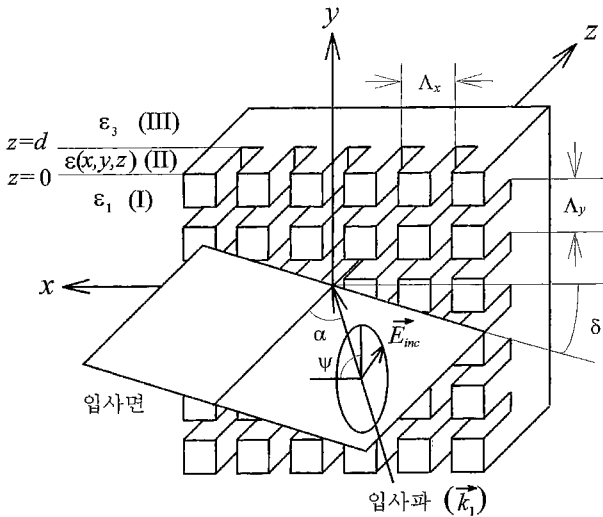


그림 2. 2차원 표면양각 회절격자에 의한 3차원 회절.

역의 복소유전상수는  $\epsilon_1$ 과  $\epsilon_3$ 이다. 요철 영역(II)의 복소유전상수  $\epsilon_2$ 는  $(x, y, z)$ 의 함수로서, 이 영역을  $N$ 개의 층(이진 이상의 경우  $N=1$ )으로 분할하여  $\epsilon_2$ 가 층 내부에서  $z$  방향으로 변화하지 않는다고 가정하고 이를 푸리에 급수로 전개한다. 본 논문에서는  $j = \sqrt{-1}$ 으로 하고 전자기장의 시간적 변화는  $e^{j\omega t}$ 로 가정한다.

입사파는 그 전기장 벡터가

$$\vec{E} = \hat{u} e^{-j\vec{k}_l \cdot \vec{r}}$$

로서  $k_l$  벡터는 크기가  $\frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon_1}$  ( $\lambda_0$ 는 진공중 파장)이고 입사파의 진행방향( $\alpha, \delta$ )를 가지며,  $\hat{u}$ 는

$$\begin{aligned} \hat{u} = & [(\cos \gamma \cos \Psi - j \sin \gamma \sin \Psi) \cos \alpha \cos \delta \\ & - (\cos \gamma \sin \Psi + j \sin \gamma \cos \Psi) \sin \alpha] \hat{x} \\ & + [(\cos \gamma \sin \delta - j \sin \gamma \sin \Psi) \cos \alpha \sin \delta \\ & + (\cos \gamma \sin \Psi + j \sin \gamma \cos \Psi) \cos \delta] \hat{y} \\ & - (\cos \gamma \cos \Psi - j \sin \gamma \sin \Psi) \sin \alpha \hat{z} \end{aligned}$$

로 주어지는 단위편광벡터이다. 여기에서 입사면은  $x$ 축과  $\delta$ , 입사방향은  $z$ 축과  $\alpha$ 의 각을 이루며,  $\Psi$ 는 타원편광의 장축과 입사면 사이의 각을 나타내고  $\tan \gamma$ 는 장축에 대한 단축의 비를 나타내는데,  $|\gamma| \leq 45^\circ$ 의 범위를 가지며  $\gamma$ 가 양(+)일 때 오

른손편광을 나타낸다.

RCWA에서는 회절격자의 세 영역에서 각각 맥스웰 방정식의 해를 구하고 각 경계면에서 전기장과 자기장의 접선성분에 대한 경계 조건을 적용시킨다. 영역 I과 영역 III에서는 전기장 벡터를

$$\vec{E} = \vec{E}_{inc} + \sum_m \sum_n \vec{R}_{mn} e^{-j\vec{k}_{l,mn} \cdot \vec{r}} \quad (1)$$

와 같이 평면파로 전개 할 수 있는데, 여기서  $\vec{R}_{mn}$ 는  $m, n$ 차 반사 회절파의 규격화된 전기장 벡터,  $\vec{T}_{mn}$ 는  $m, n$ 차 투과 회절파의 규격화된 전기장 벡터를 나타낸다. 전개에 사용된  $m$ 과  $n$ 의 최대값을  $M$ 이라 하면  $(2M+1)^2$ 은 계산에 사용되는 공간 조화파의 수이다. 위상정합과 Floquet조건에 의하여

$$\vec{k}_{l,mn} = k_{x,mn} \hat{x} + k_{y,mn} \hat{y} + k_{z,l,mn} \hat{z} \quad (l=1, 3)$$

로 주어지는데,

$$k_{x,mn} = k_l \sin \alpha \cos \delta - mK_x$$

$$k_{y,mn} = k_l \sin \alpha \sin \delta - nK_y$$

$$k_{z,l,mn} = \sqrt{k_l^2 - k_{x,mn}^2 - k_{y,mn}^2}$$

이며  $k_3 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon_3}$ 는 투과 영역에서의 파수이다. 영역 I에서의  $k_{z,1,mn}$ 는 음(-)이거나 허수부가 양(+)인 순허수이고 영역 III에서의  $k_{z,3,mn}$ 는 양(+)이거나 허수부가 음(-)인 순허수이다.

투과 영역 III에서 회절된 빛들에 의해 만들어지는 간섭무늬는 식 (1)로부터

$$I \propto \vec{E}_3 \cdot \vec{E}_3^* \quad (2)$$

와 같이 계산 할 수 있다. 입사파의 편광 상태, 파장, 요철주기, 깊이, duty cycle 등의 주어진 조건에 따라 회절된 빛들은 회절효율과 편광상태에 많은 변화를 보이며 이들의 다중 빔 간섭에 의한 무늬 역시 다양한 분포를 보인다.

RCWA를 이용하여 그림 3의 직육면체와 원통형 요철의 정사각형 배열 그리고 원통형 요철의 벌집 배열을 갖는 세 가지 형태의 이진 위상 마스크들을 설계하였다. 직육면체와 원통형 요철의 정사각형 배열은  $\Lambda_x = \Lambda_y$ 로  $x, y$  방향의 주기가 같으며 원통형 요철의 벌집배열의 경우  $\Lambda_y = \sqrt{3}\Lambda_x$ 의  $y$  방향 주기를 갖는다. 이와 같은 마스크들은 간섭 리소그래피 또는 전자빔

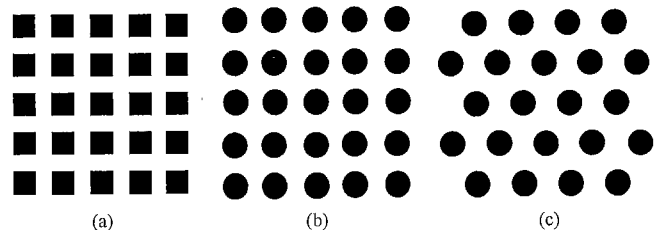


그림 3. 2차원 이진 위상 마스크의 요철형태와 배열: (a) 직육면체 요철의 정사각형 배열; (b) 원통형 요철의 정사각형 배열; (c) 원통형 요철의 벌집 배열.

리소그래피를 이용하여 비교적 용이하게 제작 할 수 있다.<sup>[2,4,10]</sup> 2차원의 주기적인 구조에 대해서는 정사각형 배열만을 고려하였고, 3차원의 경우는 3가지 배열을 전부 고려하였다.

근접장 홀로그래피에 사용된 빛의 파장  $\lambda_0$ 는 포토레지스트 노광에 널리 쓰이는 He-Cd laser의 325 nm, 기판은 fused silica를 사용하였는데, 이 파장에서 fused silica의 굴절률은 1.482이다. 그리고 계산에 사용한 공간 조화파의 수는 121 ( $M = 5$ )로 하였다.

### III. 2차원의 주기적인 구조

2차원의 주기적인 구조로는 정사각형 배열만을 고려하였는데, 그림 3(a), (b)와 같은 직육면체 요철과 원통형 요철을 갖는 위상 마스크를 설계하였다. 제작되는 구조의 질은 노광에 사용될 간섭무늬의 가시도(visibility)와 무늬의 균일도로 평가될 수 있다. 가시도는

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (3)$$

으로 정의되는데,  $I_{\max}$ 와  $I_{\min}$ 은 각각 간섭무늬 세기의 최대값과 최소값이다. 무늬의 균일도는 2차원 평면상에서 나타나는 균일함뿐만 아니라 실제 제작 시 기판의 위치나 평평도에 따라 기판에 수직인 방향으로 나타나는 불균일함을 포함한다. 일반적으로 0차 회절효율이 최소이고 1차 회절효율( $m = \pm 1; n = 0$  및  $m = 0; n = \pm 1$ )이 최대일 때 가시도와 균일도가 최적인 것으로 나타났다.

#### 3.1. 직육면체 요철의 정사각형 배열

임의로 선택한 459 nm의 주기를 갖는 직육면체 요철의 정사각형 배열 위상 마스크에 의해 만들어지는 2차원 간섭무늬는 입사파가 원편광인 경우, 요철 깊이는 451 nm이고  $x$ 축과  $y$ 축의 duty cycle이 0.478일 때 0차 회절효율은 0.012로서 최소이고 1차 회절효율은 4개의 회절파 모두 0.185로서 최대

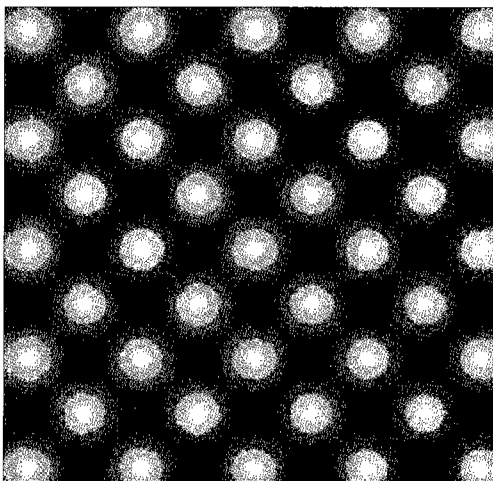


그림 4. 직육면체 요철의 정사각형 배열 위상 마스크에 있어서 원편광 입사파에 대한 정규화된 2차원 간섭무늬.

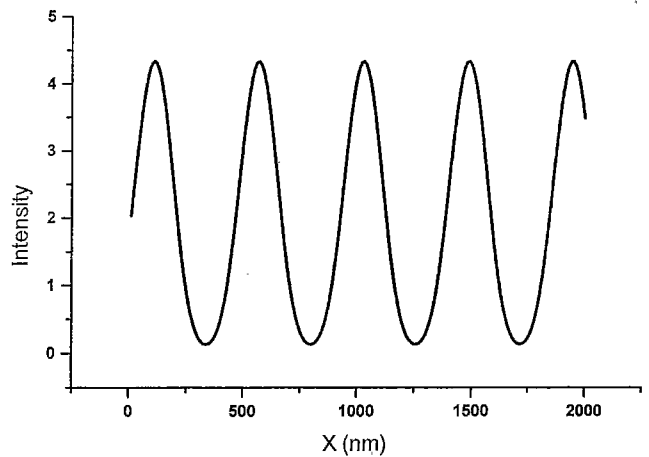


그림 5. 직육면체 요철의 정사각형 배열 위상 마스크에 있어서 원편광 입사파에 대한 간섭무늬의  $x$ 축 방향의 세기 분포.

가 된다. 이때 발생하는 간섭무늬는 그림 4에 보인 바와 같은데, 이때 위상 마스크와 기판간의 거리는  $3.6 \mu\text{m}$ 이며 이 그림의 전체 크기는  $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ 이다. 세기의 최대와 최소 비율은 31.9로서 식 (3)에 따라 가시도는 0.939이다. 그림 5에 간섭무늬의 위치에 따른 세기 분포를 보였는데, 최대점을 지나는  $x$ 축과 나란한 선에 따른 것을 보였으며,  $y$ 축 방향으로의 변화는 대칭성으로 인하여 이와 동일하다. 참고적으로 요철 깊이가  $\lambda_0/2 \sqrt{\epsilon_1 - \epsilon_3}$ 이고 duty cycle이 0.5일 때 0차 회절효율이 0이 되는 스키타 회절 이론은 적용되지 않는다.

입사파가 TE 편광인 경우 그림 6과 같은 간섭무늬(전체 크기는  $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ )가 나타나고, TM 편광의 경우 이것을  $90^\circ$  회전시킨 간섭무늬가 발생한다. 즉 편광 방향으로 늘어난 무늬를 얻게 된다. TE 편광과 TM 편광에 대한 간섭무늬의 세기를 평균하면 비편광 입사파에 대한 간섭무늬를 얻게 되는데, 이는 그림 4와 동일하다. 다시 말하면 단일 편광을 갖는 가간섭성 광 대신 비편광 입사광을 사용하더라도 우수한 간섭무늬를 얻을 수 있다.

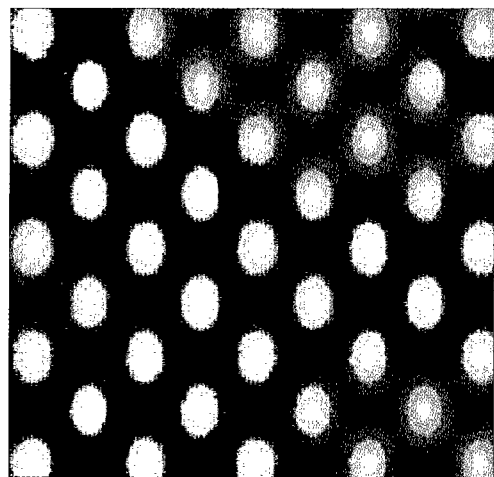
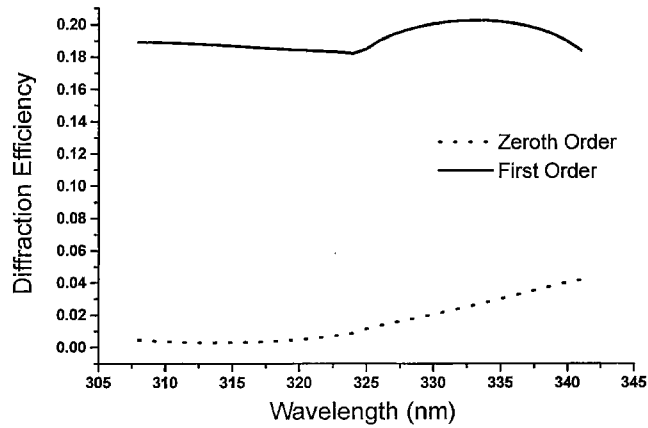


그림 6. 직육면체 요철과 원통형 요철의 정사각형 배열 위상 마스크에 있어서 TE편광 입사파에 대한 정규화된 2차원 간섭무늬.

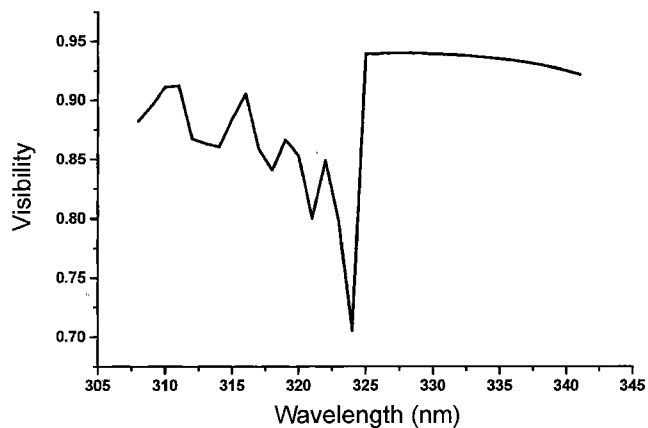
물론 입사파의 편광에 따라 회절효율도 달라진다. 앞에서 설계한 위상 마스크의 경우 TE 편광에 대하여 0차 회절효율은 0.012로 원편광의 경우와 같고, (1,0)차와 (-1,0)차의 회절효율이 0.156이며 (0,-1)차와 (0,1)차의 회절효율은 0.214이다. 이때 가시도는 0.99이고, TM 편광의 경우는 전체적으로 90° 회전시키면 된다.

이제 위상 마스크의 실제 제작 시 발생하는 오차의 영향을 살펴보고자 한다. 입사하는 빛의 편광 상태가 원편광이고 파장, 격자주기, 요철 깊이와 duty cycle이 설계된 값으로부터 최대 ±5%의 오차를 가질 때 회절효율과 가시도의 변화를 분석하였다.

첫째, 입사하는 빛의 파장이 설계된 파장으로부터 벗어날 때 0차 및 1차 회절효율을 분석하였는데, 이 경우 파장 변화 폭이 좁으므로 굴절률 변화는 무시하였다. 325 nm미만의 파장에서는 4개의 회절된 빛( $m = \pm 1; n = \pm 1$ )이 추가적으로 발생하여 그림 4와 같은 간섭 무늬 제작이 가능하지 않으며 가시도도 상당히 낮아진다. 그러나 325 nm 이상의 파장에서는 0차 회절과 이외에 4개의 1차 회절파만이 발생하여 그림 4에서와 같은 고른 분포의 간섭무늬가 형성된다. 파장변화에 따른 0차



(a)

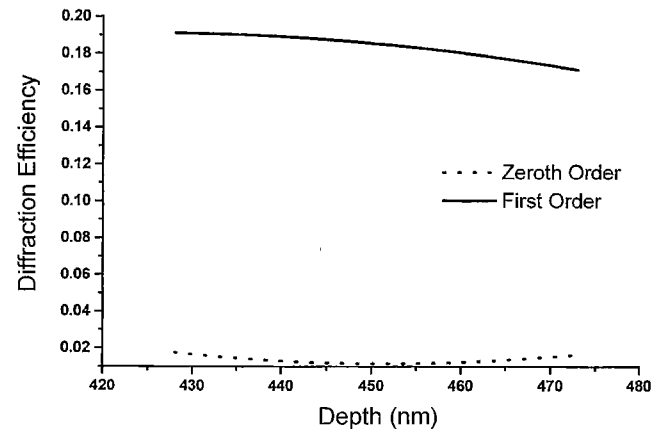


(b)

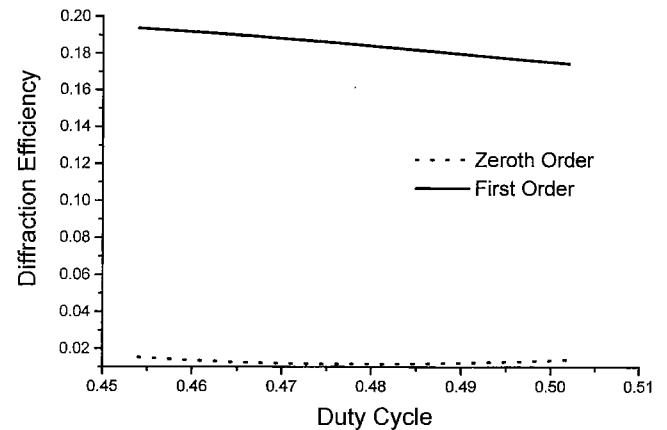
그림 7. 주기 459 nm, 요철 깊이 451 nm, duty cycle 0.478인 직육면체 요철의 정사각형 배열 위상 마스크에 원편광된 빛이 입사할 때, 파장 변화에 따른 (a) 0차 및 1차 회절효율과 (b) 가시도.

및 1차 회절효율의 변화를 그림 7에 나타내었는데, 325 nm 이상에서 0차 회절효율이 점점 커지는 경향을 보이며 1차 회절효율에서도 변화가 보이거나 가시도는 325 nm의 4%인 13 nm 내에서의 변화에 대해 1.1%만의 감소를 보이며 전체 5% 즉, 16.3 nm 벗어났을 경우 1.9%가 감소되었다. 따라서 간섭무늬의 주기는 파장에 따라 변하지 않으므로, 위상 마스크에 레이저가 아닌 파장 대역폭이 비교적 큰 빛을 사용하더라도 가시도의 저하에 따라 간섭무늬의 세기 분포만 저하 될 것이다.

둘째, 위상마스크의 격자주기가 설계로부터 벗어날 때의 변화는 위의 파장에 대한 것과 거의 같다. 분석 범위 안에서 격자주기가 커질수록 0차 회절효율이 낮아지고 1차 회절효율도 따라서 낮아지는 경향을 보이거나 큰 변화는 없었다. 그러나 460 nm 이상의 격자주기에서는 파장 변화에서 본 바와 같이 회절된 빛 4개가 추가로 발생하여 원치 않는 2차원 간섭무늬를 발생시키며 가시도에서도 저조한 결과를 보여준다. 그러나 459 nm 이하의 격자주기에서는 안정된 2차원 간섭무늬를 발생시키며 설계 주기의 4% 즉, 18.4 nm의 변화에 대해 가시도가 1.4%정도 감소하며 전체 5% 즉, 23.0 nm내에서는



(a)



(b)

그림 8. 주기 459 nm인 직육면체 요철의 정사각형 배열 위상 마스크에 원편광된 파장 325 nm의 빛이 입사할 때, (a) duty cycle 0.478에서 요철 깊이의 변화에 따른 0차 및 1차 회절효율; (b) 요철 깊이 451 nm에서 duty cycle의 변화에 따른 0차 및 1차 회절효율.

2.9%의 감소를 보인다.

한편, 요철 깊이와 duty cycle의 변화에 따른 0차 및 1차 회절효율을 그림 8에 보였다. 이들의 증가에 따라 전체적으로 1차 회절효율이 감소하는 경향을 나타내지만 그림 4와 같은 2차원 간섭무늬를 유지한다. 가시도는 큰 변화를 보이지 않고 직선에 가깝게 나타나므로 그래프를 생략하였는데, 요철깊이의 전체  $\pm 5\%$ 의 변화 폭에 대해 즉, 설계된 요철 깊이 450 nm를 기준으로  $\pm 22.5$  nm내에서 3.2%의 변화를 보이고 duty cycle의 경우는 전체  $\pm 5\%$ 의 변화 폭에 대해 즉, duty cycle 0.478을 기준으로  $\pm 0.024$ 의 변화에 대해 3.1%만의 변화를 보인다.

### 3.2. 원통형 요철의 정사각형 배열

원통형 요철의 정사각형 배열 위상 마스크에 있어서 입사파가 원편광이고  $x, y$ 축 방향의 주기가 459 nm로 직육면체 요철의 위상 마스크와 같은 경우, 요철 깊이가 448 nm, duty cycle이 0.530(요철의 반지름이 122 nm)일 때, 최소의 0차 회절효율과 최대 1차 회절효율을 보인다. 이때 0차 회절효율은 0.009이고 1차 회절효율은 4개의 회절과 모두 0.192로 직육면체 요철과 비교하여 0차 회절효율은 낮고, 1차 회절효율은 높다. 그러나 가시도는 0.933으로 직육면체 요철보다 오히려 약간 떨어진다. 간섭무늬는 위상 마스크와 기관 사이의 거리가 직육면체 요철의 경우와 같이 3.6  $\mu\text{m}$ 일 때 그림 4와 거의 같으며, 세기분포 또한 그림 5와 거의 같다.

입사파가 TE 편광인 경우 직육면체 요철과 마찬가지로 그림 6과 같은 간섭무늬가 나타나고 TM 편광에서도 직육면체 요철의 경우와 같다. 위에서 설계된 위상마스크의 경우 TE 편광에 대하여 0차 회절효율은 0.009로 원편광의 경우와 거의 같고, (1,0)차와 (-1,0)차의 회절효율이 0.176이며 (0,-1)차와 (0,1)차의 회절효율은 0.209이다.

직육면체 요철에서와 같이 실제 제작 시 발생하는 오차의 영향을 살펴보고자 입사하는 빛의 편광 상태가 원편광이고 파장, 격자주기, 요철 깊이와 duty cycle이 설계된 값으로부터 최대  $\pm 5\%$ 의 오차를 가질 때 회절효율과 가시도의 변화를 분석하였다. 그 결과 직육면체 요철의 경우와 거의 같은 변화를 보였는데, 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 파장이 변화할 때 회절효율은 그림 7과 거의 같은 변화를 보인다. 가시도는 325 nm이상 4%내에서의 변화에 대해 1.2%의 변화를 보이며 전체 5%안에서 2.3%의 변화를 보였다. 둘째, 격자주기가 변화할 때 459 nm이하에서는 안정된 2차원 형태의 간섭무늬를 만들며 가시도는 4%의 격자주기 변화에 대해 1.6%의 변화를 보이고 전체 5% 범위 안에서 2.5%의 변화를 보인다. 요철깊이와 duty cycle의 변화에 따라 회절효율은 그림 8처럼 전체적으로 1차 회절효율이 감소하는 경향을 나타내며, 가시도는 요철 깊이의 경우  $\pm 5\%$ 의 변화에 대해 1.6%의 변화를 보이고 duty cycle의 경우  $\pm 5\%$ 의 변화에 대해 1.0%만의 변화를 보인다. 따라서 파장과 주기의 변화에 대해서는 직육면체 요철과 비슷한 정도의 변화를 보이지만, 요철깊이와 duty cycle의 변화에 대해서는 원통형 요철이 더 적은 변화를 보인다.

### 3.3. 0차 회절효율에 따른 z축 방향으로의 세기 분포 변화

0차 회절효율을 최소로 하는 동시에 1차 회절효율을 극대화하여 바람직한 간섭무늬를 발생하는 위상 마스크를 설계할 수 있다. 그러나 0차 회절효율이 0으로 수렴하지 않는 한  $z$ 축 방향으로의 주기적인 구조가 나타나게 되며, 앞서 설계된 직육면체 요철의 정사각형 배열 위상 마스크에 있어서 마스크와 기관 사이의 거리에 따라 최악의 경우 그림 9와 같이 세기 분포가 고르지 못한 2차원 간섭무늬가 형성된다. 정사각형 배열의 경우  $z$ 축 방향의 주기는

$$\frac{\Lambda_z}{\Lambda_x} = \frac{\Lambda_x}{\lambda} + \sqrt{\frac{\Lambda_x^2}{\lambda^2} - 1} \quad (4)$$

로 주어지는데, 여기서  $\lambda$ 는 투과 매질(공기)에서 빛의 파장을 나타낸다.

이와 같은 문제를 해결하는 방법 중 한가지는 고른 분포의 간섭무늬가 나오는 위상 마스크와 기관간의 거리를 반복적인 계산을 통해 결정한 후 노광 시키는 방법이고, 다른 한가지 방법은 노광 과정에서 위상마스크와 기관간의 거리를 변화시킴으로서 그림 4와 같이 고른 분포를 갖는 2차원 간섭무늬 제작이 가능하도록 하는 것이다. 후자의 경우 총 노광량은 식 (2)에 따라

$$I \propto \int \vec{E}_3 \cdot \vec{E}_3^* dz$$

에 비례할 것이고, 위상마스크와 기관간의 움직임야 할 거리는  $\Lambda_z$  정도이다.

## IV. 3차원의 주기적인 구조

그림 9에서 본 바와 같이 0차 회절효율이 0이 아니면  $z$ 축 즉, 입사파의 방향으로 간섭무늬가 변하는 3차원 공간 간섭무늬가 발생한다. 이러한 변화는 0차 회절효율이 증가함에 따라 점점 두드러지게 나타나서 1차 회절효율보다 높게 되면  $z$ 축 방향으로의 변화가 매우 커진다.

2차원 간섭무늬에서와 같이 II절의 RCWA를 바탕으로 그림 3과 같은 직육면체와 원통형 요철의 정사각형 배열, 그리고 원통형 요철의 벌집 배열을 갖는 세 가지 형태의 이진 위상 마스크들을 고려하였다. 3차원 공간 간섭무늬 설계 시 2차원 간섭무늬를 설계하였을 때와 같은 입사광의 파장과, 기관을 사용하였고 각각의 위상 마스크에 의해 만들어지는 공간 간섭무늬는 식 (2)로 계산된다. 이때 형성되는 구조는 마스크에 평행한  $xy$ -평면에서는 마스크와 거의 같으나 마스크에 수직인  $z$ 축 방향으로로는 정사각형 배열과 벌집 배열에 있어서 서로 다르게 나타난다.  $z$ 축 방향의 주기  $\Lambda_z$ 는 정사각형 배열의 경우 (4)식으로 주어지고, 벌집 형태의 경우는

$$\frac{\Lambda_z}{\Lambda_x} = \frac{3}{4} \left( \frac{\Lambda_x}{\lambda} + \sqrt{\frac{\Lambda_x^2}{\lambda^2} - \frac{4}{3}} \right) \quad (5)$$

로 주어진다. 회절이 있기 위해서는  $\Lambda_x > \lambda$ 이어야 하므로 정사각형 배열의 경우 항상  $\Lambda_z > \Lambda_x$ 이나 벌집형 배열의 경우는

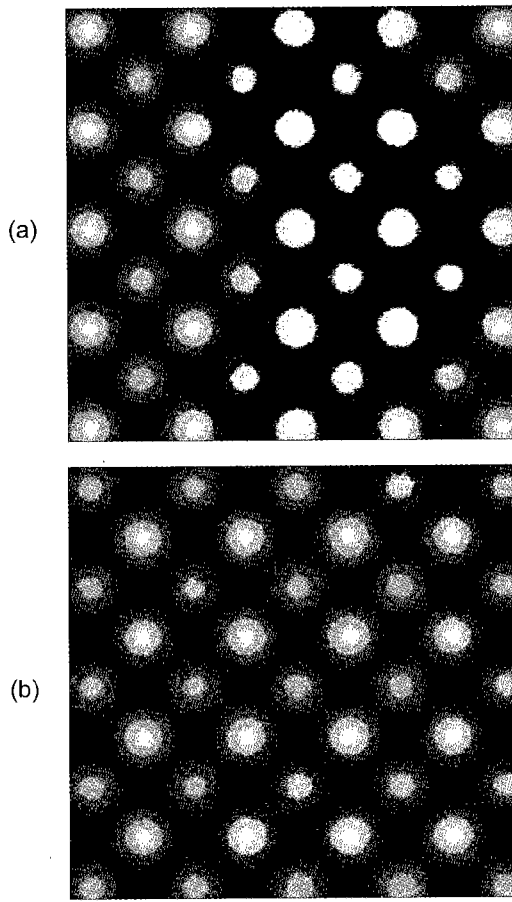


그림 9. z축 상의 위치에 따라 발생하는 불균일한 간섭무늬: 위상 마스크와 기판 사이의 거리가 (a) 3.33  $\mu\text{m}$ 일 때; (b) 3.88  $\mu\text{m}$ 일 때.

$\Lambda_z$ 가  $\Lambda_x$  보다 작을 수 있다. 공간 간섭무늬의 세기 분포는 입사광의 편광, 파장, 위상 마스크의 주기에 의해 결정되는 회절각, 요철 깊이, duty cycle에 따라 매우 다양하다.

그림 3(a), (b)와 같은 직육면체 요철과 원통형 요철의 정사각형 배열 위상 마스크에 의해 만들어지는 3차원 공간 간섭무늬는 그림 10(a)와 같은 tetragonal-body-centered 구조를 갖으며 그림 11과 같은 분포를 보인다. 그림 11은 원통형 요철의 위상 마스크에 의해 만들어진 3차원 공간 간섭무늬이다. 위상 마스크의 구조는 회절각이 45°가 되는 460 nm의 격자주기, 470 nm의 요철 깊이, 0.4의 duty cycle(원통형 요철의 반지름은 92 nm)로 이루어지며 입사하는 빛의 편광 상태는 원편광이다. 이 때 0차 회절효율이 0.150, 1차 회절효율은 0.185이고 세기분포의 최대 최소 비율은 17.1이며 z축 방향의 주기는 1110 nm이다.

그림 3(c)와 같은 원통형 요철의 벌집 배열 위상 마스크는 그림 10(b)와 같은 hexagonal 구조를 갖는 그림 12에 보인 간섭무늬를 만들게 된다. 이때 사용된 입사광의 편광 상태는 원편광, 위상 마스크의 격자주기는 회절각이 41°가 되도록 하는 495 nm이고 요철 깊이와 duty cycle은 각각 600 nm와 0.7이다. 4개의 1차 회절파와 2개의 2차 회절파를 포함하여 총 7개의 파가 간섭하게 되는데, 0차 회절효율은 0.385, 1차

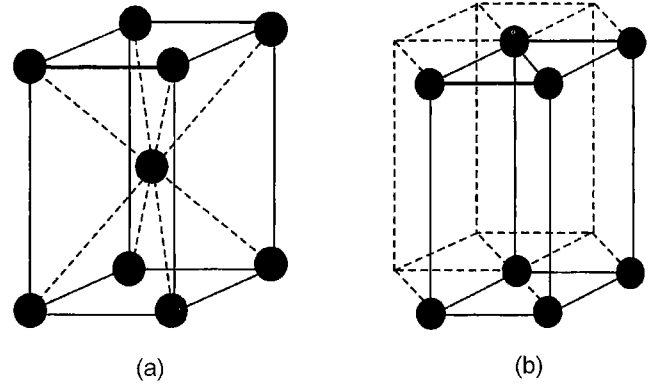


그림 10. 두 가지 형태의 3차원 공간 구조. (a) tetragonal-body-centered 구조; (b) hexagonal 구조.

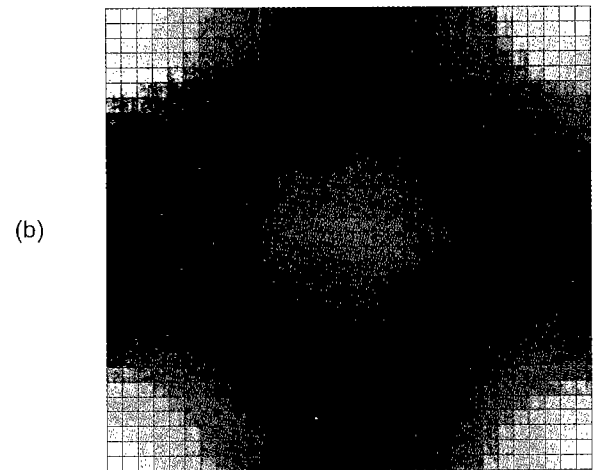
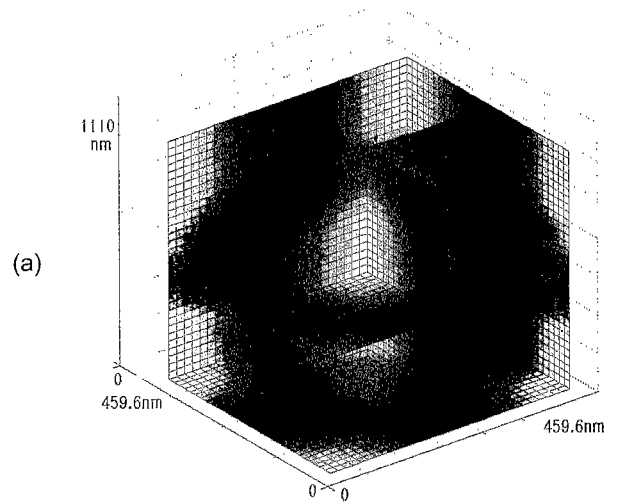


그림 11. 주기 460 nm, 요철 깊이 470 nm, duty cycle 0.4인 원통형 요철의 정사각형 배열 위상 마스크에 파장 325 nm의 원편광된 빛이 입사했을 때 만들어지는 (a) 3차원 공간 간섭무늬; (b) 공간 간섭무늬의 z=0 단면.

회절된 빛의 경우 (1,1)과 (-1,-1)차의 효율은 0.088이고 (1,-1)과 (-1,1)차의 효율은 0.087이며 2차 회절된 빛으로 (0,2)차와 (0,-2)차의 회절효율은 0.089이다. 세기 분포의 최대 최

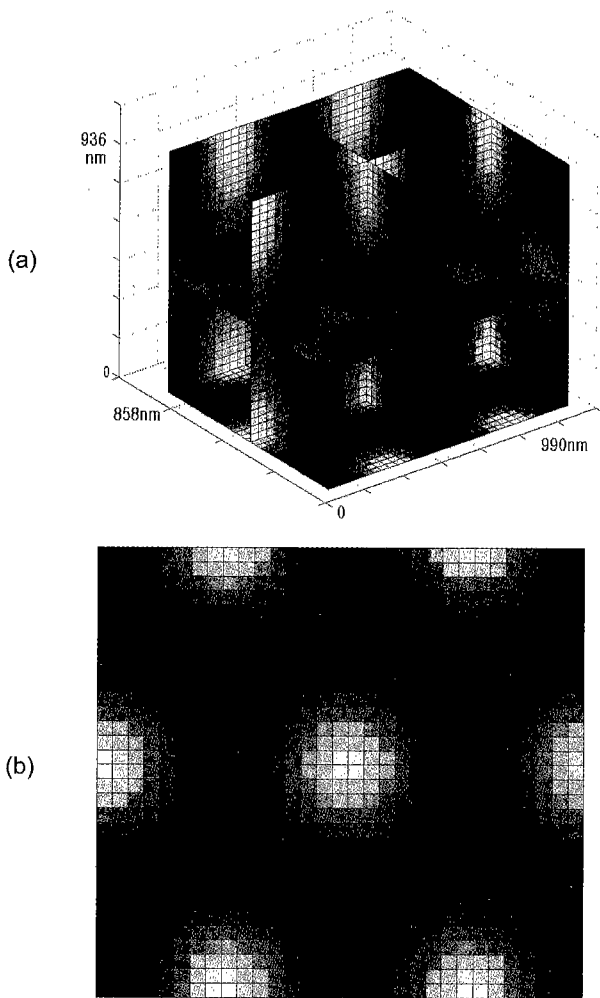


그림 12. 주기 495 nm, 요철 깊이 600 nm, duty cycle 0.7인 원통형 요철의 벌집 배열 위상 마스크에 파장 325 nm의 원편광된 빛이 입사했을 때 만들어지는 (a) 3차원 공간 간섭무늬; (b) 공간 간섭무늬의 z=0 단면.

소 비율은 220.7이다. z축 방향의 주기는 식 (5)식에 따라 936 nm이고, y축 방향의 주기는  $\sqrt{3}\Lambda_x=858$  nm이다.

### V. 결 론

근접장 홀로그래피 기술을 적용한 2차원 및 3차원 형태의 주기적인 구조를 제작하기 위해, 엄밀한 결합과 해석을 이용하여 직육면체 요철과 원통형 요철의 정사각형 배열 그리고 원통형 요철의 벌집 배열 등 세 가지 형태의 2차원 이진 위상마스크를 설계 및 분석하였다.

2차원의 주기적인 구조의 경우, 직육면체 요철과 원통형 요철의 정사각형 배열 등 두 가지 형태의 위상 마스크를 고려하여 최소의 0차 회절효율과 최대의 1차 회절효율을 갖는 조건을 찾아 간섭무늬를 발생시켰다. 또한 파장, 위상 마스크의 격자주기와 요철깊이 그리고 duty cycle이 최대  $\pm 5\%$ 만큼 설계로부터 벗어날 때 회절효율과 가시도의 변화를 조사하였는데, 원통형 요철이 더 적은 변화를 보였다. 0차 회절된 빛이 존재

함으로서 위상 마스크에 수직인 방향으로의 주기적인 변화에 의해 발생하는 문제점을 해결할 수 있는 방법을 언급하였다.

3차원의 주기적인 구조의 경우, 직육면체 요철과 원통형 요철의 정사각형 배열 그리고 원통형 요철의 벌집 배열 등 세 가지 형태의 위상 마스크를 고려하여 0차 및 1차 그리고 2차 회절된 빛의 다중빔 간섭에 의하여 tetragonal-body-centered 구조와 hexagonal 구조의 공간 간섭무늬를 형성하였다. 이때 단위 셀 내의 미세 구조는 입사파의 편광, 파장, 주기, 요철깊이와 duty cycle에 따라 달라지는데, 0차 회절효율이 증가함에 따라 다양한 공간 간섭무늬가 발생한다. 이러한 3차원 구조는 최근에 주목을 받고 있는 가시광선 영역의 포토닉 결정을 근접장 홀로그래피 리소그래피를 이용하여 레이저 빛의 정렬 등과 같은 어려움 없이, 심지어는 레이저와 같은 단일 편광을 갖는 가간섭성 광을 사용하지 않고도 제작하는데 활용 할 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 중점 국가 연구개발 사업 차세대 포토닉스 사업단의 지원에 의하여 수행되었습니다.

### 참고문헌

- [1] T. K. Gaylord and M. G. Moharam, "Analysis and applications of optical diffraction by grating," *Proc. IEEE*, vol. 73, p. 894, 1985.
- [2] A. Fernandez *et al.*, "Use of interference lithography to pattern arrays of submicron resist structures for field emission flat panel displays," *J. Vac. Sci. Technol. B* vol. 15, pp. 729-735, 1997.
- [3] V. Berger *et al.*, "Photonic band gaps and holography," *J. Appl. Phys.*, vol. 82, pp. 60-64, 1997.
- [4] V. Berger *et al.*, "Fabrication of a 2D photonic bandgap by a holographic method," *Electron. Lett.*, vol. 33, no. 5, pp. 425-426, 1997.
- [5] M. Campbell *et al.*, "Fabrication of photonic crystals for the visible spectrum by holographic lithography," *Nature*, vol. 404, pp. 53-56, 2000.
- [6] S. Shoji and S. Kawata, "Photofabrication of three-dimensional photonic crystals by multibeam laser interference into a photopolymerizable resin," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 76, no. 19, pp. 2668-2670, 2000.
- [7] D. Mei *et al.*, "Three-dimensional ordered patterns by light interference," *Opt. Lett.*, vol. 20, no. 5, pp. 429-431, 1995.
- [8] D. M. Tennant *et al.*, "Characterization of near-field holography grating masks for optoelectronics fabricated by electron beam lithography," *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 10, no. 6, pp. 2530-2535, 1992.
- [9] 조두진, "표면양각회절격자에 대한 엄밀한 3차원벡터 결합파해석의 고유값문제." *J. Opt. Soc. Kor.*, vol. 5, no. 4, pp. 439-444, 1994.
- [10] S. R. Cooper *et al.*, "Surface-relief diffraction gratings recorded by multiple-beam coherent phase exposure," *Opt. Lett.*, vol. 22, no. 6, pp. 357-359, 1977.

**Design and analysis of two-dimensional binary phase masks for the fabrication of two- and three-dimensional periodic structures**

Nam Sik Kim, Young Hee Won, Ken Ha Koh, and Doo Jin Cho<sup>†</sup>

*Dept. of Physics, Ajou University, Suwon 442-749, KOREA*

<sup>†</sup>*E-mail: djcho@madang.ajou.ac.kr*

(Received October 23, 2000 ; Revised manuscript received January 18, 2001)

Two-dimensional binary-phase diffraction gratings which can be employed to fabricate two- and three-dimensional periodic structures are designed and analyzed using rigorous coupled-wave analysis. These gratings serve as phase-masks which generate several diffracted waves from a normally incident beam and thus can produce a periodic interference pattern in space via near-field holography. The properties of the diffracted beams can be controlled by varying the polarization and wavelength of the incident beam, surface-profile, groove depth and duty cycle of the mask. For the two-dimensional structure, optimum results can be obtained when the diffraction efficiency of the zero-order beam is minimized while that of the first-order maximized. On the other hand, when the diffraction efficiency of the zero-order is appreciable or even greater than other orders, we can obtain a variety of three-dimensional interference patterns which may be used to fabricate photonic crystals of tetragonal-body-centered and hexagonal structures in a submicron scale.

*Keywords* : DI.010, DI.020.