



(19) 대한민국특허청(KR)

(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2022년04월08일

(11) 등록번호 10-2384041

(24) 등록일자 2022년04월04일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)
C30B 15/04 (2006.01) *C30B 15/20* (2006.01)
C30B 29/06 (2006.01) *C30B 33/02* (2006.01)
H01L 21/02 (2006.01) *H01L 29/167* (2006.01)
H01L 29/32 (2006.01)
- (52) CPC특허분류
C30B 15/04 (2013.01)
C30B 15/203 (2013.01)
- (21) 출원번호 10-2020-7031461(분할)
(22) 출원일자(국제) 2015년07월29일
심사청구일자 2020년11월03일
(85) 번역문제출일자 2020년10월30일
(65) 공개번호 10-2020-0127271
(43) 공개일자 2020년11월10일
(62) 원출원 특허 10-2017-7005228
원출원일자(국제) 2015년07월29일
심사청구일자 2020년07월16일
(86) 국제출원번호 PCT/US2015/042714
(87) 국제공개번호 WO 2016/019051
국제공개일자 2016년02월04일
(30) 우선권주장
62/031,203 2014년07월31일 미국(US)
(56) 선행기술조사문헌
KR1020140018233 A*
JP2012241339 A*
JP2007162657 A*
*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

- (73) 특허권자
글로벌웨이퍼스 씨오., 엘티디.
중화민국, 타이완, 신주, 사이언스-베이스드 인터
스트리얼 파크, 인터스트리얼 이스트 로드 2, 넘
버 8
- (72) 발명자
사만타, 가우라브
미국 63376 미주리주 세인트 피터스 펠 드라이브
501
루, 체-웨이
대만 300 신주 사이언스-베이스드 인터스트리얼
파크 1 크리에이션 로드 넘버 2
(뒷면에 계속)
- (74) 대리인
양영준, 백만기

전체 청구항 수 : 총 17 항

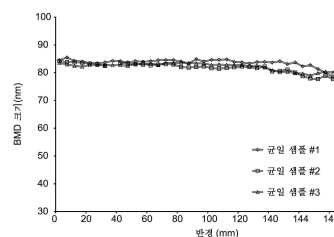
심사관 : 류동언

(54) 발명의 명칭 질소 도핑 및 공공 지배 실리콘 잉곳 및 그로부터 형성된, 반경방향으로 균일하게 분포된 산소 석출 밀도 및 크기를 갖는 열 처리 웨이퍼

(57) 요약

반경방향으로 실질적으로 균일하게 분포된 산소 석출물 밀도 및 크기를 가지며 유의한 에지 효과의 결여를 나타내는 후속 에피택셜 열 처리 웨이퍼를 제공하는, 질소-도핑 CZ 실리콘 결정 잉곳 및 그로부터 슬라이싱된 웨이퍼가 개시되어 있다. 용융된 실리콘으로부터의 인상 속도, 온도 구배 및 질소 농도를 제어함으로써 이러한 CZ 실

(뒷면에 계속)

대표도

리콘 결정 잉곳을 제조하는 방법이 또한 제공된다. 질소-도핑 CZ 실리콘 결정으로부터 슬라이싱된 후속 에피택셜 열 처리 웨이퍼의 반경방향 벌크 미세 결함 크기 분포, 반경방향 벌크 미세 결함 밀도 분포 및 산소 석출 밀도 분포를 시뮬레이션하는 방법이 또한 제공된다.

(52) CPC특허분류

C30B 29/06 (2013.01)

C30B 33/02 (2013.01)

H01L 21/02532 (2013.01)

H01L 21/02694 (2013.01)

H01L 29/167 (2013.01)

H01L 29/32 (2013.01)

(72) 발명자

차이, 평-치엔

대만 300 신주 사이언스-베이스드 인터스트리얼 파
크 1 크리에이션 로드 넘버 2

루, 정

미국 63376 미주리주 세인트 피터스 펄 드라이브
501

명세서

청구범위

청구항 1

질소-도핑 CZ 실리콘 결정 잉곳의 형성 방법으로서,

상기 실리콘 결정 잉곳을 용융된 실리콘으로부터 1.1 mm/분 내지 1.5 mm/분의 인상 속도로 인상시킴으로써 상기 질소-도핑 CZ 실리콘 결정 잉곳을 형성하는 단계 - 상기 질소-도핑 CZ 실리콘 결정 잉곳은 1300℃ 내지 1415℃의 평균 결정 표면 온도에서 10K/cm 내지 25K/cm의 표면 온도 구배를 가지며, 상기 실리콘 결정 잉곳은 1×10^{13} 개 원자/cm³ 내지 1×10^{15} 개 원자/cm³의 질소 농도를 갖고,

상기 질소-도핑 CZ 실리콘 결정 잉곳으로부터 슬라이싱되고, 780℃에서 3시간 동안, 그 후 1000℃에서 16시간 동안 열처리된 웨이퍼는:

- (1) 상기 웨이퍼의 에지까지 1000μm의 지점에서 상기 웨이퍼의 에지까지 연장되는 영역 내의 에지 밴드 - 상기 에지 밴드는 30nm 내지 100nm의 평균 직경 및 1×10^8 개 원자/cm² 내지 1×10^{10} 개 원자/cm²의 산소 석출 밀도를 갖는 산소 석출물을 포함함 -,
- (2) 상기 웨이퍼의 중심에서 상기 웨이퍼의 에지로 연장되는 영역에서 반경방향 벌크 미세 결함 크기의 20% 미만의 증가, 또는
- (3) 상기 웨이퍼의 중심에서 상기 웨이퍼의 에지로 연장되는 영역에서 반경방향 벌크 미세 결함 밀도의 200% 미만의 증가를 특징으로 하는, 질소-도핑 CZ 실리콘 결정 잉곳.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 웨이퍼는 상기 웨이퍼의 에지까지 10mm의 지점에서 상기 웨이퍼의 에지까지 연장되는 영역에서 반경방향 벌크 미세 결함 크기의 15% 미만의 증가를 갖는, 질소-도핑 CZ 실리콘 결정 잉곳.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 웨이퍼는 상기 웨이퍼의 에지까지 10mm의 지점에서 상기 웨이퍼의 에지로 연장되는 영역에서 반경방향 벌크 미세 결함 밀도의 100% 미만의 증가를 갖는, 질소-도핑 CZ 실리콘 결정 잉곳.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 에지 밴드는 1nm 내지 50nm의 평균 반경을 갖는 보이드를 포함하는, 질소-도핑 CZ 실리콘 결정 잉곳.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 질소-도핑 CZ 실리콘 결정 잉곳은 300mm의 직경을 갖는, 질소-도핑 CZ 실리콘 결정 잉곳.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 질소 농도는 3×10^{13} 개 질소 원자/cm³ 내지 2×10^{14} 개 질소 원자/cm³인, 질소-도핑 CZ 실리콘 결정 잉곳.

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 질소 농도는 1×10^{14} 개 질소 원자/cm³ 내지 1×10^{15} 개 질소 원자/cm³ 인, 질소-도핑 CZ 실리콘 결정 잉곳.

청구항 8

전방 표면, 후방 표면, 상기 전방 표면과 상기 후방 표면을 연결하는 원주방향 에지를 갖는 질소-도핑 단결정 실리콘 웨이퍼로서,

(a) 상기 질소-도핑 단결정 실리콘 웨이퍼는 150mm 내지 450mm의 직경을 갖고,

(b) 상기 질소-도핑 단결정 실리콘 웨이퍼는 1×10^{13} 개 질소 원자/cm³ 내지 1×10^{15} 개 질소 원자/cm³의 농도의 질소를 포함하고,

(c) 상기 질소-도핑 단결정 실리콘 웨이퍼는 상기 웨이퍼의 에지로부터 4000 μ m의 지점에서 상기 웨이퍼의 에지까지 연장되는 영역 내의 에지 밴드를 갖고, 상기 에지 밴드 영역의 BMD 밀도는 상기 웨이퍼의 나머지 부분과 200% 이하만큼 차이가 나고,

(d) 상기 웨이퍼의 중심에서 상기 웨이퍼의 에지로 연장되는 영역에서 반경방향 벌크 미세 결함 크기의 증가는 20% 미만인, 질소-도핑 단결정 실리콘 웨이퍼.

청구항 9

제8항에 있어서,

상기 웨이퍼는 상기 웨이퍼의 에지까지 10mm의 지점에서 상기 웨이퍼의 에지로 연장되는 영역에서 반경방향 벌크 미세 결함 밀도의 100% 미만의 증가를 갖는, 질소-도핑 단결정 실리콘 웨이퍼.

청구항 10

제8항에 있어서,

상기 웨이퍼는 상기 웨이퍼의 에지까지 10mm의 지점에서 상기 웨이퍼의 에지로 연장되는 영역에서 반경방향 벌크 미세 결함 크기의 15% 미만의 증가를 갖는, 질소-도핑 단결정 실리콘 웨이퍼.

청구항 11

제8항에 있어서,

상기 웨이퍼는 상기 웨이퍼의 에지까지 1000 μ m의 지점에서 상기 웨이퍼의 에지까지 연장되는 영역 내의 에지 밴드를 더 포함하고, 상기 에지 밴드는 30nm 내지 100nm의 평균 직경 및 1×10^8 개 원자/cm³ 내지 1×10^{10} 개 원자/cm³의 산소 석출 밀도를 갖는 산소 석출물을 포함하는, 질소-도핑 단결정 실리콘 웨이퍼.

청구항 12

제8항에 있어서,

상기 웨이퍼의 에지까지 1000 μ m의 지점에서 상기 웨이퍼의 에지까지 연장되는 영역 내의 에지 밴드를 더 포함하고, 상기 에지 밴드는 1nm 내지 50nm의 평균 반경을 갖는 보이드를 포함하는, 질소-도핑 단결정 실리콘 웨이퍼.

청구항 13

제8항에 있어서,

상기 직경은 300mm인, 질소-도핑 단결정 실리콘 웨이퍼.

청구항 14

제8항에 있어서,

상기 질소 농도는 3×10^{13} 개 질소 원자/cm³ 내지 2×10^{14} 개 질소 원자/cm³ 인, 질소-도핑 단결정 실리콘 웨이퍼.

청구항 15

제8항에 있어서,

상기 질소 농도는 1×10^{14} 개 질소 원자/cm³ 내지 1×10^{15} 개 질소 원자/cm³ 인, 질소-도핑 단결정 실리콘 웨이퍼.

청구항 16

제8항에 있어서,

상기 질소-도핑 단결정 실리콘 웨이퍼의 상기 전방 표면과 계면 접촉하는 실리콘 산화물 또는 실리콘 질화물을 포함하는 층; 및

상기 실리콘 산화물 또는 실리콘 질화물을 포함하는 상기 층과 계면 접촉하는 디바이스 층

을 더 포함하는 질소-도핑 단결정 실리콘 웨이퍼.

청구항 17

제8항에 있어서,

상기 질소-도핑 단결정 실리콘 웨이퍼의 상기 전방 표면과 계면 접촉하는 에피텍셜 층을 더 포함하는 질소-도핑 단결정 실리콘 웨이퍼.

발명의 설명

기술 분야

배경 기술

[0001] 관련 출원의 상호 참조

[0002] 본 출원은 2014년 7월 31일에 출원된 미국 가출원 62/031,203을 우선권 주장한다.

[0003] 배경기술

[0004] 본 개시내용의 분야는 일반적으로 전자 부품의 제조에 사용되는 반도체 공정용 단결정 실리콘 및 그의 제조 방법에 관한 것이다. 보다 구체적으로, 본 개시내용은 질소로 도핑되고, 반경방향으로 균일하게 분포된 산소 석출물 밀도 및 크기를 가지며 유의한 에지 효과의 결여를 나타내는 열 처리 실리콘 웨이퍼를 제공하는, 공공 (vacancy) 지배 단결정 실리콘 잉곳 및 그로부터 슬라이싱된 웨이퍼에 관한 것이다.

[0005] 그로부터 단결정 실리콘 웨이퍼가 수득될 수 있는, 단결정 실리콘은 보통 소위 초크랄스키 (Czochralski; "CZ") 방법에 의해 제조된다. 이 방법에서는, 다결정 실리콘 ("폴리실리콘")이 도가니에 충전되어 용융되고, 씨결정이 용융된 실리콘과 접촉하게 된 다음, 느린 추출에 의해 단결정이 성장한다. 네크(neck)의 형성이 완료된 후에, 결정의 직경은 인상 속도(pull rate) 및/또는 용융물 온도의 감소에 의해, 목적하는 또는 표적 직경에 도달할 때까지 커진다. 그 후에, 감소하는 용융물 수준에 대하여 보상하면서 인상 속도 및 용융물 온도를 제어함으로써 대략적으로 변함없는 직경을 갖는 결정의 원통형 본체가 성장한다. 성장 공정이 거의 끝나가지만, 도가니의 용융된 실리콘이 없어지기 전까지, 결정의 직경은 전형적으로 서서히 감소하여 엔드콘(end-cone)을 형성한다. 전형적으로, 엔드콘은 결정 인상 속도 및 도가니에 공급되는 열을 증가시킴으로써 형성된다. 직경이 충분히 작아지게 되면, 결정이 용융물로부터 분리된다.

[0006] 결정 성장 챔버에서 고체화 후에 결정이 냉각될수록 단결정 실리콘에 다수의 결함이 형성된다는 것이 알려져 있다. 이러한 결함은 부분적으로, 결정 격자 공공 ("V") 및 실리콘 자기-침입형 ("I")으로서 공지된 과량의 (즉, 용해도 한계 초과)의 농도) 고유 점 결함의 존재 때문에 발생한다. 고유 점 결함의 유형 및 초기 농도는 고체화 시에 결정되고, 이들 농도가 시스템에서의 임계 과포화 수준에 도달하고 점 결함의 이동성이 충분히 높다면, 반응 또는 응집 사건이 발생할 가능성이 높을 것이다. 산소 석출물과 같은 벌크 미세 결함 ("BMD")을 포함하는,

실리콘에서의 응집된 고유 점 결함은 복잡한 고 집적 회로의 제조에서 재료의 항복 전위에 영향을 줄 수 있다.

[0007]

응집된 공공형 결함은 D-결함, 플로우 패턴 결함 (Flow Pattern Defect; FPD), 결정 유래 입자 (Crystal Originated Particle; COP) 결함, 결정 유래 광점 결함 (Light Point Defect; LPD)과 같은 관찰가능한 결정 결함 뿐만 아니라, 적외선 산란 기술, 예컨대 적외선 주사 현미경법 및 레이저 주사 단층촬영법에 의해 관찰되는 특정 부류의 벌크 결함을 포함한다. 산소 석출물은 잉곳의 성장 중에 형성된 산소 석출 핵으로부터 생성된다. 보다 구체적으로, 산소 석출 핵은 전자 장치 제작과 연관된 후속 열 가공 동안의 산소 석출물의 형성을 위해 필요하다. 산소 석출물은 웨이퍼의 벌크에서 표면으로부터 떨어진 곳에서 금속성 불순물을 포획하는 게터링 (gettering) 자리로서 작용한다. 금속성 불순물의 게터링 능력이 없으면, 웨이퍼의 전자 특성이 불리하게 영향을 받을 수 있는데; 예를 들면, 웨이퍼가 단축된 소수 반송자 수명, p-n 접합부에서의 전류 누설, 유전 상수 불연속성 및 감소한 절연과파 강도를 가질 수 있다. 반도체 장치의 제작에서, 산소 석출과 관련된 항복 특성의 열화를 피함과 동시에, 실리콘 웨이퍼의 벌크에서의 산소 석출로부터의 적절하고 강력한 게터링 능력에 대한 요구가 점점 증가하고 있다.

[0008]

질소-도핑 실리콘 결정이 제조되고 있으며, 대체로 공극 크기 분포에 있어서의 질소-유래 감소로 인해 다양한 적용분야에서 사용되고 있다. 공공 채움을 통해 작용하는, 질소는 결정의 공공 영역에서의 점 결함 형성에 영향을 주고, 본질적으로 공극 형성을 보다 낮은 온도로 변동시키고, 공극 밀도를 증가시키고, 공극 크기를 감소시키는 것으로 생각된다. 질소 도핑 결정에서의 공공 채움 효과 때문에, 산소 석출이 비-질소 도핑 결정에서보다 높은 밀도 및 거대한 크기로 발생한다. 연마, 에피(Epi), 및 어닐링 웨이퍼에서 뿐만 아니라, 소비자의 적용시에 결함을 생성하지 않으면서 만족스러운 BMD 능력을 달성하기 위해, 열 처리 후에 웨이퍼는 바람직하게는 산소 석출의 실질적으로 균일한 반경방향 밀도 및 크기 분포를 나타낸다. 일부 진보된 반도체 장치 제작에서, 이러한 높은 밀도로의 거대한 석출이 실질적으로 균일하게 분포되지 않아 다양한 이유로 문제가 될 수 있다. 특히, 질소 도핑 실리콘 결정으로부터 슬라이싱된 웨이퍼는 전형적으로 열 처리 후에 웨이퍼의 에지 부분에서 BMD 크기 및 밀도 프로파일의 증가를 나타낸다. 임의의 특정 이론에 구애됨이 없이, 질소는 공공과 강력하게 결합하고, 질소 농도가 낮을수록 자유 공공이 보다 많아질 것이고, 결국에는 공극의 형성에 유리한 것으로 생각된다. 그 결과, 산소 석출물은 결정의 에지와 비교하여 결정의 내부 영역에서 보다 작아지고 밀도가 감소하는데, 여기서 표면-유래 효과의 존재로 인해, 산소 석출물 크기 및 밀도가 증가하는 경향이 있고, 이를 "에지 효과"라 한다.

[0009]

에지 효과로, BMD 크기 및 밀도 프로파일은 질소-도핑 CZ 실리콘 결정으로부터 슬라이싱된 선행기술의 웨이퍼의 에지 부분에서 특징적으로 증가하는 경향이 있다. 도 1 및 2에 도시된 바와 같이, 약 50°C/cm의 온도 차이에서 약 0.78 mm/분의 인상 속도로 성장된 질소-도핑 CZ 실리콘 결정으로부터 슬라이싱된 2종의 선행기술의 300 mm 직경 웨이퍼의 분석이 나타나 있다. 결정은 에피의 경우에 1130°C에서 어닐링되고, 석출의 특징화를 위해 3시간 동안의 780°C에서의 제1 단계 및 16시간 동안의 1000°C에서의 제2 단계의 2-단계 열 사이클을 갖는다. 산소 농도는 10 내지 11 ppma의 범위이고, 질소 농도는 3×10^{13} 내지 2×10^{14} 개 원자/cm³이다. 도 1 및 2에 도시된 바와 같이, 2종의 웨이퍼의 분석은 BMD 크기 및 밀도가 웨이퍼의 에지에서 반경방향으로 5 밀리미터 내에서 약 300% 증가하였음을 보여준다.

[0010]

응집된 고유 점 결함의 문제를 처리하는 하나의 접근법은 잉곳이 "공공 지배"이도록 하기 위해 (즉, 공공이 우세한 고유 점 결함인 실리콘) 실리콘 결정 잉곳을 고속으로 성장시킨 다음, 공공 지배 단결정 실리콘 웨이퍼의 표면 상에 실리콘의 얇은 결정 층을 에피택셜(epitaxial) 방식으로 증착시킴으로써, 응집된 공공 결함을 효과적으로 채우거나 또는 피복시키는 것을 포함한다. 에피택셜 증착 공정은 전형적으로 화학적 증기 증착 공정을 포함하는데, 여기서 단결정 실리콘 웨이퍼는 약 1150°C의 온도로 급속 가열되고, 그 동안에 기체성 실리콘 화합물이 웨이퍼 표면 위를 통과하여, 응집된 공공 결함이 실질적으로 존재하지 않는 실리콘 층이 증착된다. 에피택셜 증착 공정은 전형적으로 잉곳의 성장 중에 형성된 산소 석출 핵을 소멸시킨다. 에피택셜 증착 중에 산소 석출 핵이 소멸되는 문제를 처리하는 하나의 방법은 산소 석출 핵을 급속 열 에피택셜 증착 공정에 대하여 안정화하기 위한 연장된 열 어닐링 공정 (예를 들어, 약 800°C에서의 약 4시간에 이어서, 약 1000°C에서의 10시간)이다. 이 방법은 처리율을 감소시키고 실리콘 웨이퍼의 제조 비용을 상당히 증가시키는 문제가 있다.

[0011]

쿨카르니(Kulkarni) (US 8,216,362)는 CZ 실리콘 결정에서의 공공의 측방 표면 유래 응집 및 산소 클러스터링 문제를 다루었다. 그러나, 개시된 방법은 침입형 지배 체제에서 공공 지배 체제로의 전이를 위해 보론코브(Voronkov) 이론에 따른 임계 인상 속도에 가까운 인상 속도로의 공공의 측방 혼입 제어에 초점을 맞추었다. 따라서, 쿨카르니에 의해 개시된 인상 속도는 비교적 느리다. 보론코브 모델 또는 이론에 따르면, 용융물/결정

계면 근처에서의 온도장은 점 결함의 재결합을 추진하여, 각각의 평형 농도로 존재하는 용융물/결정 계면으로부터 결정 벌크로의 확산을 위한 추진력을 제공한다. 확산과 대류 둘 모두에 의한 점 결함의 이동과, 그의 재결합 사이의 상호작용이 재결합 길이라 명명되는, 계면으로부터의 짧은 거리 이상에서 점 결함 농도를 확립한다. 전형적으로, 과량의 점 결함 농도라 명명되는, 재결합 길이 이상에서의 공공 농도와 침입형 농도 사이의 차이는 결정의 측방 표면으로부터 떨어진 곳에서 본질적으로 고정되어 유지된다. 급속 인상된 결정에서, 재결합 길이 이상으로의 확산에 의한 점 결함의 공간적 재분포는 일반적으로 중요하지 않으나, 점 결함의 싱크(sink) 또는 기원으로서 작용하는 결정의 측방 표면에 가까운 영역은 예외로 한다. 따라서, 재결합 길이 이상에서의 과량의 점 결함 농도가 양수라면, 공공은 과량으로 유지되고, 보다 낮은 온도에서 응집되어 D-결함 (8면체 공공으로서 동정되는 공공 응집체)을 형성한다. 과량의 점 결함 농도가 음수라면, 침입형이 우세한 점 결함으로 남아있고, 응집되어 A-결함 (A 스윙(swirl) 결함이라 명명되는 전위 루프) 및 B-결함 (B 스윙 결함이라 명명되는 구형 침입형 클러스터)을 형성한다. 과량의 점 결함 농도가 어떤 검출 임계값 미만이라면, 검출가능한 미세결함이 형성되지 않는다. 따라서, 전형적으로, 결정 미세결함(grown-in microdefect)의 유형이 결정된다. 그러므로, 전형적으로, 결정 미세결함의 유형은 단순히 재결합 길이 이상에서 확립된 과량의 점 결함 농도에 의해 결정된다. 과량의 점 결함 농도를 확립하는 과정을 초기 혼입이라 하고, 우세한 점 결함의 종류를 혼입된 우세한 점 결함이라 한다. 혼입된 점 결함의 유형은 결정 인상 속도 (v) 대 계면 근처에서의 측방향 온도 구배 크기 (G)의 비율에 의해 결정된다. v/G 가 클수록, 점 결함의 대류가 확산보다 지배적이고, 공공이 혼입된 우세한 점 결함으로서 남아있는데, 그 이유는 계면에서의 공공 농도가 침입형 농도보다 높기 때문이다. 보다 작은 v/G 에서는, 확산이 대류보다 지배적이어서, 우세한 점 결함으로서 신속히 확산되는 침입형의 확산을 허용한다. v/G 가 그의 임계값에 가까우면, 두 종류의 점 결함이 모두 매우 낮은 유사한 농도로 혼입되어, 서로를 상호 소멸시키고 그에 따라 보다 낮은 온도에서의 임의의 미세결함의 잠재적인 형성을 억제한다. 관찰되는 공간적 미세결함 분포는 전형적으로 G 의 반경방향 불균일성 및 v 의 측방향 변화에 의해 야기되는 v/G 의 변화에 의해 설명될 수 있다. 반경방향 미세결함 분포의 하나의 특징은 산화물 입자가 임계 v/G 보다 약간 높은 좁은 범위의 v/G 에서, 비교적 낮은 혼입 공공 농도의 영역에서 산소와 공공의 상호작용을 통해 형성된다는 것이다. 이들 입자는 OSF (산화-유래 적층 결함) 고리로서 열적 산화에 의해 나타날 수 있는 좁은 공간적 밴드를 형성한다.

[0012] 쿨카르니는 추가로 측방 혼입 효과가 계면 형상 조작 및 냉각 속도의 변화에 의해 제어될 수 있음을 시사하였다. 특히, 편평한 표면으로부터의 계면 형상의 편차를 고려하여 수정된 G 값을 나타내는 $G_{보정}$ 값이 계산된다. 추가로, 주어진 잉곳 세그먼트의 냉각 속도가 증가할수록, 응집된 결함의 개수 밀도가 증가하고, 반면에 응집된 결함의 크기가 감소한다. 잉곳 세그먼트의 냉각 속도가 충분히 빠르다면, 응집된 결함의 형성을 본질적으로 피할 수 있다. 계면 형상 조작 또는 냉각 속도 변화가 목적하는 (i) 공공 반경 및 밀도의 반경방향 균일성, (ii) 결정 반경방향 위치의 함수로서 BMD 직경 및 밀도의 반경방향 균일성, 및 (iii) 에지 효과의 실질적인 부재를 달성하는데 있어서 충분하지 않다는데 문제가 있다.

[0013] 장치 제작의 신규 기술이 출현하고 장치의 크기 및 구조가 계속해서 작아지고 더욱 복잡해질수록, 에피택셜 웨이퍼에서의 BMD의 제어되는 크기 및 밀도의 반경방향 균일성을 달성하는 것이 바람직하다. 따라서, 반경방향으로 균일하게 분포된 산소 석출물 밀도 및 크기를 나타내고 산소 석출물의 에지 밴드가 제어되는 질소 도핑 실리콘 웨이퍼가 요구된다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0014] 간략하게 설명하면, 본 개시내용은 질소-도핑 CZ 실리콘 결정 잉곳의 제조 방법에 관한 것이다. 상기 방법은 실리콘 결정 잉곳을 용융된 실리콘으로부터 약 0.85 mm/분 내지 약 1.5 mm/분의 인상 속도로 인상시킴으로써 질소-도핑 CZ 실리콘 결정 잉곳을 형성하는 것을 포함하고, 여기서 실리콘 결정 잉곳은 약 10° K/cm 내지 약 35° K/cm의 표면 온도 구배를 가지며, 또한 실리콘 결정 잉곳은 약 1×10^{13} 개 원자/cm³ 내지 약 1×10^{15} 개 원자/cm³의 질소 농도를 갖는다.

[0015] 본 개시내용은 추가로 질소-도핑 CZ 실리콘 결정 잉곳에 관한 것이다. 잉곳은 약 150 mm 내지 약 450 mm의 직경을 가지며 약 1×10^{13} 개 질소 원자/cm³ 내지 약 1×10^{15} 개 질소 원자/cm³의 질소 농도를 갖는다. 실리콘 결정 잉곳으로부터 슬라이싱되고 780°C에서 3시간 동안, 이어서 1000°C에서 16시간 동안 열 처리된 웨이퍼는 상기 웨이퍼의 중심으로부터 상기 웨이퍼의 에지로 연장되는 영역에서 반경방향 벌크 미세 결함 크기의 20% 미만의 증가

를 특징으로 한다.

[0016] 본 개시내용은 또한 추가로 질소-도핑 CZ 실리콘 결정 잉곳에 관한 것이다. 잉곳은 약 150 mm 내지 약 450 mm의 직경을 가지며 약 1×10^{13} 개 질소 원자/cm³ 내지 약 1×10^{15} 개 질소 원자/cm³를 포함한다. 실리콘 결정 잉곳으로부터 슬라이싱되고 780℃에서 3시간 동안, 이어서 1000℃에서 16시간 동안 열 처리된 웨이퍼는 상기 웨이퍼의 중심으로부터 상기 웨이퍼의 에지로 연장되는 영역에서 반경방향 벌크 미세 결함 밀도의 200% 미만의 증가를 특징으로 한다.

[0017] 본 개시내용은 또한 추가로 질소-도핑 CZ 실리콘 결정 잉곳에 관한 것이다. 잉곳은 약 150 mm 내지 약 450 mm의 직경을 가지며 약 1×10^{13} 개 질소 원자/cm³ 내지 약 1×10^{15} 개 질소 원자/cm³를 포함한다. 실리콘 결정 잉곳으로부터 슬라이싱되고 780℃에서 3시간 동안, 이어서 1000℃에서 16시간 동안 열 처리된 웨이퍼는 상기 웨이퍼의 에지까지의 약 1000 μm 지점으로부터 상기 웨이퍼의 에지로 연장되는 영역에서 에지 밴드를 가지며, 에지 밴드는 약 30 nm 내지 약 100 nm의 평균 직경 및 약 1×10^8 개 원자/cm³ 내지 약 1×10^{10} 개 원자/cm³의 산소 석출 밀도를 갖는 산소 석출물을 포함한다.

[0018] 본 개시내용의 일부 특정 실시양태에서, 연마 및 에피택셜 웨이퍼가 상기에 언급된 임의의 질소-도핑 CZ 실리콘 결정 잉곳으로부터 제조된다. 웨이퍼는 CZ 실리콘 단결정 잉곳으로부터 슬라이싱된 단결정 CZ 실리콘 웨이퍼로서, 전방 표면, 후방 표면, 전방 표면과 후방 표면 사이의 중심 평면, 전방 표면과 후방 표면을 연결하는 원주 방향 에지, 중심 평면에 대하여 수직인 중심 축, 및 중심 평면과 전방 표면 사이에 웨이퍼 영역을 포함하는 벌크 층을 포함한다.

[0019] 본 개시내용의 다른 측면에서, 질소-도핑 CZ 실리콘 결정으로부터 슬라이싱되고 780℃에서 3시간 동안, 이어서 1000℃에서 16시간 동안 열 처리된 웨이퍼에서의 반경방향 벌크 미세 결함 크기 분포, 반경방향 벌크 미세 결함 밀도 분포 및 산소 석출 밀도 분포를 시뮬레이션하는 방법이 제공된다. 상기 방법은 메모리에 커풀링된 프로세서를 포함하는 연산 장치에 의해 실행되며, (1) 연산 장치에 의해, 적어도 (i) CZ 실리콘 결정 직경, (ii) CZ 실리콘 결정 인상 속도 또는 CZ 실리콘 결정 인상 속도 범위, (iii) CZ 실리콘 결정 질소 농도 또는 CZ 실리콘 결정 질소 농도 범위 및 (iv) CZ 실리콘 결정 표면 온도 구배 또는 CZ 실리콘 결정 표면 온도 구배 범위에 대한 값을 입력하고, 연산 장치에 의해, 입력 값에 기반하여 상기 웨이퍼의 중심으로부터 상기 웨이퍼의 에지로 연장되는 영역에서의 열 처리된 웨이퍼의 반경방향 벌크 미세 결함 크기 분포를 시뮬레이션하고; (2) 연산 장치에 의해, 적어도 (i) CZ 실리콘 결정 직경, (ii) CZ 실리콘 결정 인상 속도 또는 CZ 실리콘 결정 인상 속도 범위 및 (iii) CZ 실리콘 결정 질소 농도 또는 CZ 실리콘 결정 질소 농도 범위에 대한 값을 입력하고, 연산 장치에 의해, 입력 값에 기반하여 상기 웨이퍼의 중심으로부터 상기 웨이퍼의 에지로 연장되는 영역에서의 열 처리된 웨이퍼의 반경방향 벌크 미세 결함 밀도 분포를 시뮬레이션하고; (3) 연산 장치에 의해, 적어도 (i) CZ 실리콘 결정 직경, (ii) CZ 실리콘 결정 인상 속도 또는 CZ 실리콘 결정 인상 속도 범위, (iii) CZ 실리콘 결정 질소 농도 또는 CZ 실리콘 결정 질소 농도 범위 및 (iv) CZ 실리콘 결정 표면 온도 구배 또는 CZ 실리콘 결정 표면 온도 구배 범위에 대한 값을 입력하고, 연산 장치에 의해, 상기 웨이퍼의 중심으로부터 상기 웨이퍼의 에지로 연장되는 영역에서의 열 처리된 웨이퍼의 산소 석출 밀도 분포를 시뮬레이션하는 것을 포함하는, 시뮬레이션 계획의 적어도 한번의 반복을 완료하는 것을 포함한다. CZ 실리콘 결정은 약 150 mm 내지 약 450 mm의 직경을 가지며, 약 1×10^{13} 개 질소 원자/cm³ 내지 약 1×10^{15} 개 질소 원자/cm³를 포함하고, 열 처리된 웨이퍼는 상기 웨이퍼의 에지까지의 약 1000 μm 지점으로부터 상기 웨이퍼의 에지로 연장되는 영역에서 에지 밴드 영역을 갖는다. (i) 상기 웨이퍼의 중심으로부터 상기 웨이퍼의 에지로 연장되는 영역에서의 반경방향 벌크 미세 결함 크기 분포의 20% 미만의 증가 및/또는 (ii) 상기 웨이퍼의 중심으로부터 상기 웨이퍼의 에지로 연장되는 영역에서의 반경방향 벌크 미세 결함 밀도 분포의 200% 미만의 증가를 갖는 열 처리된 웨이퍼를 제조하기 위한 조건을 제공하는, CZ 실리콘 결정 인상 속도 또는 CZ 실리콘 결정 인상 속도 범위, CZ 실리콘 결정 질소 농도 또는 CZ 실리콘 결정 질소 농도 범위, 및 CZ 실리콘 결정 표면 온도 구배 또는 CZ 실리콘 결정 표면 온도 구배 범위의 조합이 시뮬레이션으로부터 유도된다.

[0020] 본 개시내용의 또 다른 추가 측면에서, 질소-도핑 CZ 실리콘 결정으로부터 슬라이싱되고 780℃에서 3시간 동안, 이어서 1000℃에서 16시간 동안 열 처리된 웨이퍼에서의 산소 석출물의 에지 밴드를 제어하는 방법이 제공된다. 상기 방법은 메모리에 커풀링된 프로세서를 포함하는 연산 장치에 의해 실행된다. 상기 방법은 연산 장치에 의한 시뮬레이션에 의해, 용융된 실리콘으로부터 CZ 공정에 의해 CZ 실리콘 결정 잉곳의 제조를 가능하게 하는 (i) CZ 실리콘 결정 직경, (ii) CZ 실리콘 결정 인상 속도 또는 CZ 실리콘 결정 인상 속도 범위, (iii) CZ 실리콘

콘 결정 질소 농도 또는 CZ 실리콘 결정 질소 농도 범위, 및 (iv) CZ 실리콘 결정 표면 온도 구배 또는 CZ 실리콘 결정 표면 온도 범위의 조합을 결정하는 것을 포함하고, 여기서 상기 웨이퍼의 웨지까지의 약 1000 μm 지점으로부터 상기 웨이퍼의 에지로 연장되는 영역에서 에지 밴드 영역을 갖는 슬라이싱된 열 처리 웨이퍼는 약 30 nm 내지 약 100 nm의 평균 직경을 갖는 산소 석출물을 특징으로 한다. CZ 실리콘 결정은 약 150 mm 내지 약 450 mm의 직경을 가지며, CZ 실리콘 결정에서의 질소 농도는 약 1×10^{13} 개 원자/ cm^3 내지 약 1×10^{15} 개 원자/ cm^3 이다. 시뮬레이션은 (1) 연산 장치에 의해, 적어도 (i) CZ 실리콘 결정 직경, (ii) CZ 실리콘 결정 인상 속도 또는 CZ 실리콘 결정 인상 속도 범위, (iii) CZ 실리콘 결정 질소 농도 또는 CZ 실리콘 결정 질소 농도 범위 및 (iv) CZ 실리콘 결정 표면 온도 구배 또는 CZ 실리콘 결정 표면 온도 구배 범위에 대한 값을 입력하고, 연산 장치에 의해, 입력 값에 기반하여 상기 웨이퍼의 중심으로부터 상기 웨이퍼의 에지로 연장되는 영역에서의 열 처리된 웨이퍼의 반경방향 벌크 미세 결함 크기 분포를 시뮬레이션하고; (2) 연산 장치에 의해, 적어도 (i) CZ 실리콘 결정 직경, (ii) CZ 실리콘 결정 인상 속도 또는 CZ 실리콘 결정 인상 속도 범위 및 (iii) CZ 실리콘 결정 질소 농도 또는 CZ 실리콘 결정 질소 농도 범위에 대한 값을 입력하고, 연산 장치에 의해, 입력 값에 기반하여 상기 웨이퍼의 중심으로부터 상기 웨이퍼의 에지로 연장되는 영역에서의 열 처리된 웨이퍼의 반경방향 벌크 미세 결함 밀도 분포를 시뮬레이션하고; (3) 연산 장치에 의해, 적어도 (i) CZ 실리콘 결정 직경, (ii) CZ 실리콘 결정 인상 속도 또는 CZ 실리콘 결정 인상 속도 범위, (iii) CZ 실리콘 결정 질소 농도 또는 CZ 실리콘 결정 질소 농도 범위 및 (iv) CZ 실리콘 결정 표면 온도 구배 또는 CZ 실리콘 결정 표면 온도 구배 범위에 대한 값을 입력하고, 연산 장치에 의해, 상기 웨이퍼의 중심으로부터 상기 웨이퍼의 에지로 연장되는 영역에서의 열 처리된 웨이퍼의 산소 석출 밀도 분포를 시뮬레이션하고; (4) 연산 장치에 의해, (i) 상기 웨이퍼의 중심으로부터 상기 웨이퍼의 에지에서의 열 처리된 웨이퍼의 반경방향 벌크 미세 결함 크기 분포, (ii) 상기 웨이퍼의 중심으로부터 상기 웨이퍼의 에지에서의 열 처리된 웨이퍼의 반경방향 벌크 미세 결함 밀도 분포, 및 (iii) 상기 웨이퍼의 중심으로부터 상기 웨이퍼의 에지로 연장되는 영역에서의 열 처리된 웨이퍼의 밀도 분포에 대한 시뮬레이션 값에 기반하여 열 처리된 웨이퍼의 에지 밴드 산소 석출물의 평균 크기를 시뮬레이션하는 것을 포함하는, 시뮬레이션 계획의 적어도 한번의 반복을 포함하고, 여기서 연산 장치는 시뮬레이션에 의해 약 30 nm 내지 약 100 nm의 평균 직경을 갖는 산소 석출물을 포함하는 열 처리된 웨이퍼의 에지 밴드를 예측한다. CZ 실리콘 결정은 그로부터 처리 웨이퍼가 제조되는 질소-도핑 CZ 실리콘 결정을 제조하는, CZ 실리콘 결정 인상 속도 또는 CZ 실리콘 결정 인상 속도 범위, CZ 실리콘 결정 질소 농도 또는 CZ 실리콘 결정 질소 농도 범위, 및 CZ 실리콘 결정 표면 온도 구배 또는 CZ 실리콘 결정 표면 온도 범위의 시뮬레이션 값으로 용융된 실리콘으로부터 인상된다.

도면의 간단한 설명

[0021]

도 1은 결정 에지에서 증가한 BMD 크기를 나타내는, CZ 결정으로부터 슬라이싱된 선행기술의 질소 도핑 300 mm 직경 열 처리 웨이퍼의 반경방향 BMD 크기 (직경) 분포를 보여주는 그래프이다.

도 2는 결정 에지에서 증가한 BMD 밀도를 나타내는, CZ 결정으로부터 슬라이싱된 선행기술의 질소 도핑 300 mm 직경 열 처리 웨이퍼의 반경방향 BMD 밀도 프로파일 분포를 보여주는 그래프이다.

도 3은 30 cm 직경의 CZ 실리콘 결정의 결정 단면에 걸쳐서 결정 반경방향 위치의 함수로서 성장(as-grown) 결정 클러스터의 반경에 대한 인상 속도의 예측 효과를 보여주는 그래프이다.

도 4는 30 cm 직경의 CZ 실리콘 결정의 결정 단면에 걸쳐서 결정 반경방향 위치의 함수로서 성장 공극 (공공 클러스터)의 반경에 대한 인상 속도의 예측 효과를 보여주는 그래프이다.

도 5는 1100°C에서 수행된 일정한 고온 어닐링에 있어서 인상 속도의 함수로서 예측 평균 BMD 밀도를 보여주는 그래프이다.

도 6은 1000°C에서 수행된 일정한 고온 어닐링에 있어서 인상 속도의 함수로서 예측 평균 BMD 밀도를 보여주는 그래프이다.

도 7은 30 cm 직경의 CZ 실리콘 결정의 결정 단면에 걸쳐서 결정 반경방향 위치의 함수로서 성장 산소 석출물의 반경에 대한 질소 농도의 예측 효과를 보여주는 그래프이다.

도 8은 30 cm 직경의 CZ 실리콘 결정의 결정 단면에 걸쳐서 결정 반경방향 위치의 함수로서 성장 공극의 반경에 대한 질소 농도의 예측 효과를 보여주는 그래프이다.

도 9는 1100°C에서 수행된 일정한 고온 어닐링에 있어서 질소 농도의 함수로서 예측 평균 BMD 밀도를 보여주는 그래프이다.

도 10은 1100℃에서 수행된 일정한 고온 어닐링에 있어서 질소 농도의 함수로서 예측 평균 BMD 밀도를 보여주는 그래프이다.

도 11은 30 cm 직경의 CZ 실리콘 결정의 결정 단면에 걸쳐서 반경방향 위치의 함수로서 플롯팅된 성장 산소 석출물의 반경에 대한 결정 표면 온도 구배의 예측 효과를 보여주는 그래프이다.

도 12는 30 cm 직경의 CZ 실리콘 결정의 결정 단면에 걸쳐서 반경방향 위치의 함수로서 플롯팅된 성장 공극의 반경에 대한 결정 표면 온도 구배의 예측 효과를 보여주는 그래프이다.

도 13은 1100℃에서 수행된 일정한 고온 어닐링에 있어서 결정 표면 온도 구배의 함수로서 예측 평균 BMD 밀도를 보여주는 그래프이다.

도 14는 1000℃에서 수행된 일정한 고온 어닐링에 있어서 결정 표면 온도 구배의 함수로서 예측 평균 BMD 밀도를 보여주는 그래프이다.

도 15는 본 개시내용의 질소 도핑 300 mm 직경 CZ 결정 (조합 1-4) 및 선행기술의 질소 도핑 300 mm 직경 CZ 결정 (종래 (#0))의 결정 단면에 걸쳐서 반경방향 위치의 함수로서 성장 산소 석출물의 예측 반경을 보여주는 그래프이다.

도 16은 본 개시내용의 질소 도핑 300 mm 직경 CZ 결정 (조합 1-4) 및 선행기술의 질소 도핑 300 mm 직경 CZ 결정 (종래 (#0))의 결정 단면에 걸쳐서 반경방향 위치의 함수로서 성장 공극의 예측 반경을 보여주는 그래프이다.

도 17은 본 개시내용의 질소 도핑 300 mm 직경 CZ 결정 및 선행기술의 질소 도핑 300 mm 직경 CZ 결정의 1100℃에서 수행된 일정한 고온 어닐링에 있어서 결정 표면 온도 구배의 함수로서 예측 평균 BMD 밀도를 보여주는 그래프이다.

도 18은 본 개시내용의 질소 도핑 300 mm 직경 CZ 결정 및 선행기술의 질소 도핑 300 mm 직경 CZ 결정의 1000℃에서 수행된 일정한 고온 어닐링에 있어서 결정 표면 온도 구배의 함수로서 예측 평균 BMD 밀도를 보여주는 그래프이다.

도 19는 800℃에서의 어닐링 동안 0.024시간, 0.23시간, 0.51시간 및 1시간의 시점에서의, 6×10^{12} 개/cm³의 초기 총 공공 농도 (C_{vt}) 및 8×10^{17} 개 원자/cm³의 산소 농도 (C_0)를 갖는 질소 도핑되지 않은 웨이퍼의 깊이로 따른 예측 산화 석출물 밀도를 보여주는 그래프이다.

도 20은 800℃에서의 어닐링 동안 0.024시간, 0.23시간, 0.51시간 및 1시간의 시점에서의, 6×10^{12} 개/cm³의 초기 총 공공 농도 (C_{vt}) 및 8×10^{17} 개 원자/cm³의 산소 농도 (C_0)를 갖는 질소 도핑되지 않은 웨이퍼의 깊이로 따른 예측 총 공공 농도 (개수/cm³)를 보여주는 그래프이다.

도 21은 본 개시내용의 CZ 결정으로부터 슬라이싱된 질소 도핑 300 mm 직경 열 처리 웨이퍼의 결정 단면에 걸쳐서 반경방향 위치의 함수로서 평균 BMD 크기 (직경)를 보여주는 그래프이다.

도 22는 본 개시내용의 CZ 결정으로부터 슬라이싱된 질소 도핑 300 mm 직경 열 처리 웨이퍼의 결정 단면에 걸쳐서 반경방향 위치의 함수로서 BMD 밀도 프로파일을 보여주는 그래프이다.

도 23은 에지 밴드 벌크 미세 결함 크기 및 밀도를 시뮬레이션하고 평가하는 본 개시내용의 하나의 방법의 흐름도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0022] 본 개시내용에 따라서, 질소-도핑 CZ 단결정 실리콘 잉곳 및 그로부터 제조된 웨이퍼가 제공되는데, 잉곳은 결정 단면에 걸쳐서 결정 반경방향 위치의 함수로서 공공 반경 및 밀도의 실질적인 반경방향 균일성을 특징으로 하고, 그로부터 슬라이싱된 열 처리 웨이퍼는 결정 단면에 걸쳐서 결정 반경방향 위치의 함수로서 BMD 직경 및 밀도의 실질적인 반경방향 균일성을 특징으로 하며, 여기서 잉곳 및 웨이퍼는 에지 효과의 실질적인 부재를 나타낸다.

[0023] 추가로 본 개시내용에 따라서, 결정 단면에 걸쳐서 결정 반경방향 위치의 함수로서 공공 반경 및 밀도의 실질적

인 반경방향 균일성을 특징으로 하는 질소-도핑 CZ 단결정 실리콘 잉곳을 제조하고, 결정 단면에 걸쳐서 결정 반경방향 위치의 함수로서 BMD 직경 및 밀도의 실질적인 반경방향 균일성을 특징으로 하는 그로부터 슬라이싱된 열 처리 웨이퍼를 제공하는 방법이 제공되고, 여기서 웨이퍼는 에지 효과의 실질적인 부재를 나타내고, 상기 방법은 용융된 실리콘으로부터 CZ 공정으로 단결정 잉곳을 제조할 때 인상 속도, 표면 온도 구배 및 질소 농도를 제어하는 것을 포함한다.

[0024] 또한 추가로 본 개시내용에 따라서, 성장 질소-도핑 CZ 단결정 실리콘 잉곳에서의 공공의 응집 및 그로부터 슬라이싱된 웨이퍼에서의 다양한 열 처리 후의 산소 클러스터링을 시뮬레이션하는 방법이 제공되는데, 상기 시뮬레이션은 인상 속도, 질소 도핑 농도, 및 결정 표면 온도 구배를 포함하는 조합 변수에 기반하여 주어진 직경에 대한 BMD 크기 및 밀도 분포 및 에지 밴드 특징을 예측하는 알고리즘을 이용한다.

[0025] 본 개시내용의 다양한 측면 중 어느 하나에서, (i) 약 150 mm 내지 약 450 mm로부터 선택된 CZ 실리콘 결정 잉곳 또는 웨이퍼 직경, (ii) 약 1×10^{13} 내지 약 1×10^{15} 범위의 질소 농도, (iii) 약 0.4 mm/분 내지 약 1.5 mm/분 범위의 인상 속도 범위 서브세트, 및 (iv) 약 1300°C 내지 약 1415°C의 평균 결정 표면 온도에서 약 10° K/cm 내지 약 50° K/cm 범위의 표면 온도 구배 서브세트 범위의 조합을 선택함으로써, 임의의 주어진 직경에 대하여, (i) 상기 웨이퍼의 중심으로부터 상기 웨이퍼의 에지로 연장되는 영역에서의 반경방향 벌크 미세 결함 크기의 20% 미만의 증가, (ii) 상기 웨이퍼의 중심으로부터 상기 웨이퍼의 에지로 연장되는 영역에서의 반경방향 벌크 미세 결함 밀도의 200% 미만의 증가, 및 (iii) 에지 밴드 효과의 본질적인 부재 중 하나 이상을 특징으로 하는 도핑 질소 웨이퍼가 제공된다.

[0026] 본 개시내용의 실리콘 결정 잉곳 및 웨이퍼는 적어도 약 150 mm, 적어도 약 200 mm, 적어도 약 250 mm, 또는 적어도 약 300 mm, 예컨대 약 150 mm, 200 mm, 250 mm, 300 mm, 350 mm, 400 mm 또는 450 mm의 직경을 갖는다. 일부 측면에서, 직경은 약 300 mm이다. 실리콘 잉곳이 일반적으로 150 mm, 200 mm, 250 mm, 300 mm 또는 300 mm 초과, 예컨대 350 mm, 400 mm 또는 450 mm의 직경을 갖는 것으로 언급될 때, 정확한 직경은 공정에서의 미소한 변화로 인해 축방향 길이를 따라 어느 정도 달라질 수 있거나 또는 유사한 크기의 웨이퍼를 제조할 수 있는 잉곳을 성장시키기 위해 의도적으로 달라질 수 있다는 것을 주목해야 한다. 예를 들어, 관련 기술분야의 통상의 기술자에게 공지된 바와 같이, 300 mm 직경의 잉곳 또는 웨이퍼는 임의로 300 mm를 초과하는 직경, 예컨대 310 mm 또는 320 mm 또는 그 초과의 직경의 잉곳 또는 웨이퍼로부터 제조될 수 있고 잉곳 또는 웨이퍼의 직경을 감소시키기 위해 관련 기술분야에 공지된 임의의 공정, 예컨대 연삭에 의해 잉곳 또는 웨이퍼의 주변부로부터 후속 제거되는 부분을 가질 수 있다.

[0027] 본 개시내용의 잉곳으로부터 슬라이싱된 열 처리 웨이퍼는 웨이퍼의 중심으로부터 웨이퍼의 에지로 연장되는 영역에서 BMD 크기의 20% 미만의 증가 또는 웨이퍼의 에지까지의 약 10 mm 지점으로부터 웨이퍼의 에지로 연장되는 영역에서 벌크 미세 결함 크기의 15% 미만의 증가를 특징으로 한다. 웨이퍼는 추가로 웨이퍼의 중심으로부터 웨이퍼의 에지로 연장되는 영역에서 벌크 미세 결함 밀도의 200% 미만의 증가, 또는 웨이퍼의 에지까지의 약 10 mm 지점으로부터 웨이퍼의 에지로 연장되는 영역에서 벌크 미세 결함 밀도의 100% 미만의 증가를 특징으로 한다.

[0028] 본 개시내용의 일부 측면에서, 본 개시내용의 잉곳으로부터 슬라이싱된 열 처리 웨이퍼는 결정의 에지 (측방 표면)까지의 약 5000 μm , 4000 μm , 3000 μm , 2000 μm 또는 1000 μm 지점으로부터 결정의 에지로 연장되는 영역에서 연장되는 에지 밴드를 특징으로 한다. 에지 밴드는 약 30 nm 내지 약 100 nm의 평균 직경 및 약 1×10^8 개 원자/cm³ 내지 약 1×10^{10} 개 원자/cm³의 산소 석출 밀도를 갖는 산소 석출물 및 약 1 nm 내지 약 50 nm의 평균 반경을 갖는 공극을 특징으로 한다. 에지 밴드에서의 BDM 크기 및 밀도 분포는 중심 축으로부터 에지 밴드로 연장되는 영역에서의 분포와 실질적으로 유사하다. 본 개시내용의 일부 측면에서, 에지 밴드 반경방향 BMD 크기는 나머지 웨이퍼에서의 BMD 크기와 20% 이하로 상이하다. 본 개시내용의 일부 다른 측면에서, 에지 밴드 BMD 밀도는 나머지 웨이퍼에서의 BMD 밀도와 200% 이하로 상이하다.

[0029] 단결정 실리콘 잉곳은 표준 CZ 방법에 따라 성장시킬 수 있다. 단결정 실리콘 잉곳은 결정 성장로(puller)에서 성장된다. 예를 들어, U.S. 6,554,898 및 WO 99/27165 (두 건 모두 선에디슨 세미컨덕터 테크놀로지 프라이빗 리미티드(SunEdison Semiconductor Technology PTE. Ltd.)에 양도되었음)를 참조하며, 이들의 개시내용은 그 전문이 서술된 것처럼 본원에 포함된다. 전형적인 CZ 성장로는 하우징; 용융된 실리콘을 함유하는 하우징 내의 도가니; 성장하는 잉곳을 용융된 실리콘으로부터 상향 인상시키는 인상 메카니즘; 및 고체 실리콘 출발 재료 (즉, 다결정 과립 및/또는 청크 다결정을 포함하는 다결정 충전물)를 용융된 실리콘 조로 용융시키기에 충분한

도가니 근처의 가열 메카니즘을 포함한다. 다결정 재료는 관련 기술분야에 공지된 기술에 따라, 예를 들어 WO 99/55940 (선예디슨 세미컨덕터 테크놀로지 프라이빗 리미티드에 양도되었음)에 기재된 바와 같이 도가니에 충전될 수 있다.

[0030] CZ 방법에 따른 잉곳 성장은 가열 메카니즘에 전력을 인가하여 고체 실리콘 출발 재료의 충전물을 용융시킴으로써 개시된다. 예를 들어, WO 99/20815 (선예디슨 세미컨덕터 테크놀로지 프라이빗 리미티드에 양도되었음)를 참조한다. 용융물 유동은 씨결정을 용융물에 담그기 전에 도가니 회전 속도, 비활성 기체 유량 등에 의해 안정화될 수 있다. 씨의 상향 인상이 고체-액체 계면에서 용융물을 결정화하고 결정이 성장하도록 한다. 씨결정으로부터 증가하는 직경의 원추형 네크가 용융물로부터의 씨결정의 인상 속도를 감소시킴으로써 성장한다. 목적하는 직경에 도달하면, 결정이 실질적으로 일정한 직경 영역을 성장시킬 때까지 인상 속도를 서서히 증가시킨다. 성장하는 실리콘 잉곳의 고체화 및 냉각 속도를 제어하기 위해 결정 인상 기구의 가열 메카니즘이 제어된다. 도가니는 전형적으로 용융물 유동을 안정화하고 결정에서의 산소 농도를 제어하기 위해 결정과 반대 양식으로 회전한다. 결정 성장의 최종 단계는 직경이 서서히 감소하여 원추형 형상이 달성되는 테일(tail) 성장이고, 여기서 엔드콘의 직경은 축방향으로 일정한 직경 영역으로부터 결정의 단부로 갈수록 감소한다. 결정이 용융물로부터 분리되었으면, 성장로의 전력을 감소시키고, 결정이 냉각됨과 동시에 상위 챔버로 리프팅된다. 공정이 끝나면, 결정을 추가 가공을 위해 성장로로부터 제거한다.

[0031] 본 개시내용의 결정 잉곳은 중심 축, 씨 단부, 반대 단부, 및 측방 표면 및 중심 축으로부터 측방 표면으로 연장되는 반경 (r)을 갖는, 씨 단부와 반대 단부 사이의 일정한 직경 부분을 포함하고, 상기 단결정 실리콘 잉곳은 CZ 방법에 따라 실리콘 용융물로부터 성장하고, 이어서 고체화로 냉각된다. 단결정 실리콘 잉곳은 공공이 우세한 고유 점 결함인 반경방향 대칭성 영역을 포함하는 일정한 직경 부분을 특징으로 하고, 상기 반경방향 대칭성 영역은 중심 축으로부터 측방 표면으로 연장되는 반경을 갖는다.

[0032] 본 개시내용의 일부 측면은 본원에서 상기에 상세히 설명된 잉곳으로부터 수득된 (슬라이싱된) 단결정 실리콘 웨이퍼에 관한 것이다. 보다 구체적으로, 본 개시내용은 약 150 mm 내지 약 450 mm의 직경을 갖는 단결정 실리콘 웨이퍼에 관한 것이다. 웨이퍼는 바람직하게는 전방 표면, 후방 표면, 전방 표면 및 후방 표면에 실질적으로 평행한, 전방 표면과 후방 표면 사이의 가상의 중심 평면, 및 전방 표면과 후방 표면을 연결하는 원주방향 에지를 갖는다. 웨이퍼는 중심 평면에 대하여 수직인 가상의 중심 축 및 중심 축으로부터 원주방향 에지로 연장되는 반경방향 길이를 추가로 포함한다. 이러한 문맥에서 용어 "전방" 및 "후방"은 웨이퍼의 2개의 주요한, 일반적으로 평면인 표면을 구분하기 위해 사용된다. 웨이퍼의 전방 표면 (이 어구는 본원에 사용된 바와 같음)이 반드시 그 위에서 전자 장치가 후속적으로 제작될 표면인 것은 아니고, 또한 웨이퍼의 후방 표면 (이 어구는 본원에 사용된 바와 같음)이 반드시 그 위에서 전자 장치가 제작되는 표면 반대편에 있는 웨이퍼의 주요 표면인 것은 아니다. 또한, 실리콘 웨이퍼는 전형적으로 약간의 총 두께 변화 (TTV), 워프(warp), 및 보우(bow)를 갖기 때문에, 전방 표면 상의 모든 지점과 후방 표면 상의 모든 지점 사이의 중간점이 정확하게 평면 내에 포함되지 않을 수 있다. 그러나, 실제로, TTV, 워프, 및 보우는 전형적으로, 거의 정확하게, 중간점이 전방 표면과 후방 표면 사이에서 대략 등거리에 있는 가상의 중심 평면 내에 포함된다고 할 수 있을 정도로 미약하다. 웨이퍼는 연마될 수 있거나, 또는 별법으로 연마 없이 래핑(lapped) 및 에칭될 수 있다. 이러한 방법 뿐만 아니라, 표준 실리콘 슬라이싱, 래핑, 에칭, 및 연마 기술이 예를 들어, 문헌 [F. Shimura, Semiconductor Silicon Crystal Technology, Academic Press, 1989], 및 [Silicon Chemical Etching, (J. Grabmaier ed.) Springer-Verlag, New York, 1982]에 개시되어 있다 (본원에 참조로 포함됨). 바람직하게는, 웨이퍼는 관련 기술분야의 통상의 기술자에게 공지된 표준 방법에 의해 연마되고 세정된다. 예를 들어, 문헌 [W.C. O'Mara et al., Handbook of Semiconductor Silicon Technology, Noyes Publications]을 참조한다.

[0033] 선행 공보 (예를 들어, 모두 선예디슨 세미컨덕터 테크놀로지 프라이빗 리미티드에 양도된 WO 98/45507, WO 98/45508, WO 98/45509, 및 WO 98/45510 참조)에 따르면, 고유 점 결함의 유형 및 초기 농도는 잉곳이 고체화 온도 (즉, 약 1410°C)에서 1300°C 초과의 온도로 냉각될 때 초기에 결정된다. 즉, 이들 결함의 유형 및 초기 농도는 v/G 비율에 의해 제어되고, 여기서 v 는 성장 속도이고 G 는 상기 온도 범위에 걸쳐 있는 평균 축방향 온도 구배이다. v/G 값이 증가할수록, 점점 줄어드는 자기-침입형 지배 성장으로부터 점점 더 공공 지배 성장로의 전이가 현재 이용가능한 정보에 기반하면 약 $2.1 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sK}$ 인 것으로 보이는 v/G_0 의 임계값 근처에서 발생하고, 여기서 G_0 은 축방향 온도 구배가 상기에 한정된 온도 범위 내에서 일정한 조건 하에 결정된다. 상기 임계값에서, 이들 고유 점 결함의 농도는 평형 상태에 있다. v/G_0 값이 임계값을 초과할 때, 공공의 농도가 증가

한다. 마찬가지로, v/G_0 값이 임계값 미만일 때, 자기-침입형의 농도가 증가한다.

- [0034] 전자 장치의 제작에서 전형적으로 이용되는 열 처리 사이클은 산소가 과포화된 실리콘 웨이퍼에서 산소의 석출을 초래할 수 있다. 웨이퍼에서의 그의 위치에 따라, 석출물은 유해할 수 있거나 또는 유익할 수 있다. 웨이퍼의 활성 장치 영역에 위치하는 산소 석출물은 장치의 작동을 손상시킬 수 있다. 그러나, 웨이퍼의 벌크에 위치하는 산소 석출물은 웨이퍼와 접촉하게 될 수 있는 바람직하지 않은 금속 불순물을 포획할 수 있다. 금속을 포획하기 위해 웨이퍼의 벌크에 위치하는 산소 석출물을 사용하는 것을 일반적으로 내재적 또는 고유 게터링 ("IG")이라 한다.
- [0035] CZ 실리콘 재료에서의 산소 석출 거동은 고유 점 결함 농도의 영향을 크게 받는다. 예를 들어 저농도 도핑된 재료의 경우에, 일반적으로 공공형 재료에서는 강력한 석출이 관찰되고, 반면에 침입형 재료에서는 석출이 발생하지 않는다. 산소 석출물의 핵형성 및 성장을 위한 충분한 임의의 열처리가 웨이퍼 전체에 걸쳐서, 즉 중심축으로부터 원주방향 에지로 연장되는 영역 및 또한 웨이퍼의 전방 표면으로부터 웨이퍼의 후방 표면으로 연장되는 영역에서 균일한 고농도의 산소 석출물을 갖는 본 개시내용의 웨이퍼를 제조하는데 적합하다. 일부 실시양태에서, BMD는 약 700°C 초과 온도에서 산소 석출물의 핵형성 및 성장에 충분한 기간 동안 산소 석출 열처리에 웨이퍼를 적용함으로써 특징화될 수 있다. 일부 다른 특징적인 실시양태에서, 웨이퍼는 NEC1 시험 절차를 포함하는 산소 석출 열처리, 예를 들어 800°C에서 4-8시간 동안, 이어서 1000°C에서 16시간 동안의 웨이퍼의 어닐링에 적용될 수 있다. 일부 다른 특징적인 실시양태에서, 웨이퍼는 780°C에서 3시간 동안, 이어서 1000°C에서 16시간 동안의 웨이퍼의 어닐링을 포함하는 산소 석출 열처리에 적용될 수 있다. 일부 다른 실시양태에서, 웨이퍼는 산소 석출 열처리에 적용된 후속 에피택셜 웨이퍼이고, 여기서 후속 에피택셜 처리는 약 900°C, 약 950°C, 약 1000°C, 약 1050°C, 약 1100°C, 약 1150°C, 또는 약 1200°C, 및 이들의 일정 범위, 예컨대 약 900°C 내지 약 1200°C, 약 1000°C 내지 약 1200°C, 또는 약 1050°C 내지 약 1150°C 온도에서 수행된다.
- [0036] 질소 도판트 농도, CZ 실리콘 결정 인상 속도, 및 인상 동안의 CZ 결정 온도 구배가 CZ 실리콘 결정 잉곳으로부터 슬라이싱된 열 처리 웨이퍼에서의 BMD 크기 및 분포에 영향을 준다. 본 개시내용의 다양한 측면 중 어느 하나에서, 본 발명의 CZ 실리콘 결정 잉곳 및 웨이퍼의 BMD 크기 분포, BMD 밀도 분포 및 에지 밴드 특징은 하기에 기재된 모델링 및 시뮬레이션 기술에 의해 결정된, 이 또한 하기에 기재된 범위 내의 변수를 선택함으로써 제어될 수 있다. 바람직한 범위는 잉곳 직경에 따라 적합하게 달라질 수 있다. 하나의 실시양태에서, 질소 도판트 농도 범위는 약 1×10^{13} 개 원자/cm³ 내지 약 1×10^{15} 개 원자/cm³이고, 인상 속도 범위는 약 0.4 mm/분 내지 약 1.5 mm/분이며, 잉곳 표면 온도 구배는 약 1300°C 내지 약 1415°C의 평균 결정 표면 온도에서 약 10° K/분 내지 약 50° K/분이다. 하나의 실시양태에서, 300 mm 직경 잉곳의 경우에, 질소 도판트 농도 범위는 약 1×10^{13} 개 원자/cm³ 내지 약 1×10^{15} 개 원자/cm³이며, 인상 속도 범위는 약 0.85 mm/분 내지 약 1.5 mm/분이며, 잉곳 표면 온도 구배는 약 1300°C 내지 약 1415°C의 평균 결정 표면 온도에서 약 10° K/cm 내지 약 35° K/cm이다.
- [0037] **질소 도판트 농도**
- [0038] 본 개시내용의 실리콘 결정은 CZ 실리콘에서의 공극 크기 분포의 감소를 유도하는 질소 도판트 원자를 포함한다. 질소 농도는 결정 반경방향 위치의 함수로서 성장 산소 클러스터의 반경에 영향을 준다. 실리콘 결정에서의 질소 농도는 약 1×10^{13} 개 원자/cm³ 내지 약 1×10^{15} 개 원자/cm³ 또는 약 1×10^{14} 개 원자/cm³ 내지 약 1×10^{15} 개 원자/cm³이다. 잉곳은, 예를 들어 질소 기체의 성장 챔버에의 도입 및/또는 질소의 폴리실리콘 용융물에의 첨가를 포함하는, 관련 기술분야에 공지된 다양한 방법 중 어느 하나에 의해 질소로 도핑될 수 있다. 성장하는 결정에 첨가되는 질소의 양은 질소를 폴리실리콘 용융물에 첨가함으로써 보다 정확하게 제어되므로, 이것이 바람직한 방법이다. 전형적인 폴리실리콘 용융물 질소 농도는 약 1×10^{16} 개 원자/cm³ 내지 약 1×10^{18} 개 원자/cm³, 또는 약 1×10^{17} 개 원자/cm³ 내지 약 1×10^{18} 개 원자/cm³, 또는 약 1×10^{17} 개 원자/cm³ 내지 약 5×10^{17} 개 원자/cm³이다. 결정에 첨가된 질소의 양은 예를 들어, 직경을 알고 있는 실리콘 웨이퍼 상에 알고 있는 두께의 질화규소 (Si₃N₄) 층을 증착시킴으로써 용이하게 결정될 수 있고, 이는 실리콘 용융물이 형성되기 전에 폴리실리콘과 함께 도가니에 도입된다 (Si₃N₄의 밀도는 약 3.18 g/cm³임).
- [0039] 질소가 공공과 강력하게 결합하기 때문에 (문헌 [M. Kulkarni, *Defect 역학 in the presence of nitrogen in growing Czochralski silicon crystals*, Journal of Crystal Growth, 제310, pages 324-335 (2008)] 참

조), 질소 농도가 낮을수록 자유 공공이 보다 많아질 것이고, 이는 공공의 형성에 유리하므로, 산소 석출물이 결정의 내부 영역에서 보다 작아지는 것으로 생각된다. 상기에 개시된 바와 같이, 질소-도핑은 CZ 실리콘 결정에서 공공 크기 분포 감소를 유도한다. 공공 채움을 통해 작용하는, 질소는 결정의 공공 영역에서의 점 결함 형성에 영향을 주고, 본질적으로 공공 형성을 보다 낮은 온도로 변동시키고, 공공 밀도를 증가시키고, 공공 크기를 감소시키는 것으로 생각된다. 질소 도핑 결정에서의 공공 채움 효과 때문에, 산소 석출은 비-질소 도핑 결정에서보다 높은 밀도 및 거대한 크기로 발생한다. 특정 이론에 구애됨이 없이, 질소 도판트 원자는 실리콘 결정에서의 공공의 확산을 지연시킴으로써 산소 석출 핵을 열적으로 안정화하는 것으로 생각된다. 구체적으로, 성장하는 결정이 냉각될수록 공공의 농도가 임계 과포화 수준에 도달하고 (즉, 이때 응집 사건이 발생함), 이는 응집된 공공 결함 또는 미세-공공의 형성을 초래한다는 것이 공지되어 있다. 예를 들어, 과포화는 약 1150-1050℃의 온도에서 발생할 수 있다. 결정이 냉각될수록, 미세-공공의 크기가 성장하는데, 그 이유는 공공이 계속해서 그러한 자리로 확산되기 때문이다. 미세-공공의 응집 사건 및 계속되는 성장이 결정에서의 비-응집 또는 "자유" 공공의 농도를 유의하게 감소시키지만, 계속해서 냉각시키면 제2 임계 과포화 수준에 도달하여, 이때 결정에서 자유 공공과 산소가 상호작용하여 산소 석출 핵을 형성한다. 비-질소 도핑 결정의 경우에, 제2 임계 과포화 수준은 결정이 약 700℃ 미만으로 냉각될 때 발생한다. 그러나, 질소 도핑 실리콘에서는, 응집 사건 동안에 미세-공공의 형성이 공공의 느려진 확산 속도로 인해 약간 억제된다. 이는 제1 응집 사건 후에 보다 높은 농도의 자유 공공이 결정에 남아있도록 한다. 질소 도핑 실리콘에서의 증가한 농도의 자유 공공은 제2 임계 과포화 수준이 발생하는 온도를, 예를 들어 약 800℃ 내지 약 1050℃로 상승시킨다. 상승한 온도에서, 결정에서의 산소 원자는 이동성이 더욱 커져 보다 많은 산소 원자가 자유 공공과 상호작용하고, 이는 보다 안정한 산소 석출 핵을 초래한다. 안정화된 산소 석출 핵은 후속 열 가공, 예컨대 에피택셜 실리콘 층의 성장 동안에 용해에 대하여 더욱 저항성을 갖는다.

[0040] 도 7 및 8에 나타나 있는 바와 같이, 표면-유래 효과의 존재 때문에, 에지 가까이에에서의 예측 산소 석출물 크기는 유사하게 보상되지 않는다. 구체적으로, 도 7에 도시된 바와 같이, 질소 농도는 결정 반경방향 위치의 함수로서 성장 산소 클러스터의 반경에 영향을 주어 반경 크기의 불균등 분포를 초래하고, 여기서 300 mm 직경 잉곳의 경우에, 산소 클러스터 반경은 에지 영역에서 현저히 증가한다. 도 8에 도시된 바와 같이, 질소 농도는 결정 반경방향 위치의 함수로서 성장 공공의 반경에 영향을 주어 반경 크기의 불균등 분포를 초래하고, 여기서 300 mm 직경 잉곳의 경우에, 공공 크기 반경은 에지 영역에서 현저히 감소한다.

[0041] 질소 농도의 효과로부터 초래되는 평균 BMD 밀도의 의존성은 어닐링 온도와 무관한 것으로 생각된다. 도 9에 나타나 있는 바와 같이, 1100℃의 어닐링 온도에서 예측 평균 BMD 밀도는 약 7.5×10^{13} 개 원자/cm³의 잉곳 질소 농도에서의 약 9.1×10^7 /cm³에서 약 2.5×10^{14} 개 원자/cm³의 잉곳 질소 농도에서의 약 4.1×10^8 /cm³로 달라진다. 도 10에 나타나 있는 바와 같이, 1000℃의 어닐링 온도에서 예측 평균 BMD 밀도는 약 7.5×10^{13} 개 원자/cm³의 잉곳 질소 농도에서의 약 2.15×10^{10} /cm³에서 약 2.5×10^{14} 개 원자/cm³의 잉곳 질소 농도에서의 약 3.75×10^{10} /cm³로 달라진다. 평균 BMD 밀도가 1100℃에서보다 1000℃에서 높지만, 질소 농도에 대한 평균 BMD 밀도의 의존성은 두 온도 모두에서 유사하였다.

[0042] **인상 속도**

[0043] 도 3에 도시된 바와 같이, 인상 속도는 결정 반경방향 위치의 함수로서 성장 산소 클러스터의 예측 반경에 영향을 주어 반경 크기의 불균등 분포를 초래한다. 300 mm 직경 잉곳의 약 0.78 mm/min 정도의 인상 속도의 경우에, 산소 클러스터 반경은 에지 영역에서 현저히 증가한다. 도 4에 도시된 바와 같이, 인상 속도는 결정 반경방향 위치의 함수로서 성장 공공의 예측 반경에 영향을 주어 반경 크기의 불균등 분포를 초래하고, 여기서 300 mm 직경 잉곳의 경우에, 0.7 mm/min 이상의 인상 속도에서 공공 크기 반경은 에지 영역에서 현저히 감소한다. 도 3 및 4의 기반 데이터는 단면에 걸쳐서 5.5×10^{10} 개 원자/cm³의 일정한 산소 농도 및 1.26×10^{14} 개 원자/cm³의 질소 농도에서 수집된다. 각각의 인상 속도에서, 용융물/결정 계면 가까이에에서의 결정 표면 온도 구배는 51.14° K/cm였다. 결정 온도가 강하할수록, 결정에서의 성장 공공은 공공으로 응집될 뿐만 아니라, 산소 클러스터의 형성을 촉진할 수 있다. 각각의 경우에 관찰되는, 공공 클러스터 및 산소 클러스터 둘 모두의 크기 프로파일에서 결정 표면 가까이에 피크가 존재한다. 높은 인상 속도 값에서는, 공공 크기의 에지 피크가 산소 클러스터에 대하여 관찰되는 것보다 훨씬 덜 급격하다. 이러한 관찰은 측방 혼입 효과에 대한 확립 이론과 일치한다. 보다 느린 인상 속도에서는, 어디에서나 보다 적은 공공이 혼입되어 공공 형성이 지연되지만, 공공 지배 결정의 이러한 빠른 결정 인상 속도에서는, 산소 클러스터의 형성이 보다 빨리 촉진될 수 있다. 따라서, 측방

향 혼입, 산소 및 질소와의 결합 강도, 및 측방 혼입에 기반하여 결정되는 자유 공공 농도에 따라 공극 형성과 산소 클러스터 형성 사이에 경쟁이 존재하고, 이는 산소 클러스터의 크기 분포의 균일성을 증가시키도록 조종될 필요가 있다. 인상 속도의 증가는 어디에서나 충분한 공공을 도입하여, 공극 크기를 증가시키고 산소 클러스터 크기를 감소시킨다. 인상 속도가 약 0.95 mm/min 또는 심지어 1 mm/min으로 증가할 때 산소 석출의 에지 밴드는 그의 강도가 현저히 감소한다는 것이 밝혀졌다.

[0044] 본 개시내용의 범주 내에서 인상 속도 범위는 잉곳 직경에 따라 달라지고, 일반적으로 약 0.4 내지 약 1.5 mm/min, 약 0.5 내지 약 1.5 mm/min, 약 0.6 내지 약 1.5 mm/min, 약 0.7 내지 약 1.5 mm/min이다. 본 개시내용의 범주 내에서 속도는 약 0.4 mm/min, 약 0.5 mm/min, 약 0.6 mm/min, 약 0.7 mm/min, 약 0.78 mm/min, 약 0.8 mm/min, 약 0.85 mm/min, 약 0.9 mm/min, 약 1.0 mm/min, 약 1.1 mm/min, 약 1.2 mm/min, 약 1.3 mm/min, 약 1.4 mm/min, 약 1.5 mm/min, 및 이들의 범위를 포함한다. 예를 들어, 300 mm 잉곳의 경우에 약 0.85 mm/min 내지 약 1.5 mm/min, 약 0.85 mm/min 내지 약 1.0 mm/min, 또는 약 0.9 mm/min 내지 약 1.0 mm/min의 인상 속도가 일반적으로 바람직하다. 300 mm 초과, 예컨대 약 400 mm 또는 약 450 mm의 직경을 갖는 잉곳의 경우에 인상 속도 범위는 바람직하게는 약 0.8 mm/min 미만, 예컨대 약 0.4 내지 약 0.7 mm/min, 약 0.5 내지 약 0.7 mm/min, 또는 약 0.5 내지 약 0.6 mm/min이다. 보론코브 이론에 따른 임계값을 초과하는 v/G를 제공하는 인상 속도가 바람직하다.

[0045] 평균 BMD 밀도가 인상 속도의 함수로서 확인되었는데, 여기서 이러한 함수성의 특징은 어닐링 온도에 따라 변화한다. 예를 들어, 도 5에 도시된 바와 같이, 1100°C의 어닐링 온도에서의 300 mm 잉곳의 예측 평균 BMD 밀도는 1000°C의 어닐링 온도에서보다 약 두 자릿수가 낮고, 인상 속도가 증가할수록 감소한다. 도 6에 도시된 바와 같이, 300 mm 잉곳의 예측 평균 BMD 밀도는 1100°C 어닐링 온도에서보다 약 두 자릿수가 높고, 0.95 mm/min까지 인상 속도가 증가할수록 증가하고 1 mm/min에서 약간 떨어진다.

[0046] 온도 구배

[0047] 성장하는 CZ 결정이 노출되는 평균 측방향 온도 구배는 중심 축으로부터 에지까지 결정 단면에 걸쳐서 공극 크기 분포에 영향을 준다. 일반적으로, 공극 크기 증가는 온도 구배에 반비례하므로, 특히 결정 에지 가까이에서의 공극 크기는 용융물/결정 계면에 가까운 결정 에지에서의 온도 구배의 감소에 반응하여 증가한다. 이러한 예측 효과가 도 11 및 12에 나타나 있다. 실제로 이는 결정 에지 가까이에서의 산소 석출물 크기의 축소를 용이하게 하고, 반면에 결정 내부에서의 산소 석출물 크기는 온도 구배의 영향을 실질적으로 받지 않는다.

[0048] 용융물/결정 계면에 가까운 결정 표면 상의 온도 구배의 감소는 그 부분을 고온 대역의 보다 고온의 구역에 더 노출시킴으로써 이루어질 수 있다. 예를 들어, 이를 달성하는 하나의 방법은 용융물 표면과 반사체용 흑연 ("Hr"이라고도 함)의 바닥 사이의 간격을 증가시키는 것에 의한 것이다. 또 다른 방법은 보다 높은 바닥 히터 출력의 운전에 의한 사이드 히터 출력의 증가이다.

[0049] 본 개시내용의 범주 내에서 온도 구배 범위는 약 1300°C 내지 약 1415°C의 평균 결정 표면 온도에서 약 10° K 내지 약 50° K/cm, 약 10° K 내지 약 35° K/cm, 약 25° K 내지 약 50° K/cm, 약 25° K 내지 약 45° K/cm, 약 30° K 내지 약 45° K/cm, 또는 약 35° K 내지 약 45° K/cm이다. 온도 구배는 약 10° K/cm, 약 20° K/cm, 약 25° K/cm, 약 30° K/cm, 약 35° K/cm, 약 40° K/cm, 약 45° K/cm, 약 50° K/cm, 및 이들의 다양한 범위를 포함한다.

[0050] 온도 구배의 효과로부터 초래되는 평균 BMD 밀도의 의존성은 어닐링 온도와 최소한으로 관련있는 것으로 생각된다. 도 13에 나타나 있는 바와 같이, 1100°C의 어닐링 온도에서 300 mm 잉곳의 예측 평균 BMD 밀도는 약 31 K/cm의 결정 표면 온도 구배에서의 약 $2 \times 10^8 / \text{cm}^3$ 에서 약 51 K/cm의 결정 표면 온도 구배에서의 약 $2.25 \times 10^8 / \text{cm}^3$ 로 달라진다. 도 14에 나타나 있는 바와 같이, 1000°C의 어닐링 온도에서 300 mm 잉곳의 예측 평균 BMD 밀도는 약 31 K/cm의 결정 표면 온도 구배에서의 약 $2.8 \times 10^{10} / \text{cm}^3$ 에서 약 51 K/cm의 결정 표면 온도 구배에서의 약 $2.8 \times 10^{10} / \text{cm}^3$ 보다 약간 작은 값으로 달라진다. 평균 BMD 밀도가 1100°C에서보다 1000°C에서 높지만, 잉곳 질소 농도에 대한 평균 BMD 밀도의 의존성은 두 온도 모두에서 실질적으로 유사하였다.

[0051] 인상 속도, 표면 온도 구배 및 질소 농도의 조합

[0052] 본 개시내용에 따라서, 인상 속도, 표면 온도 구배 및 질소 농도의 조합이 (i) 결정 단면에 걸쳐서 결정 반경방향 위치의 함수로서 공공 반경 및 밀도의 반경방향 균일성, (ii) 질소-도핑 CZ 실리콘 결정으로부터 슬라이싱된 열 처리 웨이퍼의 결정 단면에 걸쳐서 결정 반경방향 위치의 함수로서 BMD 직경 및 밀도의 반경방향 균일성, 및

(iii) 상기 웨이퍼의 에지 밴드 특징에 영향을 준다는 것이 밝혀졌다. 추가로, 인상 속도, 표면 온도 구매 및 질소 농도의 조합이 결정 웨이퍼 단면에 걸쳐서 결정 반경방향 위치의 함수로서 BMD 직경 및 밀도의 실질적인 반경방향 균일성 및 에지 효과의 실질적인 부재를 달성하도록 선택될 수 있다는 것이 밝혀졌다. 본원에 기재된 다양한 알고리즘 및 이들의 조합이 (i) BMD 크기 및 밀도 분포에 대한 인상 속도 및 온도 구매의 효과, (ii) BMD 크기 및 밀도 분포에 대한 인상 속도 및 온도 구매와 함께 산소 농도 및 질소 농도의 효과, (iii) 집중 모델에 기반한 BMD 크기 분포, 및 (iv) 에지 밴드 특징을 모델링하는데 이용된다.

[0053] 추가로 본 개시내용에 따라서, 인상 속도, 질소 농도 및 결정 표면 온도 구매의 조합이 결정 단면에 걸쳐서 결정 반경방향 위치의 함수로서 공공 반경 및 밀도의 실질적인 반경방향 균일성을 특징으로 하는 질소 도핑 CZ 실리콘 결정 잉곳 및 그로부터 슬라이싱된, 결정 단면에 걸쳐서 결정 반경방향 위치의 함수로서 BMD 직경 및 밀도의 실질적인 반경방향 균일성을 특징으로 하는 열 처리 웨이퍼를 제조하는데 적합한 조건의 세트를 유도하기 위해 시뮬레이션 및 실험에 의해 평가되고, 여기서 웨이퍼는 에지 효과의 본질적인 부재를 나타낸다. 보다 구체적으로, 본원에 개시된 결합 시뮬레이션 모델을 이용하여, 주어진 직경에 대한 실리콘 결정 및 웨이퍼에서의 공공의 응집 및 산소 클러스터링에 대한 일부 핵심 파라미터의 기여도를 예측하는 것이 가능하다. 시뮬레이션 모델에서, 300 mm 직경 웨이퍼에 대한 하나의 실시양태에서, 0.78 내지 1.0 mm/min의 고속 인상 속도에서 실리콘 웨이퍼 근처에서의 산소 석출 밴드의 존재가 고려된다. 이러한 발견은 쿨카르니 (US 8,216,362)에 의해 개시된 공공의 측방 혼입 효과를 확증한다. 성장 결정으로부터 슬라이싱되고 에피 및 어닐링으로서 시뮬레이션할 수 있는 다양한 열 처리 후의 웨이퍼의 측방 단면에 걸쳐서 평균을 낸 평균 BMD 밀도에 대한 이들 변화의 효과가 또한 시뮬레이션에 의해 고려된다. 시뮬레이션 결과에 기반하여, 이들 핵심 파라미터의 다양한 조합이 설계되고 평가된다. 시뮬레이션 모델이 파라미터의 조합 효과를 평가하고, 또한 시뮬레이션 모델을 보정하고 최종 결과를 확인하기 위해 결정 성장을 시험하고 웨이퍼를 평가하기 위한 기준을 확립하는데 사용된다. 결정 잉곳, 연마 및 에피 웨이퍼에서의 BMD의 제어되는 크기 및 밀도의 반경방향 균일성을 달성하기 위해 시뮬레이션, 보정 및 시험의 여러 번의 반복이 수행된다. 시뮬레이션 결과는 실험적으로 검증된다. 시뮬레이션의 목적상 BMD 크기가 반경 기준으로 추정되고, 반면에 열 처리 또는 후속 에피 열 처리 웨이퍼에서의 BMD 크기는 직경 기준으로 추정된다는 것을 주목해야 한다.

[0054] 시뮬레이션 및 실험에 기반하여, 웨이퍼 BMD와 질소 농도, 결정 인상 속도 및 온도 구매를 포함하는 CZ 실리콘 잉곳의 개별 파라미터 각각의 상관관계가 확립된다. 연마, 에피, 및 어닐링 웨이퍼에서의 만족스러운 BMD 능력을 달성하기 위해, 본원에 개시된 다양한 파라미터 사이의 연관성이 시뮬레이션 모델에 의해 확립되어, 실질적인 에지 효과 없이 웨이퍼에서의 BMD의 제어되는 크기 및 밀도의 균일한 반경방향 분포를 갖는 목적하는 최적화된 석출 거동을 달성하기 위해 파라미터의 다양한 조합의 결과 예측을 가능하게 한다.

[0055] 시뮬레이션 및 실험적 평가에 기반하여, 본 개시내용의 목적을 달성하는 충분한 변수의 조합이 확립된다. 범위는 잉곳 직경에 따라 적합하게 달라질 수 있다. CZ 실리콘 결정 잉곳의 제조에 대한 본 개시내용의 다양한 측면 중 어느 하나에서: (1) 질소 농도는 약 1×10^{13} 개 원자/cm³ 내지 약 1×10^{15} 개 원자/cm³이고; (2) 온도 구매는 약 10° K/cm 내지 약 50° K/분, 약 10° K/분 내지 약 35° K/cm, 약 25° K/cm 내지 약 50° K/cm, 약 30° K/cm 내지 약 50° K/cm, 또는 약 35° K/cm 내지 약 50° K/cm이며; (3) 인상 속도는 약 0.4 mm/분 내지 약 1.5 mm/분, 약 0.5 mm/분 내지 약 1.5 mm/분, 약 0.85 mm/분 내지 약 1.5 mm/분, 약 0.7 mm/분 내지 약 1.0 mm/분, 약 0.78 mm/분 내지 약 1.0 mm/분, 약 0.8 mm/분 내지 약 1.0 mm/분, 약 0.85 mm/분 내지 약 1.0 mm/분, 약 0.75 mm/분 내지 약 1.0 mm/분, 또는 약 0.9 mm/분 내지 약 1.0 mm/분이다. 일부 300 mm 직경 CZ 실리콘 결정 잉곳 측면에서, 약 0.85 mm/분 내지 약 1.5 mm/분의 인상 속도, 약 1300°C 내지 약 1415°C의 평균 결정 표면 온도에서 약 10° K/cm 내지 약 35° K/cm의 온도 구매, 및 약 1×10^{13} 개 원자/cm³ 내지 약 1×10^{15} 개 원자/cm³의 질소 농도로부터 선택된 변수의 조합이 본원에 기재된 BMD 크기 및 밀도 분포 및 에지 밴드 특징을 갖는 이곳을 제공한다. 일부 다른 이러한 측면에서, 인상 속도는 약 0.85 mm/분 내지 약 1.0 mm/분 또는 약 0.9 mm/분 내지 약 1.0 mm/분이다. 300 mm 이외의 직경을 갖는 CZ 실리콘 결정의 경우에는, 본 개시내용의 목적인 BMD 분포 및 에지 밴드를 달성하는데 요구되는 인상 속도 범위, 질소 농도 범위, 및 온도 구매 범위의 조합이 본원에 개시된 시뮬레이션에 의해 결정될 수 있고, 여기서 예측 범위는 300 mm 직경 잉곳에 대하여 요구되는 범위 밖에 있거나, 그 범위가 중복되거나 또는 그 범위에 포함될 수 있다.

[0056] **시뮬레이션**

[0057] 주어진 CZ 실리콘 결정 잉곳 직경에 대하여 인상 속도, 질소 농도 및 온도 구매 변수 세트의 예측을 허용하여, 본원에 개시된 반경방향으로 균일하게 분포된 BMD 직경 및 밀도, 및 에지 밴드 특징을 갖는 질소 도핑 CZ 실리콘

콘 웨이퍼의 제조를 가능하게 하는 알고리즘 및 시뮬레이션 방법이 본원에 개시되어 있다.

[0058] BMD 크기 및 분포에 대한 인상 속도 및 온도 구배의 효과를 모델링하고 예측하는데 사용되는 알고리즘이 문헌 [M. S. Kulkarni and V. V. Voronkov, *Simplified Two-Dimensional Quantification of the Grown-in Microdefect Distributions in Czochralski Grown Silicon Crystals*, Journal of the Electrochemical Society, 152 (10) pages G781 to G786 (2005)]에 의해 개시되었고, 이것을 본원에서는 "쿨카르니 2005 알고리즘"이라 명명한다. 개시된 집중 모델은 열 처리 웨이퍼에서의 BMD 분포의 연산 예측을 허용한다. 요약하면, 미세결함이 구체 클러스터로서 근사화될 수 있다. CZ 결정의 원소에서, 실제 클러스터 집합군의 평균 반경과 동일한, 동일한 반경의 동일한 클러스터의 등가의 집합군이 실제 클러스터 집합군을 나타낸다. 평균 클러스터 반경을, 클러스터의 반경을 제공해서 평균낸 것의 제공근으로 대체함으로써, 결함 역학을 기술하는 방정식이 연산에 의해 단순화될 수 있다. 미세결함 분포는 점 결함 농도 (C), 클러스터 밀도 (N), 및 전체 클러스터 집합군의 표면적에 비례하는 보조 변수 (U)를 기술하는 일련의 개시된 방정식에 의해 정량화된다. 클러스터 밀도 (N)는 고전적 핵형성 이론에 의해 예측되고, U는 개시된 클러스터 성장 방정식을 사용하여 기술되며, C는 점 결함의 성장하는 클러스터에 의한 이동, 재결합 및 소모를 포함하는 개시된 방정식에 의해 기술된다. 모델은 미세결함 밀도 및 크기의 최종 (결정) 공간적 분포를 획득할 정도로 충분히 정확하고, 모델의 예측을 엄격한 모델 및 실험적 관찰의 예측과 비교함으로써 검증된다.

[0059] BMD 크기 및 분포에 대한 질소 농도, 인상 속도 및 온도 구배의 효과를 모델링하고 예측하는데 사용되는 알고리즘이 문헌 [M. S. Kulkarni, *Defect dynamics in the presence of nitrogen in growing Czochralski silicon crystals*, Journal of Crystal Growth 310, pages 324 to 335 (2008)]에 의해 개시되었고, 이것을 본원에서는 "쿨카르니 2008 알고리즘"이라 명명한다. 개시된 모델은 모든 응집체를 구체 클러스터로서 근사화한다. 쿨카르니에 의해 개시된 바와 같이, 고전적 핵형성 이론은 상당한 정확도로 모든 클러스터의 형성을 포착한다. 형성된 클러스터는 확산-제한 속도론에 의해 성장한다. 공공 클러스터 및 자기-침입형 클러스터는 각각 공공 및 자기-침입형의 균질한 핵형성에 의해 형성된다. 보다 큰 비체적 때문에, 산소 클러스터가 공공에 의한 촉진에 의해 형성된다. 산소 클러스터의 성장은, 공공이 풍부할 때는 산소의 확산에 의해 제한되고 공공이 희박할 때는 공공의 확산에 의해 제한된다. 성장하는 결정에서의 주어진 위치에서의 클러스터의 집합군은 동일한 클러스터의 등가의 집합군에 의해 근사화된다. 모델은 CZ 결정 성장에서 상이한 미세결함의 형성을 유도하는 조건을 정량화한다. 달라지는 인상 속도 및 질소 농도의 효과가 또한 포착된다. 모델은 정상 상태와 비정상 상태 모두에서 성장하는 CZ 결정에서의 미세결함 분포를 정량화한다. 개시된 모델의 예측은 저농도 내지 적당한 고농도의 질소 존재 하의 보고된 미세결함 분포와 잘 일치한다. 그러나, 초고농도 (대략 10^{18} cm^{-3} 이상)의 질소 존재 하에서는, 모델의 예측이 덜 정확하다.

[0060] BMD 크기 및 분포에 대한 산소 농도, 인상 속도 및 온도 구배의 효과를 모델링하고 예측하는데 사용되는 알고리즘이 문헌 [M. S. Kulkarni, *Defect dynamics in the presence of oxygen in growing Czochralski silicon crystals*, Journal of Crystal Growth 303, pages 438 to 448 (2007)]에 의해 개시되었고, 이것을 본원에서는 "쿨카르니 2007 알고리즘"이라 명명한다. 개시된 모델은 미세결함의 형성 및 성장과 함께, 실리콘의 고유 점 결함 및 산소를 포함하는 처리 반응에 의해 달성될 수 있는 성장하는 CZ 결정에서의 미세결함의 분포를 정량화한다. 산소의 존재는 주로 2종의 결합된 공공 종류, 즉 v_0 및 vO_2 와 산소의 응집체를 생성시킨다. 공공의 응집체는 구체 v -클러스터로서 모델링되고; 자기-침입형의 응집체는 구체 i -클러스터로서 모델링되며; 산소의 응집체, 주로는 이산화규소는 구체 O -클러스터로서 모델링된다. 이러한 처리의 복잡성이 CZ 결정에서의 임의의 주어진 위치에서의 상이한 크기의 클러스터의 집합군을 동일한 클러스터의 등가의 집합군으로서 근사화하는, 쿨카르니 및 보론코브에 의해 개발된 집중 모델 (*Simplified Two-Dimensional Quantification of the Grown-in Microdefect Distributions in Czochralski Grown Silicon Crystals*, Journal of the Electrochemical Society, 152 (10) pages G781 to G786 (2005))의 적용에 의해 줄어든다. 개시된 모델의 핵심 요소는 O -클러스터의 공공 보조 형성이다. O -클러스터의 비체적이 실리콘보다 크기 때문에, 효과적으로 CZ 성장시의 모든 거대한 O 클러스터는 공공의 흡수에 의해 형성된다. 성장하는 O -클러스터는 자유 공공 (v)만을 직접적으로 소모하지만; 자유 공공 농도가 감소할수록 보다 많은 자유 공공이 vO 및 vO_2 종류의 해리에 의해 생성된다. 따라서, 자유 공공과 vO 및 vO_2 종류로 결합된 공공이 둘다 소모된다.

[0061] 개시된 모델은 정상 상태 및 비정상 상태 하에 성장하는 CZ 결정에서의 미세결함 분포를 정량화한다. 결정에서 주어진 영역에서 형성되는 미세결함의 유형은 계면으로부터 떨어진 짧은 거리에서 확립된 고유 점 결함 및 vO 및 vO_2 종류의 농도에 좌우되는 것으로 생각된다. 고농도의 자유 공공이 뚜렷한 영역에서는, 공공 또는 v -클러

스터가 공공의 핵형성에 의해 보다 높은 온도에서 형성된다. v -클러스터 성장은 자유 공공과 결합된 공공을 둘 다 소모한다. 보통의 자유 공공 농도가 뚜렷한 영역에서는, v -클러스터 형성이 보다 높은 온도에서 억제되고; 자유 공공 및 결합된 공공이 O -클러스터의 형성 및 성장에 의해 소모된다. 공공과 산소 사이의 결합은 보다 낮은 온도에서 v -클러스터 및 O -클러스터의 존재 하에서도 초저농도로 결합된 형태의 공공이 생존하도록 한다. 자기-침입형의 우세함이 뚜렷한 영역에서는, i -클러스터가 형성된다.

[0062] 계면 근처에서의 고유 점 결합의 농도장은 주로 프렌켈(Frenkel) 반응과 고유 점 결합 이동 사이의 상호작용에 의해 확립되는 것으로 생각된다. 산소는 vO 및 vO_2 종류의 농도 증가에 의해 자기-침입형과의 재결합을 위해 이용가능한 유효 공공 농도를 증가시키고, 고정된 결정 성장 조건 동안 우세한 고유 점 결합 종류로서 공공의 생존을 유도하는 조건을 약간 용이하게 한다. 증가하는 산소 농도에서, 거대한 v -클러스터 및 i -클러스터가 존재하지 않는 결정이 성장할 수 있는 인상 속도 범위의 증가가 또한 모델에 의해 예측되고 설명된다. 이러한 거동은 고정된 결정 성장 조건 동안 증가하는 산소 농도에서 결합된 공공의 농도가 증가하기 때문이다. 문헌에 보고된 CZ 결정에서의 정성적 미세결합 분포가 개발된 모델에 의해 정량화될 수 있다.

[0063] 집중 모델에 기반하여 BMD 크기 분포를 모델링하고 예측하는데 사용되는 알고리즘이 문헌 [G. Samanta and M. S. Kulkarni, *Efficient computation of population distribution of microdefects at any location in growing Czochralski silicon single crystals*, Journal of Crystal Growth, 393, pages 49 to 53 (2014)]에 의해 개시되었고, 이것을 본원에서는 "사만타(Samanta) 알고리즘"이라 명명한다. 개시된 모델은 M. S. 쿨카르니 및 V. V. 보론코브에 의해 개시된 모델 (*Simplified Two-Dimensional Quantification of the Grown-in Microdefect Distributions in Czochralski Grown Silicon Crystals*, Journal of the Electrochemical Society, 152 (10) pages G781 to G786 (2005))에 기반하는 것으로서, 클러스터 형성 및 경로 (이동) 에너지를 고려하지 않으면서 결정에서의 임의의 위치에서의 미세결합 집합군의 크기 분포 계산을 허용한다. 열 응력 및 도판트 농도의 의존성 역시 고려되지 않는다. 고유 점 결합 평형 농도에 대한 도판트-유래 변형 효과는 종래의 도핑 수준에서 무시할 정도로 작다. 페르미(Fermi) 준위에서 도판트-유래 변동으로 인한 점 결합 농도의 평형 값의 변화는 또한 초고농도의 도핑 수준 (대략 10^{18} cm^{-3} 이상)에서는 유의하다. 평형 농도 값에 대한 열 응력의 영향 역시 미약하다. 집중 모델의 연산 장점은 그것을 통해 발달된 점 결합 농도장이 또한 결정에서의 선택된 위치에서의 미세결합 집합군의 크기 분포를 푸는데 사용될 때도 방해받지 않는다. 집중 모델로부터 예측된 크기 분포는 정상 조건 및 비정상 조건 하의 엄격한 모델로부터 예측된 것과 상당히 잘 일치한다.

[0064] 본 개시내용에 따라서, 상기에 기재된 알고리즘에 기반하여, 결정 단면에 걸쳐서 결정 반경방향 위치의 함수로서 공공 반경 및 밀도의 실질적인 반경방향 균일성, 결정 단면에 걸쳐서 결정 반경방향 위치의 함수로서 BMD 직경 및 밀도의 실질적인 반경방향 균일성, 및 에지 효과의 실질적인 부재를 특징으로 하는 단결정 CZ 실리콘의 제조를 가능하게 하는 인상 속도, 온도 구배 및 질소 농도 값을 유도하는 방법이 개발되었다. 하나의 이러한 실시양태가 도 23의 흐름도에 나타나 있다. 요약하면, 쿨카르니 2005, 쿨카르니 2007, 및 쿨카르니 2008 알고리즘을 사만타 알고리즘과 함께 사용하여, 산화 석출물 밀도 및 크기의 반경방향 프로파일을 시뮬레이션하고 단결정 CZ 실리콘 잉곳 및 웨이퍼의 에지 밴드 특징을 평가한다. 인상 속도, 온도 구배 및 질소 농도 변수의 임의의 주어진 세트에 대하여, 실리콘 결정 잉곳 또는 웨이퍼가 시뮬레이션에 의해 (i) 잉곳 또는 웨이퍼의 중심으로부터 잉곳 또는 웨이퍼의 에지로 연장되는 영역에서의 반경방향 벌크 미세 결함 크기의 20% 초과 증가, (ii) 잉곳 또는 웨이퍼의 중심으로부터 잉곳 또는 웨이퍼의 에지로 연장되는 영역에서의 반경방향 벌크 미세 결함 밀도의 200% 초과 증가, (iii) 잉곳 또는 웨이퍼의 에지까지의 약 10 mm 지점으로부터 잉곳 또는 웨이퍼의 에지로 연장되는 영역에서의 반경방향 벌크 미세 결함 크기의 15% 초과 증가, (iv) 잉곳 또는 웨이퍼의 에지까지의 약 10 mm 지점으로부터 잉곳 또는 웨이퍼의 에지로 연장되는 영역에서의 반경방향 벌크 미세 결함 밀도의 100% 초과 증가, 및 (v) 잉곳 또는 웨이퍼의 에지까지의 약 1000 μm 지점으로부터 잉곳 또는 웨이퍼의 에지로 연장되는 영역에서의, 약 30 nm 미만 또는 약 100 nm 초과 평균 반경 및 약 1×10^8 개 원자/ cm^3 미만 또는 약 1×10^{10} 개 원자/ cm^3 초과 산소 석출 밀도를 갖는 산소 석출물을 포함하는 에지 밴드 때문에 실패인 것으로 예측된다면, 이러한 잉곳 또는 웨이퍼는 허용되지 않는 것으로 간주된다. 변수의 세트가 허용되지 않는 잉곳 또는 웨이퍼를 초래하는 것으로 예측된다면, 후속 시뮬레이션 반복은 새로운 변수 세트에 기반하여 수행된다. 목적하는 BMD 크기 및 분포를 제공하는 것으로 예측되는 변수 세트가 유도될 때까지 시뮬레이션 반복이 계속된다.

[0065] 본 개시내용의 일부 추가 측면에서, BMD 크기가 시뮬레이션으로부터 예측될 수 있다. 먼저, 산소 석출물의 클러스터 크기 분포를 축방향 위치에서의 결정 단면에 걸쳐서 여러 반경방향 위치에서 계산한다. 그 후에, 고정

적 핵형성 이론 (CNT)에 기반하여 하기와 같이 임계 크기 (R_{cr})를 결정한다:

[0066]
$$R_{cr} = (2215)/(T \ln(C_0/C_{0e})) \quad (1)$$

[0067] 방정식 (1)에서, R_{cr} 은 나노미터 (nm) 단위이고; T 는 켈빈도 단위의 어닐링 온도를 나타내며; C_0 는 결정에서의 산소 수준을 나타내며; C_{0e} 는 온도 T 에서 실리콘 결정에서의 산소 농도 평형 값을 나타낸다. 모든 위치에서 R_{cr} 을 초과하는 크기를 갖는 산소 석출물의 밀도를 적분한 다음, 그러한 모든 위치에서의 그 수치를 평균내어 BMD 밀도를 추정한다.

[0068] 본 개시내용은 추가로 어닐링 동안의 웨이퍼 깊이에 따른 산화물 석출 밀도를 시뮬레이션하는 방법에 관한 것이다. 시뮬레이션을 위한 수학 모델은 보론코브 및 폴스터(Falster)의 핵형성 모델 (*Nucleation of oxide precipitates in vacancy-containing silicon*, Journal of Applied Physics, Volume 51, pages 5802-5810 (2002))에 기반하고, 여기서 하기 방정식이 점 결함 균형, 공공과 산소 사이의 상호작용, 및 석출물의 성장을 좌우하는 것으로 생각된다. 방정식은 하기와 같다:

[0069]
$$\partial(C_v - C_i)/\partial t = D_v(T)\partial^2 C_v/\partial x^2 - D_i(T)\partial^2 C_i/\partial x^2 - J_i \quad (2)$$

[0070] 방정식 (2)는 공공의 결합 및 자유 상태를 설명해주는 점 결함의 균형, 점 결함의 확산 플럭스, 및 성장하는 산화 석출물로 인한 자기-침입형의 배출 플럭스를 기술한다. 자유 공공의 소모 플럭스는 확산-제한 값 미만인 것으로 추정되기 때문에 무시할 수 있다.

[0071]
$$J_i = \varepsilon 4 \pi D C \int I_s(t') R(t', t) dt' \quad (3)$$

[0072] 방정식 (3)은 자기-침입형의 배출 플럭스의 정량적 평가를 제공한다.

[0073]
$$R(t', t) = [2DC(t-t')/q]^{1/2} \quad (4)$$

[0074] 방정식 (4)는 핵형성된 산화 석출물의 확산 제한 성장을 기술한다.

[0075]
$$C_i C_{vt} = C_{ie} C_{vte} \quad (5)$$

[0076] 방정식 (5)는 결합 및 자유 공공과 자기-침입형 사이의 신속한 반응의 타당한 가정 결과이다.

[0077]
$$C_v/C_{vt} = C_{ve}/C_{vte} \quad (6)$$

[0078] 방정식 (6)은 자유 공공이 산소 클러스터에 의해 급속히 포획된다는 가정에 기인한다.

[0079] 8×10^{17} 개 산소 원자/cm³ 및 6×10^{12} 개/cm³의 초기 총 공공 농도 (C_{vt})를 함유하는 600 마이크로미터 두께의 웨이퍼를 800°C에서 1시간 동안 어닐링하는 것의 시뮬레이션이 수행된다. 선택된 C_{vt} 값은 Pt 확산 기술을 사용하여 측정된, 공공 지배 웨이퍼에 대하여 전형적인 값으로 간주된다. 도 19는 어닐링 동안의 다양한 시점에서의 웨이퍼 깊이에 따른 예측 산화 석출물 밀도의 그래프이다. 도 20은 어닐링 동안의 다양한 시점에서의 웨이퍼 깊이에 따른 예측 C_{vt} 의 그래프이다. 도 19 및 20은 표면 상의 평형 조건의 존재로 인해 웨이퍼 표면 가까이에서 발생하는 변화를 보여준다. 총 공공 농도는 벌크로부터 웨이퍼 표면을 향해 확산되어 나가서, 석출물 밀도 역시 벌크로부터 떨어진 곳에서 감퇴하게 된다. 웨이퍼 표면으로부터 약 30 내지 40 마이크로미터의 깊이에서, 석출물 밀도는 벌크 값과 비교하여 낮게 유지된다.

[0080] 본 개시내용의 실리콘 웨이퍼는 다양한 적용분야에서 사용될 수 있다. 예를 들어, 활택 마무리로 연마된 베어(bare) 실리콘 표면을 갖는 이러한 웨이퍼 (즉, 연마 웨이퍼)는 집적 회로 제조 공정에 그대로 사용될 수 있다. 별법으로, 웨이퍼는 에피택셜 증착을 위한 기판으로서 또는 실리콘 절연체 (silicon on insulator; "SOI")로서 사용될 수 있다 (충 전이 또는 산소 주입에 의해). 필요에 따라, 웨이퍼의 표면 영역 근처, 예를 들어 일반적으로 약 2 마이크로미터까지는 에칭제 및 관련 기술분야에서 통상적인 기술을 사용하여 화학적 에칭에 의해 실질적으로, 또는 심지어 전체적으로 제거될 수 있다. 필요에 따라, 웨이퍼는 산소 석출 전에 또는 그 후에 화학적으로 또는 화학기계적으로 활택 마무리로 연마될 수 있다. 에피택셜 층은 전체 웨이퍼 상에, 또는 별법으로 웨이퍼의 부분에만 증착될 수 있다. 에피택셜 층은 바람직하게는 웨이퍼의 전방 표면 상에 증착된다. 보다 바람직하게는, 웨이퍼의 전체 전방 표면 상에 증착된다. 웨이퍼의 임의의 다른 부분에 증착된 에피택셜 층을 갖는 것이 바람직한지의 여부는 웨이퍼의 의도된 용도에 좌우될 것이다. 대부분의 적용분야에서, 웨이퍼의 임의

의 다른 부분에 에피택셜 층이 존재하는지 또는 존재하지 않는지는 중요하지 않다.

[0081] 실리콘 절연체 구조물은 일반적으로 장치 층, 핸들 웨이퍼 또는 지지 층, 및 지지 층과 장치 층 사이의 절연 필름 또는 층 (전형적으로, 산화물 층)을 포함한다. 일반적으로, 장치 층은 약 0.5 내지 20 마이크로미터의 두께이다. 실리콘 절연체 구조물은 관련 기술분야에 공지된 다양한 기술, 예컨대 SIMOX 또는 BESOI에 의해 제조될 수 있다. SOI 구조물은 예를 들어, SIMOX 공정에 의해 웨이퍼를 관련 기술분야에서 표준법인 이온 주입 공정에 적용함으로써 제조될 수 있다 (예를 들어, 둘다 본원에 참조로 포함되는 미국 특허 5,436,175 및 문헌 [Plasma Immersion Ion Implantation for Semiconductor Processing, Materials Chemistry and Physics 46 (1996) 132-139] 참조). SOI 구조물은 또한 2개의 웨이퍼를 접합시키고 접합된 웨이퍼 중 어느 하나의 부분을 제거함으로써 제조될 수 있다. 예를 들어, SOI 구조물은 BESOI 공정에 의해 제조될 수 있는데, 여기서 웨이퍼는 또 다른 웨이퍼에 접합된 다음, 장치 층을 수득하기 위해 웨이퍼 중 어느 하나의 상당 부분이 공지된 웨이퍼 박화 기술을 사용하여 에칭된다 (예를 들어, 본원에 참조로 포함되는 미국 특허 5,024,723 및 5,189,500 참조).

[0082] 에피택셜 증착은 바람직하게는 화학적 증기 증착에 의해 수행된다. 일반적으로 설명하면, 화학적 증기 증착은 에피택셜 증착 반응기, 예를 들어 어플라이드 머티리얼스(Applied Materials)로부터 입수가 가능한 센추라 반응기 (Centura reactor)에서 웨이퍼의 표면을 실리콘을 포함하는 분위기에 노출시키는 것을 포함한다. 바람직하게는, 웨이퍼의 표면이 실리콘을 포함하는 휘발성 기체 (예를 들어, SiCl_4 , SiHCl_3 , SiH_2Cl_2 , SiH_3Cl , 또는 SiH_4)를 포함하는 분위기에 노출된다. 상기 분위기는 또한 바람직하게는 반응자 기체 (바람직하게는, H_2)를 함유한다. 예를 들어, 에피택셜 증착 동안에 실리콘의 공급원은 SiH_2Cl_2 또는 SiH_4 일 수 있다. SiH_2Cl_2 가 사용된다면, 증착 동안에 반응기의 진공압은 바람직하게는 약 500 내지 약 760 Torr이다. 다른 한편, SiH_4 가 사용된다면, 반응기의 압력은 바람직하게는 약 100 Torr이다. 가장 바람직하게는, 증착 동안에 실리콘의 공급원은 SiHCl_3 이다. 이것이 다른 공급원보다 훨씬 저렴한 경향이 있다. 또한, SiHCl_3 를 사용하는 에피택셜 증착은 대기압에서 수행될 수 있다. 이는 진공 펌프가 필요하지 않고 반응기 챔버가 붕괴를 방지하기 위해 튼튼할 필요가 없기 때문에 유리하다. 게다가, 안전 위험이 줄어들고 공기 또는 다른 기체가 반응기 챔버로 누설될 가능성이 감소한다.

[0083] 에피택셜 증착 동안에, 웨이퍼 표면의 온도는 바람직하게는 실리콘을 포함하는 분위기가 표면 상에 다결정 실리콘을 증착시키는 것을 방지하는 충분한 온도로 램핑되어 그 온도에서 유지된다. 일반적으로, 이러한 기간 동안의 표면 온도는 바람직하게는 적어도 약 900°C 이다. 보다 바람직하게는, 표면 온도는 약 1050 내지 약 1150°C 의 범위에서 유지된다. 가장 바람직하게는, 표면 온도는 산화구소 제거 온도에서 유지된다. 에피택셜 증착의 성장 속도는 바람직하게는 약 0.5 내지 약 $7.0 \mu\text{m}/\text{min}$ 이다. 약 3.5 내지 약 $4.0 \mu\text{m}/\text{min}$ 의 속도가 예를 들어, 약 1150°C 의 온도 및 약 1 atm 이하의 절대 압력에서 약 2.5 몰%의 SiHCl_3 및 약 97.5 몰%의 H_2 로 본질적으로 이루어진 분위기를 사용함으로써 달성될 수 있다.

[0084] 일부 적용분야에서, 웨이퍼는 전기 특성을 부여하는 에피택셜 층을 포함한다. 일부 실시양태에서, 에피택셜 층은 인으로 저농도 도핑된다. 따라서, 에피택셜 증착을 위한 환경은 휘발성 화합물, 예컨대 포스핀 (PH_3)으로서 존재하는 인을 포함한다. 일부 실시양태에서, 에피택셜 층은 붕소를 함유할 수 있다. 이러한 층은 예를 들어, 증착 동안에 분위기 중에 B_2H_6 를 포함시킴으로써 제조될 수 있다. 에피택셜 증착은 전형적으로 에피택셜 증착 동안에 형성된 부산물을 제거하기 위해, 에피택셜 증착에 이어서 후속 에피 세정 단계가 요구된다. 이 단계는 상기 부산물이 공기와 반응하는 경우에 발생하는, 시간 의존성 헤이즈를 방지하기 위해 사용된다. 또한, 다수의 후속 에피 세정 기술은 에피택셜 표면 상에 산화구소 층을 형성하는 경향이 있고, 이 층은 표면을 부동태화 (즉, 보호)하는 경향이 있다. 본 개시내용의 에피택셜 웨이퍼는 관련 기술분야에 공지된 방법에 의해 세정될 수 있다.

[0085] 웨이퍼 표면은 산화물 또는 질화물 층을 포함할 수 있다. 예를 들어, 실리콘 표면이 실온에서 공기에 노출될 때 산화구소 층이 실리콘 표면 상에 형성되고, 이것은 일반적으로 약 10 내지 약 15 Å의 두께를 갖는다. 바람직하게는, 질화물, 산화물, 또는 질화물/산화물 층은 에피택셜 층이 표면 상에 증착되기 전에 웨이퍼 표면으로부터 제거된다. 산화구소 또는 질화물/산화물 층의 제거는 산화물 또는 질화물/산화물 층이 표면으로부터 제거될 때까지 산화제 무함유 분위기에서 웨이퍼 표면을 가열함으로써 달성될 수 있다. 예를 들어, 웨이퍼의 표면이 바람직하게는 적어도 약 1100°C 의 온도, 보다 바람직하게는 적어도 약 1150°C 의 온도로 가열된다. 이러한 가열은 바람직하게는 웨이퍼의 표면을 H_2 또는 영족 기체 (예를 들어, He, Ne, 또는 Ar)를 포함하는 분위기에

노출시키면서 수행된다. 보다 바람직하게는, 상기 분위기는 H_2 를 포함한다. 가장 바람직하게는, 상기 분위기는 H_2 로 본질적으로 이루어지는데, 그 이유는 다른 분위기의 사용이 웨이퍼의 표면에서 에치 피트(etch pit)의 형성을 초래하는 경향이 있기 때문이다. 일반적으로, 웨이퍼 표면을 가열하여 산화규소 또는 질화물/산화물 층을 제거하고, 이어서 산화물 또는 질화물/산화물이 제거된 후 30초 이내에 (보다 바람직하게는, 약 10초 이내에) 실리콘 증착을 개시하는 것이 바람직하다. 일반적으로, 이는 웨이퍼 표면을 적어도 약 $1100^{\circ}C$ (보다 바람직하게는, 적어도 약 $1150^{\circ}C$)의 온도로 가열하고, 웨이퍼 표면이 상기 온도에 도달한 후 30초 이내에 (보다 바람직하게는, 약 10초 이내에) 실리콘 증착을 개시함으로써 달성될 수 있다. 산화규소 또는 질화물/산화물 층의 제거 후 최대 약 10초 동안 실리콘 증착 개시를 대기함으로써는 웨이퍼의 온도 안정화 및 균일화를 허용한다.

[0086] 별법으로, 산화물 또는 질화물/산화물 층은 화학적으로 스트립핑(stripped)될 수 있다. 실리콘 표면이 질화물/산화물 층을 갖는 실시양태에서, 화학적 스트립핑은 질화물/산화물 층을 제거하기 위한 바람직한 수단이다. 화학적 스트립핑은 인산, 플루오린화수소산, 또는 공지된 다른 산을 사용하여 관련 기술분야에서 공지된 수단에 의해 수행될 수 있다. 또 다른 별법으로, 산화물 또는 질화물/산화물 층은, 예를 들어 어플라이드 머티리얼스의 eMAX를 사용하는 플라즈마 에칭, 또는 관련 기술분야에 공지된 다른 방법에 의해 에칭될 수 있다. 표면 층이 우세하게 질화규소 층인 실시양태에서, 질화물 층은 연마, 화학적 에칭, 또는 플라즈마 에칭 (예컨대, 어플라이드 머티리얼스의 eMAX, 또는 관련 기술분야에 공지된 다른 에칭 방법)에 의해 제거될 수 있다.

[0087] 실시예

[0088] 실시예 1

[0089] 질소-도핑 단결정 실리콘 잉곳으로부터 슬라이싱된, BMD 크기 및 분포의 실질적인 반경방향 균일성을 특징으로 하는 300 mm 직경 웨이퍼의 제조를 가능하게 하는 변수 세트를 유도하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 표 1에 개시된 변수의 조합에 대하여 도 23에 나타나 있는 방법에 기반하고, 여기서 "Comb"는 조합을 나타내고, "선행기술"은 비교용 선행기술 잉곳이다. 표 1에서 질소 농도는 실리콘 용융물 중의 농도를 나타내고, 여기서 형성된 실리콘 결정 중의 질소 농도는 약 1×10^{13} 개 원자/ cm^3 내지 약 1×10^{15} 개 원자/ cm^3 의 범위에 있을 것이라 예상된다.

[0090] <표 1>

Comb.	인상 속도 (mm/min)	질소 (원자/ cm^3)	결정 표면 온도 구배 (K/cm)
선행 기술	0.85	1.26×10^{17}	51.14
1	0.9	1.76×10^{17}	46.04
2	0.9	1.26×10^{17}	46.04
3	0.9	1.76×10^{17}	35.84
4	0.9	1.26×10^{17}	35.84

[0091]

[0092] 중심 축으로부터 에지까지 웨이퍼 단면에 걸쳐서 다양한 위치에서의 성장 산소 석출물의 반경 및 성장 공극의 반경을 본원에 개시된 시뮬레이션 방법을 사용하여 예측하였다. 도 15는 웨이퍼 단면에 걸쳐서 반경방향 위치의 함수로서 성장 산소 석출물의 예측 반경을 보여주는 그래프이고, 도 16은 웨이퍼 단면에 걸쳐서 반경방향 위치의 함수로서 성장 공극의 예측 반경을 보여주는 그래프이다. 하기 표 2는 도 15의 시뮬레이션 결과를 (i) 웨이퍼의 중심으로부터 웨이퍼의 에지까지의, 또한 (ii) 10 mm 지점으로부터 웨이퍼의 에지까지의 예측 BMD 크기 증가 %에 대하여 표 형태로 제시한다.

[0093] <표 2>

Comb.	잉곳의 중심으로부터 잉곳의 에지까지의 산소 석출물 크기 증가 %	잉곳의 에지까지의 10 mm 지점으로부터 잉곳의 에지까지의 산소 석출물 크기 증가 %
0	39%	34%
1	18%	23%
2	20%	20%
3	12%	15%
4	17%	15%

[0094]

[0095]

1100℃ 및 1000℃에서의 고온 어닐링으로부터 초래되는 웨이퍼에서의 BMD 밀도를 시뮬레이션에 기반하여 예측하였다. 시뮬레이션 결과가 도 17 및 18에 나타나 있으며, 여기서 조합 0은 선행기술의 조합을 나타낸다. 도 17은 1100℃에서 수행된 일정한 고온 어닐링에 있어서 결정 표면 온도 구배의 함수로서 웨이퍼의 예측 평균 BMD 밀도를 보여주는 그래프이고, 도 18은 1000℃에서 수행된 일정한 고온 어닐링에 있어서 결정 표면 온도 구배의 함수로서 웨이퍼의 예측 평균 BMD 밀도를 보여주는 그래프이다.

[0096]

실시예 2

[0097]

3종의 300 mm 직경 단결정 CZ 실리콘 잉곳 (균일 샘플 1, 2 및 3으로 지정됨)을 각각 0.9 mm/분의 인상 속도, 약 35° K/cm 내지 약 46° K/cm의 온도 구배, 및 약 1×10^{14} 개 원자/cm³ 내지 약 1×10^{15} 개 원자/cm³의 잉곳 질소 농도에서 제조하였다. 비교용 300 mm 직경 단결정 CZ 실리콘 잉곳 (불균일 샘플 1 및 2로 지정됨)을 각각 0.78 mm/분의 인상 속도, 약 51° K/cm의 온도 구배, 및 약 3×10^{13} 개 원자/cm³ 내지 약 2×10^{14} 개 원자/cm³의 잉곳 질소 농도에서 제조하였다. 웨이퍼를 잉곳으로부터 슬라이싱하고, 780℃에서 3시간 동안, 이어서 1000℃에서 16시간 동안 웨이퍼를 어닐링함으로써 산소 석출 열처리에 적용하였다.

[0098]

도 1에 나타나 있는 바와 같이, 웨이퍼의 중심으로부터 웨이퍼의 에지까지의 평균 BMD 크기 (직경) 증가는 불균일한 선행기술의 샘플 1 및 2에 대하여 각각 약 47% 및 약 37%였다. 에지까지의 10 mm 지점으로부터 웨이퍼의 에지까지의 평균 BMD 크기 증가는 10 mm 반경 내에서 불균일한 선행기술의 샘플 1 및 2에 대하여 각각 약 28% 및 약 29%였다. 도 2에 나타나 있는 바와 같이, 웨이퍼의 중심으로부터 웨이퍼의 에지까지의 평균 BMD 밀도 증가는 불균일한 선행기술의 샘플 1 및 2에 대하여 각각 약 660% 및 약 285%였다. 웨이퍼의 에지까지의 10 mm 지점으로부터 웨이퍼의 에지까지의 평균 BMD 밀도 증가는 10 mm 반경 내에서 불균일한 선행기술의 샘플 1 및 2에 대하여 각각 약 357% 및 약 308%였다. 에지 밴드는 비교적 높은 밀도 및 비교적 거대한 크기를 갖는 석출 밴드를 특징으로 한다.

[0099]

도 21에 나타나 있는 바와 같이, 웨이퍼의 중심으로부터 웨이퍼의 에지까지의 평균 BMD 크기 감소는 본 개시내용의 균일 샘플 1, 2 및 3에 대하여 각각 약 6%, 7% 및 4%였다. 웨이퍼의 중심으로부터 웨이퍼의 에지까지의 평균 BMD 크기 감소는 본 개시내용의 균일 샘플 1, 2 및 3에 대하여 각각 약 6%, 3% 및 1%였다. 도 22에 나타나 있는 바와 같이, 웨이퍼의 중심으로부터 웨이퍼의 에지까지의 평균 BMD 밀도 감소는 본 개시내용의 균일 샘플 1, 2 및 3에 대하여 각각 약 23%, 37% 및 4%였다. 도 22에 나타나 있는 바와 같이, 웨이퍼의 중심으로부터 웨이퍼의 에지까지의 평균 BMD 밀도 감소는 본 개시내용의 균일 샘플 1, 2 및 3에 대하여 각각 약 6%, 12% 및 16%였다. 밀도와 크기 둘 모두의 감소 때문에 이들 균일 샘플에서는 검출가능한 에지 밴드가 존재하지 않았다.

[0100]

실험 결과는 여러 조합의 시뮬레이션을 통해, 공극 크기의 유의한 변화 없이 종래 공정의 에지 영역에서의 산소 석출물의 반경이 유의하게 감소할 수 있다는 것을 입증한다. 어닐링이 1100℃에서 수행된다면, 선행기술에서 게터링을 위해 충분한 것으로 확인되었던 1×10^8 /cm³보다 높은 밀도를 여전히 유지하면서, 평균 BMD 밀도가 또한 감소할 수 있었다.

[0101]

상기의 상세한 설명 명세서에는 최상의 모드를 포함하는 본 발명을 개시하고, 또한 관련 기술분야의 통상의 기술자가 임의의 장치 또는 시스템을 제조 및 사용하고 임의의 포함된 방법을 수행하는 것을 포함하여, 본 발명을 실시할 수 있도록 하기 위해 실시예를 사용한다. 본 발명의 특허가능한 범주는 청구범위에 의해 한정되고 관련

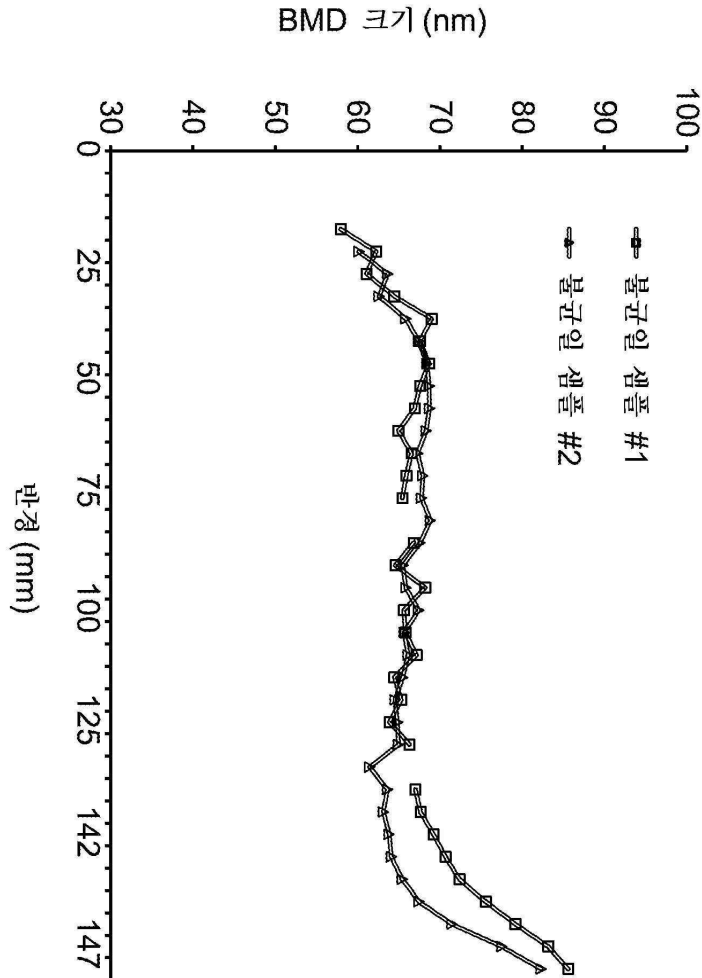
기술분야의 통상의 기술자에 의해 이루어지는 다른 실시예를 포함할 수 있다. 이러한 다른 실시예는 청구범위의 적역된 언어와 상이하지 않은 구조적 요소를 갖거나 또는 청구범위의 적역된 언어와 실질적이지 않은 차이를 갖는 등가의 구조적 요소를 포함한다면 청구범위의 범주 내에 포함되려고자 한다.

[0102]

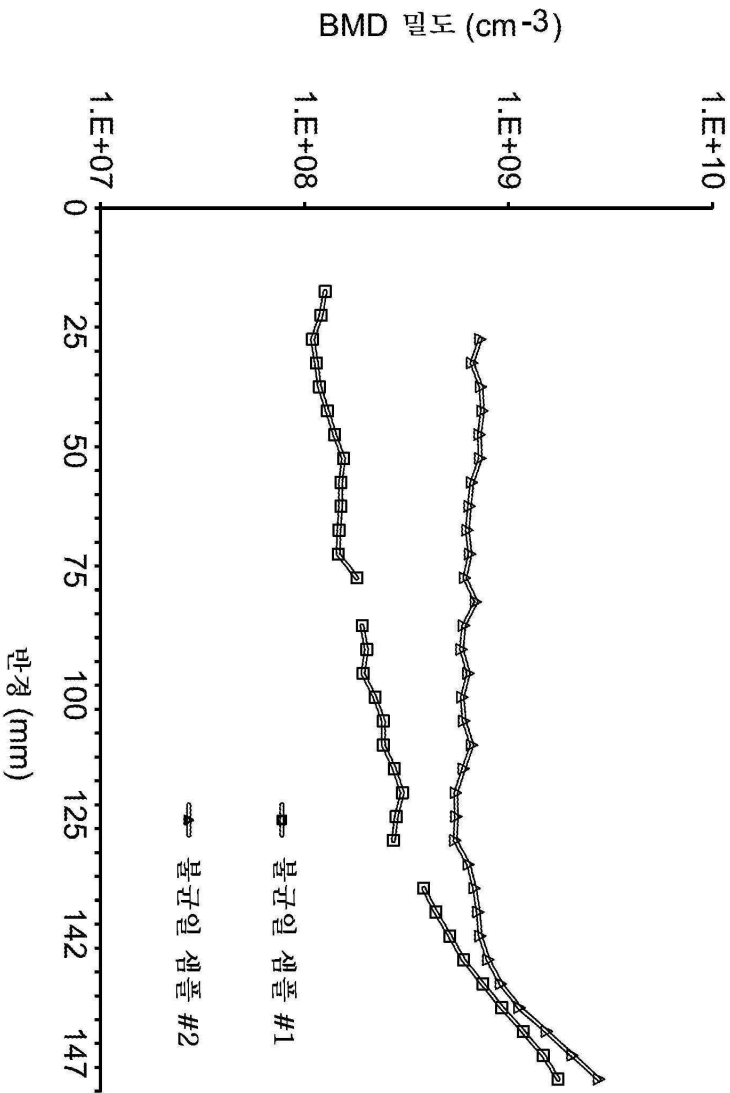
본 발명의 요소 또는 그의 실시양태(들)를 도입할 때, 관사 "하나의", "한", "그" 및 "상기"는 하나 이상의 요소가 존재한다는 것을 의미하기 위한 것이다. "포함하는", "비롯한" 및 "갖는"과 같은 용어들은 포괄적이고 나열된 요소 이외의 추가 요소가 존재할 수도 있다는 것을 의미하기 위한 것이다.

도면

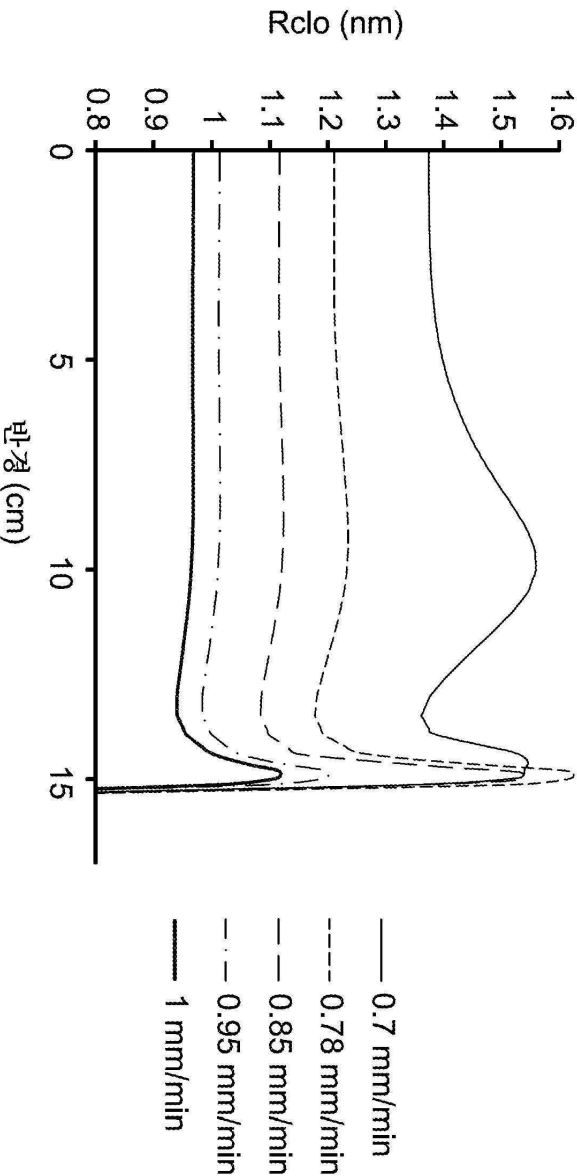
도면1



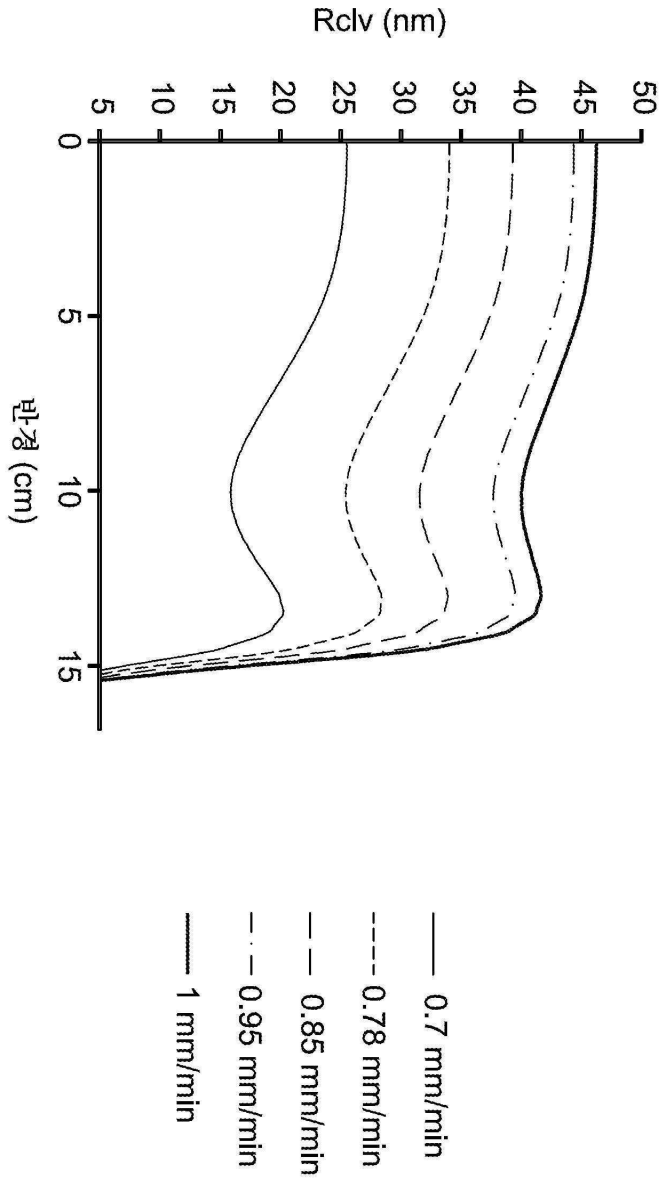
도면2



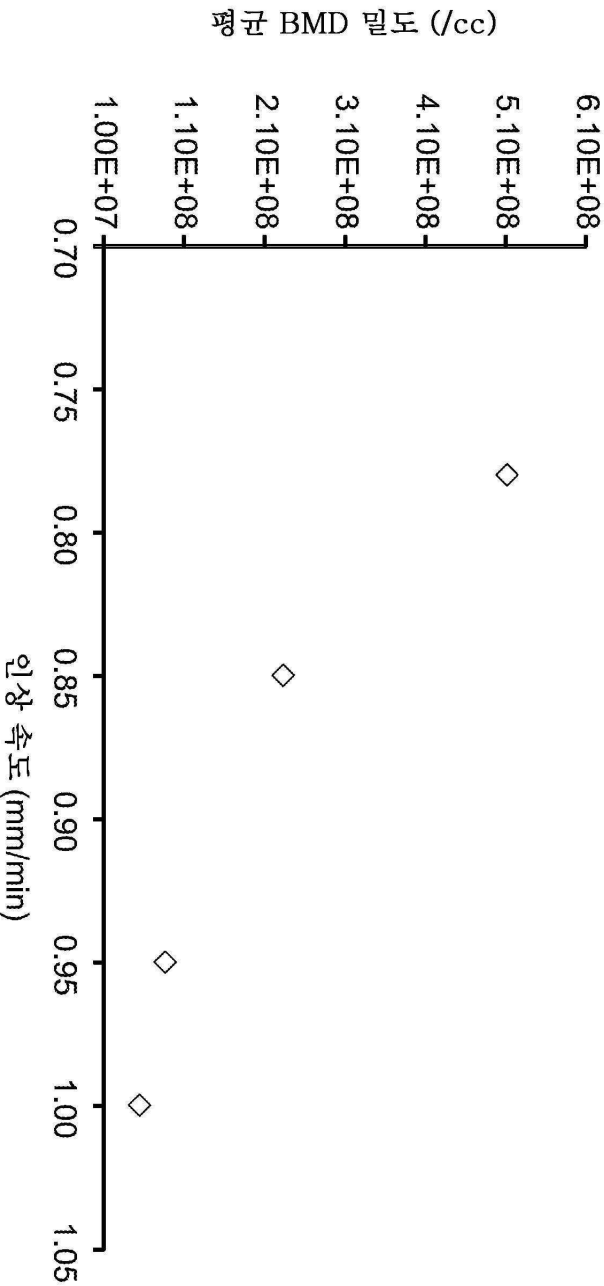
도면3



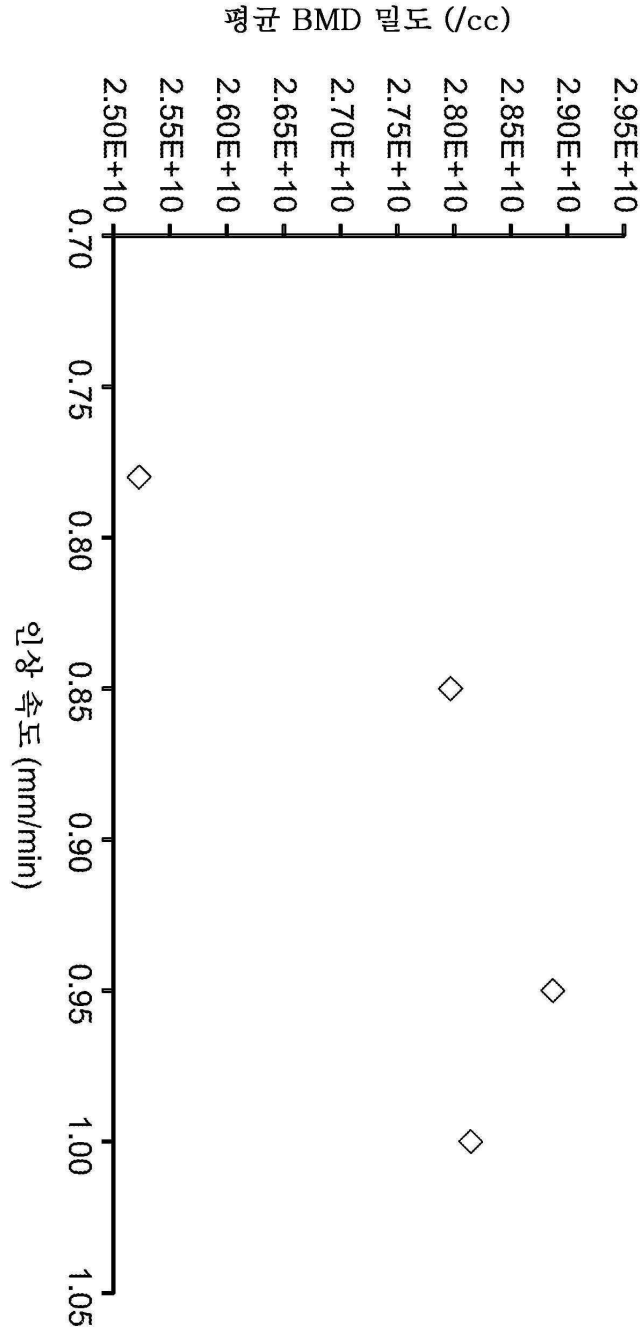
도면4



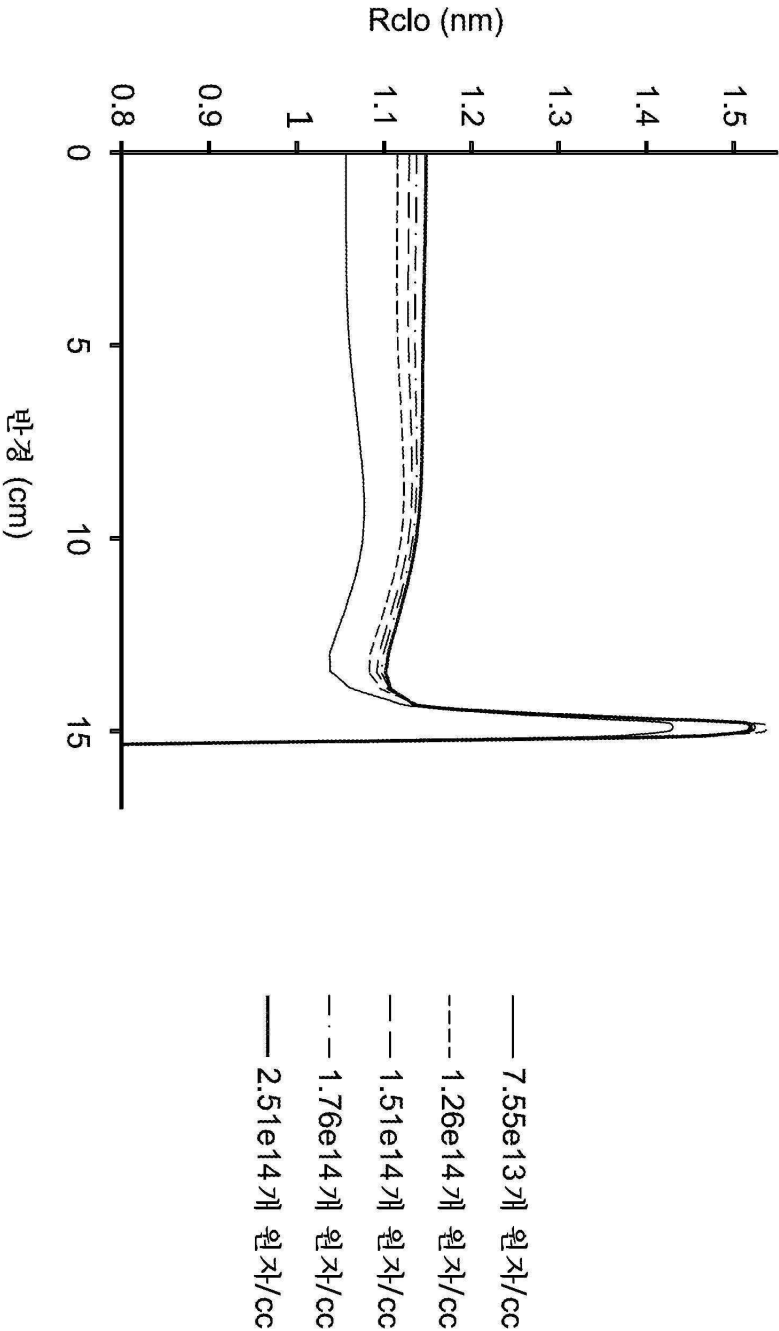
도면5



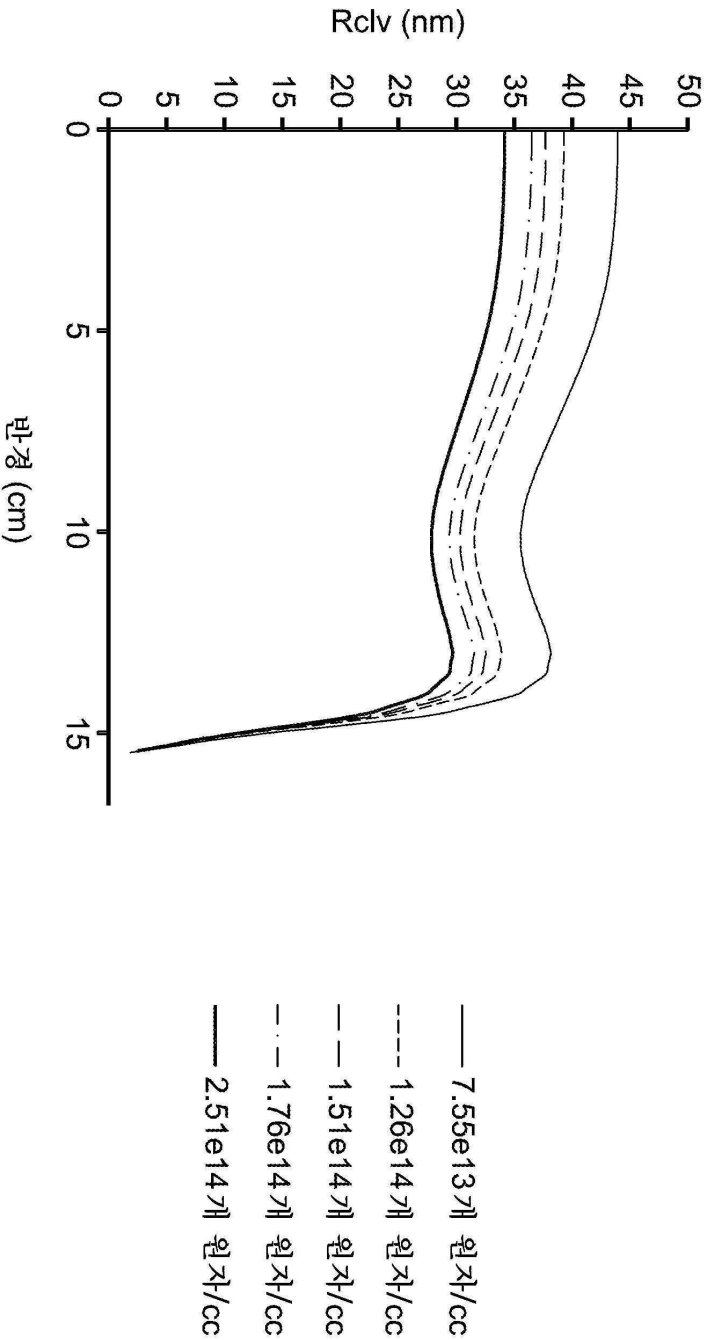
도면6



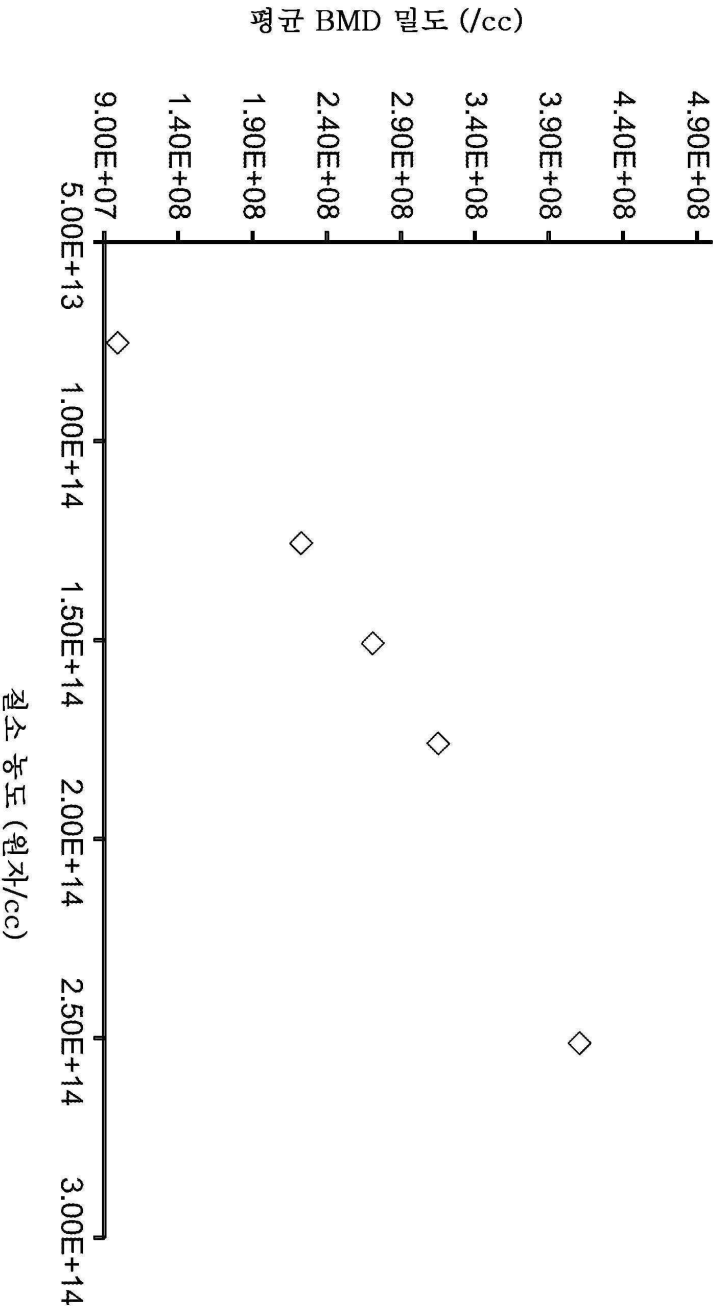
도면7



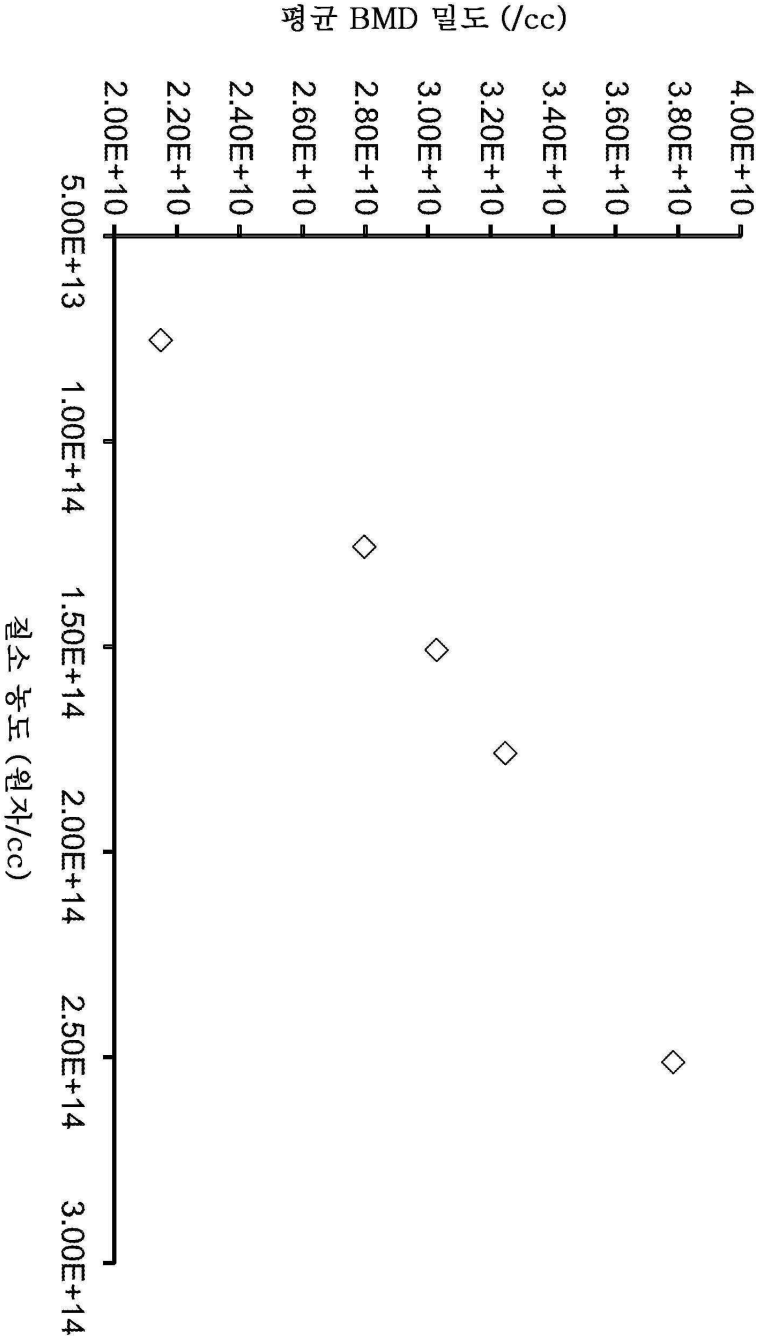
도면8



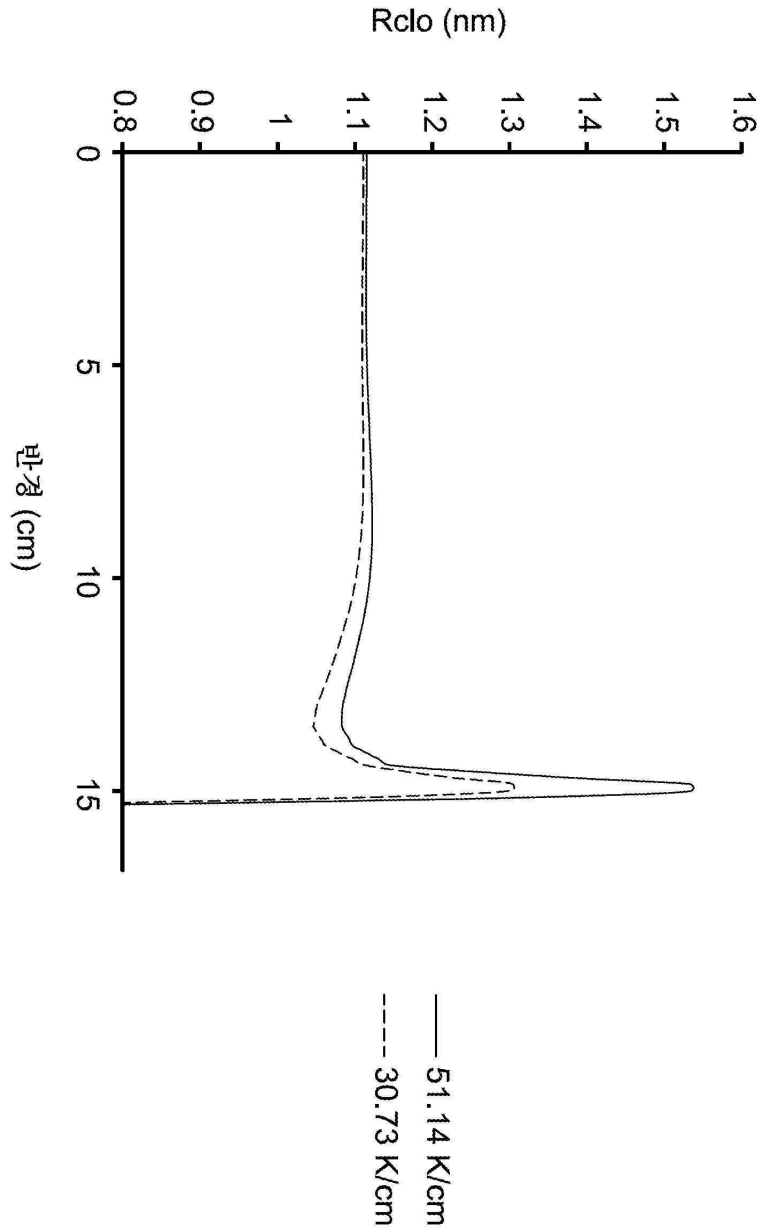
도면9



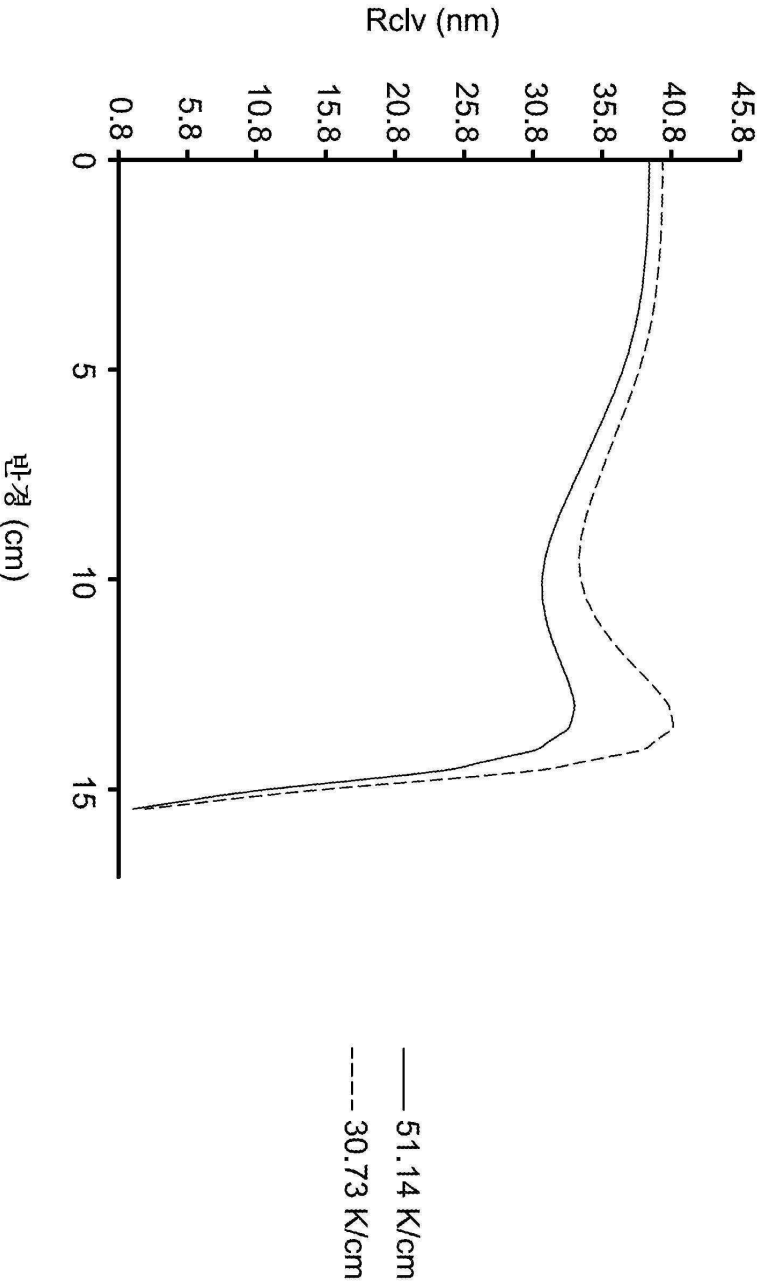
도면10



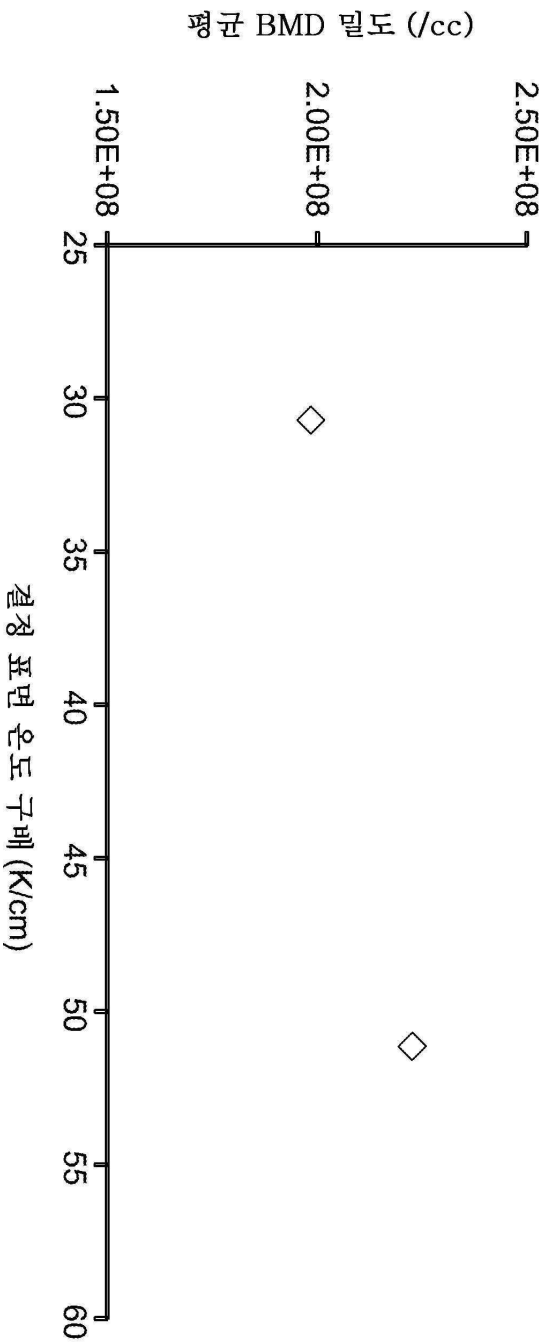
도면11



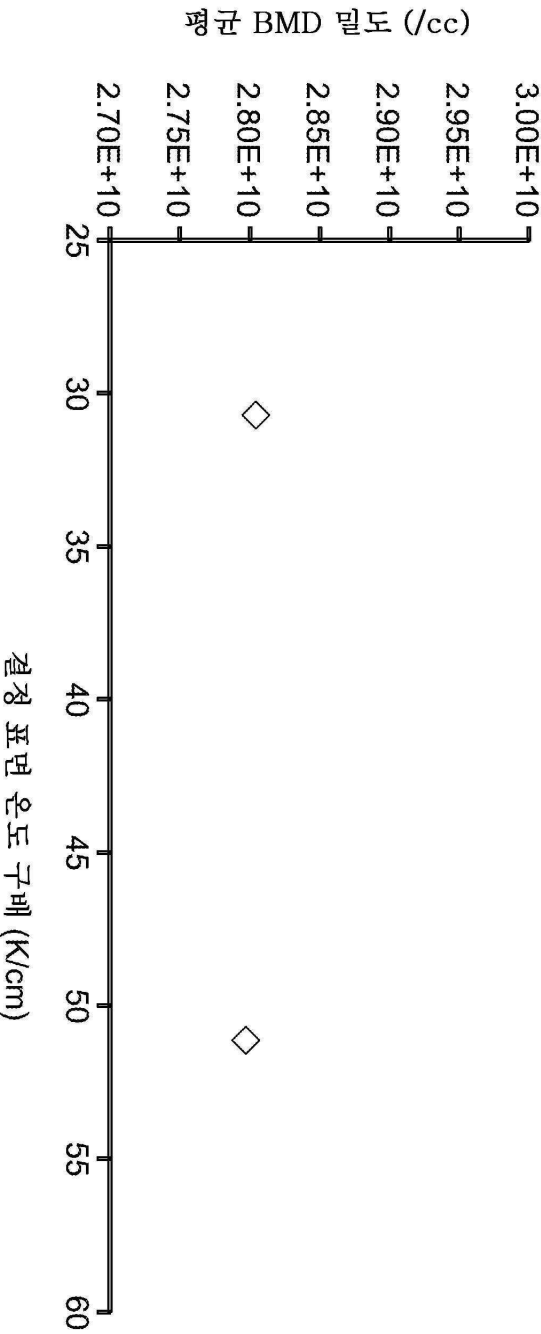
도면12



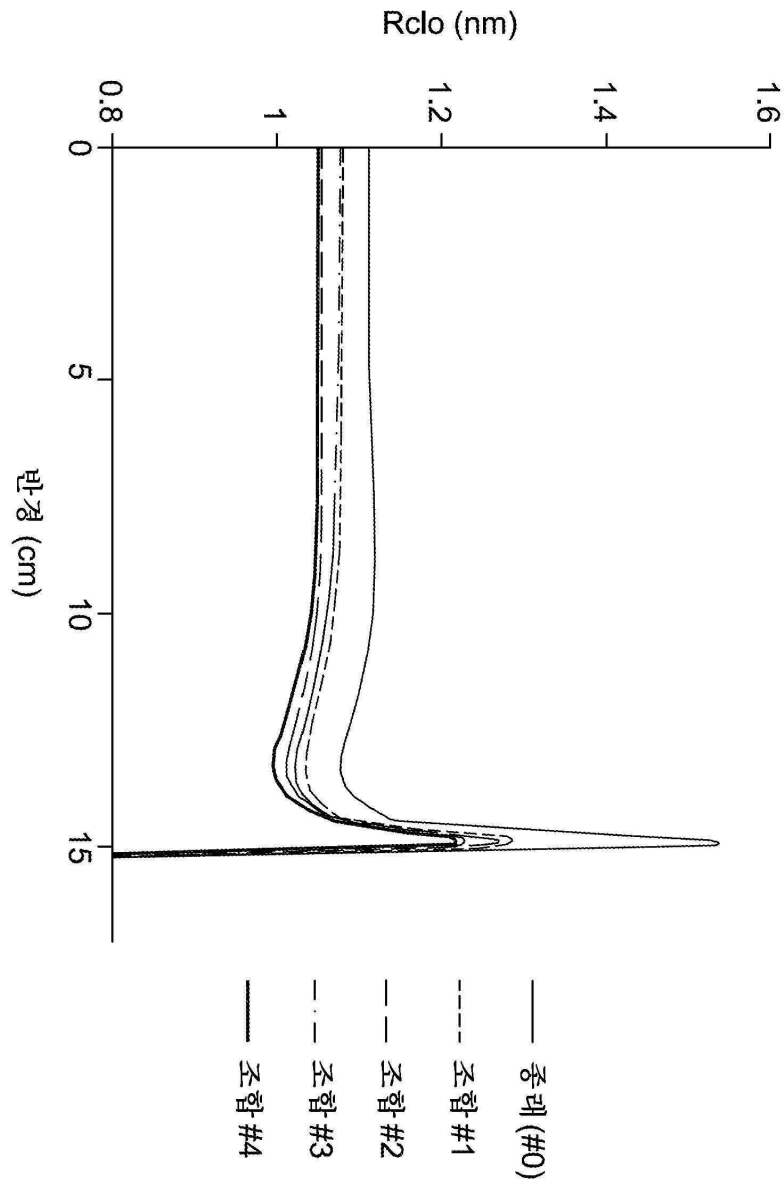
도면13



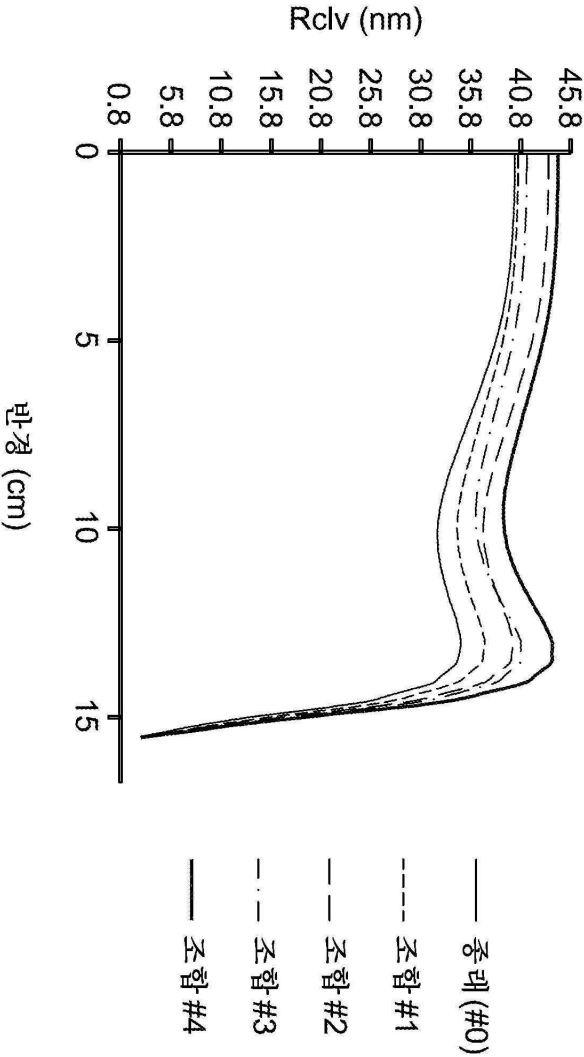
도면14



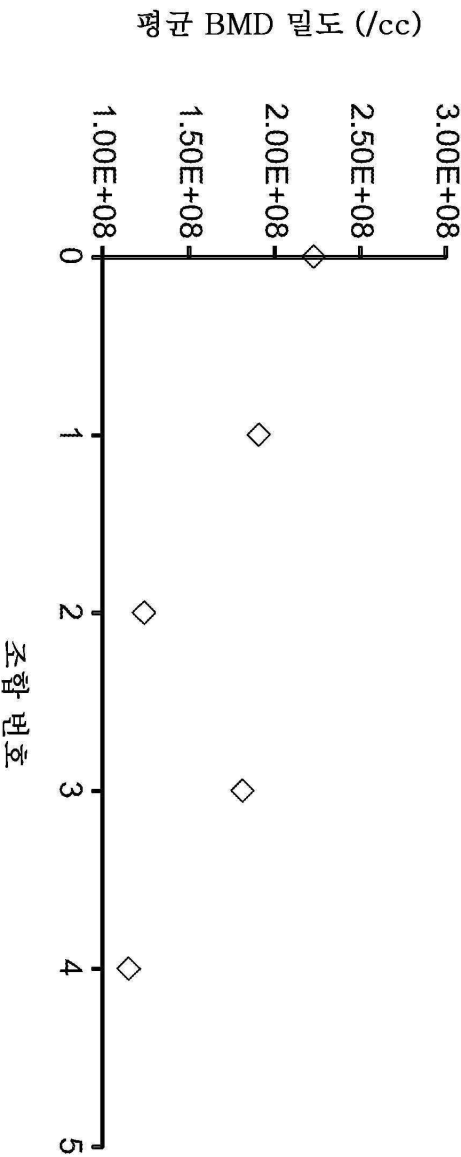
도면15



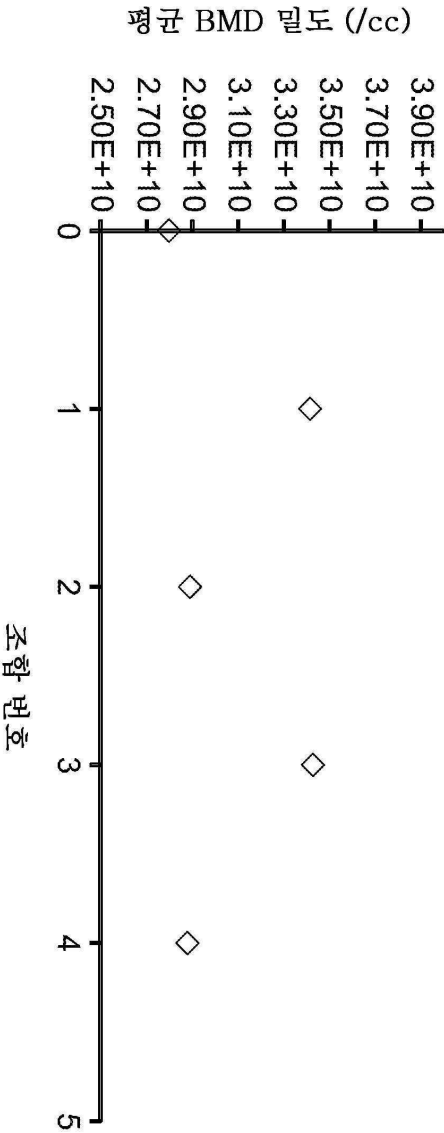
도면16



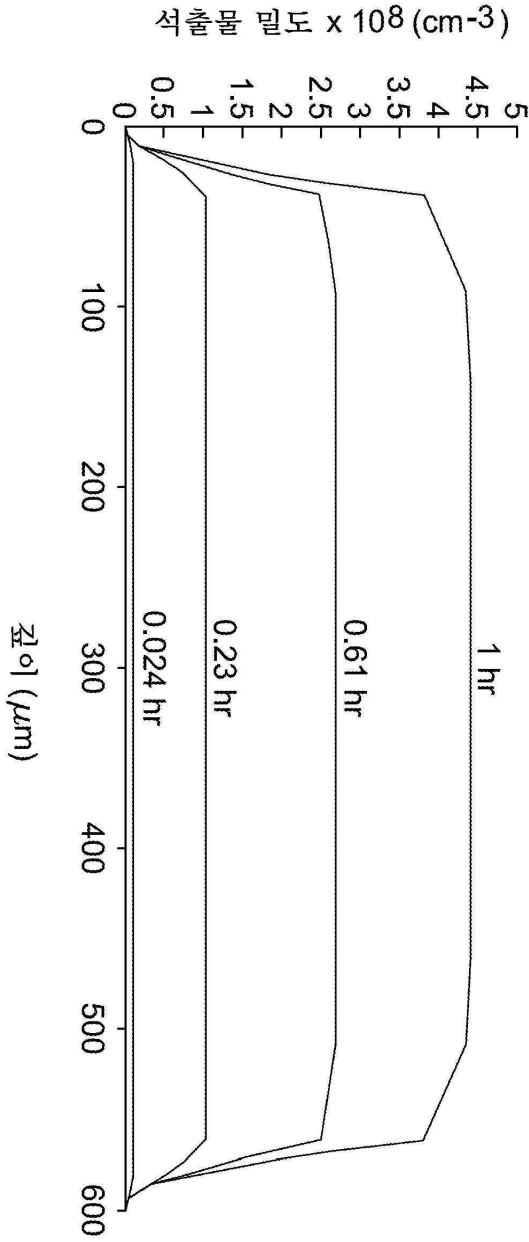
도면17



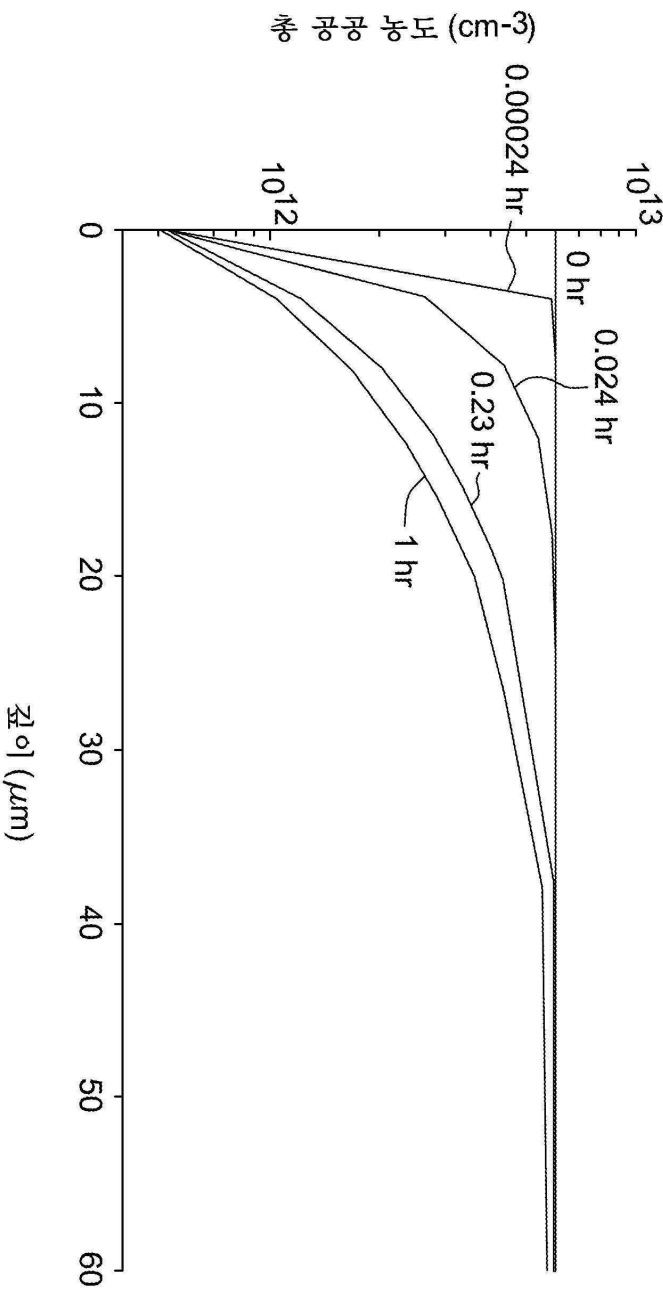
도면18



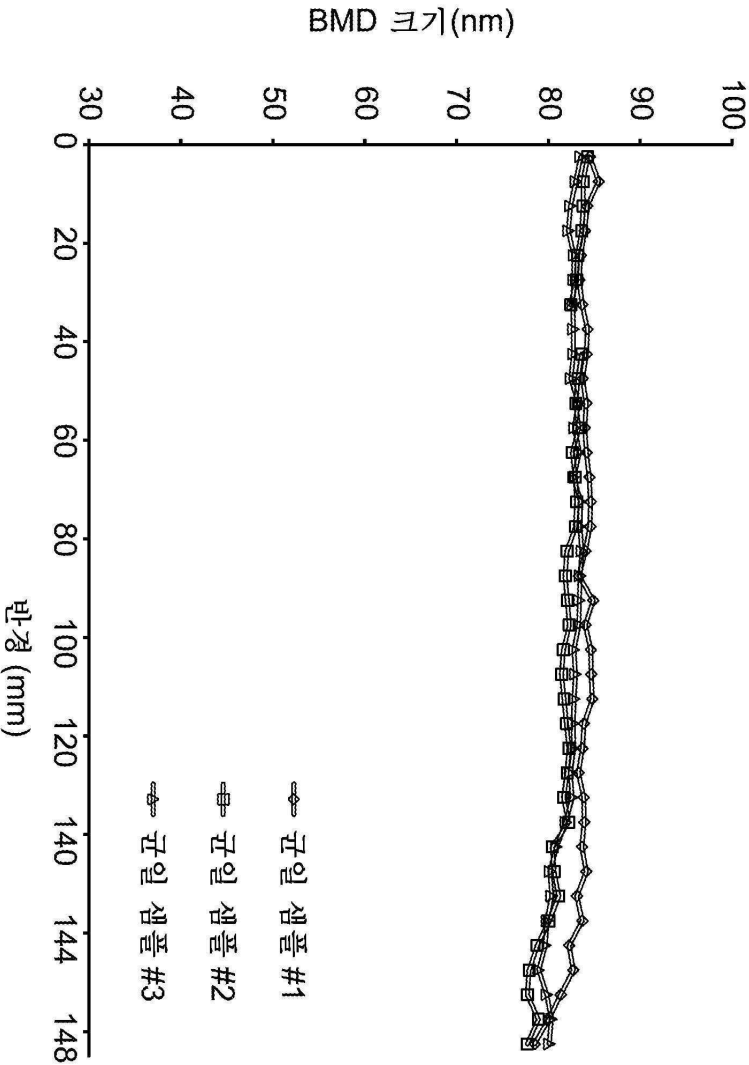
도면19



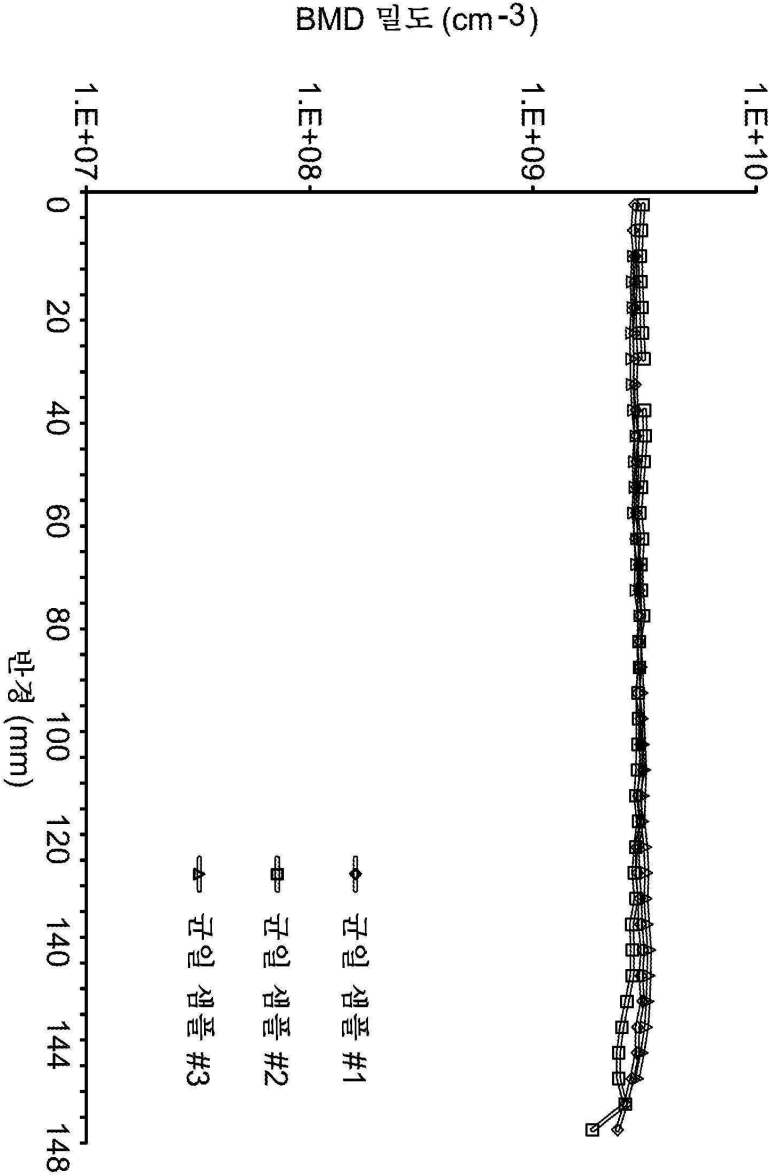
도면20



도면21



도면22



도면23

