



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2025-0052715
(43) 공개일자 2025년04월21일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G03F 1/50 (2012.01) G03F 7/20 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G03F 1/50 (2013.01)
G03F 7/70408 (2023.05)
(21) 출원번호 10-2023-0135822
(22) 출원일자 2023년10월12일
심사청구일자 2023년10월12일

(71) 출원인
포항공과대학교 산학협력단
경상북도 포항시 남구 청암로 77 (지곡동)
고려대학교 산학협력단
서울특별시 성북구 안암로 145, 고려대학교 (안암동5가)
(72) 발명자
이치현
경상북도 포항시 남구 청암로 77
노준석
경상북도 포항시 남구 청암로 77
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
유장현

전체 청구항 수 : 총 12 항

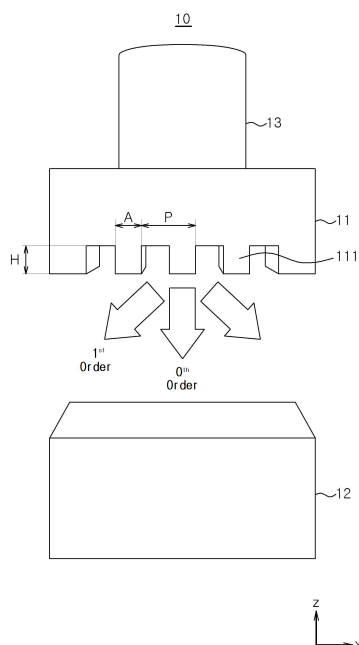
(54) 발명의 명칭 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치, 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크, 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크의 제조 방법 및 나노 패터닝 장치

(57) 요약

본 발명은 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치, 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크, 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크의 제조 방법 및 나노 패터닝 장치에 관한 것이다.

일 실시예에 따르면, 일정한 주기를 갖는 복수 개의 나노구조체를 포함하는 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터 (뒷면에 계속)

대표도 - 도3



닝용 마스크의 설계 장치로서, 특정 굴절률을 갖는 상기 나노구조체의 재료를 선정할 수 있는 재료선정부; 특정 높이와 너비를 갖는 상기 재료로 형성된 나노구조체의 2D전기장 세기맵을 기초로 목적함수를 산출할 수 있는 목적함수산출부; 상기 나노구조체의 주기, 굴절률 및 상기 목적함수 중 적어도 하나 이상을 입력변수로 설정하고, 상기 입력변수를 기 설정된 알고리즘에 입력하여 상기 나노구조체의 설계매개변수를 산출할 수 있는 최적화부를 포함하고, 상기 최적화부에서 산출된 상기 설계매개변수를 갖도록 제조된 상기 나노구조체를 포함하는 상기 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크는 입사되는 빛을 회절시켜 간섭장을 발생시킬 수 있는 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치가 제공될 수 있다.

(72) 발명자

전석우

서울특별시 성북구 안암로 145

배광민

서울특별시 성북구 안암로 145

장건호

서울특별시 성북구 안암로 145

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711192661
과제번호	2022M3C1A3081312
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	STEAM연구
연구과제명	스마트 위변조 방지 기술 상용화를 위한 광학 플랫폼 개발
기 여 율	1/2
과제수행기관명	포항공과대학교
연구기간	2023.03.01 ~ 2023.12.31

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711189093
과제번호	2022M3H4A1A02074314
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	나노소재기술개발
연구과제명	홀로그램 프린팅 기반 초심해 3D 패턴 인코딩 기술(HOPE)
기 여 율	1/2
과제수행기관명	고려대학교
연구기간	2023.01.01 ~ 2023.12.31

명세서

청구범위

청구항 1

일정한 주기를 갖는 복수 개의 나노구조체를 포함하는 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크의 설계 장치로서,

특정 굴절률을 갖는 상기 나노구조체의 재료를 선정할 수 있는 재료선정부;

특정 높이와 너비를 갖는 상기 재료로 형성된 나노구조체의 2D전기장 세기맵을 기초로 목적함수를 산출할 수 있는 목적함수산출부;

상기 나노구조체의 주기, 굴절률 및 상기 목적함수 중 적어도 하나 이상을 입력변수로 설정하고, 상기 입력변수를 기 설정된 알고리즘에 입력하여 상기 나노구조체의 설계매개변수를 산출할 수 있는 최적화부를 포함하고,

상기 최적화부에서 산출된 상기 설계매개변수를 갖도록 제조된 상기 나노구조체를 포함하는 상기 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크는 입사되는 빛을 회절시켜 간섭장을 발생시킬 수 있는

전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치.

청구항 2

제1 항에 있어서,

상기 목적함수산출부는,

상기 2D전기장 세기맵에서 복수 개의 포인트를 선정하고, 상기 포인트를 기초로 목적함수를 산출하는

전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치.

청구항 3

제1 항에 있어서,

상기 목적함수산출부는,

상기 2D전기장 세기맵에서 전기장의 강도가 가장 센 제1포인트를 선정하고, 일 축을 기준으로 전기장의 강도가 가장 약한 제2포인트와 다른 일 축을 기준으로 전기장의 강도가 가장 약한 제3포인트를 선정하고, 상기 제2포인트와 제3포인트를 연결한 가상의 직선의 중심점인 제4포인트를 선정하고, 상기 제1포인트 내지 제4포인트를 기초로 상기 목적함수를 산출하는

전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치.

청구항 4

제3 항에 있어서,

상기 목적함수산출부에 의해 산출되는 목적함수는

$$FOM = E_{\max}^2 + E_{\text{diag}}^2 - E_{\min x}^2 - E_{\min z}^2$$

로 제공되는,

전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치.

여기서, $E_{\max}^2$ 는 상기 제1포인트에서의 전기장이고, E_{diag}^2 는 상기 제4포인트에서의 전기장이고, $E_{\min x}^2$

는 상기 제2포인트에서의 전기장이고, $E_{\min z}^2$ 는 상기 제3포인트에서의 전기장임.

청구항 5

제4 항에 있어서,

최적화부는 상기 목적함수가 최대가 되는 나노구조체의 높이를 상기 나노구조체의 설계매개변수로 산출하는 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치.

청구항 6

제1 항에 있어서,

상기 최적화부는 상기 입력변수를 PSO 알고리즘에 입력하여 상기 나노구조체의 설계매개변수를 산출하는 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치.

청구항 7

제1 항에 있어서,

상기 목적함수산출부에 의해 산출되는 상기 나노구조체의 상기 설계매개변수는 상기 나노구조체의 높이, 상기 나노구조체의 충전계수(fill factor) 및 상기 나노구조체의 형상을 포함하는

전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치.

청구항 8

제1항에 기재된 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치에 의해 산출된 설계매개변수를 갖는 나노구조체를 포함하는

전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크.

청구항 9

제8 항에 있어서,

상기 설계매개변수는 상기 나노구조체의 높이, 충전계수(fill factor) 및 나노구조체의 형상을 포함하는

전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크.

청구항 10

제1항에 기재된 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치에 의해 산출된 설계매개변수를 갖도록 제조된 나노구조체를 포함하는 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크;

상기 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크를 향해 빛을 조사할 수 있는 광원;

상기 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크를 투과하여 회절된 빛을 조사받아 나노구조체의 패턴이 생성되는 포토레지스트를 포함하는

나노 패터닝장치.

청구항 11

제1항에 기재된 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치에 의해 산출된 설계매개변수 또는 상기 설계매개변수와 상보적인 변수를 갖는 마스터몰드를 제공하는 단계(S1단계);

상기 마스터몰드에 폴리우레탄 아크릴레이트를 증착하는 단계(S2단계);

상기 폴리우레탄 아크릴레이트를 경화시킨 후 상기 마스터몰드와 분리하여, 상기 폴리우레탄 아크릴레이트로 형성된 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크를 형성하는 단계(S3단계)를 포함하는

전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 제조방법.

청구항 12

제11 항에 있어서,

상기 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크에 폴리디메틸실록산을 증착하는 단계(S4단계);

상기 폴리디메틸실록산을 경화시킨 후 상기 폴리우레탄 아크릴레이트로 형성된 상기 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크를 분리하여 상기 폴리디메틸실록산으로 형성된 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크를 형성하는 단계(S5단계)를 포함하는

전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 제조방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치, 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크, 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크의 제조 방법 및 나노 패터닝 장치에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 3차원 나노 구조는 반도체, 전극 소재, 구조 소재 등 다양한 분야에서 우수한 특성을 보이고 있고, 이로 인해 3차원 나노 구조 제작에 관한 기술 개발이 활발히 이루어지고 있다.

[0003] 기존의 3차원 나노 구조 제작 기술은 목표 구조를 한 번에 제작하는 것이 아닌 3차원 구조를 2차원 단면으로 나누어 적층 하는 방식을 주로 기반으로 한다. 이러한 적층 방식의 3차원 나노 구조 제작은 공정 속도와 양산성에 있어 단점이 있다.

[0004] 이러한 단점을 해결하기 위해 반복 공정 없이 3차원 나노 구조를 형상화하는 기술이 개발되어 왔고, 그 예시로 근접장 나노패터닝이 있다.

[0005] 근접장 나노패터닝은 돌출 구조를 가지는 위상 마스크를 통해 단일 광원을 회절 시키고, 회절 된 빛들 간의 간섭을 통해 간섭무늬를 형성하고, 포토레지스트에 전사해 3차원 나노 구조를 형성한다.

[0006] 근접장 나노패터닝을 통해 형성된 나노 구조는 광학 소재, 구조 소재, 전극 소재, 센서 등 다양한 나노 소재에서 활용되어 왔고, 우수한 특성을 위해 높은 해상도의 나노구조의 수요가 커져 왔다. 근접장 나노패터닝의 나노 구조 해상도는 위상 마스크로부터 형성되는 간섭 무늬의 해상도에 직접적으로 영향을 받기에 근접장 나노패터닝의 최적화는 마스크 디자인의 구조 디자인 조절을 통해 이루어져 왔다.

[0007] 상술한 종래의 근접장 나노패터닝 최적화는 단일 변수 조절을 통한 0차 회절 억제를 통해 제어되었다. 0차 회절 억제는 간섭 무늬의 최대값과 최소값의 차이를 증가시켜 대비를 극대화한다고 알려져 있다.

[0008] 그러나, 0차 회절의 억제는 국소 부위의 전기장 세기 조절이 어렵다는 단점이 있으며, 0차 회절 억제를 할 경우 최대값 증가뿐 아니라 목표 3차원 나노 구조 형성에 방해가 되는 지역의 전기장 세기 또한 증가해 해상도가 감소하는 문제가 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0010] 본 발명의 실시예들은 상술한 문제점을 해결하기 위한 것으로, 높은 해상도의 3차원 나노 구조체를 제작에 필요한 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크의 설계매개변수를 산출할 수 있는 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치를 제공할 수 있다.

[0011] 또한, 높은 해상도의 3차원 나노 구조체를 제작할 수 있는 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 및 이를 포함하는 나노 패터닝장치를 제공할 수 있다.

과제의 해결 수단

[0013] 일 실시예에 따르면, 일정한 주기를 갖는 복수 개의 나노구조체를 포함하는 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크의 설계 장치로서, 특정 굴절률을 갖는 상기 나노구조체의 재료를 선정할 수 있는 재료선정부; 특정 높이와 너비를 갖는 상기 재료로 형성된 나노구조체의 2D전기장 세기맵을 기초로 목적함수를 산출할 수 있는 목적함수산출부; 상기 나노구조체의 주기, 굴절률 및 상기 목적함수 중 적어도 하나 이상을 입력변수로 설정하고, 상기 입력변수를 기 설정된 알고리즘에 입력하여 상기 나노구조체의 설계매개변수를 산출할 수 있는 최적화부를 포함하고, 상기 최적화부에서 산출된 상기 설계매개변수를 갖도록 제조된 상기 나노구조체를 포함하는 상기 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크는 입사되는 빛을 회절시켜 간섭장을 발생시킬 수 있는 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치가 제공될 수 있다.

[0014] 또한, 상기 목적함수산출부는, 상기 2D전기장 세기맵에서 복수 개의 포인트를 선정하고, 상기 포인트를 기초로 목적함수를 산출하는 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치가 제공될 수 있다.

[0015] 또한, 상기 목적함수산출부는, 상기 2D전기장 세기맵에서 전기장의 강도가 가장 센 제1포인트를 선정하고, 일축을 기준으로 전기장의 강도가 가장 약한 제2포인트와 다른 일축을 기준으로 전기장의 강도가 가장 약한 제3포인트를 선정하고, 상기 제2포인트와 제3포인트를 연결한 가상의 직선의 중심점인 제4포인트를 선정하고, 상기 제1포인트 내지 제4포인트를 기초로 상기 목적함수를 산출하는 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치가 제공될 수 있다.

[0016] 또한, 상기 목적함수산출부에 의해 산출되는 목적함수는

[0017]
$$FOM = E_{\max}^2 + E_{\text{diag}}^2 - E_{\min x}^2 - E_{\min z}^2$$
 로 제공되는, 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치가 제공될 수 있다. 여기서, $E_{\max}^2$ 는 상기 제1포인트에서의 전기장이고, E_{diag}^2 는 상기 제4포인트에서의 전기장이고, $E_{\min x}^2$ 는 상기 제2포인트에서의 전기장이고, $E_{\min z}^2$ 는 상기 제3포인트에서의 전기장이다.

[0018] 또한, 최적화부는 상기 목적함수가 최대가 되는 나노구조체의 높이를 상기 나노구조체의 설계매개변수로 산출하는 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치가 제공될 수 있다.

[0019] 또한, 상기 최적화부는 상기 입력변수를 PSO 알고리즘에 입력하여 상기 나노구조체의 설계매개변수를 산출하는 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치가 제공될 수 있다.

[0020] 또한, 상기 목적함수산출부에 의해 산출되는 상기 나노구조체의 상기 설계매개변수는 상기 나노구조체의 높이, 상기 나노구조체의 충전계수(fill factor) 및 상기 나노구조체의 형상을 포함하는 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치가 제공될 수 있다.

[0021] 일 실시예에 따르면, 제1항에 기재된 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치에 의해 산출된 설계매개변수를 갖는 나노구조체를 포함하는 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크가 제공될 수 있다.

[0022] 또한, 상기 설계매개변수는 상기 나노구조체의 높이, 충전계수(fill factor) 및 나노구조체의 형상을 포함하는 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크가 제공될 수 있다.

[0023] 일 실시예에 따르면, 제1항에 기재된 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치에 의해 산출된 설계매개변수를 갖도록 제조된 나노구조체를 포함하는 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크; 상기 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크를 향해 빛을 조사할 수 있는 광원; 상기 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크를 투과하여 회절된 빛을 조사받아 나노구조체의 패턴이 생성되는 포토레지스트를 포함하는 나노 패터닝장치가 제공될 수 있다.

[0024] 일 실시예에 따르면, 제1항에 기재된 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치에 의해 산출된 설계매개변수 또는 상기 설계매개변수와 상보적인 변수를 갖는 마스터몰드를 제공하는 단계(S1단계); 상기 마스터몰드에 폴리우레탄 아크릴레이트를 증착하는 단계(S2단계); 상기 폴리우레탄 아크릴레이트를 경화시킨 후 상

기 마스터몰드와 분리하여, 상기 폴리우레탄 아크릴레이트로 형성된 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크를 형성하는 단계(S3단계)를 포함하는 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 제조방법이 제공될 수 있다.

[0025] 또한, 상기 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크에 폴리디메틸실록산을 증착하는 단계(S4단계); 상기 폴리디메틸실록산을 경화시킨 후 상기 폴리우레탄 아크릴레이트로 형성된 상기 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크를 분리하여 상기 폴리디메틸실록산으로 형성된 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크를 형성하는 단계(S5단계)를 포함하는 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 제조방법이 제공될 수 있다.

발명의 효과

[0027] 본 발명의 일 실시예에 따르면 높은 해상도의 3차원 나노 구조체를 제작에 필요한 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크의 설계매개변수를 산출할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0029] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치의 구성을 개념적으로 나타내는 도면이다.

도 2는 도 1의 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크의 프로세서의 하위 구성을 개념적으로 나타내는 도면이다.

도 3은 도 1의 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치에 의해 설계된 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크를 포함하는 나노 패터닝장치를 개념적으로 나타낸 도면이다.

도 4는 특정 재료로 형성된 나노구조체의 2D전기장 세기맵을 나타내는 도면이다.

도 5는 도 2의 최적화부에 의해 PSO 알고리즘이 실행됨으로써 나타나는 최적화된 설계매개변수(충전계수(fill factor), 높이 포함)를 나타내는 도면이다.

도 6은 나노구조체의 높이에 따른 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크를 통과한 빛의 회절 효율(Diffraction efficiency)를 나타내는 도면이다.

도 7은 설계매개변수의 최적화를 위한 3D전기장의 분포 및 나노구조체의 x-z 단면을 나타내는 도면이다.

도 8은 본 실시예 및 비교예의 설계매개변수, 회절효율(diffraction efficiency), 붕괴조건, 전기장 정보 등을 포함하는 표를 나타낸다.

도 9는 본 발명의 일 실시예에 따른 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 제조방법을 개념적으로 나타내는 도면이다.

도 10은 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치에 의해 생성되는 나노 구조체를 포함하는 나노메타표면이다.

도 11은 나노 패터닝장치에 의해 형성된 나노구조체를 포함하는 나노메타표면의 성능평가를 나타내는 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0030] 이하에서는 본 발명의 구체적인 실시예들에 대하여 도면을 참조하여 상세히 설명한다. 아울러 본 발명을 설명함에 있어서, 관련된 공지 구성 또는 기능에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 흐릴 수 있다고 판단되는 경우에는 그 상세한 설명을 생략한다.

[0031] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치(1)의 구성을 개념적으로 나타내는 도면이고, 도 2는 도 1의 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11)의 프로세서(100)의 하위 구성을 개념적으로 나타내는 도면이며, 도 3은 도 1의 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치(1)에 의해 설계된 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11)를 포함하는 나노 패터

닝장치(10)를 개념적으로 나타낸 도면이고, 도 4는 특정 재료로 형성된 나노구조체의 2D전기장 세기맵(2D electric field intensity map)을 나타내는 도면이며, 도 5는 도 2의 최적화부(130)에 의해 PSO 알고리즘이 실행됨으로써 나타나는 최적화된 설계매개변수(충전계수(fill factor), 높이(H) 포함)를 나타내는 도면이고, 도 6은 나노구조체(111)의 높이(H)에 따른 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11)를 통과한 빛의 회절 효율(Diffraction efficiency)를 나타내는 도면이며, 도 7은 설계매개변수의 최적화를 위한 3D전기장의 분포 및 나노구조체(111)의 x-z 단면을 나타내는 도면이고, 도 8은 본 실시예 및 비교예의 설계매개변수, 회절효율(diffraction efficiency), 붕괴조건, 전기장 정보 등을 포함하는 표를 나타낸다.

[0032] 도 1 및 도 8을 참조하면, 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치(1)는 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11)를 설계하기 위한 최적화된 설계매개변수를 산출할 수 있다.

[0033] 본 실시예에서는 목표로 하는 전기장의 세기 분포를 설정하고, 입자 군집 최적화 방식을 이용한 다중 변수 조절 최적화로 목표 전기장 세기 분포를 구현하는 역설계를 진행하고, 이를 통해 높은 해상도의 3차원 나노 구조체를 포함하는 나노메타표면(1000)을 제작할 수 있는 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11)를 도출할 수 있다.

[0034] 또한 본 발명은 역설계를 통해 최적화된 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11)를 이용하여 높은 해상도를 가지는 3차원 나노 구조체를 제조할 수 있다.

[0035] 주기적 구조체로 만들어진 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11)와, 간섭장 패터닝의 셋업은 rigorous coupled-wave analysis(RCWA)를 기반으로 빠른 속도로 마스크를 통과한 이후의 전기장을 계산할 수 있다.

[0036] RCWA 계산 코드와 입자 군집 최적화 알고리즘을 결합하여 특정 부분의 전기장을 조절하여 고 대비(high-contrast)의 3차원 전기장을 얻고, 이를 기반으로 고성능의 3차원 나노 구조체를 제작할 수 있다.

[0037] 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11)는 일정한 주기(P)를 갖는 복수 개의 나노구조체(111)를 포함할 수 있다(도 3참조)

[0038] 각각의 나노구조체(111)는 특정 높이(H)와 너비(A)를 갖는 3차원 형상(예를 들어, 직육면체 형상)으로 이해될 수 있다. 예를 들어, 나노구조체(111)가 직육면체 형상으로 제공되는 경우 나노구조체(111)는 특정 높이(H), 너비(A)를 가질 수 있다. 여기서, 나노구조체(111)의 다른 일면은 xz평면과 수직한 방향으로 길게 연장되는 변수로서, 후술하는 본 실시예의 입력변수와 설계매개변수에서 제외될 수 있다.

[0039] 본 실시예에서 나노구조체(111)의 높이(H)는 도 3을 기준으로 z축 방향으로 측정한 길이로 이해될 수 있고, 너비(A)는 도 3을 기준으로 x축 방향으로 측정한 길이로 이해될 수 있다.

[0040] 본 실시예에서 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치(1)에 산출되는 나노구조체(111)의 설계매개변수로서 나노구조체(111)의 형상은 직육면체 형상일 수 있다. 본 실시예에서 나노구조체(111)는 직육면체 형상으로 형성되는 것을 예를 들어 설명한다. 다만, 본 발명의 사상은 이에 한정되지 않으며 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치(1)에 입력되는 입력변수에 따라 나노구조체(111)의 형상은 원기둥 형상으로 도출될 수도 있다.

[0041] 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11)는 메모리(800), 프로세서(100) 및 통신모듈(700)을 포함할 수 있다.

[0042] 프로세서(100)는 기본적인 산술, 로직 및 입출력 연산을 수행함으로써, 컴퓨터 프로그램의 명령을 처리하도록 구성될 수 있다. 명령은 메모리(800) 또는 통신모듈(700)로부터 프로세서(100)로 제공될 수 있다.

[0043] 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11)의 프로세서(100)는 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11)의 나노구조체(111)를 제작하기 위한 설계매개변수(예를 들어, 나노구조체(111)의 높이(H), 충전계수(fill factor)등)를 도출하기 위해 필요한 데이터의 입출력, 데이터의 처리, 데이터의 관리, 통신망을 이용한 통신 등 다양한 기능을 수행할 수 있다. 이를 실행하기 위한 프로세서(100)의 구체적인 구성요소들은 후술한다.

[0044] 또한, 프로세서(100)의 구성요소 중 적어도 일부는 머신러닝으로 미리 학습된 인공지능망을 포함할 수 있다. 또한, 메모리(800)는 컴퓨터에서 판독 가능한 기록매체로서 RAM(Random Access Memory), ROM(Read Only Memory) 및 디스크 드라이브와 같은 비소멸성 대용량 기록장치(permanent mass storage device)를 포함할 수 있다.

- [0045] 본 실시예의 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치(1)의 프로세서(100)는 재료선택부(110), 목적함수산출부(120), 최적화부(130)를 포함할 수 있다.
- [0046] 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치(1)에 의해 도출된 설계매개변수를 기초로 도 3에 도시된 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11)를 제조할 수 있다.
- [0047] 재료선택부(110)는 특정 굴절률(n)을 갖는 나노구조체(111)의 재료를 선정할 수 있다.
- [0048] 여기서, 복수 개의 재료는 데이터베이스(810)에 저장되어 있을 수 있으며, 재료선택부(110)는 데이터베이스(810)에 저장된 복수 개의 재료 중 하나를 불러올 수 있다. 다만, 본 발명의 사상은 이에 한정되지 않으며, 입력부(예: 키보드, 마우스 등)로부터 프로세서(100)의 재료선택부(110)에 직접 나노구조체(111)의 재료가 입력될 수도 있다.
- [0049] 재료선택부(110)에 의해 선정되는 나노구조체(111)의 재료는 폴리우레탄 아크릴레이트(polyurethane acrylate, PUA), 폴리디메틸실록산(polydimethylsiloxane, PDMA) 중 적어도 하나를 포함할 수 있다.
- [0050] 여기서, 폴리디메틸실록산(polydimethylsiloxane, PDMA)는 s-PDMS와 h-PDMS를 포함할 수 있고, s-PDMS는 소프트(soft) PDMS, h-PDMS는 하드(hard) PDMS로 이해될 수 있다.
- [0051] 폴리우레탄 아크릴레이트(polyurethane acrylate, PUA)의 굴절률(n)은 1.54로 제공될 수 있고, 폴리디메틸실록산(polydimethylsiloxane, PDMA)의 굴절률은 1.4로 제공될 수 있다.
- [0052] 또한, 나노구조체(111)의 재료는 이산화티타늄(TiO₂)를 포함할 수 있으며, 이산화티타늄의 굴절률은 2.87로 제공될 수 있다.
- [0053] 목적함수산출부(120)는 특정 높이(H)와 너비(A)를 갖는 나노구조체(111)의 2D전기장 세기맵(2D electric field intensity map)을 기초로 목적함수(FOM)를 산출할 수 있다.
- [0054] 도 3은 특정 재료로 형성된 나노구조체의 2D전기장 세기맵(2D electric field intensity map)을 나타내는 도면이다.
- [0055] 여기서, 2D전기장 세기맵(2D electric field intensity map)은 고대비 3D 나노패터닝(high-contrast 3D nanopatterning)을 위해 역설계된 전기장 세기맵으로 이해될 수 있다.
- [0056] 목적함수산출부(120)는 도 3에 도시된 바와 같은 2D전기장 세기맵(2D electric field intensity map)에서 복수 개의 포인트를 선정하고, 상기 복수 개의 포인트를 기초로 목적함수(FOM)를 산출할 수 있다.
- [0057] 구체적으로, 목적함수산출부(120)는, 2D전기장 세기맵(2D electric field intensity map)에서 전기장의 강도가 가장 센 제1포인트(121)를 선정하고, 일 축을 기준으로 전기장의 강도가 가장 약한 제2포인트(122)와 다른 일 축을 기준으로 전기장의 강도가 가장 약한 제3포인트(123)를 선정하고, 제2포인트(122)와 제3포인트(123)를 연결한 가상의 직선의 중심점인 제4포인트(124)를 선정하고, 제1포인트(121) 내지 제4포인트(124)를 기초로 상기 목적함수(FOM)를 산출할 수 있다.
- [0058] 여기서, 제2포인트(122)는 x축을 기준으로 전기장의 강도가 가장 약한 부분으로 이해될 수 있고, 제3포인트(123)는 z축을 기준으로 전기장의 강도가 가장 약한 부분으로 이해될 수 있다.
- [0059] 또한, 목적함수산출부(120)의 산출되는 목적함수(FOM)는 하기 수식1과 같다.

[0060] [수식 1]

$$\text{FOM} = E_{\max}^2 + E_{\text{diag}}^2 - E_{\min x}^2 - E_{\min z}^2$$

[0062] 여기서, $E_{\max}^2$ 는 2D전기장 강도맵(2D electric field intensity map)에서 전기장의 강도가 가장 센 제1포인트(121)에서 측정된 전기장으로 이해될 수 있고,

[0063] E_{diag}^2 는 전기장의 강도가 가장 약한 두 지점의 중간점의 강도를 나타내는 제4포인트(124)에서 측정된 전기장으

로 이해될 수 있고, $E_{\min x}^2$ 는 일 축(x축)을 기준으로 전기장의 세기가 가장 약한 제2포인트(122)에서 측정된 전기장으로 이해될 수 있고, $E_{\min z}^2$ 는 다른 일축(z축)을 기준으로 전기장의 세기가 가장 약한 제3포인트(123)에서 측정된 전기장으로 이해될 수 있다.

[0064] 여기서, E_{diag}^2 는 사각형 패턴의 균일성(uniformity of square-shaped patterns)을 높이기 위한 항으로 이해될 수 있고, 목적함수(FOM)의 높은 값은 회절 차수 효율에 관계없이 이상적인 직육면체 격자 모양을 제공할 수 있다.

[0065] 최적화부(130)는 나노구조체(111)의 주기(P), 굴절률(n) 및 목적함수(FOM) 중 적어도 하나 이상을 입력변수로 설정하고, 입력변수를 기 설정된 알고리즘에 입력하여 나노구조체(111)의 설계매개변수를 산출할 수 있다.

[0066] 예를 들어, 최적화부(130)는 PSO 알고리즘(particle swarm optimization algorithm)을 사용하여 나노구조체(111)의 설계매개변수를 산출할 수 있다. 이에 의해 고대비 3D 나노패터닝(high-contrast 3D nanopatterning)에 최적화된 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11)의 형상을 획득할 수 있다.

[0067] 여기서, PSO 알고리즘은 기울기 정보를 사용하지 않기 때문에 공지된 전역 최적화 방법 중 하나로서, 미분 불가능한 문제에 적용될 수 있다.

[0068] PSO 알고리즘은 쉽게 로컬 최적화(local optimum)에 빠지고, 반복 과정에서 수렴률(convergence rate in the iterative process)이 낮습니다. 이러한 문제를 보완하기 위해서는 PSO 알고리즘의 내부 매개변수(internal parameters)를 결정하고 경계조건(boundary conditions)을 설정할 수 있다.

[0069] 여기서, PSO 알고리즘은 입자 군집 최적화 알고리즘으로 명명될 수 있고,

[0070] 경계조건으로 실제 설계 가능한 조건 (구조체 한계 높이 비율, 최소 구조체 사이즈)를 설정함으로써 공정 가능한 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11) 디자인 중 목적함수(FOM)를 최대화할 수 있는 구조체를 찾아낼 수 있다.

[0071] 종래의 최적화 구조체의 경우 0차 회절 최소화를 통해 개발된 마스크 디자인이과 비교했을 때, 본 실시예의 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11)는 더 높은 전기장의 세기 대비를 확보할 수 있었으며, 임계값을 넘는 부분을 제거했을 때, 바이너리한 예상 구조체상에서도 더 뚜렷한 3차원 패턴을 획득할 수 있는 장점이 있다.

[0072] PSO 알고리즘은 최적화된 매개변수(optimal parameters)를 찾기 위해 여러개의 파티클(particles)을 사용한다. 각 파티클의 포지션은 설계매개변수를 나타내고, 값은 시뮬레이션을 통해 계산된 목적함수(FOM)일 수 있다. 모든 반복 과정(iteration)에서 개인 및 전역 최소 정보(personal and global minimum information)를 공유하여 모든 파티클들은 각 위치를 업데이트할 수 있다. 이러한 반복 과정동안, 여러개의 파티클은 초기 경계조건에서 제외(outbound)될 수 있다.

[0073] 본 실시예에서 최적화부(130)는 PSO 알고리즘에 2가지 유형의 조건을 적용할 수 있다.

[0074] 최적화부(130)는 충전계수(fill factor)와 높이(H)를 포함하는 설계매개변수의 최대값과 최소값을 PSO 알고리즘의 경계조건으로 적용할 수 있다. 예를 들어, 최적화부(130)에 의해 경계조건은 높이(H)의 최소값 100nm, 높이(H)의 최대값 800nm로 설정될 수 있고, 충전계수(fill factor)의 최소값 0.2, 충전계수(fill factor)의 최대값 0.8로 설정될 수 있다.

[0075] 또한, 최적화부(130)는 PSO 알고리즘에 붕괴조건(collapse condition)을 적용할 수 있다.

[0076] 마이크로접촉 프린팅 기반 제작(microcontact printing-based fabrications)의 경우 나노구조체(111)는 재료 및 형상에 따라 달라지는 잔류 응력(residual stress)을 고려해야 한다. 반복 과정동안 일부 파티클이 붕괴조건을 초과하면 경계를 벗어난 파티클이 제거되고 초기 경계조건 내에서 다시 생성된다. 이와 같이 내부 매개변수(internal parameter)를 수정하여 PSO 알고리즘을 실행할 수 있으며, PSO 알고리즘은 공지된 알고리즘으로서 보다 자세한 설명은 생략한다.

- [0077] 이와 같은 PSO 알고리즘에 의해 산출되는 상기 나노구조체(111)의 설계매개변수는 나노구조체(111)의 높이(H), 나노구조체(111)의 충전계수(fill factor) 및 나노구조체(111)의 형상을 포함할 수 있다.
- [0078] 여기서, 충전계수(fill factor)는 나노구조체(111)의 높이(H)와 너비(A)의 비율인 (나노구조체(111)의 너비(A)/나노구조체(111)의 높이(H))로 이해될 수 있다.
- [0079] 도 5에는 PSO 알고리즘이 실행됨으로써 나타나는 최적화된 설계매개변수(충전계수(fill factor), 높이(H) 포함)가 도출되는 도면이 도시되어 있다.
- [0080] 또한, 최적화부(130)는 목적함수(FOM)가 최대가 되는 나노구조체(111)의 높이(H)를 상기 나노구조체(111)의 설계매개변수로 산출할 수 있다.
- [0081] 도 6을 참조하면, 나노구조체(111)의 높이(H)에 따른 회절 효율(Diffraction efficiency)은 목적함수(FOM)가 최대점일때 가장 높음을 알 수 있다. 도 5에서 붉은실선은 본 실시예의 목적함수(FOM), 파란실선과 파란점선은 각각 비교예로서 0th 차수(order), 1th 차수(order)의 효율을 나타낸다.
- [0082] 도 6에 사용된 나노구조체(111)의 주기(P)는 400nm이고, 충전계수(fill factor)는 0.5일 수 있다.
- [0083] 도 7은 설계매개변수의 최적화를 위한 3D전기장의 분포 및 나노구조체(111)의 x-z 단면을 나타내는 도면이다.
- [0084] 도 7의 (a)는 비교예로서 초기 설계매개변수로서 주기(P) 400nm, 충전계수(fill factor) 0.5, 높이(H) 200nm인 나노구조체(111)일때 3D전기장의 분포를 나타낸다. x축 낮은 대비(low contrast)는 육각형 격자 모양(hexagonal lattice shape)을 방해하는 요소로 이해될 수 있다.
- [0085] 도 7의 (b)는 비교예로서 0차 효율을 최소화한 설계(minimize 0th order efficiency design)로서, 설계매개변수로서 주기(P) 400nm, 충전계수(fill factor) 0.34, 높이(H) 313nm인 나노구조체(111)일때 3D전기장의 분포를 나타낸다. 마찬가지로 x축 낮은 대비(low contrast)는 육각형 격자 모양(hexagonal lattice shape)을 방해하는 요소로 이해될 수 있다.
- [0086] 도 7의 (c)는 본 발명의 일 실시예로서 설계매개변수로서 주기(P) 400nm, 충전계수(fill factor) 0.27, 높이(H) 159nm인 나노구조체(111)일때 3D전기장의 분포를 나타낸다. 본 실시예는 육각형 격자를 나타냄을 알 수 있다. 도 7의 (d)는 본 발명의 일 실시예의 설계매개변수로서 주기(P) 500nm, 충전계수(fill factor) 0.52, 높이(H) 158nm인 나노구조체(111)일때 3D전기장의 분포를 나타낸다. 도 7(a) 내지 (d)의 나노구조체(111)는 재료로 폴리우레탄 아크릴레이트(polyurethane acrylate, PUA)가 이용될 수 있다. 도 7의 (e)는 본 발명의 일 실시예로서 재료로 폴리디메틸실록산(polydimethylsiloxane, PDMA)이고, 설계매개변수로서 주기(P) 600nm, 충전계수(fill factor) 0.4, 높이(H) 183nm인 나노구조체(111)일때 3D전기장의 분포를 나타낸다.
- [0087] 도 7에 도시된 전기장 분포 및 이진화 결과에서 알 수 있듯이 회절 제어를 통해 경우 육각형 격자 구멍 배열을 형성할 수 있다.
- [0088] 도 8은 본 실시예 및 비교예의 설계매개변수, 회절효율(diffraction efficiency), 붕괴조건, 전기장 정보 등을 포함하는 표를 나타낸다.
- [0089] 도 8에 도시된 실시예 중 inverse design 라고 기재된 부분이 본 실시예를 나타내는 것으로 이해될 수 있다.
- [0090] 도 8을 참조하면, 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치(1)에 의해 나노구조체(111)의 재료는 폴리우레탄 아크릴레이트(polyurethane acrylate, PUA)와 폴리디메틸실록산(polydimethylsiloxane, PDM A)일 수 있다.
- [0091] 또한, 도 8에 도시된 나노구조체(111)의 주기(P)는 400nm 내지 600nm으로 제공될 수 있고, 충전계수(fill factor)는 0.27 내지 0.52로 제공될 수 있고, 높이(H)는 158nm 내지 183nm으로 제공될 수 있다. 이때, 목적함수(FOM)의 값은 2.836 내지 2.945로 제공될 수 있다.
- [0092] 구체적으로, 도 8에 도시된 본 발명의 일 실시예의 나노구조체(111)는 재료로 폴리우레탄 아크릴레이트(polyurethane acrylate, PUA), 주기(P) 400nm, 충전계수(fill factor) 0.27, 높이 159nm, 목적함수(FOM)의 값 2.907로 제공될 수 있다.
- [0093] 또한, 본 발명의 다른 실시예의 나노구조체(111)는 재료로 폴리우레탄 아크릴레이트(polyurethane acrylate, PUA), 주기(P) 500nm, 충전계수(fill factor) 0.52, 높이 158nm, 목적함수(FOM)의 값 2.945로 제공될 수 있다.

- [0094] 또한, 본 발명의 또 다른 실시예의 나노구조체(111)는 재료로 폴리디메틸실록산(polydimethylsiloxane, PDMA), 주기(P) 600nm, 충전계수(fill factor) 0.4, 높이 183nm, 목적함수(FOM)의 값 2.836으로 제공될 수 있다.
- [0095] 도 9는 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 제조방법을 개념적으로 나타내는 도면이고, 도 10은 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치(1)에 의해 생성되는 나노메타표면(1000)이다.
- [0096] 도 1 내지 도 9를 참조하면, 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 제조방법은 상술한 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치(1)에 의해 산출된 설계매개변수 또는 상기 설계매개변수와 상보적인 변수를 갖는 마스터몰드(210)를 제공하는 단계(S1단계);
- [0097] 상기 마스터몰드(210)에 폴리우레탄 아크릴레이트(polyurethane acrylate, PUA)를 증착하는 단계(S2단계);
- [0098] 상기 폴리우레탄 아크릴레이트(polyurethane acrylate, PUA)를 경화시킨 후 상기 마스터몰드(210)와 분리하여, 상기 폴리우레탄 아크릴레이트(polyurethane acrylate, PUA)로 형성된 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11)를 형성하는 단계(S3단계)를 포함할 수 있다.
- [0099] S1단계에서 설계매개변수와 상보적인 변수는 최종 생성되는 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11)가 상술한 설계매개변수를 갖도록 설계되는 변수로 이해될 수 있다.
- [0100] S1단계에 대해 보다 자세히 설명하면, 표준 전자빔 리소그래피 공정(ELIONIX, ELS-7800, 가속 전압: 80kV, 빔 전류: 100pA, 크기 제한 500um X 500um²)을 이용하여 500 μ m 두께의 Si 웨이퍼를 패터닝할 수 있다.
- [0101] 노광 공정 후 마스크 패턴을 포지티브 전자빔 레지스트(495 PMMA A2, Micro-Chem) 위에 전사하고, 메틸 이소부틸 케톤/IPA(1:3) 용액에서 0° C에서 15분간 노출된 레지스트 패턴을 디벨롭할 수 있다. 또한, 전자빔 증발기(KVT, KVE-E4000)를 사용하여 30nm 두께의 Cr 마스크를 증착한 후, 75° C에서 15분간 아세톤에 담그고 45Hz에서 4분간 초음파 처리하는 리프트 오프 과정을 거칠 수 있다. 그 후, 건식 식각 공정(Dry Etcher, DMS)을 사용하여 Cr 마스크 패턴을 Si 웨이퍼에 전사한 후 Cr 식각제(CR-7)를 사용하여 잔류 Cr 마스크를 제거함으로써 마스터몰드(210)를 생성할 수 있다.
- [0102] 그 후, 마스터몰드(210)에 폴리우레탄 아크릴레이트(polyurethane acrylate, PUA)를 증착하는 단계(S2단계)가 실행될 수 있다.
- [0103] 그 후, 폴리우레탄 아크릴레이트(polyurethane acrylate, PUA)를 경화시킨 후 마스터몰드(210)와 분리하여, 폴리우레탄 아크릴레이트(polyurethane acrylate, PUA)로 형성된 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11)를 형성하는 단계(S3단계)가 실행될 수 있다.
- [0104] 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11)의 경우 식각 공정을 통해 형성된 실리콘 주형에 폴리우레탄 아크릴레이트(polyurethane acrylate, PUA)를 떨어뜨리고 투명한 유리 기판으로 덮어준다. 폴리우레탄 아크릴레이트(polyurethane acrylate, PUA)와 유리 기판으로 연결된 실리콘 주형을 UV 노광을 통해 1차 가교를 형성하고, 기판을 주형에서 분리시켜 기판 위에 PUA 요철 구조를 형성시킨다. 그 후 2차로 UV 노광을 충분히 시켜 완전히 가교를 일으킬 수 있다.
- [0105] 또한, 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 제조방법은 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11)에 폴리디메틸실록산(polydimethylsiloxane, PDMA)을 증착하는 단계(S4단계); 폴리디메틸실록산(polydimethylsiloxane, PDMA)을 경화시킨 후 상기 폴리우레탄 아크릴레이트(polyurethane acrylate, PUA)로 형성된 상기 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11)를 분리하여 폴리디메틸실록산(polydimethylsiloxane, PDMA)으로 형성된 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11)를 형성하는 단계(S5단계)를 더 포함할 수 있다.
- [0106] S4단계는, 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11)에 h-PDMS를 증착하는 단계, h-PDMS의 상부에 s-PDMS를 증착하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0107] 이와 같은 과정을 거쳐 생성된 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(16)는 h-PDMS와 s-PDMS의 재료로 형성될 수 있다.
- [0108] 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(16)의 경우 상기 기술된 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11)에 2가지 다른 기계적 강도를 가지는 PDMS를 이용해서 제작될 수 있다.
- [0109] 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(16)에 이용되는 PDMS는 상대적으로 높은 기계적 강도를 가지는

h-PDMS (hard PDMS), 상대적으로 약한 기계적 강도를 가지는 s-PDMS (soft PDMS)를 포함할 수 있다.

- [0110] 여기서, h-PDMS 는 VDT-731, HMS-301 (Gelest) 를 이용해 굳혀진다. 또한, s-PDMS는 Sylgard 184 기반 PDMS 탄성 중합체를 베이스와 경화제를 10 : 1 비율로 섞은 후 경화하여 제작한다. 또한, 상기 제작된 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11) 주형에 h-PDMS를 스핀 코팅하고, 완전히 경화되기 전에 s-PDMS를 부어 경화시켜 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(16)를 완성시킬 수 있다.
- [0111] S1단계 내지 S3단계에 의해 폴리우레탄 아크릴레이트(polyurethane acrylate, PUA)로 형성된 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11)를 형성할 수 있고, S1단계 내지 S5단계에 의해 폴리디메틸실록산(polydimethylsiloxane, PDMA)으로 형성된 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(16)를 형성할 수 있다.
- [0113] 본 발명의 또 다른 실시예에 따르면, 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치(1)에 의해 산출된 설계매개변수를 갖도록 제조된 나노구조체(111)를 포함하는 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11); 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11)를 향해 빛을 조사할 수 있는 광원(13); 상기 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11)를 투과하여 회절된 빛을 조사받아 나노구조체(111)의 패턴이 생성되는 포토레지스트(12)를 포함하는 나노 패터닝장치(10)가 제공될 수 있다(도 3 참조).
- [0114] 여기서, 나노구조체(111)는 포토레지스트(12)와 직접 접촉하거나 또는 비접촉하게 배치될 수 있다.
- [0115] 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11)는 주기성을 갖는 나노구조체(111)를 포함하는 것을 기본으로 하나, 이에 국한되지 않고 입사되는 빛을 목표한 간섭무늬를 형성할 수 있도록 회절시킬 수 있는 임의의 구조를 가질 수 있다.
- [0116] 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11)가 주기적인 구조를 가지는 경우, 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11)의 조절 가능 구조적 요소는 나노구조체(111)의 주기(P), 충전계수(fill factor), 높이(H)를 포함할 수 있다. 여기서, 충전계수(fill factor)는 돌출구조가 차지하는 비율로 이해될 수 있다.
- [0117] 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11)를 이루는 물질은 PDMS (Polydimethylsiloxane, $n \sim 1.4$), PUA(Polyurethane acrylate, $n \sim 1.54$) 같은 고분자 중합체 혹은 TiO_2 ($n \sim 2.87$) 같은 고굴절률 재료를 포함할 수 있다.
- [0118] 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11)를 이루는 물질에 따라 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11)와 포토레지스트(12) 간의 접촉, 비접촉 상태가 결정되며 비접촉 모드인 경우 공기층 혹은 탄성중합체를 통해 빛을 전파할 수 있다.
- [0119] 포토레지스트(12)는 SU-8 ($n \sim 1.6$)와 같은 네거티브 톤 (negative-tone) 포토레지스트와 AZ 계열의 포지티브 톤 (positive-tone) 포토레지스트가 사용가능하지만, 이외에도 노광 공정에 사용되는 모든 물질이 사용이 가능하다.
- [0121] 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11)는 위에서 자세히 설명하였는바 이에 대한 자세한 설명은 생략한다.
- [0122] 광원(13)은 300nm 내지 400nm 파장범위, 바람직하게는 355nm를 갖는 빛을 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11)를 향해 조사할 수 있다.
- [0123] 빛은 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11)를 투과하여 회절이 발생함으로써 간섭장이 생성될 수 있다.
- [0124] 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11)를 투과한 빛은 0차(0th order), 1차(1th order) 회절, 2차(2th order) 회절, n차 회절을 갖는 빛으로 회절될 수 있다.
- [0125] 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11)를 투과한 빛은 포토레지스트(12)가 5 내지 10um 스핀코팅되어 있는 기판에 노광될 수 있다. 노광 후 안정적인 가교 형성을 위해 55도에서 15분 동안 가열될 수 있다. 그 후, 포토레지스트(12)를 약 20분 동안 현상한 후 에탄올 용액에 세정을 할 수 있다.
- [0126] 또한, 네거티브 톤의 포토레지스트의 경우 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크(11)로부터 형성되는

간섭 무늬 중 높은 세기를 가지는 지역만이 가교가 일어나 3차원 나노 구조로 남게 된다. 노광 후 현상 과정을 통해 가교가 일어나지 않은 부분을 제거하여 형성된 3차원 나노 구조만을 기판에 남길 수 있다. 노광 후 안정적인 3차원 나노 구조 형성을 위해 가열 혹은 현상 단계가 추가될 수 있다.

- [0127] 이러한 과정을 통해 도 10에 도시된 바와 같은 패터닝이 형성된 나노메타표면(1000)이 생성될 수 있다.
- [0128] 도 11은 나노 패터닝장치(10)에 의해 형성된 나노구조체를 포함하는 나노메타표면(1000)의 성능평가를 나타내는 도면이다.
- [0129] 도 11은 나노구조체의 완성도를 정량적으로 평가한 점수를 나타낸 도표로서, 구조 유사도 평가지표 (Structural similarity index, SSIM)를 기반으로 두가지 타입의 이상적인 구조체(배열을 평가하기 위한 이상적 배열 (Lattice)/나노홀의 모양을 평가하기 위한 이상적 나노홀 (Pore))을 통해 두가지 지표를 모두 비교할 수 있다.
- [0130] 본 실시예의 나노 패터닝장치(10)를 이용하여 제작된 나노구조체는 종래의 0차회절 최소화를 기반으로 제작된 구조체에 비해 더 균일한 형상과 더 균일한 배치를 얻을 수 있다
- [0131] 본 실시예에 따르면 사용자가 특정한 부분의 전기장을 만족하는 구조체를 역으로 찾아낼 수 있고, 전기장의 높고 낮은 지점을 다르게 설정하면 다양한 패턴 제작에 활용 가능하다. 이를 통해 광학 소재, 구조 소재 등 다양한 3차원 나노 구조체의 응용 분야에 활용할 수 있다.
- [0132] 이상 본 발명의 실시예에 따른 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치, 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크, 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크의 제조 방법 및 나노 패터닝 장치를 구체적인 실시 형태로서 설명하였으나, 이는 예시에 불과한 것으로서 본 발명은 이에 한정되지 않는 것이며, 본 명세서에 개시된 기초 사상에 따르는 최광의 범위를 갖는 것으로 해석되어야 한다. 당업자는 개시된 실시 형태들을 조합, 치환하여 적시되지 않은 실시 형태를 실시할 수 있으나, 이 역시 본 발명의 권리범위를 벗어나지 않는 것이다. 이외에도 당업자는 본 명세서에 기초하여 개시된 실시형태를 용이하게 변경 또는 변형할 수 있으며, 이러한 변경 또는 변형도 본 발명의 권리범위에 속함은 명백하다.

부호의 설명

- [0133] 1 : 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크 설계 장치
- 10 : 나노 패터닝장치
- 100 : 프로세서
- 1000 : 나노메타표면
- 11 : 전기장 조절 기반 3차원 근접장 패터닝용 마스크
- 110 : 재료선정부
- 111 : 나노구조체
- 12 : 포토레지스트
- 120 : 목적함수산출부
- 121 : 제1포인트
- 122 : 제2포인트
- 123 : 제3포인트
- 124 : 제4포인트
- 13 : 광원
- 130 : 최적화부
- 210 : 마스터몰드

도면

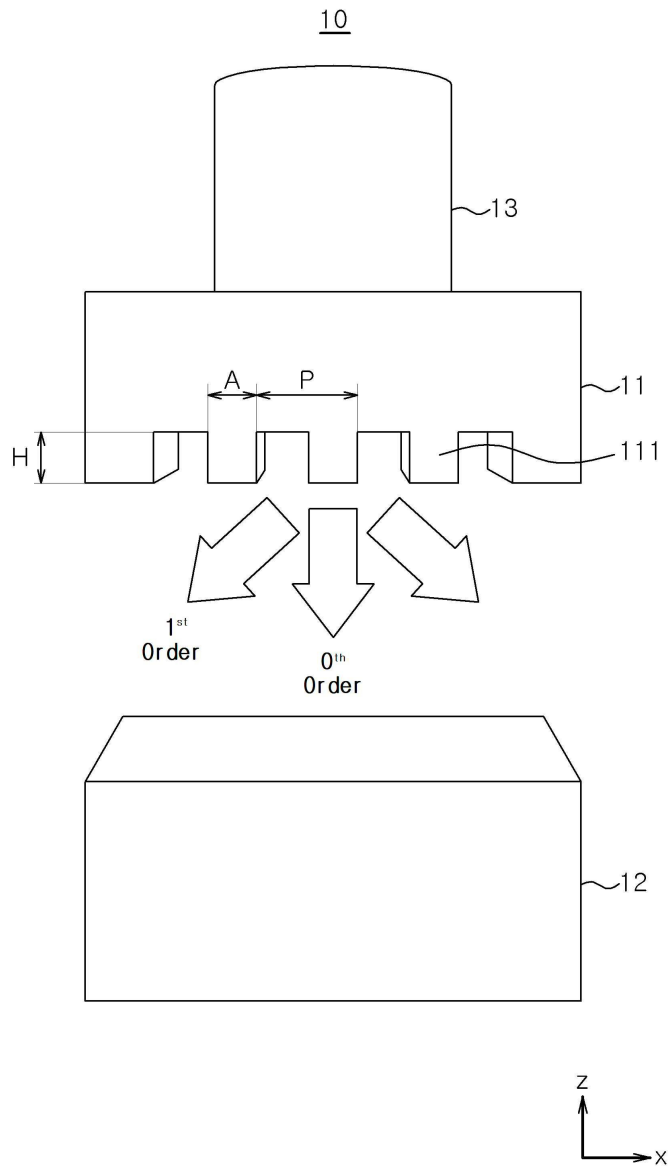
도면1



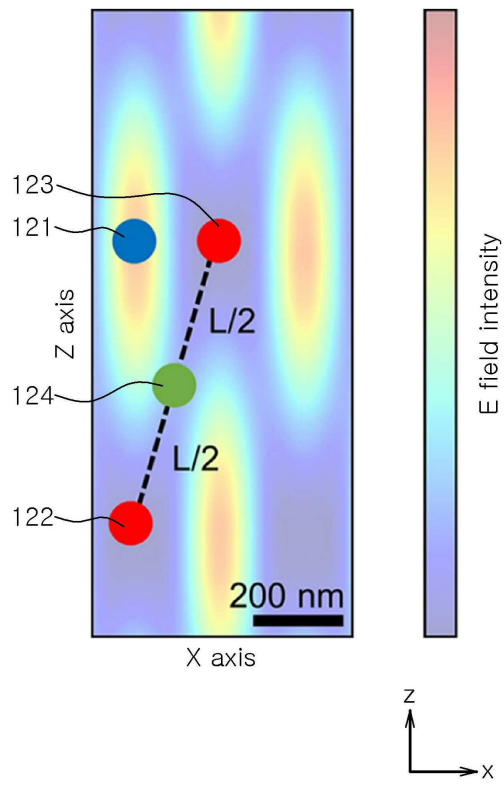
도면2



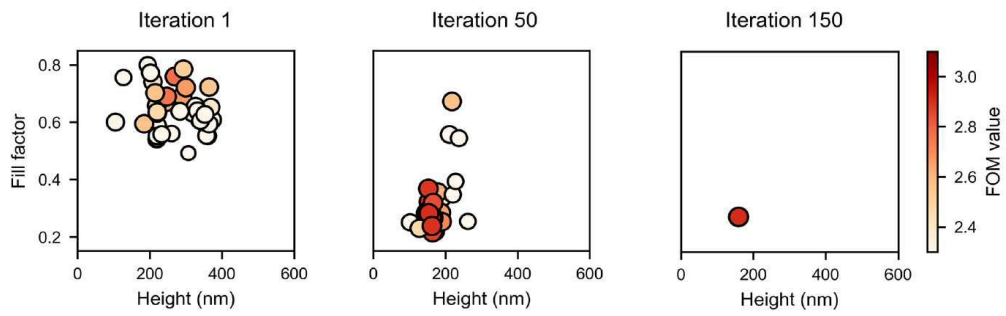
도면3



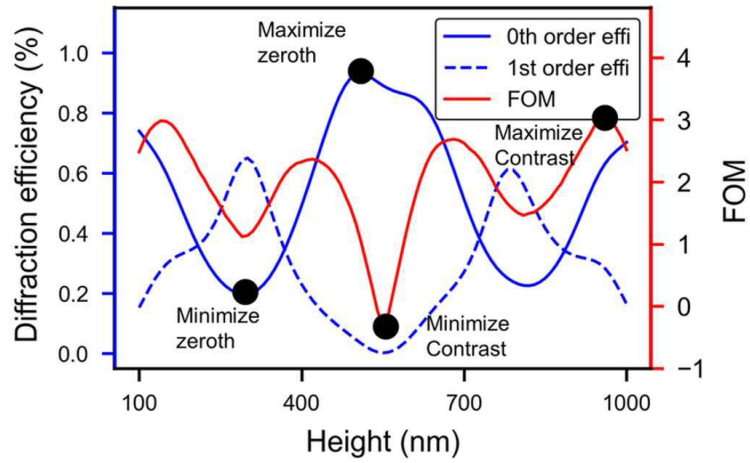
도면4



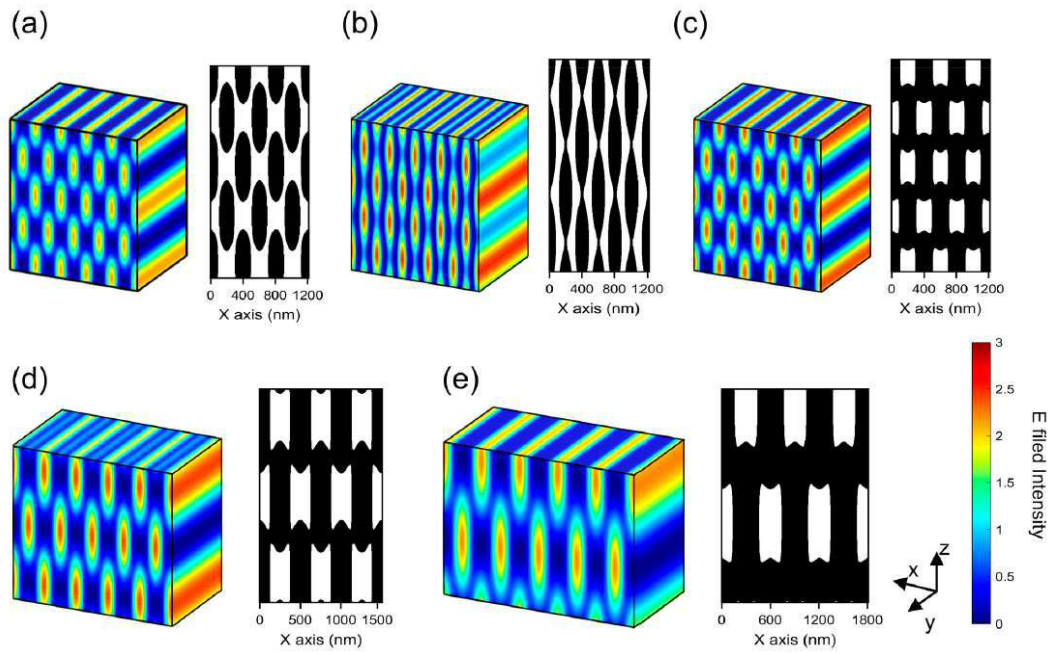
도면5



도면6



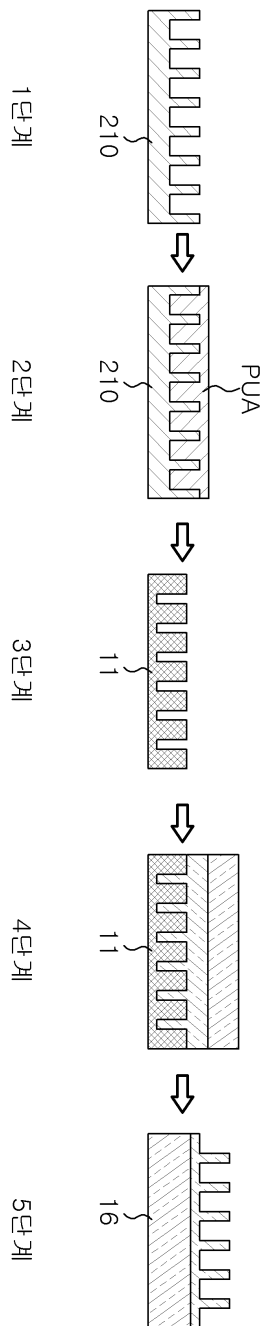
도면7



도면8

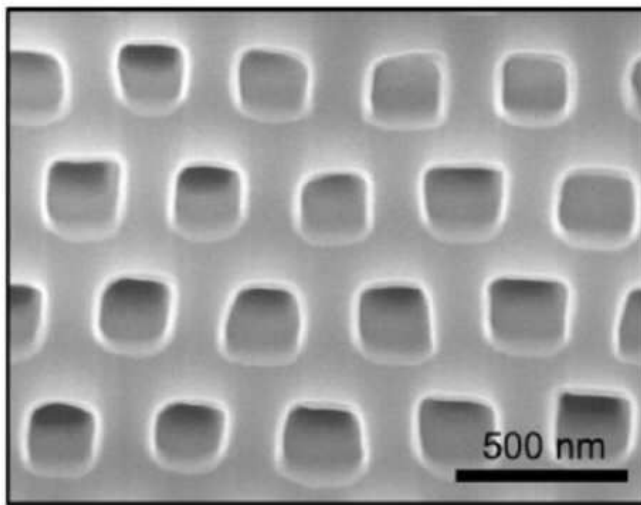
FOM	initial design	minimize 0th design	inverse design	inverse design	inverse design
material	PUA	PUA	PUA	PUA	PDMS
period (nm)	400	400	400	500	600
fill factor	0.5	0.34	0.27	0.52	0.4
height (nm)	200	313	159	158	183
collapse coefficient	0.022	0.055	0.006	0.001	0.001
max E-field intensity	2.22	2.61	2.34	2.44	2.25
diagonal E-field intensity	0.35	0.11	0.57	0.53	0.59
minimum E-field (z-axis)	0.08	0.003	0.002	0.012	0.003
Minimum E-field (x-axis)	0.064	0.761	0.001	0.013	0.001
zeroth order efficiency	0.391	0.128	0.639	0.584	0.652
First order efficiency	0.349	0.73	0.274	0.346	0.275
FOM value	2.43	1.956	2.907	2.945	2.836

도면9



도면10

1000



도면11

