



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2019-0015180
(43) 공개일자 2019년02월13일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)
B23K 26/352 (2014.01) B23K 26/00 (2014.01)
B23K 26/0622 (2014.01) B23K 26/082 (2014.01)
B23K 101/32 (2006.01) B23K 101/36 (2006.01)
B23K 103/00 (2006.01) B23K 103/04 (2006.01)
B23K 103/10 (2006.01) B23K 103/12 (2006.01)
B23K 103/14 (2006.01)
- (52) CPC특허분류
B23K 26/3584 (2018.08)
B23K 26/0006 (2013.01)
- (21) 출원번호 10-2018-7026071
(22) 출원일자(국제) 2017년03월08일
심사청구일자 없음
- (85) 번역문제출일자 2018년09월07일
(86) 국제출원번호 PCT/GB2017/050621
(87) 국제공개번호 WO 2017/153750
국제공개일자 2017년09월14일
- (30) 우선권주장
1603991.9 2016년03월08일 영국(GB)
- (71) 출원인
유니버시티 오브 던디
영국 던디 디디1 4에이치엔 네더게이트
- (72) 발명자
아브둘반드, 아민
영국 던디 DD1 4HN 네더게이트 유니버시티 오브
던디 스쿨 오브 사이언스&엔지니어링
- (74) 대리인
특허법인 무한

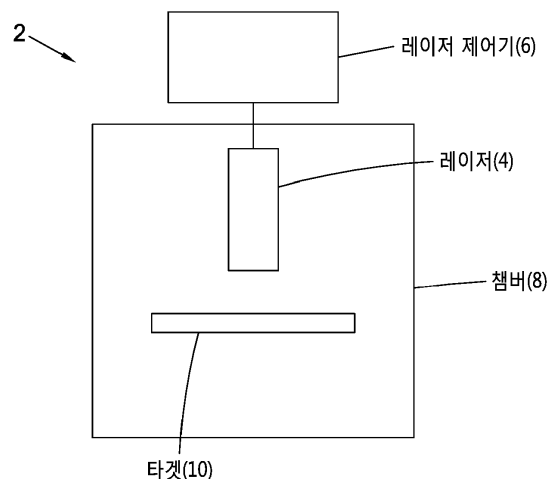
전체 청구항 수 : 총 33 항

(54) 발명의 명칭 세라믹 표면의 광전자 수율 및/또는 이차 전자 수율을 감소시키는 방법, 대응하는 장치 및 제품

(57) 요약

세라믹 표면의 광전자 수율(PEY) 및/또는 이차 전자 수율(SEY)을 감소시키는 방법은 타겟(10)의 상기 표면에 주기적인 구조들의 배열을 생성하도록 상기 타겟(10)의 상기 표면에 레이저(4)에 의해 방사된 일련의 레이저 펄스들을 포함하는 펄스화된 레이저 방사선을 적용하는 단계를 포함한다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류

B23K 26/0624 (2015.10)

B23K 26/082 (2015.10)

B23K 2101/32 (2018.08)

B23K 2101/36 (2018.08)

B23K 2103/05 (2018.08)

B23K 2103/10 (2018.08)

B23K 2103/12 (2018.08)

B23K 2103/14 (2018.08)

B23K 2103/52 (2018.08)

명세서

청구범위

청구항 1

세라믹 표면의 광전자 수율(PEY) 및/또는 이차 전자 수율(SEY)을 감소시키는 방법에 있어서,

상기 표면에 주기적인 구조들의 배열을 생성하도록 상기 표면에 일련의 레이저 펄스들을 포함하는 펄스화된 레이저 방사선을 적용하는 단계

를 포함하는 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 펄스들의 출력 밀도는,

0.1 TW/cm^2 내지 3 TW/cm^2 의 범위이고, 선택적으로는 0.5 TW/cm^2 내지 1.5 TW/cm^2 의 범위에 있는 방법.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 펄스들의 출력 밀도는,

0.1 GW/cm^2 내지 3 GW/cm^2 의 범위이고, 선택적으로는 0.2 GW/cm^2 내지 1 GW/cm^2 의 범위에 있는 방법.

청구항 4

제1항 내지 제3항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 레이저 방사선을 적용하는 단계는,

상기 표면이 2.5보다 작은, 선택적으로는 2.0보다 작은, 선택적으로는 1.6보다 작거나 같은, 선택적으로는 1.4보다 작거나 같은, 선택적으로는 0.2 내지 2.0의 범위이고, 선택적으로는 0.5 내지 1.6의 범위이고, 선택적으로는 1.0 내지 1.4의 범위에 있는 SEY의 값을 갖도록, 상기 표면의 성질들을 변경하는

방법.

청구항 5

제1항 내지 제4항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 레이저 펄스들은,

상기 표면의 재료의 열 완화 시간보다 더 짧은 지속시간을 갖는 방법.

청구항 6

제1항 내지 제5항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 레이저 펄스들의 펄스 지속시간은,

300 펨토초(fs) 내지 1 나노초(ns)의 범위이고, 선택적으로는 1 ns 내지 100 ns의 범위에 있을 수 있는 방법.

청구항 7

상기 펄스 지속시간은 1 ps 내지 100 ps의 범위에 있을 수 있음. 상기 펄스 지속시간은 1 ps 내지 50 ps의 범위에 있을 수 있음. 상기 펄스 지속시간은 5 ps 내지 500 ps의 범위에 있을 수 있음.

청구항 8

제1항 내지 제7항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 표면에서의 상기 주기적인 구조들의 배열은,

실질적으로 서로 평행한 주기적인 일련의 피크들 및 트로프들을 포함하고,

선택적으로는 상기 피크들은,

실질적으로 상부에서 평평할 수 있고 및/또는 상부에서 둥글 수 있고, 및/또는 실질적으로 상부에서 뾰족한 및/또는 날카로운 구역들을 가질 수 없는 방법.

청구항 9

제1항 내지 제8항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 피크들 중 적어도 일부에 대한 상기 피크 내지 트로프 거리, 및/또는 평균 또는 중간 피크 내지 트로프 거리는,

1 μm 내지 100 μm 의 범위이고, 선택적으로는 20 μm 내지 80 μm 의 범위이고, 선택적으로는 30 μm 내지 60 μm 의 범위에 있는 방법.

청구항 10

제1항 내지 제9항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 주기적인 구조들의 배열은,

크로스-해칭된 배열; 또는

실질적으로 크로스-해칭 없는 피크들 및 트로프들의 실질적으로 평행한 라인들의 배열을 포함하는 방법.

청구항 11

제1항 내지 제10항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 주기적인 구조들의 배열은,

상기 레이저 방사선을 제공하는 레이저 소스의 단일 패스에 의해 생성되는 방법.

청구항 12

제1항 내지 제11항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 레이저 방사선은,

5 μm 내지 100 μm 의 범위이거나, 또는 1 μm 내지 100 μm 의 범위에 있는 상기 표면에서의 초점 스팟 직경을 갖는 펄스화된 레이저 빔을 포함하는 방법.

청구항 13

제1항 내지 제12항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 펄스화된 방사선은,

10 kHz 내지 1 MHz의 범위에 있는 펄스 반복률을 갖는 방법.

청구항 14

제1항 내지 제13항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 레이저 방사선의 평균 출력은,

3 W 내지 8 W의 범위이거나, 또는 1 W 내지 10 W의 범위이거나, 또는 0.3 W 내지 2 W의 범위이거나, 또는 1 W

내지 5 W의 범위이거나, 또는 0.1 W 내지 1 W의 범위이거나, 또는 0.1 W 내지 2 W의 범위이거나, 또는 0.3 W 내지 5 W의 범위에 있을 수 있는 방법.

청구항 15

제1항 내지 제14항 중 어느 한 항에 있어서,
상기 표면에 상기 레이저 방사선을 적용하는 단계는,
상기 표면 위로 펄스화된 레이저 빔을 스캐닝하는 단계를 포함하고,
상기 스캐닝을 위한 스캔 속도는,
1 mm/s 내지 200 mm/s의 범위에 있는 방법.

청구항 16

제1항 내지 제15항 중 어느 한 항에 있어서,
상기 표면 위로 펄스화된 레이저 빔을 스캐닝하는 단계는,
2 회와 10 회 사이에서 반복되거나, 한 번 수행되는 방법.

청구항 17

제1항 내지 제16항 중 어느 한 항에 있어서,
상기 표면에 대한 상기 레이저 방사선의 입사각은,
0도로부터 30도로의, 또는 90도로부터 60도로의 범위에 있는 방법.

청구항 18

제1항 내지 제17항 중 어느 한 항에 있어서,
상기 방사선의 파장은,
100 nm 내지 2,000 nm의 범위에 있고, 선택적으로는 355 nm 또는 532 nm 또는 1064 nm인 방법.

청구항 19

제1항 내지 제18항 중 어느 한 항에 있어서,
상기 주기적인 구조들의 배열은,
제1 방향으로 배열되는 제1 일련의 피크들 및 트로프들, 및 제2, 상이한 방향으로 배열되는 제2 일련의 피크들 및 트로프들
을 포함하는 방법.

청구항 20

제1항 내지 제19항 중 어느 한 항에 있어서,
상기 제1 일련의 피크들 및 트로프들 및 상기 제2 일련의 피크들 및 트로프들은 교차하여, 상기 주기적인 구조들의 배열이 크로스-해칭된 배열을 포함하도록 하는 방법.

청구항 21

제1항 내지 제20항 중 어느 한 항에 있어서,
상기 레이저 방사선은,
상기 표면에 상기 레이저 방사선을 적용하는 단계에 의하여 추가 구조들을 생성하고,

상기 추가 구조들은,
상기 주기적인 구조들의 배열의 상기 구조들 보다 더 작은 방법.

청구항 22

제1항 내지 제21항 중 어느 한 항에 있어서,
상기 추가 구조들은,
추가 주기적인 구조들, 선택적으로는 나노-리플들을 포함하는 방법.

청구항 23

제1항 내지 제22항 중 어느 한 항에 있어서,
상기 추가 구조들은,
레이저 유도된 주기적 표면 구조들(LIPPS)을 포함하는 방법.

청구항 24

제1항 내지 제23항 중 어느 한 항에 있어서,
상기 추가 구조들은,
10 nm 내지 1 μ m의 범위에서의, 선택적으로는 100 nm 내지 1 μ m의 범위에서의 주기성을 갖는 방법.

청구항 25

제1항 내지 제24항 중 어느 한 항에 있어서,
상기 추가 구조들은,
상기 구조들의 주기적 어레이의 적어도 일부를 커버하고, 및/또는
상기 주기적인 구조들의 배열의 상기 피크들에 및/또는 상기 트로프들에 형성되는 방법.

청구항 26

제1항 내지 제25항 중 어느 한 항에 있어서,
상기 표면은,
라미네이트된 구조의 일부를 형성하는 방법

청구항 27

제1항 내지 제26항 중 어느 한 항에 있어서,
상기 표면은,
입자 가속기, 인젝션 키커 시스템, 빔라인, 알.에프. 도파관과 같은 도파관, 검출기, 검출기 장치, 우주선, 또는 진공 챔버의 일부를 형성하는 방법.

청구항 28

제1항 내지 제27항 중 어느 한 항에 있어서,
상기 표면은,
장치의 구성 요소의 표면을 포함하고,
상기 방법은,
상기 표면에 상기 주기적인 구조들의 배열을 생성하도록 상기 표면에 상기 레이저 방사선을 적용하고, 상기 장치에 상기 구성 요소를 설치하는 단계

를 포함하거나, 또는
상기 방법은,
상기 장치에서 원래(in situ) 상기 구성 요소를 가진 상기 표면에 상기 레이저 방사선을 적용하는 단계
를 포함하는 방법.

청구항 29

제1항 내지 제28항 중 어느 한 항에 있어서,
상기 레이저 방사선을 적용하는 단계 후에, 상기 표면의 적어도 일부에 금속 층을 형성하는 단계
를 더 포함하는 방법.

청구항 30

제1항 내지 제29항 중 어느 한 항에 있어서,
상기 레이저 방사선을 적용하는 단계 후에, 상기 표면을 탈지, 클리닝 또는 스무딩하는 단계 중 적어도 하나의
단계, 및/또는
상기 레이저 방사선을 적용하는 단계 후에, 상기 표면에 대해 표면 탄소 저감 공정을 수행하는 단계
를 포함하는 방법.

청구항 31

세라믹 표면의 광전자 수율(PEY) 및/또는 이차 전자 수율(SEY)을 감소시키는 장치에 있어서,
표면에 펄스화된 레이저 방사선을 적용하는 레이저 소스; 및
상기 세라믹 표면에 주기적인 구조들의 배열을 형성하도록 일련의 레이저 펄스들로서 상기 레이저 방사선을 적
용하는 상기 레이저 소스를 제어하도록 구성된 레이저 제어기
를 포함하는 장치.

청구항 32

주기적인 구조들의 배열을 포함하는 레이저 처리된 세라믹 표면.

청구항 33

제32항에 있어서,
상기 주기적인 구조들의 배열 중 적어도 일부를 커버하는 금속 층
을 더 포함하는 레이저 처리된 세라믹 표면.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 광전자 수율(PEY; photoelectron yield) 및/또는 이차 전자 수율(SEY; secondary electron yield)을
감소시키기 위하여 세라믹 표면들(ceramic surfaces)을 처리하는 방법 및 장치에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 광전자 방사(PEE; Photoelectron emission)은 표면과 광자들의 인터랙션(interaction)으로 인한 전자들의 방사
를 말한다. 이차 전자 방사(SEE; Secondary electron emission)은 표면과 1차 전자(primary electron)의 인터
랙션으로 인한 표면으로부터의 이차 전자의 방사를 말한다. 광전자 수율(PEY)는 PEE를 특성화하는데 사용될 수
있고 이차 전자 수율(SEY)는 SEE를 특성화하는데 사용될 수 있다. PEY 및 SEY는 각각 단일 입사 광자 또는 전
자 당 방사된 전자들의 평균 수로 취할 수 있다.

- [0003] PEE 및 SEE 이펙트들(effects)은, 예를 들어 진공 챔버들(vacuum chambers), 우주선들, 검출기들, 예를 들어 알.에프. 도파관들(r.f. waveguides)과 같은 도파관들(waveguides), 빔라인들(beamlines), 및 입자 가속기들(particle accelerators)에서의 매우 다양한 장치들에서 상당한 어려움을 야기할 수 있다. PEE 및 SEE 이펙트들은, 문제의 장치 및 애플리케이션(application)의 특정 유형에 따라, 원하지 않는 전자 클라우드 축적(electron cloud build-up), 압력, 빔 손실들 및 불안정성에서의 원하지 않는 증가, 빔 수명의 감소, 원하지 않는 열 부하들, 전력 손실, 손상, 장치 수명의 감소, 소음의 증가, 및 민감도의 증가를, 다양하게, 불러올 수 있다.
- [0004] 예를 들어 가속기 빔 전달(accelerator beam transfer)(인젝션 키커 시스템(Injection Kicker Systems))의 키커(Kickers)에 사용되는 99.7 % 순수 알루미늄과 같은, > 99.5 %의 순수 산화 알루미늄(pure aluminium oxide)(알루미나(alumina))과 같은 세라믹 재료들(ceramic materials)에 대한 SEY 또는 PEY의 감소는, 특히, 예를 들어 SEY 값들이 일부 실제 애플리케이션들(practical applications)에서 원하는 것(예를 들어, 2보다 작거나, 1.6, 또는 경우에 따라서는 1.4 보다 작거나) 보다 훨씬 더 높을 수 있다(예를 들어, 8 이상). Al_2O_3 는 일반적으로 산화 알루미늄 또는 알루미늄이라고 지칭하지만, 당해 기술 분야에서 알루미나 산화물(alumina oxide)로 지칭하는 것이 또한 공지되어 있다.
- [0005] PEY 및 SEY를 감소시키기 위한 개선된 또는 적어도 대안적인 방법들을 제공하는 것이 바람직하다.

발명의 내용

해결하려는 과제

과제의 해결 수단

- [0006] 본 발명의 제1 측면에서, 세라믹 표면의 광전자 수율(PEY) 및/또는 이차 전자 수율(SEY)을 감소시키는 방법이 제공되며, 상기 표면에 주기적인 구조들의 배열(periodic arrangement of structures)을 생성하도록 상기 표면에 레이저 방사선(laser radiation)을 적용하는 단계를 포함한다.
- [0007] 상기 레이저 방사선은 일련의 레이저 펄스들을 포함하는 펄스화된 레이저 방사선(pulsed laser radiation)을 포함할 수 있다. 세라믹 재료, 예를 들어, 세라믹 표면은 이온 결합(ionic bonds) 및/또는 공유 결합(covalent bonds)에 의해 합쳐진 금속 및 비금속 원자, 예를 들어, 이온 결합 및 공유 결합의 혼합물을 포함할 수 있다.
- [0008] 상기 레이저 방사선, 예를 들어, 펄스들(pulses)의 출력 밀도(power density)는 TW/cm^2 의 범위이고, 선택적으로는, $0.1 TW/cm^2$ 내지 $3 TW/cm^2$ 의 범위에 있을 수 있다. 선택적으로는, 출력 밀도는 $0.5 TW/cm^2$ 내지 $1.5 TW/cm^2$ 의 범위에 있을 수 있다.
- [0009] 대안적으로는, 레이저 방사선의, 예를 들어, 펄스들의 출력 밀도는 GW/cm^2 의 범위에 있을 수 있고, 선택적으로는 $0.1 GW/cm^2$ 내지 $3 GW/cm^2$ 의 범위에 있을 수 있다. 선택적으로는, 출력 밀도는 $0.2 GW/cm^2$ 내지 $1 GW/cm^2$ 의 범위에 있을 수 있다.
- [0010] 이러한 TW/cm^2 의 범위 또는 GW/cm^2 의 범위에서의 출력 밀도들을 갖는 레이저 펄스들을 사용함으로써, 원하는 전자 일 함수 성질들(electron work function properties)을 구비하는 표면을 제공하는 주기적인 구조들의 배열이 획득될 수 있다. 예를 들어, 이차 전자 수율(SEY)의 원하는 값 또는 값의 범위를 갖는 표면은 획득될 수 있다.
- [0011] 상기 방법은 상기 표면이 2.5 보다 작고, 선택적으로는 2.0 보다 작고, 선택적으로는 1.6 보다 작거나 같고, 선택적으로는 1.4 보다 작거나 같고, 선택적으로는 0.2 내지 2.0의 범위이고, 선택적으로는 0.5 내지 1.6의 범위이고, 선택적으로는 1.0 내지 1.4의 범위에 있는, SEY의 값을 가지도록 상기 표면의 성질들을 변경시킬 수 있다.
- [0012] 상기 레이저 펄스들은 상기 표면의 재료의 열 완화 시간(thermal relaxation time)보다 더 짧은 지속시간을 가질 수 있다. 대안적으로, 상기 레이저 펄스들은 열 완화 시간보다 더 긴 지속시간을 가질 수 있다. 상기 레이저 펄스들은 표면의 재료의 전자 및 원자 격자가 실질적으로(substantially) 레이저 펄스들의 적용

(application) 전체에 걸쳐 실질적으로 상이한 온도를 갖도록 하는 지속시간을 가질 수 있다. 상기 레이저 펄스들은 상기 표면의 재료가 상기 표면의 상당한 유동 및/또는 용해 없이 제거되거나 증발되거나 기화됨 중 적어도 하나인 지속시간을 가질 수 있다. 상기 레이저 펄스들은 상기 표면의 일부 재료가 상기 표면의 남은 재료의 상당한 유동 및/또는 용해 없이 제거되거나 증발되거나 기화됨 중 적어도 하나인 지속시간을 가질 수 있다.

- [0013] 상기 레이저 펄스들의 펄스 지속시간(pulse duration)은 300 펨토초(femtoseconds)(fs) 내지 1 나노초(nanosecond)(ns)의 범위에 있을 수 있다.
- [0014] 상기 레이저 펄스들의 펄스 지속시간은 1 ns 내지 100 ns의 범위에 있을 수 있다.
- [0015] 상기 표면에서의 주기적인 구조들의 배열은 실질적으로 서로 평행한 주기적인 일련의 피크들 및 트로프들(periodic series of peaks and troughs)을 포함할 수 있으며, 상기 피크들은 실질적으로 상부에서 평평할 수 있고 및/또는 상부에서 둥글(rounded) 수 있고, 및/또는 실질적으로 상부에서 뾰족한 및/또는 날카로운 구역들(regions)을 가질 수 없을 수 있다. 상기 피크들은 실질적으로 톱 햇 모양(top hat shape) 및/또는 끝을 잘라낸 피라미드 모양(truncated pyramidal shape), 예를 들어 횡단면 프로파일(cross-sectional profile)에서 톱 햇 모양 및/또는 끝을 잘라낸 피라미드 모양을 가질 수 있다. 따라서, 예를 들어, 전자 일 함수(electron work function) 및/또는 원하는 전자 트래핑 성질들(electron trapping properties)의 원하는 값들은 획득될 수 있다. 상기 피크들은 종 방향(longitudinal direction)으로 연장될 수 있고 리지들(ridges)로 지칭될 수 있다.
- [0016] 상기 피크들 중 적어도 일부에 대한 상기 피크 내지 트로프 거리(peak to trough distance), 및/또는 평균 또는 중간 피크 내지 트로프 거리(average or median peak to trough distance)는, 1 μm 내지 100 μm 의 범위이고, 선택적으로는 20 μm 내지 80 μm 의 범위이고, 선택적으로는 30 μm 내지 60 μm 의 범위에 있을 수 있다.
- [0017] 상기 주기적인 구조들의 배열은 실질적으로 크로스-해칭(cross-hatching) 없는 피크들 및 트로프들의 실질적으로 평행한 라인들(parallel lines)의 배열(예를 들어, 리지들 및 밸리들(valleys)) 또는 크로스-해칭된 배열(cross-hatched arrangement)을 포함할 수 있다. 상기 주기적인 구조들의 배열은, 예를 들어, 상기 레이저 방사선을 제공하는 레이저 소스(laser source)의 단일 패스(single pass)에 의해 생성될 수 있다.
- [0018] 상기 세라믹 표면은 적어도 하나의 밑에 있는 층(underlying layer)에 있을 수 있고, 상기 레이저 방사선은 밑에 있는 층을 노출하는 방식과 같이 상기 표면의 재료를 실질적으로 이동시키지 않거나 제거하지 않는 것과 같을 수 있다.
- [0019] 독립적으로 제공될 수 있는, 본 발명의 또 다른 측면에서, 세라믹 표면에 레이저로 형성된 주기적인 구조들의 배열을 포함하는 세라믹 레이저 처리된 표면이 제공되며, 적어도 하나의 다음을 포함한다:
- [0020] 상기 주기적인 구조들의 배열은 실질적으로 서로 평행한 주기적인 일련의 피크들 및 트로프들을 포함하고;
- [0021] 상기 주기적인 구조들의 배열은 크로스-해칭된, 주기적인 일련의 피크들 및 트로프들(cross-hatched, periodic series of peaks and troughs)을 포함하고; 및 선택적으로는
- [0022] 상기 피크들은 실질적으로 상부에서 평평(flat)할 수 있고, 및/또는 상부에서 둥글(rounded) 수 있고, 및/또는 실질적으로 상부에서 뾰족한 및/또는 또는 날카로운 구역들(pointed and/or or sharp regions)을 가질 수 없고, 및/또는 상기 피크들은 실질적으로 톱 햇 모양(top hat shape) 및/또는 끝을 잘라낸 피라미드 모양(truncated pyramidal shape), 예를 들어 횡단면 프로파일(cross-sectional profile)에서 톱 햇 모양 및/또는 끝을 잘라낸 피라미드 모양을 가질 수 있고; 및/또는
- [0023] 상기 피크들 중 적어도 일부에 대한 상기 피크 내지 트로프 거리, 및/또는 평균 또는 중간 피크 내지 트로프 거리는, 1 μm 내지 100 μm 의 범위이고, 선택적으로는 20 μm 내지 80 μm 의 범위이고, 선택적으로는 30 μm 내지 60 μm 의 범위에 있을 수 있다.
- [0024] 독립적으로 제공될 수 있는, 본 발명의 또 다른 측면에서, 세라믹 표면의 광전자 수율(PEY) 및/또는 이차 전자 수율(SEY)을 감소시키는 장치가 제공되며, 포함한다:
- [0025] 표면에 펄스화된 레이저 방사선을 적용하는 레이저 소스(laser source); 및
- [0026] 상기 표면에 주기적인 구조들의 배열을 형성하도록 일련의 레이저 펄스들로서 상기 레이저 방사선을 적용하는 상기 레이저 소스를 제어하도록 구성되는 레이저 제어기(laser controller)를 포함한다. 상기 펄스들의 출력 밀도는 TW/cm^2 의 범위 또는 GW/cm^2 의 범위에 있을 수 있다. 상기 펄스들의 출력 밀도는 0.01 TW/cm^2 내지 3

TW/cm^2 의 범위일 수 있다. 상기 펄스들의 출력 밀도는 $0.1 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 내지 $3 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 의 범위일 수 있다.

- [0027] 본 발명의 또 다른 측면에서, 세라믹 표면의 광전자 수율(PEY) 및/또는 이차 전자 수율(SEY)을 감소시키는 방법이 제공되며, 포함한다:
- [0028] 상기 세라믹 표면에 주기적인 구조들의 배열을 생성하도록 상기 표면에 레이저 방사선을 적용하는 단계,
- [0029] 상기 레이저 방사선은 일련의 레이저 펄스들을 포함하는 펄스화된 레이저 방사선을 포함하고, 상기 레이저 펄스들의 펄스 지속시간은 300 fs 내지 1 ns의 범위 또는 1 ns 내지 100 ns의 범위에 있음.
- [0030] 상기 표면은 타겟의 표면일 수 있다.
- [0031] 상기 펄스 지속시간은 1 ps 내지 100 ps의 범위에 있을 수 있다. 상기 펄스 지속시간은 1 ps 내지 50 ps의 범위에 있을 수 있다. 상기 펄스 지속시간은 5 ps 내지 500 ps의 범위에 있을 수 있다.
- [0032] 상기 레이저 방사선은 $5 \mu\text{m}$ 내지 $1000 \mu\text{m}$ 의 범위이거나, 또는 $1 \mu\text{m}$ 내지 $100 \mu\text{m}$ 의 범위에 있는 상기 표면 상의 초점 스팟 직경(focal spot diameter)을 갖는 펄스화된 레이저 빔(pulsed laser beam)을 포함할 수 있다.
- [0033] 상기 펄스화된 방사선은 10 kHz 내지 1 MHz의 범위, 선택적으로는 10 KHz 내지 200 kHz의 범위에 있는 펄스 반복률(pulse repetition rate)을 가질 수 있다.
- [0034] 상기 레이저 방사선의 평균 출력은 3 W 내지 8 W의 범위이거나, 또는 1 W 내지 10 W의 범위에 있을 수 있다. 상기 레이저 방사선의 평균 출력은 0.3 W 내지 2 W의 범위이거나, 또는 1 W 내지 5 W의 범위이거나, 또는 0.1 W 내지 1 W의 범위이거나, 또는 0.1 W 내지 2 W의 범위이거나, 또는 0.3 W 내지 5 W의 범위에 있을 수 있다.
- [0035] 상기 표면에 상기 레이저 방사선을 적용하는 단계는 상기 표면 위로(over) 펄스화된 레이저 빔을 스캐닝하는(scanning) 단계를 포함하고, 상기 스캐닝을 위한 스캔 속도는 1 mm/s 내지 100 mm/s의 범위 또는 10 mm/s 내지 50 mm/s의 범위에 있을 수 있다.
- [0036] 상기 표면 위로 펄스화된 레이저 빔을 스캐닝하는 단계는 2 회와 10 회 사이에서 반복될 수 있거나, 한 번 수행될 수 있다.
- [0037] 상기 표면에 대한 상기 레이저 방사선의 입사각은 0도로부터 30도로의 범위에 있을 수 있다. 상기 표면에 대한 상기 레이저 방사선의 입사각은 90도로부터 60도로의 범위에 있을 수 있다.
- [0038] 상기 방사선의 파장은 100 nm 내지 2,000 nm의 범위에 있을 수 있고, 선택적으로는 355 nm 또는 532 nm 또는 1064 nm일 수 있다.
- [0039] 상기 구조들은 피크들 및 트로프들을 포함할 수 있다. 상기 주기적인 구조들의 배열은 주기적인 일련의 피크들 및 트로프들을 포함할 수 있다. 상기 피크들 및 트로프들은 실질적으로 서로 평행할 수 있다.
- [0040] 상기 주기적인 구조들의 배열은 제1 방향으로 배열된 제1 일련의 피크들 및 트로프들 및, 제2, 상이한 방향으로 배열된 제2 일련의 피크들 및 트로프들을 포함할 수 있다. 제1 및 제2 방향들은 실질적으로 직교할 수 있다. 제1 일련의 피크들 및 트로프들 및 제2 일련의 피크들 및 트로프들은, 주기적인 구조들의 배열이 크로스-해칭된 배열을 포함하도록 교차할 수 있다.
- [0041] 상기 주기적인 배열의 주기(period)는 $0.5 \mu\text{m}$ 내지 $100 \mu\text{m}$ 의 범위에 있을 수 있다. 상기 주기적인 구조의 인접한 피크들(또는 트로프들)의 분리는 $0.5 \mu\text{m}$ 내지 $100 \mu\text{m}$ 의 범위에 있을 수 있다.
- [0042] 상기 크로스-해칭된 배열의 해치 거리(hatch distance)는 $0.5 \mu\text{m}$ 내지 $100 \mu\text{m}$ 의 범위이고, 선택적으로는 $10 \mu\text{m}$ 내지 $100 \mu\text{m}$ 의 범위에 있을 수 있다.
- [0043] 레이저 방사선은 상기 표면에 상기 레이저 방사선을 적용하는 단계에 의하여 추가 구조들(further structures)을 생성하는 것일 수 있다. 상기 추가 구조들은 상기 주기적인 구조들의 배열의 구조들 보다 더 작을 수 있다.
- [0044] 이러한 특징은 특히 중요할 수 있으므로, 독립적으로 제공될 수 있는, 본 발명의 제2 측면에서, 세라믹 표면의 광전자 수율(PEY) 및/또는 이차 전자 수율(SEY)을 감소시키는 방법이 제공되며, 포함한다:
- [0045] 상기 표면 상에 주기적인 구조들의 배열을 생성하도록 상기 표면에 레이저 방사선을 적용하는 단계,
- [0046] 상기 레이저 방사선은 일련의 레이저 펄스들을 포함하는 펄스화된 레이저 방사선을 포함하고, 상기 레이저 방사선은 상기 주기적인 구조들의 배열뿐만 아니라 상기 표면 상에 추가 구조들(further structures)을 생성하는 것

과 같은 것임.

- [0047] 상기 추가 구조들은 추가 주기적인 구조들(further periodic structures)을 포함할 수 있다. 상기 추가 구조들은 리플들(ripples)을 포함할 수 있다. 상기 추가 구조들은 나노-리플들(nano-ripples)을 포함할 수 있다. 상기 추가 구조들은 추가 주기적인 구조들일 수 있다. 상기 추가 구조들은, 예를 들어 레이저 파장의 범위에서 주기성(periodicity)을 갖는, 레이저 유도된 주기적 표면 구조들(laser induced periodic surface structures)(LIPPS)을 포함할 수 있다. 상기 추가 구조들은 10 nm 내지 1 μ m의 범위에서, 선택적으로는 100 nm 내지 1 μ m의 범위에서 주기성을 가질 수 있다.
- [0048] 상기 추가 구조들은 상기 주기적인 구조들의 어레이(periodic array of structures)의 적어도 일부를 커버할 (cover) 수 있다. 상기 추가 구조들은 상기 주기적인 구조들의 배열의 트로프들 및/또는 피크들에 형성될 수 있다.
- [0049] 세라믹 표면 및/또는 타겟은 알루미늄을 포함할 수 있다. 예를 들어, > 99.5 %의 순수 알루미늄 산화물이 가속 기 빔 전달의 키퍼(인젝션 키퍼 시스템((Injection Kicker Systems)))에 사용된다.
- [0050] 세라믹 표면 및/또는 타겟은 임의의 적합한 자기, 전도성 또는 유전체 세라믹 재료를 포함할 수 있다.
- [0051] 표면 및/또는 타겟은 스피넬 구조(spinel structure)를 갖는 세라믹 재료를 포함할 수 있으며, 예를 들어 스피넬 구조는 M이 공유 결합 양이온(covalent cation)인 화학식 $M(Fe_2O_4)$ 를 갖는다. M은 망간(manganese)(Mn^{2+}), 니켈(nickel)(Ni^{2+}), 코발트(cobalt)(Co^{2+}), 아연(zinc)(Zn^{2+}), 구리(copper)(Cu^{2+}), 마그네슘(magnesium)(Mg^{2+}) 그룹으로부터 선택되는 공유 결합 양이온일 수 있다. 대안적으로, M은, 예를 들어 양 전하의 부재가 추가 3가 철 양이온들(trivalent iron cations)(Fe^{3+})에 의해 보상될 수 있는 경우에, 예를 들어 리튬(Li^+) 또는 공공(vacancy) 또는 공공들(vacancies)과 같은 1가 양이온(monovalent cation)을 나타낼 수 있다.
- [0052] 표면 및/또는 타겟은 페라이트 재료(ferrite material), 예를 들어 육방정 페라이트 재료(hexagonal ferrite material)를 포함할 수 있으며, 예를 들어 재료는 구조 $M(Fe_{12}O_{19})$ 을 가질 수 있다. M은 바륨(barium)(Ba), 스트론튬(strontium)(Sr), 납(lead)(Pb) 그룹으로부터 선택될 수 있다.
- [0053] 표면 및/또는 타겟은, 예를 들어 실리케이트 미네랄 가넷(silicate mineral garnet)의 구조를 갖고, 예를 들어 M이 이트륨(yttrium) 또는 희토류 이온(rare earth ion)일 수 있는 화학식 $M_3(Fe_5O_{12})$ 을 갖는, 가넷 페라이트 재료(garnet ferrite material)를 포함할 수 있다.
- [0054] 표면 및/또는 타겟은 두꺼운 또는 얇은 필름 레지스터(thick- or thin-film resistor) 또는 전극(electrode) 또는 커패시터(capacitor) 또는 그러한 두꺼운 또는 얇은 필름 레지스터 또는 전극 또는 커패시터로서 또는 그 일부로서 사용하기에 적합한 재료를 포함할 수 있다. 표면 및/또는 타겟은 금속 산화물 재료(metal oxide material), 예를 들어, 산화 납(lead oxide)(PbO), 이산화 루테튬(ruthenium dioxide)(RuO_2), 루테튬산 비스무트(bismuth ruthenate)($Bi_2Ru_2O_7$) 그룹으로부터 선택된 재료를 포함할 수 있다. 표면 및/또는 타겟은 중첩하는 에너지 밴드들(overlapping energy bands)을 갖는 세라믹 재료를 포함할 수 있다.
- [0055] 표면 및/또는 타겟은 세라믹 전도체(ceramic conductor)를 포함할 수 있다. 예를 들어, 표면 및/또는 타겟은 산화 인듐(indium oxid)(In_2O_3) 및/또는 산화 주석(tin oxide)(SnO_2) 또는 인듐 주석 산화물(indium tin oxide)(ITO)을 포함할 수 있다.
- [0056] 표면 및/또는 타겟은 가열 요소(heating element) 또는 이러한 가열 요소로서 또는 그 일부로서 사용하기에 적합한 재료를 포함할 수 있다. 표면 및/또는 타겟은 실리콘 카바이드(silicon carbide)(SiC), 이규화 몰리브덴(molybdenum disilicide)($MoSi_2$), 란타늄 크로마이트(lanthanum chromite)($LaCr_2O_4$), 지르코니아(zirconia)(ZrO_2) 그룹으로부터 선택된 재료를 포함할 수 있다.
- [0057] 표면 및/또는 타겟은 서미스터(thermistor) 또는 이러한 서미스터로서 또는 그 일부로서 우리에게 적합한 재료를 포함할 수 있다. 표면 및/또는 타겟은 철 스피넬 재료(iron spinel material), 코발트 스피넬 재료(cobalt spinel material) 및 망간 스피넬 재료(manganese spinel material)로 구성된 그룹으로부터 선택된 재료를 포함할 수 있다.

- [0058] 표면 및/또는 타겟은 초전도체 재료(superconductor material), 예를 들어 이트륨-바륨-구리 산화물(yttrium barium copper oxide)($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$), 비스무트-스트론튬-칼슘-구리 산화물 재료(bismuth-strontium-calcium-copper oxide material)(예를 들어, $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_6$, $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ 또는 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$), 탈륨-바륨-칼슘-구리 산화물 재료(thallium-barium-calcium-copper oxide material)(예를 들어, $\text{Ti}_2\text{Ba}_2\text{CuO}_6$, $\text{Ti}_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$, $\text{Ti}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ 또는 $\text{TiBa}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_{11}$) 또는 수은-바륨-칼슘-구리 산화물 재료(mercury-barium-calcium-copper oxide material)(예를 들어, $\text{HgBa}_2\text{CuO}_4$, $\text{HgBa}_2\text{CaCu}_2\text{O}_6$, 또는 $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$)를 포함할 수 있다.
- [0059] 표면 및/또는 타겟은 페로브스카이트 재료(perovskite material)를 포함할 수 있다. 표면 및/또는 타겟은 티탄산 바륨(barium titanate)(BaTiO_3) 또는 비 화학량론 납(non-stoichiometric lead), 스트론튬(strontium) 또는 칼슘 치환(calcium substitutions)을 포함하는 티탄산 바륨을 포함할 수 있다.
- [0060] 표면은, 예를 들어 알루미늄 및 적어도 하나의 다른 재료를 포함하는 적층 된 타겟(laminated target)과 같은 적층 구조(laminated structure)의 일부를 형성할 수 있다.
- [0061] 레이저 방사선의 평균 또는 피크 플루언스(average or peak fluence) 또는 다른 성질은 박리 임계값(ablation threshold) 이상, 및/또는 표면의 열 임계값의 범위 및/또는 박리 임계값의 105 %, 선택적으로는 102 %, 선택적으로는 101 % 내에 있을 수 있다.
- [0062] 상기 펄스들은 각 펄스에 대해 플라즈마(plasma)가 상기 표면에 형성되도록 할 수 있다. 상기 플라즈마는 표면의 하부 재료(underlying material)와 실질적으로 동일한 밀도를 가질 수 있다.
- [0063] 상기 표면은, 입자 가속기(particle accelerator), 인젝션 키커 시스템(injection kicker system), 빔라인(beamline), 알.에프. 도파관과 같은 도파관(waveguide for example an r.f. waveguide), 검출기(detector), 검출기 장치(detector apparatus), 또는 우주선(spacecraft)의 일부를 형성할 수 있다.
- [0064] 상기 표면은 진공 챔버(vacuum chamber)의 표면을 포함하거나 그 일부를 형성할 수 있다.
- [0065] 상기 표면은 장치의 구성 요소의 표면을 포함할 수 있다. 상기 장치는 다음으로부터 선택될 수 있다: 입자 가속기, 빔 키커 마그네트(구성 요소는, 예를 들어 세라믹 플레이트 커패시터(ceramic plate capacitor) 또는 세라믹 라이너 파이프(ceramic liner pipe)를 포함할 수 있음), 빔라인, 예를 들어 알.에프. 도파관과 같은 도파관, 검출기, 검출 장치, 우주선. 상기 방법은 상기 표면 상에 상기 주기적인 구조들의 배열을 생성하도록 상기 표면에 상기 레이저 방사선을 적용하고, 상기 장치에 상기 구성 요소를 설치하는 단계를 포함하거나, 또는 상기 방법은 상기 장치에서 원래(in situ) 상기 구성 요소를 가진 상기 표면에 상기 레이저 방사선을 적용하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0066] 상기 방법은 고체-상태 벌크 레이저(solid-state bulk laser)를 사용하여 상기 방사선을 적용하는 단계를 포함할 수 있고, 선택적으로 상기 고체 상태 레이저는 Nd:YVO₄ 또는 Nd:YAG 또는 Yb:KYW 또는 Yb:KGW 레이저, 또는 펄스화된 섬유 레이저(pulsed fibre laser), 선택적으로는 Yb, Tm 또는 Nd - 도핑된 펄스화된 고체-상태 섬유 레이저(Yb, Tm or Nd - doped pulsed solid-state fibre laser)를 포함한다.
- [0067] 상기 방법은 상기 레이저 방사선을 적용하는 단계 후에, 상기 표면의 적어도 일부에 금속 층(metal layer)을 형성하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0068] 상기 방법은 상기 금속 층으로 상기 주기적인 구조들을 실질적으로 커버하는 단계를 포함할 수 있다. 상기 금속 층은, 예를 들어, 코팅 공정(coating process)과 같은, 임의의 적합한 공정을 사용하여 형성될 수 있다.
- [0069] 상기 금속 층은 금 또는 임의의 다른 적합한 금속, 예를 들어 은, 구리 또는 알루미늄을 포함할 수 있다. 상기 금속 층은 원소 금속(elemental metal), 예를 들면, 원소 금, 은, 구리 또는 알루미늄을 포함할 수 있거나, 금속 합금(metal alloy) 또는 금속 화합물(metallic compound)을 포함할 수 있다.
- [0070] 상기 금속 층은 0.1 nm 내지 100 nm, 선택적으로는 1 nm 내지 50 nm, 선택적으로는 1 nm 내지 20 nm의 범위의 두께를 가질 수 있다. 상기 금속 층은 실질적으로 일정한 두께를 가질 수 있다. 상기 금속 층은, 예를 들어 표면이 금속 층의 형성 전에 실질적으로 동일한 단면 프로파일(cross-sectional profile)을 갖도록 유지하기 위해, 표면의 형태(morphology)를 유지하는 두께를 가질 수 있다. 예를 들어, 상기 금속 층은 금속 층의 형성 전에 표면에서의 레이저-형성된 트로프들 및 피크들(laser-formed troughs and peaks)의 실질적으로 동일한 분포를 유지하기 위한, 및/또는 예를 들어 트로프들 및/또는 피크들 또는 다른 레이저-형성된 표면 특징들과 같은,

표면 특징들(surface features) 사이의 갭들(gaps)을 완전히 채우지 않기 위한, 두께를 가질 수 있다.

- [0071] 상기 방법은 레이저 방사선을 적용하는 단계 후에, 상기 표면을 탈지(degreasing), 클리닝(cleaning) 또는 스무딩(smoothing)하는 단계 중 적어도 하나의 단계, 및/또는 상기 레이저 방사선을 적용하는 단계 후에, 상기 표면에 대해 표면 탄소 저감 공정(surface carbon reduction process)을 수행하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0072] 독립적으로 제공될 수 있는, 본 발명의 다른 측면에서, 세라믹 표면의 광전자 수율(PEY) 및/또는 이차 전자 수율(SEY)을 감소시키는 장치가 제공되며, 포함한다:
- [0073] 표면에 펄스화된 레이저 방사선을 적용하는 레이저 소스; 및
- [0074] 상기 표면 상에 주기적인 구조들의 배열을 생성하도록, 200 펨토초(fs) 내지 1000 ps의 범위에서의 펄스 지속시간을 가지는 일련의 레이저 펄스들로서 상기 레이저 방사선을 적용하는 상기 레이저 소스를 제어하도록 구성되는 레이저 제어기.
- [0075] 독립적으로 제공될 수 있는, 본 발명의 다른 측면에서, 세라믹 표면의 광전자 수율(PEY) 및/또는 이차 전자 수율(SEY)을 감소시키는 장치가 제공되며, 포함한다:
- [0076] 표면에 펄스화된 레이저 방사선을 적용하고 임의의 다른 측면에 따른 방법을 수행하도록 작동하기 위하여 작동하도록 구성되는 레이저 소스.
- [0077] 독립적으로 제공될 수 있는, 본 발명의 다른 측면에서, 임의의 다른 측면에 따른 방법을 사용하여 형성되는 상기 표면 상에 주기적인 구조들의 배열을 포함하는 레이저 처리된 세라믹 표면(laser treated ceramic surface)이 제공된다.
- [0078] 상기 표면은 구조들 및/또는 표면의 주기적인 배열의 적어도 일부, 선택적으로 실질적으로 모두를 커버하는 금속 층을 더 포함할 수 있다. 따라서, 세라믹 표면의 외부 부분(outer part)의 적어도 일부 선택적으로 모두는 금속을 포함할 수 있다.
- [0079] 독립적으로 제공될 수 있는, 본 발명의 다른 측면에서, 상기 세라믹 표면 상에 레이저-형성된 주기적 구조들의 배열 및 상기 세라믹 표면 상에 추가 레이저-형성된 구조들을 포함하는 레이저 처리된 세라믹 표면이 제공된다.
- [0080] 상기 추가 구조들은 추가 주기적인 구조들을 포함할 수 있다. 상기 추가 구조들은 리플들을 포함할 수 있다. 상기 추가 구조들은 나노-리플들을 포함할 수 있다. 상기 추가 구조들은 추가 주기적인 구조들일 수 있다. 상기 추가 구조들은 레이저 유도된 주기적 표면 구조들(LIPPS)을 포함할 수 있다. 상기 추가 구조들은 10 nm 내지 1 μm 의 범위에서의, 선택적으로는 100 nm 내지 1 μm 의 범위에서의 주기성을 가질 수 있다.
- [0081] 상기 구조들은 피크들 및 트로프들을 포함할 수 있다. 상기 주기적인 구조들의 배열은 주기적인 일련의 피크들 및 트로프들을 포함할 수 있다. 상기 피크들 및 트로프들은 실질적으로 서로 평행할 수 있다.
- [0082] 상기 주기적인 구조들의 배열은 제1 방향으로 배열된 제1 일련의 피크들 및 트로프들 및, 제2, 상이한 방향으로 배열된 제2 일련의 피크들 및 트로프들을 포함할 수 있다. 제1 및 제2 방향들은 실질적으로 직교할 수 있다. 제1 일련의 피크들 및 트로프들 및 제2 일련의 피크들 및 트로프들은, 주기적인 구조들의 배열이 크로스-해칭된 배열을 포함하도록 교차할 수 있다.
- [0083] 상기 주기적인 배열의 주기는 0.5 μm 내지 100 μm 의 범위에 있을 수 있다. 상기 주기적인 구조의 인접한 피크들(또는 트로프들)의 분리는 0.5 μm 내지 100 μm 의 범위에 있을 수 있다. 상기 크로스-해칭된 배열의 해치 거리는 0.5 μm 내지 100 μm 의 범위에 있을 수 있다.
- [0084] 상기 추가 구조들은 추가 주기적인 구조들을 포함할 수 있다. 상기 추가 구조들은 리플들을 포함할 수 있다. 상기 추가 구조들은 나노-리플들을 포함할 수 있다. 상기 추가 구조들은 추가 주기적인 구조들일 수 있다. 상기 추가 구조들은 레이저 유도된 주기적 표면 구조들(LIPPS)을 포함할 수 있다. 상기 추가 구조들은 10 nm 내지 1 μm 의 범위에, 선택적으로는 100 nm 내지 1 μm 의 범위에서 주기성을 가질 수 있다.
- [0085] 상기 추가 구조들은 상기 주기적인 구조들의 어레이의 적어도 일부분을 커버할 수 있다. 상기 추가 구조들은 상기 주기적인 구조들의 배열의 트로프들에 형성될 수 있다.
- [0086] 표면은 알루미늄을 포함할 수 있다. 표면은, 예를 들어 알루미늄 또는 적어도 하나의 다른 재료를 포함하는 적층된 타겟(laminated target)과 같은 적층 구조(laminated structure)의 일부를 형성할 수 있다.
- [0087] 독립적으로 제공될 수 있는, 본 발명의 다른 측면에서, 광-열 인터랙션(photo-thermal interaction) 및/또는 광

-박리 인터랙션(photo-ablation interaction)에 의해 표면을 변형시키기(modify) 위해 레이저 방사선을 표면에 적용함으로써 세라믹 표면을 변형시키는 방법이 제공된다.

- [0088] 독립적으로 제공될 수 있는, 본 발명의 또 다른 측면에서, 레이저 방사선을 표면에 적용함으로써 획득되는 광-열 인터랙션 및/또는 광-박리 인터랙션에 의해 변형된 세라믹 표면이 제공된다.
- [0089] 독립적으로 제공될 수 있는, 본 발명의 다른 측면에서, 다른 측면들 중 어느 하나에 따라 또는 다른 측면들 중 어느 하나에 따라 형성된 세라믹 표면을 가지는 구성 요소를 포함하는, 입자 가속기, 인젝션 키커 시스템, 빔 키커 마그네트, 빔라인, 도파관, 검출기, 우주선, 또는 진공 챔버가 제공된다.
- [0090] 본 발명의 다른 측면에서, 본 명세서에 도시된 및/또는 설명된 바와 같이, 방법, 표면, 표면을 포함하는 구조, 장치, 구성 요소, 입자 가속기, 인젝션 키커 시스템, 빔 키커 마그네트, 빔라인, 도파관, 검출기, 우주선, 또는 진공 챔버가 제공된다.
- [0091] 본 발명의 임의의 하나 이상의 측면들에서의 임의의 특징은 임의의 적절한 조합으로 본 발명의 임의의 다른 하나 이상의 측면들에 적용될 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0092] 본 발명의 실시예들은 첨부된 도면들을 참조하여 이하에서 더 설명된다:
- 도 1은, 예를 들어 광전자 수율(PEY) 및/또는 이차 광전자 수율(SEY)을 감소시키기 위해, 광전자 방사(PEE) 및/또는 이차 전자 방사(SEE) 이펙트들을 감소시키기 위해 표면의 레이저 처리에 사용되는 시스템의 개략도이다;
- 도 2는 일 실시예에 따른 샘플에 대한 1차 전자 에너지의 함수로서의 SEY의 플롯이다;
- 도 3은 도 2의 샘플의 반대쪽에 대한 1차 전자 에너지의 함수로서의 SEY의 플롯이다;
- 도 4 내지 도 9는 다른 실시예들에 따른 샘플들에 대한 1차 전자 에너지의 함수로서의 SEY의 플롯이다;
- 도 10a 내지 도 10c는 실시예들에 따른 샘플들의 표면들의 스캐닝 전자 현미경(SEM; scanning electron microscope) 이미지들이다;
- 도 11a 내지 도 11j는 다른 실시예들에 따른 샘플들의 표면들의 SEM 이미지들이다;
- 도 12는 샘플들에 대한 총 반사율, 총 투과율 및 흡수율을 나타내는 그래프이다;
- 도 13은 다른 실시예들에 따른 샘플에 대한 1차 전자 에너지의 함수로서의 SEY의 플롯이다;
- 도 14는 도 13의 샘플에 대한 1차 전자 에너지의 함수로서의 SEY의 플롯이며, 샘플의 공기에 대한 컨디셔닝(conditioning) 및 노출 후의 데이터를 포함한다;
- 도 15a 및 15b는 실시예들에 따른 샘플들의 표면들의 SEM 이미지들이다;
- 도 16a 내지 도 16n은 다른 실시예들에 따른 샘플들의 표면들의 SEM 이미지들이다;
- 도 17a 및 도 17b는 광-열 인터랙션(PTI; photo-thermal interaction) 및 광-박리 인터랙션(PAI; photo-ablation interaction) 메커니즘들의 개략도이다;
- 도 18은 금의 층(layer of gold)으로 코팅하기 전과 후에 알루미늄 세라믹 샘플들에 대한 1차 에너지의 함수로서의 측정 SEY의 플롯이다; 및
- 도 19 및 도 20은 도 18의 대상(subject)인 샘플들의 표면들의 SEM 이미지들이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0093] 도 1은, 광전자 수율(PEY) 및/또는 이차 전자 수율(SEY)을 감소시키기 위해, 광전자 방사(PEE) 및/또는 이차 전자 방출(SEE) 이펙트들을 감소시키기 위해 표면의 레이저 처리에 사용되는 시스템을 도시한다.
- [0094] 도 1의 시스템(2)은 원하는 특성들의 펄스화된 레이저 방사선 빔을 방사하는 레이저(4)의 작동을 제어하는데 사용되는 레이저 제어기(6)에 연결된 레이저(4)를 포함한다. 레이저(4)는 타겟(target)(8)에 맞추어 조정되어, 레이저 제어기(6)의 제어 하에 레이저(4)의 작동이 타겟의 표면 상에 주기적인 구조들을 형성한다.
- [0095] 실시예들에서, 레이저는 펄스화된 Nd:YVO₄ 또는 Nd:YAG 또는 Yb:KYW 또는 Yb:KGW 고체-상태 벌크 레이저

(solid-state bulk laser), 또는 펄스화된 섬유 레이저(pulsed fibre laser), 선택적으로는 Yb, Tm 또는 Nd - 도핑된 펄스화된 고체-상태 섬유 레이저(Yb, Tm or Nd - doped pulsed solid-state fibre laser) 중 하나일 수 있다. 임의의 다른 적절한 레이저가 대안적 실시예들에서 사용될 수 있다. 도 1의 실시예에서, 펄스화된 레이저 방사선의 파장은 532 nm이지만, 임의의 다른 적절한 파장, 예를 들어 1064 nm 또는 355 nm가 다른 실시예들에서 사용될 수 있다.

[0096] 제어기는 전용 제어기, 또는 적절히 프로그래밍된 컴퓨터를 포함할 수 있다. 제어기는 소프트웨어, 하드웨어 또는 하드웨어와 소프트웨어의 임의의 적절한 조합으로 구현될 수 있다. 일부 실시예들에서, 제어기는 더 많은 ASIC들(응용 주문형 집적 회로들(application specific integrated circuits)) 또는 FPGA들(필드 프로그램가능 게이트 어레이들(field programmable gate arrays)) 또는 다른 적절한 회로를 포함할 수 있다.

[0097] 도 1의 실시예에서, 타겟(8) 및 레이저(4)는 공기 중에서(in air) 위치되고 표면의 레이저 처리는 공기 중에서 수행된다. 타겟(8) 및 레이저(4)는 관련된 펌프(pump) 및/또는 가스 공급원을 갖는 밀봉 가능 및/또는 펌핑 가능한 챔버(sealable and/or pumpable chamber)(10)에 위치될 수 있으며, 표면의 레이저 가공(laser processing)은, 예를 들어 선택된 반응성 가스 또는 불활성 가스(inert gas)의 존재에서, 진공 또는 원하는 가스 조건들(gaseous conditions)에서 수행될 수 있다. 일부 실시예들에서 챔버(8)는 생략된다.

[0098] 도 1의 실시예에서, 타겟은, 알루미늄, 예를 들어 99.5 % 또는 99.5 % 보다 더 큰 순수 알루미늄을 포함하는 세라믹 타겟이다. 다른 실시예들에서는 다른 세라믹 타겟들이 사용될 수 있다. 예를 들어, 타겟은 임의의 적합한 자기, 전도성 또는 유전체 세라믹 재료를 포함할 수 있다.

[0099] 예를 들어, 타겟은 스피넬 구조를 갖는 세라믹 재료를 포함할 수 있으며, 예를 들어 스피넬 구조는 M이 공유 결합 양이온(covalent cation)인 화학식 $M(Fe_2O_4)$ 를 갖는다. M은 망간(Mn^{2+}), 니켈(Ni^{2+}), 코발트(Co^{2+}), 아연(Zn^{2+}), 구리(Cu^{2+}), 마그네슘(Mg^{2+}) 그룹으로부터 선택되는 공유 결합 양이온일 수 있다. 대안적으로, M은, 예를 들어 양 전하의 부재가 추가 3가 철 양이온들(Fe^{3+})에 의해 보상될 수 있는 경우에, 예를 들어 리튬(Li^+) 또는 공공 또는 공공들과 같은 1가 양이온을 나타낼 수 있다.

[0100] 대안적으로, 일부 실시예에서, 세라믹 타겟은 페라이트 재료, 예를 들어 육방정 페라이트 재료를 포함할 수 있으며, 예를 들어 재료는 구조 $M(Fe_{12}O_{19})$ 을 가질 수 있다. M은 바륨(Ba), 스트론튬(Sr), 납(Pb) 그룹으로부터 선택될 수 있다.

[0101] 다른 실시예들에서, 세라믹 타겟은, 예를 들어 실리케이트 미네랄 가넷의 구조를 갖고, 예를 들어 M이 이트륨 또는 희토류 이온일 수 있는 화학식 $M_3(Fe_5O_{12})$ 을 갖는, 가넷 페라이트 재료를 포함할 수 있다.

[0102] 일부 실시예들에서, 세라믹 타겟은 두꺼운 또는 얇은 필름 레지스터 또는 전극 또는 커패시터 또는 그러한 두꺼운 또는 얇은 필름 레지스터 또는 전극 또는 커패시터로서 또는 그 일부로서 사용하기에 적합한 재료를 포함할 수 있다. 실시예들에서, 세라믹 타겟은 금속 산화물 재료, 예를 들어, 산화 납(PbO), 이산화 루테튬(RuO_2), 루테튬산 비스무트($Bi_2Ru_2O_7$) 그룹으로부터 선택된 재료를 포함할 수 있다. 세라믹 타겟은 중첩하는 에너지 밴드들을 갖는 세라믹 재료를 포함할 수 있다.

[0103] 다른 실시예들에서, 타겟은 세라믹 전도체를 포함할 수 있다. 예를 들어, 타겟은 산화 인듐(In_2O_3) 및/또는 산화 주석(SnO_2) 또는 인듐 주석 산화물(ITO)을 포함할 수 있다.

[0104] 실시예들에서, 세라믹 타겟은 가열 요소 또는 이러한 가열 요소로서 또는 그 일부로서 사용하기에 적합한 재료를 포함할 수 있다. 실시예들에서, 타겟은 실리콘 카바이드(SiC), 이규화 몰리브덴($MoSi_2$), 란타넘 크로마이트($LaCr_2O_4$), 지르코니아(ZrO_2) 그룹으로부터 선택된 재료를 포함할 수 있다.

[0105] 실시예들에서, 세라믹 타겟은 서미스터 또는 이러한 서미스터로서 또는 그 일부로서 우리에게 적합한 재료를 포함할 수 있다. 실시예들에서, 타겟은 철 스피넬 재료, 코발트 스피넬 재료 및 망간 스피넬 재료로 구성된 그룹으로부터 선택된 재료를 포함할 수 있다.

[0106] 실시예들에서, 세라믹 타겟은 초전도체 재료, 예를 들어 이트륨 바륨 구리 산화물($YBa_2Cu_3O_7$), 비스무트-스트론튬-갈륨-구리 산화물 재료(예를 들어, $Bi_2Sr_2CuO_6$, $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$ 또는 $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$), 탈륨-바륨-갈륨-구리 산

화물 재료(예를 들어, $Ti_2Ba_2CuO_6$, $Tl_2Ba_2CaCu_2O_8$, $Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$ 또는 $TlBa_2Ca_3Cu_4O_{11}$) 또는 수은-바륨-칼슘-구리 산화물 재료(예를 들어, $HgBa_2CuO_4$, $HgBa_2CaCu_2O_6$, 또는 $HgBa_2Ca_2Cu_3O_8$)를 포함할 수 있다.

[0107] 실시예들에서, 타겟은 페로브스카이트 재료를 포함할 수 있다. 실시예들에서, 타겟은 티탄산 바륨($BaTiO_3$) 또는 비 화학량론 납, 스트론튬 또는 칼슘 치환을 포함하는 티탄산 바륨을 포함할 수 있다.

[0108] 작동에서, 원하는 특성들의 펄스화된 레이저 방사선은 레이저 제어기(6)의 제어 하에 레이저(4)에 의해 타겟(8)의 표면을 가로 질러 스캐닝되어 표면 상에 주기적인 구조들의 배열을 생성한다. 예를 들어, 평행한 행들(rows)로 배열된 트로프들(troughs) 및 피크들(peaks)을 형성하기 위하여, 레이저 빔은 표면을 가로 질러 평행하고, 이격된 경로들을 따라 스캐닝되어 피크들에 의해 분리된 평행한 트로프들을 형성할 수 있다. 임의의 다른 적절한 구조들의 배열은 표면 위로 레이저 빔의 적절한 스캐닝에 의해 형성될 수 있다.

[0109] 레이저의 작동 파라미터들 및 이러한 파라미터들 링크하는(linking) 특정 방정식들은 다음과 같이 나타낼 수 있다,

[0110] 파장 (λ) [m]

[0111] 레이저의 반복률(Repetition rate of the laser) (γ) [Hz]

[0112] 레이저의 펄스 길이(Pulse length of the laser) (τ) [s]

[0113] 레이저의 평균 출력(Average power of the laser) (P_{avg}) [W] - 하나의 주기 t에 걸친 에너지 흐름을 나타냄

[0114] 펄스 당 에너지(Energy per pulse) (E_p) [J]

[0115] 레이저의 플루언스(Fluence of the laser) (F) [J/cm^2]

[0116] 타겟 상의 빔 스팟 반경(Beam spot radius on the target) (r) [m]

[0117] 타겟 상의 빔 스팟 영역(Beam spot area on the target) ($A=\pi r^2$) [m^2]

[0118] 타겟의 표면이 레이저 빔에 의해 스캐닝된 횟수 (N) 무차원

[0119] 타겟의 표면이 레이저 빔에 의해 스캐닝된 속도 (V) [m/s]

[0120] 타겟의 표면 상의 각 스팟 당 발생하는 펄스의 수 (n) [무차원]

[0121] 펄스들 사이의 시간 간격 - 한 주기 (t) [s]

[0122] 피크 출력(Peak Power) (P_{peak}) [W] - 단일 펄스 내 에너지 흐름 정의

[0123] 출력 밀도(Power density) 또는 강도(Intensity) (I) [W/cm^2]

[0124] 주요 방정식들

$$t = \frac{1}{\gamma}$$

[0125]

$$n = \frac{(2r)\gamma}{V}$$

[0126]

$$E_p = \frac{P_{avg}}{\gamma}$$

[0127]

$$F = \frac{E_{pulse}}{A}$$

$$P_{peak} = \frac{E_{pulse}}{\tau}$$

$$I = \frac{P_{peak}}{A}$$

예를 들어, 원하는 펄스들의 출력 밀도와 같은, 원하는 성질들의 펄스화된 레이저 방사선을 획득하기 위해, 적절한 작동 파라미터들은, 예를 들어, 상기 방정식들 및 표현들에 기초하여 선택될 수 있다.

표 1은 알루미늄의 다양한 샘플들의 표면 상에 원하는 주기적인 구조들의 배열을 생성하기 위한 도 1의 장치의 레이저의 작동 파라미터들을 제공한다. 표면의 레이저 가공은 표 1의 PSCA에 대한 아르곤 대기(argon atmosphere)에서 그리고 모든 다른 샘플들에 대해 공기 중에서 수행되었다.

표 1

샘플 이름	PSCA	PS2L1R	PS2C1R	PS2L2R	PS2C2R	PS4L1R	PS1C1R
파장(nm)	532	532	532	532	532	532	532
T	10 ps	10 ps	10 ps	10 ps	10 ps	10 ps	10 ps
반복률(kHz)	200	200	200	200	200	200	200
출력(W)	2	2	2	2	2	4	1
레이저 초점 스팟 직경(μm)	12	12	12	12	12	12	12
펄스 에너지 (μJ)	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	20.00	5.00
플루언스(J/cm ²)	8.84	8.84	8.84	8.84	8.84	17.68	4.42
구조 (크로스/라인)	크로스	라인	크로스	라인	크로스	라인	크로스
해치 거리(μm)	24	24	24	24	24	24	24
스캔 속도(mm/s)	6	6	6	6	6	6	6
패스들	1	1	1	2	2	1	1
패스 당 스팟 당 펄스들	400	400	400	400	400	400	400
레이저-가공된 영역의 폭(mm)	14	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2
레이저-가공된 영역의 길이(mm)	14	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2
가공 시간(분)	45.37	26.74	53.48	53.48	106.96	26.74	53.48

[0133]

[0134]

표 1의 샘플들은 3 mm의 두께를 가지며, 샘플들의 레이저 가공 면적(laser processed areas)은 14 mm X 14 mm(샘플 PSCA의 경우) 또는 15.2 mm X 15.2 mm(다른 샘플들의 경우)였다. 각각의 샘플들은 순도 99.7 % 보다 더 큰 산화 알루미늄(알루미나)이었으며, 이는 특정 입자 가속기 애플리케이션들에 사용된 등급(grade)이다.

[0135]

표 1의 각각의 샘플들의 이차 전자 수율(SEY)은 샘플들에서의 3 개 또는 4 개의 상이한 스팟들에서 상이한 1차 전자 에너지들(primary electron energies)에 대해 측정되었다. 충전 이펙트(charging effects)를 회피하기 위해, 표면들은 각 측정 포인트(measurement point) 사이에 저에너지 전자들(low energy electrons)(36eV)로 충격을 받았다(bombarded). 하나의 데이터 포인트를 측정하기 위한 최대 적용 투여량(maximum applied dose)은 약 1×10^{-12} C였다. 따라서, 하나의 스펙트럼을 측정하기 위한 총 투여량은 약 1×10^{-11} C였다.

[0136]

도 2는 레이저 처리된 표면에서의 3 개의 상이한 스팟들에서 샘플 PSCA에 대한 1차 전자 에너지의 함수로서 SEY의 플롯이다. 도 3은 비교 목적을 위해, 레이저 처리되지 않은 샘플의 반대쪽(reverse side)에 있는 3 개의 상이한 스팟들에서 샘플 PSCA에 대한 1차 전자 에너지의 함수로서 SEY의 플롯이다.

[0137]

PSCA 샘플의 표면의 레이저 처리는 약 8 내지 9로부터(처리되지 않은 반대 표면에 대해) 레이저 처리된 표면에

대해 약 2.2로 SEY를 감소시키는 것을 볼 수 있다.

[0138] 도 4 내지 도 9는 샘플 PS1C1R, PS2C1R, PS2C2R, PS2L1R, PS2L2R 및 PS4L1R 각각에 대한 1차 전자 에너지의 함수로서 SEY의 플롯이다.

[0139] 표 1의 다양한 샘플들에 대한 근사 최대 SEY 값들은 아래 표 2에 요약되어 있다.

표 2

샘플	레이저-처리된 표면에 대해 획득된 최대 SEY 값
PSCA	2.2
PS1C1R	2.2
PS2C1R	1.6
PS2C2R	1.7 (특이치 1.9)
PS2L1R	1.9
PS2L2R	2.2
PS4L1R	2.5

[0140]

[0141] 표 1의 샘플들의 스캐닝 전자 현미경(SEM) 이미지들은 획득되었고, 샘플들의 표면들의 레이저 처리에 의해 형성된 구조들을 보여준다.

[0142] 도 10a는 샘플 PSCA의 레이저 처리된 표면의 SEM 이미지이다.

[0143] 도 10b는 PS2L1R 샘플(상단 왼쪽 이미지), PS2L2R 샘플(하단 왼쪽 이미지), PS2C1R 샘플(상단 오른쪽 이미지) 및 PS2C2R 샘플(하단 오른쪽 이미지)의 레이저 처리된 표면들의 SEM 이미지들을 도시한다.

[0144] 도 10c는 PS4L1R 샘플(오른쪽 이미지) 및 PS1C1R 샘플(왼쪽 이미지)의 레이저 처리된 표면들의 SEM 이미지들을 도시한다.

[0145] 도 11a 내지 도 11e는 레이저 빔의 출력 밀도가 각각 0.74 TW/cm^2 , 0.88 TW/cm^2 , 0.95 TW/cm^2 , 2 TW/cm^2 , 1.3 TW/cm^2 이었고, 샘플은 아르곤 대기에서 레이저 처리되었던, 레이저 처리된 표면들의 SEM 이미지들이다. 도 11f 내지 도 11j는 레이저 빔의 출력 밀도가 각각 0.3 TW/cm^2 , 0.4 TW/cm^2 , 2 TW/cm^2 , 0.6 TW/cm^2 및 1 TW/cm^2 이었고, 샘플은 공기 중에 레이저 처리되었던, 레이저 처리된 표면들의 SEM 이미지들이다. 다른 작동 파라미터들은 표 1의 샘플 PSCA와 실질적으로 동일하였다.

[0146] (아르곤 대기 하에서 공정이 되었던) 샘플 PSCA의 보통의 확대되지 않은 뷰(normal, unmagnified view)에서, 표면은 흑색으로 보이고, 표 1의 다른 샘플들의 보통의 확대되지 않은 뷰에서, 샘플들의 표면들은 백색으로 보이거나, 샘플 PSCA의 표면 보다 적어도 훨씬 더 밝았다.

[0147] 또한, 산화 알루미늄의 샘플의 스펙트럼 성질들의 측정들은 수행되었다. 도 12는 키퍼 마그네트(kicker magnet)에서 CERN에 의해 사용되는 산화 알루미늄(C Cera로 참조되고, 약 99.7 %의 순도를 갖음)의 샘플 및 임의의 레이저 가공 전의 다른 산화 알루미늄(White Cera로 참조됨)의 샘플의 총 반사율(total reflectance), 총 투과율(total transmittance), 및 흡수율(absorptance)을 나타내는 그래프이다. 스펙트럼은 532 nm에서의 흡수율 및 1064 nm에서의 매우 낮은 흡수율을 나타낸다. 반사율은 샘플들에 따라 다르며, 이는 인간의 눈에 명백한 샘플들의 상이한 색상들에 따른 것이다. 두 샘플들의 두께는 3 mm였다. 이러한 측정들로부터 532 nm, 또는 515 nm - 또 다른 가용 레이저 파장에서의 레이저 가공이 적합할 수 있음이 결정되었다.

[0148] 표 1의 샘플들의 레이저 처리된 표면들에 대해 측정된 최대 SEY 값은 1.6과 2.2 사이에서 달라진다는 것을 상기에서 설명한 결과들로부터 알 수 있다. SEY가 가장 낮은 샘플은 최대 값이 1.6인 PS2C1R이다. 샘플들의 반사율과 SEY 사이에는 실질적인 상관 관계가 없는 것으로 보인다. 몇몇 샘플들은 200eV 전자 에너지에서 특이치

(outliers)를 가지며, 이는 표면의 비균질성(inhomogeneities) 때문일 수 있다.

[0149] 샘플이 알루미늄인 몇몇 다른 실시예들에서, 작동 파라미터들은 아래 표 3으로부터 선택되어 샘플의 표면 상에 원하는 주기적 구조들의 배열을 생성할 수 있다. 작동 파라미터들의 값들은 또한 관심있는 다른 세라믹 재료들의 경우 표 3으로부터 선택될 수 있다.

표 3

파장(nm)	펄스 폭 범위	초점 스팟 직경	반복률 (KHz)	평균 출력 (W)	스캔 속도 (mm/s)	반복 수	해치 거리 (mcm)	출력 밀도 (강도)
355 nm, 532 nm or 1064 nm	500fs - 1ns	1 μ m - 100 μ m	10kHz - 200 kHz	1-10	1-100	1-10	10-100	0.1TW/cm ² 내지 3TW/cm ²

[0150]

[0151] 0.1 TW/cm² 내지 3 TW/cm²의 출력 밀도 범위에서 우수한 결과들이 달성될 수 있으며, 특히 아르곤에서 0.5 TW/cm² 내지 1.5 TW/cm²의 출력 밀도 범위에서 532nm의 파장에 대해 우수한 결과들이 달성될 수 있다. 그러나, 고도로 조직화된 구조화는 공기 또는 아르곤 중 하나에서 레이저 가공에 대해 달성된다.

[0152] 표 1 내지 표 3 및 도 2 내지 도 12와 관련하여 상기 설명된 결과들은 TW/cm²의 범위의 레이저 빔 출력 밀도들을 사용하여 획득되었다. 대안적인 실시예들에서, 세라믹 표면의 레이저 패터닝(laser patterning)은 GW/cm²의 범위의 레이저 빔 출력 밀도를 사용하여 획득된다.

[0153] 표 4는, GW/cm²의 범위의 레이저 빔 출력 밀도를 사용하여, 알루미늄의 샘플(NSCA 샘플이라 칭함)의 표면 상에 원하는 주기적인 구조들의 배열을 생성하기 위해 도 1의 장치의 레이저의 작동 파라미터들을 제공한다. 표면의 레이저 가공은 NSCA 샘플에 대해 아르곤 대기에서 수행되었다.

표 4

샘플 이름	NSCA
파장(nm)	532
T	10 ns
반복률(kHz)	20
출력(W)	3.46
레이저 초점 스팟 직경(μm)	60
펄스 에너지 (μJ)	173.0
플루언스(J/cm^2)	6.12
구조(크로스/라인)	크로스
해치 거리(μm)	70
스캔 속도(mm/s)	20
패스들	10
패스 당 스팟 당 펄스들	60
레이저-가공된 영역의 폭(mm)	14
레이저-가공된 영역의 길이(mm)	14
가공 시간(분)	46.67

[0154]

[0155] 표 4는 위의 표 1과 동일한 형식이며, TW/cm^2 의 범위의 레이저 출력 밀도들로 처리된 특정 샘플들에 대한 작동 파라미터들을 제공한다.

[0156] 표 1의 NSCA 샘플은 3mm의 두께를 가지며, 샘플들의 레이저 가공 면적은 14mm X 14mm이었다. 샘플은 99.7 % 보다 더 큰 순도의 산화 알루미늄(알루미나)이었는데, 이는 특정 입자 가속기 애플리케이션들에 사용되는 등급이다.

[0157] 표 4의 NSCA 샘플의 이차 전자 수율(SEY)은 샘플 상의 3 개의 상이한 스팟들에서 상이한 1차 전자 에너지들에 대해 측정되었다. 차징 이펙트를 회피하기 위해, 표면들은 각 측정 포인트 사이에서 저에너지 전자들(36eV)로 충격을 받았다. 하나의 데이터 포인트를 측정하기 위한 최대 적용 투여량은 약 1×10^{-12} C였다. 따라서, 하나의 스펙트럼을 측정하기 위한 총 투여량은 약 1×10^{-11} 였다.

[0158] 도 13은 레이저 처리된 표면 상의 3 개의 상이한 스팟들에서의 샘플 NSCA에 대한 1차 전자 에너지의 함수로서의 SEY의 플롯이다.

[0159] SEY 측정들의 수행 후, NSCA 샘플은 500eV 전자들로 총 투여량 1×10^{-2} C/ mm^2 까지 충격을 가하고, 하루 밤 동안 샘플을 공기에 노출시킴으로써 더 낮은 SEY 값들을 획득하는 시도(attempt)로 컨디셔닝되었다(conditioned).

[0160] 도 14는 500eV 전자들을 사용하는 컨디셔닝 및 공기에 노출된, 레이저 처리된 표면 상의 3 개의 상이한 스팟들에서의 샘플 NSCA에 대한 1차 전자 에너지의 함수로서의 SEY의 플롯이다. 또한, 비교를 위해 도 13의 SEY 결과는 도 14에 포함되었다.

- [0161] 컨디셔닝 및 공기 노출 후에 획득된 도 14의 SEY 결과들은 최대 SEY가 증가하여 반응성 표면(reactive surface)을 제안하는(suggesting) 것으로 밝혀졌다. 컨디셔닝 및 공기 노출 이후의 SEY 스펙트럼의 측정들은 잘 재생성될(reproducible) 수 없었는데, 가능한 이유는 세라믹의 벌크(bulk)로 전하들을 주입하는 것(implantation)일 수 있다.
- [0162] NSCA 샘플 표면의 충전을 확인하기 위해, XPS 스펙트럼을 획득하기 위한 X-레이 광전자 분광학 측정들(X-ray photoelectron spectroscopy)은 컨디셔닝 및 공기 노출 후에 수행되었다. XPS 스펙트럼은 알루미늄(15 원자 % (atomic %))과 산소(79 원자 %)가 메인 원소들(main elements)이며, 탄소 오염(carbon contamination)이 낮고(1 원자 %), 일부 불소(fluorine)가 존재한다고(5 원자 %) 나타났다.
- [0163] 도 15a 및 도 15b는 샘플 NSCA의 레이저 처리된 표면의 상이한 배율의 레벨들에서의 SEM 이미지들이다.
- [0164] 도 16a 내지 도 16d는 레이저 빔의 출력 밀도가 각각 0.25 GW/cm^2 , 0.35 GW/cm^2 , 0.45 GW/cm^2 , 및 0.55 GW/cm^2 이었고, 샘플이 공기 중에 레이저 처리되었던, 레이저 처리된 표면들의 SEM 이미지들이다. 도 16e 내지 도 16n은 레이저 빔의 출력 밀도가 각각 0.6 GW/cm^2 , 0.65 GW/cm^2 , 0.7 GW/cm^2 , 0.75 GW/cm^2 , 0.8 GW/cm^2 , 0.85 GW/cm^2 , 0.9 GW/cm^2 , 0.95 GW/cm^2 , 1 GW/cm^2 및 1.5 GW/cm^2 이었고, 샘플은 아르곤 대기에서 레이저 처리되었던, 레이저 처리된 표면들의 SEM 이미지들이다. 다른 작동 파라미터들은 표 4의 샘플 NSCA와 실질적으로 동일하였다.
- [0165] 샘플이 알루미늄이나인 몇몇 다른 실시예들에서, 작동 파라미터들은 다음과 같은 아래 표 5로부터 선택되어 샘플의 표면 상에 원하는 주기적 구조들의 배열을 생성할 수 있다. 작동 파라미터들의 값들은 또한 관심있는 다른 세라믹 재료들의 경우 표 5로부터 선택될 수 있다.

표 5

파장(nm)	펄스 폭 범위	초점 스팟 직경	반복률 (KHz)	평균 출력 (W)	스캔 속도 (mm/s)	반복 수	해치 거리 (mcm)	출력 밀도 (강도)
355 nm, 532 nm or 1064 nm	1ns - 100ns	20 μm - 100 μm	10kHz - 200 kHz	3-8	10-50	1-10	10-100	0.002 GW/cm^2 내지 3 GW/cm^2

- [0166]
- [0167] 0.1 GW/cm^2 내지 3 GW/cm^2 의 출력 밀도 범위에서 우수한 결과들이 달성될 수 있으며, 특히 아르곤에서 0.2 GW/cm^2 내지 1 GW/cm^2 의 출력 밀도 범위에서 532nm의 파장에 대해 우수한 결과들이 달성될 수 있다. 그러나, 고도로 조직화된 구조화는 공기 또는 아르곤 중 하나에서 레이저 가공에 대해 달성된다.
- [0168] TW/cm^2 의 범위 또는 GW/cm^2 의 범위의 출력 밀도를 갖는 레이저 방사선을 표면들에 적용함으로써 세라믹 표면들 상에 주기적인 구조들이 형성될 수 있는 것이 실시예들의 특징이다. 이론에 구속되기를 바라지 않고, 보호의 범위를 제한하지 않고, 적어도 일부 실시예들과 관련하여 발생할 수 있는 공정들에 관한 다음의 설명이 제공된다.
- [0169] 레이저 엔지니어링(Laser engineering)은 실시예들에 따른 주기적인 구조들의 형성을 제공하는 포괄적인 방법론을 제공한다. 정밀 레이저 엔지니어링(Precision laser engineering)은 실제로 반도체들 내의 두 가지 유형들의 여기들(excitations), 절연체들(insulators) 내의 진동들 및 금속들 내의 자유 전자들을 일으킬 것으로 예상된다. 레이저들이 재료들을 엔지니어링할(engineer) 수 있는 메커니즘들은 다음과 같다:
- [0170] (i) 광-열 인터랙션(Photo-thermal interaction)(PTI) - 짧은 체류 시간을 제공하는 레이저 빔들을 사용하여 일반적으로 달성됨(예컨대, 나노초 펄스 폭의 레이저들).
- [0171] (ii) 광-박리 인터랙션(Photo-ablation interaction)(PAI) - 매우 짧은 체류 시간을 제공하는 레이저 빔들을 사용하여 구상됨(envisaged)(예컨대, 피코초 또는 펨토초 펄스 폭을 구비한 레이저들).

- [0172] 표 4 및 5 및 도 13 내지 도 16과 관련하여 설명된 실시예들에 대한 레이저 가공은 PTI 체제(regime)일 수 있다. 표 1 내지 표 3 및 도 2 내지 도 11과 관련하여 설명된 실시예들에 대한 레이저 가공은 PAI 체제일 수 있다.
- [0173] PTI 체제에서, 집속된 레이저 빔은 공간적으로 제한된, 강렬한 열원으로서 작용한다. 타겟이 된 재료가 급격히 가열되어, 결국 기화된다(vaporized). 보호의 범위에 대한 제한을 암시하기를 바라지 않고, 타겟이 된 재료는 끓여서 증발시키는 것으로서(as being boiled away) 불려질 수 있다. 이 접근법의 장점은 타겟 재료의 상대적으로 많은 양을 신속하게 제거할 수 있다는 것이다. 그러나, 주변 열 영향 존(peripheral heat affected zone)(HAZ) 손상 및 가공 후 일부 재구성 재료(recast material)의 존재는 정밀 레이저 재료 엔지니어링에 대한 열 제한의 관점에서 한계들을 나타낸다.
- [0174] PAI 체제에서, 레이저는 재료 내부의 광의 다중-광자 흡수(multi-photon absorption)를 유도한다. 이것은 재료로부터 전자들을 분해하며(strips), 이는 쿨롬 반발(Coulomb repulsion)로 인해 폭발한다. PAI는 단순히 가열하는 것이 아니라 재료를 함께 홀드하는(hold) 분자 또는 원자 결합들을 직접적으로 파괴하는 것(breaking)을 포함하며, 본질적으로 '뜨거운' 공정('hot' process)은 아니다. 재료가 매우 짧은 시간프레임(timeframe) 내에 제거되기 때문에, 열이 주변 재료로 퍼질 수 있기 전에 제거된 재료는 대부분의 에너지를 운반한다. 이러한 효과들은 상당히 감소된 HAZ의 결과를 낳을 수 있다. 또한, 이것은 클린 공정(clean process)이며 최소한의 재구성 재료를 남기므로, 정교한 사후-공정의 필요성을 제거해준다. PAI 메커니즘은 선형 광학 흡수가 낮고 기존 기술들로는 엔지니어링하기 어려운 고 대역-갭 재료들(high band-gap materials)을 포함하여, 매우 광범위한 재료들과 호환된다. PAI 메커니즘은 '파장 중립(wavelength neutral)'으로 간주될 수 있다; 즉, 재료가 레이저 파장에서 정상적으로 투과성이더라도 비선형 흡수가 감소될 수 있다.
- [0175] PAI 메커니즘은 표면들의 전자 일 함수(electron work function)의 맞춤 설계를 근본적으로 허용할 수 있다. 세라믹들은 보통 부분적으로 이온 및 부분적으로 공유 결합을 하는 결합들로 결합된 금속 및 비금속 원자들로 구성되어, 경도(hardness), 부서짐(brittleness) 및 열에 대한 저항성(resistance to heat)과 같은 성질들을 부여한다. 따라서, 이러한 재료들의 광-물질 인터랙션 메커니즘(light-matter interaction mechanisms)에서 중요한 역할을 하고, 레이저 정밀 구조화 공정들(laser precision structuring processes)의 문제점들(challenges) 및 세라믹 표면들의 표면 포텐셜(surface potential)의 설계에 궁극적으로 기여할 수 있는 파라미터들을 정확하게 식별하는 것이 중요할 수 있다.
- [0176] PTI 및 PAI 메커니즘은 각각 도 17a 및 17b에 개략적으로 도시된다.
- [0177] 예를 들어 피코초 범위 또는 이하에서의 펄스 지속시간의 사용과 같은, 표면에 적용되는 펄스화된 방사선의 특성들이, 형성된 주기적인 구조들이, 예를 들어 나노-초 범위에서의 펄스 지속시간과 같은, 더 긴 지속시간 및/또는 더 높은 에너지의 펄스화된 방사선을 사용하여 형성되는 특징들 보다 더 얕은 깊이(shallower depth) 및/또는 더 완만하게 기울어지도록(more gently sloped) 할 수 있는 것은 실시예들의 추가 특징이다.
- [0178] 또한, 이론에 구속되기를 바라지 않고, 보호의 범위의 범위를 제한하지 않고, 적어도 일부 실시예들과 관련하여 발생할 수 있는 공정들에 관한 다음의 추가 설명이 제공된다.
- [0179] 매우 높은 강도들(또는 높은 조사량(irradiance))에서의 조사(irradiation)에서, 약 10^{20} W/cm³의 율(rate)로 에너지가 방출되는 처음 수십 nm에서는 밀도가 높고 강한 흡수 재료의 문제에 직면하게 된다. 일단 무작위화된(once randomised), 이 에너지의 일부는 재료의 벌크(bulk)로 전도되고(conducted), 일부는 가열된 층의 열 팽창(thermal expansion)에 의해 방향성 운동 에너지(directed kinetic energy)로 변환된다. 두 개의 체제는 이 점에서 구별된다.
- [0180] 1. 재료의 박리 및 팽창에 의해 지배되는 나노초 펄스화된 레이저 인터랙션(Nanosecond pulsed laser interaction). 여기서, 가열된 층의 열 압력은 밑에 있는 타겟 재료(underlying target material)의 상당한 압축을 야기하기에 충분하다.
- [0181] 2. 펄스 지속기간 동안 유체 역학적 운동(hydrodynamic motion)은 무시할 수 있기 때문에(레이저 펄스들은 나노초 보다 1000 배 이상 더 짧을 수 있음) 열 전도가 지배적인 피코초 펄스화된 레이저 인터랙션. 피코초 체제에서, 가공된 층의 유체 역학적 팽창이 시작되기 전에 밀도가 높은 재료의 강한 가열이 발생할 수 있다. 이 체제에서 생산생성된 플라즈마들은 본질적으로 고체 타겟 자체와 동일한 밀도를 가질 수 있다. 이것은 - 냉각 시 - 나노-구조로 커버된 - 조사 파라미터들에 따라 1 마이크로미터(micrometres)로부터 50 마이크로미터 범위의 -

미세 구조들이 형성된다.

- [0182] 일부 실시예들에 따라 피코초 지속시간 펄스화된 방사선을 사용하면 표면 위로 적절한 패턴으로 레이저 빔을 스캐닝함으로써 획득된 더 큰 스케일(scale)의 피크들 및 트로프들에 더하여 표면 상에 나노-리플들(nano-ripples) 또는 다른 작은 스케일 구조들의 형성을 야기할 수 있다. 그러한 나노-리플들 또는 다른 작은 스케일 구조들은 일부 경우들에서는 더 큰 주기적 피크 및 트로프 구조들에 의해 획득된 감소 이외에, PEY 또는 SEY를 더 줄일 수 있다. 또한, 일부 경우들에서, 나노-리플들 또는 다른 작은 스케일 구조들 및/또는 나노초 펄스들보다 피코초와 관련된 더 얇은 피크들 및 트로프들은, 예를 들어 감소된 유도(induction)와 같은, 표면의 향상된 또는 대안적 성질들을 제공할 수 있고, 및/또는 나노- 또는 마이크로-스케일에서 증가된 영역을 구비한 표면을 제공할 수 있다.
- [0183] 또한, 이론에 구속되기를 바라지 않고, 보호의 범위를 제한하지 않고, 추가 설명들은 다음과 같다.
- [0184] 표면 거칠기가 증가함에 따라, 최대 SEY는 (예를 들어 통계적으로 포함하는) 더 많은 밸리들에 의해 특성화된 표면에 대해 줄 수 있지만, 그것은 (예를 들어 통계적으로 포함하는) 더 많은 힐들(hills)로 덮힌 표면에서 상당히 증가할 수 있다. 이 관찰은 힐 및 밸리 구조들이 그것들의 상이한 형태상의 특징들 및 표면 전자 일 함수들(surface electron work functions)(EWF)으로 인해, 각각, SEY를 증가시키거나 줄이는데 매우 효과적일 수 있음을 나타낸다.
- [0185] 총 SEY는 표면에 입사하는 1차 전자들(PEs)에 대한 후방산란된 전자들(backscattered electrons)(BSEs) 및 두 방사된 실제 이차 전자들(SEs)의 비율을 나타낼 수 있다.
- [0186] 예시: 공기에 노출된 샘플 표면은 흡착된 가스들 및 탄화수소들로 쉽게 오염될 수 있으며, 그것들의 SEY는 증가할 수 있다.
- [0187] 오염들에 의한 높은 SEY는 전자 증식을 일으켜 결국 마이크로파 디바이스들의 성능 및 대형 입자 가속기들의 파괴적인 전자-클라우드 불안정성을 저하시킬 수 있다.
- [0188] SEY의 증가는 전자 일 함수(EWF)에서의 감소를 나타낸다.
- [0189] 표면 거칠기가 증가함에 따라 SEY_{max} 는 힐들에 의해 절약되는(spared) 표면들에 대해 상당한 증가를 가진다. 이 현상은 힐 구조가 SE 방사에 긍정적인 역할을 할 수 있음을 의미한다. 또한, SEY_{max} 는 밸리들에 의해 특성화되는 표면들에 의해 빠르게 줄어드는데, 이는 SEY_{max} 에서의 감소의 주요 요인일 수 있다.
- [0190] 밸리 구조들의 경우에서, SE들은 측벽들(sidewalls)과의 충돌을 통해 효율적으로 트랩될(trapped) 수 있으므로, SEY는 하락한다. 그럼에도 불구하고, 힐 구조들에 대해서는, 측벽들의 부작용을 제외하고는, SE 방사에 몇몇의 긍정적인 영향들을 미친다. 예를 들어, 일부 PE들은 힐들을 구비한 로컬 표면들(local surfaces)에 비스듬하게(obliquely) 치며(strike), 이는 수직 입사(normal incidence)보다 많은 SE들을 더 유도할 것이다. 또한, SE들은 힐들의 측벽을 다시-들어갈(re-enter) 가능성이 있으므로, 결과적으로 SE들 세대들(SEs generations)이 늘어난다. 대부분의 다시-들어난 SE들은 표면 전위 장벽을 극복하고 진공으로 벗어나는 저 에너지들을 구비한 많은 실제 SE들을 생성하는 고 에너지들을 구비한 BSE들이 될 수 있다.
- [0191] 상이한 표면 형태들에 의해 유도된 전자 일 함수(EWF)의 변화들은 또한 SEY 변이들에 원인일 수 있다. 일 함수는 표면 피크들에서 줄고 표면 거칠기가 증가함에 따라 표면 밸리들에서 증가할 수 있다. 우리의 구조화 작업에서 힐들 및 밸리들은 표면 피크들 및 밸리들로서 간주될 수 있다. 힐 구조들에 의해 도입된 더 거친 표면은 종종 더 낮은 전자 일 함수(EWF)를 가져서, 따라서 자연적으로 SEY가 증가한다. 그러나, EWF는 밸리 구조들을 구비한 표면을 거칠게 함으로써 향상될 것이며, 결국 SEY는 준다.
- [0192] 주기적인 구조들을 형성하는 레이저 처리 후에 세라믹 표면 상에 금속 층을 형성하는 단계는 SEY의 상당한 감소를 초래할 수 있음이 밝혀졌다. 도 18은 10nm 두께의 금의 층으로 코팅하기 전후에, 상기 언급된 샘플 이름들 PS2C1R 및 PS2C1R을 갖는 알루미늄 세라믹 샘플에 대한 1차 에너지의 함수로서 SEY 측정들의 플롯이다. 두 샘플들에 대한 SEY의 상당한 감소가 있음을 알 수 있다.
- [0193] 도 19 및 도 20은 금 층으로 코팅한 후의 PS2C1R 및 PS2C1R 알루미늄 샘플의 표면들의 SEM 이미지들을 도시한다.
- [0194] 대안적인 실시예들에서, 임의의 다른 적합한 두께의 임의의 다른 적합한 금속이 세라믹 표면 상에서의 메탈 층

을 위해 사용될 수 있다.

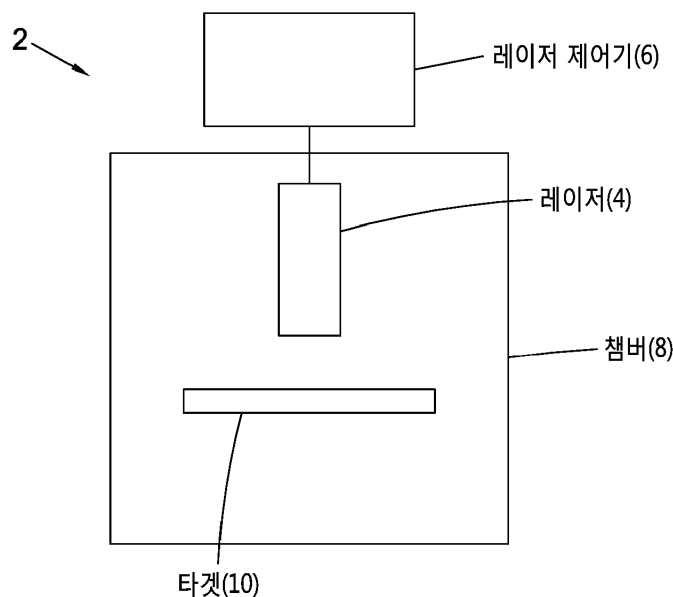
[0195] 금 또는 다른 금속의 층은 임의의 적합한 증착 공정(deposition process), 예를 들어 임의의 적합한 화학적 또는 물리적 증기 증착 공정(chemical or physical vapour deposition process), 예를 들어 스퍼터링 공정(sputtering process), 증발 증착 공정(evaporative deposition process) 또는 레이저 증착 공정(laser deposition process)을 사용하여 형성될 수 있다. 예시에 의해, 에드워드(Edwards)(RTM) 308 코팅 유닛은 코팅을 형성하는데 사용될 수 있다. 임의의 다른 적합한 증착 장치가 사용될 수 있다.

[0196] 대안적인 실시예들에서, 세라믹 표면, 또는 세라믹 표면 상에 증착된 금속 층은 레이저 방사선의 적용 후에 탈지, 클리닝 또는 스무딩 공정 및/또는 표면 탄소 저감 공정을 받을 수 있으며, 이는 SEY에서의 감소를 초래할 수 있다. NGL (RTM) 탈지 제품을 사용한 클리닝은 사용될 수 있다. 임의의 적합한 탈지, 클리닝, 스무딩 또는 표면 탄소 저감 공정이 대안적인 실시예들에서 사용될 수 있다. 일부 실시예들에서, 탈지제(degreaser)는 샘플의 형태를 실질적으로 변화시키지 않을 수 있지만, 예를 들어, 금속 산화물들, 그리스(grease) 또는 먼지와 같은, 표면으로부터의 재료들 또는 혼합물들, 혼합물들 또는 다른 재료들 또는 다른 바람직하지 않은 및/또는 외부 화합물들, 탄소 또는 탄소-함유 화합물들의 층을 제거할 수 있다. 예를 들어, 일부 실시예들에서 99.7 % 빙초산(glacial acetic acid)(임의의 다른 적절한 농도가 사용될 수 있음)은 예를 들어 실온에서, 예를 들어 실질적으로 표면 형태 변화 없이 구리(I) 및 구리(II) 산화물 및/또는 다른 재료들과 같은, 표면 재료들을 제거하기 위해 사용될 수 있다.

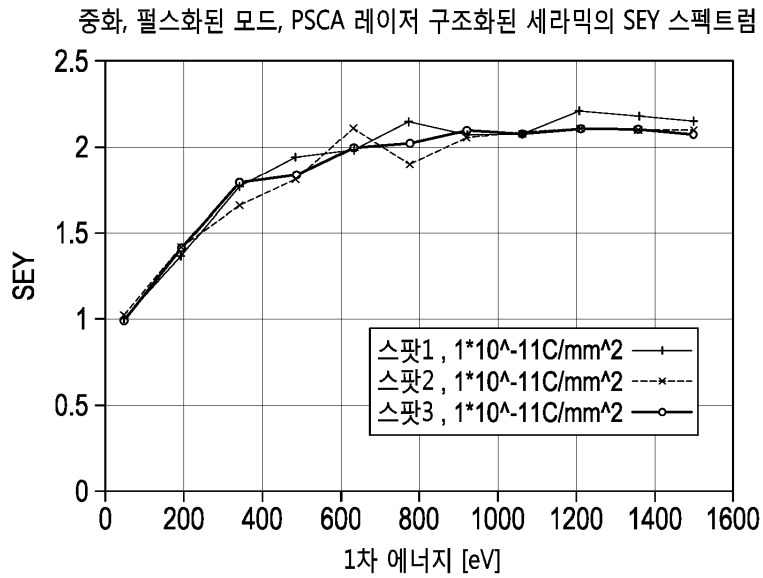
[0197] 본 발명은 순전히 예시로써 설명되었으며, 본 발명의 범위 내에서 세부 사항의 수정들이 이루어질 수 있음을 이해할 것이다. 설명의 각 특징, 및 (해당되는 경우) 도면들은 독립적으로 제공되거나 다른 기능과 적절하게 결합하여 제공될 수 있다.

도면

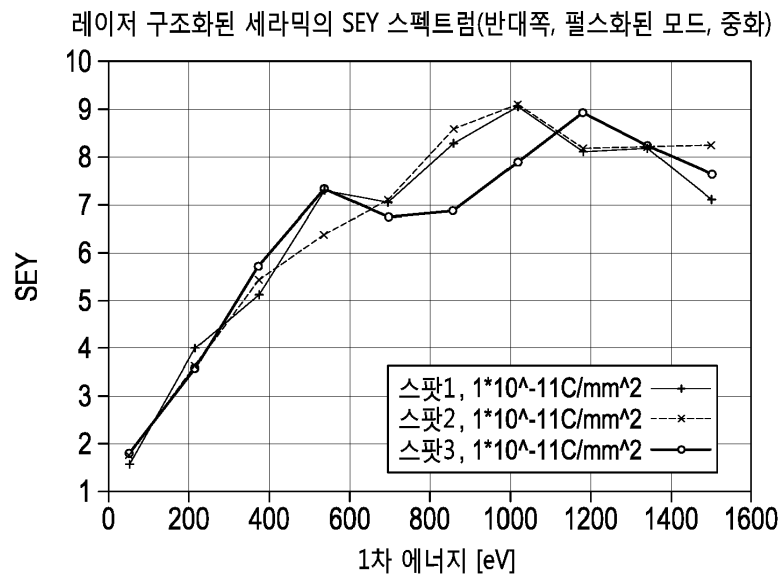
도면1



도면2

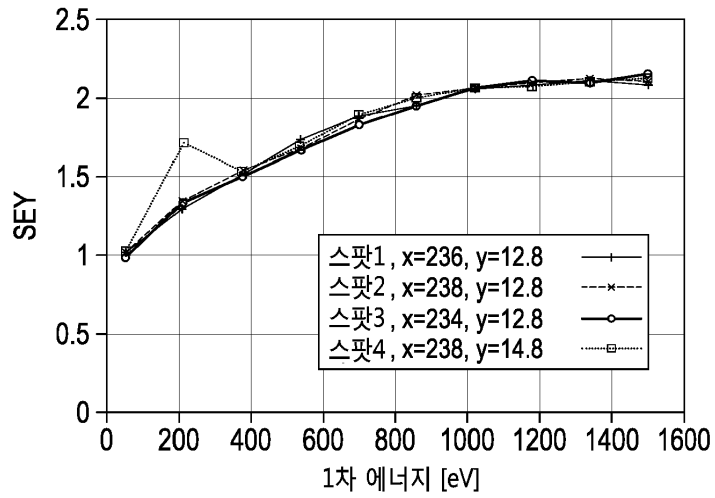


도면3



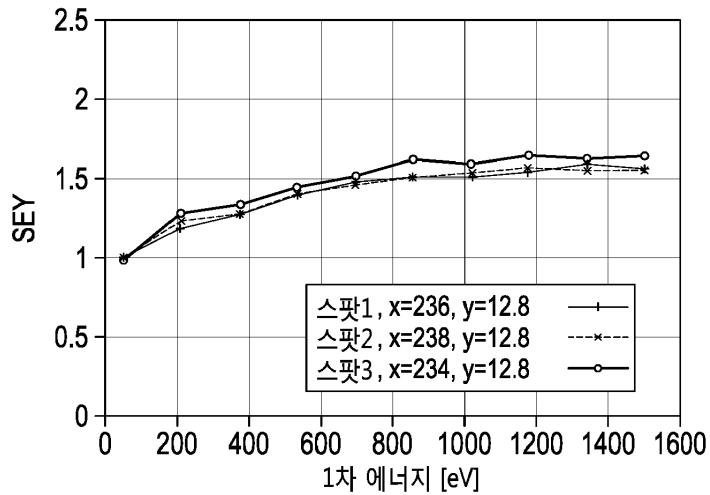
도면4

중화, 펄스화된 모드, PS1-C1R 레이저 구조화된 세라믹의 SEY 스펙트럼



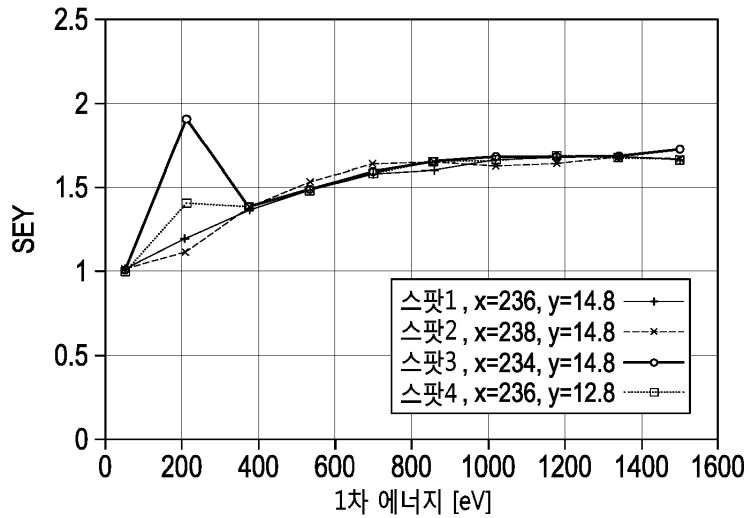
도면5

중화, 펄스화된 모드, PS2-C1R 레이저 구조화된 세라믹의 SEY 스펙트럼



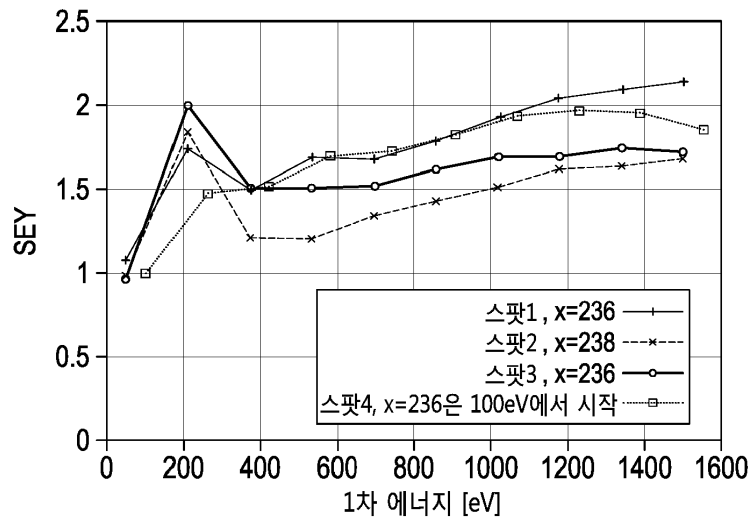
도면6

중화, 펄스화된 모드, PS2-C2R 레이저 구조화된 세라믹의 SEY 스펙트럼



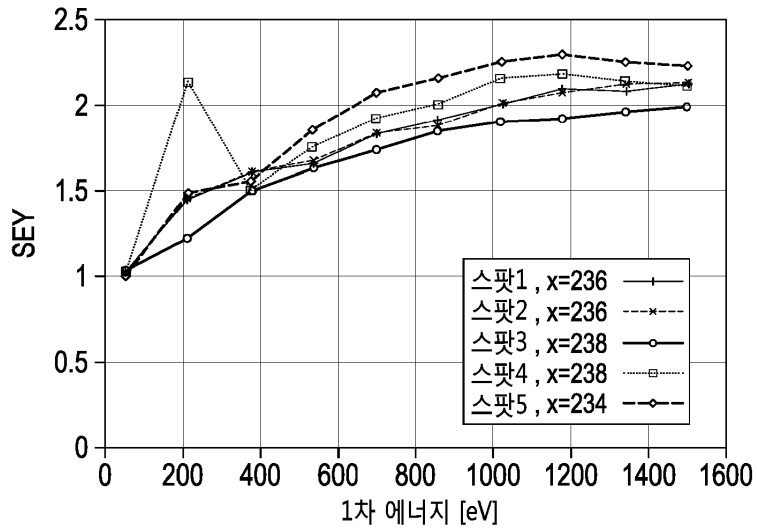
도면7

w/o 중화, 펄스화된 모드, PS2-L1R 레이저 구조화된 세라믹의 SEY 스펙트럼



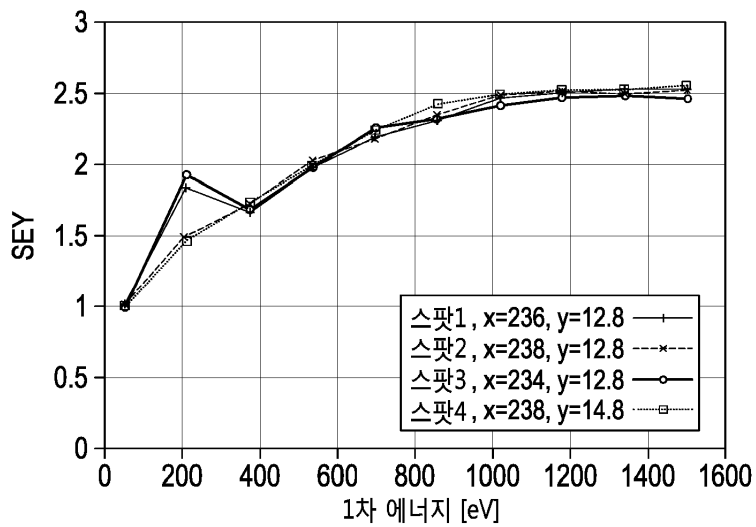
도면8

w/o 중화, 펄스화된 모드, PS2-L2R 레이저 구조화된 세라믹의 SEY 스펙트럼

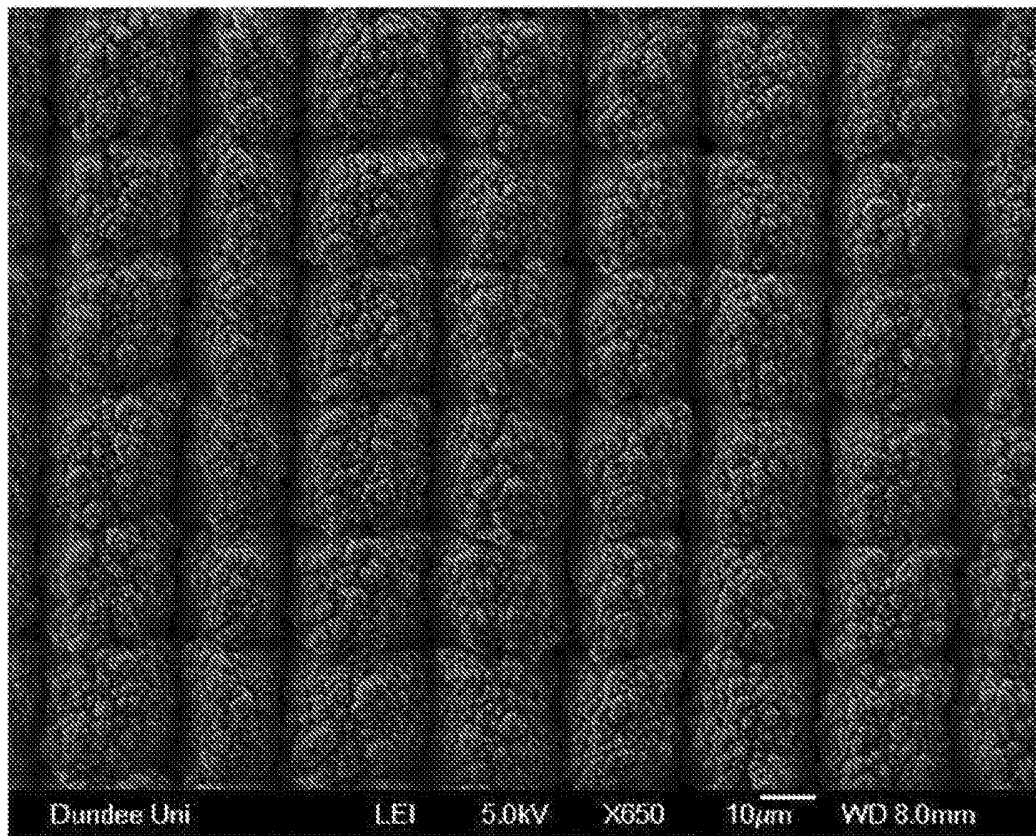


도면9

중화, 펄스화된 모드, PS4-L1R 레이저 구조화된 세라믹의 SEY 스펙트럼



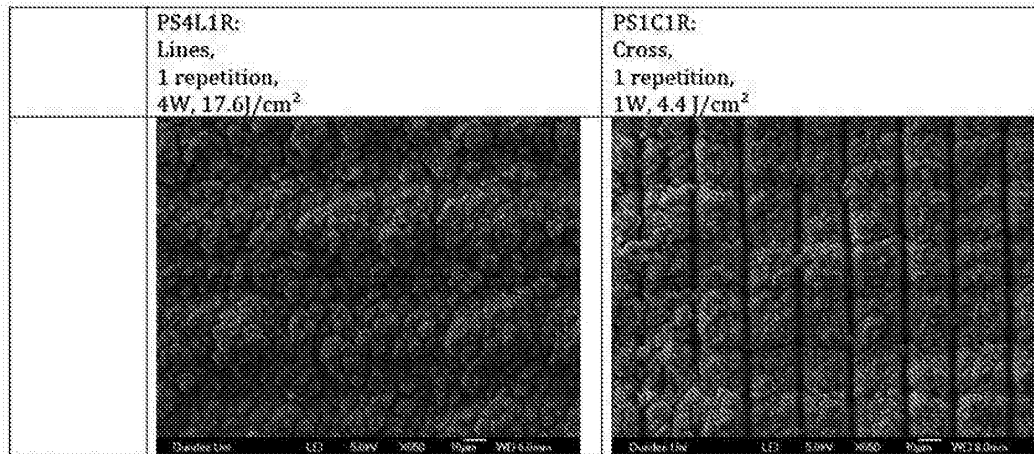
도면10a



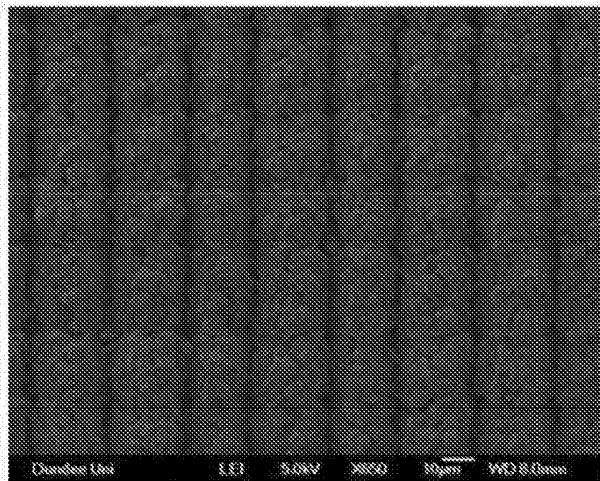
도면10b

	PS2L1R (Top) and PS2L2R (bottom)	The best SEVs: PS2C1R (Top) and PS2C2R (bottom)
1 repetition 2W, 8.8J/cm ²		
2 repetitions 2W, 8.8J/cm ²		

도면10c

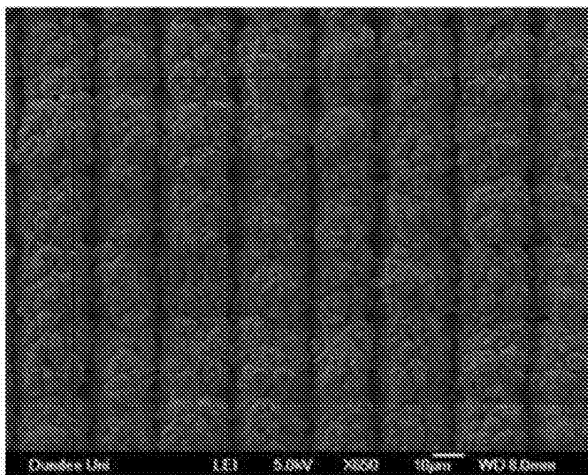


도면11a



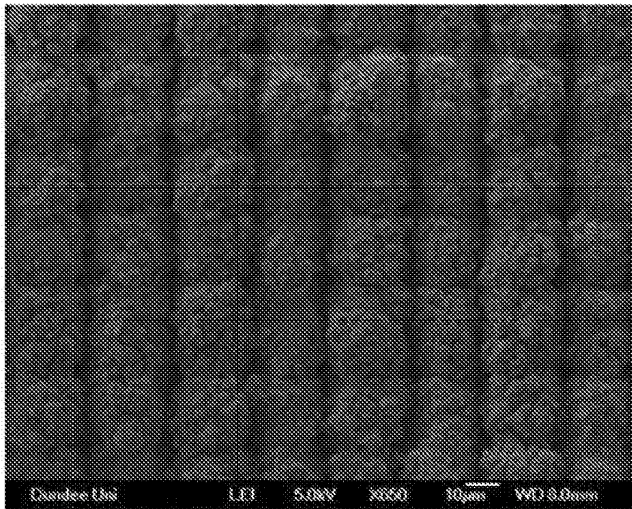
아르곤 - 0.74 TW/cm²

도면11b



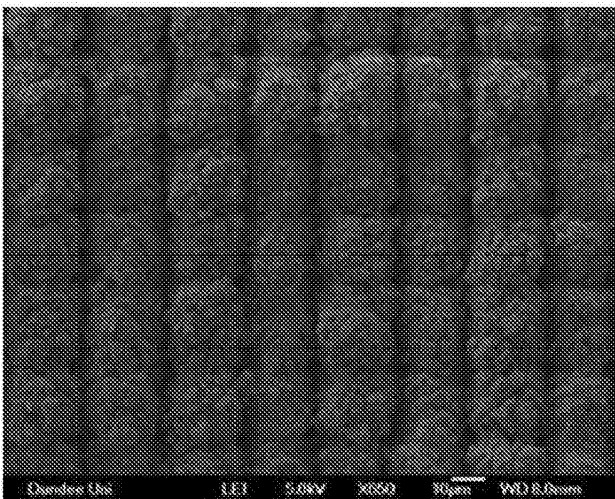
아르곤 - 0.88 TW/cm²

도면11c



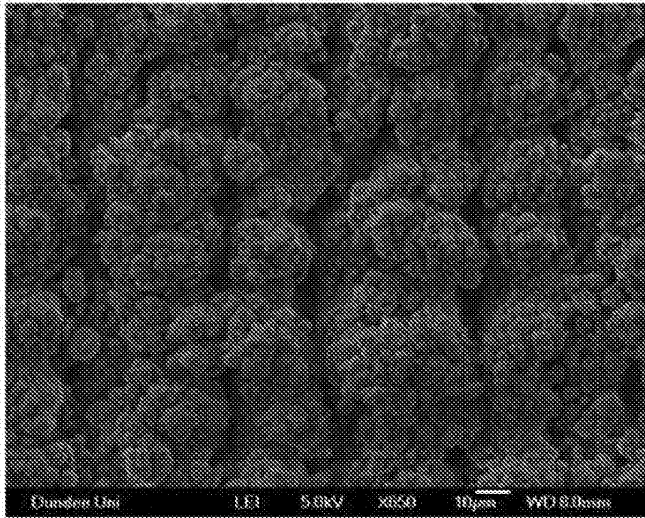
아르곤 - 0.95 TW/cm²

도면11d



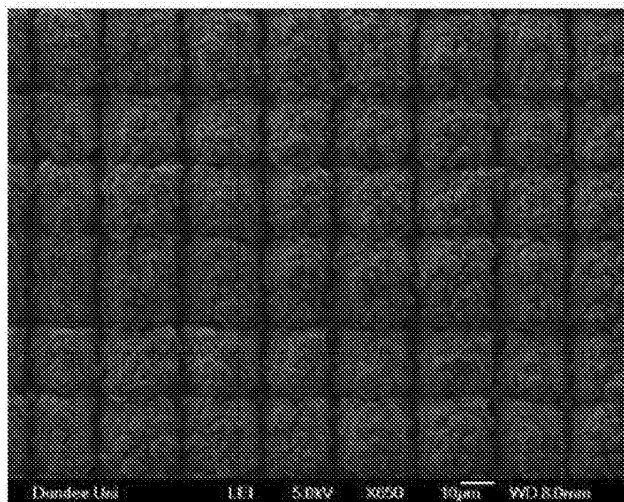
아르곤 - 2 TW/cm²

도면11e



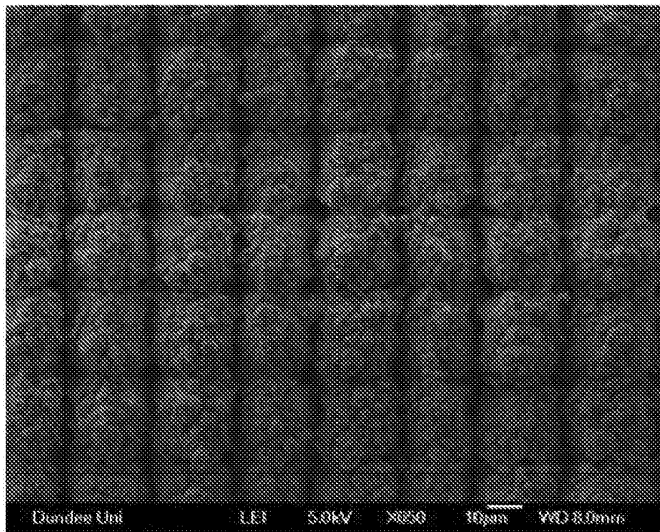
아르곤 - 1.3 TW/cm²

도면11f



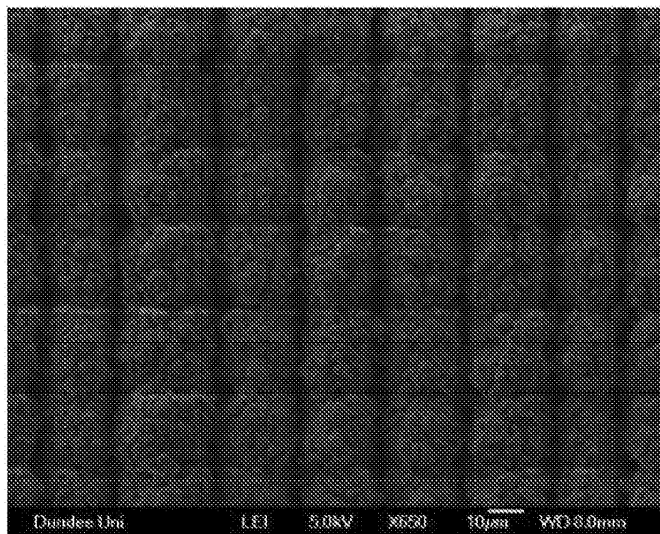
공기 - 0.3 TW/cm²

도면11g



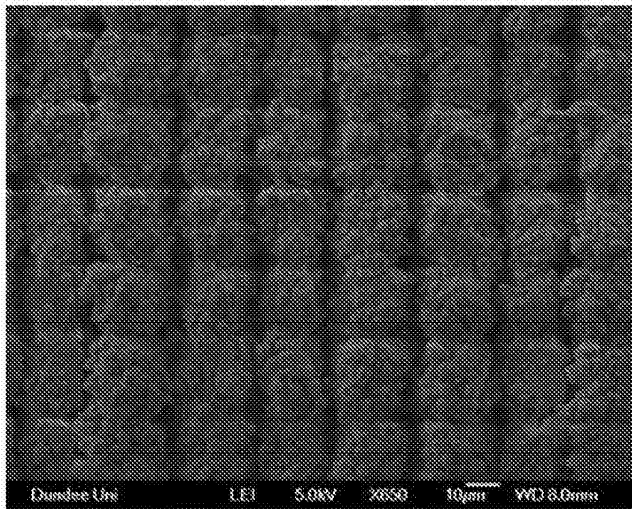
아르곤 - 0.4 TW/cm²

도면11h



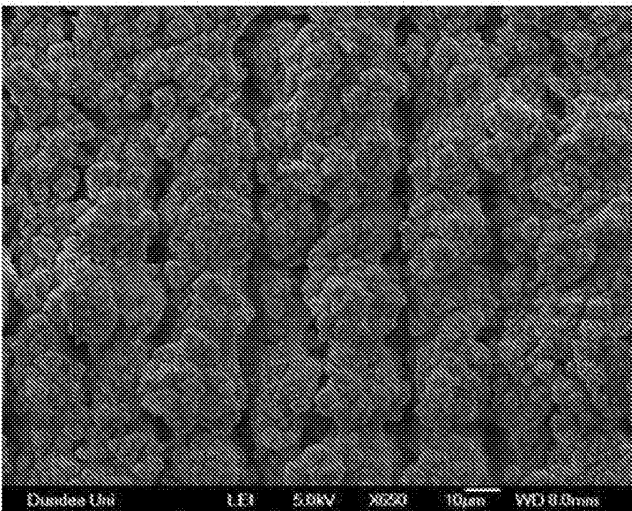
아르곤 - 2 TW/cm²

도면11i



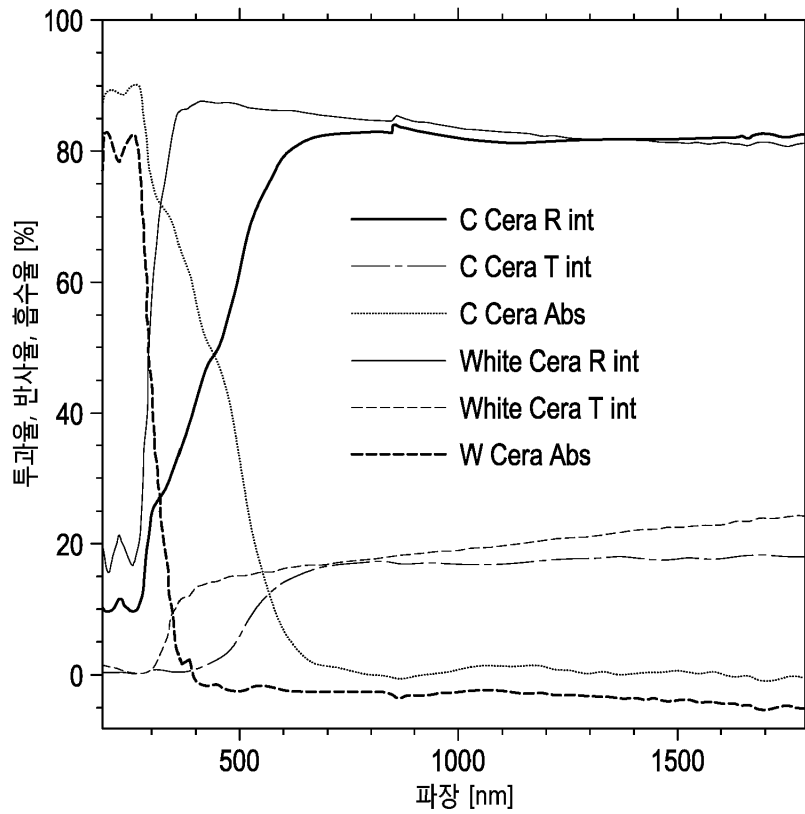
공기 - 0.6 TW/cm^2

도면11j

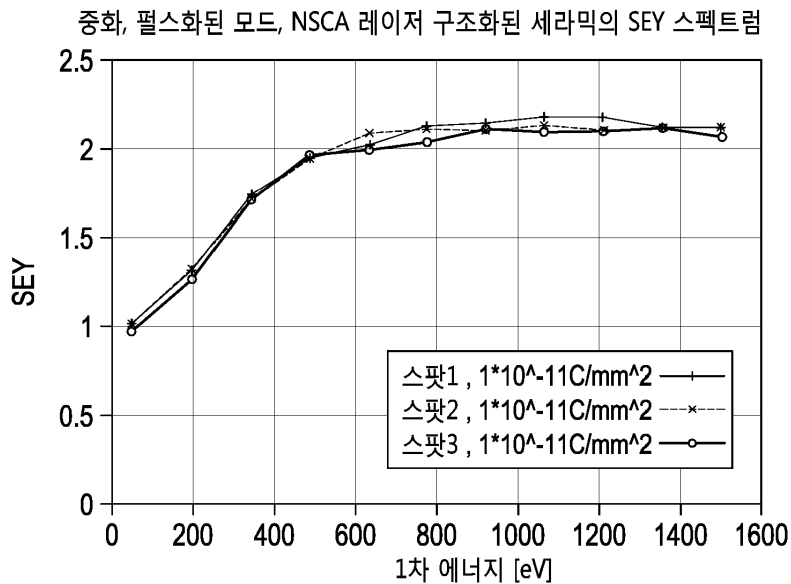


공기 - 1 TW/cm^2

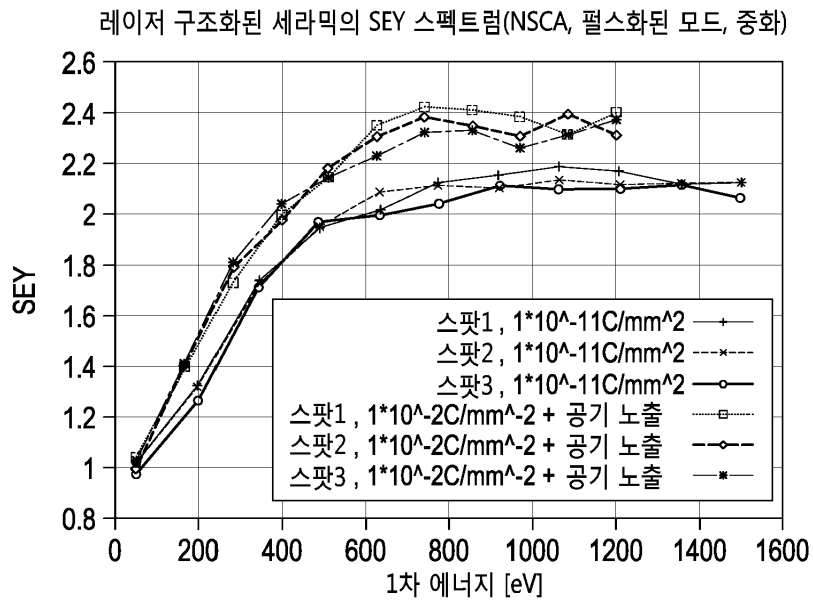
도면12



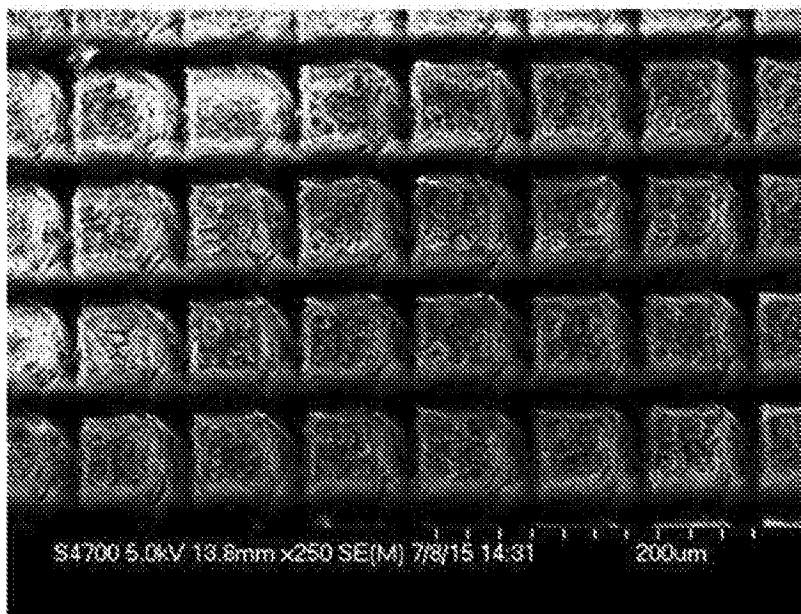
도면13



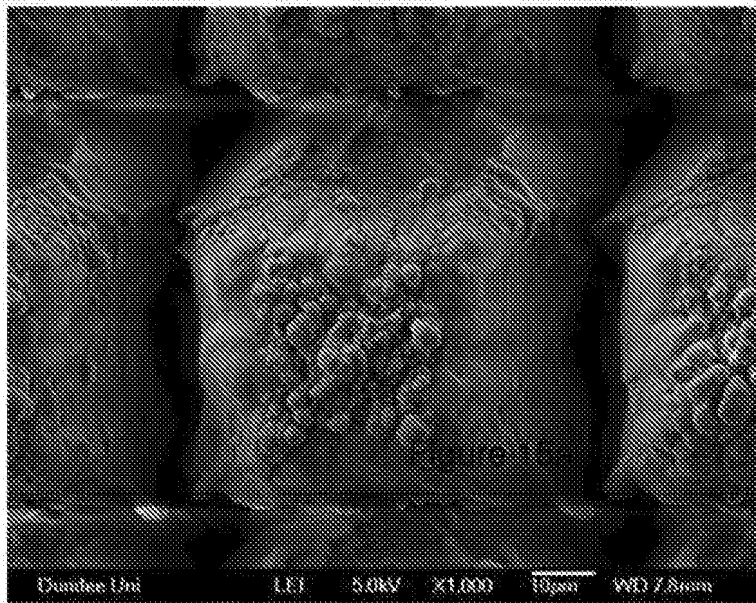
도면14



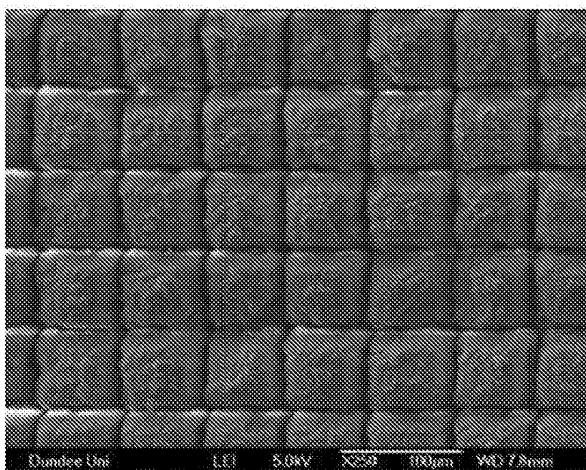
도면15a



도면15b

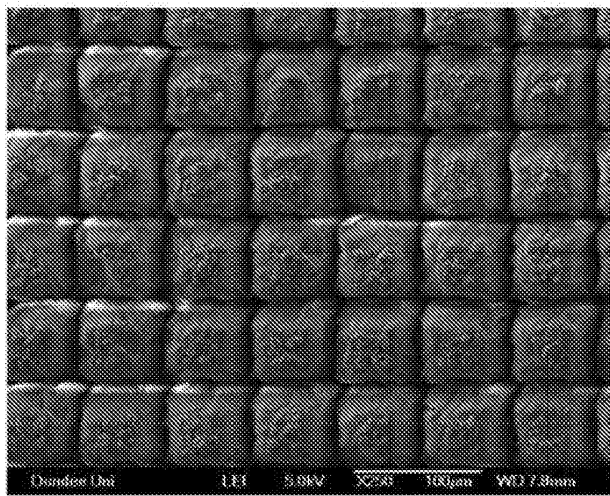


도면16a



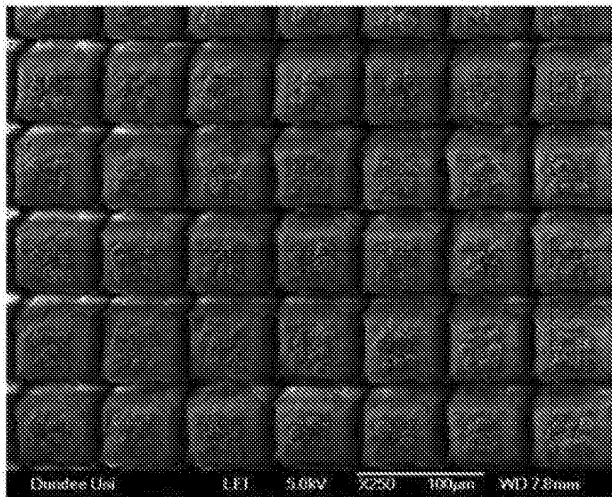
공기 - 0.25 GW/cm²

도면16b



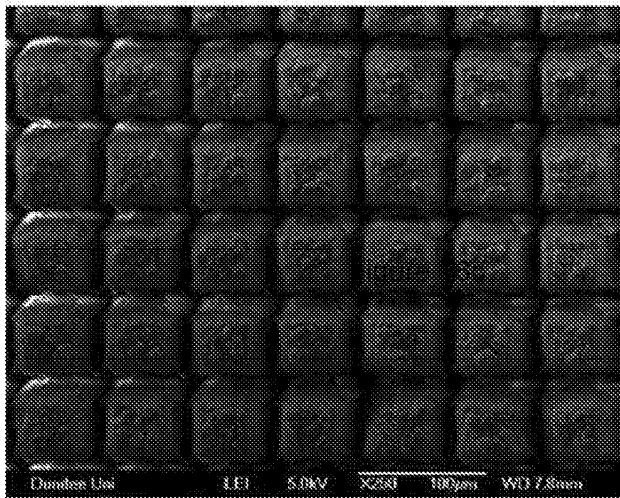
공기 - 0.35 GW/cm^2

도면16c



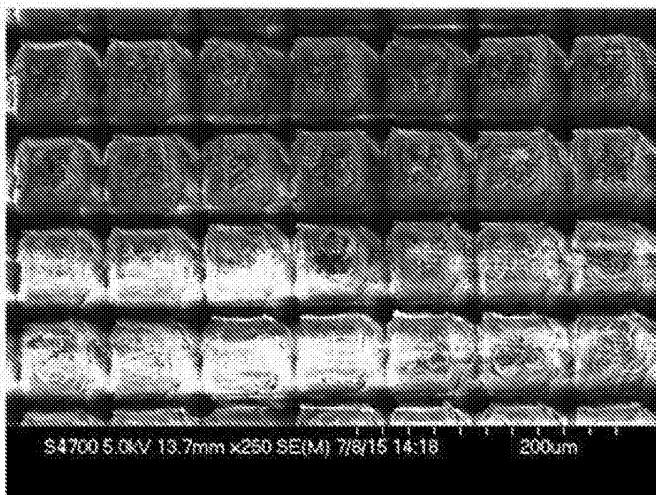
공기 - 0.45 GW/cm^2

도면16d



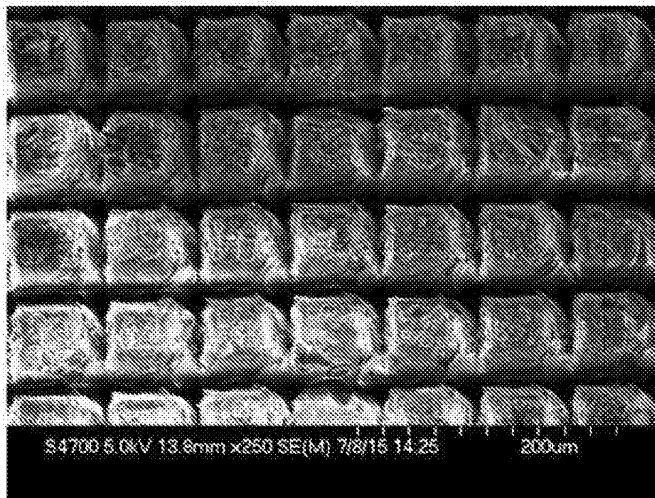
공기 - 0.55 GW/cm²

도면16e



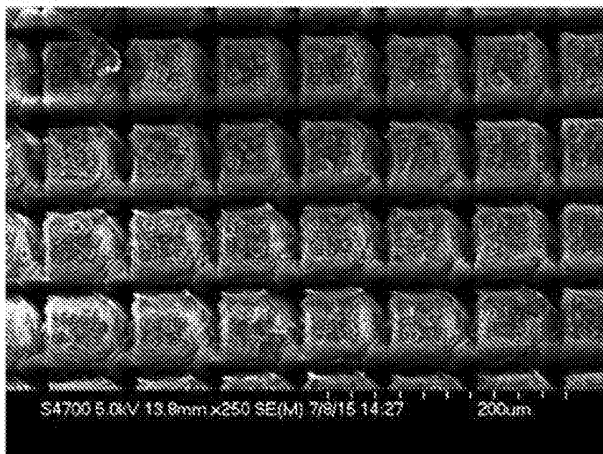
아르곤 - 0.6 GW/cm²

도면16f



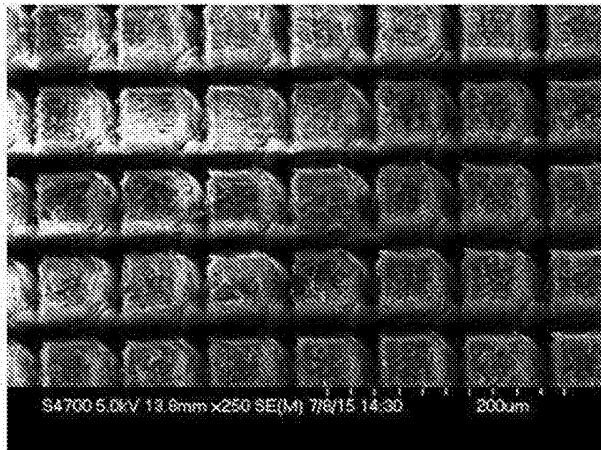
아르곤 - 0.65 GW/cm²

도면16g



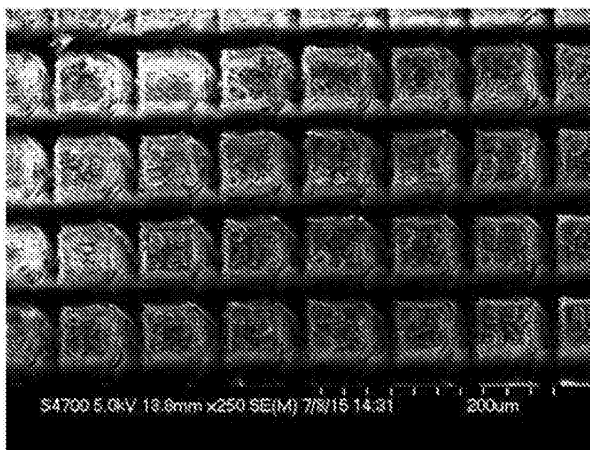
아르곤 - 0.7 GW/cm²

도면16h



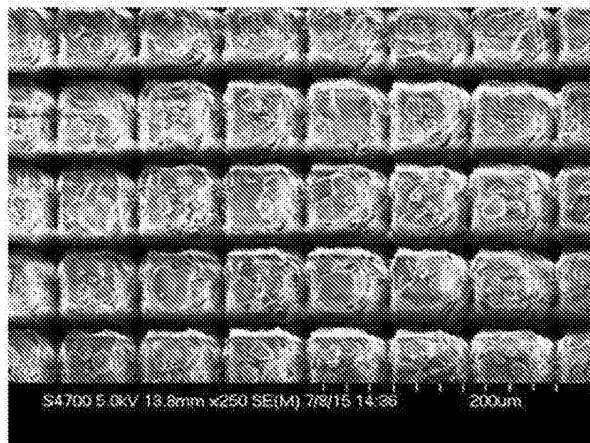
아르곤 - 0.75 GW/cm²

도면16i



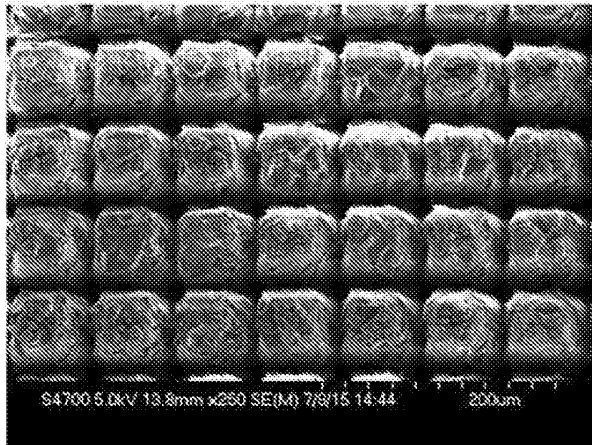
아르곤 - 0.8 GW/cm²

도면16j



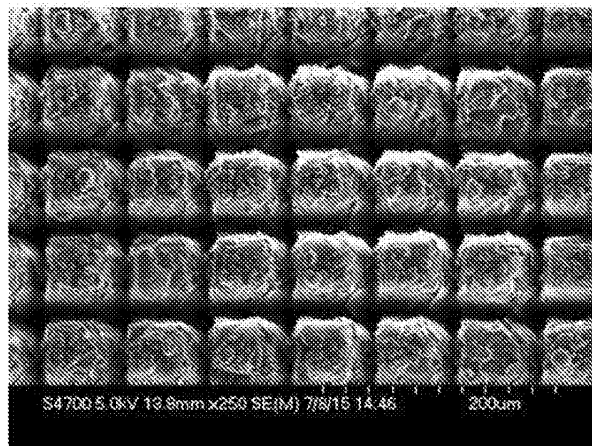
아르곤 - 0.85 GW/cm²

도면16k



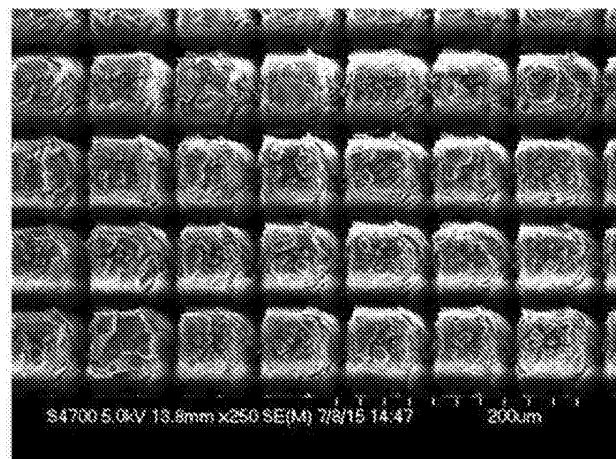
아르곤 - 0.9 GW/cm²

도면16l



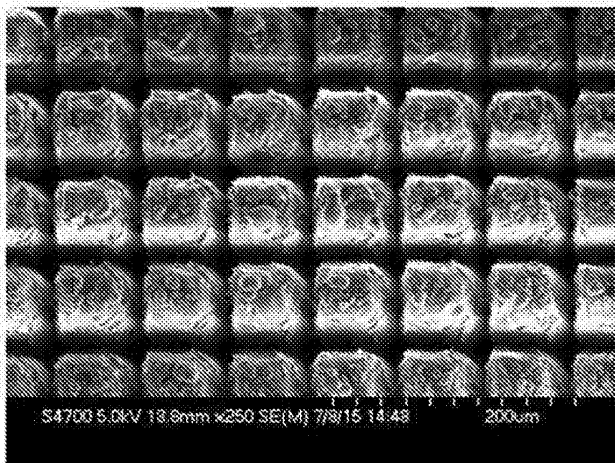
아르곤 - 0.95 GW/cm²

도면16m



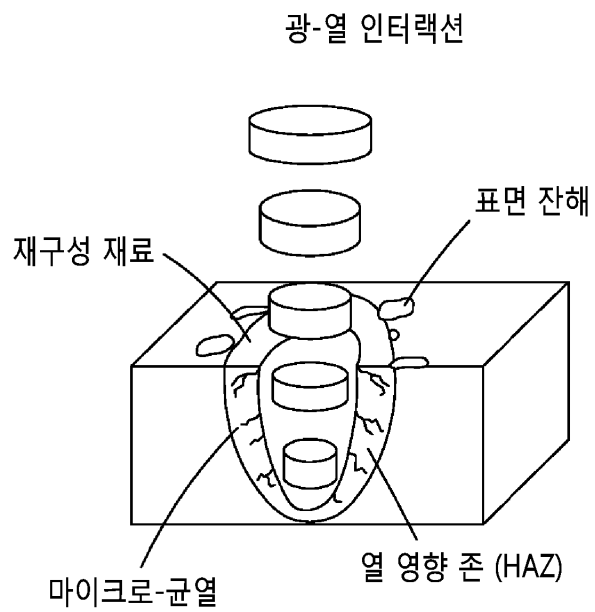
아르곤 - 1 GW/cm²

도면16n

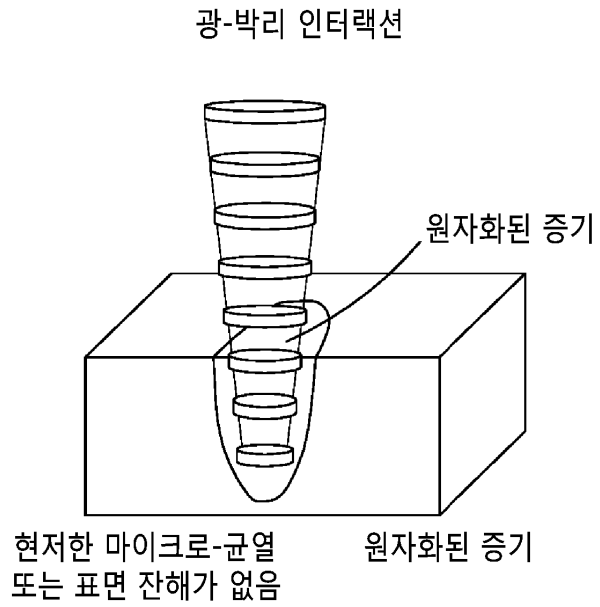


아르곤 - 1.5 GW/cm²

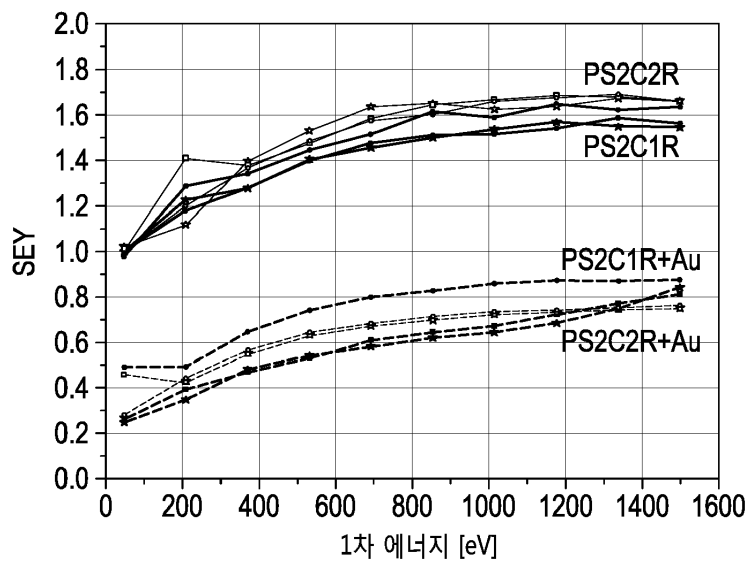
도면17a



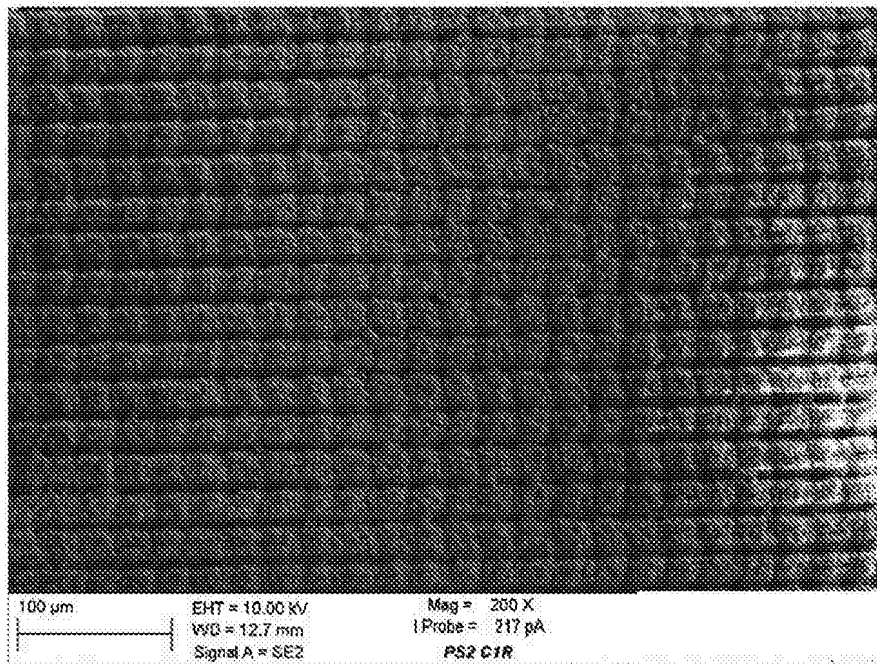
도면17b



도면18



도면19



도면20

