(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2014년12월09일
(11) 등록번호 10-1470814
(24) 등록일자 2014년12월03일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
C30B 11/14 (2006.01) *C30B 15/20* (2006.01)
H01L 31/18 (2006.01) *C30B 29/06* (2006.01)
(21) 출원번호 10-2012-7014739(분할)
(22) 출원일자(국제) 2007년01월18일
심사청구일자 2012년06월07일
(85) 번역문제출일자 2012년06월07일
(65) 공개번호 10-2012-0081241
(43) 공개일자 2012년07월18일
(62) 원출원 특허 10-2008-7020400
원출원일자(국제) 2007년01월18일
심사청구일자 2011년11월11일
(86) 국제출원번호 PCT/US2007/060661
(87) 국제공개번호 WO 2007/084934
국제공개일자 2007년07월26일
(30) 우선권주장
60/760,453 2006년01월20일 미국(US)
(뒷면에 계속)
(56) 선행기술조사문헌
JP평성11011924 A
JP평성10194718 A
EP0748884 A
EP0887442 A
전체 청구항 수 : 총 8 항

(73) 특허권자
에이엠지 아이디얼캐스트 솔라 코포레이션
미국 21703 메릴랜드주 프레데릭 노스 캐스팅 패실리티 솔라렉스 코트 630
(72) 발명자
스토다드 나단 지
미국 17325 펜실베이니아주 게티스버그 헤리티지 드라이브 995
(74) 대리인
특허법인코리아나

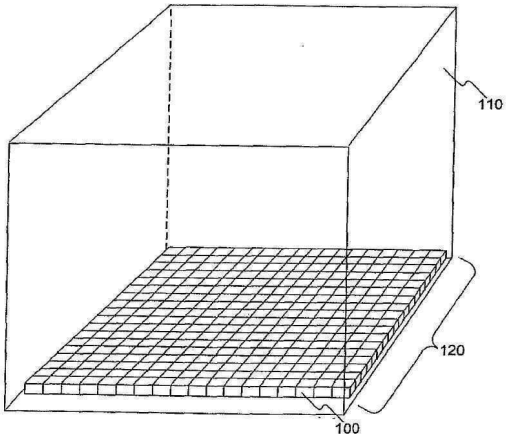
심사관 : 조수익

(54) 발명의 명칭 **광전 변환 소자용 단결정 캐스트 실리콘 및 단결정 캐스트 실리콘 바디들을 제조하는 방법 및 장치**

(57) 요 약

광전지 및 다른 애플리케이션들을 위해 실리콘을 캐스팅하는 방법 및 장치를 제공한다. 이러한 방법 및 장치의 경우, 방사상으로 분포된 불순물들 및 결함들이 없거나 실질적으로 없고, 각각 적어도 약 35 cm 인 적어도 2개의 치수들을 갖는 단결정 실리콘의 캐스트 바디를 형성할 수도 있다.

대 표 도 - 도1



(30) 우선권주장
60/808,954 2006년05월30일 미국(US)
60/839,670 2006년08월24일 미국(US)
60/839,672 2006년08월24일 미국(US)

특허청구의 범위

청구항 1

웨이퍼로서,

준-단결정 실리콘 (near-monocrystalline silicon) 의 바디 (body) 로부터 형성된 실리콘을 포함하고,

상기 바디는 원추형으로-분포된 불순물들 및 결함들이 없고;

상기 바디는 각각 적어도 25 cm 인 적어도 2 개의 치수들을 갖고 적어도 20 cm 인 제 3 치수를 갖고;

상기 웨이퍼는 적어도 50 mm 인 적어도 하나의 치수를 갖는, 웨이퍼.

청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 바디는 원추형으로-분포된 불순물들 및 결함들이 없고;

상기 바디는 각각 25 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 20 cm 인 제 3 치수를 갖고;

상기 웨이퍼는 적어도 50 mm 인 제 3 치수를 갖는, 웨이퍼.

청구항 3

제 1 항에 있어서,

상기 웨이퍼는 와류 결함들 (swirl defect) 이 없고 산소-유도된 적층 결함들 (oxygen-induced stacking fault defect) 이 없는, 웨이퍼.

청구항 4

제 1 항에 있어서,

상기 바디는 2×10^{16} 원자/cm^3 에서 5×10^{17} 원자/cm^3 인 용존 탄소 농도, 5×10^{17} 원자/cm^3 를 초과하지 않는 용존 산소 농도, 적어도 1×10^{15} 원자/cm^3 의 용존 질소 농도를 갖는, 웨이퍼.

청구항 5

제 1 항에 있어서,

상기 웨이퍼는,

캐스트 실리콘의 바디를 제공하는 것, 및

상기 바디로부터 적어도 하나의 웨이퍼를 형성하는 것에 의해 형성되고,

상기 캐스트 실리콘의 바디는,

도가니 내의 적어도 하나의 표면상에 준-단결정 실리콘을 포함하는 복수의 실리콘 시드 결정들의 기하학적 배열 (geometric arrangement) 을 위치시키는 것으로서, 상기 기하학적 배열은 밀집된 다각형들을 포함하는, 상기 기하학적 배열을 위치시키는 것;

상기 적어도 하나의 표면상의 상기 복수의 실리콘 시드 결정들과 접촉하게 실리콘 공급재료를 위치시키는 것;

상기 실리콘 공급재료 및 상기 복수의 실리콘 시드 결정들을 실리콘의 용융 온도까지 가열시키는 것;

상기 복수의 실리콘 시드 결정들이 완전히 용융되지는 않도록 상기 가열을 제어하는 것으로서, 상기 도가니 내의 어딘가에서 상기 실리콘의 용융 온도에 도달한 후, 상기 도가니의 외부 표면에서 측정되는 경우, 0.1 ℃/분 이하인 ΔT 를 유지시키는 것을 포함하는, 상기 가열을 제어하는 것; 및

상기 실리콘을 냉각함으로써 준-단결정 실리콘을 포함하는 고형체 (solid body) 를 형성하는 것에 의하여 형성된, 웨이퍼.

청구항 6

웨이퍼로서,

연속적 단결정 실리콘의 바디로부터 형성된 실리콘을 포함하고,

상기 바디는 원추형으로-분포된 불순물들 및 결함들이 없고;

상기 바디는 각각 적어도 25 cm 인 적어도 2 개의 치수들을 갖고 적어도 20 cm 인 제 3 치수를 갖고;

상기 웨이퍼는 적어도 50 mm 인 적어도 하나의 치수를 갖는, 웨이퍼.

청구항 7

광전지로서,

상기 광전지는,

준-단결정 실리콘의 바디로부터 형성된 실리콘을 포함하는 웨이퍼로서,

상기 바디는 원추형으로-분포된 불순물들 및 결함들이 없고;

상기 바디는 각각 적어도 25 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 20 cm 인 제 3 치수를 갖고;

상기 웨이퍼는 적어도 50 mm 인 적어도 하나의 치수를 갖는, 상기 웨이퍼;

상기 웨이퍼 내의 p-n 결합;

상기 웨이퍼 표면의 부분 상의 반사 방지막;

후면 표면 필드와 패시베이팅층 (passivating layer) 중에서 선택되는 적어도 하나의 층; 및

상기 웨이퍼 상의 도전성 콘택들을 포함하는, 광전지.

청구항 8

광전지로서,

상기 광전지는,

연속적 단결정 실리콘의 바디로부터 형성된 실리콘을 포함하는 웨이퍼로서,

상기 연속적 단결정 실리콘의 바디는 원추형으로-분포된 불순물들 및 결함들이 없고;

상기 연속적 단결정 실리콘의 바디는 각각 적어도 25 cm 인 2 개의 치수들 및 적어도 20 cm 인 제 3 치수를 갖고;

상기 웨이퍼는 적어도 50 mm 인 하나의 치수를 갖는, 상기 웨이퍼;

상기 웨이퍼 상의 p-n 결합;

상기 웨이퍼 표면의 부분 상의 반사 방지막;

후면 표면 필드와 패시베이팅층 중에서 선택되는 적어도 하나의 층; 및

상기 웨이퍼 상의 도전성 콘택들을 포함하는, 광전지.

청구항 9

삭제

청구항 10

삭제

청구항 11

삭제

청구항 12

삭제

청구항 13

삭제

청구항 14

삭제

청구항 15

삭제

청구항 16

삭제

청구항 17

삭제

청구항 18

삭제

청구항 19

삭제

청구항 20

삭제

청구항 21

삭제

청구항 22

삭제

청구항 23

삭제

명 세 서

기 술 분 야

[0001] **설명**

[0002] 본 발명은 Department of Energy (DOE) 에 의해 수여된, DOE 계약 제 DE-AC36-98GO10337 호의 National Renewable Energy Laboratory (NREL) 하도급 계약 제 ZDO-2-30628-03 호 하에서의 미국 정부 지원으로 행해 졌다. 미국 정부는 본 발명의 소정 권리를 갖는다.

[0003] **관련 출원들**

[0004] 본 출원은 2006 년 01 월 20 일자로 출원된 미국 가출원 제 60/760,453 호, 2006 년 05 월 30 일자로 출원된 미국 가출원 제 60/808,954 호, 2006 년 08 월 24 일자로 출원된 미국 가출원 제 60/839,672 호, 및 2006 년 08 월 24 일자로 출원된 미국 가출원 제 60/839,670 호로부터의 우선권 이익을 주장하며, 그들 전체로 본 명세서의 참조로서 명백하게 병합된다.

[0005] **기술 분야**

[0006] 본 발명은 일반적으로 광전 변환 공학 (Photovoltaics) 의 분야 및 광전 변환 소자 애플리케이션용 캐스트 실리콘을 제조하는 방법들 및 장치들에 관한 것이다. 또한, 본 발명은 광전지들 (photovoltaic cells) 과 같은 디바이스들 및 다른 반도체 디바이스들을 제조하는데 사용될 수 있는 캐스트 실리콘의 새로운 형태에 관한 것이다. 새로운 실리콘은 단결정 구조 (monocrystalline structure) 를 가질 수 있고, 캐스팅 프로세스에 의해 제조될 수 있다.

배 경 기 술

[0007] 광전지들은 광을 전류로 변환시킨다. 광전지에 대한 가장 중요한 척도 중 하나는 광 에너지를 전기 에너지로 변환 시의 그 효율이다. 광전지들이 다양한 반도체 재료들로부터 제조될 수 있으나, 합리적인 가격에서 쉽게 이용가능하기 때문에, 그리고 광전지 제조 시 사용하는 전기적 특성, 물리적 특성, 화학적 특성의 적절한 밸런스를 갖기 때문에 실리콘이 일반적으로 사용된다.

[0008] 광전지의 제조에 대해 공지된 절차에서, 실리콘 공급재료 (silicon feedstock) 는 포지티브 도전형 또는 네가티브 도전형 중 어느 하나를 유도하는 재료 (또는 도펀트) 와 혼합되고, 용융되고, 그 후 (초크랄스키 (CZ) 방법 또는 플로우 존 (FZ) 방법을 통해) 용융 영역 밖으로 결정화된 실리콘을 풀링 (pulling) 하여 단결정 실리콘의 잉곳들로 결정화되거나 개별 실리콘 그레인의 그레인 사이즈에 따라 다결정 실리콘 또는 폴리결정 실리콘의 블록들 또는 "브릭스들 (bricks)" 로의 캐스팅된다. 위에서 기술된 절차에서는, 공지된 슬라이싱 방법 또는 쏘잉 방법에 의해 얇은 기판들 (또는 웨이퍼로 불림) 로 잉곳 또는 블록들이 절단된다. 그 후, 이 웨이퍼들은 광전지들로 처리될 수도 있다.

[0009] 광전지의 제조 시 사용하는 단결정 실리콘은 일반적으로 CZ 또는 FZ 방법에 의해 생산되고, 양 방법은 결정 실리콘의 원통형으로 형상된 불 (boule) 을 생산하는 프로세스들이다. CZ 프로세스의 경우, 불은 용융된 실리콘 풀 (pool) 의 밖으로 천천히 풀링된다. FZ 프로세스의 경우, 고체 재료는 용융 영역을 통해 피딩되고 용융 영역의 다른 측에서 재응고된다. 이들 방식들로 제조되는 단결정 실리콘의 불은 불순물들, 및 산소-유도된 적층 결함들 (OSF) 및 침입형 또는 베이컨시 클러스터들의 "와류 (swirl)" 결함들과 같은 결함들의 방사상 분포를 포함한다. 이들 불순물들 및 결함들의 존재에도, 높은 효율의 태양 전지를 생산하는데 사용하기 때문에 일반적으로 단결정 실리콘은 광전지들을 생산하는 실리콘의 바람직한 소스이다. 그러나, 단결정 실리콘은 위에서 기술한 그것들과 같은 공지된 기술들을 이용하여 종래의 다결정 실리콘보다 생산하는데 비용이 더 든다.

[0010] 일반적으로, 캐스팅 프로세스에 의해 광전지들의 제조 시 사용하는 종래의 다결정 실리콘이 생산된다. 종래의 다결정 실리콘을 준비하는 캐스팅 프로세스들은 광 변환 기술의 당업자에게 공지되어 있다. 간단히 말해, 이러한 프로세스들에서는, 석영 도가니와 같은 도가니 내에 용융된 실리콘이 수용되고, 그 내에 수용된 실리콘의 결정화를 허용하는 제어된 방식으로 용융된 실리콘을 냉각시킨다. 일반적으로 광전지를 제조하는데 사용될 웨이퍼 사이즈와 동일하거나 거의 동일한 단면을 갖는 블럭들로 다결정 실리콘의 블록이 절단되고, 그 블럭스들은 이러한 웨이퍼들로 쏘우잉되거나 다르게 절단된다. 이러한 방식으로 생산된 다결정 실리콘은 만들어진 웨이퍼들 내의 서로 상대적인 그레인의 배향이 효율적으로 랜덤한 결정 그레인의 덩어리 (agglomeration) 이다.

[0011] 종래의 다결정 실리콘 (multi-crystalline silicon) 또는 폴리-결정 (poly-crystalline silicon) 실리콘 중 어느 하나의 그레인들의 랜덤 배향은 이렇게 만들어진 웨이퍼의 표면을 텍스처링 (texturing) 하는 것을 어렵게 만든다. 텍스처링은 광 반사를 감소시키고 셀 마다 표면을 통한 광 에너지 흡수를 개선시킴으로써 광전지의 효율성을 개선하는데 사용된다. 또한, 종래의 다결정 실리콘의 그레인들 간의 경계들에서 형성하는 "얽힘 (kinks)" 은 디스로케이션 (dislocations) 의 클러스터 형태나 선 형태로 구조적 결함들의 핵을 이루는 경향이 있다. 이들 디스로케이션들, 및 이들을 유도하는 경향이 있는 불순물들은 종래의 다결정 실리콘으로부터 만들어진 기능성 광전지 내의 전기적 전하 캐리어의 빠른 재결합을 야기하는 것으로 생각된다. 이것은 전지의 효율에서 감소를 일으킨다. 일반적으로, 이러한 다결정 실리콘에서 만들어진 광전지들은 공지된 기술들에

의해 생산된 단결정 실리콘에 존재하는 결함들의 방사상 분포를 고려한다고 하더라도 단결정 실리콘으로부터 만들어진 동등한 광전지들과 비교하여 보다 낮은 효율성을 갖는다. 그러나, 종래의 다결정 실리콘을 제조하는데 상대적으로 단순하고 낮은 비용뿐만 아니라 셀 프로세싱 내에 효율적인 결함 패시베이션 때문에, 다결정 실리콘은 광 전지들을 제조하는 실리콘의 형태로서 보다 광범위하게 사용된다.

[0012] 몇몇 기존 캐스팅 기술들은 결정 성장에 대해 "콜드-벽 (cold-wall)" 을 이용하는 것을 수용하였다. "콜드-벽" 이란 용어는 도가니의 벽들 상에 또는 내에 존재하는 유도 코일들을 수냉시키고, 슬룻팅 될 수도 있고, 이로써 일반적으로 100 ℃ 이하로 유지시키는 것을 의미한다. 도가니 벽들은 코일들 및 공급재료 간에 매우 근접하게 위치될 수도 있다. 도가니 벽의 재료는 특히 열적 절연되지 않고, 따라서 냉각된 코일과 열적 평형을 유지시킬 수 있다. 따라서, 도가니 내의 유도성 실리콘 가열이 흐름에 유도된 전류에 의해 직접적으로 실리콘을 가열하는 것을 의미하기 때문에, 실리콘의 가열은 도가니 벽들로부터 방사에 대해 의미되지 않는다.
이 방식에서는, 도가니의 벽들은 실리콘의 용융 온도 이하로 유지되고, 용융된 실리콘에 상대적으로 "콜드" 로서 고려된다. 유도성으로 가열된 용융된 실리콘의 고체화 동안, 도가니의 이들 콜드 벽들은 열 싱크로서 역할을 한다. 잉곳은 콜드 벽들로 방사에 의해 예정되어 빠르게 냉각한다. 따라서, 초기 고체화 전면은 수직적으로 및 기하학적으로 정렬된 프로세스 또는 실질적으로 평탄화 고체화 전면을 유지시키는 어떤 시도도 중단시켜, 잉곳 측들에서 그리고 잉곳 중앙을 향해 대각선 방향으로 발생하는 결정 핵생성을 갖고 실질적으로 빠르게 굽게 된다.

[0013] 상기의 관점에서, 광전지를 제조하는데 사용될 수 있는 실리콘의 개선된 형태에 대한 필요성이 있다. 또한, 단결정 실리콘을 생산하는데 이전까지 사용되었던 프로세스들보다 보다 빠르고 저렴한 프로세스에서 제조될 수 있는 실리콘에 대한 필요성이 있다. 본 발명은 이러한 실리콘 및 이러한 프로세스들을 제공한다.

발명의 내용

[0014] **발명의 개요**

[0015] 본 명세서에 사용되는 바와 같이, "단결정 실리콘 (monocrystalline silicon)" 이란 용어는 줄곧 하나의 일정한 결정 배향을 갖는 단일 결정 실리콘의 바디를 의미한다. 또한, 종래의 다결정 실리콘은 실리콘의 바디 내에 위치된 다수의 랜덤하게 배향되는 결정들을 갖고, cm-스케일 그레인 사이즈 분포를 갖는 결정 실리콘을 의미한다.

[0016] 또한, 본 명세서에서 사용되는 바와 같이, "폴리 결정 실리콘 (poly-crystalline silicon)" 이란 용어는 주어진 실리콘 바디 내에 위치되는 마이크론 차수의 그레인 사이즈 및 다수의 그레인 배열들을 갖는 결정 실리콘이다.
예를 들어, 그레인들은 통상 평균 약 서브마이크론 내지 서브밀리미터인 사이즈 (예를 들어, 개별 그레인은 육안으로 보이지 않을 수도 있다) 이고, 그레인 배열은 전역에 랜덤하게 분포된다.

[0017] 여전히 또한, 본 명세서에서 사용되는 바와 같이, "준-단결정 실리콘 (near-monocrystalline silicon)" 이란 용어는 전역에 걸쳐 하나의 일정한 결정 배향을 갖는 결정 실리콘의 바디가 그 바디의 체적 50% 보다 큰 경우를 의미하고, 여기서, 예를 들어, 이러한 준-단결정 실리콘은 다결정 영역에 인접한 단결정 실리콘의 바디를 포함할 수 있고, 또는 부분적으로나 전체적으로 다른 결정 배향들에 대해 보다 작은 실리콘 결정들을 포함하는 크고, 인접하게 일정한 실리콘의 결정을 포함할 수도 있고, 여기서 보다 작은 결정들은 전체 체적의 50% 를 초과하게 구성되지는 않는다. 바람직하게는, 준-단결정 실리콘은 전체 체적의 25% 를 초과하게 구성되지는 않는 보다 작은 결정들을 포함할 수 있다. 더욱 바람직하게는, 준-단결정 실리콘은 전체 체적의 10% 를 초과하게 구성되지는 않는 보다 작은 결정들을 포함할 수 있다. 또한 더욱 바람직하게는, 준-단결정 실리콘은 전체 체적의 5% 를 초과하게 구성되지는 않는 보다 작은 결정들을 포함할 수 있다.

[0018] 그러나, 본 명세서에서 사용되는 바와 같이, "기하학적으로 정렬된 다결정실리콘 (geometrically ordered multi-crystalline silicon)" (이하에서는 "기하학적 다결정 실리콘 (geometrical multi-crystalline silicon)" 으로 줄임) 이란 용어는 본 발명의 실시형태들에 따라, 실리콘의 바디 내에 위치된 다수의 정렬된 결정들을 갖고 기하학적으로 정렬된 cm-스케일 그레인 사이즈 분포를 갖는 결정 실리콘을 의미한다. 예를 들어, 기하학적 다결정 실리콘에서, 각 그레인은 미리 결정된 배향들에 따라 제어되는 기하학적 다결정 실리콘의 바디 내에 그레인 배향을 갖고, 통상 약 0.25 cm^2 내지 약 2,500 cm^2 사이즈인 평균 단면적 및 실리콘 바디만큼 클 수 있는, 예를 들어, 단면의 면에 수직인 실리콘의 바디의 치수만큼 클 수 있는 높이를 갖는다. 기하학적 다결정 실리콘의 그레인의 높이 또는 길이에 수직인 그레인의 단면의 형상은 통상 시드 결정의 형상 또는 형성된 시드 결정상의 부분과 동일하다. 바람직하게는, 그레인의 단면의 형상은 다각형이다. 바람직하게

는, 다각형 그레인의 코너들은 3 개의 상이한 그레인들의 접합들에 대응한다. 기하학적 다결정 실리콘의 바디 내에 각 그레인이 그 그레인의 전역에 걸쳐 하나의 인접하게 일정한 결정 배향을 갖는 실리콘을 포함하는 것이 바람직하지만, 하나 이상의 그레인들은 또한 상이한 배향의 보다 작은 실리콘 결정들의 작은 양을 포함할 수 있다. 예를 들어, 각각 이러한 그레인은 다른 결정 배열들인 보다 작은 실리콘 결정들을 부분적으로 또는 전체적으로 함유할 수 있고, 여기서, 이러한 보다 작은 결정은 그레인의 전체 체적의 25% 이하로 구성하고, 바람직하게는 그레인의 전체 체적의 10% 이하로 구성하고, 더욱 바람직하게는 그레인의 전체 체적의 5% 이하로 구성하고, 또한 더욱 바람직하게는 그레인의 전체 체적의 1% 이하로 구성하며, 또한 더욱 바람직하게는 그레인의 전체 체적의 0.1% 이하로 구성한다.

[0019] 구체화되고 폭넓게 기술되는 바와 같이 본 발명에 따르면, 적어도 실리콘의 용융 온도까지 가열된 하나 이상의 측벽들 및 냉각을 위한 적어도 하나의 벽을 갖는 용기 내에 적어도 하나의 실리콘 시드 결정과 접촉하게, 용융된 실리콘을 위치시키는 단계; 및 용융된 실리콘을 냉각시켜 결정화를 제어함으로써 단결정 실리콘을 포함하고, 선택적으로 각각 적어도 약 10 ㎝ 인 적어도 2 개의 치수들을 갖는 고형체를 형성하는 단계를 포함하고, 고형체를 형성하는 단계는 냉각을 위한 적어도 하나의 벽과 적어도 초기에 평행인 용융된 실리콘의 에지에서 고체-액체 계면을 형성하는 단계를 포함하고, 고체-액체 계면은 냉각 동안 용융된 실리콘과 냉각을 위한 적어도 하나의 벽 간의 거리를 증가시키는 방향으로 이동하도록 제어되는, 캐스트 실리콘 제조 방법을 제공한다. 도가니의 벽들 중 하나가 도가니의 저부일 수도 있음이 예기된다.

[0020] 또한, 본 발명의 일 실시형태에 따르면, 적어도 실리콘의 용융 온도까지 가열되는 하나 이상의 측벽 및 냉각을 위한 적어도 하나의 벽을 갖는 도가니 내의 적어도 하나의 표면상에 단결정 실리콘을 포함한 복수의 실리콘 시드 결정들의 기하학적 배열을 위치시키는 단계로서, 기하학적 배열은 밀집된 다각형들을 포함하는, 상기 기하학적 배열을 위치시키는 단계; 실리콘 시드 결정들의 기하학적 배열과 접촉하게 용융된 실리콘을 위치시키는 단계; 및 용융된 실리콘을 냉각시켜 결정화를 제어함으로써 단결정 실리콘을 포함하고, 선택적으로 각각 적어도 약 10 ㎝ 인 적어도 2 개의 치수들을 갖는 고형체를 형성하는 단계를 포함하고, 고형체를 형성하는 단계는 냉각을 위한 적어도 하나의 벽과 평행인 용융된 실리콘의 에지에서 고체-액체 계면을 형성하는 단계를 포함하고, 고체-액체 계면은 냉각 동안 용융된 실리콘과 냉각을 위한 적어도 하나의 벽 간의 거리를 증가시키는 방향으로 이동하도록 제어되는 캐스트 실리콘을 제조하는 방법을 제공한다.

[0021] 또한, 본 발명의 다른 실시형태에 따르면, 단결정 실리콘을 포함하는 복수의 실리콘 시드 결정들을 도가니의 적어도 2 개의 표면들 상에 미리 결정된 패턴으로 배열시키는 단계; 단결정 실리콘 시드 결정들과 접촉하게 용융된 실리콘을 위치시키는 단계; 및 도가니의 적어도 2 개의 표면들로부터 용융된 실리콘을 냉각시켜 결정화를 제어함으로써, 선택적으로 각각 적어도 약 10 ㎝ 인 적어도 2 개의 치수들을 갖는, 단결정 실리콘의 고형체를 형성하는 단계를 포함하고, 고형체를 형성하는 단계는 냉각 동안 용융된 실리콘과 도가니의 적어도 2 개의 표면들 간의 거리를 증가시키는 방향으로 이동하도록 용융된 실리콘의 에지에서 고체-액체 계면을 제어하는 단계를 포함하는 캐스트 실리콘을 제조하는 방법을 제공한다.

[0022] 또한, 본 발명의 또 다른 실시형태에 따르면, 적어도 하나의 표면상에 단결정 실리콘을 포함한 적어도 하나의 실리콘 시드 결정과 접촉하게 실리콘 공급재료를 위치시키는 단계; 실리콘 공급재료 및 적어도 하나의 실리콘 시드 결정을 실리콘의 용융 온도까지 가열하는 단계; 적어도 하나의 실리콘 시드 결정이 완전히 용융되지는 않도록 가열을 제어하는 단계로서, 도가니 내의 어딘가에서 실리콘의 용융 온도에 도달한 후, 도가니의 외부 표면에서 측정되는 경우, 약 0.1 ℃/분 이하인 ΔT 를 유지시키는 단계를 포함하는, 상기 가열을 제어하는 단계; 및 일단 적어도 하나의 실리콘 시드 결정이 부분적으로 용융되면, 실리콘을 냉각시켜 단결정 실리콘을 포함하는 고형체를 형성하는 단계를 포함하는 캐스트 실리콘을 제조하는 방법을 제공한다.

[0023] 또한, 본 발명의 또 다른 실시형태에 따르면, 도가니 내의 적어도 하나의 표면상에 단결정 실리콘을 포함하는 복수의 실리콘 시드 결정들의 기하학적 배열을 위치시키는 단계로서, 기하학적 배열은 밀집된 다각형들을 포함하는, 상기 기하학적 배열을 위치시키는 단계; 적어도 하나의 표면상에 복수의 실리콘 시드 결정들과 접촉하게 실리콘 공급재료를 위치시키는 단계; 실리콘 공급재료 및 복수의 실리콘 시드 결정들을 실리콘의 용융 온도까지 가열하는 단계; 복수의 실리콘 시드 결정들이 완전히 용융되지는 않도록 가열을 제어하는 단계로서, 도가니 내의 어딘가에서 실리콘의 용융 온도에 도달한 후, 도가니의 외부 표면에서 측정되는 경우, 약 0.1 ℃/분 이하인 ΔT 를 유지시키는 단계를 포함하는, 상기 가열을 제어하는 단계; 및 일단 적어도 하나의 실리콘 시드 결정이 부분적으로 용융되면, 실리콘을 냉각시켜 단결정 실리콘을 포함하는 고형체를 형성하는 단계를 포함하는 캐스트 실리콘을 제조하는 방법을 제공한다.

[0024] 또한, 본 발명의 다른 실시형태에 따르면, 단결정 실리콘을 포함하는 복수의 실리콘 시드 결정들을 도가니의 적어도 2 개의 표면들 상에 미리 결정된 패턴으로 배열시키는 단계; 적어도 2 개의 표면들 상에 복수의 실리콘 시드 결정들과 접촉하게 실리콘 공급재료를 위치시키는 단계; 실리콘 공급재료 및 복수의 단결정 실리콘 시드 결정들을 실리콘의 용융 온도까지 가열하는 단계; 복수의 실리콘 시드 결정들이 완전히 용융되지는 않도록 가열을 제어하는 단계로서, 도가니 내의 어딘가에서 실리콘의 용융 온도에 도달한 후, 도가니의 외부 표면에서 측정되는 경우, 약 0.1 ℃/분 이하인 ΔT 를 유지시키는 단계를 포함하는, 상기 가열을 제어하는 단계; 및 일단 적어도 하나의 단결정 실리콘 시드 결정이 부분적으로 용융되면, 실리콘을 냉각시켜 단결정 실리콘을 포함하는 고형체를 형성하는 단계를 포함하는 캐스트 실리콘을 제조하는 방법을 제공한다.

[0025] 또한, 본 발명의 일 실시형태에 따르면, 적어도 실리콘의 용융 온도까지 가열되는 하나 이상의 측벽들을 갖는 용기 내에 적어도 하나의 실리콘 시드 결정과 접촉하게 용융된 실리콘을 위치시키는 단계로서, 적어도 하나의 실리콘 시드 결정은 용기의 표면의 전체 또는 실질적으로 전체 면적을 피복하도록 배열되는, 상기 용융된 실리콘을 위치시키는 단계; 및 용융된 실리콘을 냉각시켜 결정화를 제어함으로써 단결정 실리콘을 포함하고, 선택적으로 각각 적어도 약 10 cm 인 적어도 2 개의 치수들을 갖는 고형체를 형성하는 단계를 포함하는 캐스트 실리콘을 제조하는 방법을 제공한다.

[0026] 또한, 본 발명의 일 실시형태에 따르면, 방사상으로 분포된 불순물들 및 결함들이 없거나 실질적으로 없고, 각각 적어도 약 25 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 약 20 cm 인 제 3 치수를 갖는 연속 단결정 실리콘의 바디를 제공한다.

[0027] 또한, 본 발명의 또 다른 실시형태에 따르면, 약 2×10^{16} 원자/cm^3 내지 약 5×10^{17} 원자/cm^3 인 탄소 농도, 5×10^{17} 원자/cm^3 이하인 산소 농도, 적어도 1×10^{15} 원자/cm^3 인 질소 농도를 갖고, 각각 적어도 약 25 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 약 20 cm 인 제 3 치수를 갖는 연속 단결정 실리콘의 바디를 제공한다.

[0028] 또한, 본 발명의 또 다른 실시형태에 따르면, 각각 적어도 약 35 cm 인 적어도 2 개의 치수들을 갖는 연속 캐스트 단결정 실리콘의 바디를 제공한다.

[0029] 또한, 본 발명의 다른 실시형태에 따르면, 방사상으로 분포된 불순물들 및 결함들이 없거나 실질적으로 없고, 각각 적어도 약 25 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 약 20 cm 인 제 3 치수를 갖는 연속 단결정 실리콘의 바디로부터 형성된 웨이퍼; 웨이퍼 내의 p-n 접합; 선택적인 웨이퍼의 표면상에 반사방지막; 선택적인 후면 표면 필드와 패시베이팅층중에서 선택되는 적어도 하나의 층; 및 웨이퍼 상의 도전성 콘택들을 포함하는 태양 전지를 제공한다.

[0030] 또한, 본 발명의 다른 실시형태에 따르면, 각각 적어도 약 35 cm 인 적어도 2 개의 치수들을 갖는 연속 캐스트 단결정 실리콘의 바디로부터 형성된 웨이퍼; 웨이퍼 내의 p-n 접합; 선택적인 웨이퍼의 표면상의 반사방지막; 선택적인 후면 표면 필드와 패시베이팅층중에서 선택되는 적어도 하나의 층; 및 웨이퍼 상에 도전성 콘택들을 포함하는 태양 전지를 제공한다.

[0031] 또한, 본 발명의 다른 실시형태에 따르면, 연속 캐스트 단결정 실리콘의 바디로부터 형성된 연속 단결정 실리콘 웨이퍼로서, 연속 단결정 실리콘 웨이퍼는 적어도 약 50 cm 인 적어도 하나의 치수를 갖고, 연속 캐스트 단결정 실리콘의 바디는 각각 적어도 약 25 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 약 20 cm 인 제 3 치수를 갖는, 상기 연속 단결정 실리콘 웨이퍼; 단결정 실리콘 웨이퍼 내의 p-n 접합; 단결정 실리콘 웨이퍼의 표면상의 선택적 반사방지막; 선택적으로 후면 표면 필드와 패시베이팅층으로부터 선택되는 적어도 하나의 층; 및 단결정 실리콘 웨이퍼 상에 도전성 콘택들을 포함하는 태양 전지를 제공한다.

[0032] 또한, 본 발명의 다른 실시형태에 따르면, 방사상으로 분포된 불순물들 및 결함들이 없거나 실질적으로 없고, 각각 적어도 약 25 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 약 20 cm 인 제 3 치수를 갖는, 연속 단결정 실리콘의 바디로부터 형성되는 실리콘을 포함하는 웨이퍼를 제공한다.

[0033] 또한, 본 발명의 다른 실시형태에 따르면, 연속 캐스트 단결정 실리콘의 바디로부터 형성된 실리콘을 포함하는 웨이퍼로서, 웨이퍼는 적어도 약 50 cm 인 적어도 하나의 치수를 갖고, 연속 캐스트 단결정 실리콘의 바디는 각각 적어도 약 25 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 약 20 cm 인 제 3 치수를 갖는 웨이퍼를 제공한다.

[0034] 또한, 본 발명의 다른 실시형태에 따르면, 적어도 실리콘의 용융 온도까지 가열되는 하나 이상의 측벽들 및 냉각을 위한 적어도 하나의 벽을 갖는 용기 내에 적어도 하나의 실리콘 시드 결정과 접촉하게 용융된 실리콘을 위치시키는 단계; 및 용융된 실리콘을 냉각시켜 결정화를 제어함으로써, 선택적으로 각각 적어도 약 10 cm 인 적

어도 2 개의 치수들을 갖는, 준-단결정 실리콘의 고형체를 형성하는 단계를 포함하고, 고형체를 형성하는 단계는 냉각을 위한 적어도 하나의 벽과 적어도 초기에 평행인 용융된 실리콘의 에지에서 고체-액체 계면을 형성하는 단계를 포함하고, 고체-액체 계면은 냉각 동안 용융된 실리콘과 냉각을 위한 적어도 하나의 벽 간의 거리를 증가시키는 방향으로 이동하도록 제어되는 캐스트 실리콘을 제조하는 방법을 제공한다.

[0035] 또한, 본 발명의 다른 실시형태에 따르면, 적어도 실리콘의 용융 온도까지 가열되는 하나 이상의 측벽들을 갖는 용기 내에 적어도 하나의 실리콘 시드 결정과 접촉하게 용융된 실리콘을 위치시키는 단계로서, 적어도 하나의 실리콘 시드 결정은 용기의 표면의 전체 또는 실질적으로 전체 면적을 피복하도록 배열되는, 상기 용융된 실리콘을 위치시키는 단계; 및 용융된 실리콘을 냉각시켜 결정화를 제어함으로써, 선택적으로 각각 적어도 약 10 cm 인 적어도 2개의 치수들을 갖는, 준-단결정 실리콘의 고형체를 형성하는 단계를 포함하는 캐스트 실리콘을 제조하는 방법을 제공한다.

[0036] 또한, 본 발명의 다른 실시형태에 따르면, 방사상으로 분포된 불순물들 및 결함들이 없거나 실질적으로 없고, 각각 적어도 약 25 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 약 20 cm 인 제 3 치수를 갖는 준-단결정 실리콘의 바디를 제공한다.

[0037] 또한, 본 발명의 다른 실시형태에 따르면, 약 2×10^{16} 원자/cm^3 내지 약 5×10^{17} 원자/cm^3 인 탄소 농도, 5×10^{17} 원자/cm^3 이하인 산소 농도, 적어도 1×10^{15} 원자/cm^3 인 질소 농도를 갖고, 각각 적어도 약 25 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 약 20 cm 인 제 3 치수를 갖는 준-단결정 실리콘의 바디를 제공한다.

[0038] 또한, 본 발명의 다른 실시형태에 따르면, 각각 적어도 약 35 cm 인 적어도 2 개의 치수들을 갖는 연속 캐스트 준-단결정 실리콘의 바디를 제공한다.

[0039] 또한, 본 발명의 다른 실시형태에 따르면, 방사상으로 분포된 불순물들 및 결함들이 없거나 실질적으로 없고, 각각 적어도 약 25 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 약 20 cm 인 제 3 치수를 갖는, 준-단결정질 실리콘의 바디로부터 형성된 웨이퍼; 웨이퍼 내의 p-n 접합; 선택적인 웨이퍼의 표면 상의 반사방지막; 선택적으로 후면 표면 필드와 패시베이팅층중에서 선택되는 적어도 하나의 층; 및 웨이퍼 상에 도전성 콘택들을 포함하는 태양 전지를 제공한다.

[0040] 또한, 본 발명의 다른 실시형태에 따르면, 각각 적어도 약 35 cm 인 적어도 2 개의 치수들을 갖는 캐스트 준-단결정 실리콘의 바디로부터 형성된 웨이퍼; 웨이퍼 내의 p-n 접합; 선택적인 웨이퍼의 표면상의 반사방지막; 선택적인 후면 표면 필드와 패시베이팅층중에서 선택되는 적어도 하나의 층; 및 웨이퍼 상에 도전성 콘택들을 포함하는 태양 전지를 제공한다.

[0041] 또한, 본 발명의 다른 실시형태에 따르면, 방사상으로 분포된 불순물들 및 결함들이 없거나 실질적으로 없고, 각각 적어도 약 25 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 약 20 cm 인 제 3 치수를 갖는 준-단결정 실리콘의 바디로부터 형성된 실리콘을 포함하는 웨이퍼를 제공한다.

[0042] 또한, 본 발명의 다른 실시형태에 따르면, 캐스트 준-단결정 실리콘의 바디로부터 형성된 실리콘을 포함하는 웨이퍼로서, 상기 웨이퍼는 적어도 약 50 cm 인 적어도 하나의 치수를 갖고, 상기 준-단결정 실리콘의 바디는 각각 약 25 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 약 20 cm 인 제 3 치수를 갖는 웨이퍼를 제공한다.

[0043] 또한, 본 발명의 또 다른 실시형태에 따르면, 방사상으로 분포된 결함들이 실질적으로 없고, 각각 적어도 약 25 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 약 20 cm 인 제 3 치수를 갖는 연속 단결정 실리콘의 바디로부터 슬라이싱된 웨이퍼; 웨이퍼 내의 p-n 접합; 웨이퍼의 표면상에 선택적 반사방지막; 선택적인 후면 표면 필드; 선택적인 하나 이상의 패시베이팅층들; 및 웨이퍼의 적어도 일 표면상에 복수의 도전성 콘택들을 포함하는 태양 전지를 제공한다.

[0044] 또한, 본 발명의 또 다른 실시형태에 따르면, 방사상으로 분포된 결함들이 실질적으로 없고, 각각 적어도 약 35 cm 인 적어도 2 개의 치수들을 갖는 연속 캐스트 단결정 실리콘의 바디로부터 슬라이싱된 웨이퍼; 웨이퍼 내의 p-n 접합; 선택적인 웨이퍼의 표면상에 반사방지막; 선택적인 후면 표면 필드; 선택적인 하나 이상의 패시베이팅층들; 및 웨이퍼의 적어도 일 표면상에 복수의 도전성 콘택들을 포함하는 태양 전지를 제공한다.

[0045] 또한, 본 발명의 다른 실시형태에 따르면, 방사상으로 분포된 결함들이 실질적으로 없는, 연속 단결정 실리콘의 바디로부터 슬라이싱된 연속 단결정 실리콘 웨이퍼로서, 단결정 실리콘 웨이퍼는 적어도 약 40 mm 인 적어도 하나의 치수를 갖고, 단결정 실리콘의 바디는 각각 적어도 약 25 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 약 20 cm

인 제 3 치수를 갖는, 단결정 실리콘 웨이퍼; 웨이퍼 내의 p-n 접합; 선택적인 웨이퍼의 표면상의 반사방지막; 선택적인 후면 표면 필드; 선택적인 하나 이상의 패시베이팅층들; 및 웨이퍼의 적어도 하나의 표면상에 복수의 도전성 콘택들을 포함하는 태양 전지를 제공한다.

[0046] 또한, 본 발명의 다른 실시형태에 따르면, 본 발명에 따라 만든 준-단결정 실리콘은 다른 결정 배향들인 보다 작은 결정의 체적에서 5% 까지 포함할 수 있다. 바람직하게는, 본 발명의 다른 실시형태에 따르면, 본 발명에 따라 만든 준-단결정 실리콘은 다른 결정 배향들인 보다 작은 결정의 체적에서 1% 까지 포함할 수 있다. 또한 더 바람직하게는, 본 발명의 다른 실시형태에 따르면, 본 발명에 따라 만든 준-단결정 실리콘은 다른 결정 배향들인 보다 작은 결정의 체적에서 0.1% 까지 포함할 수 있다.

[0047] 본 발명의 추가적 특징 및 장점은 다음의 설명에 개시되며, 본 발명의 ㅅ시실시형태들의 설명으로부터 명백하거나 그들의 실행에 의해 습득된다. 본 발명의 특징들 및 다른 이점들은 기술된 설명 및 청구범위뿐만 아니라 도면에 의해 특히 가리켜진 반도체 디바이스 구성들과 제조 방법 및 제조 장치에 의해 실현되고 달성된다.

[0048] 상기 일반적 설명 및 후속 상세한 설명 모두는 예시적이고 설명적이며, 청구되는 바와 같은 발명의 추가적 설명을 제공하도록 의도된다. 또한, 본 발명은 본 명세서에서 기술되고 청구된 방법들에 의해 만든 실리콘, 이러한 실리콘으로부터 만든 웨이퍼들 및 태양 전지들을 포함한다.

도면의 간단한 설명

[0049] 본 명세서에 병합되고 본 명세서의 일부로 구성하는 첨부된 도면은 발명의 실시형태들을 설명하고, 상세한 설명과 함께 본 발명의 특징, 이점, 및 원리를 설명하는데 제공된다. 도면에서:

도 1 은 본 발명의 일 실시형태에 따라, 도가니의 저부 표면상에 실리콘 시드들의 예시적인 배열을 도시한다;

도 2 는 본 발명의 일 실시형태에 따라, 도가니의 저부 및 측부 표면들 상에 실리콘 시드들의 다른 예시적 배열을 도시한다;

도 3a 내지 도 3c 는 본 발명의 일 실시형태에 따라, 도가니 내의 기하학적으로 정렬된 다결정 실리콘을 캐스팅하는 타일링 (tiling) 의 일 실시예를 도시한다;

도 4 는 본 발명의 일 실시형태에 따라, 도가니 내의 기하학적으로 정렬된 다결정 실리콘을 캐스팅하는 타일링의 다른 실시예를 도시한다;

도 5 는 본 발명의 일 실시형태에 따라, 6 각형 시드 타일들의 밀집된 어레이의 일 실시예를 도시한다;

도 6 은 본 발명의 일 실시형태에 따라, 장사방형 간극들 (rhomboid interstices) 이나 삼각형 간극들 (triangular interstices) 을 갖는 다각형 형상들의 예시적 어레이를 도시한다;

도 7 은 본 발명의 일 실시형태에 따라, 예시적 방법을 나타낸다;

도 8a 내지 도 8g 및 도 9 는 본 발명의 일 실시형태에 따라, 단결정 실리콘 또는 기하학적으로 정렬된 다결정 실리콘에 대한 예시적 캐스팅 프로세스들을 도시한다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0050] 이하에서는 본 발명의 실시형태들에 대해 언급하고, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 실시예들을 서술한다. 가능한 어떤 경우든, 동일 또는 유사한 참조 번호들은 도면의 전체에 걸쳐 동일 또는 유사 부분들을 참조하는데 사용된다.

[0051] 본 발명에 따른 실시형태들에서는, 하나 이상의 시드 결정들을 이용한 캐스팅 프로세스들에 의해 용융된 실리콘의 결정화를 수행한다. 본 명세서에서 개시되는 바와 같이, 이러한 캐스팅 프로세스들은 결정화된 실리콘의 캐스트 바디 내의 결정 그레인 (crystal grains) 의 사이즈, 형상, 및 배향을 제어하도록 구현될 수도 있다. 본 명세서에서 사용되는 바와 같이, "캐스트 (cast)" 란 용어는 용융된 실리콘을 유지하는데 사용되는 몰드 또는 용기 내에 용융된 실리콘을 냉각시켜 실리콘을 형성하는 것을 의미한다. 용융된 실리콘과 같은 액체는 그것이 위치되는 용기의 형상을 취하기 때문에, 본 명세서에서는 몰드 또는 용기뿐만 아니라 임의의 수단에 의해 용융된 실리콘을 한정하면서 용융된 실리콘의 냉각을 달성할 수도 있음이 또한 예기된다. 예로서, 도가니 내의 고체화에 의해 실리콘을 형성할 수 있고, 여기서 고체화는 용융물로 도입되는 냉각된 외부 물체를 통하지 않고, 도가니의 적어도 하나의 벽에서 개시된다. 도가니는 컵, 원통, 또는 박스와 같은 임의의 적합한

형상을 가질 수도 있다. 따라서, 본 발명에 따른 용융된 실리콘의 결정화 프로세스는 불 (boule) 또는 리본을 "풀링 (pulling)" 하는 것에 의해 제어되지 않는다. 또한, 본 발명의 일 실시형태에 따르면, 몰드, 용기, 또는 도가니는 용융된 실리콘과 접촉하는 적어도 하나의 "핫 측벽 (hot side wall)" 표면을 포함한다. 본 명세서에서 사용되는 바와 같이, "핫 측벽" 이란 용어는 접촉하는 용융된 실리콘과 등온 또는 고온인 표면을 의미한다. 바람직하게는, 핫 측벽 표면은 실리콘의 프로세싱 동안 고정된 상태로 남는다.

[0052] 본 발명의 실시형태들에 따르면, 결정화된 실리콘은 연속 단결정 실리콘 (continuous monocrystalline silicon), 준-단결정 실리콘 (near-monocrystalline silicon), 또는 제어된 그레인 배향들 (grain orientations) 을 갖는 연속 기하학적 다결정 실리콘 (continuous geometric multi-crystalline silicon) 중 어느 하나일 수 있다. 본 명세서에서 사용되는 바와 같이, "연속 단결정 실리콘" 이란 용어는 단일 결정 실리콘을 의미하고, 여기서 실리콘의 바디는 단결정 실리콘의 하나의 균질체 (homogeneous body) 이고 보다 큰 실리콘 조각을 형성하기 위해 보다 작은 실리콘 조각들이 함께 결합된 것이 아니다. 또한, 본 명세서에서 사용되는 바와 같이, "연속 기하학적 다결정 실리콘" 이란 용어는 기하학적 다결정 실리콘을 의미하고, 여기서 실리콘의 바디는 기하학적 다결정 실리콘의 하나의 균질체이고 보다 큰 실리콘 조각을 형성하기 위해 보다 작은 실리콘 조각들이 함께 결합된 것이 아니다.

[0053] 본 발명의 실시형태들에 따르면, 결정화는 예를 들어, 용융된 실리콘을 수용할 수 있는 석영 도가니와 같은 용기의 바닥에 결정 실리콘 "시드 (seeds)" 의 원하는 콜렉션을 위치시킴으로써 달성될 수 있다. 본 명세서에 사용되는 바와 같이, "시드" 란 용어는 원하는 결정 구조를 갖는 바람직한 기하학적으로 형상된 실리콘 조각을 의미하고, 여기서 적어도 하나의 단면은 위치될 수도 있는 용기의 표면과 일치하는 일 측을 갖는 기하학적 형상, 바람직하게는 다각형 형상을 갖는다. 이러한 시드는 실리콘의 단결정 조각이나 기하학적으로 정렬된 다결정 실리콘의 조각 중 어느 하나이고, 예를 들어, 단결정 실리콘의 잉곳에서 절단되거나 다르게 획득된 슬라브 (slab) 또는 수평 섹션일 수 있다. 본 발명에 따르면, 시드는 반드시 그런 경우는 아니지만, 자신의 저부 표면과 평행인 상부 표면을 가질 수도 있다. 예를 들어, 시드는 약 2 ㎜ 내지 약 3000 ㎜ 지름인 사이즈로 변화하는 실리콘 조각일 수 있다. 예를 들어, 시드는 약 10 ㎜ 내지 300 ㎜ 지름일 수 있다. 실리콘 부분은 약 1 ㎜ 내지 약 1000 ㎜, 바람직하게 약 5 ㎜ 내지 약 50 ㎜ 인 두께를 가질 수도 있다. 편리와 타일링 (tiling) 을 위해 시드의 적합한 사이즈 및 형상을 선택할 수도 있다. 이하에서 보다 상세하게 기술되는 타일링은 실리콘 시드 결정들이 예를 들어, 도가니의 저부 또는 하나 이상의 도가니의 측면들 및 저부 표면들에 걸쳐 미리 결정된 기하학적 배향 또는 패턴으로 배열되는 곳이다. 시드 또는 시드들이 자신이 위치되는 곳에 인접한 전체 도가니 표면을 피복하여 시드들로부터 멀어지게 시딩된 결정 성장 고체화 전면을 이동시킬 때, 도가니 단면의 전체 사이즈는 일정한 기하학적 결정으로서 유지될 수 있다.

[0054] 그 후, 용융된 실리콘의 결정화가 고형의 시드들의 원래 상부 레벨 이하에서 시작하여 시드들로부터 멀어지게, 바람직하게는 상향으로 진행하도록 용융된 실리콘의 냉각이 행해지는 바람직한 방식으로 시드들의 존재하에서 용융된 실리콘은 냉각 및 결정화하게 된다. 바람직하게는, 용융된 실리콘의 에지에서의 고체-액체 계면은 초기에 캐스팅되는 도가니 내의 표면과 같은 용기의 냉각 표면과 일치한다. 본 발명의 실시형태들에 따르면, 용융된 실리콘과 결정화된 실리콘 간의 액체-고체 계면은 캐스팅 프로세스의 일부, 예를 들어, 고체화 단계의 개시 부분이나 캐스팅 프로세스의 전부 동안 실질적으로 평탄하게 유지될 수 있다. 본 발명의 일 실시형태에서는, 실질적으로 평탄한 고체-액체 계면을 바람직하게 유지하면서 용융된 실리콘과 도가니의 냉각된 표면 간의 거리를 증가하는 방향으로 이동하도록 냉각 동안 용융된 실리콘의 각각의 에지들에서 고체-액체 계면을 제어한다.

[0055] 따라서, 본 발명에 따르면, 고체화 전면은 용기의 냉각된 표면의 형상과 평행할 수도 있다. 예를 들어, 저부가 평탄한 도가니의 경우, 고체화 전면은 제어된 프로파일을 갖는 고체-액체 계면으로 실질적으로 평탄하게 남을 수도 있다. 고체-액체 계면은 에지에서 중심으로 이동함에 따라 자신의 곡률 반지름이 감소하게 제어될 수 있다. 대신에, 고체-액체 계면은 용기 폭의 적어도 절반인 평균 곡률 반지름을 유지하도록 제어될 수 있다. 또한, 고체-액체 계면은 용기 폭의 적어도 2 배인 평균 곡률 반지름을 유지하도록 제어될 수 있다. 고체는 용기 폭의 적어도 약 4 배인 곡률 반지름을 갖는 다소 볼록한 계면을 가질 수 있다. 예를 들어, 고체-액체 계면은 0.7 m 정방형 도가니에서 2 m 보다 일반적으로 크고, 도가니의 수평 치수의 2 배를 초과하며, 바람직하게는 도가니의 수평 치수의 약 8 배 내지 16 배인 곡률 반지름을 가질 수 있다.

[0056] 본 발명의 실시형태에 따르면, 캐스팅되는 것이 바람직하고, 각각 적어도 약 20 ㎝, 예를 들어, 일변이 적어도 약 20 ㎝ 인 적어도 2 개의 치수들과 적어도 약 10 ㎝ 인 제 3 치수를 갖는, 단결정 실리콘, 또는 준-단결정 실리콘의 고형체를 형성할 수 있다. 바람직하게는, 캐스팅되는 것이 바람직하고, 각각 적어도 약 30 ㎝, 예를

들어, 일변이 적어도 약 30 cm 인 적어도 2 개의 치수들과 적어도 약 10 cm 인 제 3 치수를 갖는, 단결정 실리콘, 또는 준-단결정 실리콘의 고형체를 형성할 수 있다. 더욱 바람직하게는, 캐스팅되는 것이 바람직하고, 각각 적어도 약 35 cm, 예를 들어, 일변이 적어도 약 35 cm 인 적어도 2 개의 치수들과 적어도 약 10 cm 인 제 3 치수를 갖는, 단결정 실리콘, 또는 준-단결정 실리콘의 고형체를 형성할 수 있다. 또한 더욱 바람직하게는, 캐스팅되는 것이 바람직하고, 각각 적어도 약 40 cm, 예를 들어, 일변이 적어도 약 40 cm 인 적어도 2 개의 치수들과 적어도 약 20 cm 인 제 3 치수를 갖는, 단결정 실리콘, 또는 준-단결정 실리콘의 고형체를 형성할 수 있다. 또한 더욱 바람직하게는, 캐스팅되는 것이 바람직하고, 각각 적어도 약 50 cm, 예를 들어, 일변이 적어도 약 50 cm 인 적어도 2 개의 치수들과 적어도 약 20 cm 인 제 3 치수를 갖는, 단결정 실리콘, 또는 준-단결정 실리콘의 고형체를 형성할 수 있다. 또한 더욱 바람직하게는, 캐스팅되는 것이 바람직하고, 각각 적어도 약 60 cm, 예를 들어, 일변이 적어도 약 60 cm 인 적어도 2 개의 치수들과 적어도 약 20 cm 인 제 3 치수를 갖는, 단결정 실리콘, 또는 준-단결정 실리콘의 고형체를 형성할 수 있다. 또한 더욱 바람직하게, 캐스팅되는 것이 바람직하고, 각각 적어도 약 70 cm, 예를 들어, 일변이 적어도 약 70 cm 인 적어도 2 개의 치수들과 적어도 약 20 cm 인 제 3 치수를 갖는, 단결정 실리콘, 또는 준-단결정 실리콘의 고형체를 형성할 수 있다. 본 발명의 실시형태들에 따르면, 방사상으로 분포된 결함들 및/또는 불순물들이 없거나 실질적으로 없고, 바람직하게는 각각 적어도 약 20 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 약 10 cm 인 제 3 치수를 갖는 연속 단결정 실리콘, 또는 준-단결정 실리콘의 바디를 형성할 수 있다. 바람직하게는, 방사상으로 분포된 결함들 및/또는 불순물들이 없거나 실질적으로 없고, 바람직하게는 각각 적어도 약 30 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 약 10 cm 인 제 3 치수를 갖는 연속 단결정 실리콘, 또는 준-단결정 실리콘의 바디를 형성할 수 있다. 더욱 바람직하게는, 방사상으로 분포된 결함들 및/또는 불순물들이 없거나 실질적으로 없고, 바람직하게는 각각 적어도 약 35 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 약 10 cm 인 제 3 치수를 갖는 연속 단결정 실리콘, 또는 준-단결정 실리콘의 바디를 형성할 수 있다. 또한 더욱 바람직하게는, 방사상으로 분포된 결함들 및/또는 불순물들이 없거나 실질적으로 없고, 바람직하게는 각각 적어도 약 40 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 약 20 cm 인 제 3 치수를 갖는 연속 단결정 실리콘, 또는 준-단결정 실리콘의 바디를 형성할 수 있다. 또한 더욱 바람직하게는, 방사상으로 분포된 결함들 및/또는 불순물들이 없거나 실질적으로 없고, 바람직하게는 각각 적어도 약 50 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 약 20 cm 인 제 3 치수를 갖는 연속 단결정 실리콘, 또는 준-단결정 실리콘의 바디를 형성할 수 있다. 또한 더욱 바람직하게는, 방사상으로 분포된 결함들 및/또는 불순물들이 없거나 실질적으로 없고, 바람직하게는 각각 적어도 약 60 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 약 20 cm 인 제 3 치수를 갖는 연속 단결정 실리콘, 또는 준-단결정 실리콘의 바디를 형성할 수 있다. 또한 더욱 바람직하게는, 방사상으로 분포된 결함들 및/또는 불순물들이 없거나 실질적으로 없고, 바람직하게는 각각 적어도 약 70 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 약 20 cm 인 제 3 치수를 갖는 연속 단결정 실리콘, 또는 준-단결정 실리콘의 바디를 형성할 수 있다.

[0057] 본 발명의 실시형태들에 따라 만든 캐스트 실리콘의 잉곳의 수평 사이즈의 상한은 발명된 방법 자체에 의해서가 아니라 캐스팅 및 도가니 만드는 기술에 의해서만 결정된다. 본 발명에 따라, 적어도 1 m^2 및 4-8 m^2 까지인 단면의 면적을 갖는 잉곳들을 제조할 수 있다. 유사하게, 잉곳의 높이의 상한은 캐스팅 프로세스의 펀더멘털들 (fundamentals) 과 관련되는 것이 아니라 보다 긴 사이클 시간들에 관련될 수 있다. 약 50 cm 내지 약 80 cm 까지의 잉곳 높이가 가능하다. 따라서, 본 발명에 따르면, 연속 단결정 실리콘, 또는 준-단결정 실리콘의 바디는, 연속 단결정 실리콘의 장방형 고체 조각이 적어도 33,750 cm^3 의 체적을 가지면서 약 66 cm × 66 cm 인 단면까지 성공적으로 성장될 수 있다. 또한, 본 발명에 따르면, 캐스트 연속 단결정 실리콘, 또는 준-단결정 실리콘의 고형체는 바람직하게 각각 캐스팅 용기의 내부 치수들만큼 큰 적어도 2 개의 치수들 및 잉곳의 높이와 같은 제 3 치수를 가지고 형성될 수 있다. 예를 들어, 단결정 실리콘의 캐스트 바디가 정육면체-형상 또는 장방형-형상 고체이면, 위의 이들 치수들은 이러한 바디들의 길이, 폭, 및 높이로 불린다.

[0058] 유사하게는, 바람직하게 각각 적어도 약 10 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 약 5 cm 인 제 3 치수를 갖는 캐스트 기하학적 다결정 실리콘의 고형체를 형성할 수 있다. 바람직하게는, 각각 적어도 약 20 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 약 5 cm 인 제 3 치수를 갖는 캐스트 기하학적 다결정 실리콘의 고형체를 형성할 수 있다. 더욱 바람직하게는, 각각 적어도 약 30 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 약 5 cm 인 제 3 치수를 갖는 캐스트 기하학적 다결정 실리콘의 고형체를 형성할 수 있다. 또한 더욱 바람직하게는, 각각 적어도 약 35 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 약 5 cm 인 제 3 치수를 갖는 캐스트 기하학적 다결정 실리콘의 고형체를 형성할 수 있다. 또한 더욱 바람직하게는, 각각 적어도 약 40 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 약 5 cm 인 제 3 치수를 갖는 캐스트 기하학적 다결정 실리콘의 고형체를 형성할 수 있다. 또한

더욱 바람직하게는, 각각 적어도 약 50 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 약 5 cm 인 제 3 치수를 갖는 캐스트 기하학적 다결정 실리콘의 고형체를 형성할 수 있다. 또한 더욱 바람직하게는, 각각 적어도 약 60 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 약 5 cm 인 제 3 치수를 갖는 캐스트 기하학적 다결정 실리콘의 고형체를 형성할 수 있다. 또한 더욱 바람직하게는, 각각 적어도 약 70 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 약 5 cm 인 제 3 치수를 갖는 캐스트 기하학적 다결정 실리콘의 고형체를 형성할 수 있다. 따라서, 본 발명에 따르면, 연속 기하학적 다결정 실리콘의 바디는, 연속 기하학적 다결정 실리콘의 장방형 고체 조각이 적어도 33,750 cm^3 의 체적을 가지면서 약 66 cm × 66 cm 인 단면까지 성공적으로 성장될 수 있다. 또한, 본 발명에 따르면, 캐스트 기하학적 다결정 실리콘의 고형체는 바람직하게 각각 캐스팅 용기의 내부 치수들만큼 큰 적어도 2 개의 치수들을 가지고 형성될 수 있다. 예를 들어, 기하학적 다결정 실리콘의 캐스트 바디가 정육면체-형상 또는 장방형-형상 고체이면, 위의 이들 치수들은 이러한 바디들의 길이, 폭, 및 높이로 불린다.

[0059] 본 발명의 실시형태들에 따른 방식으로 용융된 실리콘의 결정화를 수행함으로써, 랜덤 그레인보다 오히려 특정 그레인 경계들 및 특정 그레인 사이즈를 갖는 캐스트 실리콘을 만들 수 있다. 또한, 모든 씨드들이 서로 상대적으로 동일한 방향, 예를 들어, 도가니의 저부와 수직인 (100) 극 방향 및 장방형 또는 정방형 단면 도가니의 측면들 중 하나에 평행인 (110) 극 방향에 배향되는 방식으로 시드(들)을 정렬함으로써, 이러한 캐스트 실리콘의 극 방향이 시드의 극 방향과 동일한 단결정 실리콘이나 이에 가까운 캐스트 실리콘의 큰 바디들을 획득할 수 있다. 유사하게, 다른 극 방향들은 도가니의 저부와 수직일 수도 있다. 또한, 본 발명의 일 실시형태에 따르면, 시드(들)는 임의의 공통 극 방향이 도가니의 저부와 수직하도록 배열될 수도 있다.

[0060] 용융된 실리콘의 풀 (pool) 로부터 원통형으로 형상된 불 (boule) 을 풀링하는 종래의 방법, 예를 들어 CZ 또는 FZ 방법들에 의해 단결정 실리콘을 만드는 경우, 획득된 단결정 실리콘은 (베이컨시들 (vacancies) 및 자기-침입형 원자들 (self-interstitial atoms) 과 같은 고유의 결함들로부터 형성된) 와류 결함들 및 OSF 링 결함들과 같은, 방사상으로 분포된 불순물들 및 결함들을 함유한다. 와류 결함들은 싱귤라 형태 또는 클러스터링된 형태 중 어느 하나의 형태인 침입형의 실리콘 원자들 또는 베이컨시들이다. 이러한 와류 결함들은 x-선 토포그라피 (x-ray topography) 에 의해 검출되고 실리콘 내에 "와류" 로서 나타날 수 있다. 또한, 검출 묘사를 위한 실리콘에 대해 선택적 산 에칭 (preferential acid etching) 후에 와류 결함들이 검출될 수 있다.

[0061] 종래의 CZ 또는 FZ 방법들에 따르면, 실리콘 내의 산소 원자들의 분포 및 이러한 산소 원자들에 의해 야기된 실리콘 내의 결함들은 방사상으로 위치된다. 이것은 결함들이 중심 축에 대해 대칭적인 링들, 나선들 또는 스트라이에이션들 (striations) 로 배열되는 경향이 있음을 의미한다. OSF 링 결함은 나노미터-스케일의 산소 침전물들이 풀링된 단결정 실리콘 잉곳 또는 실리콘 불 내에 원통형 밴드의 적층 결함의 핵이 되어 이러한 실리콘으로부터 만든 웨이퍼 상에 원형 결함 밴드들을 일으키는 특정예이다. 이러한 밴드들은 선택적 산 칭 후에 실리콘의 샘플에서 관찰될 수 있다.

[0062] 와류 결함들 및 OSF 링 결함들 모두는 예를 들어, 종래의 CZ 또는 FZ 방법들에 따라 용융된 실리콘의 풀로부터 원통형으로 형상된 불을 풀링함으로써 풀링 프로세스의 회전적 대칭, 축방향의 열적 기울기들, 및 프로세스의 고유한 회전 때문에 단결정 실리콘의 불들 내에 발생한다. 이에 반해, 이러한 와류 결함들 및 OSF 링 결함들을 나타내지 않는 본 발명의 실시형태들에 따른 캐스팅 프로세스들에 의해 실리콘을 만들 수 있다. 본질적으로, 이것은 원통형 대칭을 갖지 않는 실리콘의 바디에서, 그리고 고체화 및 쿨-다운 프로세스들 동안 잉곳의 전역에 걸쳐 등온면이 본질적으로 평탄한 프로세스 내에서 캐스팅 프로세스 동안 결함들의 결합이 회전에 의해 영향 받지 않는 성장 계면에 랜덤하게 분포될 수 있기 때문이다.

[0063] 상이한 방법들에 의해 성장된 실리콘 내의 가벼운 원소 불순물들의 농도에 대해서, 표 1 에 도시되는 다음의 레벨들은 광범위하게 고려되는 특성이다.

[0064] 표 1

	농도 (원자/cm^3)		
	산소	탄소	질소
플로우트 존	$< 1x10^{16}$	$< 1x10^{16}$	$< 1x10^{14}$
초크랄스키	$2x10^{17}$ - $1x10^{18}$	$< 1x10^{16}$	$< 5x10^{14}$
캐스트	$2-3x10^{17}$	$2x10^{16}$ - $5x10^{17}$	$> 1x10^{15}$

[0065]

[0066] CZ 잉곳들의 부분들은 5×10^{17} 원자/cm^3 만큼 낮으나, 그보다 낮지 않은 산소 농도로 생산될 수 있다. 의도적 도핑에 의해 FZ 잉곳 및 CZ 잉곳 내에 탄소 농도 및 질소 농도를 증가시킬 수 있으나, 도핑은 (캐스트 재료에서 하는 것처럼) 이들 기술들의 고체 용해도 제한을 초과하지 않고, 도핑된 잉곳들은 20 cm 직경보다 큰 사이즈로 만들어지지 않았다. 그에 반해, 캐스트 잉곳들은 일반적으로 박리 코팅막 (release coating) 과 퍼니스 핫 존 (furnace hot zone) 의 설계에 의해 탄소 및 질소에 대해 통상 과포화된다. 따라서, 침전된 질화물들 및 탄화물들은 액상 핵생성 및 성장에 의해 곳곳에 존재한다. 또한, 본 발명의 실시형태에 따르면, 위에 보고된 불순물 레벨과 $50\times50\times20$ cm^3 및 $60\times60\times5$ cm^3 만큼 큰 사이즈로 캐스트 단결정 잉곳들을 제조하였다. 이들 치수들은 예시일 뿐, 본 발명의 캐스팅 프로세스들에 대한 상한으로 고려되지는 않는다.

[0067] 예를 들어, 불순물 레벨들에 대해, 본 발명에 따른 실리콘 캐스트에서는 약 $1-5\times10^{17}$ 원자/cm^3 (약 1×10^{17} 원자/cm^3 내지 약 5×10^{17} 원자/cm^3 에 대한 표기) 인 용존 탄소 농도, 약 $2-3\times10^{17}$ 원자/cm^3 인 용존 산소 농도, 및 $1-5\times10^{15}$ 원자/cm^3 인 용존 질소 농도가 바람직하다. 본 발명의 실시형태에 따르면, 캐스팅되는 것이 바람직하고, 각각 적어도 약 20 cm, 예를 들어, 일변이 적어도 약 20 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 약 10 cm 인 제 3 치수를 갖고, 약 $1-5\times10^{17}$ 원자/cm^3 인 용존 탄소 농도, 약 $2-3\times10^{17}$ 원자/cm^3 인 용존 산소 농도, 및 $1-5\times10^{15}$ 원자/cm^3 인 용존 질소 농도를 갖는, 단결정 실리콘, 또는 준-단결정 실리콘의 고형체를 형성할 수 있다. 바람직하게는, 캐스팅되는 것이 바람직하고, 각각 적어도 약 30 cm, 예를 들어, 일변이 적어도 약 30 cm 인 적어도 2 개의 치수들과 적어도 약 10 cm 인 제 3 치수를 갖고, 약 $1-5\times10^{17}$ 원자/cm^3 인 용존 탄소 농도, 약 $2-3\times10^{17}$ 원자/cm^3 인 용존 산소 농도, 및 $1-5\times10^{15}$ 원자/cm^3 인 용존 질소 농도를 갖는, 단결정 실리콘, 또는 준-단결정 실리콘의 고형체를 형성할 수 있다. 더욱 바람직하게는, 캐스팅되는 것이 바람직하고, 각각 적어도 약 35 cm, 예를 들어, 일변이 적어도 약 35 cm 인 적어도 2 개의 치수들과 적어도 약 10 cm 인 제 3 치수를 갖고, 약 $1-5\times10^{17}$ 원자/cm^3 인 용존 탄소 농도, 약 $2-3\times10^{17}$ 원자/cm^3 인 용존 산소 농도, 및 $1-5\times10^{15}$ 원자/cm^3 인 용존 질소 농도를 갖는, 단결정 실리콘, 또는 준-단결정 실리콘의 고형체를 형성할 수 있다.

또한 더욱 바람직하게는, 캐스팅되는 것이 바람직하고, 각각 적어도 약 40 cm, 예를 들어, 일변이 적어도 약 40 cm 인 적어도 2 개의 치수들과 적어도 약 20 cm 인 제 3 치수를 갖고, 약 $1-5\times10^{17}$ 원자/cm^3 인 용존 탄소 농도, 약 $2-3\times10^{17}$ 원자/cm^3 인 용존 산소 농도, 및 $1-5\times10^{15}$ 원자/cm^3 인 용존 질소 농도를 갖는, 단결정 실리콘, 또는 준-단결정 실리콘의 고형체를 형성할 수 있다. 또한 더욱 바람직하게는, 캐스팅되는 것이 바람직하고, 각각 적어도 약 50 cm, 예를 들어, 일변이 적어도 약 50 cm 인 적어도 2 개의 치수들과 적어도 약 20 cm 인 제 3 치수를 갖고, 약 $1-5\times10^{17}$ 원자/cm^3 인 용존 탄소 농도, 약 $2-3\times10^{17}$ 원자/cm^3 인 용존 산소 농도, 및 $1-5\times10^{15}$ 원자/cm^3 인 용존 질소 농도를 갖는, 단결정 실리콘, 또는 준-단결정 실리콘의 고형체를 형성할 수 있다. 또한 더욱 바람직하게는, 캐스팅되는 것이 바람직하고, 각각 적어도 약 60 cm, 예를 들어, 일변이 적어도 약 60 cm 인 적어도 2 개의 치수들과 적어도 약 20 cm 인 제 3 치수를 갖고, 약 $1-5\times10^{17}$ 원자/cm^3 인 용존 탄소 농도, 약 $2-3\times10^{17}$ 원자/cm^3 인 용존 산소 농도, 및 $1-5\times10^{15}$ 원자/cm^3 인 용존 질소 농도를 갖는, 단결정

실리콘, 또는 준-단결정 실리콘의 고형체를 형성할 수 있다. 또한 더욱 바람직하게는, 캐스팅되는 것이 바람직하고, 각각 적어도 약 70 cm, 예를 들어, 일변이 적어도 약 70 cm 인 적어도 2 개의 치수들과 적어도 약 20 cm 인 제 3 치수를 갖고, 약 $1-5\times10^{17}$ 원자/cm^3 인 용존 탄소 농도, 약 $2-3\times10^{17}$ 원자/cm^3 인 용존 산소 농도, 및 $1-5\times10^{15}$ 원자/cm^3 인 용존 질소 농도를 갖는, 단결정 실리콘, 또는 준-단결정 실리콘의 고형체를 형성할 수 있다.

[0068] 본 발명의 실시형태들에 따르면, 방사상으로 분포된 결함들 및/또는 불순물들이 없거나 실질적으로 없고, 바람직하게 각각 적어도 약 20 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 약 10 cm 인 제 3 치수를 갖고, 약 $1-5\times10^{17}$ 원자/cm^3 인 용존 탄소 농도, 약 $2-3\times10^{17}$ 원자/cm^3 인 용존 산소 농도, 및 $1-5\times10^{15}$ 원자/cm^3 인 용존 질소 농도를 갖는, 연속 단결정 실리콘, 또는 준-단결정 실리콘의 바디를 형성할 수 있다. 바람직하게는, 방사상으로 분포된 결함들 및/또는 불순물들이 없거나 실질적으로 없고, 바람직하게 각각 적어도 약 30 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 약 10 cm 인 제 3 치수를 갖고, 약 $1-5\times10^{17}$ 원자/cm^3 인 용존 탄소 농도, 약 $2-3\times10^{17}$ 원자/cm^3 인 용존 산소 농도, 및 $1-5\times10^{15}$ 원자/cm^3 인 용존 질소 농도를 갖는, 연속 단결정 실리콘, 또는 준-단결정 실리콘의 바디를 형성할 수 있다. 더욱 바람직하게는, 방사상으로 분포된 결함들 및/또는 불순물들이 없거나 실질적으로 없고, 바람직하게 각각 적어도 약 35 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 약 10 cm 인 제 3 치수를 갖고, 약 $1-5\times10^{17}$ 원자/cm^3 인 용존 탄소 농도, 약 $2-3\times10^{17}$ 원자/cm^3 인 용존 산소 농도, 및 $1-5\times10^{15}$ 원자/cm^3 인 용존 질소 농도를 갖는, 연속 단결정 실리콘, 또는 준-단결정 실리콘의 바디를 형성할 수 있다. 또한 더욱 바람직하게는, 방사상으로 분포된 결함들 및/또는 불순물들이 없거나 실질적으로 없고, 바람직하게 각각 적어도 약 40 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 약 20 cm 인 제 3 치수를 갖고, 약 $1-5\times10^{17}$ 원자/cm^3 인 용존 탄소 농도, 약 $2-3\times10^{17}$ 원자/cm^3 인 용존 산소 농도, 및 $1-5\times10^{15}$ 원자/cm^3 인 용존 질소 농도를 갖는, 연속 단결정 실리콘, 또는 준-단결정 실리콘의 바디를 형성할 수 있다. 또한 더욱 바람직하게는, 방사상으로 분포된 결함들 및/또는 불순물들이 없거나 실질적으로 없고, 바람직하게 각각 적어도 약 50 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 약 20 cm 인 제 3 치수를 갖고, 약 $1-5\times10^{17}$ 원자/cm^3 인 용존 탄소 농도, 약 $2-3\times10^{17}$ 원자/cm^3 인 용존 산소 농도, 및 $1-5\times10^{15}$ 원자/cm^3 인 용존 질소 농도를 갖는, 연속 단결정 실리콘, 또는 준-단결정 실리콘의 바디를 형성할 수 있다. 또한 더욱 바람직하게는, 방사상으로 분포된 결함들 및/또는 불순물들이 없거나 실질적으로 없고, 바람직하게 각각 적어도 약 60 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 약 20 cm 인 제 3 치수를 갖고, 약 $1-5\times10^{17}$ 원자/cm^3 인 용존 탄소 농도, 약 $2-3\times10^{17}$ 원자/cm^3 인 용존 산소 농도, 및 $1-5\times10^{15}$ 원자/cm^3 인 용존 질소 농도를 갖는, 연속 단결정 실리콘, 또는 준-단결정 실리콘의 바디를 형성할 수 있다. 또한 더욱 바람직하게는, 방사상으로 분포된 결함들 및/또는 불순물들이 없거나 실질적으로 없고, 바람직하게 각각 적어도 약 70 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 약 20 cm 인 제 3 치수를 갖고, 약 $1-5\times10^{17}$ 원자/cm^3 인 용존 탄소 농도, 약 $2-3\times10^{17}$ 원자/cm^3 인 용존 산소 농도, 및 $1-5\times10^{15}$ 원자/cm^3 인 용존 질소 농도를 갖는, 연속 단결정 실리콘, 또는 준-단결정 실리콘의 바디를 형성할 수 있다.

[0069] 본 발명의 실시형태들에 따라 만들고, 위에서 참조된 불순물 농도를 갖는 캐스트 실리콘 잉곳의 수평 사이즈의 상한은 발명된 방법 자체에 의해서가 아니라 캐스팅 및 도가니 만드는 기술에 의해서만 결정된다. 따라서, 본 발명에 따르면, 바람직하게는 캐스팅 용기의 내부 치수들만큼 큰 적어도 2 개의 치수들 및 잉곳과 같은 높이인 제 3 치수를 갖고, 위에서 언급된 불순물 농도를 갖는 캐스트 연속 단결정 실리콘이나 준-단결정 실리콘의 고형체를 형성할 수 있다. 예를 들어, 단결정 실리콘의 캐스트 바디가 정육면체-형상 또는 장방형-형상 고체이면, 위의 이들 치수들은 이러한 바디들의 길이, 폭, 및 높이로 불린다.

[0070] 본 발명의 실시형태들에 따른 캐스팅 프로세스를 위해 사용되는 시드(들)는 임의의 원하는 사이즈 및 형상일 수 있으나, 실리콘의 정방형, 장방형, 육각형, 장사방형 또는 팔각형으로 형상된 조각들과 같은 단결정 실리콘, 준-단결정 실리콘, 또는 기하학적으로 정렬된 다결정 실리콘에 대한 적합하게 기하학적으로 형상된 조각들이다.

시드들은 타일링에 도움되는 형상으로 될 수 있어, 에지-대-에지에 위치되거나 "타일링될" 수 있고, 원하는 패턴으로 도가니의 저부와 일치될 수 있다. 또한, 본 발명의 실시형태들에 따르면, 시드들은 도가니의 모든 면들을 포함한 하나 이상의 측면들 상에 위치될 수 있다. 이러한 시드들은 예를 들어, 단결정 실리콘의 불

과 같은 결정 실리콘의 소스를 원하는 형상을 갖는 조각들로 쏘잉하여 획득될 수 있다. 또한, 시드들은 본 발명의 실시형태들에 따른 프로세스에 의해 만든 연속 단결정 실리콘, 근-다결정 실리콘, 또는 연속 기하학적 다결정 실리콘 중 어느 하나의 샘플로부터 그들을 절단하여, 초기의 캐스팅 프로세스로부터 후속 캐스팅 프로세스들에서 사용하는 시드(들)를 만들 수 있다. 따라서, 예를 들면, 연속 단결정 실리콘이나 준-단결정 실리콘의 잉곳에서 절단되거나 다른 방법으로 획득되는 연속 단결정 실리콘이나 준-단결정 실리콘 중 하나 실리콘의 슬라브는 연속 단결정 실리콘 또는 준-단결정 실리콘의 후속 캐스팅에 대한 템플렛으로서 기능을 할 수 있다.

이러한 시드 결정은 시드가 위치되는 도가니 또는 다른 용기의 저부와 같은 일 측의 사이즈 및 형상, 또는 실질적으로 동일한 사이즈 및 형상일 수 있다. 단결정 캐스팅의 목적으로, 결함들의 결합을 회피하기 위해 도가니 저부를 피복하는데 가능한 한 적은 시드들을 갖는 것이 바람직하다. 따라서, 시드 또는 시드들은 본 발명에 따른 캐스팅 방법을 수행하도록 위치되는 도가니 또는 다른 용기의, 저부와 같은, 하나 이상의 측들의 사이즈 및 형상, 또는 실질적으로 동일한 사이즈 및 형상일 수 있다.

[0071] 이하에서는 본 발명의 소정 실시형태들에 따른 실리콘을 준비하는 프로세스들 및 장치들을 기술한다. 그러나, 이들 프로세스들 및 장치들이 본 발명의 원리에 따라 실리콘을 형성하는 유일한 방법들은 아님을 이해될 것이다.

[0072] 도 1 을 참조하면, 시드들 (100) 은 크고, 연속하게 배향된 슬라브 (120) 를 형성하도록 동일 배향으로 시드들을 매우 인접하게 하는 방식으로, 석영 도가니와 같은, 저부와 측벽을 갖는 도가니 (110) 의 저부에 위치된다.

다른 방법으로, 시드들은 생성되는 결과의 실리콘 내에 의도적으로 선택된 그레인 사이즈들을 갖는 특정 그레인 경계들을 생성하도록 미리-선택된 오배향들 (misorientations) 로 가깝게 접하게 된다. 즉, 기하학적 다결정 실리콘의 캐스팅의 경우, 이렇게 만들어진 결정화된 기하학적 다결정 실리콘의 단면 그레인 사이즈 및 바람직하게는 단면 형상은 시드들의 단면 그레인 사이즈 및 단면 형상과 같거나 비슷하고, 그레인의 높이는 단면과 수직인 실리콘의 치수만큼 길 수 있다. 만약 기하학적 다결정 실리콘 시드 결정, 예를 들어, 기하학적 다결정 실리콘의 잉곳에서 절단되거나 다르게 획득된 기하학적 다결정 실리콘의 슬라브 (slab) 가 기하학적 다결정 실리콘을 캐스팅하는 시드 결정 또는 시드 결정들로서 사용되는 경우, 이렇게 만들어진 기하학적 다결정 실리콘의 그레인들에 대한 단면 그레인 사이즈 및 바람직하게는 단면 형상은 기하학적 다결정 시드 또는 시드들 내의 그레인들과 유사하다. 따라서, 기하학적 다결정 실리콘의 잉곳에서 절단되거나 다르게 획득된 기하학적 다결정 실리콘의 슬라브는 "기하학적 다결정 실리콘 시드 결정" (또는 "기하학적으로 정렬된 다결정 실리콘 시드 결정" 으로 불림) 일 수 있고, 기하학적 다결정 실리콘의 후속 캐스팅의 템플릿으로 기능할 수 있다. 이러한 시드 결정은 시드가 위치되는 도가니 또는 다른 용기의, 저부와 같은, 일 측의 사이즈 및 형상이거나 또는 실질적으로 그 사이즈 및 형상일 수 있다. 이러한 시드 결정이 본 발명의 방법으로 사용되는 경우, 이렇게 만들어진 기하학적 다결정 실리콘은 시드의 그레인과 같은 동일 또는 실질적으로 동일한 단면 사이즈 및 형상을 갖는 결정 그레인을 갖는 것이 바람직하다.

[0073] 바람직하게는, 시드들 (100) 은 도가니 (110) 의 저부의 전체를 실질적으로 피복하도록 타일링되고 위치된다.

또한, 도가니 (110) 로부터 결정화된 실리콘의 제거를 돕기 위해 실리카, 실리콘 질화물, 또는 액체 인캡슐런트 (liquid encapsulant) 와 같은 박리 코팅막을 도가니 (110) 가 갖는 것이 바람직하다. 또한, 시드들은 약 3 ㎜ 내지 약 100 ㎜ 두께인, 원하는 결정 배향의 단결정 실리콘의 슬라브 또는 슬라브들을 포함할 수도 있다. 도 1 에서는 시드들 (100) 의 구체적 수와 사이즈가 도시되나, 애플리케이션에 따라 시드들의 수와 사이즈 모두가 증가되거나 감소될 수 있음이 당업자에게 매우 명백하다.

[0074] 또한, 도 2 를 참조하면, 시드들 (100) 은 도가니 (110) 의 하나 이상의 측벽들 (130, 140) 상에 위치될 수 있다. 시드들 (100) 은 도가니 (110) 의 모든 4 개의 벽들에 위치될 수 있으나, 오직 설명의 목적으로, 시드들 (100) 은 벽들 (130, 140) 상에만 도시된다. 바람직하게는, 도가니 (110) 의 4 개의 벽들 중 임의의 벽 상에 위치되는 시드들 (100) 은 결정 성장을 용이하도록 컬럼형이다. 바람직하게는, 도가니 (110) 의 4 개의 벽들 중 임의의 벽 상에 위치되는 컬럼형 시드들 각각은 도가니 (110) 의 저부 표면 상에서 바로 밑에 위치된 시드와 동일한 그레인 배향을 갖는다. 기하학적 다결정 실리콘 성장의 경우, 본 방식으로 컬럼형 시드들을 위치시키는 것은 도가니 (110) 의 높이만큼 큰 기하학적 다결정 실리콘 그레인들의 성장을 용이하게 한다.

[0075] 계속 도 2 를 참조하면, 시드들 (110) 의 본 배열에 대한 이점들은 보다 빠르고, 보다 단순한, 보다 높은 결정도 (crystallinity) 와 보다 높은 성장률을 갖는 실리콘을 캐스팅하는 자전 프로세스 (self-progagating process) 이다. 예를 들어, 도가니 (110) 내부에 예를 들어, 하나의 저부와 4 개의 벽들로 동공 (cavity) 을 형성하도록 함께 적층되는 많은 시드들로 이루어진 실리콘 '컵' 내에서 실리콘을 용융할 수도 있다. 다

른 방법으로, 도가니 (110) 내부에 예를 들어, 하나의 저부와 4 개의 벽들로 동공을 형성하도록 함께 적층되는 많은 시드들로 이루어진 실리콘 '컵' 내에 용융된 실리콘을 부을 수도 있다. 대안적 실시예에서, 수용하는 '컵' 을 우선 실리콘의 용융 온도까지 이르게 하나, 고체 상태로 유지시키고, 이후 컵 내에 용융된 실리콘을 붓고 열적 평형에 도달하게 한다. 그 후, 위의 어느 한 실시예에서, 도가니 (110) 를 냉각시켜, 예를 들어, 도가니 (110) 의 개방 상부에 여전히 열을 가하면서, 주위로 열을 방사하는 고체 히트 싱크 재료 (미도시) 에 의해 도가니 (110) 의 저부와 측면들에서의 열을 제거한다. 이 방식에서는, 이렇게 만들어진 실리콘의 캐스트 잉곳이 (사용되는 시드들 (100) 의 유형 및 그들의 배향에 따라) 단결정 또는 기하학적 다결정 중 어느 하나일 수도 있고, 결정화는 공지의 다결정 캐스팅 프로세스들보다 빠르게 진행한다. 이 프로세스를 반복하기 위해, 공지의 기술들을 이용하여 결정화된 실리콘 잉곳의 측들 및 저부 중 일부를 제거하고, 후속 캐스팅 프로세스에 재사용할 수 있다. 바람직하게, 복수의 시드 결정들, 예를 들어 시드들 (100) 은 시드들 (100) 간의 공통 극 방향이 도가니 (110) 의 저부 및 일 측의 각각에 수직하도록 배열되어 도가니 (110) 의 저부와 일 측 간에 어떤 그레인 경계도 형성하지 않는다.

[0076] 도 3a 내지 도 3c 는 도가니 (110) 내의 기하학적 다결정 실리콘을 캐스팅하는 일 실시예를 도시한다. 결정 그레인 공학 (crystal grain engineering) 은 면밀한 시드 생성, 배향, 배치, 결정 성장에 의해 달성될 수 있다. 도 3a 내지 도 3b 는, 예를 들어, 2 개의 단결정 슬라브들 (155, 165) 을 나타내고, 여기서 단결정 슬라브들 (155, 165) 상에는 상이한 (110) 방향들이 도시된다. 양 슬라브들은 그들의 표면들에 수직인 공통 (100) 방향을 갖는다. 이후, 단결정 실리콘 (155, 165) 의 각 슬라브는 시드들 (150, 160) 이 되는 많은 실리콘 조각들을 형성하도록 절단된다. 표면 유형들은 예를 들어, 텍스처링 이유로 균일, 예를 들어, (100) 이거나 자유자재로 선택될 수 있다. 그레인의 형상 및 사이즈는 도 3b 에 도시된 바와 같이 단결정 실리콘의 슬라브들 (155 및 165) 로부터 타일들의 절단에 기초하여 선택될 수도 있다. 이웃한 타일 조각들 (150, 160) 간의 상대적 배향 각도는 이렇게 만들어진 캐스트 기하학적 다결정 실리콘내의 그레인 경계 유형 (예를 들어, 높은 각도, 낮은 각도 또는 쌍둥이) 을 결정한다. 도 3a 에서는, 예를 들어, (100) 극 방향의 2 개의 그레인 배향들을 도시한다.

[0077] 이후, 도 3c 에서 도시되는 시드들은 이웃 타일들에 대해 배향 관계들을 구체적으로 선택한 타일링된 단결정 실리콘 조각들 (150, 160) 로 이루어진다. 그 후, 실리콘 조각들 (150, 160) 은 조각들 (150, 160) 상에 그려진 화살표들에 의해 도시된 바와 같이, 2 개의 (110) 방향들이 교대되도록, 도 3c 에 도시된 도가니 (110) 의 저부에서 타일링된다. 조각들 (150, 160) 이 오직 설명의 목적으로 대략 정방형 블록으로서 그려지고, 이하에서 언급되는 이유로 다른 형상들일 수 있음을 주목하는 것이 중요하다.

[0078] 또한, 도 3c 에 도시되지는 않았지만, 도 2 내에서처럼, 시드들은 도가니의 측면들 상에 위치될 수도 있다. 이후, 실리콘 공급재료 (미도시) 는 조각들 (150, 160) 상부의 도가니 (110) 내로 도입되고, 그 후 용융될 수도 있다. 다른 방법으로, 도가니 (110) 내에 용융된 실리콘을 붓을 수도 있다. 다른 방법의 실시예에서는, 우선 실리콘의 용융 온도에 가깝게 또는 용융 온도까지 도가니 (110) 를 이르게 하고, 용융된 실리콘을 그 내에 붓는다. 본 발명의 실시형태들에 따르면, 시드들의 얇은 층은 고체화가 시작되기 전에 용융될 수 있다.

[0079] 이후, 위의 어느 한 실시예에서, 도가니 (110) 를 냉각시켜, 예를 들어, 도가니 (110) 의 개방 상부에 여전히 열을 가하면서, 주위로 열을 방사하는 고체 히트 싱크 재료 (미도시) 에 의해 도가니 (110) 의 저부와 측면들에서의 열을 제거한다. 따라서, 고체로서 시드가 유지되면서 용융된 실리콘을 도입하고, 용융의 방향성 고체화가 컬럼 그레인의 상향 성장을 야기한다. 본 방식에서, 이렇게 만들어진 기하학적 다결정 실리콘의 캐스트 잉곳은 타일링된 실리콘 시드들 (150, 160) 의 그레인 배향들을 모방한다. 일단 본 기술을 적절히 구현하면, 이렇게 만들어진 잉곳은 예를 들어, 다른 캐스팅 프로세스들에 대해 시드 층들로서 작용하도록 수평 슬라브들로 절단될 수 있다. 슬라브는 예를 들어, 캐스팅에 사용되는 도가니 또는 다른 용기의, 저부와 같은, 일 표면의 사이즈 및 형상이나 이의 사실상 사이즈 및 형상을 가질 수 있다. 예로서, 캐스팅 프로세스를 위해 오직 하나의 이러한 슬라브를 사용할 수 있다.

[0080] 도 4 는 도 3c 에 도시된 타일링의 변화를 나타낸다. 캐스팅된 기하학적 다결정 실리콘에 대한 그레인 배향의 일 실시예로서, 도가니 (110) 의 저부와 수직인 공통 극 방향 (001) 을 갖고 시드 조각들 (150, 160) 을 타일링한다. 도 4 에서는, 방향성 화살표들에 의해 표시되는 바와 같이, 타일링 조각들 (150, 160)에 (110) 방향들의 패밀리에 대한 모든 변화들을 나타낸다. 또한, 본 특정 도면에 도시되지는 않았지만, 시드들은 도가니 (110) 의 하나 이상의 측면들 상에 있을 수 있다.

[0081] 따라서, 실리콘을 형성하는데 사용되는 도가니 내의 시드 결정들의 배향은 캐스팅된 기하학적 다결정 실리콘 내에 특정 그레인 경계들을 형성하고, 이러한 그레인 경계들이 기하학적 형상들을 포위하도록 선택될 수도 있다.

본 발명의 실시형태들에 대조적으로, 공지된 캐스팅 프로세스들은 완전히 용융된 대량 실리콘에서의 방향성 고체화에 의해 제어되지 않은 방식으로 다결정 그레인의 캐스팅을 수반한다. 기본적으로, 이렇게 만들어진 그레인들은 랜덤한 배향 및 사이즈 분포를 갖는다. 랜덤한 그레인 배향은 실리콘 표면을 효과적으로 텍스쳐링하기 어렵게 만든다. 또한, 그레인 경계들에서 얽힘들, 통상의 성장 기술들의 천연 산물은 디스로케이션들 (dislocations) 의 클러스터나 라인을 수반하는 구조적 결함들의 핵을 이루는 경향이 있음이 알려졌다. 이들 디스로케이션들 및 이들을 유인하도록 하는 불순물들은 전기적 캐리어들의 빠른 재결합 및 광 변환 재료로서 성능 열화를 야기한다. 따라서, 본 발명의 일 실시형태에 따르면, 구조적 결함들을 최소화하면서 소수 캐리어의 라이프 타임 및 불순물 게터링을 최대화하도록 명확히 그레인들의 사이즈, 형상, 및 배향을 선택함으로써 단결정 실리콘이나 기하학적 다결정 실리콘 중 어느 하나의 캐스팅에 대해 규칙적인 그레인 경계 네트워크의 신중한 계획 및 시딩을 달성한다.

[0082] 성장 동안 그레인 경계들의 수직 방향을 유지하면서 디스로케이션 핵형성을 최소화하기 위하여 평탄면이도록 그레인 경계들이 선택될 수 있다. 불순물의 게터링 및 스트레스 완화를 최대화하도록 그레인 경계 유형들이 선택된다. 텍스처링을 하게 하고, 표면 패시베이션 (surface passivation) 을 개선하며, 그레인 강도를 강화하도록 그레인 배향들 (및 특히 표면 배향) 이 선택된다. 효과적인 게터링 거리들과 큰 흡수 면적들 간의 밸런스를 최적화하도록 그레인들의 사이즈가 선택된다. 예를 들어, 도 3c 및 도 4 에 예로서 도시된 바와 같이 기하학적 다결정 실리콘이 캐스트 기하학적 다결정 실리콘의 표면에 수직인 공통 극 방향을 갖고 적어도 약 0.5 cm 내지 약 10 cm 인 평균 최저 그레인 단면 사이즈를 갖도록 기하학적 다결정 실리콘의 캐스팅이 달성될 수 있다. 평균 결정 그레인 단면 사이즈는 약 0.5 cm 내지 약 70 cm 이상일 수 있다. 위에서 설명한 바와 같이, 그레인의 높이 또는 길이에 수직인 그레인의 단면의 최대 치수로서 단면 사이즈가 이해된다. 이렇게 만들어진 광 변환 재료의 효율에서 순 결과가 전체적으로 증가한다.

[0083] 본 발명의 일 실시형태에 따르면, 도가니의 적어도 하나의 표면, 예를 들어, 도가니의 저부 표면 상에 밀집된 다각형을 포함하는, 복수의 단결정 실리콘 시드 결정들의 기하학적 배열을 위치시킬 수 있다. 다른 방법으로, 도 5 및 도 6 에 예로서 도시되는 바와 같이, 기하학적인 배열이 밀집된 육각형 형상, 또는 장사방형 간극들 (rhomboid interstices) 이나 삼각형 간극들을 갖는 다각형 형상을 포함하도록 복수의 단결정 실리콘 시드 결정들의 기하학적인 배열을 위치시킬 수 있다. 또 다른 방법으로, 복수의 단결정 시드 결정들을 이용하는 대신에, 본 발명에 따른 단결정 실리콘 또는 준-단결정 실리콘을 캐스팅하는 단일 시드 결정으로서 단결정 실리콘 또는 준-단결정 실리콘의 캐스팅 전에 제조된 잉곳에서 절단되거나 다르게 획득된 섹션 또는 슬라브를 이용할 수 있다. 이러한 단일 시드 결정은 캐스팅을 수행하는데 사용되는 도가니 또는 다른 용기의 표면과 같은 사이즈 및 형상 또는 실질적으로 이와 같은 사이즈 및 형상일 수 있다. 더욱 구체적으로, 도 5 는 육각형들 (170) 의 밀집된 어레이의 일 실시예를 나타낸다. 이에 반해, 도 6 은 장사방형 간극들 (180) 이나 삼각형 간극들 (190) 을 갖는 다각형 형상들의 어레이의 일 실시예를 나타낸다. 이하에서는 더욱 상세하게 양 어레이들을 언급한다. 또한, 위에서 언급된 배열들의 어느 하나는 도가니의 저부 및 측면 표면들 모두에 시드 결정들을 그렇게 위치시키는 단결정 실리콘의 고형체, 준-단결정 실리콘의 고형체, 또는 기하학적 다결정 실리콘의 고형체 중 어느 하나를 캐스팅하는 일 실시형태에 적용 가능하다.

[0084] 본 발명의 실시형태들에 따르면, 기하학적 다결정 실리콘의 바디를 캐스팅하여 생산되는 실리콘 결정 그레인들은 컬럼형 방식으로 성장시킬 수도 있다. 또한, 이러한 결정 그레인들은 형성되는 시드의 형상이나 이에 근사한 형상인 단면을 가질 수도 있다. 이렇게 구체적으로 선택된 그레인 경계들을 갖는 실리콘을 만들 때, 그레인 경계 접합들은 코너당 오직 3 개의 그레인 경계들을 만나게 하는 것이 바람직하다. 도 5 에서 도시된 바와 같이, 수평면의 원자들이 실리콘용 (111) 와 같이 3 겹의 대칭이나 6 겹의 대칭을 갖도록 결정 배향이 있는 곳에서 시드들의 타일링을 위해 시드 결정들 (170) 을 육각형 배열들로 하는 것이 바람직하다. 따라서, 도 5 는 도 1 및 도 2 에서 도시된 바와 같은 적절한 도가니의 저부에서의 배열을 위한 육각형 형상 시드들의 콜렉션의 일부의 평면도를 나타낸다. 화살표들은 시드들 내의 실리콘 결정의 (110) 방향의 배향을 나타낸다.

[0085] 다른 방법으로, 4 겹의 대칭을 갖는 배향들의 경우, 3 개의 그레인 경계 코너 규칙을 여전히 충족하면서 다수의 그레인들을 통해 안정적이고 대칭적인 그레인 경계들을 유지하도록 시드들의 상이한 기하학적인 구성을 사용할 수 있다. 예를 들어, (110) 방향 및 (100) 극을 갖는 팔각형의 1 차 측면들 간의 오배향이 Θ면, α 는 도 6 에서 도시된 바와 같이, 격자 간의 장사방형에 대한 정점 각도이고, 만약 α = 90 - Θ 이면, 모든 결정 그레

인들은 (110) 방향에 대해 대칭적 그레인 경계를 갖는다. 본 실시예에서, 모든 결정 그레인들은 도 6 이 도시되는 종이의 면에 수직인 (100) 극 방향을 갖는다. 따라서, 도 6 은, 도 1 및 도 2 에서 도시된 것과 같은 적절한 도가니의 저부 내의 배열에 대해 장사방형 형상된 시드들 (180, 190) 에 따라 팔각형 형상 시드들의 콜렉션의 일부의 평면도이다. 화살표들은 시드들 내의 실리콘 결정의 (110) 방향의 배향을 나타낸다.

[0086] 도 7 은 본 발명에 따라 실리콘을 만드는 예시적인 방법을 나타내는 흐름도이다. 도 7 에 따르면, 방법 (700) 은 단결정 실리콘 성장이나 기하학적 다결정 실리콘 성장에 대한 단결정 실리콘 시드 결정들을 선택하고 도가니 내의 단결정 실리콘 시드 결정들을 배열함으로써 시작할 수도 있다 (단계 705). 다른 방법으로, 단일 시드 결정으로서 단결정 실리콘이나 기하학적으로 정렬된 다결정 실리콘의 잉곳에서 절단되거나 다르게 획득된 단일 슬라브를 사용할 수 있다. 다음으로, 도가니에 실리콘 공급재료를 첨가할 수도 있다 (단계 710).

이후, 저부에서 (수동적으로나 능동적으로; 단계 715 참조) 도가니의 저부를 냉각시키면서 상부에서 도가니를 가열한다. 용융 동안, 고체-액체 계면의 위치를 추적하고 제어하도록 실리콘의 용융 스테이지를 모니터링한다 (단계 720). 단결정 실리콘 시드 결정들의 일부가 용융될 때까지 실리콘의 용융 스테이지를 진행하게 한다 (단계 725). 일단 단결정 실리콘 시드 결정들의 원하는 일부가 용융되면, 용융 스테이지는 종료되고 결정 성장 스테이지가 시작된다 (단계 730). 실리콘 결정화가 완료될 때까지 도가니 내부의 단방향으로 그리고 수직방향으로 결정 성장을 계속하게 한다 (단계 735). 기하학적 다결정 실리콘 성장을 위해 시드들을 배열시키는 경우, 단계 735 의 결정화는 컬럼형의 그레인들을 갖는 기하학적 다결정 실리콘 잉곳을 생산한다 (단계 740). 다른 방법으로, 단결정 실리콘 성장을 위해 시드들을 배열시키는 경우, 단계 735 의 결정화는 단결정 실리콘 잉곳을 생산한다 (단계 745). 마지막으로는, 추가적 프로세싱을 위해 단계 740 또는 단계 745 중 어느 하나 단계에서 생산된 잉곳을 제거한다 (단계 750).

[0087] 도 8a 에 도시되는 바와 같이, 예를 들어, 2 개의 방식 중 하나의 방식으로 시드들 (220) 을 수용하는 도가니 (210) 에 실리콘 공급재료 (200) 를 도입시킬 수 있다. 우선, 용이하게 사이징된 청크들의 형태로 적절히 고체 실리콘 공급재료 (200) 를 갖는 최대 용량으로 도가니 (210) 를 로딩시키고, 캐스팅 스테이션 (미도시) 에 로딩된 도가니 (210) 를 위치시킨다.

[0088] 도 8b 에서 도시된 바와 같이, 도가니 (210) 의 열 프로파일은 도가니 (210) 의 저부에서 고체 상태의 시드들 (220) 을 유지시키도록, 즉 공급재료 (200) 가 용융될 때 시드들 (220) 이 유동되지 않도록 능동적으로나 수동적으로 저부가 냉각되면서, 도가니 (110) 내의 실리콘 투입의 상부가 용융까지 가열되도록 설정된다. 고체 히트 싱크 재료 (230) 는 수냉된 벽들에 열을 방사하기 위해 도가니 (210) 의 저부와 접촉해 있다. 예를 들어, 히트 싱크 재료 (230) 는 흑연의 고체 블록일 수 있고, 바람직하게는 도가니의 저부보다 크거나 저부만큼 큰 치수들을 가질 수 있다. 본 발명에 따르면, 예를 들어, 66 cm × 66 cm 인 저부 표면을 갖는 도가니를 갖고 사용될 때, 히트 싱크 재료는 66 cm × 66 cm × 20 cm 일 수 있다. 도가니 (210) 의 저부 상에만 시드들 (220) 이 위치된다면, 도가니 (210) 의 측벽들은 냉각되지는 않는 것이 바람직하다. 도가니 (210) 의 저부와 측면들 모두에 시드들 (220) 이 위치되면, 원하는 열 프로파일을 유지하기 위하여 도가니 (210) 의 저부 및 측면들 모두에 히트 싱크 재료 (230) 를 위치시킬 수도 있다.

[0089] 용융된 실리콘과 시드들 간의 계면의 위치를 추적하도록 실리콘 공급재료 (200) 의 용융 상태를 철저히 모니터링한다. 바람직하게는, 부분적으로 시드들 (220) 이 용융된 후에, 시드들 (220) 을 제외한 공급재료 실리콘 (200) 모두가 완전히 융용될 때까지 (도 8b 에 도시된) 용융물 (240) 을 계속한다. 예를 들어, 도가니의 외부 표면에서 측정되는 경우, 도가니 내의 어딘가에서 실리콘의 용융 온도에 도달한 후, 약 0.1 ℃/분 이하인 ΔT 를 유지시키면서 시드들 (220) 이 완전히 용융되지는 않도록 가열을 철저히 제어할 수 있다. 바람직하게는, 도가니의 외부 표면에서 측정되는 경우, 도가니 내의 어딘가에서 실리콘의 용융 온도에 도달한 후, 약 0.05 ℃/분 이하인 ΔT 를 유지시키면서 시드들 (220) 이 완전히 용융되지는 않도록 가열을 철저히 제어할 수 있다.

예를 들어, 본 발명에 따르면, 도가니와 흑연의 큰 블록 간에서 도가니의 외부 표면에서 ΔT 를 측정할 수 있고, 용융된 시드들 (220) 의 부분을 계산하기 위하여 용융된 상태의 깊이를 측정하도록 용융물 (240) 내로 딥-로드를 삽입할 수도 있다.

[0090] 도 8c 에 도시된 바와 같이, 부분 (250) 는 용융물 (240) 하부에서 시드들 (220) 의 전체 두께에 대해 용융된 부분을 나타낸다. 용융물 (240) 하부에서 시드들 (220) 의 부분 (250) 이 용융된 후, 용융 스테이지는 그 후 빠르게 종료되고 결정 성장 스테이지가 시작되며, 여기서 도가니 (210) 의 상부에서의 가열은 감소되고/감소되거나 히트 싱크 재료 (230) 의 저부의 냉각은 증가된다. 본 프로세스의 일 실시예로서, 도 8d 에 도시된 차트는 시간의 함수에 따라 시드들 (220) 의 부분 (250) 에 대한 용융을 나타낸다. 도 8d 에 도시된 바와 같이, 5 cm 내지 6 cm 인 초기 두께를 갖는 시드들의 일부는 고체 시드가 2 cm 바로 아래로 남을 때까지 점진적

으로 용융된다. 예를 들어, 도가니의 외부 표면에서 측정되는 경우 (예를 들어, 냉각 블록 내에 탑재된 써모커플 (thermocouple) 을 통해), 도가니 내의 어딘가에서 실리콘의 용융 온도에 도달한 후, 약 0.1 ℃/분 이하인 ΔT 를 유지시키면서 시드들 (220) 이 완전히 용융되지는 않도록 가열을 철저히 제어할 수 있다. 바람직하게는, 도가니의 외부 표면에서 측정되는 경우, 도가니 내의 어딘가에서 실리콘의 용융 온도에 도달한 후, 약 0.05 ℃/분 이하인 ΔT 를 유지시키면서 시드들 (220) 이 완전히 용융되지는 않도록 가열을 철저히 제어할 수 있다. 여기서, 용융 스테이지는 이후 빠르게 종료되고 차트의 종좌표 상에 측정된 고체 두께의 상대적 증가로 표시되는 결정 성장 스테이지는 시작된다.

[0091] 이후, 도 8e 에서 도시된 바와 같이, 시딩된 결정 성장은 실리콘 결정화가 완료될 때까지 도가니 (210) 내의 단방향으로 그리고 수직방향으로 계속된다. 캐스팅 사이클은 도가니 (210) 내의 상부-대-저부 열 기울기가 평행하게 되면 종료된다. 그 후, 전체 잉곳 (260) 은 실온까지 천천히 냉각된다. 기하학적 다결정 실리콘의 캐스팅의 경우, 도 8e 에 도시된 바와 같이, 이 시딩된 단방향 성장은 일반적으로 형성되는 개별 시드 (220) 의 형상인 수평 단면을 갖는 컬럼형으로 형상된 그레인들 (270) 을 생산한다. 본 방식으로, 캐스트 기하학적 다결정 실리콘의 그레인 경계들은 미리-선택될 수 있다. 이미 언급된 시딩 패턴들/타일링 중 어느 하나가 본 캐스팅 프로세스에 적용 가능하다.

[0092] 다른 방법으로, 단결정 실리콘의 캐스팅의 경우, 시드들 (220) 의 배열은 모든 곳에서 그레인 경계들을 갖지 않도록 행해져, 캐스트 단결정 실리콘이 되게 할 수 있다. 도 8f 에서 도시된 바와 같이, 부분 (250) 은 용융물 (240) 아래서, 시드들 (220) 의 전체 두께의 용융된 부분을 나타낸다. 시드들 (220) 의 부분 (250) 이 용융물 (240) 아래에서 용융된 후, 용융 스테이지는 이후 빠르게 종료되고 결정 성장 스테이지가 시작되며, 여기서 도가니 (210) 의 상부에서의 가열은 감소되고/감소되거나 히트 싱크 재료 (230) 의 저부의 냉각은 증가된다. 이후, 도 8g 에 도시된 바와 같이, 시딩된 결정 성장은 실리콘 결정화가 완료될 때까지 도가니 (210) 내의 단방향으로 그리고 수직으로 계속된다. 바람직하게 실질적으로 평탄한 고체-액체 계면 (285) 은 도가니 (210) 의 저부 표면에서 상향으로 그리고 멀리지게 전파된다. 캐스팅 사이클은 도가니 (210) 내의 상부-대-저부 열 기울기가 평행하게 되는 경우, 결정 성장의 완료 후에 종료된다. 그 후, 전체 잉곳 (280) 은 실온까지 천천히 냉각된다. 단결정 실리콘의 캐스팅의 경우, 도 8g 에 도시된 바와 같이, 시딩된 단방향 성장은 캐스트 단결정 실리콘 (290) 의 연속 고형체를 생산한다.

[0093] 도 9 에 도시된 다른 프로세스에서는, 우선 개별실 또는 개별 용융 용기 (300) 내에서 실리콘 공급재료 (220) 를 용융할 수도 있다. 용융 파이프 (310) 를 통해 도가니 (210) 내로 용융된 공급재료 (305) 를 피딩하거나 붓기 전에 시드들 (220) 은 상부로부터 부분적으로 용융되거나 되지 않을 수도 있고, 도 8b 내지 도 8g 에 참조하여 기술된 바와 같이 이후의 냉각 및 성장을 진행한다. 다른 실시형태에서는, 도가니 (210) 의 벽들 (미도시) 상에 실리콘 시드 결정들을 탑재할 수도 있고, 이미 기술된 바와 같이, 시딩된 성장은 도가니 (210) 의 측면들뿐만 아니라 저부에서도 행할 수 있다. 다른 방법으로, 도가니 (210) 에서 분리된 용융 용기 (300) 내에서 실리콘 공급재료 (200) 를 용융하고, 동시에 실리콘의 용융 온도까지 도가니 (210) 를 가열하며, 시드들 (220) 은 완전히 용융하지 않도록 가열을 제어한다. 시드들 (220) 의 부분 용융에 대해, 용융된 공급재료 (305) 는 용융 용기 (300) 에서 도가니 (210) 로 전달될 수 있고, 냉각 및 결정화가 시작될 수 있다. 따라서, 본 발명의 일 실시형태에 따르면, 결정화된 실리콘의 고형체의 일부는 시드들 (220) 을 포함할 수 있다.
다른 방법으로, 시드들은 용융 도입 전에 완전히 고체로서 유지될 수도 있다. 이 경우, 용융 용기 (300) 내의 용융된 실리콘은 용융 온도를 넘어 가열되고, 과가열액체 (superheated liquid) 는 도입될 때 몇몇 시드들의 일부를 용융시킨다.

[0094] 도 9 에 도시된 것과 같은 2 개-스테이지 캐스팅 스테이션에서, 용융된 공급재료 (305) 는 용융 용기 (300) 로부터 흘러내려오고, 시드들 (220) 상에 랜딩하고, 고체화 동안 그들의 결정도 (crystallinity) 를 가정할 수 있다. 다른 방법으로, 용융은 하나 이상의 도가니 (210) 의 카피들 (미도시) 과 같은 고체화 도가니들의 분산되는 장치를 공급하는 중앙 용융 용기 (300) 에서 발생할 수도 있다. 본 발명의 실시형태들에 따르면, 고체화 도가니들은 도가니들의 저부 및 측면들 중 어느 하나 또는 모두에 시드들 (220) 를 따라 늘어설 수 있다.
이 접근방식의 몇몇 장점들은: 각 캐스팅 단계의 보다 나은 최적화를 허용하도록 용융 및 고체화 시스템들의 분리; 도가니 공급을 유지시킬 필요에 따라 통상의 방식으로 새로운 재료의 용융을 발생시킬 수 있는 반연속식 실리콘 용융; 용해의 중간에 고체화 스테이션들로 피딩되어 시작 실리콘 재료의 순도를 강화하면서 상부 실리콘 (및 저부 실리콘의 포텐셜 드레이닝 (potential draining)) 의 슬래그화; 및 용융 용기 (300) 가 용융된 공급재료 (305) 와 평형을 이루게 하여 더 이상 현저한 불순물 소스가 되지 않게 하는 것을 포함한다.

[0095] 따라서, 위에서 기술한 방법 중 하나에 의해 잉곳 (260 또는 280) 을 캐스팅한 후, 예를 들어, 본 발명에 따르

면, 잉곳의 저부나 다른 섹션을 절단하고, 단결정 실리콘, 준-단결정 실리콘, 또는 기하학적 다결정 실리콘의 바디를 형성하도록 후속 캐스팅에서 단결정 시드로서 그것을 사용하여 이렇게 만들어진 캐스트 잉곳을 더 처리할 수 있고, 여기서 이러한 단결정 시드의 사이즈 및 형상은 후속 캐스팅 실시에서 사용되는 도가니의 저부와 동일한 사이즈 및 형상이고, 잉곳의 나머지는 광전지로 프로세싱하기 위한 블릭들 및 웨이퍼로 절단될 수 있다.

다른 방법으로, 예를 들어, 미래의 캐스팅 실시들을 위해 다수의 캐스팅 스테이션들 내의 시드 결정들로서 사용하는 수평 슬라브들로서 전체 잉곳을 절단할 수 있다.

[0096] 본 발명의 실시형태들에 따른 프로세스들에 사용되는 실리콘 공급재료는 다음을 포함하는 리스트에서 선택되는 것과 같은 하나 이상의 도펀트들을 함유할 수 있다: 보론, 알루미늄, 리튬, 갈륨, 인, 안티몬, 비소, 및 비스무스. 이러한 도펀트의 전체 양은 약 0.01 ppma (parts per million by atomic %) 내지 약 2 ppma 일 수 있다. 바람직하게는, 실리콘 내의 도펀트 양은 실리콘으로부터 만든 웨이퍼가 약 0.1 Ω-cm 내지 약 50 Ω-cm 이고, 바람직하게는 약 0.5 Ω-cm 내지 약 5.0 Ω-cm 인 비저항을 갖는 양이다.

[0097] 따라서, 본 발명에 따르면, 실리콘은 바람직하게 OSF 결함들 및/또는 와류 결함들과 같은 방사상으로 분포된 결함들이 본질적으로 없거나 없는 캐스트 연속 단결정 실리콘, 캐스트 준-단결정 실리콘, 또는 캐스트 연속 기하학적 다결정 실리콘의 바디일 수 있고, 여기서, 바람직하게 바디의 적어도 2 개의 치수들은 적어도 약 10 cm, 바람직하게 적어도 약 20 cm, 더욱 바람직하게 적어도 약 30 cm, 또한 더욱 바람직하게 적어도 약 40 cm, 또한 더욱 바람직하게 적어도 약 50 cm, 또한 더욱 바람직하게 적어도 약 60 cm, 및 가장 바람직하게 적어도 약 70 cm 이다. 가장 바람직하게는, 실리콘의 이러한 바디의 제 3 치수는 적어도 약 5 cm 이고, 바람직하게는 적어도 약 15 cm 이며, 가장 바람직하게는 적어도 약 20 cm 이다. 실리콘의 바디는 단일 바디로서 하나의 개별 조각일 수 있거나, 전체적으로 또는 부분적으로 다른 실리콘 내에 의해 수용되거나 이에 의해 포위될 수 있다. 실리콘의 바디는 각각 캐스팅 용기의 내부 치수들만큼 큰 적어도 2 개의 치수들을 갖고 형성될 수 있는 것이 바람직하다. 본 명세서에서 개시된 바와 같이, 발명의 실시형태들은 단순하고 효율적 비용의 캐스팅 프로세스에 의해 단결정 실리콘, 준-단결정 실리콘, 또는 기하학적 다결정 실리콘의 큰 바디들을 생산하는데 사용될 수 있다.

[0098] 다음은 본 발명의 실시형태들에 따른 실험적 결과들의 예시들이다. 이들 예시들은 본 발명의 실시형태들을 단지 예시하고 설명하기 위해 나타내고 이 방식으로 발명의 범위를 제한하는 것으로서 해석되어서는 안 된다.

[0099] 실시예 1

[0100] 시드 준비: MEMC 사로부터 얻고, 보론 0.3 ppma 를 갖는 순수 초크랄스키 (CZ) 실리콘 (단결정) 의 불은 측면당 14 cm 로 가리키는 정방형 단면을 갖도록 다이아몬드가 코팅된 밴드 쏘우를 이용하여 그 길이에 따라 절단되었다. 이렇게 만들어진 단결정 실리콘 블록은 약 2 cm 내지 약 3 cm 인 두께를 갖는 슬라브들로 동일한 쏘우를 이용하여 그 단면으로 절단되었다. 이들 슬라브들은 단결정 실리콘 시드 결정들, 또는 "시드" 로서 사용되었다. 실리콘 불에 대한 (100) 결정학적 극 배향을 유지시켰다. 이후, 슬라브들의 (100) 방향이 정면이 위로 가고, 도가니의 일 측면에 평행하게 (110) 방향이 유지되도록 석영 도가니의 저부에 이렇게 만들어진 단결정 실리콘 슬라브들을 배열시켰다. 석영 도가니는 일 측면이 68 cm 인 정방형 단면, 약 40 cm 인 깊이, 및 약 1.8 cm 인 벽 두께를 가졌다. 슬라브들은 도가니의 저부와 평행인 그 긴 치수, 및 도가니의 저부 상에 이러한 슬라브들의 단일, 완전한 일 층을 형성하도록 접촉하는 자신의 측면들을 갖고 도가니의 저부에 배열되었다.

[0101] 캐스팅: 이후 도가니에는 실온에서 전체 질량 265 kg 까지 고체 실리콘 공급재료를 채웠다. 그 후, 채워진 도가니는 다결정 실리콘을 캐스팅하는데 사용되는 인-시튜 용융/방향성 고체화 캐스팅 스테이션으로 로딩되었다. 용융 프로세스는 약 1550 ℃ 까지 저항성 히터들을 가열시켜 실시되었고, 그 히터들은 6 cm 인 전체 절연을 개방시켜, 열이 저부 밖으로 방사되게 하면서 상부에서 가열이 도달하도록 구성되었다. 이 구성은 도가니의 저부로 향하는 탑-다운 방향으로 진행하는 용융을 야기하였다. 써모커플에 의해 모니터링됨에 따라, 저부를 통한 수동형 냉각은 용융 온도에서 고체 상태로 시드 결정들을 유지시키도록 하였다. 용융의 범위는 십 분마다 용융 내로 내려진 석영 딥 로드에 의해 측정되었다. 딥 로드 높이는 남은 고체 재료의 높이를 결정하도록 스테이션 내의 빈 도가니에 취해진 측정과 비교되었다. 딥 로드 측정에 의해, 우선 공급재료가 용융되었고, 이후 용융 상태는 남아있던 시드 결정들의 약 1.5 cm 인 높이까지만 계속되게 허용되었다.

여기서, 12 cm 까지 절연을 개방시켜 저부에서의 방사를 증가시키면서 1500 ℃ 인 온도 설정까지 가열 전력을 떨어뜨렸다. 시드 결정들은 딥-로드 측정에 의해 관찰되는 바와 같이, 고체화 시작 전에 추가적 1 mm 또는 2 mm 용융되었다. 이후, 시딩된 단결정 성장은 고체화 단계의 종래까지 진행되었다. 성장 스테이지

및 캐스팅 사이클의 나머지는 상부-저부 열 기울기가 평행이 되었던 곳에서 보통의 파라미터들을 가지고 수행되었고, 이후 실온까지 전체 잉곳을 천천히 냉각시켰다. 캐스트 실리콘 제품은 66 cm × 66 cm × 24 cm 잉곳이었고, 50 cm × 50 cm 인 치수를 나타내는 수평적인 정방형 단면을 갖는 그 중앙 부분은 상부에서 저부로의 단결정 실리콘이었다. 단결정 실리콘 구조는 잉곳의 표면의 시각적 검사로부터 분명히 알 수 있었다. 선택적으로, 그레인 경계들을 묘사할 수 있는 부식성 제조법을 갖는 실리콘의 에칭은 재료에서의 그레인 경계들의 결핍을 더 확인시켰다. 벌크 도핑 평균은 1.2 Ω-cm 이었고, 본 실리콘에서 제조된 광전지는 16.0% 인 전기적 효율성을 가졌다.

[0102] 본 실시예에 따라 수행된 다른 캐스팅 실시들에서는, 캐스트 실리콘 제품이 다른 결정 배향들인 보다 작은 실리콘 결정들을 수용한 실리콘에 대해 인접하게 결합하는 결정이나, 다결정 실리콘의 인접한 영역들을 가진 단결정 실리콘의 바디였음이 관찰되었다.

[0103] 실시예 2

[0104] 시드 준비: 시딩은 (110) 방향이 절반의 시드들에 대해 정방형 시드들의 측면으로부터 45 도에 있으나, 다른 절반이 약 20 도의 각도를 갖도록 단결정 실리콘 시드들이 절단되었다는 점을 제외하고 실시예 1 에서와 같이 달성되었다. 정방형 조각들은 2 개의 상이한 시드 배향들, 즉 (110) 방향이 도가니 측면들의 배향으로부터 45 도 및 20 도의 각도를 교대하는 체커보드 (checkerboard) 방식으로 도가니의 저부에서 층을 이뤘다. 서로에 관하여, 시드들은 25 도 또는 155 도의 오배향 중 어느 하나를 가졌다. 그러나, 정방형 형상 시드들의 사이즈 미스매치에 의해, 시딩층의 일부 갭들은 피복되지 않은 채로 남았다. 도가니는 정방형 측면들의 각각에 대해 약 33 cm 이고 약 22 cm 높이를 가리켰다.

[0105] 캐스팅: 시드들을 수용한 도가니 및 전체 65 kg 인 공급재료 실리콘 청크들을 수용하는 개별 도가니는 UCP (Ubiquitous Casting Process) 2-스테이지 캐스팅 스테이션으로 로딩되었다. (내부에 시드들을 갖는) 수용 도가니는 실리콘의 용융점까지 가열되었으나, 완전하게 용융하는 에너지가 주어지지는 않았다. 다른 도가니 내의 실리콘은 실리콘의 용융 온도와 적어도 50 ℃ 상위인 온도에서 저항 흑연 히터들에 의해 용융되었고, 이후 수용 도가니 내로 부어졌다. 여기서, 방향성 고체화 및 시딩된 결정 성장에 영향을 주기 위해 수용 도가니의 저부로부터 열이 추출되면서 고체화는 바로 시작되었다. 표준 성장 사이클은 시드들이 구성한 이미 고체화된 재료의 질량을 차지하도록 짧아졌다. 이 방식에서는, 냉각 프로세스가 시작하기 전에 고체화하기 위한 모든 66 kg (10kg 의 시드 및 56 kg 의 공급재료 실리콘) 에 대한 시간을 허용하는 대신에, 가열 에너지의 낭비를 회피하도록 용융된 실리콘의 56 kg 에 대한 시간만을 제공하였다. 본 프로세스에 대한 제품은 형성되는 원래 시드 결정 치수들 중 상부 표면에 가깝게 남아있던 형상 및 치수들을 갖는 정방형 단면을 구비한 크고, 일반적으로 컬럼형 그레인을 갖는 실리콘 잉곳이었다. 측면 그레인 경계 위치들은 성장이 진행됨에 따라 일부 경우에 벗어났다.

[0106] 실시예 3

[0107] 시드 준비: 시딩은 63 cm × 63 cm 인 커버리지 면적 및 중앙의 3 cm 에서 측면의 1.8 cm 까지 변동하는 두께를 제공하는, 도가니의 저부를 정렬시키는데 사용되는 23kg 의 정방형 (100) 플레이트들로 달성되었다. 모든 플레이트들은 도가니의 벽들에서 45° 에서 그들의 (110) 방향들을 갖고 배열되었다.

[0108] 캐스팅: 시드들을 수용하는 도가니는 진성 실리콘, 이전의 잉곳들로부터 재활용된 실리콘, 및 9 Ω-cm 보다 큰 p-형 비저항을 갖는 이중-캐스트 실리콘의 혼합으로 표시되는, 선택적으로 전체 242 kg 인 공급재료 실리콘 청크들로 채워졌다. 도가니 내의 실리콘의 투입은 일-스테이지 방향성 고체화 노 내로 로딩되었다. 12 cm 까지 절연을 개방하여 저부를 냉각시키면서 (내부에 시드들을 갖는) 도가니를 1550 ℃ 인 온도까지 가열하였다. 고체-액체 계면은 용융 종료 시에 시드의 어느 부분도 완전히 용융되지는 않도록 용융 동안 실질적으로 평탄하게 유지되었다. 실리콘의 두께는 석영 딥 로드의 사용에 의해 모니터링되었다. 중심 두께가 2.5 cm 으로 가리킨 경우, 용융 스테이지는 정지되었고, 히터 온도는 1440 ℃ 까지 강하하였으며, 절연 높이는 15 cm 까지 증가되었다. 용융 상태 변화의 시작으로부터, 온도 증가율은 도가니의 외부 표면에서 측정되는 경우, 도가니 내의 어딘가에서 실리콘의 용융 온도에 도달한 후, 0.1 ℃/분 이하로 유지되었다. 그 후, 고체화 프로세스의 나머지는 결정 성장의 종료가 관찰되었을 때까지 유지되는 히터에 대해 대략 일정한 전력을 갖고 진행되게 하였다. 성장의 종료 후, 결정화된 실리콘 잉곳의 온도는 고르게 되었고, 이후 실온까지 균일하게 낮아졌다. 도가니에서 잉곳을 제거한 후, 잉곳의 저부는 다른 후속 캐스팅 프로세스의 시드로서 이후에 재사용하기 위해 하나의 큰 조각으로 절단되었고, 잉곳의 나머지는 추가 프로세싱을 위해 12.5 cm 정방형 블릭들로 절단되었다. 프로세스는 실질적으로 전체 시드층 단면 상부에 단결정 성장을 생기게 하는데 성공하였고, 잉

곳의 상부까지 통과해 진행되었다. 단결정도 (monocrystallinity) 는 그 절단된 실리콘의 검사로부터 분명히 알 수 있었다.

[0109] 본 실시예에 따라 수행된 다른 캐스팅 실시들에서는, 캐스트 실리콘 제품이 다른 결정 배향들인 보다 작은 실리콘 결정들을 수용한 실리콘에 대해 인접하게 결합하는 결정이나, 다결정 실리콘의 인접한 영역들을 가진 단결정 실리콘의 바디였음이 관찰되었다.

[0110] 본 발명의 실시형태들에 따른 실리콘으로부터 만든 웨이퍼들은 적절히 얇고, 광전지에 사용될 수 있다. 또한, 웨이퍼들은 n-형 또는 p-형일 수 있다. 예를 들어, 웨이퍼들은 약 10 마이크론 두께 내지 약 700 마이크론 두께일 수 있다. 또한, 광전지에 사용되는 웨이퍼는 웨이퍼 두께 (t) 보다 큰 확산 길이 (L_p) 를 갖는 것이 바람직하다. 예를 들어, L_p 대 t 의 비율은 적절히 적어도 0.5 이다. 이것은, 예를 들어, 적어도 약 1.1 또는 적어도 2 일 수 있다. 확산 길이는 (p-형 재료에서 전자들과 같은) 소수 캐리어들이 다수 캐리어들 (p-형 재료에서 홀) 과 재결합하기 전까지의 확산할 수 있는 평균 거리이다. L_p 는 관계식 $L_p = (D\tau)^{1/2}$ 을 통해 소수 캐리어 라이프 타임 τ 와 관련되고, 여기서 D 는 확산 상수이다. 확산 길이는 광자-빔-유도 전류 기술 (Photon-Beam-Induced Current technique) 또는 표면 광전압 기술 (Surface Photovoltage technique) 과 같은 다수의 기술들에 의해 측정될 수 있다. 확산 길이가 어떻게 측정될 수 있는지에 대한 설명에 대해서는, "Fundamentals of Solar Cells" by A. Fahrenbruch and R. Bube, Academic Press, 1983, pp. 90-102 를 예로서 참조하라.

[0111] 웨이퍼들은 약 100 mm 내지 약 600 mm 인 폭을 가질 수 있다. 바람직하게는, 웨이퍼들은 적어도 약 50 mm 인 적어도 하나의 치수를 갖는다. 본 발명의 실리콘으로부터 만든 웨이퍼들 및 결과적으로 본 발명에 의해 만든 광전지는 예를 들어 약 50 cm^2 내지 약 3600 cm^2 인 표면 면적을 가질 수 있다. 웨이퍼의 전면 표면은 바람직하게 텍스처링된다. 예를 들어, 웨이퍼는 화학적 에칭, 플라즈마 에칭 또는 레이저나 기계적인 스크라이빙을 이용하여 적절히 텍스처링될 수 있다. (100) 극 배향을 갖는 웨이퍼가 사용되는 경우, 약 10 내지 약 120 분 동안 예를 들어, 약 70 ℃ 내지 약 90 ℃ 인 상승된 온도에서 수산화 나트륨과 같은 염기 수용액에 웨이퍼를 처리함으로써 이방성으로 텍스처링된 표면을 형성하도록 웨이퍼는 에칭될 수 있다. 수용액은 이소프로판올과 같은 알코올을 포함할 수도 있다.

[0112] 따라서, 태양 전지들은 적어도 하나의 웨이퍼를 형성하도록 캐스트 실리콘의 고형체를 슬라이싱하고; 선택적으로 웨이퍼의 표면에 세정 절차를 수행하고; 선택적으로 표면 상에 텍스처링 단계를 수행하고; 예를 들어, 표면을 도핑하여 p-n 접합을 형성하고; 선택적으로 표면 상에 반사방지막을 성막하고; 선택적으로 예를 들어, 알루미늄 소결 단계에 의해 후면 표면 필드와 패시베이팅층중에서 선택되는 적어도 하나의 층을 형성하며; 웨이퍼 상에 도전성 콘택들을 형성함으로써 본 발명의 실시형태들을 따른 캐스트 실리콘 잉곳들에서 생산된 웨이퍼를 이용하여 제조될 수 있다. 패시베이팅 층은 표면 원자들의 댕글링 본드들에 매달린 베어 웨이퍼 (bare wafer) 표면과의 인터페이스를 갖는 층이다. 실리콘 상의 패시베이팅 층들의 실시예들은 실리콘 질화물, 실리콘 이산화물 및 비정질 실리콘을 포함한다. 이 패시베이팅층은 일반적으로 1 마이크론보다 얇고, 빛에 대해 투명하거나 반사방지층으로서 작용한다.

[0113] 예를 들어, p-형 실리콘 웨이퍼를 이용하는 광전지를 준비하는 통상 및 일반적 프로세스에서는 적합한 n-도펀트로 일 측의 웨이퍼를 노광하여 전면에 에미터층과 p-n 접합 또는 웨이퍼의 수광측 (light-receiving side) 을 형성한다. 통상, 화학적 또는 물리적 증착과 같은 공통으로 채용된 기술을 이용하여 p-형 웨이퍼의 전면 표면에 n-도펀트를 우선 퇴적함으로써 n-형 층 또는 에미터층을 형성하고, 이러한 퇴적 후, 실리콘 웨이퍼의 전면 표면으로 n-도펀트, 예를 들어, 인을 주입시켜 웨이퍼 표면으로 n-도펀트를 추가로 확산시킨다. 이 "주입 (drive-in)" 단계는 높은 온도에 웨이퍼를 노광함으로써 공통으로 달성된다. 그것에 의해, p-n 접합은 n-형 층과 p-형 실리콘 웨이퍼 기판 간의 경계 영역에 형성된다. 에미터층을 형성하기 위한 인 또는 다른 도핑 전에 웨이퍼 표면은 텍스처링될 수 있다. 추가로 광 흡수를 개선하기 위하여, 실리콘 질화물과 같은 선택적 반사방지막은 통상 웨이퍼의 전면에 적용되어, 때로 동시에 표면 및/또는 벌크 패시베이션을 제공할 수 있다.

[0114] 광 에너지로 p-n 접합을 노광하여 생성된 전위를 이용하기 위하여, 광전지는 통상 웨이퍼의 정면에 전도성 전면 콘택 및 웨이퍼의 후면에 전도성 후면 콘택이 제공되나, 양 콘택들은 웨이퍼의 후면 상에 있을 수 있다. 이러한 콘택들은 통상 하나 이상의 높은 전도성 금속들로 이루어지고, 따라서 통상 불투명하다.

[0115] 따라서, 위에서 기술된 실시형태들에 따른 태양 전지는 방사상으로 분포된 결함들이 없거나 실질적으로 없는 연

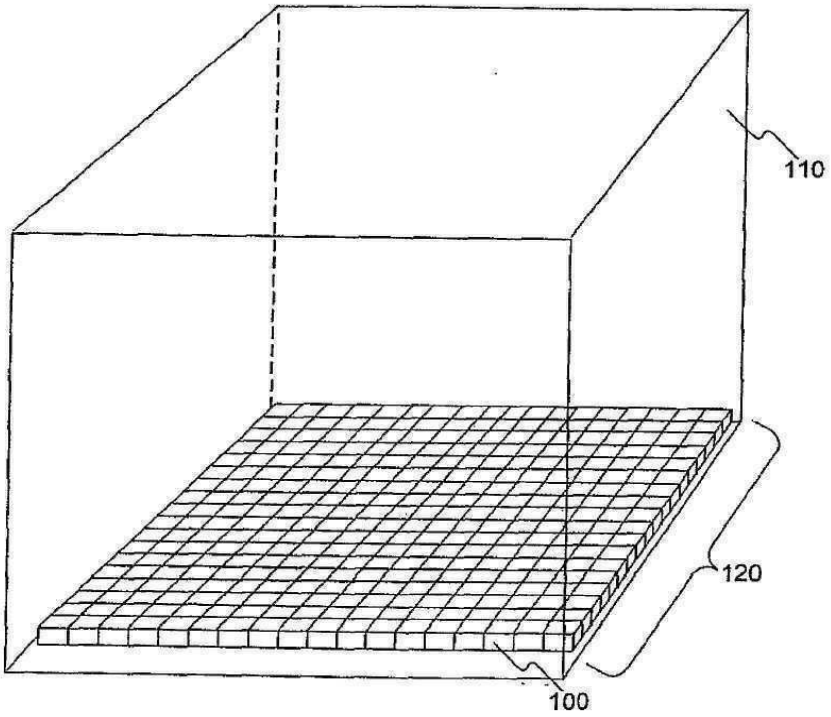
속 단결정 실리콘이나 준-단결정 실리콘의 바디로부터 형성된 웨이퍼로서, 웨이퍼는 이상에서 서술된 바와 같이, 예를 들어, 각각 적어도 약 25 cm 인 적어도 2 개의 치수들 및 적어도 약 20 cm 인 제 3 치수를 갖는, 웨이퍼; 웨이퍼 내의 p-n 접합; 선택적인 웨이퍼의 표면상에 반사방지막; 바람직하게 후면 표면 필드와 패시베이팅층중에서 선택되는 적어도 하나의 층; 및 웨이퍼 상의 도전성 콘택들을 포함하고, 바디는 와류 결함들이 없거나 실질적으로 없고, OSF 결함들이 없거나 실질적으로 없을 수도 있다.

[0116] 또한, 위에서 기술된 실시형태들에 따른 태양 전지들은 연속 기하학적 다결정 실리콘의 바디로부터 형성되는 웨이퍼로서, 바디는 바람직하게는 바디의 표면과 수직인 공통 극 방향을 갖는, 그레인 배향들의 미리 결정된 배열을 갖고, 또한 각각 바람직하게 적어도 약 10 cm 인 적어도 2 개의 치수를 갖는 웨이퍼; 웨이퍼 내의 p-n 접합; 선택적인 웨이퍼의 표면 상의 반사방지막; 바람직하게는 후면 표면 필드와 패시베이팅층중에서 선택되는 적어도 어느 일층; 및 웨이퍼 상의 도전성 콘택들을 포함하고, 기하학적 다결정 실리콘은 약 0.5 cm 내지 약 30 cm 인 평균 결정 그레인 단면 사이즈를 갖는 실리콘 그레인들을 포함하고, 바디는 와류 결함들이 없거나 실질적으로 없고 OSF 결함들이 없거나 실질적으로 없을 수도 있다.

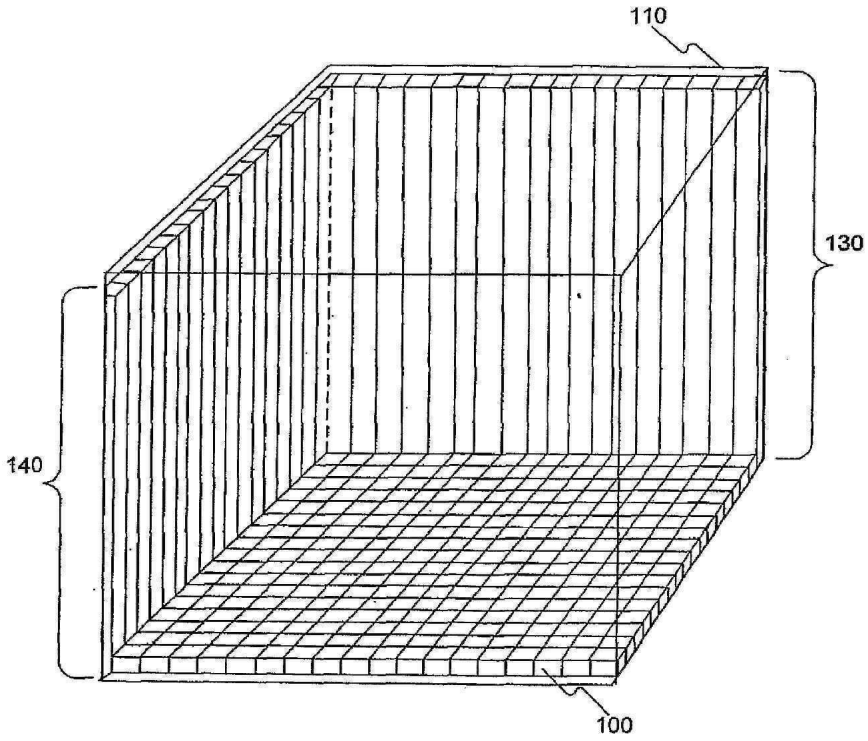
[0117] 당업자에게는 본 발명의 범위나 사상을 벗어남 없이 개시된 구조들 및 방법들의 다양한 변경들 및 변화들이 행해질 수 있음이 명백하다. 또한, 예를 들어, 단결정 실리콘을 형성하는 것과 관련되는 개시된 프로세스들 및 방법들은 준-단결정 실리콘 또는 이들의 조합을 형성하는데 적용 가능하다. 또한, 본 명세서에서는 실리콘 캐스팅이 기술되었으나, 다른 반도체 재료들 및 비금속 결정 재료들도 본 발명의 범위 및 사상에 벗어남 없이 캐스팅할 수도 있다. 예를 들어, 발명자는 갈륨 비화물 (gallium arsenide), 실리콘 게르마늄 (silicon germanium), 알루미늄 산화물 (aluminum oxide), 갈륨 질화물 (gallium nitride), 아연 산화물 (zinc oxide), 아연 황화물 (zinc sulfide), 갈륨 인듐 비화물 (gallium indium arsenide), 인듐 안티몬화물 (indium antimonide), 게르마늄 (germanium), 이트늄 바륨 산화물 (yttrium barium oxides), 란탄족 산화물 (lanthanide oxides), 마그네슘 산화물 (magnesium oxide), 및 다른 반도체들, 산화물들, 및 액상을 갖는 금속간 화합물들 (intermetallics) 과 같은, 본 발명의 실시형태들에 따른 다른 재료들의 캐스팅을 예기하였다. 당업자에게는 본 발명의 다른 실시형태들이 본 명세서에 개시된 발명의 상세한 설명 및 실시에 대한 고려로부터 명백하다. 상세한 설명 및 실시예들은 예시로서만 고려되고, 본 발명의 실제 범위와 사상은 다음의 청구범위에 의해 나타내지는 것으로 의도된다.

도면

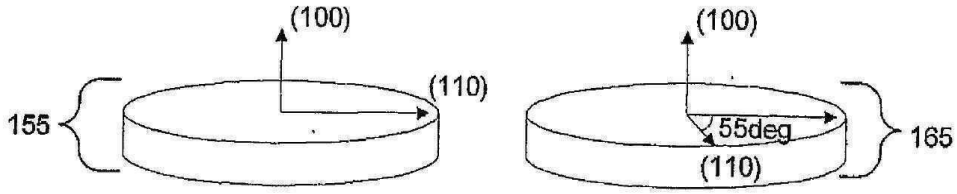
도면1



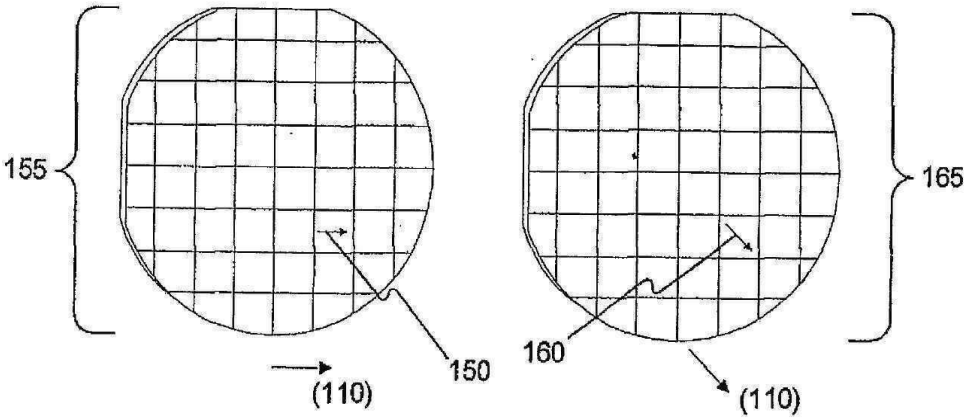
도면2



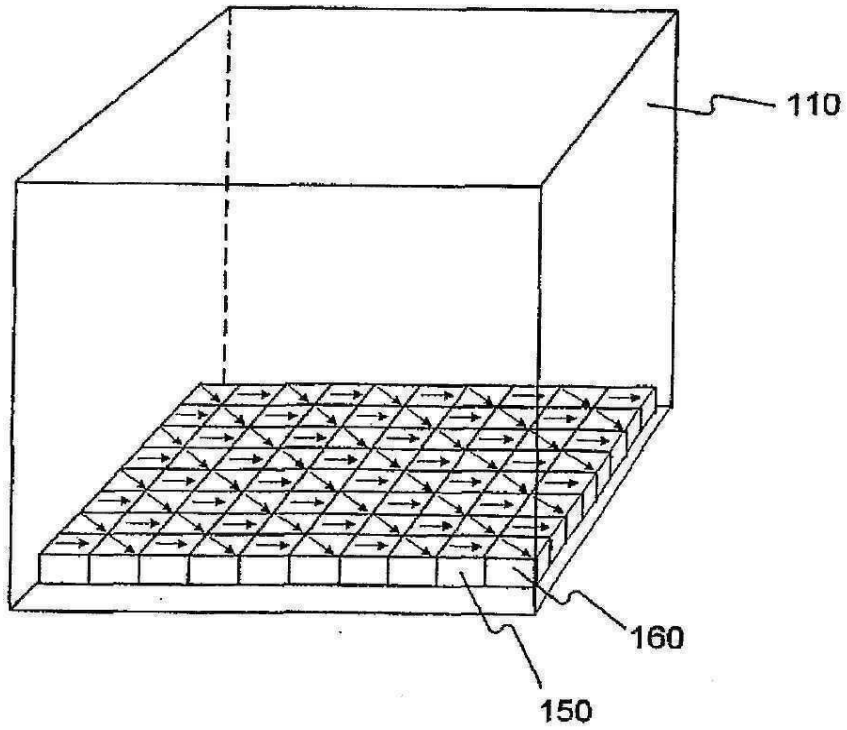
도면3a



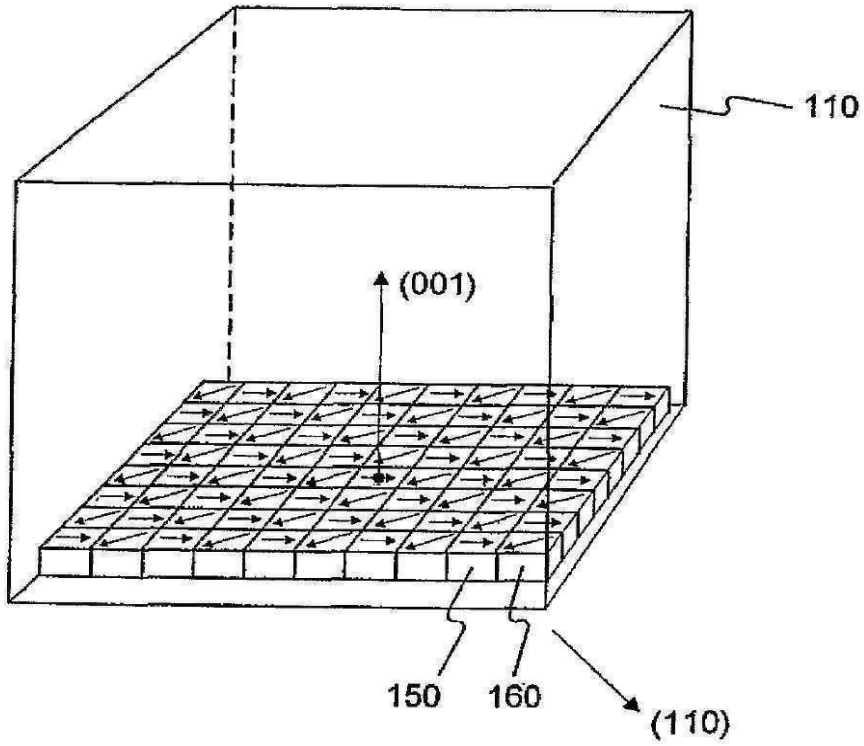
도면3b



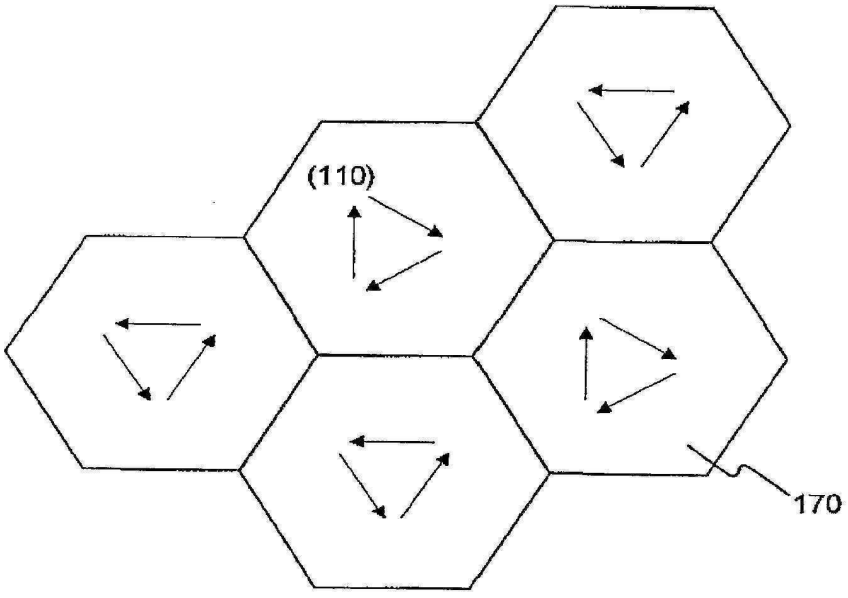
도면3c



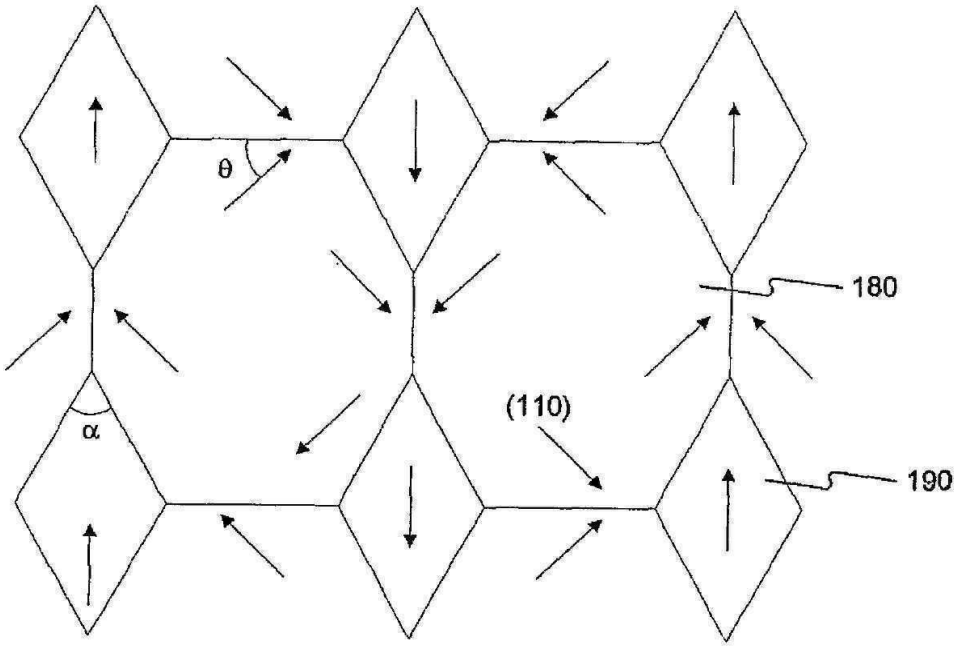
도면4



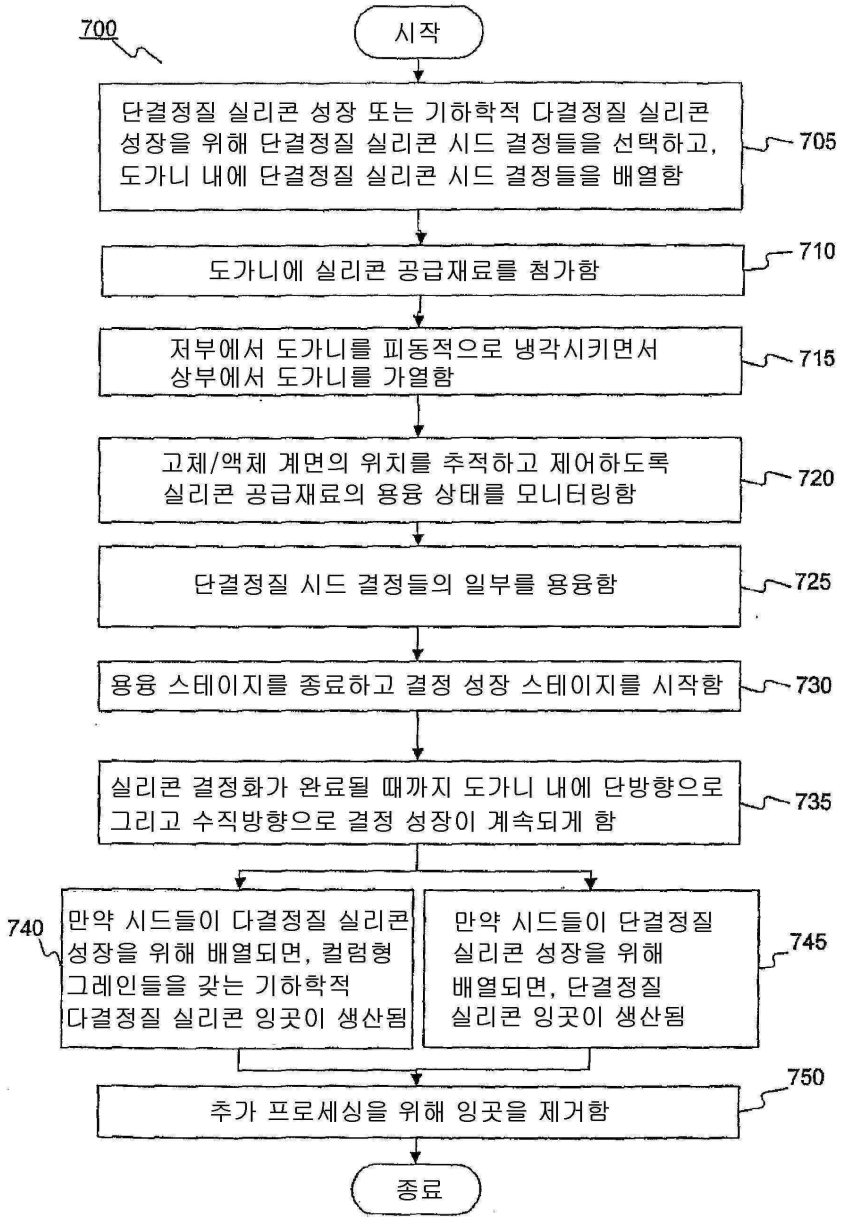
도면5



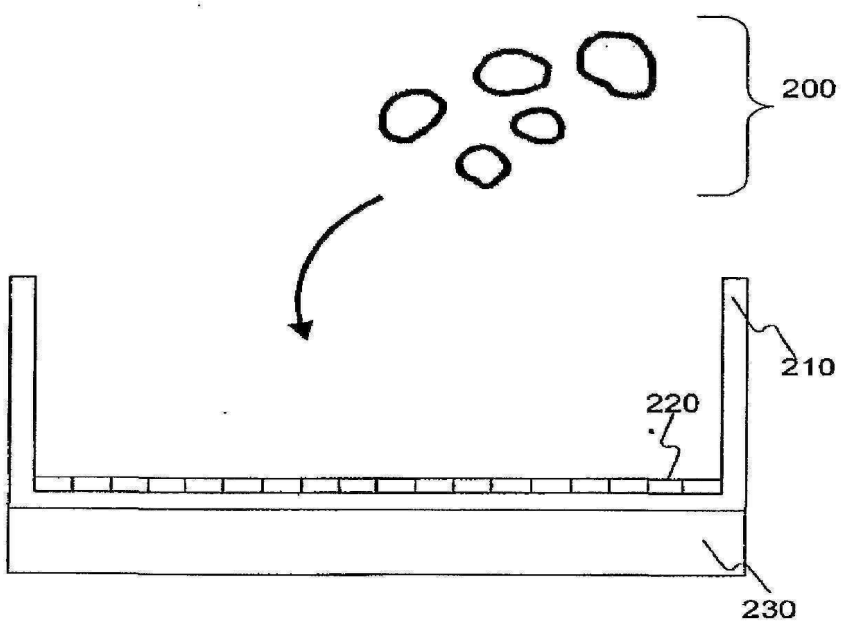
도면6



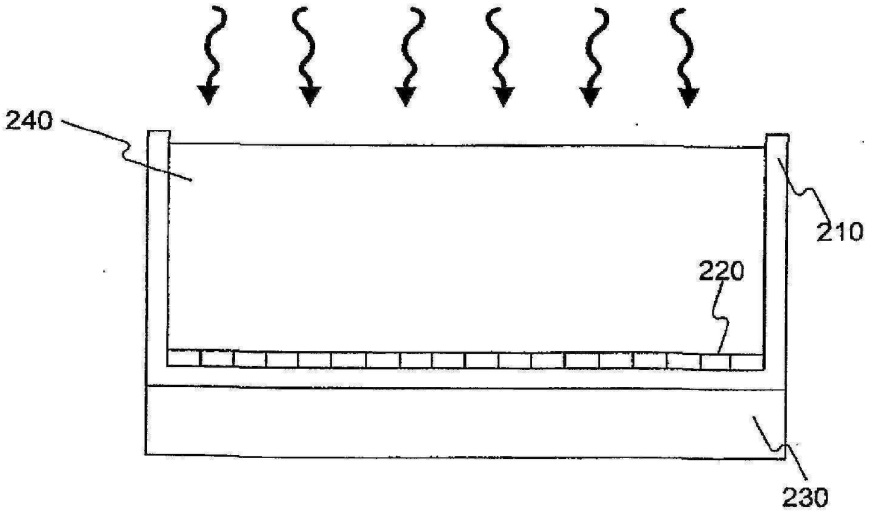
도면7


700
시작
단결정질 실리콘 성장 또는 기하학적 다결정질 실리콘 성장을 위해 단결정질 실리콘 시드 결정들을 선택하고, 도가니 내에 단결정질 실리콘 시드 결정들을 배열함
705
도가니에 실리콘 공급재료를 첨가함
710
저부에서 도가니를 피동적으로 냉각시키면서 상부에서 도가니를 가열함
715
고체/액체 계면의 위치를 추적하고 제어하도록 실리콘 공급재료의 용융 상태를 모니터링함
720
단결정질 시드 결정들의 일부를 용융함
725
용융 스테이지를 종료하고 결정 성장 스테이지를 시작함
730
실리콘 결정화가 완료될 때까지 도가니 내에 단방향으로 그리고 수직방향으로 결정 성장이 계속되게 함
735
740
만약 시드들이 다결정질 실리콘 성장을 위해 배열되면, 컬럼형 그레인들을 갖는 기하학적 다결정질 실리콘 잉곳이 생산됨
만약 시드들이 단결정질 실리콘 성장을 위해 배열되면, 단결정질 실리콘 잉곳이 생산됨
745
추가 프로세싱을 위해 잉곳을 제거함
750
종료

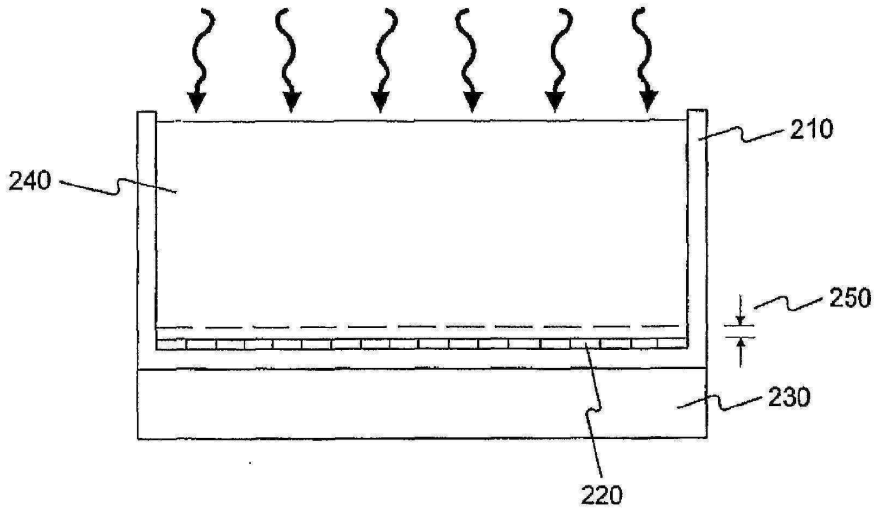
도면8a



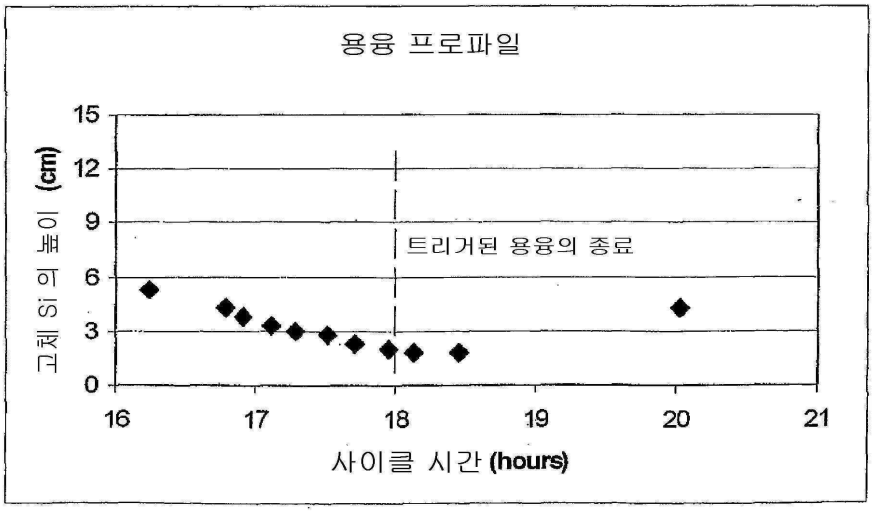
도면8b



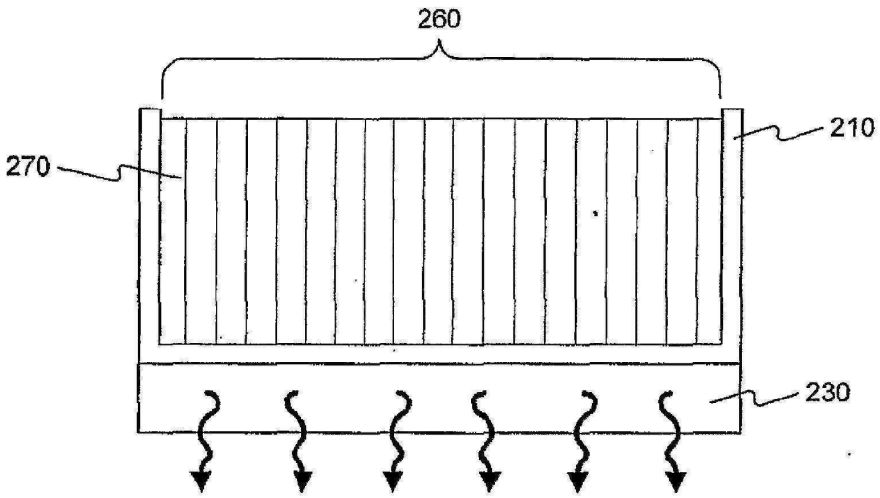
도면8c



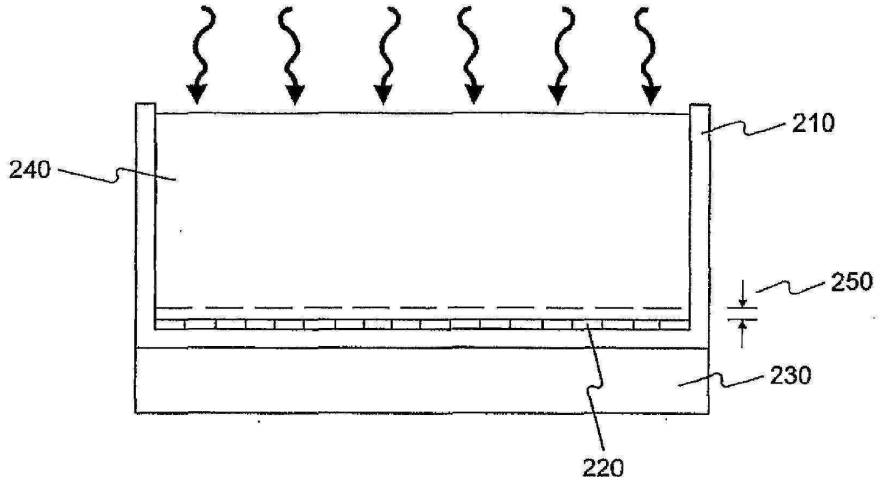
도면8d



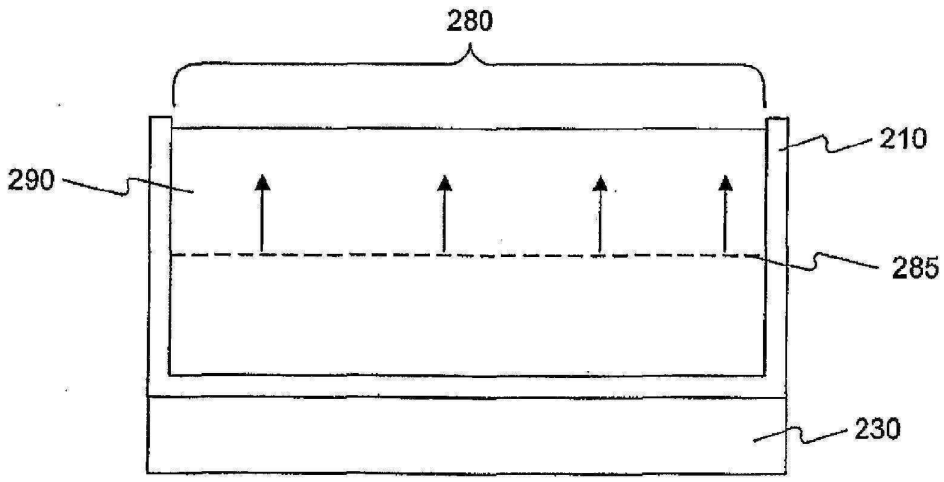
도면8e



도면8f



도면8g



도면9

