



등록특허 10-2576552



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2023년09월07일
(11) 등록번호 10-2576552
(24) 등록일자 2023년09월05일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)
C30B 15/00 (2006.01) *C30B 15/20* (2006.01)
C30B 15/30 (2006.01) *C30B 29/06* (2006.01)
- (52) CPC특허분류
C30B 15/002 (2013.01)
C30B 15/20 (2013.01)
- (21) 출원번호 10-2021-7037242
- (22) 출원일자(국제) 2020년04월13일
심사청구일자 2023년04월12일
- (85) 번역문제출일자 2021년11월15일
- (65) 공개번호 10-2021-0154193
- (43) 공개일자 2021년12월20일
- (86) 국제출원번호 PCT/US2020/027953
- (87) 국제공개번호 WO 2020/214531
국제공개일자 2020년10월22일

(30) 우선권주장
62/835,735 2019년04월18일 미국(US)

- (56) 선행기술조사문현
KR1020030059293 A
KR1020150107241 A
KR1020060040724 A
KR100526081 B1

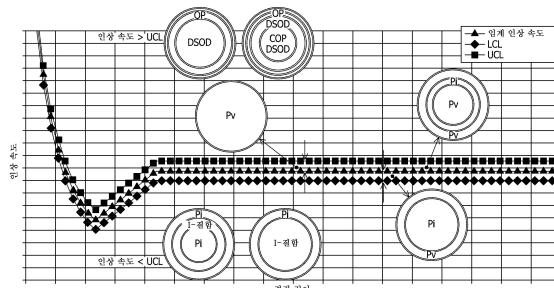
전체 청구항 수 : 총 25 항

심사관 : 장성원

(54) 발명의 명칭 연속 죄크랄스키 방법을 사용하여 단결정 실리콘 잉곳을 성장시키기 위한 방법들

(57) 요약

연속 죄크랄스키 방법에 의해 단결정 실리콘 잉곳을 성장시키기 위한 방법이 개시된다. 용융물 깊이 및 열 조건들은 실리콘 용융물이 소비됨에 따라 연속적으로 보충되며 때문에 성장 동안 일정하고, 도가니 위치는 고정된다. 임계 v/G는 고온 구역 구성에 의해 결정되고, 성장 동안 용융물에 실리콘의 연속 보충은 잉곳의 본체의 상당 부분의 성장 동안 임계 v/G와 일치하는 일정한 인상 속도로 잉곳의 성장을 가능하게 한다.

대 표 도

(52) CPC특허분류

C30B 15/305 (2013.01)

C30B 29/06 (2013.01)

명세서

청구범위

청구항 1

연속 쇼크랄스키 방법에 의해 단결정 실리콘 잉곳을 준비하는 방법으로서,

다결정 실리콘의 초기 충전물을 도가니에 추가하는 단계;

상기 다결정 실리콘의 초기 충전물을 포함하는 도가니를 가열하여 실리콘 용융물이 상기 도가니에 형성되게 하는 단계 - 상기 실리콘 용융물은 용융된 실리콘의 초기 체적을 포함하며 초기 용융물 상승 레벨(initial melt elevation level)을 가짐 -;

실리콘 시드 결정을 실리콘 용융물과 접촉시키는 단계;

상기 실리콘 시드 결정을 회수(withdrawing)하여, 목 부분을 성장시키는 단계 - 상기 실리콘 시드 결정은 상기 목 부분의 성장 동안 목 부분 인상 속도(neck portion pull rate)로 회수됨 -;

상기 실리콘 시드 결정을 회수하여, 상기 목 부분에 인접한 바깥쪽으로 벌어지는 시드 원뿔(outwardly flaring seed-cone)을 성장시키는 단계 - 상기 실리콘 시드 결정은 상기 바깥쪽으로 벌어지는 시드 원뿔의 성장 동안 시드 원뿔 인상 속도로 회수됨 -; 및

상기 실리콘 시드 결정을 회수하여, 상기 바깥쪽으로 벌어지는 시드 원뿔에 인접한 상기 단결정 실리콘 잉곳의 본체를 성장시키는 단계 - 상기 실리콘 용융물은 상기 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 성장 동안 용융된 실리콘의 체적 및 용융물 상승 레벨을 포함함 -

를 포함하고,

상기 단결정 실리콘 잉곳의 본체는, 인상 속도가 제1 인상 속도로부터 제2 인상 속도로 감소하는 제1 가변 영역 및 상기 인상 속도가 상기 제2 인상 속도로부터 일정한 본체 인상 속도로 증가하는 제2 가변 영역을 갖는 초기 가변 본체 인상 속도 조건들 하에서 성장되고, 상기 단결정 실리콘 잉곳의 본체는 상기 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 길이의 약 20% 미만에 대해서는 상기 초기 가변 본체 인상 속도 조건들 하에서 성장되며 상기 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 길이의 적어도 약 30%에 대한 성장 동안에는 상기 일정한 본체 인상 속도로 성장되고, 상기 일정한 본체 인상 속도는 상기 일정한 본체 인상 속도로 성장되는 상기 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 길이에 걸쳐 응집된 점 결함들(agglomerated point defects)을 회피하기에 충분한 일정한 임계 인상 속도이고;

다결정이 상기 도가니에 연속적으로 공급되어, 그에 의해 상기 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 성장 동안 상기 도가니에서 용융된 실리콘의 체적 및 용융물 상승 레벨을 보충하고;

자기장이 상기 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 성장 동안 상기 실리콘 용융물에 인가되는, 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

수평 자기장이 상기 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 성장 동안 상기 실리콘 용융물에 인가되는, 방법.

청구항 3

제1항에 있어서,

첨두 자기장이 상기 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 성장 동안 상기 실리콘 용융물에 인가되는, 방법.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 인가된 자기장은 상기 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 성장의 약 70% 내지 약 90% 동안 실질적으로 일정한 용융물/고체 계면 프로파일을 유지하는, 방법.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 단결정 실리콘 잉곳의 본체는 적어도 약 1000 밀리미터 길이, 적어도 1400 밀리미터 길이, 또는 적어도 1500 밀리미터 길이인, 방법.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 단결정 실리콘 잉곳의 본체는 적어도 2000 밀리미터 길이, 적어도 2200 밀리미터 길이, 적어도 약 3000 밀리미터 길이, 또는 적어도 약 4000 밀리미터 길이인, 방법.

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 단결정 실리콘 잉곳의 본체는 적어도 약 150 밀리미터 또는 적어도 약 200 밀리미터의 직경을 갖는, 방법.

청구항 8

제1항에 있어서,

상기 단결정 실리콘 잉곳의 본체는 적어도 약 300 밀리미터 또는 적어도 약 450 밀리미터의 직경을 갖는, 방법.

청구항 9

제1항에 있어서,

상기 일정한 본체 인상 속도는 약 0.4 mm/분 내지 약 0.8 mm/분, 약 0.4 mm/분 내지 약 0.7 mm/분, 또는 약 0.4 mm/분 내지 약 0.65 mm/분인, 방법.

청구항 10

제1항에 있어서,

상기 단결정 실리콘 잉곳의 본체는 상기 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 길이의 약 5% 내지 약 20%에 대해 상기 초기 가변 본체 인상 속도 조건들 하에서 성장되는, 방법.

청구항 11

제1항에 있어서,

상기 단결정 실리콘 잉곳의 본체는 상기 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 길이의 적어도 약 50%에 대한 성장 동안 상기 일정한 본체 인상 속도로 성장되는, 방법.

청구항 12

제1항에 있어서,

상기 단결정 실리콘 잉곳의 본체는 상기 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 길이의 적어도 약 70%에 대한 성장 동안 상기 일정한 본체 인상 속도로 성장되는, 방법.

청구항 13

제1항에 있어서,

상기 단결정 실리콘 잉곳의 본체는 상기 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 길이의 적어도 약 80%에 대한 성장 동안 상기 일정한 본체 인상 속도로 성장되는, 방법.

청구항 14

제1항에 있어서,

상기 단결정 실리콘 잉곳의 본체는 상기 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 길이의 적어도 약 90%에 대한 성장 동안 상기 일정한 본체 인상 속도로 성장되는, 방법.

청구항 15

제1항에 있어서,

상기 일정한 본체 인상 속도는 상기 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 길이의 적어도 70%에 걸쳐 응집된 점 결함들을 회피하기에 충분한 일정한 임계 인상 속도인, 방법.

청구항 16

제1항에 있어서,

상기 일정한 본체 인상 속도는 상기 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 길이의 적어도 90%에 걸쳐 응집된 점 결함들을 회피하기에 충분한 일정한 임계 인상 속도인, 방법.

청구항 17

제1항에 있어서,

상기 용융된 실리콘의 체적은 상기 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 적어도 약 90%의 성장 동안 약 1.0 체적% 이하 만큼 변화되는, 방법.

청구항 18

제1항에 있어서,

상기 용융된 실리콘의 체적은 상기 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 적어도 약 90%의 성장 동안 약 0.5 체적% 이하 만큼 변화되는, 방법.

청구항 19

제1항에 있어서,

상기 용융된 실리콘은 체적은 상기 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 적어도 약 90%의 성장 동안 약 0.1 체적% 이하 만큼 변화되는, 방법.

청구항 20

제1항에 있어서,

상기 용융물 상승 레벨은 상기 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 적어도 약 90%의 성장 동안 약 +/- 0.5 밀리미터 미만만큼 변화되는, 방법.

청구항 21

제1항에 있어서,

상기 단결정 실리콘 잉곳의 본체는 상기 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 길이의 적어도 약 70%에 걸쳐 완벽한 실리콘(perfect silicon)을 포함하는, 방법.

청구항 22

제1항에 있어서,

상기 단결정 실리콘 잉곳의 본체는 상기 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 길이의 적어도 약 80%에 걸쳐 완벽한 실리콘을 포함하는, 방법.

청구항 23

제1항에 있어서,

상기 단결정 실리콘 잉곳의 본체는 상기 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 길이의 적어도 약 90%에 걸쳐 완벽한 실

리콘을 포함하는, 방법.

청구항 24

제1항에 있어서,

상기 제1 인상 속도는 약 0.5 mm/분 내지 약 2.0 mm/분이고, 상기 제2 인상 속도는 약 0.4 mm/분 미만이고, 상기 일정한 본체 인상 속도는 약 0.4 mm/분 내지 약 0.8 mm/분인, 방법.

청구항 25

제1항에 있어서,

상기 제1 인상 속도는 약 1.0 mm/분이고, 상기 제2 인상 속도는 약 0.3 mm/분 내지 약 0.4 mm/분이고, 상기 일정한 본체 인상 속도는 약 0.4 mm/분 내지 약 0.65 mm/분인, 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001]

관련 출원(들)에 대한 상호 참조

[0002]

본 출원은 2019년 4월 18일자로 출원된 미국 가출원 제62/835,735호의 우선권의 혜택을 주장하며, 그것의 개시는 그 전체가 제시된 것처럼 참조에 의해 포함된다.

[0003]

기술분야

[0004]

본 개시의 분야는 연속 츄크랄스키 방법을 사용하여 단결정 실리콘 잉곳을 성장시키기 위한 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0005]

반도체 전자 컴포넌트들의 제조를 위한 대부분의 프로세스들에서 출발 물질인 단결정 실리콘은 통상적으로 츄크랄스키(Czochralski)(“Cz”) 방법에 의해 준비된다. 이 방법에서, 다결정 실리콘(“폴리실리콘”)은 도가니에 장입되고 용융되며, 시드 결정이 용융된 실리콘과 접촉되고, 느린 추출에 의해 단결정이 성장된다. 목(neck)의 형성이 완료된 후, 결정의 직경은 예를 들어 원하는 또는 목표 직경에 도달할 때까지 인상 속도(pulling rate) 및/또는 용융물 온도를 감소시킴으로써 확대된다. 다음으로, 대략 일정한 직경을 갖는 결정의 원통형 본체는 감소하는 용융물 레벨을 보상하면서 인상 속도와 용융물 온도를 제어함으로써 성장된다. 성장 프로세스가 거의 끝나가지만 도가니에서 용융된 실리콘이 비워지기 전에, 결정 직경은 전형적으로 점진적으로 감소되어, 말단 원뿔(end-cone) 형태의 꼬리 단부를 형성한다. 말단 원뿔은 통상적으로 도가니에 공급되는 결정 인상 속도와 열을 증가시킴으로써 형성된다. 직경이 충분히 작아지면, 결정은 용융물로부터 분리된다.

[0006]

촘크랄스키 성장 기술들은 배치 츄크랄스키 방법 및 연속 츄크랄스키 방법을 포함한다. 배치 CZ에서, 단일 다결정 충전물은 도가니에 장입되며, 단일 충전물은 단결정 실리콘 잉곳을 성장시키기에 충분하고, 그 후에 도가니는 본질적으로 실리콘 용융물이 고갈된다. 연속 츄크랄스키(CCZ) 성장에서, 다결정 실리콘은 성장 프로세스 동안 용융물을 보충하기 위해 용융된 실리콘에 연속적으로 또는 주기적으로 첨가될 수 있고, 결과적으로, 다수의 잉곳은 성장 프로세스 동안 단일 도가니로부터 인상될 수 있다.

[0007]

CCZ 프로세스를 수행하기 위해, 전통적인 배치 츄크랄스키 성장 챔버 및 장치는 성장 잉곳의 속성들에 악영향을 주지 않고 추가 다결정 실리콘을 용융물에 연속 또는 반연속 방식으로 공급하기 위한 수단을 포함하기 위해 수 정된다. 시드 결정이 용융물로부터 연속적으로 성장됨에 따라, 입상 다결정 실리콘과 같은 고체 다결정 실리콘은 용융물을 보충하기 위해 용융물에 첨가된다. 용융물에 첨가된 부가 고체 다결정 실리콘의 공급 속도는 전형적으로 프로세스 매개변수들을 유지하기 위해 제어된다. 동시 결정 성장에 활동을 보충하는 이것의 역효과들을 감소시키기 위해, 전통적인 석영 도가니는 종종 추가된 재료가 전달되는 외부 또는 환형 용융물 구역을 실리콘 잉곳이 인상되는 내부 성장 구역과 함께 제공하기 위해 수 정된다. 이들 구역들은 서로 유체 흐름 연통된다.

[0008]

현대 마이크로전자 디바이스의 연속적으로 수축하는 크기는 실리콘 기판의 품질에 도전적인 제한들을 부과하며, 이는 본질적으로 성장된 미소결함들의 크기 및 분포에 의해 결정된다. 츄크랄스키(CZ) 프로세스 및 부유 구역(Float Zone)(FZ) 프로세스에 의해 성장되는 실리콘 결정들에 형성된 미소결함들의 대부분은 실리콘의 고유 점

결합들의 응집체들 - 공공들(vacancies) 및 자체간극들(또는, 간단히, 간극들)이다.

[0009] 일련의 연구들은 간극 응집체들이 이하의 2개의 형태로 존재하는 것을 수립하였다 - B 와류 결합(또는 B-결합들)로 칭해지는 구형 간극 클러스터들, 및 A 와류 결합(또는 A-결합들)로 칭해지는 전위 루프들. D-결합들로서 공지되어 있는 나중에 발견된 공공 응집체들은 8면체 보이드들로서 식별되었다. 보론코프(Voronkov)는 결정 성장 조건들을 기초로 실리콘 결정들에서 관찰된 미소결합 분포들에 대한 잘 허용된 설명을 제공하였다. 보론코프의 모델, 또는 이론에 따르면, 용융물/결정 계면 부근의 온도 필드는 용융물/결정 계면으로부터 - 각각의 평형 농도들에 존재하는 경우 - 결정 벌크로의 확산을 위한 구동력들을 제공하는 점 결합들의 재결합을 추진한다. 확산 및 대류 둘 다에 의한, 점 결합들의 이송과, 그들의 재결합 사이의 상호작용은 재결합 길이로 칭해지는, 계면에서 떨어진 단거리를 너머 점 결합 농도를 설정한다. 전형적으로, 초과 점 결합 농도로 칭해지는, 재결합 길이를 넘는 공공 농도와 간극 농도 사이의 차이는 본질적으로 결정의 측방 표면에서 떨어져서 고정된 채로 유지된다. 신속히 인상된 결정에서, 재결합 길이를 넘는 확산에 의한 점 결합들의 공간 재분배는 일반적으로 - 점 결합들의 싱크 또는 소스로서의 역할을 하는 결정의 측방 표면에 가까운 영역을 제외하고 - 중요하지 않다. 따라서, 재결합 길이를 넘는 초과 점 결합 농도가 양이면, 공공들은 초과하여 남아 있고, 응집되어 더 낮은 온도들에서 D-결합들을 형성한다. 초과 점 결합 농도가 음이면, 간극들은 지배적 점 결합들로 남아 있고, 응집되어 A-결합들 및 B-결합들을 형성한다. 초과 점 결합 농도가 일부 겹출 임계치 아래이면, 어떤 겹출가능 미소결합들도 형성되지 않는다. 따라서, 전형적으로, 성장된 미소결합들의 타입은 재결합 길이를 너머 설정된 초과 점 결합 농도에 의해 간단히 결정된다. 초과 점 결합 농도를 설정하는 프로세스는 초기 혼입으로 칭해지고 지배적 점 결합 종들은 혼입된 지배적 점 결합으로 칭해진다. 혼입된 점 결합들의 타입은 결정 인상 속도 (v) 대 계면(G) 부근의 측방향 온도 기울기의 크기의 비율에 의해 결정된다. 더 높은 v/G에서, 점 결합들의 대류는 그들의 확산을 지배하고, 공공들은 계면에서의 공공 농도가 간극 농도보다 더 높으므로, 혼입된 지배적 점 결합들로 남아 있다. 더 낮은 v/G에서, 확산은 대류를 지배하여, 지배적 점 포인트들로서 신속한 확산 간극들의 혼입을 허용한다. 그것의 임계 값에 가까운 v/G에서, 점 결합들 둘 다는 매우 낮고 비교가능한 농도들로 혼입되어, 서로 상호 전멸시키고 따라서 더 낮은 온도들에서 임의의 미소결합들의 잠재적 형성을 억제한다. 관찰된 공간 미소결합 분포는 전형적으로 G의 반경방향 비균일성에 의해 야기된, v/G의 변동 및 v의 측방향 변동에 의해 설명될 수 있다. 반경방향 미소결합 분포의 두드러진 특징은 비교적 더 낮은 혼입된 공공 농도의 영역들에서 - 임계 v/G보다 아주 조금 위에 있는 v/G의 작은 범위에서 공공들과 산소의 상호작용을 통해 형성된 산화물 입자들이다. 이들 입자들은 열 산화에 의해 산화 유도 적층 흠(oxidation-induced stacking fault)(OSF) 링으로서 드러날 수 있는 좁은 공간 대역을 형성한다. 상당히 자주, OSF 링은 V/I 경계로 공지되어 있는, 공공-지배되고 간극-지배되는 인접 결정 영역들 사이의 경계를 표시한다.

[0010] 그러나, 많은 현대 프로세스들에서 더 낮은 속도들로 성장된 CZ 결정들 내의 미소결합 분포들은 결정들의 측방 표면들에 의해 유도되는 확산을 포함하여, 결정 벌크에서의 점 결합들의 확산에 영향을 받는다. 따라서, CZ 결정들에서의 미소결합 분포들의 정확한 정량화는 바람직하게는 둘 다 측방향으로 그리고 반경방향으로 2차원 점 결합 확산을 포함한다. 점 결합 농도 필드만을 정량화하는 것은 형성되는 미소결합들의 타입이 그것에 의해 직접 결정됨에 따라, CZ 결정에서 미소결합 분포를 질적으로 캡처할 수 있다. 그러나, 미소결합 분포의 더 정확한 정량화를 위해, 점 결합들의 응집을 캡처하는 것이 필요하다. 전통적으로, 미소결합 분포는 점 결합들의 초기 혼입 및 미소결합들의 후속 형성을 분리함으로써 정량화된다. 이 접근법은 더 높은 온도들에서의 영역들(미소결합 밀도가 무시가능함)로부터 더 낮은 온도들에서의 영역들(미소결합들은 더 높은 밀도들로 존재하고 점 결합들을 소비함)로, 핵형성 영역 부근의 지배적 점 결합들의 확산을 무시한다. 대안적으로, 결정 내의 모든 위치에서 미소결합 모집단들의 크기 분포들을 예측하는 것에 기초하는 엄격한 수치 시뮬레이션은 수치적으로 고가이다.

[0011] 공공 및 간극 지배된 재료 사이의 전이는 v/G 의 임계 값에 발생하며, 이는 현재 약 $2.5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sK}$ 인 것으로 나타난다. v/G 의 값이 임계 값을 초과하면, 공공들은 지배적 고유 점 결합이며, 그들의 농도는 증가 v/G 에 따라 증가한다. v/G 의 값이 임계 값 미만이면, 실리콘 자체간극들은 지배적인 고유 점 결합이며, 그들의 농도는 감소 v/G 에 따라 증가한다. 따라서, 성장 속도(v 에 영향을 줌)뿐만 아니라, 고온 구역 구성들(G 에 영향을 줌)과 같은, 프로세스 조건들은 단결정 실리콘 내의 고유 점 결합들이 지배적으로 공공들(여기서, v/G 는 일반적으로 임계 값보다 더 큼) 또는 자체간극들(여기서, v/G 는 일반적으로 임계 값 미만임)인지를 결정하기 위해 제어될 수 있다.

[0012] 응집된 결합 형성은 일반적으로 2개의 단계에서 발생한다. 우선, 결합 "핵형성"이 발생하며, 이는 주어진 온도에서 과포화되는 고유 점 결합들의 결과이며; 이러한 "핵형성 임계" 온도 위에서, 고유 점 결합들은 실리콘 격

자에서 가용성을 유지한다. 응집된 고유 점 결합들에 대한 핵형성 온도는 약 1000 °C보다 더 크다.

[0013] 이러한 "핵형성 임계" 온도에 도달되면, 고유 점 결합들이 응집되며; 즉, 실리콘 격자의 "고용체"로부터의 이들 점 결합들의 석출이 발생한다. 고유 점 결합들은 그들이 존재하는 잉곳의 부분의 온도가 제2 임계 온도(즉, "확산도 임계치") 위에 유지하는 한 실리콘 격자를 통해 계속 확산할 것이다. 이러한 "확산도 임계" 온도 아래에서, 고유 점 결합들은 상업적으로 실용적인 시간 기간들 내에서 더 이상 움직이지 않는다.

[0014] 잉곳이 "확산도 임계" 온도 위에 남아 있지만, 공공 또는 간극 고유 점 결합들은 응집된 공공 결합들 또는 간극 결합들 각각이 이미 존재한 부위들로 실리콘 격자를 통해 확산하여, 주어진 응집된 결합으로 하여금 크기가 증가하게 된다. 성장은 이들 응집된 결합 부위들이 본질적으로 "스크들"로서의 역할을 하기 때문에 발생하여, 응집의 더 유리한 에너지 상태 때문에 고유 점 결합들을 끌어당기고 수집한다.

[0015] 공공 타입 결합들은 적외선 스캐닝 마이크로스코피 및 레이저 스캐닝 토모그래피와 같은 적외선 광 스캐닝 기술들에 의해 관찰된 특정 등급들의 벌크 결합들뿐만 아니라, D-결합들, 흐름 패턴 결합들(Flow Pattern Defects)(FPDs), 게이트 산화물 무결성(Gate Oxide Integrity)(GOI) 결합들, 결정 유래 입자(Crystal Originated Particle)(COP) 결합들, 결정 유래 광 점 결합들(Light Point Defects)(LPDs)로서 그러한 관찰가능 결합 결합들의 근원인 것으로 인식된다. 또한 초과 공공들의 영역들에 산소 또는 이산화 실리콘의 클러스터들이 존재한다. 이들 클러스터들의 일부는 작고 비교적 변형없이 남아 있어, 본질적으로 그러한 실리콘으로부터 준비되는 다수의 디바이스에 어떤 피해를 야기하지 않는다. 이들 클러스터들의 일부는 링 산화 유도 적층 흠(oxidation induced stacking fault)(OISF)에 대한 핵들로서의 역할을 하기에 충분히 크다. 이러한 특정 결합은 초과 공공들의 존재에 의해 촉매화되는 이전에 핵형성된 산소 응집체들에 의해 용이하게 되는 것으로 추측된다. 산화물 클러스터들은 중간 공공 농도가 있을 때 1000 °C 아래의 CZ 성장에 주로 형성된다.

[0016] 자체간극들에 관한 결합들은 덜 연구된다. 그들은 일반적으로 간극-타입 전위 루프들 또는 네트워크들의 낮은 밀도들인 것으로 간주된다. 그러한 결합들은 게이트 산화물 무결성 실패들, 즉 중요한 웨이퍼 성능 기능에 책임이 없지만, 그들은 통상적으로 전류 누설 문제들과 연관된 다른 타입들의 디바이스 고장들의 원인인 것으로 광범위하게 인식된다.

[0017] 이와 관련하여, 일반적으로 말하면, 실리콘 격자에서의 간극 형태의 산소는 전형적으로 실리콘의 점 결합으로 간주되지만, 고유 점 결합으로 간주되지 않는 반면, 실리콘 격자 공공들 및 실리콘 자체간극들(또는, 간단히, 간극들)은 전형적으로 고유 점 결합들인 것으로 간주된다는 점이 주목되어야 한다. 따라서, 본질적으로 모든 미소결합들은 일반적으로 응집된 점 결합들로서 설명될 수 있는 한편, D-결합들(또는 보이드들)뿐만 아니라, A-결합들 및 B-결합들(즉, 간극 결합들)은 응집된 고유 점 결합들로서 더 구체적으로 설명될 수 있다. 산소 클러스터들은 공공들을 흡수함으로써 형성되며; 따라서, 산소 클러스터들은 양 공공들 및 산소의 응집체들로 간주될 수 있다.

[0018] 쿠크랄스키 실리콘에서의 그러한 공공 및 자체간극 응집된 점 결합들의 밀도는 이력적으로 약 $1 \times 10^3/\text{cm}^3$ 내지 약 $1 \times 10^7/\text{cm}^3$ 의 범위 내에 있었던 반면, 산소 클러스터들의 밀도는 약 $1 \times 10^8/\text{cm}^3$ 내지 $1 \times 10^{10}/\text{cm}^3$ 에서 변화된다는 점이 추가로 주목되어야 한다. 따라서, 응집된 고유 점 결합들은 그러한 결합들이 복합 및 고도 집적 회로들의 생산에서 단결정 실리콘 재료의 수율 가능성에 심하게 영향을 줄 수 있기 때문에, 디바이스 제조들에게 중요성을 신속히 증가시키고 있다.

[0019] 상술한 것을 고려하여, 많은 응용들에서, 실리콘 웨이퍼들로 나중에 슬라이스되는, 실리콘 결정의 일부 또는 전부는 이들 응집된 고유 점 결합들이 실질적으로 없는 것이 바람직하다. 지금까지, 실질적으로 결함이 없는 실리콘 결정들을 성장시키기 위한 몇 가지 접근법들이 보고되었다. 일반적으로 말하면, 모든 이들 접근법들은 성장 CZ 단결정 실리콘 결정에 존재하는 고유 점 결합들의 초기 타입 및 농도를 결정하기 위해 v/G의 비율을 제어하는 것을 수반한다. 추가로, 그러나, 그러한 접근법들은 고유 점 결합들의 농도를 억제하고, 따라서 결정의 일부 또는 전부에서 응집된 고유 점 결합들의 형성을 실질적으로 제한하거나 회피하기 위해 연장된 확산 시간을 하용하도록 결정의 후속 열 이력을 제어하는 것을 수반할 수 있다. (예를 들어, 미국 특허 번호: 6,287,380; 6,254,672; 5,919,302; 6,312,516 및 6,328,795를 참조하며; 그것의 전체 내용들은 본원에 참조로 이로써 포함된다.) 대안적으로, 그러나, 그러한 접근법들은 신속히 냉각된 실리콘(RCS) 성장 프로세스를 수반할 수 있으며, 결정의 후속 열 이력은 이때 결정의 일부에서 응집된 고유 점 결합들의 형성을 제어하기 위해 목표 핵형성 온도를 통해 적어도 해당 일부를 신속히 냉각하도록 제어된다. 이들 접근법들 중 하나 또는 둘 다는 또한 목표 핵형성 온도를 통해 결정의 일부를 신속히 냉각하기 전에, 성장된 결정의 적어도 해당 일부가 고유 점 결

함들의 농도를 감소시키기 위해 연장된 시간 기간 동안 핵형성 온도 위에 남아 있는 것을 허용하는 것을 포함하며, 따라서 응집된 고유 점 결합들의 형성을 그 안에서 실질적으로 제한하거나 회피한다. (예를 들어, 미국 특허 출원 공개 번호 2003/0196587을 참조하며, 그것의 전체 개시는 본원에 참조로 포함된다.) 게다가, 방법들은 응고된 잉곳의 냉각 속도의 동시 제어 및 계면(G) 부근의 축방향 온도 기울기의 반경방향 변동에 의해 잉곳의 중앙으로부터 가장자리로 응집된 점 결합들을 감소시키거나 제거하기 위해 개발되었다. (예를 들어, 미국 특허 번호 8,673,248을 참조하며, 그것의 전체 개시는 본원에 참조로 포함된다.)

[0020] 응집된 점 결합들, 예를 들어, 결정 유래 피트들(crystal originated pits)(COP)의 결핍으로 제조자 요건들을 충족하는 연마된 실리콘 웨이퍼들은 중성 실리콘 또는 완벽한 실리콘으로 지칭될 수 있다. 완벽한 실리콘 웨이퍼들은 예를 들어, 더 높은 에피택셜 방식으로 증착된 웨이퍼들에 대한 더 낮은 비용의 연마된 웨이퍼 대안으로서의 많은 반도체 응용들에 바람직하다. 마지막 20년 동안, 많은 실리콘 웨이퍼 공급자들은 전통적으로 시장 내 비용 압박들에 더 민감한 주로 메모리(DRAM/NAND/FLASH) 시장으로의 판매를 위해 200mm 및 300mm 직경 둘 다에서의 결함이 없고 및 COP가 없는 웨이퍼 제품들을 개발하였다. 허용가능 결함도에 대한 산업 표준은 고객 애플리케이션 디바이스 노드들이 축소됨에 따라 허용가능 레벨의 광 점 산란(light point scatterings)(LLS) 및 게이트 산화물 강도(Gate Oxide Intensity)(GOI)의 측면에서 이러한 시간 프레임에 걸쳐 진화하였다. 예를 들어, 산업 COP가 없는 사양은 한때, 0.12 μ m 크기 이하에서 수백개 미만일 수 있었다. 더 많은 현재 표준들은 완벽한 실리콘으로서의 자격을 얻기 위해 0.026 μ m 크기 이하에서 20 COP 미만을 요구한다. 다른 예로서, MOS 트랜지스터에서의 GOI에 대한 과거 표준은 8MV 이하(B-모드)에서 95%이었다. 현재, 사양들은 10 내지 12MV(D-mode)에서 99%로 이동하고 있다. 이러한 요건 외에, BMD 밀도(밸크 마이크로 결합들) 및 BMD 크기 분포에 의해 전통적으로 측정되는 바와 같은 웨이퍼 전체에 걸친 개선된 반경방향 산소 석출을 위한 요구는 디바이스 노드들이 축소되므로 처리 동안의 기판 슬립 또는 디바이스 리소그래피 동안의 패턴화된 오버레이에 영향을 줄 수 있는 뒤틀림을 회피하기 위해 필요하다. 이들 사양들(LLS, GOI, BMD 균일성 등)이 업격해졌으므로, 결합 및 COP가 없는 실리콘 성장을 위한 제어 원도우는 상당히 축소되어, 프로세스의 결정 처리량을 상당히 감소시킨다. 이것은 허용가능 대역 구조의 원도우(조작의 프로세스 원도우로 직접 변환될 수 있음)가 사양들에 따라 시간이 지나면서 이동했기 때문이다.

[0021] 본 섹션은 아래에서 설명 및/또는 청구되는 본 개시의 다양한 양태들에 관련될 수 있는 기술의 다양한 양태들을 독자에게 소개하도록 의도되는 것이다. 이 논의는 본 개시의 다양한 양태들의 더 나은 이해를 용이하게 하기 위해 독자에게 배경 정보를 제공하는 데 도움이 될 것으로 여겨진다. 따라서, 이러한 진술은 종래 기술의 인정으로서가 아니라 이러한 관점에서 읽어야 함을 이해해야 한다.

발명의 내용

[0022] 본 개시의 일 양태는 연속 쇼크랄스키 방법에 의해 단결정 실리콘 잉곳을 준비하는 방법에 관한 것이다. 방법은 다결정 실리콘의 초기 충전물을 도가니에 추가하는 단계; 다결정 실리콘의 초기 충전물을 포함하는 도가니를 가열하여 실리콘 용융물이 도가니 내에 형성되게 하는 단계 - 실리콘 용융물은 용융된 실리콘의 초기 체적을 포함하고 초기 용융물 상승 레벨을 가짐 -; 실리콘 시드 결정을 실리콘 용융물과 접촉시키는 단계; 목 부분을 성장시키기 위해 실리콘 시드 결정을 회수하는 단계 - 실리콘 시드 결정은 목 부분의 성장 동안 목 부분 인상 속도로 회수됨 -; 목 부분에 인접한 바깥쪽으로 벌어지는 시드 원뿔을 성장시키기 위해 실리콘 시드 결정을 회수하는 단계 - 실리콘 시드 결정은 바깥쪽으로 벌어지는 시드 원뿔의 성장 동안 시드 원뿔 인상 속도로 회수됨 -; 및 바깥쪽으로 벌어지는 시드 원뿔에 인접한 단결정 실리콘 잉곳의 본체를 성장시키기 위해 실리콘 시드 결정을 회수하는 단계를 포함하며, 실리콘 용융물은 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 성장 동안 용융된 실리콘의 체적 및 용융물 상승 레벨을 포함하고; 단결정 실리콘 잉곳의 본체는 초기 가변 본체 인상 속도 및 일정한 본체 인상 속도로 성장되며, 단결정 실리콘 잉곳의 본체는 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 길이의 약 20% 미만에 대해 초기 가변 본체 인상 속도로 성장되고 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 길이의 적어도 약 30%에 대한 성장 동안 일정한 본체 인상 속도로 성장되고; 추가로 단결정은 도가니에 연속적으로 공급되며 그것에 의해 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 성장 동안 도가니에서 용융된 실리콘의 체적 및 용융물 상승 레벨을 보충한다.

[0023] 본 개시의 위에서 언급된 양태들과 관련하여 언급된 특징들의 다양한 개선이 존재한다. 추가 특징들은 또한 본 개시의 위에서 언급된 양태들에 포함될 수 있다. 이러한 개선 및 추가 특징들은 개별적으로 또는 임의의 조합으로 존재할 수 있다. 예를 들어, 본 개시의 예시된 실시예들 중 임의의 것과 관련하여 아래에서 논의되는 다양한 특징들은 단독으로 또는 임의의 조합으로 본 개시의 임의의 전술한 양태들에 포함될 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0024]

도 1a(초기 본체 성장), 도 1b(중기 본체 성장), 및 도 1c(말기 본체 성장)는 예시적 배치 쿄크랄스키 프로세스 동안 결정 길이의 함수로서 용융물 체적 또는 깊이 및 도가니 위치를 예시한다.

도 2는 예시적 배치 Cz 프로세스에 의해 성장되는 잉곳에서 충분한 결함도 제어를 달성하도록 요구되는 인상 속도의 일정한 변화를 도시하는 그래프이다.

도 3은 인가된 자기장으로 예시적 배치 Cz 프로세스에 의해 성장되는 잉곳에서 충분한 결함도 제어를 달성하도록 요구되는 인상 속도 프로파일을 도시하는 그래프이다.

도 4는 본 발명의 방법에 따른 예시적 연속 Cz 프로세스에 의해 성장되는 잉곳에서 충분한 결함도 제어를 달성하도록 요구되는 인상 속도 프로파일을 도시하는 그래프이다.

도 5는 본 발명의 방법에 따른 예시적 연속 Cz 프로세스에 적합한 예시적 도가니 구성을 도시한다.

도 6a, 도 6b, 및 도 6c는 본 발명의 방법에 따른 예시적 연속 Cz 프로세스의 용융물 레벨 및 잉곳 성장을 예시한다.

도 7a 및 도 7b는 본 발명의 방법에 따른 예시적 연속 Cz 프로세스에 의한 잉곳의 성장 동안 실리콘 용융물에 인가되는 자기장들을 예시한다.

대응하는 참조 기호들은 도면들 전체에서 대응하는 부분들을 나타낸다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0025]

본 발명의 맥락에서, "완벽한 실리콘"은 Perfect SiliconTM(SunEdison Semiconductor, Ltd.)의 표준들을 충족하거나 초과하기 위한 조건들 하에 성장되는 쿄크랄스키 성장 단결정 실리콘 잉곳들로부터 슬라이스된 단결정 실리콘 웨이퍼들을 지칭한다. 이들 표준들은 응집된 결함들, 직접 표면 산화물 결함들(direct surface oxide defects)(DSOD), 결정 유래 퍼트들 또는 입자들(COP), D-결함들, 및 I-결함들 등에 대한 산업 사양들을 충족하거나 초과하는 잉곳을 포함한다. 예를 들어, "완벽한 실리콘" 웨이퍼들은 검출불가능 FPD(세코 에칭 기술에 의한 흐름 패턴 결함) 및 DSOD(전기 절연파괴 후의 직접 표면 산화물 결함 입자 카운트) 및 세코 에칭 기술에 의한 제로 I-결함(A-결함)에 의해 특징화될 수 있다. 세코 에치는 실리콘의 다양한 결정 (100),(111), 및 (110) 평면들에서 전위들 및 다른 격자 결함들을 적절히 드러내기 위해, 알칼리 중크롬산염 및 플루오르화 수소산의 회색 수용액을 적용하는 것을 포함한다. 에치는 리니지(저각도 그레인 경계들) 및 슬립 라인들 둘 다를 끌어낸다. 본 발명의 방법은 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 길이의 적어도 약 70%에 걸쳐, 예컨대 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 길이의 적어도 약 80%에 걸쳐, 또는 심지어 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 길이의 적어도 약 90%에 걸쳐 완벽한 실리콘을 포함하는 단결정 실리콘 잉곳의 성장을 가능하게 한다. 일부 실시예들에서, 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 길이의 적어도 약 70%에 걸쳐, 예컨대 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 길이의 적어도 약 80%에 걸쳐, 또는 심지어 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 길이의 적어도 약 90%에 걸쳐 성장되는 잉곳들로부터 슬라이스된 웨이퍼들은 검출불가능 FPD(세코 에칭 기술에 의한 흐름 패턴 결함) 및 DSOD(전기 절연파괴 후의 직접 표면 산화물 결함 입자 카운트) 및 세코 에칭 기술에 의한 제로 I-결함(A-결함)에 의해 특징화된다. 일부 실시예들에서, 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 길이의 적어도 약 80%에 걸쳐, 또는 심지어 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 길이의 적어도 약 90%에 걸쳐 성장되는 잉곳들로부터 슬라이스된 웨이퍼들은 8MV 이하(B-모드)에서 95%, 바람직하게는 10 내지 12MV(D-모드)에서 99%로 MOS 트랜지스터의 GOI에 의해 특징화된다.

[0026]

단결정 실리콘 잉곳을 성장시키기 위한 종래의 배치 쿄크랄스키 프로세스에서, 결정 용융물/계면 및 열 조건 둘 다는 잉곳 성장 동안의 실리콘 용융물의 소비 및 도가니 위치의 가변성으로 인해 잉곳 길이를 증가시키는 함수로서 연속적으로 변화된다. 도가니의 용융물 고갈 및 이동의 도면은 도 1에서 발견될 수 있다. 도 1a(초기 본체 성장), 도 1b(중기 본체 성장), 및 도 1c(말기 본체 성장)는 배치 Cz 프로세스 동안 결정 길이의 함수로서 용융물 레벨 및 도가니 높이를 예시한다. 용융물 조건들, 예를 들어, 질량 및 상승 레벨들, 및 도가니 위치가 배치 프로세스 동안 연속적으로 변화되고 있으므로, 결함도를 최소화하는데 필요한 v/G 비율(성장 속도(V)/축방향 온도 기울기(G))은 결정 길이에 걸쳐 연속적으로 변화되어, 결정의 품질을 변경한다. 프로세스 윈도우 내에서 사양을 충족하기 위한 원하는 품질을 유지하기 위해, 몇 가지 매개변수들의 연속 제어 조정은 위치에 따라 필요하다. 이들 매개변수들은 도가니 회전 속도(C/R), 시드 회전 속도(S/R), 시드 리프트 속도(S/L), 히터 전

력, 반사기 높이 등을 포함한다. 도 2를 참조하여, 도 2는 예시적 배치 Cz 프로세스에 의해 성장되는 잉곳에서 충분한 결함도 제어를 달성하도록 요구되는 인상 속도의 일정한 변화를 도시하는 그래프이다. 삼각형(---▲---)에 의해 정의되는 라인은 임계 v/G 값을 달성하기 위한 일정하게 변화하는 임계 인상 속도이다. 인상 속도는 정사각형(---■---)에 의해 표시되는 상부 임계 인상 속도("UCL") 및 다이아몬드(---◆---)에 의해 표시되는 하부 임계 인상 속도("LCL") 내에서 변화되고 허용가능 결함도 제어를 여전히 달성할 수 있다. 이들 3개의 라인은 완벽한 실리콘을 생성할 수 있는 인상 속도를 나타낸다. 상부 및 하부 인상 속도 경계들 내에서, 변화하는 지배적 고유 점 결함들을 갖는 완벽한 실리콘이 생성될 수 있다. 예를 들어, 공공 지배적("Pv") 실리콘은 적용된 인상 속도가 도 2(및 도 3 및 도 4)에서 삼각형 및 정사각형으로 라벨링된 라인들 사이에서 제어될 때 생성되고, 간극 지배적("Pi") 실리콘은 적용된 인상 속도가 도 2(및 도 3 및 도 4)에서 삼각형 및 다이아몬드로 라벨링된 라인들 사이에서 제어될 때 생성된다. 도 2(및 도 3 및 도 4)에 도시된 예, 잉곳 성장의 초기 및 중기 위치들에서, 공공 지배적 점 결함들을 갖는 완벽한 실리콘은 "Pv"로 라벨링된 잉곳 단면의 표현에 의해 도시된 바와 같이, 성장될 수 있다. 도 2는 잉곳이 중앙으로부터 가장자리로 공공 지배적인 것을 도시한다. 도 2에 도시된 예에서, 나중의 성장에서, 잉곳은 공공 지배적 점 결함들 및 간극 지배적 점 결함들의 영역들에 의해 특징화되며, 이는 "Pi"로 라벨링된 단면 영역들에 표현된다. 예를 들어, 중앙으로부터 전체 잉곳의 반경 미만의 반경방향 길이로 간극 지배적인 잉곳이 성장될 수 있으며, 이는 잉곳의 가장자리에 대한 공공 지배적 재료의 대역에 의해 둘러싸여진다. 더 나중의 영역에서, 잉곳의 단면은 가장자리에서 공공 지배적 재료의 다른 대역에 의해 둘러싸여지는, 간극 지배적 재료의 대역에 의해 둘러싸여지는, 중앙 내의 공공 지배적 재료를 도시한다. 이들 도면들은 단지 예시를 위한 것이고 본 발명의 방법에 제한적인 것으로 의도되지 않는다. 완벽한 실리콘, 즉, 겸출가능한 응집된 점 결함들이 없는 잉곳들 및 이들로부터 슬라이스된 웨이퍼들은 잉곳의 인상 속도에 의해 부분적으로 초과 점 결함들(공공 및 간극 실리콘)의 적절한 제어에서 기인한다. 공공들 및 간극들과 같은, 고유 점 결함들은 쿠크랄스키 방법에 의해 성장되는 잉곳들에서 발생한다. 그러한 결함들의 존재는 실리콘이 완벽한지에 영향을 미치지 않는다. 오히려, 완벽한 실리콘은 COP들, DSOD들, 및 I-결함들과 같은, 응집된 점 결함들이 없는 것으로서 특징화된다.

[0027]

도 2(및 또한 도 3 및 도 4)는 또한 임의의 결정 길이에서 임계 v/G의 상한 및 하한 밖의 인상 속도들의 함수로서 잉곳을 초래할 수 있는 응집된 결함들을 나타낸다. 상부 임계 인상 속도가 초과되면(v/G가 임계 v/G보다 더 높으면) 발생할 수 있는 결함들은 직접 표면 산화물 결함들(DSOD) 또는 결정 유래 퍼트들 또는 입자들(COP)을 포함한다. 인상 속도가 하부 임계 인상 속도 아래이면(v/G가 임계 v/G보다 더 낮으면) 발생할 수 있는 결함들은 I-결함들을 포함한다. 이들 결함들이 발생하는 대역들은 또한 잉곳 단면들에 도시된다. 지배적 초과 점 결함이 공공들인 영역들에서, 공공 결함들의 응집체들은 Cz 실리콘 결정 성장 및 냉각 동안 공공들의 응집 및 석출에 의해 COP, DSOD와 같은 별개 결함을 형성한다. 지배적 초과 점 결함이 간극 실리콘 원자들인 영역들에서, 그들은 응집되어 간극 실리콘의 응집/석출에 의해 I-결함과 같은 별개 결함을 형성하고 전위를 편치 아웃한다. v/G의 임의의 작은 편차는 공공 또는 간극 실리콘 원자의 응집에 의해 결함을 형성할 것이다.

[0028]

자기장들, 예를 들어, 수평 또는 첨두는 도가니 내에서 용융물 흐름 패턴을 변경하고 결정/용융물 계면의 형상 및 높이의 향상된 제어를 가능하게 하기 위해 인가될 수 있으며, 이는 그것에 의해 품질 제어를 향상시킨다. 그러나, 인상 속도들 및 다른 매개변수들은 도 3에 예시된 바와 같이, 허용가능 결함도 제어를 달성하기 위해 여전히 변화되어야 한다. 도 3은 인가된 자기장으로 예시적 배치 Cz 프로세스에 의해 성장되는 잉곳에서 충분한 결함도 제어를 달성하도록 요구되는 인상 속도 프로파일들을 도시하는 그래프이다. 삼각형(---▲---)에 의해 정의되는 라인은 임계 v/G 값을 달성하기 위한 임계 인상 속도이며, 이는 필요에 따라, 단결정 실리콘 잉곳의 성장 동안 연속적으로 변화된다. 인상 속도는 정사각형(---■---)에 의해 표시되는 상부 임계 인상 속도("UCL") 및 다이아몬드(---◆---)에 의해 표시되는 하부 임계 인상 속도("LCL") 내에서 변화되고 허용가능 결함도 제어를 여전히 달성할 수 있다. 단결정 실리콘 잉곳의 단면에서의 고유 점 결함 및 응집된 점 결함의 영역들은 실질적으로 도 2의 설명에서 상술된 바와 같다.

[0029]

본 발명의 방법에 따르면, 단결정 실리콘 잉곳은 용융물이 소비됨에 따라 연속적으로 보충되기 때문에 성장 동안 실질적으로 일정하게 남아 있기 위해 용융물 깊이를 가능하게 하는 조건들(즉, 용융된 실리콘의 상승 레벨) 및 열 조건들 하에 연속 쿠크랄스키(CCZ) 방법에 의해 성장된다. 일부 실시예들에서, 용융된 실리콘의 실질적으로 일정한 상승 레벨을 유지하는 것은 고정된 위치에 도가니를 유지하는 것을 가능하게 한다. v/G가 적절한 고온 구역 구성에서 고정되면, 프로세스 윈도우는 결정 길이의 상당 부분에 걸쳐 고정될 것이다(즉, 어떤 제어 조정도 없음). 프로세스 조건들(S/R, 전력, 기체 흐름 및 압력, 자속 밀도, 첨두 또는 HMCZ MGP 위치)이 설정되면, 기체 흐름 및/또는 챔버 압력 및 C/R은 산소 함량을 제어하기 위해 사용된다. 따라서, 본 발명의 방법은 인상 속도가 잉곳의 상당한 길이의 성장 동안 일정한 연속 쿠크랄스키(CCZ) 방법에 의한 단결정 실리콘 잉곳의

성장을 가능하게 하고, 이 방법에 따른 성장된 잉곳은 잉곳의 축방향 길이의 상당 부분에 걸쳐 균일한 허용가능 결함도 제어, Oi 균일성, 및 BMD 균일성을 갖는다.

[0030] 모든 조건들이 정상 상태로 설정된 후에, 전체 결정 길이에서 원하는 결함도 제어를 갖는 단결정 실리콘 잉곳을 생산하기 위한 인상 속도는 일정해서, 종래의 Cz 프로세스와 비교하여 프로세스 제어로 인해 생산의 품질 손실들을 상당히 감소시킬 것이다. 도 4는 본 발명에 따른 예시적 연속 쿠크랄스키 성장 방법 동안 단결정 실리콘 잉곳의 축방향 길이의 함수로서의 인상 속도의 그래프이다. 도 4에 도시된 바와 같이, 일정한 인상 속도는 단결정 실리콘 잉곳의 본체 부분의 성장의 상당 부분에 걸쳐 유지된다. 삼각형(---▲---)에 의해 정의되는 라인은 임계 v/G 값을 달성하기 위한 임계 인상 속도이며, 이는 초기 변화하는 영역 다음에, 단결정 실리콘 잉곳의 본체 부분의 성장의 상당 부분에 걸쳐 일정한 인상 속도의 영역을 갖는다. 인상 속도는 정사각형(---■---)에 의해 표시되는 상부 임계 인상 속도("UCL") 및 다이아몬드(---◆---)에 의해 표시되는 하부 임계 인상 속도("LCL") 내에서 변화되고 허용가능 결함도 제어를 여전히 달성할 수 있다. 단결정 실리콘 잉곳의 단면에서의 고유 점 결합 및 응집된 점 결합의 영역들은 실질적으로 도 2의 설명에 상술된 바와 같다.

[0031] 본 발명의 방법에 따른 CCZ 프로세스에서, 다결정 실리콘 공급은 결정 성장에 연속적이며, 그것에 의해 용융물 체적은 결정 길이에 관계없이 초기 충전물 용융 깊이와 실질적으로 동일하게 유지된다. 용융물 상승이 성장 결정 중량과 연속적으로 공급된 다결정 실리콘 사이의 질량 균형에 의해 제어되므로, 용융물 및 성장 결정에서의 열 조건은 축방향 성장 전체에서 변화되지 않는다. 그 후에, 원하는 결정/용융물 계면이 자기장, C/R 및 S/R, 인상 속도, 히터 전력 등과 같은 매개변수들에 의해 결정되고 고정되면, 결합 품질 및 Oi 제어는 결정 축방향 성장 전체에서 일정하게 유지될 것이다. 게다가, 열 조건들 및 결정/용융물 계면이 결정 성장 동안 고정되기 때문에, 주어진 HZ 및 결정/용융물 계면에 대한 일정한 인상 속도는 준정상 상태 제어에서 전체 결정 길이에 걸쳐 사용될 수 있다.

[0032] 본 발명의 방법에 따르면, 결함도 제어에 대한 요건들을 충족하는 단결정 실리콘 잉곳의 성장을 달성하는데 적합한 열 조건은 고온 구역 구성에 의해 설정된다. 성장 방법은 연속 쿠크랄스키 방법이다. 따라서, 퍼니스 챔버는 다결정 실리콘의 연속 공급을 위한 수단, 예를 들어 공급 튜브를 포함한다. 도가니에 첨가되는 고체 폴리실리콘은 전형적으로 입상 폴리실리콘이지만, 청크 폴리실리콘이 사용될 수 있으며, 그것은 입상 폴리실리콘과 함께 사용하도록 최적화된 폴리실리콘 공급기를 사용하여 도가니에 공급된다. 청크 폴리실리콘은 전형적으로 3 내지 45 밀리미터의 크기(예를 들어, 최대 치수)를 갖고, 입상 폴리실리콘은 전형적으로 400 내지 1400 미크론의 크기를 갖는다. 입상 폴리실리콘은 더 작은 크기로 인해, 공급 속도의 쉽고 정확한 제어를 제공하는 것을 포함하여 몇 가지 장점을 갖는다. 그러나, 입상 폴리실리콘의 비용은 전형적으로 화학 기상 증착 프로세스, 또는 그것의 생산에서 사용되는 다른 제조 방법들로 인해, 청크 폴리실리콘의 비용보다 높다. 청크 폴리실리콘은 그것의 더 큰 크기를 고려하여, 더 저렴하고 더 높은 공급 속도가 가능하다는 장점을 갖는다. 가열 유닛들, 냉각 재킷의 위치, 및 전력 제어의 동작은 다결정 실리콘 공급기를 수용하기 위해 조정된다.

[0033] 상이한 용융물 구역들로 용융물을 분리하는 복수의 위어(weir)(20, 30, 40) 또는 유체 장벽들을 갖는 도가니(10)의 도면은 도 5에 도시된다. 예시된 실시예에서, 도가니 조립체(10)는 실리콘 용융물의 내부 용융물 구역(22)을 정의하는 제1 위어(20)(광범위하게, 유체 장벽)를 포함한다. 내부 용융물 구역(22)은 단결정 실리콘 잉곳(50)이 성장되는 성장 영역이다. 제2 위어(30)는 실리콘 용융물의 중간 용융물 구역(32)을 정의한다. 최종적으로, 제3 위어(40)는 실리콘 용융물의 외부 용융물 구역(42)을 정의한다. 공급 튜브(도시되지 않음)는 잉곳의 성장 동안 실질적으로 일정한 용융물 상승 레벨 및 체적을 유지하기에 충분한 속도로 입상, 청크, 또는 입상 및 청크의 조합일 수 있는 다결정 실리콘을 외부 용융물 구역(42)으로 공급한다. 제1 위어(20), 제2 위어(30), 및 제3 위어(40) 각각은 일반적으로 환형 형상을 갖고, 용융된 실리콘이 내부 용융물 구역(22)의 성장 영역을 향해 반경방향 내부로 흐르는 것을 허용하기 위해 그 안에 정의된 적어도 하나의 개구부를 갖는다. 도 5에 도시된 도가니 구성은 예시적이고 본 발명의 프로세스를 수행하는데 적합하다. CCZ에 적합한 다른 구성들은 본 발명의 범위로부터 벗어나지 않고 사용될 수 있다. 예를 들어, 도가니(10)는 제2 위어(30)가 없을 수 있고/있거나 제3 위어(40)가 없을 수 있다.

[0034] 일반적으로, 잉곳이 인발되는(drawn) 용융물은 다결정 실리콘을 도가니에 장입하여 초기 실리콘 충전물을 형성 함으로써 형성된다. 일반적으로, 초기 충전물은 다결정 실리콘의 약 100 킬로그램 내지 약 200 킬로그램이며, 이는 입상, 청크, 또는 입상 및 청크의 조합일 수 있다. 초기 충전물들의 질량은 원하는 결정 직경 및 HZ 디자인에 의존한다. 초기 충전물은 다결정 실리콘이 결정 성장 동안 연속적으로 공급되기 때문에, 결정의 길이를 반영하지 않는다. 예를 들어, 다결정 실리콘이 연속적으로 공급되고 챔버 높이가 충분히 크면, 결정 길이는 2000 mm, 3000 mm, 또는 심지어 4000 mm 길이로 연장될 수 있다. 도가니는 도 5에 도시된 구성, 또는 CCZ 성

장에 적합한 다른 구성을 가질 수 있다. 다결정 실리콘의 다양한 공급원들은 예를 들어, 유동화된 베드 반응기에서 실란 또는 할로실란의 열 분해에 의해 생성되는 입상 다결정 실리콘 또는 지멘스(Siemens) 반응기에서 생산되는 다결정 실리콘을 포함하여 사용될 수 있다. 다결정 실리콘은 도가니에 추가되어 충전물을 형성하면, 충전물은 대략 실리콘의 용융 온도(예를 들어, 약 1412 °C)보다 높은 온도로 가열되어 충전물을 용융시키고, 그것에 의해 용융된 실리콘을 포함하는 실리콘 용융물을 형성한다. 실리콘 용융물은 용융된 실리콘의 초기 체적을 갖고 초기 용융물 상승 레벨을 가지며, 이들 매개변수들은 초기 충전물의 크기에 의해 결정된다. 일부 실시예들에서, 실리콘 용융물을 포함하는 도가니는 적어도 약 1425 °C, 적어도 약 1450 °C 또는 심지어 적어도 약 1500 °C의 온도로 가열된다.

[0035] 충전물이 액화되어 용융된 실리콘을 포함하는 실리콘 용융물을 형성하면, 실리콘 시드 결정이 하강되어 용융물과 접촉한다. 그 다음, 실리콘 시드 결정은 실리콘은 그것(즉, 도 5를 참조하여, 시드 결정 부분 및 목(52))에 부착되는 상태에서 용융물로부터 회수되며 그것에 의해 용융물의 표면 근처에 또는 표면에 용융물/고체 계면을 형성한다. 일반적으로, 목 부분을 형성하기 위한 초기 인상 속도는 높다. 일부 실시예들에서, 실리콘 시드 결정 및 목 부분은 적어도 약 1.0 mm/분, 예컨대 약 1.5 mm/분 내지 약 6 mm/분, 예컨대 약 3 mm/분 내지 약 5 mm/분의 목 부분 인상 속도로 회수된다. 일부 실시예들에서, 실리콘 시드 결정 및 도가니는 반대 방향들, 즉, 역회전으로 회전된다. 역회전은 실리콘 용융물에서 대류를 달성한다. 결정의 회전은 대칭 온도 프로파일을 제공하고, 불순물들의 각도 변동을 억제하고 또한 결정 용융물 계면 형상을 제어하기 위해 주로 사용된다. 일부 실시예들에서, 실리콘 시드 결정은 약 5 rpm 내지 약 30 rpm, 또는 약 5 rpm 내지 약 20 rpm, 또는 약 8 rpm 내지 약 20 rpm, 또는 약 10 rpm 내지 약 20 rpm의 속도로 회전된다. 일부 실시예들에서, 도가니는 약 0.5 rpm 내지 약 10 rpm, 또는 약 1 rpm 내지 약 10 rpm, 또는 약 4 rpm 내지 약 10 rpm, 또는 약 5 rpm 내지 약 10 rpm의 속도로 회전된다. 일부 실시예들에서, 시드 결정은 도가니보다 더 빠른 속도로 회전된다. 일부 실시예들에서, 시드 결정은 도가니의 회전 속도 더 높은 적어도 1 rpm, 예컨대 더 높은 적어도 약 3 rpm, 또는 더 높은 적어도 약 5 rpm인 속도로 회전된다. 일반적으로, 목 부분(52)은 약 300 밀리미터 내지 약 700 밀리미터, 예컨대 약 450 밀리미터 내지 약 550 밀리미터의 길이를 갖는다. 그러나, 목 부분(52)의 길이는 이를 범위들 밖에서 달라질 수 있다.

[0036] 목(52) 형성 후, 도 5를 참조하여, 목(52)에 인접한 바깥쪽으로 벌어지는 시드 원뿔 부분(54)이 성장된다. 일반적으로, 인상 속도는 목 부분 인상 속도로부터 바깥쪽으로 벌어지는 시드 원뿔 부분(54)을 성장시키는데 적합한 속도로 감소된다. 예를 들어, 바깥쪽으로 벌어지는 시드 원뿔의 성장 동안의 시드 원뿔 인상 속도는 약 0.5 mm/분 내지 약 2.0 mm/분, 예컨대 약 1.0 mm/분이다. 일부 실시예들에서, 바깥쪽으로 벌어지는 시드 원뿔(54)은 약 100 밀리미터 내지 약 400 밀리미터, 예를 들어 약 150 밀리미터 내지 약 250 밀리미터의 길이를 갖는다. 바깥쪽으로 벌어지는 시드 원뿔(54)의 길이는 이러한 범위들 밖에서 달라질 수 있다. 일부 실시예들에서, 바깥쪽으로 벌어지는 시드 원뿔(54)은 약 150 mm, 적어도 약 150 밀리미터, 약 200 mm, 적어도 약 200 밀리미터, 약 300 mm, 적어도 약 300 mm, 약 450 mm, 또는 심지어 적어도 약 450 mm일 수 있다. 단결정 실리콘 잉곳의 잉곳 본체(52)는 결국 적어도 약 1000 밀리미터 길이, 예컨대 적어도 1400 밀리미터 길이, 예컨대 적어도 1500 밀리미터 길이, 또는 적어도 2000 밀리미터 길이, 또는 적어도 2200 밀리미터, 예컨대 2200 밀리미터, 또는 적어도 약 3000 밀리미터 길이, 또는 적어도 약 4000 밀리미터 길이인 것으로 성장된다.

[0037] 목(52) 및 목 부분에 인접한 바깥쪽으로 벌어지는 시드 원뿔(54)의 형성 후, 원뿔 부분에 인접한 일정한 직경을 갖는 잉곳 본체(56)가 이때 성장된다. 잉곳 본체(56)의 일정한 직경 부분은 원주 가장자리, 원주 가장자리에 평행한 중심 축, 및 중심 축으로부터 원주 가장자리로 연장되는 반경을 갖는다. 중심 축은 또한 바깥쪽으로 벌어지는 시드 원뿔(54) 및 목(52)을 통과한다. 잉곳 본체(56)의 직경은 변화될 수 있고 일부 실시예들에서, 직경은 약 150 mm, 적어도 약 150 밀리미터, 약 200 mm, 적어도 약 200 밀리미터, 약 300 mm, 적어도 약 300 mm, 약 450 mm, 또는 심지어 적어도 약 450 mm일 수 있다. 단결정 실리콘 잉곳의 잉곳 본체(52)는 결국 적어도 약 1000 밀리미터 길이, 예컨대 적어도 1400 밀리미터 길이, 예컨대 적어도 1500 밀리미터 길이, 또는 적어도 2000 밀리미터 길이, 또는 적어도 2200 밀리미터, 예컨대 2200 밀리미터, 또는 적어도 약 3000 밀리미터 길이, 또는 적어도 약 4000 밀리미터 길이인 것으로 성장된다.

[0038] 도 4는 본 발명의 방법의 일부 실시예들에 따른 단결정 실리콘 잉곳의 본체를 인상하기 위한 예시적이고 비제한적 인상 속도 프로토콜을 예시한다. 예시적 예시로부터 분명한 바와 같이, 인상 속도는 비교적 높은 인상 속도로부터 최소 인상 속도로 감소하고, 그 다음 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 성장의 상당 부분에 대해 일정한 인상 속도로 상승한다. 본 발명의 프로세스에 따르면, 인상 속도들은 완벽한 실리콘, 즉, 응집된 결함들, 직접 표면 산화 결함들(DSOD), 결정 유래 퍼트들(COP), D-결함들, 및 I-결함들 등 중에서 선택되는 검출가능 결핍 응집된 결함들에 의해 특징화되는 실리콘을 달성하기 위해 선택된다. 초기 높은 인상 속도는 약 0.5 mm/분 내지 약 2.0 mm/분, 예컨대 약 1.0 mm/분이며, 그 다음 약 0.4 mm/분 내지 약 0.8 mm/분, 약 0.4 mm/분 내지 약 0.7

mm/분, 또는 약 0.4 mm/분 내지 약 0.65 mm/분의 일정한 인상 속도로 증가하기 전에, 약 0.4 mm/분만큼 낮거나 심지어 약 0.3 mm/분만큼 낮을 수 있는 인상 속도로 감소할 수 있다.

[0039] 본 발명의 방법을 수행하는데 적합한 퍼니스 챔버(100) 내의 고온 구역 구성의 예시적이고 비제한적 예시는 도 6a, 도 6b, 및 도 6c에 도시된다. 다른 고온 구역 구성들은 본 발명의 방법을 수행하는데 적합하다. 고온 구역 구성은 냉각 재킷(102), 반사기(104), 측면 히터(106), 및 하단 히터(108)를 포함한다. 성장 결정 직경 및 메니스커스의 형상 및 높이는 상단 윈도우에 위치된 카메라(도시되지 않음)에 의해 감시된다. 카메라로부터 획득되는 데이터는 측면 히터(106) 및 하단 히터(108)에 피드백을 가능하게 한다. 결정 성장 동안, 전력 분포는 용융물/고체 계면의 균일성을 가능하게 하기 위해, 즉, 메니스커스의 원하는 형상 및 높이를 유지하기 위해 히터들 사이에서 조정될 수 있다. 반사기(104)는 히터 및 도가니를 포함하는 퍼니스의 고온 부분으로부터 용융물로 열 유속을 반사시켜야 한다. 반사기(104)는 퍼니스의 고온 부분으로부터 저온 부분(냉각 재킷(102)에 의해 유지됨)으로 열 전달을 감소시키고 그것에 의해 퍼니스의 이들 2개의 영역 사이에 분리를 유지한다. 반사기는 축방향 및 반경방향 온도 기울기들을 제어하는 것을 도우며, 이는 성장 잉곳으로의 용융된 실리콘의 응고 및 결정화를 추진한다.

[0040] 도 6a, 도 6b, 및 도 6c는 도 4에 도시된 인상 속도의 영역들에 대응하는 제1 단계, 제2 단계, 및 제3 단계를 각각 도시한다. 즉, 도 6a에 도시된 제1 단계는 도 4에서 인상 속도가 높고 최소치로 감소하는 영역에 대응한다. 도 6b에 도시된 제2 단계는 도 4에서 인상 속도가 최소치에 있고 일정한 인상 속도로 증가하는 영역에 대응한다. 도 6c에 도시된 제3 단계는 도 4에서 일정한 인상 속도의 영역에 대응한다. 각각의 단계 동안, 용융물(110)은 다결정 실리콘이 잉곳(112)의 성장 동안 용융물(도 5 참조)로 연속적으로 공급되므로 본 발명의 실시 예들에 따른 일정한 용융물 체적 및 용융물 상승 레벨을 보유한다.

[0041] 가변 인상 속도에 의해 특징화된 단결정 실리콘 잉곳의 본체를 성장시키는 초기 영역은 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 총 길이의 약 20% 미만을 포함할 수 있다. 일부 실시예들에서, 가변 인상 속도 체제는 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 길이의 약 5% 내지 약 20%, 예컨대 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 길이의 약 5% 내지 약 15%, 또는 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 길이의 약 10% 내지 약 15%를 포함할 수 있다. 가변 인상 속도 조건들 하에 성장되는 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 길이의 퍼센티지는 잉곳의 본체의 총 길이에 부분적으로 의존한다. 예를 들어, 가변 속도 조건들 하에 인상되는 잉곳의 본체의 길이는 약 50 mm 내지 약 200 mm 사이, 약 100 mm 내지 약 200 mm 사이, 예컨대 약 150 mm 내지 약 200 mm 사이에서 변화될 수 있다. 200 mm가 가변 속도 조건들 하에 성장되고, 잉곳의 본체의 총 길이가 1400 mm이면, 본체의 약 14%가 가변 속도 조건들 하에 성장되는 한편, 본체의 약 9%만이 2200 mm의 총 본체 길이에 대해 가변 속도 조건들 하에 성장된다.

[0042] 본체의 초기 영역이 가변 인상 속도 조건들 하에 성장된 후에, 본체의 나머지는 일정한 인상 속도 하에 성장된다. 일부 실시예들에서, 잉곳의 본체는 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 길이의 적어도 약 30%, 예컨대 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 길이의 적어도 약 50%, 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 길이의 적어도 약 70%, 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 길이의 적어도 약 80%, 또는 심지어 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 길이의 적어도 약 90%의 성장 동안 일정한 본체 인상 속도로 성장된다. 일부 실시예들에서, 일정한 본체 인상 속도는 약 0.4 mm/분 내지 약 0.8 mm/분, 약 0.4 mm/분 내지 약 0.7 mm/분, 또는 약 0.4 mm/분 내지 약 0.65 mm/분이다.

[0043] 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 성장 동안, 다결정 실리콘, 즉, 입상, 청크, 또는 입상 및 청크의 조합은 용융된 실리콘에 첨가되며 그것에 의해 용융된 실리콘의 일정한 체적 및 일정한 용융물 상승 레벨을 달성한다. 본 발명의 방법에 따르면, 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 축방향 길이의 상당 부분의 성장 동안 실질적으로 일정한 용융물 체적의 유지는 일정한 인상 속도로 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 축방향 길이의 상당 부분에 걸쳐 높은 잉곳 품질의 달성을 가능하게 한다. 일정한 용융물 체적은 결정 길이에 관계없이 잉곳의 본체의 상당 부분에 걸쳐 일정한 결정/용융물 계면 및 따라서 균일한 결정 품질을 유지하는 것을 가능하게 한다. 따라서, 일부 실시예들에서, 용융된 실리콘의 체적은 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 적어도 약 90%의 성장 동안 약 1.0 체적 % 이하만큼, 또는 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 적어도 약 90%의 성장 동안 약 0.5 체적 % 이하만큼, 또는 심지어 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 적어도 약 90%의 성장 동안 약 0.1 체적 % 이하만큼 변화된다. 다른 방식으로 서술하면, 일부 실시예들에서, 용융물 상승 레벨은 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 적어도 약 90%의 성장 동안 약 +/- 0.5 밀리미터 미만만큼 변화된다.

[0044] 추가로, 본 발명의 프로세스에 따르면, 실리콘 용융물을 포함하는 도가니에 자기장이 인가될 수 있다. 적절한 결정/용융물 계면, 즉 메니스커스의 형상 및 높이를 설정하기 위해, 첨두 또는 수평 자기장이 인가될 수 있다. 자기장은 주로 원하는 결정/용융물 계면 형상 및 높이를 고정하기 위해 사용되며, 산소 함량 Oi의 제어는 부차

적인 목적이다.

[0045] 용융물 흐름 및 용융물/고체 계면의 형상의 제어, 및 그에 따른 잉곳의 품질은 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 성장 동안 실리콘 용융물에 자기장을 인가함으로써 향상될 수 있다. 일부 실시예들에서, 인가된 자기장은 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 성장의 적어도 약 70% 동안, 또는 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 성장의 약 70% 내지 약 90% 동안 실질적으로 일정한 용융물/고체 계면 프로파일을 유지한다. 자기장은 전자기력을 인가하고, 이는 실리콘 용융물 흐름에 영향을 미치므로, 용융물 내의 열 전달이 영향을 받는다. 그것은 결정/용융물 계면의 프로파일 및 성장 결정의 온도를 변경하며, 이는 완벽한 실리콘의 중요 제어 매개변수이다.

[0046] 자기장은 잉곳 내의 산소 함량 및 균일성에 영향을 미친다. 잉곳의 산소 공급원은 석영 도가니 벽의 용해, 용융물이 없는 표면에서의 $\text{SiO}_x(g)$ 의 증발(용융물 흐름 역학에 의해 제어됨), 및 성장 결정 정면에의 혼입으로부터 오는 것이다. 자기장은 산소 증발 및 혼입에 영향을 줄 수 있는 성장 동안의 대류성 용융물 흐름에 영향을 미친다. 시간 충분에 의한 단결정 실리콘 잉곳으로의 산소 혼입의 변동은 이하의 수학식에 따라 용융물 내의 산소의 확산 및 대류에 의해 제어된다:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla C - v\rho + SOURCE.$$

[0047] C 는 응고되는 실리콘 내의 산소의 농도이고, t 는 시간이고, v 는 대류 속도(용융물 흐름 속도), ρ (rho)는 실리콘 용융물의 밀도이고, ∇ 는 기울기(d/dx)이다. 인가되는 자기장은 용융물 속도(v), 및 용융물 내 산소 농도의 기울기($dC/dx = \nabla C$)에 영향을 준다. 자기장이 정상 상태의 용융물 흐름을 야기하므로, 잉곳 내로의 산소의 혼입 O_i 는 시간에 따라 일정하며, 이는 반경방향 및 축방향 산소 농도 균일성을 향상시킨다. SOURCE 항은 2 개의 매개변수, 즉 산소의 생성인 석영(SiO_2) 도가니의 용해($\text{Si}(l) + \text{SiO}_2(s) \rightarrow \text{SiO}_x(g)$), 및 용융물로부터의 산소($\text{SiO}_x(g)$)의 제거(소실)인 증발로부터 유도된다. 배치 C_z 프로세스에서, 이 SOURCE 항은 일정하지 않다. 대신에, 결정이 성장함에 따라 용융물 질량이 감소하기 때문에, 이것은 결정 길이에 따라 달라진다. 잉곳이 그것의 본체 길이의 상당 부분을 성장시킨 때, 남은 용융물 체적은 적고, 그에 의해 도가니와 접촉하는 실리콘 용융물의 양이 감소되므로, 이는 도가니로부터 용융물 내로 혼입되는 산소 농도를 낮춘다. 따라서, 다른 항들(확산, 대류, 증발)이 일정한 경우, 응고 실리콘 결정에 혼입된 산소가 감소된다. 용융물이 없는 표면(용융물과 기체 사이의 접촉 표면) 면적은 $\text{SiO}_x(g)$ 의 증발 속도에 영향을 준다. 배치 C_z 프로세스에서의 작은 용융물 질량은 도 1c에 도시된 바와 같이 도가니의 형상으로 인해 비교적 작은 표면적을 갖는다. $\text{SiO}_x(g)$ 의 증발이 적다는 것은 응고 실리콘 결정에 더 많은 산소가 혼입됨을 의미한다. 본 발명의 방법에 따르면, 결정 잉곳이 성장함에 따라 폴리실리콘에 침가되기 때문에 용융물 질량은 일정하게 유지된다. 따라서, 모든 source 항(SiO_2 도가니가 용융물 내로 용해되는 것에 의한 산소의 발생, 및 용융물이 없는 표면을 통한 $\text{SiO}_x(g)$ 기체의 증발)은 일정하다. 따라서, 확산 및 대류 항은 응고 실리콘 결정의 산소에 영향을 미친다. 인가되는 자기장은 용융물 흐름을 더 안정적으로 만들고(즉, 용융물 흐름은 시간에 독립적인 정상 상태처럼 일정함), 따라서 혼입 산소는 잉곳의 전체 길이의 성장 동안 축방향 및 반경방향에서 균일하고 안정적이다. 일부 실시예들에서, 간극 산소(간극 oxygen)는 약 4 PPMA 내지 약 18 PPMA의 농도로 잉곳에 혼입될 수 있다. 일부 실시예들에서, 간극 산소는 약 10 PPMA 내지 약 35 PPMA의 농도로 잉곳에 혼입될 수 있다. 일부 실시예들에서, 잉곳은 약 15 PPMA 이하 또는 약 10 PPMA 이하의 농도로 산소를 포함한다. 간극 산소는 SEMI MF 1188-1105에 따라 측정될 수 있다.

[0049] 일부 실시예들에서, 수평 자기장은 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 성장 동안 실리콘 용융물에 인가된다. 그러한 수평 필드는 도 7a에 예시되며, 이는 도 5에 도시된 바와 같이 도가니 및 성장 잉곳에 걸쳐 중첩되는 수평 자기장의 도면이다. 수평 자기장이 있는 상태에서의 결정 성장은 실리콘 용융물을 보유하는 도가니를 기준 전자석(200)의 극들 사이에 배치함으로써 달성된다. 일부 실시예들에서, 수평 자기장은 용융물 영역에서 약 0.2 테슬라 내지 약 0.4 테슬라의 자속 밀도를 가질 수 있다. 용융물 내에서의 자기장 변동은 주어진 강도에서 +/- 약 0.03 테슬라 미만이다. 수평 자기장의 인가는 용융물 대류를 유도하는 힘들에 반대로, 유체 운동과 반대 방향으로 축 방향을 따르는 로렌츠 힘을 발생시킨다. 따라서, 용융물 내의 대류가 억제되고, 계면 근처의 결정에서 축방향 온도 기울기가 증가한다. 그러면, 용융물-결정 계면은 계면 근처의 결정에서 증가된 축 방향 온도 기울기를 수용하기 위해 결정 측으로 위를 향해 이동하고, 도가니 내의 용융물 대류로 인한 기여도는 감소한다.

[0050] 일부 실시예들에서, 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 성장 동안 첨두 자기장이 실리콘 용융물에 인가된다. 첨두 필드는 도 7b에 예시되며, 이는 도 5에 도시된 바와 같이 도가니 및 성장 잉곳에 걸쳐 중첩되는 첨두 자기장의 도면이다. 첨두 자기장은 2개의 제어 매개변수, 즉 자속 밀도 및 자기장 형상을 갖는다. 첨두 자기장은 잉곳

축 근처의 용융물 내의 더 깊은 수직(축방향) 자기장과 결합하여, 용융물의 가장 가까운 표면에 수평(반경방향) 자기장 성분을 인가한다. 첨두 자기장은 반대 방향으로 전류를 운반하는 한 쌍의 헬름홀츠 코일을 사용하여 생성된다. 결과적으로, 잉곳 축을 따라 수직으로, 2개의 자기장 사이의 중간 위치에서 자기장은 서로 상쇄되어 수직 자기장 성분을 0으로, 또는 0에 가깝게 만든다. 예를 들어, 첨두 자속 밀도는 전형적으로 축 방향에서 약 0 내지 약 0.2 테슬라이다. 반경 방향의 자속 밀도는 일반적으로 수직 방향의 자속 밀도보다 높다. 예를 들어, 첨두 자속 밀도는 전형적으로 반경방향 위치에서 약 0 내지 약 0.6T, 예를 들어 반경방향 위치에 따라 약 0.2 내지 약 0.5T이다. 반경방향 첨두 자기장은 용융물의 흐름을 억제하여 용융물을 안정화시킨다. 즉, 반경 방향 첨두 자기장의 인가는 결정 성장이 일어나는 고체-액체 계면에 인접한 부분에서 대류를 유도하고, 용융물의 나머지 부분들에서 대류를 억제하여, 균일한 산소 분포를 실현하기 위한 효과적인 방법으로 작용한다. 열 용융물 대류는 용융물이 없는 표면 및 용융물 도가니 계면에서 첨두 자기장에 의해 동시에 국부적으로 독립적으로 제어될 수 있다. 이는 결정 회전 속도에 관계없이 자속 밀도만으로 성장 결정의 산소 농도를 제어하는 것을 가능하게 한다. 축방향 또는 반경방향 자기장이 있는 경우, 결정 회전 속도의 제어를 통해 산소 농도의 제어가 달성된다. 첨두 자기장의 인가는 약 15 PPMA 이하 또는 약 10 PPMA 이하와 같이 인가된 자기장 없이 성장된 잉곳보다 적은 산소 함량을 포함하는 잉곳에서의 성장을 가능하게 할 수 있다. 간극 산소는 SEMI MF 1188-1105에 따라 측정될 수 있다.

[0051] 본 발명의 방법은 완벽한 실리콘에 대한 산업 사양들을 충족하거나 초과하는 연속 쇼크랄스키 방법에 의한 단결정 실리콘 잉곳들의 성장을 가능하게 한다. 완벽한 실리콘 결정들의 성장에 기여하는 인자들은 완벽한 실리콘을 성장시키기 위한 임계 인상 속도를 결정하는 것, 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 성장의 상당 부분에 걸쳐 임계 속도로 일정한 인상 속도를 유지하는 것, 및 자기장을 인가하여 용융물/고체 계면의 형상 및 높이를 유지하는 것을 포함한다. 인상 속도 및 자기장의 구성들이 결정되면, 인상 속도는 일정한 용융물 체적 및 용융물 상승 레벨을 유지하기 위해 다결정 실리콘의 연속 첨가로 인하여 일정한 속도로 유지될 수 있다. 따라서, 성장 잉곳들의 종래의 방법들과 달리, 인상 속도는 잉곳의 성장의 상당 부분에 걸쳐 일정하다. 본원에 개시된 방법에 의해 가능하게 되는 프로세스 제어들을 고려하여, 본 발명의 방법은 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 길이의 적어도 약 70%에 걸쳐, 예컨대 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 길이의 적어도 약 80%에 걸쳐, 또는 심지어 단결정 실리콘 잉곳의 본체의 길이의 적어도 약 90%에 걸쳐 완벽한 실리콘을 포함하는 단결정 실리콘 잉곳의 성장을 가능하게 한다.

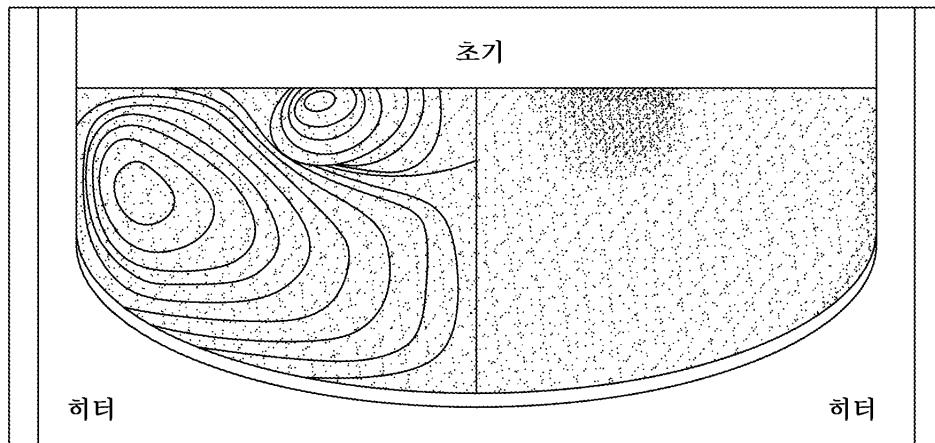
[0052] 본 명세서에 사용될 때, 용어 "약", "실질적으로", "본질적으로" 및 "대략"은 치수들, 농도들, 온도들, 또는 다른 물리적 또는 화학적 속성을 또는 특성들의 범위들과 함께 사용될 때, 예를 들어 반올림, 측정 방법론, 또는 다른 통계적 변동에 기인하는 변동들을 포함하여 속성들 또는 특성들의 범위의 상한 및/또는 하한에 존재할 수 있는 변동들을 포함하도록 의도된다.

[0053] 본 개시 및 그 실시예(들)의 요소들을 소개할 때, 단수 표현(관사 "a", "an", "the" 및 "상기(said)")은 하나 이상의 그러한 요소가 존재함을 의미하는 것으로 의도된다. 용어 "포함하는(comprising, including)", "함유하는" 및 "갖는"은 포괄적인 것으로 의도되고, 나열된 요소들 이외의 추가 요소들이 존재할 수 있음을 의미한다. 특정 배향(예를 들어, "위쪽", "아래쪽", "측면" 등)을 나타내는 용어들의 사용은 설명의 편의를 위한 것이며, 설명된 항목의 임의의 특정 배향을 요구하지 않는다.

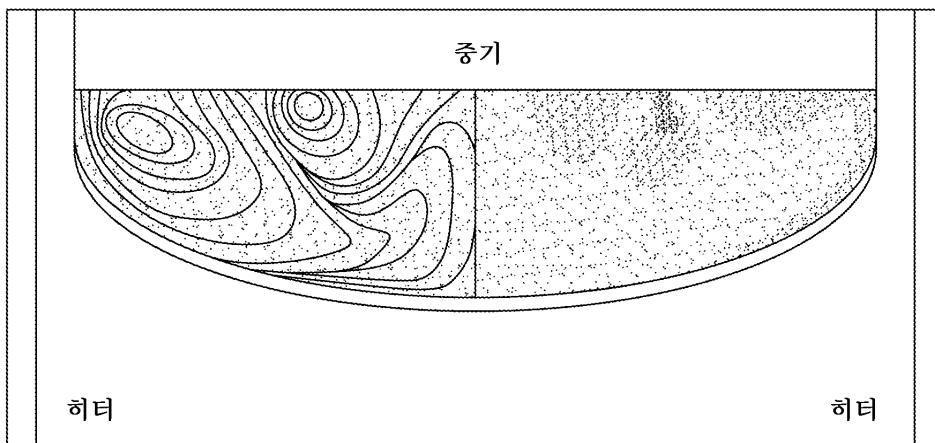
[0054] 본 개시의 범위를 벗어나지 않고서 상기 구성들 및 방법들에서 다양한 변경이 이루어질 수 있으므로, 상기 설명에 포함되고 첨부된 도면(들)에 도시된 모든 사항은 제한적인 의미가 아니라 예시적인 것으로 해석되어야 한다.

도면

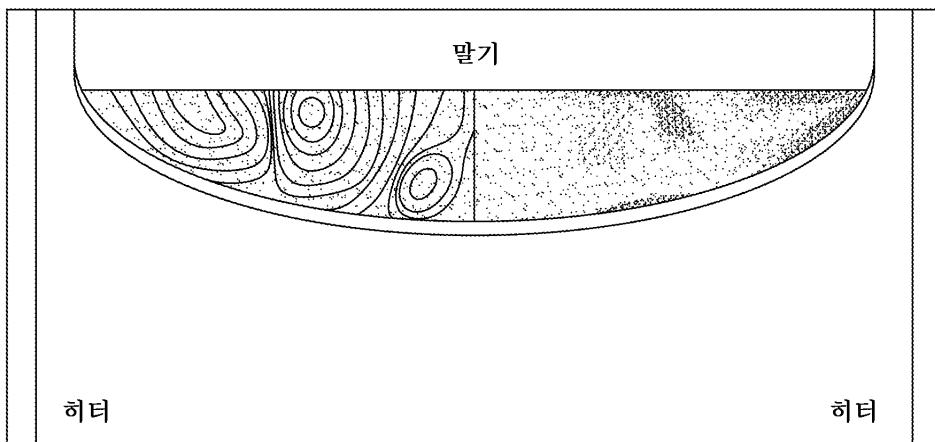
도면 1a



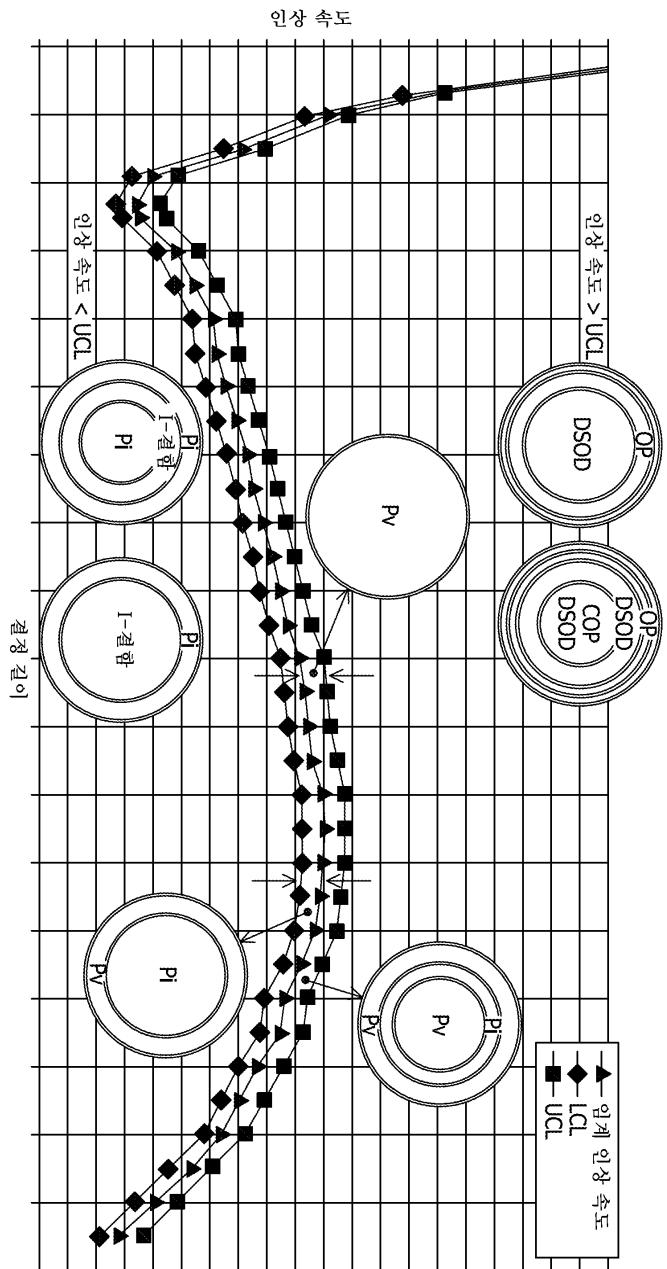
도면 1b



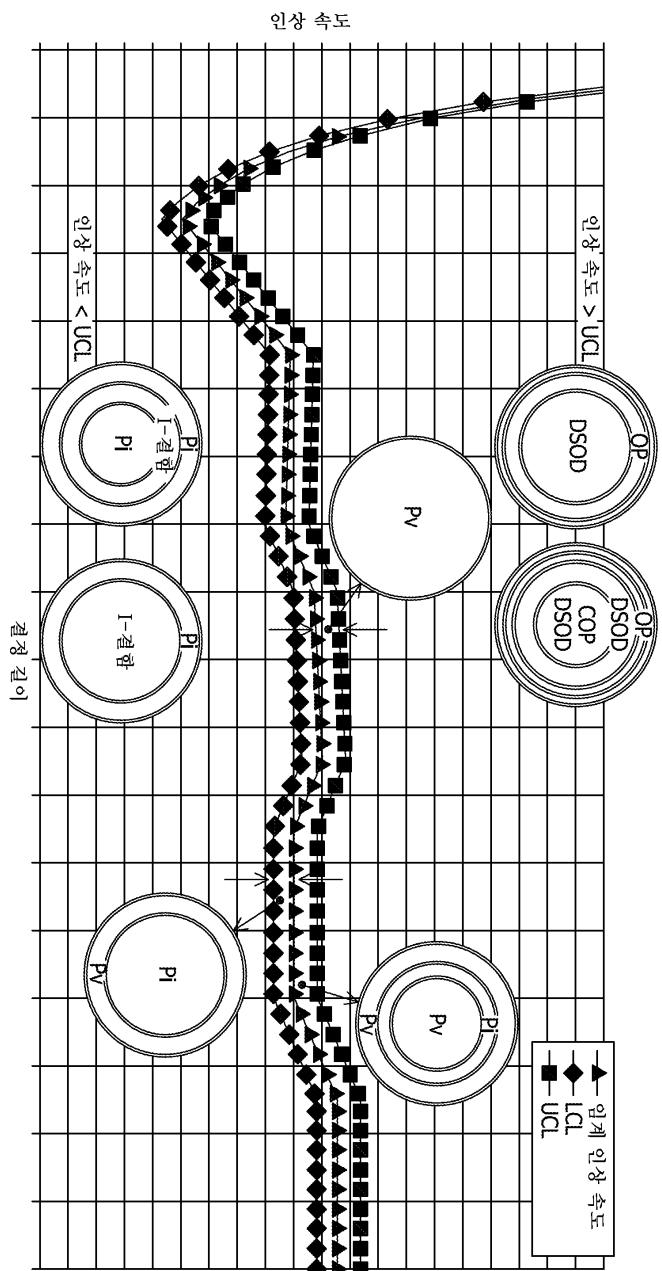
도면 1c



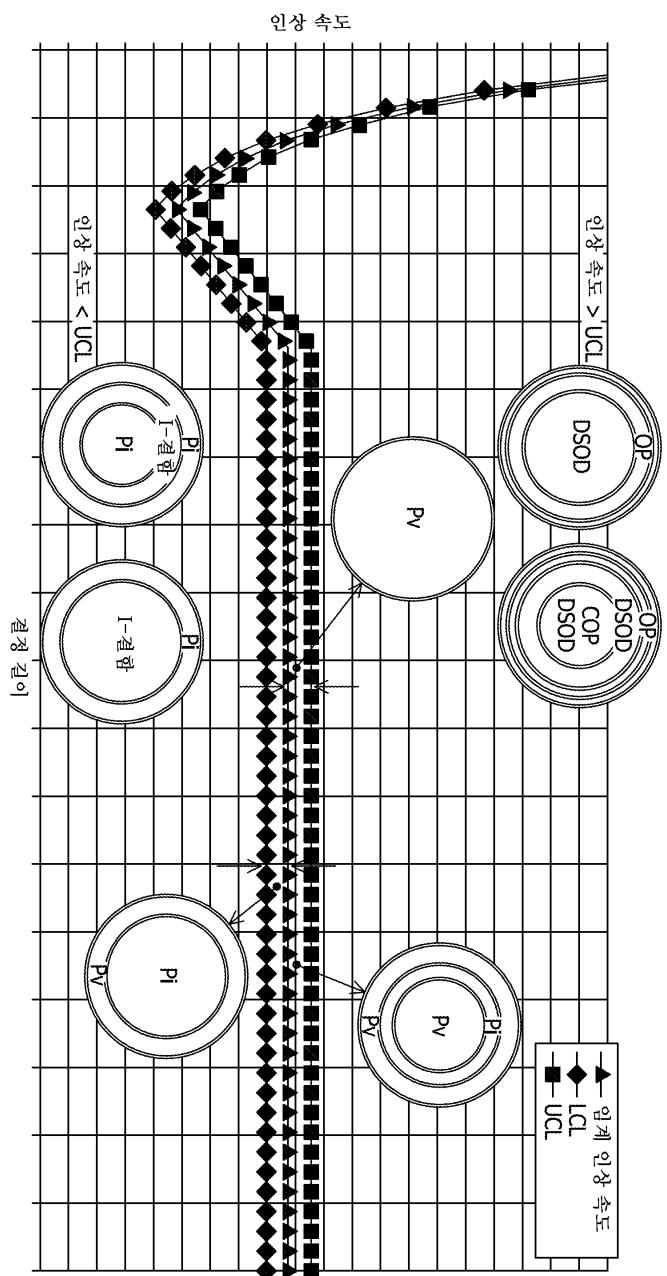
도면2



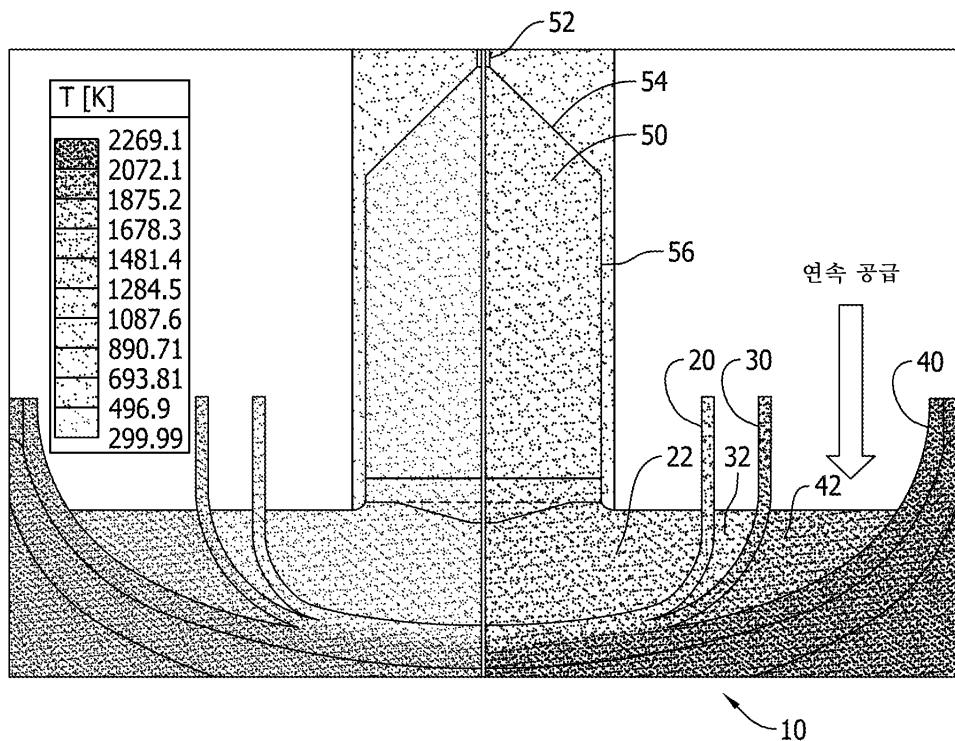
도면3



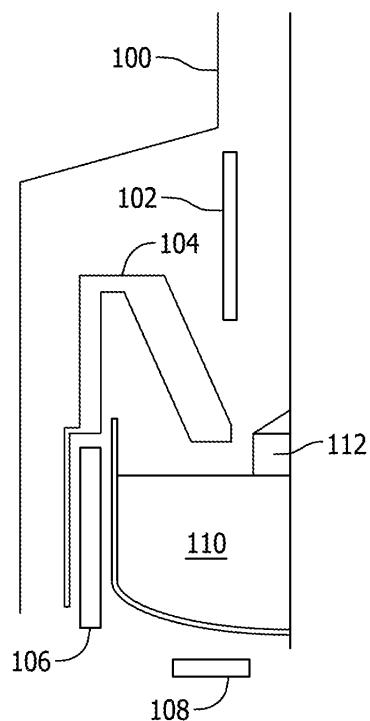
도면4



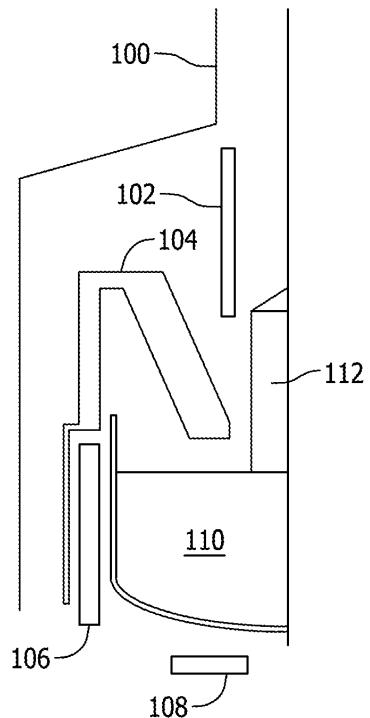
도면5



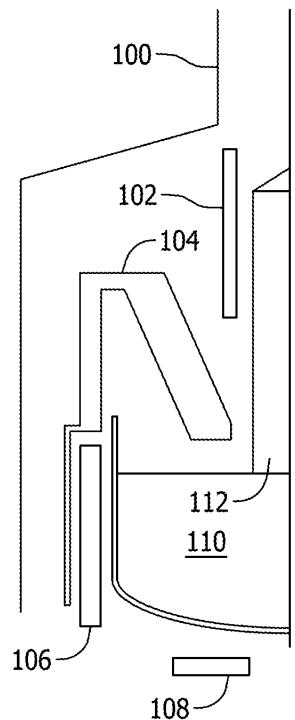
도면6a



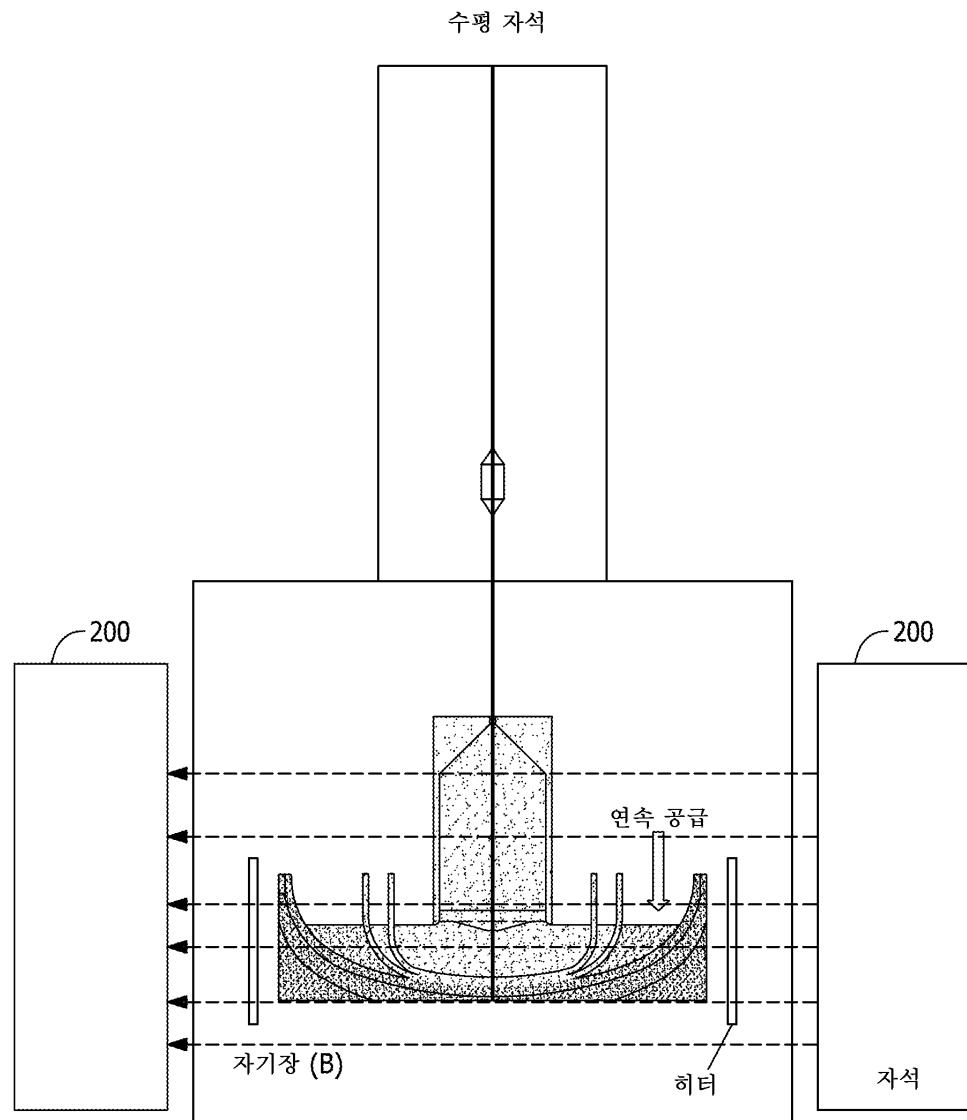
도면6b



도면6c



도면7a



도면7b

