



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2015-0103703

(43) 공개일자 2015년09월11일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

H01L 31/0288 (2006.01) C30B 15/04 (2006.01)

C30B 15/20 (2006.01) C30B 29/06 (2006.01)

H01L 31/0216 (2014.01) H01L 31/18 (2006.01)

(52) CPC특허분류

H01L 31/0288 (2013.01)

C30B 15/04 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2015-7020520

(22) 출원일자(국제) 2013년12월27일

심사청구일자 없음

(85) 번역문제출일자 2015년07월28일

(86) 국제출원번호 PCT/US2013/078056

(87) 국제공개번호 WO 2014/106086

국제공개일자 2014년07월03일

(30) 우선권주장

TO2012A001175 2012년12월31일 이탈리아(IT)

(뒷면에 계속)

(71) 출원인

엠이엠씨 일렉트로닉 머티리얼스 쏘시에떼 페 아
찌오니

이탈리아공화국, 아이-28100 노바라, 비알레 게르
찌 31

(72) 발명자

아펠, 제시 삼소노브

미국 63376 미주리주 세인트 피터스 펄 드라이브
501

빈스, 마틴 제프리

미국 63376 미주리주 세인트 피터스 펄 드라이브
501

(뒷면에 계속)

(74) 대리인

양영준, 백만기, 정은진

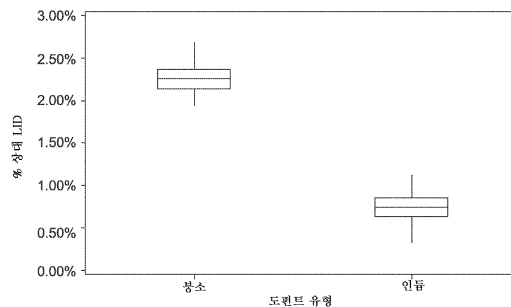
전체 청구항 수 : 총 56 항

(54) 발명의 명칭 인듐 도핑된 실리콘 웨이퍼 및 이를 사용한 태양 전지

(57) 요약

초크랄스키법(Czochralski method)에 의해 성장된 잉곳으로부터 슬라이싱된 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼로부터 제작된 태양 전지가 제공된다. 태양 전지는 높은 효율 및 낮은 광 유도 열화(light induced degradation)를 갖는 것을 특징으로 한다.

대표도



(52) CPC특허분류

C30B 15/20 (2013.01)
C30B 29/06 (2013.01)
H01L 31/02168 (2013.01)
H01L 31/182 (2013.01)
H01L 31/186 (2013.01)
Y02E 10/50 (2013.01)

(72) 발명자

스칼라, 로베르토

이탈리아 아이-28100 노바라 비알레 게르지 31 엠
이엠씨 일렉트릭 머티리얼스 쏘시에페 퍼 아찌오니
내

보난노, 루이지

이탈리아 아이-28100 노바라 비알레 게르지 31 엠
이엠씨 일렉트로닉 머티리얼스 쏘시에페 퍼 아찌오
니 내

하린게르, 스테판

이탈리아 아이-28100 노바라 비알레 게르지 31 엠
이엠씨 일렉트로닉 머티리얼스 쏘시에페 퍼 아찌오
니 내

기안나타시오, 아르만도

이탈리아 아이-28100 노바라 비알레 게르지 31 엠
이엠씨 일렉트로닉 머티리얼스 쏘시에페 퍼 아찌오
니 내

모세르, 발렌티노

이탈리아 아이-28100 노바라 비알레 게르지 31 엠
이엠씨 일렉트로닉 머티리얼스 쏘시에페 퍼 아찌오
니 내

(30) 우선권주장

PCT/EP2013/054878 2013년03월11일
유럽특허청(EPO)(EP)
PCT/EP2013/054875 2013년03월11일
유럽특허청(EPO)(EP)
61/838,660 2013년06월24일 미국(US)

명세서

청구범위

청구항 1

태양 전지로서

초크랄스키법(Czochralski method)에 의해 성장된 잉곳으로부터 슬라이싱된 인듐 도핑된 단결정 실리콘(silicon) 웨이퍼를 포함하고,

1.5의 절대 공기 질량(absolute air mass) 하에 상기 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼의 표면 상의 태양 스펙트럼 방사조도(solar spectral irradiance)를 변환하는 효율이 적어도 17%인 태양 전지.

청구항 2

제1항에 있어서, 1.5의 절대 공기 질량 하에 상기 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼의 표면 상의 태양 스펙트럼 방사조도를 변환하는 효율이 적어도 18%인 태양 전지.

청구항 3

제1항에 있어서, 1.5의 절대 공기 질량 하에 상기 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼의 표면 상의 태양 스펙트럼 방사조도를 변환하는 효율이 적어도 19%인 태양 전지.

청구항 4

제1항에 있어서, 1.5의 절대 공기 질량 하에 상기 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼의 표면 상의 태양 스펙트럼 방사조도를 변환하는 효율이 적어도 19.5%인 태양 전지.

청구항 5

제1항에 있어서, 1.5의 절대 공기 질량 하에 상기 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼의 표면 상의 태양 스펙트럼 방사조도를 변환하는 효율이 적어도 20%인 태양 전지.

청구항 6

제1항에 있어서, 1.5의 절대 공기 질량 하에 상기 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼의 표면 상의 태양 스펙트럼 방사조도를 변환하는 효율이 적어도 20.5%인 태양 전지.

청구항 7

제1항에 있어서, 1.5의 절대 공기 질량 하에 상기 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼의 표면 상의 태양 스펙트럼 방사조도를 변환하는 효율이 적어도 21%인 태양 전지.

청구항 8

제1항에 있어서, 1.5의 절대 공기 질량 하에 상기 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼의 표면 상의 태양 스펙트럼 방사조도를 변환하는 효율이 적어도 22%인 태양 전지.

청구항 9

제1항에 있어서, 1.5의 절대 공기 질량 하에 상기 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼의 표면 상의 태양 스펙트럼 방사조도를 변환하는 효율이 적어도 24%인 태양 전지.

청구항 10

제1항에 있어서, 1.5의 절대 공기 질량 하에 상기 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼의 표면 상의 태양 스펙트럼 방사조도를 변환하는 효율이 적어도 26%인 태양 전지.

청구항 11

제1항에 있어서, 1.5의 절대 공기 질량 하에 상기 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼의 표면 상의 태양 스펙트럼 방사조도를 변환하는 효율이 적어도 28%인 태양 전지.

청구항 12

제1항에 있어서, 1.5의 절대 공기 질량 하에 상기 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼의 표면 상의 태양 스펙트럼 방사조도를 변환하는 효율이 적어도 30%인 태양 전지.

청구항 13

제1항에 있어서, 상기 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼가 약 10 ohm-cm 미만의 평균 벌크 저항률(average bulk resistivity)을 갖는 것인 태양 전지.

청구항 14

제1항에 있어서, 상기 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼가 약 5 ohm-cm 미만의 평균 벌크 저항률을 갖는 것인 태양 전지.

청구항 15

제1항에 있어서, 상기 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼가 약 4 ohm-cm 미만의 평균 벌크 저항률을 갖는 것인 태양 전지.

청구항 16

제1항에 있어서, 상기 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼가 약 3 ohm-cm 미만의 평균 벌크 저항률을 갖는 것인 태양 전지.

청구항 17

제1항에 있어서, 상기 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼가 약 1 ohm-cm 미만의 평균 벌크 저항률을 갖는 것인 태양 전지.

청구항 18

제1항에 있어서, 상기 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼가 약 0.5 ohm-cm 미만의 평균 벌크 저항률을 갖는 것인 태양 전지.

청구항 19

제1항에 있어서, 상기 태양 전지의 상대 효율이 45℃ 미만의 온도에서 0.1 sun 내지 10 sun에 상당하는 광에 1 시간 내지 300시간 노출 후에 약 2% 이하 만큼 열화되는 것인 태양 전지.

청구항 20

제1항에 있어서, 상기 태양 전지의 상대 효율이 45℃ 미만의 온도에서 0.1 sun 내지 10 sun에 상당하는 광에 1 시간 내지 300시간 노출 후에 약 1% 이하 만큼 열화되는 것인 태양 전지.

청구항 21

제1항에 있어서, 상기 태양 전지의 상대 효율이 45℃ 미만의 온도에서 0.7 sun에 상당하는 광에 24시간 노출 후에 약 2% 이하 만큼 열화되는 것인 태양 전지.

청구항 22

제1항에 있어서, 상기 태양 전지의 상대 효율이 45℃ 미만의 온도에서 0.7 sun에 상당하는 광에 24시간 노출 후에 약 1% 이하 만큼 열화되는 것인 태양 전지.

청구항 23

제1항에 있어서, 상기 태양 전지의 절대 효율이 45℃ 미만의 온도에서 0.1 sun 내지 10 sun에 상당하는 광에 1 시간 내지 300시간 노출 후에 약 0.5% 이하 만큼 열화되는 것인 태양 전지.

청구항 24

제1항에 있어서, 상기 태양 전지의 절대 효율이 45℃ 미만의 온도에서 0.1 sun 내지 10 sun에 상당하는 광에 1 시간 내지 300시간 노출 후에 약 0.2% 이하 만큼 열화되는 것인 태양 전지.

청구항 25

제1항에 있어서, 상기 태양 전지의 절대 효율이 45℃ 미만의 온도에서 0.1 sun 내지 10 sun에 상당하는 광에 1 시간 내지 300시간 노출 후에 약 0.1% 이하 만큼 열화되는 것인 태양 전지.

청구항 26

제1항에 있어서, 상기 태양 전지의 절대 효율이 45℃ 미만의 온도에서 0.7 sun에 상당하는 광에 24시간 노출 후에 약 0.5% 이하 만큼 열화되는 것인 태양 전지.

청구항 27

제1항에 있어서, 상기 태양 전지의 절대 효율이 45℃ 미만의 온도에서 0.7 sun에 상당하는 광에 24시간 노출 후에 약 0.2% 이하 만큼 열화되는 것인 태양 전지.

청구항 28

제1항에 있어서, 상기 태양 전지의 절대 효율이 45℃ 미만의 온도에서 0.7 sun에 상당하는 광에 24시간 노출 후에 약 0.1% 이하 만큼 열화되는 것인 태양 전지.

청구항 29

제1항에 있어서, 상기 인듐 도핑된 웨이퍼가 동일 저항률의 붕소 도핑된 웨이퍼보다 830 nm 내지 1400 nm의 파장을 갖는 광을 더 많이 흡수하는 것인 태양 전지.

청구항 30

태양 전지로서,

초크랄스키법에 의해 성장된 잉곳으로부터 슬라이싱된 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼를 포함하고,

상기 웨이퍼는 약 10 ohm-cm 미만의 평균 벌크 저항률을 갖고, 상기 태양 전지의 상대 효율은 45℃ 미만의 온도에서 0.1 sun 내지 10 sun에 상당하는 광에 1시간 내지 300시간 노출 후에 약 1% 이하 만큼 열화되는 것인 태양 전지.

청구항 31

제30항에 있어서, 상기 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼가 약 5 ohm-cm 미만의 평균 벌크 저항률을 갖는 것인 태양 전지.

청구항 32

제30항에 있어서, 상기 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼가 약 4 ohm-cm 미만의 평균 벌크 저항률을 갖는 것인 태양 전지.

청구항 33

제30항에 있어서, 상기 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼가 약 3 ohm-cm 미만의 평균 벌크 저항률을 갖는 것인 태양 전지.

청구항 34

제30항에 있어서, 상기 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼가 약 1 ohm-cm 미만의 평균 벌크 저항률을 갖는 것인

태양 전지.

청구항 35

제30항에 있어서, 상기 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼가 약 0.5 ohm-cm 미만의 평균 벌크 저항률을 갖는 것인 태양 전지.

청구항 36

제30항에 있어서, 상기 태양 전지의 절대 효율이 45℃ 미만의 온도에서 0.1 sun 내지 10 sun에 상당하는 광에 1 시간 내지 300시간 노출 후에 약 0.5% 이하 만큼 열화되는 것인 태양 전지.

청구항 37

제30항에 있어서, 상기 태양 전지의 절대 효율이 45℃ 미만의 온도에서 0.1 sun 내지 10 sun에 상당하는 광에 1 시간 내지 300시간 노출 후에 약 0.2% 이하 만큼 열화되는 것인 태양 전지.

청구항 38

제30항에 있어서, 상기 태양 전지의 절대 효율이 45℃ 미만의 온도에서 0.1 sun 내지 10 sun에 상당하는 광에 1 시간 내지 300시간 노출 후에 약 0.1% 이하 만큼 열화되는 것인 태양 전지.

청구항 39

제30항에 있어서, 상기 태양 전지의 절대 효율이 45℃ 미만의 온도에서 0.7 sun에 상당하는 광에 24시간 노출 후에 약 0.5% 이하 만큼 열화되는 것인 태양 전지.

청구항 40

제30항에 있어서, 상기 태양 전지의 절대 효율이 45℃ 미만의 온도에서 0.7 sun에 상당하는 광에 24시간 노출 후에 약 0.2% 이하 만큼 열화되는 것인 태양 전지.

청구항 41

제30항에 있어서, 상기 태양 전지의 절대 효율이 45℃ 미만의 온도에서 0.7 sun에 상당하는 광에 24시간 노출 후에 약 0.1% 이하 만큼 열화되는 것인 태양 전지.

청구항 42

제30항에 있어서, 상기 인듐 도핑된 웨이퍼가 동일 저항률의 붕소 도핑된 웨이퍼보다 830 nm 내지 1400 nm의 파장을 갖는 광을 더 많이 흡수하는 것인 태양 전지.

청구항 43

태양 전지로서,

초크랄스키법에 의해 성장된 잉곳으로부터 슬라이싱된 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼를 포함하고,

상기 웨이퍼는 약 10 ohm-cm 미만의 평균 벌크 저항률을 갖고, 상기 태양 전지의 상대 효율은 45℃ 미만의 온도에서 태양광에 적어도 4시간 노출 후에 약 1% 이하 만큼 열화되는 것인 태양 전지.

청구항 44

중심축, 상기 중심축에 대체로 수직인 전방 표면 및 후방 표면, 상기 전방 표면과 상기 후방 표면 사이에 있고 상기 전방 표면 및 상기 후방 표면에 평행한 중앙 평면, 원주 에지(circumferential edge), 및 상기 중심축으로부터 상기 원주 에지로 연장하는 반경(R)을 갖는 단결정 실리콘 세그먼트로서,

적어도 약 1×10^{15} 원자/세제곱 센티미터의 평균 인듐 농도를 포함하고,

상기 인듐 농도는 적어도 0.75R에 걸쳐 약 15% 이하의 상대 반경방향 분산(relative radial variance)을 갖는 것인 단결정 실리콘 세그먼트.

청구항 45

제44항에 있어서, 상기 인듐 농도가 적어도 0.95R에 걸쳐 약 15% 이하의 상대 반경방향 분산을 갖는 것인 단결정 실리콘 세그먼트.

청구항 46

제44항에 있어서, 상기 인듐 농도가 적어도 0.75R에 걸쳐 약 10% 이하의 상대 반경방향 분산을 갖는 것인 단결정 실리콘 세그먼트.

청구항 47

제44항에 있어서, 상기 평균 인듐 농도가 약 1×10^{15} 원자/세제곱 센티미터 내지 약 1×10^{17} 원자/세제곱 센티미터인 단결정 실리콘 세그먼트.

청구항 48

제44항에 있어서, 상기 단결정 실리콘 세그먼트는 약 11 ppma 내지 약 20 ppma의 산소 농도를 갖는 단결정 실리콘 세그먼트.

청구항 49

제44항에 있어서, 상기 단결정 실리콘 세그먼트는 약 2 ppma 이하의 탄소 농도를 갖는 단결정 실리콘 세그먼트.

청구항 50

약 100 마이크로미터 내지 약 1000 마이크로미터의 두께 및 약 50 mm 내지 약 300 mm의 2개의 주요 치수들을 갖는 단결정 실리콘 웨이퍼로서,

적어도 약 1×10^{15} 원자/세제곱 센티미터의 평균 인듐 농도를 포함하고,

상기 인듐 농도는 상기 2개의 주요 치수들 중 어느 하나의 길이의 적어도 75%에 걸쳐 약 15% 이하의 분산 (variance)을 갖는 것인 단결정 실리콘 웨이퍼.

청구항 51

제50항에 있어서, 약 120 마이크로미터 내지 약 240 마이크로미터의 두께 및 약 100 mm 내지 약 200 mm의 2개의 주요 치수들을 갖고, 상기 인듐 농도가 상기 2개의 주요 치수들 둘 다의 길이의 적어도 75%에 걸쳐 약 15% 이하의 상대 분산을 갖는 것인 단결정 실리콘 웨이퍼.

청구항 52

제50항에 있어서, 상기 인듐 농도가 상기 2개의 주요 치수들 둘 다의 길이의 적어도 95%에 걸쳐 약 15% 이하의 상대 분산을 갖는 것인 단결정 실리콘 웨이퍼.

청구항 53

제50항에 있어서, 상기 인듐 농도가 상기 2개의 주요 치수들 둘 다의 길이의 적어도 75%에 걸쳐 약 10% 이하의 상대 분산을 갖는 것인 단결정 실리콘 웨이퍼.

청구항 54

제50항에 있어서, 상기 평균 인듐 농도가 약 1×10^{15} 원자/세제곱 센티미터 내지 약 1×10^{17} 원자/세제곱 센티미터인 단결정 실리콘 웨이퍼.

청구항 55

제50항에 있어서, 상기 단결정 실리콘 웨이퍼는 약 11 ppma 내지 약 20 ppma의 산소 농도를 갖는 단결정 실리콘 웨이퍼.

청구항 56

제50항에 있어서, 상기 단결정 실리콘 웨이퍼는 약 2 ppma 이하의 탄소 농도를 갖는 단결정 실리콘 웨이퍼.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 관련 출원들에 대한 상호 참조

[0002] 본 출원은 2012년 12월 31일자로 출원된 이탈리아 출원 제TO2012A001175호, 2013년 3월 11일자로 출원된 국제 출원 PCT/EP2013/054878호, 2013년 3월 11일자로 출원된 국제 출원 PCT/EP2013/054875호, 및 2013년 6월 24일자로 출원된 미국 특허출원 제61/838660호에 대해 우선권을 주장하며, 이들 개시는 그 전문이 본원에 참조로 포함된다.

[0003] 기술 분야

[0004] 본 기술분야는 일반적으로 단결정 실리콘(silicon) 웨이퍼들 상에 제작된 태양 전지들의 제조에 관한 것이고, 보다 구체적으로는 초크랄스키(Czochralski) 성장된 단결정 실리콘 잉곳들로부터 슬라이싱된 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들 상에 제작된 태양 전지들에 관한 것이다.

배경 기술

[0005] 반도체 전자 부품들의 제작을 위한 대부분의 공정들에서 시작 재료인 단결정 실리콘은 통상 소위 초크랄스키("Cz") 법에 의해 제조된다. 이 방법에서는, 다결정 실리콘("폴리실리콘")을 도가니(crucible)에 담아서 용융시키고, 시드 결정(seed crystal)을 이 용융 실리콘과 접촉시킨 후에, 느리게 추출함으로써 단결정을 성장시킨다. 넥(neck)의 형성이 완료된 후에, 결정의 직경은, 예를 들어, 인상 속도(pulling rate) 및/또는 용융물 온도를 감소시킴으로써 원하는 직경 또는 목표 직경에 도달할 때까지 커지게 된다. 이어서, 감소되는 용융물 레벨을 보상하면서 인상 속도 및 용융물 온도를 제어함으로써, 대략 일정한 직경을 갖는 결정의 원통형 주 본체가 성장된다. 성장 공정의 종료 근처에서 그러나 도가니로부터 용융 실리콘이 비워지기 전에, 결정 직경은 전형적으로 점차 감소되어 엔드콘(end-cone)의 형태로 테일 단부(tail end)를 형성한다. 엔드콘은 통상 결정 인상 속도 및 도가니에 제공되는 열을 증가시킴으로써 형성된다. 직경이 충분히 작아졌을 때, 결정을 용융물로부터 분리한다.

[0006] 태양 전지들은 초크랄스키법에 의해 제조되는 단결정 실리콘 기판들로부터 제작될 수도 있다. 초크랄스키 성장된 단결정 실리콘 기판들은 어느 하나의 표준에 의해, 즉, 배치식(batch) 또는 연속식(continuous)으로 성장될 수도 있다. 태양 전지 응용물들에 대한 허용가능한 저항률을 달성하기 위해, 성장하는 결정은 주로 붕소로 도핑된다. 붕소 도핑된 실리콘 웨이퍼들을 사용하는 것이 확산 접합 스크린 인쇄된 태양 전지들(diffused junction screen-printed solar cells)에 대한 산업 표준이다.

[0007] 붕소 도핑된 실리콘 웨이퍼들의 사용이 문제가 없는 것은 아니다. 예를 들어, 초크랄스키 성장된 결정의, 통상 도가니에 의해 야기되는 산소 불순물은 붕소 도펀트들과 상호작용하여 재료 내에 착물들을 형성한다고 알려져 있다. 기판 또는 완성된 태양 전지가 광에 노출될 때 이들 산소 착물들은 활성화되어 그의 소수 캐리어 수명을 열화시키므로, 완성된 태양 전지의 효율을 열화시킨다. 이러한 현상은 광 유도 열화(light induced degradation, LID)라 불리고, 붕소 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들 상에 제작된 태양 전지들에 대한 주요 손실 메커니즘이다.

[0008] LID의 영향을 최소화하기 위해, 제조업자들은 각 웨이퍼에서 붕소 도펀트 원자들의 양을 감소시키기 위한 최적의 저항률보다 약간 더 높은 저항률을 목표로 한다. 그리하여, LID와 최적의 베이스 저항률 사이에 절충이 있다. 따라서, 태양 전지의 최대 효율은 실현될 수 없다.

발명의 내용

[0009] 따라서, 간단히 말해, 일 양태는 초크랄스키법에 의해 성장된 잉곳으로부터 슬라이싱된 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼를 포함하는 태양 전지로서, 1.5의 절대 공기 질량(absolute air mass) 하에 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼의 표면 상의 태양 스펙트럼 방사조도(solar spectral irradiance)를 변환하는 효율이 적어도 17%인 태양 전지에 관련된다.

- [0010] 다른 양태는 초크랄스키법에 의해 성장된 잉곳으로부터 슬라이싱된 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼를 포함하는 태양 전지로서, 웨이퍼는 약 10 ohm-cm 미만의 평균 벌크 저항률(average bulk resistivity)을 갖고, 태양 전지의 상대 효율은 45℃ 미만의 온도에서 0.1 sun 내지 10 sun에 상당하는 광에 1시간 내지 300시간 노출 후에 약 1% 이하 만큼 열화되는 태양 전지에 관련된다.
- [0011] 또 다른 양태는 초크랄스키법에 의해 성장된 잉곳으로부터 슬라이싱된 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼를 포함하는 태양 전지로서, 웨이퍼는 약 10 ohm-cm 미만의 평균 벌크 저항률을 갖고, 태양 전지의 상대 효율은 45℃ 미만의 온도에서 태양광에 적어도 4시간 노출 후에 약 1% 이하 만큼 열화되는 태양 전지에 관련된다.
- [0012] 또 다른 양태는 중심축, 중심축에 대체로 수직인 전방 표면 및 후방 표면, 전방 표면과 후방 표면 사이에 있고 전방 표면 및 후방 표면에 평행한 중앙 평면, 원주 에지(circumferential edge), 및 중심축으로부터 원주 에지로 연장하는 반경(R)을 갖는 단결정 실리콘 세그먼트로서, 적어도 약 1×10^{15} 원자/세제곱 센티미터의 평균 인듐 농도를 포함하고, 인듐 농도는 적어도 0.75R에 걸쳐 약 15% 이하의 상대 반경방향 분산(relative radial variance)을 갖는 단결정 실리콘 세그먼트에 관련된다.
- [0013] 다른 양태는 약 100 마이크로미터 내지 약 1000 마이크로미터의 두께 및 약 50 mm 내지 약 300 mm의 2개의 주요 치수들을 갖는 단결정 실리콘 웨이퍼로서, 적어도 약 1×10^{15} 원자/세제곱 센티미터의 평균 인듐 농도를 포함하고, 인듐 농도는 2개의 주요 치수들 중 어느 하나의 길이의 적어도 75%에 걸쳐 약 15% 이하의 분산(variance)을 갖는 단결정 실리콘 웨이퍼에 관련된다.
- [0014] 또 다른 양태는 단결정 실리콘 잉곳을 성장시키는 방법으로서, 단결정 잉곳 성장 장치를 제공하는 단계 - 성장 장치는 내부 압력을 갖는 챔버 및 챔버 내부에 배치된 도가니를 포함함 -, 도가니에서 실리콘 용융물을 제조하는 단계, 실리콘 용융물 위에 기체 유입구로부터 챔버 내로 불활성 기체를 도입하는 단계 - 불활성 기체는 실리콘 용융물의 표면 위에서 유동하고 일정 유량을 가짐 -, 실리콘 용융물 내로 휘발성 도펀트를 도입하는 단계 - 휘발성 도펀트는 인듐을 포함함 -, 인듐 도핑된 단결정 실리콘 잉곳을 성장시키는 단계 - 인듐 도핑된 단결정 실리콘 잉곳은 일정 인듐 도펀트 농도를 가짐 -, 및 불활성 기체 유량 및 챔버의 내부 압력의 비를 조정함으로써 잉곳에서의 인듐 도펀트 농도를 제어하는 단계를 포함하는 방법에 관련된다.
- [0015] 또 다른 양태는 중심축, 원주 에지, 중심축으로부터 원주 에지로 연장하는 반경, 및 질량을 갖는 단결정 실리콘 잉곳으로서, 적어도 약 5×10^{14} 원자/세제곱 센티미터의 평균 인듐 농도 및 20 센티미터 초과와 축방향 길이(axial length)에 걸쳐 약 5×10^{14} 원자/세제곱 센티미터 미만의 인듐 농도의 축방향 분산(axial variance)을 포함하고, 잉곳의 반경은 약 75 밀리미터 초과인 잉곳에 관련된다.
- [0016] 다른 양태는 단결정 실리콘 잉곳을 성장시키는 방법으로서, 단결정 잉곳 성장 장치를 제공하는 단계 - 성장 장치는 내부 압력을 갖는 챔버, 챔버 내부에 배치된 도가니, 및 액체 도핑 디바이스를 포함함 -, 도가니에서 실리콘 용융물을 제조하는 단계, 실리콘 용융물 위에 기체 유입구로부터 챔버 내로 불활성 기체를 도입하는 단계 - 불활성 기체는 실리콘 용융물의 표면 위에서 유동하고 일정 유량을 가짐 -, 실리콘 용융물 내로 액체로서의 휘발성 도펀트를 도입하는 단계 - 휘발성 도펀트는 인듐을 포함함 -, 인듐 도핑된 단결정 실리콘 잉곳을 성장시키는 단계 - 인듐 도핑된 단결정 실리콘 잉곳은 일정 인듐 도펀트 농도를 가짐 -, 및 불활성 기체 유량 및 챔버의 내부 압력의 비를 조정함으로써 잉곳에서의 인듐 도펀트 농도를 제어하는 단계를 포함하는 방법에 관련된다.

도면의 간단한 설명

- [0017] 도 1은 결정 성장 챔버의 단면도이다.
- 도 2는 결정 성장 챔버에서 사용하기 위한 액체 도핑 시스템의 단면도이다.
- 도 3은 도 2에 도시된 도핑 시스템의 공급 튜브(feeding tube)의 확대도이다.
- 도 4는 용융물 표면을 향해 낮아지고 있는 도 2의 도핑 시스템의 단면도이다.
- 도 5는 용융물 표면 근처에 위치한 도 2의 도핑 시스템의 단면도이다.
- 도 6은 본 명세서에 개시된 방법들에 따라 성장된 단결정 실리콘 잉곳의 묘사이다.
- 도 7은 실시양태의 단결정 실리콘 웨이퍼의 묘사이다.
- 도 8a, 도 8b 및 도 8c는 태양 스펙트럼 전역에서 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들 상에 제작된 태양 전지

들 및 붕소 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들 상에 제작된 태양 전지들의 광의 흡수를 도시하는 그래프들이다.

도 9는 광 소킹(light soaking) 전후 둘 다에서 높은 수명의 붕소 도핑된 웨이퍼(P01GJ-A4)에서의 소수 캐리어 수명을 나타내는 그래프이다. 소수 캐리어 수명 데이터는 실시예 12에 기재된 방법에 따라 획득되었다.

도 10은 광 소킹 전후 둘 다에서 평균 수명의 붕소 도핑된 웨이퍼(P00PC-C2)에서의 소수 캐리어 수명을 나타내는 그래프이다. 소수 캐리어 수명 데이터는 실시예 12에 기재된 방법에 따라 획득되었다.

도 11은 광 소킹 전후에 소수 캐리어 수명을 나타내는 그래프이다(210TON). 소수 캐리어 수명 데이터는 실시예 12에 기재된 방법에 따라 획득되었다.

도 12는 실외 광 소킹 후에 붕소 기반 태양 전지 및 모듈 그리고 인듐 기반 태양 전지 및 모듈의 정규화된 태양 전지 및 모듈 효율을 나타내는 박스플롯(boxplot)이다. 이들 데이터는 실시예 13에 기재된 방법에 따라 획득되었다.

도 13은 실외 광 소킹 후에 붕소 기반 태양 전지 및 모듈 그리고 인듐 기반 태양 전지 및 모듈의 정규화된 개방 회로 전압을 나타내는 박스플롯이다. 이들 데이터는 실시예 13에 기재된 방법에 따라 획득되었다.

도 14는 실외 광 소킹 후에 붕소 기반 태양 전지 및 모듈 그리고 인듐 기반 태양 전지 및 모듈의 정규화된 단락 전류를 나타내는 박스플롯이다. 이들 데이터는 실시예 13에 기재된 방법에 따라 획득되었다.

도 15는 실외 광 소킹 후에 붕소 기반 태양 전지 및 모듈 그리고 인듐 기반 태양 전지 및 모듈의 정규화된 충전율(fill factor)을 나타내는 박스플롯이다. 이들 데이터는 실시예 13에 기재된 방법에 따라 획득되었다.

도 16은 실외 광 소킹 후에 붕소 기반 태양 전지 및 인듐 기반 태양 전지의 % 상대 LID를 나타내는 박스플롯이다. 이들 데이터는 실시예 13에 기재된 방법에 따라 획득되었다.

도 17은 실외 광 소킹 후에 붕소 기반 태양 전지 및 인듐 기반 태양 전지의 절대 태양 전지 효율 손실을 나타내는 박스플롯이다. 이들 데이터는 실시예 13에 기재된 방법에 따라 획득되었다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0018]

본 명세서에 개시되는 인듐 도핑된 단결정 실리콘 세그먼트, 예컨대, 웨이퍼는 초크랄스키법에 의해 성장된 잉곳으로부터 슬라이싱된다. 인듐 도핑된 단결정 실리콘 세그먼트는 반도체들 및 태양 전지들의 제작에서 유용하다. 따라서, 일부 실시양태들에서, 본 발명은 또한 초크랄스키법에 의해 성장된 잉곳으로부터 슬라이싱된 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼 상에 제작된 태양 전지에 관련된다. 본 발명의 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼는 그의 표면 상의 태양 스펙트럼 방사조도(예컨대, 태양광)를 변환하는 높은 효율을 갖는 것을 특징으로 한다. 본 발명의 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼는, 특히, 태양 스펙트럼의 적외선 영역에서의 광을 변환하는 높은 효율을 갖는 것을 특징으로 한다. 따라서, 본 발명의 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼는 1.5의 절대 공기 질량 하에 측정될 때, 적어도 17%, 적어도 18%, 적어도 19%, 또는 심지어 적어도 20%의 태양 스펙트럼 방사조도 변환 효율을 가질 수 있다. 유리하게, 본 발명에 따른 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들의 광 유도 열화는 종래의 붕소 도핑된 태양 전지들의 LID보다 상당히 더 작다. 일부 실시양태들에서, 태양 전지의 상대 효율은 광, 예컨대, 태양광에 노출 후에 약 1% 이하 만큼 열화된다. 절대 광 유도 열화는 0.5% 미만인 것으로 관찰되었고, 일부 경우에는 상당히 더 작고, 예를 들어 0.1% 미만인 것으로 관찰되었다. 그러한 관점에서, 본 발명의 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼는 태양 전지들의 제조에 사용하기에 특히 적합하다.

[0019]

일부 실시양태들에서, 본 발명은 초크랄스키 성장된 잉곳으로부터 슬라이싱된 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼에 관련된다. 유리하게, 초크랄스키 성장된 잉곳은 배치식 Cz 공정 또는 연속식 Cz 공정에 의해 성장될 수도 있다. 초크랄스키법에 의해 성장된 실리콘 잉곳들에서 도펀트로서의 인듐의 사용은 몇몇의 과제를 제시한다. 인듐은 매우 휘발성인 도펀트이고, 다른 도펀트들과 비교해서 극히 낮은 분리 계수(segregation coefficient)를 갖는다. 예를 들어, 인듐의 분리 계수는 대략 4×10^{-4} 이며, 붕소의 경우 0.8과 대비된다. 결과적으로, 실리콘 용융물에서의 인듐 도펀트 농도는 단일 초크랄스키 배치식 성장 공정 동안 수십 배의 크기로 다양할 수 있다. 성장된 잉곳에서의 축방향(즉, 잉곳의 길이를 따른) 도펀트 농도는 또한 실리콘 용융물에서의 다양한 도펀트 농도의 결과로서 수십 배의 크기로 다양할 수 있다. 잉곳으로부터 취해진 웨이퍼들의 저항률은 잉곳 내의 그들의 위치에 의해 좌우될 것이기 때문에 이러한 축방향 변화는 바람직하지 않다. 따라서, 본 발명의 방법에 따르면, 단결정 실리콘 잉곳의 축방향 길이를 따른 그리고 중심축으로부터 에지로 측정될 때의 웨이퍼의 반경방향 길이를 따른 균일한 인듐 도펀트를 보장하기 위해 배치식 Cz 공정 또는 연속식 Cz 공정 중 어느 것이든 조건들이 제

어될 수도 있다.

- [0020] 일부 실시양태들에서, 단결정 실리콘 기판은 단결정 실리콘 잉곳의 세그먼트, 즉, 단결정 실리콘 잉곳으로부터 슬라이싱된 부분을 포함한다. 일부 실시양태들에서, 단결정 실리콘 기판은 단결정 실리콘 웨이퍼를 포함한다. 일부 실시양태들에서, 실리콘 웨이퍼는 단결정 실리콘 웨이퍼로부터 슬라이싱되는 웨이퍼를 포함하는데, 이 단결정 실리콘 웨이퍼는 본 명세서에 기재된 초크랄스키 결정 성장 방법들에 따라 성장된 단결정 잉곳으로부터 슬라이싱되었다. 단결정 실리콘 잉곳은 초크랄스키 결정 성장 방법들에 의해 달성 가능한 공칭 직경(nominal diameter)을 갖는다. 일반적으로, 공칭 직경은 적어도 약 150 mm, 약 200 mm, 또는 약 200 mm 초과, 예를 들어 205 mm, 250 mm, 300 mm 또는 심지어 450 mm일 수도 있다. 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼는 반도체 응용물들과 연관되는 둥근 형상을 갖도록 잉곳으로부터 슬라이싱될 수도 있고, 또는 태양 전지들의 제조에서의 사용을 위해 대체로 정사각형 형상(generally square shape)을 갖도록 슬라이싱될 수도 있다.
- [0021] 일부 실시양태들에서, 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼는 반도체 응용물에서 사용을 위해 제조된다. 실리콘 슬라이싱, 래핑(lapping), 에칭(etching), 및 연마(polishing) 기법들을 포함하여, 반도체 제조를 위해 웨이퍼들을 제조하기 위한 표준 공정뿐만 아니라 잉곳 성장이, 예를 들어, (본 명세서에 참조로 통합된) 문헌[F. Shimura, Semiconductor Silicon Crystal Technology, Academic Press, 1989, and Silicon Chemical Etching, (J. Grabmaier ed.) Springer-Verlag, N.Y., 1982]에 개시되어 있다.
- [0022] 일부 실시양태들에서, 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼는 태양 전지의 제조에서 사용을 위해 제조된다. 웨이퍼는 대체로 정사각형 형상(도 7 참조)으로 슬라이싱될 수도 있다. 준-정사각형(semi-square) 셀이 원형 웨이퍼로부터 시작하지만 다수의 셀들이 더 효율적으로 직사각형 모듈 내에 채워질 수 있도록 에지들을 잘라냈다.
- [0023] 초크랄스키법에 의해 제조된 잉곳들은 일반적으로 산소 불순물들을 함유하는데, 산소 불순물들은 주변 대기(ambient atmosphere)로부터 그리고 도가니 벽으로부터 실리콘 용융물로 들어갈 수도 있다. 결정 성장 동안, 용융 실리콘은 도가니를 구성하는 석영을 에칭하거나 또는 용해시킴으로써, 산소 도핑을 발생시킨다. 산소는 결정 전체에 걸쳐 흩어져 있고, 모여서 침전물들 및 작물들을 형성할 수 있다. 단결정 실리콘 잉곳들, 및 이로부터 슬라이싱된 단결정 실리콘 웨이퍼들은, 약 30 PPMA(parts per million atomic, ASTM 표준 F-121-83 또는 SEMI 표준 M44)까지의 산소 농도를 포함할 수도 있고, 일반적으로 약 20 PPMA 미만, 예를 들어 약 11 PPMA 내지 약 20 PPMA의 산소 농도를 포함할 수도 있다.
- [0024] 초크랄스키법에 의해 제조된 잉곳들은 또한 불순물로서 탄소를 포함할 수도 있다. 일부 실시양태들에서, 단결정 실리콘 잉곳들, 및 이로부터 슬라이싱된 단결정 실리콘 웨이퍼들은, 약 2 ppma 이하의 농도로 탄소를 포함할 수도 있다.
- [0025] 일부 실시양태들에서, 본 발명은 인듐으로 도핑되어 있는 초크랄스키법에 의해 제조된 단결정 실리콘 잉곳들, 예를 들어 도 6에 도시된 잉곳에 관련된다. 또 다른 실시양태들에서, 본 발명은 이러한 잉곳들을 성장시키기 위한 방법들에 관련된다. 또 다른 실시양태들에서, 본 발명은 이러한 인듐 도핑된 초크랄스키 성장된 잉곳들로부터 슬라이싱되는 세그먼트들 및 웨이퍼들에 관련된다. 일부 실시양태들에서, 인듐 도핑된 단결정 실리콘 기판은, 2개의 주요한 대체로 평행한 표면들 - 이 표면들 중 하나는 기판의 전방 표면이고 이 표면들 중 다른 하나는 기판의 후방 표면임 -, 전방 표면 및 후방 표면과 접하고 있는 원주 에지, 전방 표면과 후방 표면 사이에 있는 중앙 평면, 및 중앙 평면으로부터 원주 에지로 연장하는 반경(R)을 갖는 세그먼트, 예컨대, 웨이퍼를 포함한다. 일부 실시양태들에서, 단결정 실리콘 기판은 원형 형상을 갖는 단결정 실리콘 웨이퍼를 포함한다. 웨이퍼의 직경은, 관련 기술분야에 공지되어 있는 바와 같이, 균일한 직경을 갖는 잉곳을 달성하기 위해, 잉곳의 연삭되는 부분을 제외하고는, 초크랄스키-성장된 단결정 실리콘 잉곳의 직경과 대체로 유사하다. 잉곳들은 일반적으로 웨이퍼의 직경보다 더 큰 직경으로 성장되고, 전형적으로 그의 외부 원주 에지들을 매끄럽게 하기 위해 연삭(grinding)되는데, 이는 갓 성장된(freshly grown) 잉곳과 비교해서 직경을 감소시킬 수도 있다. 웨이퍼의 직경은 적어도 약 150 mm, 약 200 mm, 또는 약 200 mm 초과, 예를 들어 205 mm, 250 mm, 300 mm 또는 심지어 450 mm일 수도 있고, 일부 실시양태들에서 약 150 mm 내지 약 450 mm일 수도 있다. 일부 실시양태들에서, 단결정 실리콘 웨이퍼는 약 100 마이크로미터 내지 약 1000 마이크로미터, 예를 들어 약 120 마이크로미터 내지 약 240 마이크로미터의 두께를 갖는다. 특정 실시양태들에서, 두께는 약 180 마이크로미터, 또는 약 200 마이크로미터일 수도 있다. 두께는 상기 언급된 두께보다 약 20 마이크로미터 더 작거나 또는 더 크게 변화할 수도 있다.
- [0026] 일부 실시양태들에서, 중심축, 중심축에 대체로 수직인 전방 표면 및 후방 표면, 전방 표면과 후방 표면 사이에 있고 전방 표면 및 후방 표면에 평행한 중앙 평면, 원주 에지, 및 중심축으로부터 원주 에지로 연장하는 반경

(R)을 갖는 (시드 및 엔드콘들을 제거하기 위해 크로핑되었을 수도 있는) 인듐 도핑된 단결정 실리콘 잉곳 또는 이로부터 슬라이싱된 인듐 도핑된 단결정 실리콘 세그먼트(예컨대, 웨이퍼)는, 적어도 약 5×10^{14} 원자/세제곱 센티미터(약 0.01 PPMA), 또는 적어도 약 1×10^{15} 원자/세제곱 센티미터 - 이는 약 0.02 PPMA임 - 의 평균 인듐 농도를 포함한다. 일부 실시양태들에서, 평균 인듐 농도는 약 1×10^{15} 원자/세제곱 센티미터(약 0.02 PPMA) 내지 약 1×10^{18} 원자/세제곱 센티미터(약 20 PPMA)이다. 일부 실시양태들에서, 평균 인듐 농도는 약 1×10^{15} 원자/세제곱 센티미터(약 0.02 PPMA) 내지 약 1×10^{17} 원자/세제곱 센티미터(약 2 PPMA)이다. 일부 실시양태들에서, 평균 인듐 농도는 약 1×10^{15} 원자/세제곱 센티미터(약 0.02 PPMA) 내지 약 1×10^{16} 원자/세제곱 센티미터(약 0.2 PPMA)이다.

[0027]

본 발명의 초크랄스키 성장 방법은 상당히 균일한 축방향 및 반경방향의 인듐 농도의 잉곳들 및 이로부터 슬라이싱된 세그먼트들의 제조를 가능하게 한다. 따라서, 일부 실시양태들에서, 잉곳 또는 이로부터 슬라이싱된 세그먼트는 적어도 0.75R(즉, 잉곳 또는 세그먼트의 반경의 적어도 75%)에 걸쳐 약 15% 이하의 인듐 농도의 상대 반경방향 분산을 갖는다. 일부 실시양태들에서, 잉곳 또는 이로부터 슬라이싱된 세그먼트는 적어도 0.75R(즉, 잉곳 또는 세그먼트의 반경의 적어도 75%)에 걸쳐 약 10% 이하의 인듐 농도의 상대 반경방향 분산을 갖는다. 일부 실시양태들에서, 잉곳 또는 이로부터 슬라이싱된 세그먼트는 적어도 0.95R(즉, 잉곳 또는 세그먼트의 반경의 적어도 95%)에 걸쳐 약 15% 이하의 인듐 농도의 상대 반경방향 분산을 갖는다. "상대 반경방향 분산"은, 웨이퍼의 중심축으로부터 원주 예지로 측정될 때 단결정 실리콘 잉곳의 반경방향 길이를 따라 주어진 거리로 떨어져 위치되는 2개의 지점들 사이의 인듐 농도의 변화를, 단결정 실리콘 웨이퍼의 중심축에 가장 가까운 지점에서 측정된 인듐 농도로 나눈 것을 측정함으로써 결정된다. 이 결과적인 값에 100을 곱해서 백분율을 구한다. 이러한 백분율이 본 명세서에 개시된 인듐 농도에서의 "상대 반경방향 분산"이다.

[0028]

태양 전지 산업에서, 단결정 실리콘 잉곳은 일반적으로 4개의 편평한 에지들(flat edges)을 갖도록 절단되고, 여기서 각 에지는 실질적으로 동일한 길이이다. 따라서, 태양 전지는 대체로 정사각형 형상인 단결정 실리콘 웨이퍼를 포함한다. 일부 실시양태들에서, 단결정 실리콘 웨이퍼는 대체로 정사각형 형상이고, 둥근 에지들을 갖는다. 태양 전지들의 산업 표준 정사각형 형상을 갖는 단결정 실리콘 웨이퍼의 묘사인 도 7을 참조한다. 정사각형 형상의 단결정 실리콘 웨이퍼는, 초크랄스키 성장된 단결정 실리콘 잉곳의 직경들과 본질적으로 동일한, 중심축으로부터 원주 예지로 측정될 때의 반경(R)을 갖는 둥근 에지들을 포함할 수도 있다. 일부 실시양태들에서, 단결정 실리콘 웨이퍼들은 약 100 마이크로미터 내지 약 1000 마이크로미터, 예를 들어 약 120 마이크로미터 내지 약 240 마이크로미터의 두께를 갖는다. 특정 실시양태들에서, 두께는 약 180 마이크로미터일 수도 있고 또는 약 200 마이크로미터일 수도 있다. 두께는 상기 언급된 두께보다 약 20 마이크로미터 더 작거나 또는 더 크게 변화할 수도 있다. 잉곳의 2개의 주요 치수들의 길이(즉, 편평한 부분에서 편평한 부분까지(flat to flat))는 약 50 mm 내지 약 300 mm, 예를 들어 약 100 mm 내지 약 200 mm일 수도 있다. 일부 실시양태들에서, 2개의 주요 치수들의 편평한 부분에서 편평한 부분까지 치수들은 각각 약 125 mm (± 0.5 밀리미터)일 수도 있다. 일부 실시양태들에서, 2개의 주요 치수들의 편평한 부분에서 편평한 부분까지 치수들은 각각 약 156 mm (± 0.5 밀리미터)일 수도 있다. 둥근 에지들은 약 10 mm 내지 약 20 mm, 예를 들어 약 15.4 mm ± 1.0 밀리미터의 길이들을 가질 수도 있다.

[0029]

상기 언급된 바와 같이, 태양 전지들의 제조에서 사용하기 위한 인듐 도핑된 단결정 실리콘 잉곳들은 일반적으로 편평한 에지들을 갖도록 크로핑되고, 그리하여 이로부터 슬라이싱된 웨이퍼들이 도 7에 도시된 바와 같이 둥근 모서리들을 갖는 대체로 정사각형 형상이 된다. 본 발명의 정사각형 형상의 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼는 적어도 약 5×10^{14} 원자/세제곱 센티미터(약 0.01 PPMA), 또는 적어도 약 1×10^{15} 원자/세제곱 센티미터 - 이는 약 0.02 PPMA임 - 의 평균 인듐 농도를 포함한다. 일부 실시양태들에서, 평균 인듐 농도는 약 1×10^{15} 원자/세제곱 센티미터(약 0.02 PPMA) 내지 약 1×10^{18} 원자/세제곱 센티미터(약 20 PPMA)이다. 일부 실시양태들에서, 평균 인듐 농도는 약 1×10^{15} 원자/세제곱 센티미터(약 0.02 PPMA) 내지 약 1×10^{17} 원자/세제곱 센티미터(약 2 PPMA)이다. 일부 실시양태들에서, 평균 인듐 농도는 약 1×10^{15} 원자/세제곱 센티미터(약 0.02 PPMA) 내지 약 1×10^{16} 원자/세제곱 센티미터(약 0.2 PPMA)이다. 정사각형 형상의 웨이퍼는 2개의 주요 치수들 중 어느 하나의 길이의 적어도 75%에 걸쳐 약 15% 이하의 인듐 농도의 분산을 가질 수도 있다. 일부 실시양태들에서, 웨이퍼의 인듐 농도는 2개의 주요 치수들 둘 다의 길이의 적어도 75%에 걸쳐 약 15% 이하의 분산을 갖는다. 또 다른 실시양태들에서, 인듐 농도는 2개의 주요 치수들 둘 다의 길이의 적어도 75%에 걸쳐 약 10%

이하의 분산을 갖는다. 또 다른 실시양태들에서, 인듐 농도는 2개의 주요 치수들 둘 다의 길이의 적어도 95%에 걸쳐 약 15% 이하의 분산을 갖는다.

[0030] 본 명세서에 기술된 바와 같은 인듐 도핑된 농도들을 갖는 단결정 실리콘 웨이퍼들을 포함하는 본 발명의 태양 전지들은 일반적으로 약 10 ohm-cm 미만의 평균 벌크 저항률을 갖는다. 일부 실시양태들에서, 평균 벌크 저항률은 약 5 ohm-cm 미만, 약 4 ohm-cm 미만, 약 3 ohm-cm 미만, 약 1 ohm-cm 미만, 또는 심지어 약 0.5 ohm-cm 미만이다.

[0031] 일 실시양태의 공정에 따르면, 인듐 도핑된 단결정 실리콘 잉곳은 초크랄스키법에 의해 성장된다. 일부 실시양태들에서, 인듐 도핑된 단결정 실리콘 잉곳은 배치식 초크랄스키법에 의해 성장된다. 일부 실시양태들에서, 인듐 도핑된 단결정 실리콘 잉곳은 연속식 초크랄스키법에 의해 성장된다.

[0032] 본 발명에 따른 인듐 도핑된 단결정 실리콘 잉곳들은 일반적으로 초크랄스키 성장 시스템에서 성장되고, 보론코브 이론(Voronkov theory)에 따라 성장된다. 다른 출원들 중에서도 엠이엠씨 일렉트로닉 머티리얼즈(MEMC Electronic Materials)에 양도된, 예컨대 국제특허 공개 WO 1998/45508호; WO 1998/45509호; WO 1998/45510호; 및 WO 2000/022196호를 참조한다. 일 실시양태에서, 초크랄스키 성장 챔버는 도가니, 잉곳 성장 동안 실리콘의 전달을 위한 시스템, 및 잉곳 성장 동안 인듐의 전달을 위한 시스템을 포함한다. 도가니는 고체 실리콘 공급원료 및 액체 실리콘 공급원료 둘 다를 함유할 수 있는 실리콘 결정 성장 시에 사용하기 위한 임의의 공지된 것일 수 있다. 예를 들어, 도가니는 석영 도가니일 수 있고 또는 석영 인너 라이너(quartz inner liner)를 포함하는 흑연 도가니일 수 있다. 도가니는 또한, 예를 들어, 결정 성장 시스템의 기하학 구조에 따른 임의의 단면 형상을 가질 수 있지만, 전형적으로 원형 단면 형상을 갖는다. 도가니는 적합하게 내부 성장 구역 및 외부 공급 구역을 포함하고, 이들 구역들은 서로 유체 연통하고 있다. 일부 실시양태들에서, 도가니는 내부 구역 및 외부 구역으로 도가니를 분할하는 벽 또는 다른 분리 수단을 포함할 수 있다. 벽은 단결정 잉곳의 성장 동안 실리콘 및/또는 인듐의 전달을 위한 수단을 포함할 수도 있다.

[0033] 일부 실시양태들에서, 인듐 도핑된 단결정 실리콘 잉곳은 연속식 초크랄스키법에 의해 성장될 수도 있다. 초기 용융물을 형성하거나 또는 잉곳 성장 동안 실리콘 용융물을 보충하기 위한 실리콘 공급원들은 전자 등급(electronic grade) 실리콘, 금속 등급(metallurgical grade) 실리콘, 또는 태양전지 등급(solar grade) 실리콘을 포함한다. 실리콘은 입상(granular) 다결정 실리콘으로서 또는 다결정 청크들(chunks)로서 첨가될 수도 있다. 잉곳이 인상됨에 따라 실리콘 용융물을 보충하기 위해, 실리콘 전달 시스템은 실리콘 용융물이 용융 실리콘에 의해 보충되도록 첨가된 실리콘을 가열하기 위한 수단을 포함한다. 일부 실시양태들에서, 실리콘은 고체 형태 또는 용융된 형태 중 어느 것으로든 전달될 수 있다.

[0034] 본 발명의 연속식 초크랄스키 성장 시스템은, 초기 용융물의 실리콘 및 잉곳이 인상됨에 따라 실리콘 용융물을 보충하기 위한 실리콘 둘 다에서, 도가니에 인듐을 전달하기 위한 수단을 더 포함한다. 인듐은 실리콘 보충물과는 별도로 전달될 수 있고, 또는 인듐은 실리콘 보충물 내에서 제공될 수도 있다. 연속식 초크랄스키 성장은 실리콘에 의한 실리콘 용융물의 연속적인 또는 간헐적인 보충을 포함하고, 인듐은, 용융물 내의 인듐의 상대 농도가 비교적 일정하게 유지되는 것을 보장하기 위해 그리고 용융물 내의 실리콘이 성장하는 단결정으로 고형화됨에 따라 실리콘 용융물 레벨이 비교적 일정하게 유지되는 것을 또한 보장하기 위해 존재할 수도 있다.

[0035] 일부 실시양태들에서, 인듐 도핑된 단결정 실리콘 잉곳을 성장시키기 위한 방법은 배치식 초크랄스키를 포함한다. 배치식 초크랄스키법에서 초기 용융물을 형성하기 위한 실리콘 스톡 재료(silicon stock material)는 전자 등급 실리콘, 금속 등급 실리콘, 또는 태양전지 등급 실리콘을 포함할 수도 있다. 실리콘 스톡 재료는, 예를 들어, 입상 다결정 실리콘 또는 다결정 청크들일 수도 있다.

[0036] 본 명세서에 기재된 인듐 도핑된 웨이퍼들 및 태양 전지들을 제작하기 위해 적합한 인듐 도핑된 단결정 실리콘 잉곳을 성장시키기 위한 적합한 방법들이 이제 도 1 내지 도 5를 참조하여 설명될 것이다. 본 발명의 범주 내에서 다른 방법들이 고려된다.

[0037] 본 명세서에 기재된 인듐 도핑된 잉곳들을 성장시키기 위해 적합한 초크랄스키 성장 챔버는 도 1에서 100으로 일반적으로 나타나 있다. 성장 챔버(100)는, 노(furnace; 108) 내부에 포함되는 서셉터(106)에 의해 둘러싸인, 실리콘과 같은 반도체 또는 태양전지 등급 재료의 용융물(104)을 수용하기 위한 도가니(102)를 포함한다. 반도체 또는 태양전지 등급 재료는 절연체(112)에 의해 둘러싸인 가열 요소(110)로부터 제공되는 열에 의해 용융된다. 성장 챔버(100) 내부에 더 양호한 열적 분포를 제공하기 위해 용융물 표면(116) 위에 열 차폐물들 또는 반사체들(114)이 배치될 수도 있다.

- [0038] 성장 챔버 내부에는 잉곳들을 성장시키고 용융물(104) 밖으로 잉곳들을 인상하기 위해 인상 메커니즘(118)이 제공된다. 인상 메커니즘은 인상 케이블(120), 인상 케이블의 단부에 배치된 시드 홀더 또는 척(122), 및 시드 홀더 또는 척(122)에 연결되고 결정 성장을 개시하기 위한 시드 결정(124)을 포함한다.
- [0039] 성장 챔버(100)는 또한 성장 챔버 내로 불활성 기체를 도입하기 위한 하나 이상의 기체 유입구들(126)을 포함할 수도 있다. 기체 유입구들(126)은 성장 챔버(100)를 따라 어디든 배치될 수도 있다. 도 1에서의 기체 유입구들(126)은 용융물 표면(116) 위에 배치된다. 기체 유입구들을 통해 도입되는 기체는 실리콘 용융물의 표면 및 성장하는 잉곳의 표면 위에서 유동하고, 이에 따라 단결정이 성장하고 있는 상 경계에 오염물질 입자들이 도달하는 것을 방지한다. 적합한 불활성 기체들은 아르곤, 헬륨, 질소, 네온, 이들의 혼합물들, 및 임의의 다른 적합한 불활성 기체를 포함한다. 실리콘 용융물의 표면 위에서의 불활성 기체 유동은 실리콘 용융물로부터 화학종들, 특히, 인듐과 같은 휘발성 도펀트들의 증발을 증가시키는 경향이 있다. 이러한 효과는 열 차폐물들 또는 반사체들(114)에 의해 생성된 것들과 같은, 실리콘 용융물 위의 좁은 채널들을 통해 불활성 기체가 유동할 때 증폭된다. 따라서, 기체 유입구들(126)은, 이하 더욱 상세하게 설명되는, 유입되는 불활성 기체의 유량을 제어하기 위한 하나 이상의 유동 제어기들(128)에 부착될 수도 있다.
- [0040] 성장 챔버는 또한 유체, 예를 들어 불활성 기체들 및 용융물로부터의 증발된 화학종들, 및 성장 챔버로부터의 오염물질 입자들을 제거하기 위한 하나 이상의 배기구들(130)을 포함할 수도 있다. 배기구들(130)은, 이하 더욱 상세하게 설명되는, 성장 챔버(100)의 내부 챔버 압력을 조절하기 위한 하나 이상의 압력 조절 디바이스들(132)에 부착될 수도 있다. 배기구들은 또한, 이하 더욱 상세하게 설명되는, 펌프(134)에 부착될 수도 있는데, 펌프(134)는 성장 챔버(100)의 내부 챔버 압력을 조절하기 위한 압력 조절 디바이스들(132)에 관계없이 또는 그와 함께 동작될 수도 있다.
- [0041] 배치식 또는 연속식 초크랄스키법들에서, 인듐 도펀트는 고체 또는 액체로서 도입될 수도 있다. 유리하게, 인듐 도펀트는, 도핑 및/또는 성장 공정 동안 인듐 도펀트 증발의 양을 제한하기 위해 그리고 결과적인 인듐 도핑된 실리콘 잉곳에서의 보다 예측 가능한 인듐 도펀트 농도들을 제공하기 위해, 도 2에 도시된 액체 도핑 시스템(200)과 같은 액체 도핑 시스템을 사용하여 액체로서 도입될 수도 있다.
- [0042] 도 2에 도시된 액체 도핑 시스템(200)은 도 1에 도시된 성장 챔버(100)와 같은 성장 챔버 내부에 배치될 수도 있고, 본 명세서에 기재된 도핑 공정 동안 액체 도핑 시스템(200)을 위치시키기 위한, 도 1에 도시된 인상 메커니즘(118)과 같은 인상 메커니즘에 부착된 더미 시드(dummy seed; 204)로부터 케이블들 또는 와이어들(202)에 의해 매달려 있을 수도 있다. 더미 시드(204)는 단결정 잉곳들을 성장시키기 위해 사용되는 인상 메커니즘(118)의 시드 홀더 또는 척(122) 내부에 수용되거나 또는 시드 홀더 또는 척(122)에 연결되도록 크기가 정해지고 형상화될 수도 있다. 도 2에 도시된 실시양태에서, 케이블들 또는 와이어들(202)은 몰리브덴 또는 텅스텐으로 제조되지만, 다른 재료들이 케이블들 또는 와이어들(202)에 사용될 수도 있다. 더미 시드(204)는 스테인리스강 또는 액체 도핑 시스템의 중량을 지지하기 위한 임의의 다른 적합한 재료로 제조될 수도 있다. 더미 시드(204)의 형상 및 크기가 단결정 잉곳들을 성장시키기 위해 인상 메커니즘(118)에 사용되는 시드 결정(124)의 형상 및 크기와 동일하거나 또는 유사할 경우, 액체 도핑 시스템(200)은, 거의 또는 전혀 수정 없이, 도 1에 도시된 성장 챔버(100)와 같은 성장 챔버들 내에 설치될 수 있다.
- [0043] 액체 도핑 시스템(200)은 도펀트(208)를 수용하기 위한 도펀트 저장소(206), 및 도펀트 저장소(206) 내의 제1 또는 상부 개방부(210)로부터 연장하는 기다란 공급 튜브(300)를 포함한다. 액체 도핑 시스템(200)은 고온 용도에 적합한 임의의 재료(예컨대, 내화 세라믹, 몰리브덴, 텅스텐, 및 흑연)로 제조될 수도 있다. 석영은 액체 도핑 시스템(200)으로부터의 오염의 위험을 최소화하기 때문에 적합하다. 도 2에 도시된 실시양태에서는, 액체 도핑 시스템(200)이 단일 구성물을 갖는다. 다른 실시양태들에서는, 액체 도핑 시스템(200)이 별도의 구성요소들로부터 조립될 수도 있다. 도펀트 저장소(206)는 대체로 원통형 본체(214)를 한정하는 석영 측벽들(212) 및 본체(214)의 단면적보다 더 작은 단면적을 갖는 제1 개방부(210)를 한정하는 테이퍼 단부(tapered end; 216)를 포함한다. 테이퍼 단부(216)는 도펀트 저장소(206)의 가장 낮은 지점으로 도펀트를 보내기 위해 원뿔 형상을 갖는다. 도 2에 도시된 실시양태에서, 테이퍼 단부(216)의 측벽들(212)은 직선적으로 테이퍼링되지만, 테이퍼 단부(216)를 한정하는 측벽들(212)은 또한 테이퍼 단부(216)가 사발형 형상(bowl-type shape)을 갖도록 안쪽으로 만곡되어 있을 수도 있다. 테이퍼 단부(216)로부터 먼 쪽의 본체(214)의 단부는 본체(214)의 원주 둘레에 등간격으로 하나 이상의 홀들(218)을 포함하며, 본 명세서에 기재된 도핑 공정 동안 액체 도핑 시스템(200)을 위치시키기 위해 인상 메커니즘(118)에 액체 도핑 시스템(200)을 잡아매기 위해 케이블들 또는 와이어들(202)이 이 홀들(218)을 통해 삽입된다. 도 2에 도시된 실시양태는 4개의 홀들(218)을 갖지만, 다른 실시양태들은 다른

개수의 홀들을 가질 수도 있다.

- [0044] 이제 도 3을 참조하면, 공급 튜브(300)는 상부 개방부(210)로부터 길이(L)까지 연장하는 측벽들(302)을 포함하고, 상부 개방부(210) 근처에 위치되는 제1 또는 상부 단부(304), 및 상부 단부(304)로부터 먼 쪽의 제2 또는 하부 단부(306)를 갖고, 본 명세서에 정의된 제2 또는 하부 개방부(308)를 갖는다. 공급 튜브(300)의 하부 단부(306)에 경사진 팁(angled tip; 310)이 배치된다. 경사진 팁(310)은, 비경사진 팁(non-angled tip)과 비교해서, 공급 튜브의 하부 단부(306)와 용융물 표면(116) 사이의 접촉의 더 양호한 시각적 지표를 제공한다. 따라서 경사진 팁(310)은 오퍼레이터(도시 생략)가 용융물(104)과 액체 도핑 시스템(200) 사이의 접촉을 최소화하는 것을 돕는다.
- [0045] 이하 더욱 상세하게 설명되는 바와 같이, 도핑 공정 동안, 도핑 시스템은 경사진 팁(310)이 용융물 표면(116)과 접촉할 때까지 용융물 표면(116)을 향해 내려진다. 그리하여 도펀트 저장소(206)는 공급 튜브(300)의 길이(L)와 대체로 동일한 거리만큼 용융물 표면(116) 위에 위치된다. 공급 튜브(300)의 길이(L)는, 도핑 동작 동안, 도펀트 저장소 내부의 온도가 도펀트(208)의 용융 온도 약간 위에 있도록 도펀트 저장소가 용융물 표면(116) 위의 높이(H)(도 5에 도시됨)에 위치되도록 선택되고, 이에 따라 도펀트 증발을 제한한다.
- [0046] 공급 튜브(300)는 공급 튜브(300)의 내부 측벽들(312)에 의해 한정되는 내경(d)을 갖고, 내경(d)은, 액체 도펀트가 공급 튜브(300)를 통과하고 있을 때 액체 도펀트가 공급 튜브(300)에 의해 둘러싸이는 체적을 사실상 차지하도록 크기가 정해진다. 그 결과, 액체 도펀트의 자유 표면이 최소화되고, 이에 따라 액체 도펀트의 증발을 감소시킨다. 공급 튜브(300)의 내경(d)은 또한, 액체 도펀트가 공급 튜브(300)를 통과하는 것을 모세관 작용이 막지 못하도록 크기가 정해진다. 액체 도펀트에 작용하는 모세관 힘들이 액체 도펀트의 온도에 반비례 관계에 있기 때문에, 공급 튜브(300)의 내경(d)은 공급 튜브(300)의 하부 단부(306)를 향해 안쪽으로 테이퍼링될 수도 있다.
- [0047] 공급 튜브(300)는 또한 공급 튜브 측벽들(302)의 두께 및 내경(d)의 크기에 기초한 외경(D)을 갖는다. 도 2에 도시된 실시양태에서, 공급 튜브(300)의 외경(D)은 상부 개방부(210)에서 테이퍼 단부(216)의 외경과 동일하다.
- [0048] 공급 튜브(300)의 내부 측벽들(312)은 개방부(210) 근처에서 안쪽으로 연장하여 공급 튜브(300)를 통한 고체 도펀트(208)의 통과를 규제하도록 구성된 제1 규제부(first restriction; 314)를 형성한다. 제1 규제부(314)는 대안적으로 테이퍼 단부(216)의 내부 측벽들(316)로부터 형성될 수도 있고, 또는 제1 규제부(314)는 공급 튜브(300) 및 테이퍼 단부(216)에 걸쳐 있을 수도 있다. 제1 규제부(314)는 공급 튜브(300)를 통한 고체 도펀트의 통과를 막도록 하는 크기의 직경을 갖는다. 도 2 및 도 3에 도시된 실시양태에서, 제1 규제부는 1 mm의 내경을 갖는다.
- [0049] 이 실시양태의 제2 규제부(318)가 공급 튜브(300)의 하부 단부(306) 근처에 형성되어, 공급 튜브(300)를 통과하는 액체 도펀트의 유동을 방해하고 그의 유속을 감소시킨다. 액체 도펀트의 유속을 감소시킴으로써, 용융물 표면(116) 상의 액체 도펀트의 충돌이 감소되고, 이에 따라 용융물(104)의 스플래싱(splashing) 또는 스패터링(splattering)을 감소시킨다. 게다가, 공급 튜브(300)의 하부 단부(306)에서의 액체 도펀트의 유동을 방해하는 것은, 액체 도펀트가 용융물(104) 내로 도입되기 이전에 더욱 가열되도록 한다. 그리하여, 액체 도펀트는 용융물(104) 내로 도입되기 전에 용융물(104)의 온도에 근접한 온도로 가열된다. 이것은 도펀트(208)와 용융물(104) 사이의 열충격(thermal shock)을 감소시킨다. 추가적으로, 액체 도펀트의 온도를 상승시키는 것은 액체 도펀트의 점도를 감소시키며, 이에 따라 액체 도펀트가 도입될 때 용융물(104)의 스플래싱 또는 스패터링을 더욱 감소시킨다.
- [0050] 제2 규제부(318)는 또한 공급 튜브(300)를 빠져나가는 액체 도펀트 스트림의 단면적, 및 용융물 표면(116) 상의 액체 도펀트의 결과적인 자유 표면적을 감소시킨다. 용융물 표면(116) 상의 액체 도펀트의 자유 표면적을 감소시킴으로써, 제2 규제부(318)는 액체 도펀트의 증발을 더욱 감소시킨다.
- [0051] 도 3에 도시된 실시양태에서, 제2 규제부(318)는 공급 튜브(300)의 내부 측벽들(312)이 하부 개방부(308) 근처에서 안쪽으로 테이퍼링되어 제2 규제부(318)를 형성한다는 점에서 제1 규제부(314)와 유사한 구성을 갖는다. 제2 규제부(318)는 공급 튜브(300)의 단부까지 하방으로 연장하여, 공급 튜브(300)의 하부 개방부(308)를 한정한다. 제2 규제부(318)의 직경은 공급 튜브(300)의 내경(d)보다 더 작은 크기이고, 공급 튜브(300)의 내부 측벽들(312)로부터 액체 도펀트에 작용하는 모세관 힘들을 액체 도펀트가 극복할 수 있도록 하기에 충분히 크다. 도 3에 도시된 실시양태에서, 제2 규제부의 직경은 2 mm이다.
- [0052] 이제 도 2, 도 4 및 도 5를 참조하여, 액체 도핑 시스템(200)을 사용하여 액체 도펀트를 반도체 또는 태양전지

등급 재료의 용융물 내로 도입하는 방법이 이제 설명될 것이다. 도 2에 도시된 바와 같이, 액체 도핑 시스템(200)이 용융물 표면(116)으로부터 멀리 떨어져 위치되어 있는 동안 미리 결정된 양의 도펀트 입자들(208)이 도펀트 저장소(206) 내로 도입된다. 테이퍼 단부(216)는 도펀트 입자들(208)을 도펀트 저장소(206)의 가장 낮은 부분을 향해 보낸다. 제1 규제부(314)는 고체 도펀트 입자들(208)이 공급 튜브(300)를 통과하는 것을 막는다.

[0053]

도 4 및 도 5에 도시된 바와 같이, 도펀트(208)를 용융물(104) 내로 도입하기 위해, 액체 도핑 시스템(200)은 인상 메커니즘(118)을 통해 용융물 표면(116) 근처로 내려진다. 액체 도핑 시스템(200)은 공급 튜브(300)의 경사진 팁(310)이 용융물 표면(116)과 접촉할 때까지 내려진다. 공급 튜브(300)의 경사진 팁(310)은, 용융물 표면(116)과 공급 튜브(300) 사이의 접촉의 더 양호한 시각적 지표를 제공함으로써 용융물 표면(116) 근처에 액체 도핑 시스템(200)의 위치 선정을 용이하게 한다. 그리하여, 액체 도핑 시스템(200)은 용융물 표면(116) 근처에 위치되도록 그리고 용융물(104)과의 접촉을 최소화하도록 구성되는데, 이 접촉은 열충격 및 변형으로부터의 도핑 시스템의 점차적인 열화, 공급 튜브 근방에서의 용융물 재료의 고형화, 및 용융물(104)로부터 증발하는 일산화규소의 공급 튜브 내부 표면 상의 증착을 야기할 수 있다.

[0054]

액체 도핑 시스템(200)이 용융물 표면(116)을 향해 내려짐에 따라, 도펀트 저장소(206) 내부의 온도는 상승하기 시작한다. 도펀트(208)가 용융물 표면(116) 근처에 위치되기 전에 도펀트(208) 용융의 가능성을 감소시키기 위해, 액체 도핑 시스템(200)을 위치시키는 이동 시간이 결정될 수도 있다. 이동 시간은 고체 도펀트 입자들(208)을 용융시키는 데 필요한 시간의 양에 기초할 수도 있고, 고체 도펀트 입자들(208)의 온도를 융점으로 상승시키는 데 필요한 시간의 양에 의해, 또는 다음과 같이 추정될 수 있고,

[0055]

<식 1>

$$t_{\text{이동}} = \frac{(T_m - T_s) * (c_d * m_d + c_{dd} * m_{dd})}{\frac{dE}{dt}}$$

[0056]

여기서 T_m 은 도펀트의 용융 온도이고, T_s 는 도핑 공정의 시작 시에 고체 도펀트 입자들(208)의 온도(통상 실온)이고, c_d 는 고체 도펀트 입자들(208)의 비열용량(specific heat capacity)이고, m_d 는 고체 도펀트 입자들(208)

의 총 질량이고, c_{dd} 는 액체 도핑 시스템(200)의 비열용량이고, m_{dd} 는 액체 도핑 시스템(200)의 질량이고, $\frac{dE}{dt}$ 는 용융물(104) 및 성장 챔버(100)의 다른 구성요소들로부터 고체 도펀트 입자들(208)로 그리고 액체 도핑 시스템(200)으로의 에너지 전달률이다. 이동 시간 이내에 액체 도핑 시스템(200)을 용융물 표면(116) 근처에 위치시키는 것은, 액체 도핑 시스템(200)이 용융물 표면(116)으로부터 멀리 떨어져 위치되는 동안 액체 도펀트가 방출되는 것을 방지하며, 이에 따라 용융물 표면(116) 상의 액체 도펀트의 격렬한 충돌을 방지한다. 공급 튜브(300)의 경사진 팁(310)은 용융물 표면(116)과 공급 튜브(300) 사이의 접촉의 더 양호한 시각적 지표를 제공하기 때문에 액체 도핑 시스템(200)을 위치시키는 데 필요한 시간의 양을 감소시킨다. 따라서, 경사진 팁(310)은 오퍼레이터(도시 생략)가 이동 시간 이내에 액체 도핑 시스템(200)을 위치시키는 것을 돕는다.

[0058]

액체 도핑 시스템(200)이 용융물 표면(116) 근처에 위치된 후에, 도펀트 저장소(206) 내부의 온도는 도펀트 입자들(208)의 용융 온도까지 상승된다. 고체 도펀트 입자들(208)이 액화되므로, 생성되는 액체 도펀트(220)는 제1 규제부(314) 및 공급 튜브(300)를 통해 유동한다. 액체 도펀트(220)가 공급 튜브(300)를 통해 유동할 때 공급 튜브(300)의 직경(d)의 크기는 액체 도펀트(220)의 가용 자유 표면을 제한하고, 이에 따라 액체 도펀트(220)의 증발을 제한한다.

[0059]

공급 튜브(300)를 통해 유동하는 액체 도펀트(220)는 하부 개방부(308)를 통해 공급 튜브(300)를 빠져나가서 용융물(104)에 들어가기 전에 공급 튜브(300)의 하부 단부(306)에서 제2 규제부(318)에 의해 방해받는다. 제2 규제부(318)는 공급 튜브(300)를 통과하는 액체 도펀트(220)의 유동을 방해하고 그의 유속을 감소시키며, 이에 따라 용융물 표면(116) 상의 액체 도펀트(220)의 충돌, 및 용융물(104)의 스플래싱 또는 스패터링을 감소시킨다. 게다가, 공급 튜브(300)의 하부 단부(306)에서의 액체 도펀트의 유동을 방해하는 것은, 액체 도펀트(220)가 용융물(104)에 들어가기 이전에 더욱 가열되도록 한다. 그 결과, 액체 도펀트(220)의 온도는 용융물(104)에 들어가기 전에 용융물(104)의 온도에 근접한 온도로 가열될 수 있고, 이에 따라 액체 도펀트(220)와 용융물(104) 사이의 열충격을 감소시킨다. 추가적으로, 액체 도펀트(220)의 온도를 상승시키는 것은 액체 도펀트의 점도를 감소시키며, 이에 따라 액체 도펀트(220)가 용융물(104) 내로 도입될 때 용융물(104)의 스플래싱 또는 스패터링을 더욱 감소시킨다.

[0060]

제2 규제부(318)는 또한 공급 튜브(300)를 빠져나가는 액체 도펀트(220) 스트림의 단면적, 및 용융물 표면(116)

상의 액체 도펀트(220)의 결과적인 자유 표면적을 감소시킨다. 용융물 표면(116) 상의 액체 도펀트(220)의 자유 표면적을 감소시킴으로써, 제2 규제부(318)는 액체 도펀트(220)의 증발을 감소시킨다.

[0061] 일단 도펀트 입자들(208)이 액화되고 그리고/또는 미리 결정된 시간이 경과되면, 액체 도핑 시스템(200)은 인상 메커니즘(118)에 의해 올려지고 노(108)로부터 꺼내진다. 그 후에 도핑 공정은 반복될 수도 있고 또는 액체 도핑 시스템(200)은 나중 사용을 위해 보존될 수도 있다.

[0062] 도펀트(208)가 비교적 낮은 용점 - 예컨대 1400℃ 미만, 또는 심지어 800℃ 미만 - 을 갖는 경우, 상기 설명된 도핑 방법은 비교적 짧은 시간에 수행될 수 있다. 그 결과, 도펀트 저장소(206)의 본체(214)의 온도는, 도핑 공정이 완료된 직후에, 냉각 단계를 필요로 하지 않고서, 액체 도핑 시스템(200)을 노(108)로부터 꺼낼 수 있을 만큼 충분히 낮다. 추가적으로, 더미 시드(204)는 척(122)으로부터 즉시 제거될 수 있고, 단결정 잉곳을 성장시킬 시에 사용을 위해, 도 1에 도시된 시드 결정(124)과 같은 시드 결정으로 대체될 수 있다.

[0063] 예컨대, 본 명세서에 기재된 액체 도핑 시스템과 같은 액체 도핑 시스템을 사용함으로써, 액체로서의 인듐을 도입하는 것은, 도핑 및/또는 성장 공정 동안 인듐 증발을 감소시키고, 결과적인 인듐 도핑된 실리콘 잉곳에서의 보다 예측 가능한 인듐 도펀트 농도들을 제공한다.

[0064] 이제 도 1을 참조하면, 성장 공정 동안, 용융물에 의해 생성되는 증발된 화학종들 및 오염물질들을 제거하고 그리고 성장된 잉곳 내로 오염물질들이 혼입될 위험을 감소시키기 위해 실리콘 용융물(104) 위에 배치된 하나 이상의 기체 유입구들(126)로부터 성장 챔버 내로 불활성 기체가 도입될 수도 있다. 불활성 기체는 용융물 표면(116) 및 성장하는 잉곳(136)의 표면 위에서 유동하고, 이에 따라 단결정이 성장하고 있는 상 경계(138)에 오염물질 입자들이 도달할 수 있는 것을 방지한다. 적합한 불활성 기체들은 아르곤, 헬륨, 질소, 네온, 이들의 혼합물들, 및 임의의 다른 적합한 불활성 기체를 포함한다.

[0065] 상기 서술된 바와 같이, 인듐은 붕소와 비교해서 비교적 높은 분리 계수 및 높은 증발률을 갖는다. 실리콘 용융물의 표면 위에서 불활성 기체를 유동시키는 것은 실리콘 용융물에서의 인듐의 증발률을 증가시키는 경향이 있고, 이는 성장된 잉곳에서의 예측 불가능한 도펀트 농도들을 초래할 수 있다. 따라서, 성장된 잉곳에서의 인듐 도펀트 농도는 성장 챔버 내부의 다른 파라미터들에 관련하여 불활성 기체 유량을 조정함으로써 제어될 수도 있다. 특히, 성장된 잉곳에서의 인듐 도펀트 농도는 불활성 기체 유량, 내부 챔버 압력, 및 실리콘 용융물에서의 인듐의 유효 증발률 간의 관계에 기초하여 불활성 기체 유량 및 내부 챔버 압력의 비를 조정함으로써 제어될 수도 있다.

[0066] 구체적으로, 실리콘 용융물에서의 인듐의 유효 증발률, 불활성 기체 유량, 및 내부 챔버 압력 간의 관계는 다음과 같이 표현될 수 있고

[0067] <식 2>

$$g^* = A \left(\frac{f}{p} \right) + B$$

[0069] 여기서 g^* 는 실리콘 용융물에서의 인듐의 유효 증발률이고, f 는 유입되는 불활성 기체 유량이고, p 는 챔버의 내부 압력이고, A 및 B 는 각각 성장 챔버의 구성에 의존하는 계수들이다. 그리하여, A 및 B 가 알려져 있는 경우, 불활성 기체 유량 및 챔버의 내부 압력의 비는 실리콘 용융물에서의 인듐의 원하는 유효 증발률을 획득하도록 조정될 수 있다. 본 명세서에 사용되는 바와 같이, "유입되는 불활성 기체 유량"이란, 체적 유량, 질량 유량, 또는 유량을 측정하는 임의의 다른 적합한 수단으로서 측정된, 본 명세서에 기재된 하나 이상의 기체 유입구들을 통해 성장 챔버에 들어가는 불활성 기체의 총 유량을 말한다.

[0070] 실리콘 용융물에서의 인듐의 유효 증발률은 잉곳 성장 공정 동안 주어진 시간 t 에서 실리콘 용융물에서의 원하는 인듐 도펀트 농도에 기초하여 선택될 수도 있다. 실리콘 용융물에서의 인듐 도펀트 농도는 하기 식에 의해 성장 공정 동안 경과되는 시간의 양에 관련될 수도 있고

[0071] <식 3>

$$C_t = C_{i,0} e^{-\left(\frac{g^*}{H}\right)t}$$

[0073] 여기서 C_t 은 성장 공정 동안 주어진 시간 t 에서 실리콘 용융물에서의 인듐 도펀트 농도이고, $C_{i,0}$ 은 실리콘 용융물에서의 초기 인듐 도펀트 농도이고, g^* 는 인듐 도펀트의 유효 증발률이고, H 는 용융물 체적 대 용융물의 자유

표면(즉, 잉곳 단면의 표면적보다 작은 실리콘 용융물의 표면적)의 비이다. 실리콘 용융물에서의 인듐의 유효 증발률은 또한 성장된 잉곳에서 원하는 도펀트 농도 프로파일에 기초하여 선택될 수도 있다. 예를 들어, 고체-액체 계면에서 성장하는 잉곳에서의 도펀트 농도는 하기 식을 사용하여 대략적으로 계산될 수 있고

<식 4>

$$C_s = k * C_l$$

여기서 C_s 는 고체-액체 계면에서 고형화된 잉곳에서의 인듐 도펀트 농도이고, k 는 실리콘에서 인듐의 분리 계수(대략 4×10^{-4})이다. 실리콘 용융물에서의 인듐의 유효 증발률은 또한 성장된 잉곳에서의 원하는 저항률 프로파일에 기초하여 선택될 수도 있다. 예를 들어, 인듐 도핑된 실리콘의 저항률은, DIN 50444, SEMI MF723-0307에 기술된 Irvin 곡선과 같은 산업 표준들을 사용하여 실리콘에서의 인듐 도펀트 농도에 관련될 수 있다. 원하는 저항률 프로파일을 위해, 대응하는 인듐-도펀트 농도 프로파일이 결정될 수도 있고, 실리콘 용융물에서의 대응하는 인듐-도펀트 농도가 결정될 수도 있고, 그에 따라 실리콘 용융물에서의 인듐의 유효 증발률이 선택될 수도 있다. 실리콘에서의 인듐 도펀트 농도를 결정하기 위해 Irvin 곡선들을 사용하는 것 이외에 또는 대안으로서, 인듐 도핑된 실리콘의 저항률과 인듐 도핑된 실리콘의 인듐 도펀트 농도 사이의 경험적 관계를 결정하기 위해 하나 이상의 교정 잉곳들이 제작되어 이용될 수도 있다. 이러한 실시양태들에서, 인듐 도펀트 농도는 저항률에 관계없이, 예를 들어, 이차 이온 질량 분광법(secondary ion mass spectroscopy, SIMS) 또는 저온 푸리에 변환 적외선 분광법(low-temperature Fourier transform infrared spectroscopy, LT-FTIR)을 사용하여 측정될 수도 있다. 이러한 측정 기법들은 인듐이 실리콘에서의 비교적 높은 이온화 에너지(대략 160 MeV)를 갖는 결과로서 인듐 도핑된 실리콘에서의 인듐 도펀트 농도에 대한 보다 정확한 값들을 제공할 수도 있다. 독립적으로 측정된 인듐 도펀트 농도들은 상기 설명된 바와 같이, 실리콘 용융물에서의 인듐의 유효 증발률을 선택하기 위해 측정된 저항률 값들과 조합하여 사용될 수도 있다.

식 2에서의 계수들 A 및 B는 성장된 인듐 도핑된 실리콘 잉곳들로부터 취해진 측정들에 기초하여 경험적으로 결정될 수도 있다. 예를 들어, 계수들 A 및 B는 다음과 같이 표현되는, 실리콘에서의 인듐의 유효 증발률과 인듐의 유효 분리 계수(k_e) 사이의 관계를 사용하여 결정될 수도 있고

<식 5>

$$g^* = (k_e - k) \frac{Hv}{\delta}$$

여기서 k 는 실리콘에서의 인듐의 분리 계수(대략 4×10^{-4})이고, H 는 용융물 체적 대 용융물의 자유 표면의 비이고, v 는 결정 인상기(crystal puller)의 평균 인상 속도(average pull speed)이고, δ 는 실리콘의 액체 대 고체 밀도비이다. 실리콘에서의 인듐의 유효 분리 계수(k_e)는 하기 식을 사용하여 성장된 인듐 도핑된 실리콘 잉곳들로부터 절단된 섹션들로부터 취해진 측정들로부터 계산될 수도 있고

<식 6>

$$k_e = 1 + \frac{\log\left(\frac{C_a}{C_z}\right)}{\log\left(\frac{1-m_a}{1-m_z}\right)}$$

여기서 C_a 는 측정되고 있는 잉곳 섹션의 시드 단부(즉, 잉곳의 시드 단부에 가장 가까운 잉곳 섹션의 단부)에서의 도펀트 농도이고, C_z 는 측정되고 있는 잉곳 섹션의 테일 단부(즉, 잉곳의 테일 단부에 가장 가까운 잉곳 섹션의 단부)에서의 도펀트 농도이고, m_a 는 잉곳 섹션의 시드 단부에서의 실리콘 잉곳의 고형화된 분율(solidified fraction)이고, m_z 는 잉곳 섹션의 테일 단부에서의 실리콘 잉곳의 고형화된 분율이다. 식 5에 관련하여 사용되는 바와 같이, 잉곳의 세로축에 수직으로 취해진 실리콘 잉곳의 주어진 단면에 대해, "고형화된 분율"이라는 용어는 잉곳의 시드 단부와 기준 단면 사이의 잉곳의 질량을, 잉곳을 성장시키기 위해 사용된 초기 충전 중량의 총 질량으로 나눈 것을 의미한다.

그리하여, 본 명세서에 기재된 불활성 기체 유량과 내부 챔버 압력 사이의 관계들을 사용하여, 불활성 기체 유량 및 내부 챔버 압력의 비를 조정함으로써 인듐 도펀트 증발률이 제어될 수도 있다. 따라서, 성장된 인듐 도

평된 실리콘 잉곳에서의 인듐-도펀트 농도도 또한 불활성 기체 유량 및 내부 챔버 압력의 비를 조정함으로써 제어될 수도 있다. 특정한 실시양태들에서, 불활성 기체 유량 및 내부 챔버 압력은 불활성 기체 유량 및 내부 챔버 압력의 비가 밀리바(millibar)당 약 0.05 내지 약 1.40 노멀-리터/분(normal-liters per minute), 밀리바당 약 0.10 내지 약 1.00 노멀-리터/분, 또는 밀리바당 약 0.10 내지 약 0.80 노멀-리터/분이도록 조정될 수도 있다. 또 다른 실시양태들에서, 불활성 기체의 유량은 약 20 노멀-리터/분 내지 약 200 노멀-리터/분, 약 30 노멀-리터/분 내지 약 140 노멀-리터/분, 또는 약 30 노멀-리터/분 내지 약 80 노멀-리터/분으로 다양할 수도 있다. 또 다른 실시양태들에서, 성장 챔버의 내부 압력은 약 20 밀리바 내지 약 400 밀리바, 약 30 밀리바 내지 약 200 밀리바, 또는 약 30 밀리바 내지 약 100 밀리바로 다양할 수도 있다. 본 명세서에 사용되는 바와 같이, "노멀-리터"라는 용어는 273.15 켈빈(Kelvin) 및 101.325 kPa에서의 기준 기체 1 리터를 말한다.

[0085]

불활성 기체 유량 및 내부 챔버 압력의 비는, 성장된 잉곳에서의 원하는 인듐 도펀트 농도를 획득하기 위해 성장 공정 이전, 성장 공정 동안, 또는 성장 공정 이전 및 성장 공정 동안 둘 다에서 조정될 수도 있다. 불활성 기체 유량 및/또는 내부 챔버 압력은 성장 공정 동안 1회 초과로, 또는 심지어 성장 공정 동안 연속적으로 조정될 수도 있다. 불활성 기체 유량 및/또는 내부 챔버 압력은 초크랄스키 성장 공정의 실시간 측정들에 기초하여, 또는 성장 공정의 시작 이후에 하나 이상의 미리 결정된 횟수로 조정될 수도 있다. 불활성 기체 유량 또는 내부 챔버 압력이 조정되는 미리 결정된 횟수는, 성장 공정의 개시 후에 경과된 시간의 양, 원하는 길이에 도달하는 잉곳, 원하는 인상 속도에 도달하는 인상 속도, 또는 성장 공정에 의해 소모되는 실리콘 용융물의 양에 기초할 수도 있다.

[0086]

기체 유입구들(126)을 통해 유동하는 불활성 기체의 유량은 기체 유입구들(126)에 부착된 하나 이상의 유동 제어기들(128)을 사용하여 제어된다. 유동 제어기들(128)은 기체 유입구를 통과해 성장 챔버 내로 들어가는 불활성 기체의 유량을 조절하는 데 적합한 임의의 디바이스, 예를 들어, 질량 유동 제어기, 체적 유동 제어기, 스로틀 밸브들, 또는 버터플라이 밸브들(butterfly valves)일 수도 있다. 유동 제어기들(128)은 자동화되거나 또는 수동으로 제어될 수도 있다. 자동 유동 제어기들은 사용자 정의 조건들에 기초하여 (예컨대, 소정 시간이 경과된 후에) 불활성 기체의 유량을 조절할 수 있는 하나 이상의 프로그래밍가능 디바이스들(140)에 의해 제어될 수도 있다. 도 1에 도시된 유동 제어기들은 사용자 정의 조건들에 기초하여 불활성 기체의 유량을 조절할 수 있는 프로그래밍가능 디바이스들(140)에 의해 제어되는 자동 질량 유동 제어기들이다.

[0087]

성장 챔버(100)의 내부 압력은 성장 챔버의 배기구들(130)과 유체 연통하는 하나 이상의 압력 조절 디바이스들(132)을 사용하여 제어될 수도 있다. 압력 조절 디바이스들(132)은 성장 챔버(100) 내부의 압력을 조절하기 위해 적합한 임의의 유형의 디바이스, 예를 들어, 전자 압력 제어기들, 스로틀 밸브들, 버터플라이 밸브들, 및 볼 밸브들(ball valves)일 수도 있다. 압력 조절 디바이스들(132)은 자동화되거나 또는 수동으로 제어될 수도 있다. 자동 압력 조절 디바이스들은 사용자 정의 조건들에 기초하여 (예컨대, 소정 시간이 경과된 후에) 성장 챔버(100)의 내부 압력을 조절할 수 있는 하나 이상의 프로그래밍가능 디바이스들(140)에 의해 제어될 수도 있다. 압력 조절 디바이스(132)를 제어하기 위해 사용되는 프로그래밍가능 디바이스(140)는 유동 제어기(128)를 제어하기 위해 사용되는 프로그래밍가능 디바이스(140)와는 별개이거나 또는 그와 동일할 수도 있다. 도 1에 도시된 압력 조절 디바이스는 자동화되고, 사용자 정의 조건들에 기초하여 성장 챔버의 내부 압력을 조절할 수 있는 프로그래밍가능 디바이스(140)에 의해 제어된다.

[0088]

성장 챔버(100)의 배기구들(130)과 유체 연통하는 펌프(134)는 불활성 기체, 오염물질들, 및 실리콘 용융물로부터의 증발된 화학종들(예컨대, SiO 및 도펀트 관련 화학종들)을 성장 챔버(100) 밖으로 펌핑하기 위해 사용될 수도 있다. 펌프(134)는 성장 챔버(100) 내부의 압력을 조절하거나 또는 조정하기 위해 압력 조절 디바이스(132)에 관계없이 또는 그와 함께 동작될 수도 있다. 펌프(134)는 사용자 정의 조건들에 기초하여 (예컨대, 소정 시간이 경과된 후에) 펌프의 설정들을 조절할 수 있는 프로그래밍가능 디바이스(140)에 의해 제어될 수도 있다. 프로그래밍가능 디바이스(140)는 유동 제어기(128) 및/또는 압력 조절 디바이스(132)를 제어하기 위해 사용되는 프로그래밍가능 디바이스와 동일하거나 또는 이와는 별개일 수도 있다.

[0089]

불활성 기체 유량 및 내부 챔버 압력의 비를 조정하는 것은 인듐 도핑된 실리콘 잉곳이 성장됨에 따라 용융물에서의 인듐의 상대 농도가 비교적 일정하게 유지되는 것을 보장하고, 인듐 도핑된 실리콘 잉곳에서의 도펀트 농도가 비교적 균일한 것을 또한 보장한다.

[0090]

본 발명의 공정의 이점은, 잉곳의 중심축(602)에 평행한 방향으로 인듐 도펀트 농도의 낮은 축방향 분산과 함께, 중심축으로부터 원주 에지(606)로 측정될 때 반경(604)을 따라 낮은 반경방향 분산을 갖는, 도 6에 도시된 잉곳(600)과 같은, 상품 크기의 단결정 실리콘 잉곳의 제조이다. 일부 실시양태들에서, 인듐 농도의 축방향

분산은 20 cm 초과와 단결정 실리콘 잉곳의 축방향 길이에 걸쳐 약 5×10^{14} 원자/세제곱 센티미터 미만, 20 cm 초과와 단결정 실리콘 잉곳의 축방향 길이에 걸쳐 약 1×10^{14} 원자/세제곱 센티미터 미만, 20 cm 초과와 단결정 실리콘 잉곳의 축방향 길이에 걸쳐 약 5×10^{13} 원자/세제곱 센티미터 미만, 또는 20 cm 초과와 단결정 실리콘 잉곳의 축방향 길이에 걸쳐 심지어 약 4×10^{13} 원자/세제곱 센티미터 미만일 수도 있다. 일부 실시양태들에서, 인듐 농도의 축방향 분산은 40 cm 초과와 단결정 실리콘 잉곳의 축방향 길이에 걸쳐 약 1×10^{15} 원자/세제곱 센티미터 미만, 40 cm 초과와 단결정 실리콘 잉곳의 축방향 길이에 걸쳐 약 5×10^{14} 원자/세제곱 센티미터 미만, 또는 40 cm 초과와 단결정 실리콘 잉곳의 축방향 길이에 걸쳐 심지어 약 2×10^{14} 원자/세제곱 센티미터 미만일 수도 있다. 일부 실시양태들에서, 인듐 농도의 상대 축방향 분산은 20 cm 초과와 단결정 실리콘 잉곳의 축방향 길이에 걸쳐 약 20% 미만, 20 cm 초과와 단결정 실리콘 잉곳의 축방향 길이에 걸쳐 약 10% 미만, 20 cm 초과와 단결정 실리콘 잉곳의 축방향 길이에 걸쳐 약 5% 미만, 또는 20 cm 초과와 단결정 실리콘 잉곳의 축방향 길이에 걸쳐 심지어 약 2% 미만일 수도 있다. 일부 실시양태들에서, 인듐 농도의 상대 축방향 분산은 40 cm 초과와 단결정 실리콘 잉곳의 축방향 길이에 걸쳐 약 33% 미만, 40 cm 초과와 단결정 실리콘 잉곳의 축방향 길이에 걸쳐 약 25% 미만, 40 cm 초과와 단결정 실리콘 잉곳의 축방향 길이에 걸쳐 약 15% 미만, 또는 40 cm 초과와 단결정 실리콘 잉곳의 축방향 길이에 걸쳐 심지어 약 10% 미만일 수도 있다. 일부 실시양태들에서, 인듐 도핑된 실리콘 잉곳(600)의 질량은 적어도 약 30 kg, 적어도 약 40 kg, 적어도 약 50 kg, 적어도 약 60 kg, 적어도 약 70 kg, 또는 적어도 약 80 kg일 수도 있다. 또 다른 실시양태들에서, 인듐 도핑된 실리콘 잉곳(600)의 질량은 175 kg 초과, 예를 들어 적어도 약 180 kg, 적어도 약 200 kg, 또는 심지어 적어도 약 220 kg일 수도 있다. "상대 축방향 분산"은, 단결정 실리콘 잉곳의 축방향 길이를 따라 주어진 거리로 떨어져 위치되는 2개의 지점들 사이의 인듐 농도의 변화를, 단결정 실리콘 잉곳의 시드 콘(seed cone)에 가장 가까운 지점에서 측정될 때의 인듐 농도로 나눈 것을 측정함으로써 결정된다. 이 결과적인 값에 100을 곱하여 백분율을 구한다. 이러한 백분율이 본 명세서에 개시된 인듐 농도에서의 "상대 축방향 분산"이다. 본 발명의 공정은 실리콘 잉곳의 상당한 길이에 걸쳐 인듐 농도의 낮은 상대 축방향 분산을 갖는 단결정 실리콘 잉곳을 야기한다. 따라서, 잉곳은 저항률, 변환 효율, 및 광 유도 열화에 대한 저항의 실질적으로 균일한 특성을 갖는 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들의 집합체(population)로 슬라이싱될 수도 있다.

[0091]

단결정 실리콘 잉곳은 태양 전지 응용물들에 사용하기에 적합한 단결정 실리콘 웨이퍼 또는 단결정 실리콘 웨이퍼들의 집합체로 가공될 수도 있다. 이와 관련하여, 잉곳은, 편평한 에지들을 갖도록 절단하는 것을 포함하여, 산업 표준들에 따라 가공되고, 연삭되고, 에지 모따기되고(edge chamfered), 크로핑되고, 그리고 본 명세서에 설명되는 바와 같이, 인듐 농도 및 저항률의 실질적으로 균일한 특성들을 갖는 단결정 실리콘 웨이퍼들의 집합체로 와이어쏘(wiresaw) 절단될 수도 있다. 절단 동작은 일반적으로 절단 공구의 제조업자에 의해 제공되는 가이드라인들을 따른다. 단결정 실리콘 잉곳은 태양 전지에서 최종 사용의 기하학적 요건들을 충족시키는 산업 표준 형상들 및 크기들을 갖는 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들의 집합체로 절단된다. 산업 표준에 따라 가공되고 슬라이싱된 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼는 그 후에 또 다시 산업 표준들에 따라 태양 전지로 더욱 가공될 수도 있다.

[0092]

인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼로부터 태양 전지를 제조하는 공정에서, 웨이퍼 표면은 반사를 최소화하기 위해 텍스처링될 수도 있다. 표면의 임의의 "조면화(roughening)"는 반사광이 주위 공기 속으로 보다는, 표면 상으로 다시 튕기회를 증가시킴으로써 반사를 감소시킨다. 단결정 기판은 결정 평면들의 면들을 따라 에칭에 의해 텍스처링될 수 있다. 실리콘의 결정 구조는 표면이 내부 원자들에 관하여 적절히 정렬되면 피라미드들로 이루어진 표면을 야기한다. 사용되는 다른 유형의 표면 텍스처링으로는 "반전된 피라미드" 텍스처링이라고 알려진 것이 있다. 이러한 텍스처링 방식을 사용하면, 피라미드들은 실리콘 표면으로부터 상방으로 에칭되는 것을 시사하기 보다는 실리콘 표면 내로 들어가 에칭된다. 텍스처링된 웨이퍼는 인(phosphorus)의 주입(implantation) 또는 확산과 같은 산업 표준 공정에 따라 이미터(emitter)를 포함하도록 산업 표준들에 따라 가공되고, 그 다음에 에지 격리(edge isolation)가 실시된다. 일부 실시양태들에서, 반사방지 코팅이 적용될 수도 있다. 태양 전지들 상에서의 반사방지 코팅들은 카메라 렌즈들과 같은 다른 광학 장비 상에서 사용되는 것들과 유사하다. 이들은, 코팅에서의 간섭 효과들이, 반사방지 코팅 상단 표면으로부터 반사되는 파동이 반도체 표면들로부터 반사되는 파동과는 위상이 다르도록 하는 두께를 갖는 유전체 재료의 박층으로 이루어진다. 이들 위상이 다른 반사된 파동들은 서로 상쇄적으로 간섭하여, 순수 반사된 에너지가 제로가 되게 한다. 통상 사용되는 코팅은 질화규소이다. 대안적으로, 황화아연/플루오르화마그네슘과 같은, 이중층 반사방지 코팅이 적용될

수도 있다. 패턴화된 금속 스크린, 예컨대, 은, 알루미늄이 웨이퍼의 전방 및 후방으로 스크린 인쇄에 의해 적용되고, 그 다음에 웨이퍼들을 소성하여, 예컨대 어레이 그리드에서 유용한 태양 전지들을 수득한다.

[0093] 본 발명의 태양 전지는 태양 스펙트럼 방사조도 변환의 높은 효율을 갖는 것을 특징으로 한다. 태양 스펙트럼 방사조도 변환 효율은 산업 표준들에 따라 측정될 수도 있다. 예를 들어, 변환 효율은 광전지 성능 평가를 위한 미국 재료 시험 협회(ASTM) 지상 기준 스펙트럼(American Society for Testing and Materials (ASTM) Terrestrial Reference Spectra for Photovoltaic Performance Evaluation)이라는 제목으로 ASTM G173-03에서 기술된 표준에 따라 측정될 수도 있다. ASTM G173 스펙트럼은 특정 대기 조건들의 세트 하에서 특정 배향의 표면 상에서의 지상 태양 스펙트럼 방사조도를 나타낸다. 과장의 함수로서의 전력(대역폭의 나노미터당 와트/제곱미터)의 이러한 분포는 여러 가지 스펙트럼 분포들을 갖는 다양한 천연 및 인공 광 공급원들 하에서 측정된 성능에 관하여 선택적인 PV 재료들을 스펙트럼으로 평가하기 위한 단일 공통 기준을 제공한다. 선택되는 조건들은 1년의 기간에 걸쳐 미국의 48개 인접한 주들에 대해 타당한 평균이라고 간주되었다. 선택되는 경사각은 대략, 인접한 미국에 대한 평균 위도이다. 수용하는 표면은, 태양에 대면하여, 적도를 향해 37° 기울기의 경사면으로서 표준들에 정의된다(즉, 표면 법선은 수평선 위 41.81°의 각에서 태양을 가리킨다.). 특정 대기 조건들은 다음과 같다:

[0094] a) 33개의 층들에서 특정되는 온도, 압력, 에어로졸 밀도(지방 에어로졸 로딩), 공기 밀도, 분자중 밀도를 갖는 1976년 미국 표준 대기

[0095] b) 1.5의 절대 공기 질량 (태양 천정각 48.19°)

[0096] c) 500 nm에서 용스트롬 탁도 (베이스 e) 0.084 °

[0097] d) 1.42cm의 총 칼럼 수증기 상당물

[0098] e) 0.34 cm의 총 칼럼 오존 상당물

[0099] f) 제트 추진 연구소 ASTER 스펙트럼 반사율 데이터베이스(<http://speclib.jpl.nasa.gov>.)에 기록된 바와 같은 경토(Light Soil)의 표면 스펙트럼 알베도(반사율)

[0100] 태양 전지 효율은 태양광의 형태에서의 입사 에너지에 대한 태양 전지의 전기 출력의 비이다. 지상 태양 전지들은 AM1.5 조건들 하에서 그리고 25°C의 온도에서 측정된 것이다. 태양 전지의 에너지 변환 효율(η)은 셀이 노출되고 전기 에너지로 변환되는 태양 에너지의 백분율이다. 태양 전지의 효율은 전기로 변환되고 다음과 같이 정의되는 입사 전력의 분율로서 결정되고

[0101] <식 7>

[0102]
$$P_{max} = V_{oc} I_{sc} FF$$

[0103] <식 8>

[0104]
$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}}$$

[0105] 여기서 P_{max} 는 최대 전력이고, V_{oc} 는 개방회로 전압이고; I_{sc} 는 단락 전류이고; FF는 충전율이고; η 는 효율이다.

[0106] 태양 전지 효율은 통상적으로 백분율로서 표현되었다. 본 발명의 일부 실시양태들에서, 태양 전지는, 1.5의 절대 공기 질량 하에 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼의 표면 상의 태양 스펙트럼 방사조도를 변환하는 효율이 적어도 17%, 적어도 18%, 적어도 19%, 적어도 19.5%, 적어도 20%, 적어도 20.5%, 적어도 21%, 적어도 22%, 적어도 24%, 적어도 26%, 적어도 28% 또는 적어도 30%인 것을 특징으로 하는 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼를 포함한다.

[0107] 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들이 태양 스펙트럼의 적외선 영역에서의 광 상향변환 및 흡수의 능력을 갖기 때문에 높은 태양 스펙트럼 방사조도 효율이 적어도 부분적으로 달성된다. 특히, 본 발명의 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼는 실질적으로 유사하거나 또는 동일한 저항률을 갖는 붕소 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼보다 태양 스펙트럼의 적외선 영역에서의 광을 더 많이 흡수한다. 일부 실시양태들에서, 본 발명의 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼는 실질적으로 유사하거나 또는 심지어 동일한 저항률을 갖는 붕소 도핑된 웨이퍼보다 830

nm 내지 1400 nm의 파장 범위에서의 광을 더 많이 흡수한다. 태양 스펙트럼 전역에서 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들로부터 제작된 태양 전지들이 붕소 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들로부터 제작된 태양 전지들과 비교해서 광의 더 양호한 흡수를 도시하는 그래프들인 도 8a, 도 8b 및 도 8c를 참조한다. 붕소 도핑된 웨이퍼들의 저항률(약 2.4 ohm cm)이 인듐 도핑된 웨이퍼들의 저항률(약 3.5 ohm cm)보다 작더라도 인듐 도핑된 웨이퍼들로부터 제작된 태양 전지들의 흡수는 붕소 도핑된 웨이퍼들로부터 제작된 태양 전지들의 흡수보다 더 크다. PC1D 모델(자유롭게 입수가능한 태양 전지 모델링 프로그램; 뉴사우스웨일스 대학교(the University of New South Wales)로부터 입수가능함)로부터의 계산들에 기초하여, J_{sc} 에 있어서의 차이는 저항률에 의해 해명될 수 없다. 환언하면, 각각의 태양 전지들에서의 웨이퍼들의 저항률은 인듐 도핑된 웨이퍼들의 흡수의 증가를 설명하지 못한다. 더 낮은 에너지 IR 광의 더 높은 흡수는 붕소 도펀트 원자들과 비교해서 인듐 도펀트 원자들의 밴드갭에서의 더 높은 위치로 인해 그러하다고 여겨진다.

[0108]

태양 스펙트럼 전역에서 광의 높은 효율 및 증대된 상향변환에 더하여, 본 발명의 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들은 상대 기준 및 절대 기준 둘 다에 대해 낮은 광 유도 열화를 갖는 것을 특징으로 한다. 이와 관련하여, 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼를 포함하는 태양 전지의 상대 효율은 45°C 미만의 온도에서 0.1 sun 내지 10 sun에 상당하는 광에 1시간 내지 300시간 노출 후에 약 2% 이하 만큼 열화된다. 일부 실시양태들에서, 태양 전지의 상대 효율은 45°C 미만의 온도에서 0.1 sun 내지 10 sun에 상당하는 광에 1시간 내지 300시간 노출 후에 약 1% 이하 만큼 열화된다. 일부 실시양태들에서, 태양 전지의 상대 효율은 45°C 미만의 온도에서 0.1 sun 내지 10 sun에 상당하는 광에 1시간 내지 300시간 노출 후에 약 0.3% 이하 만큼 열화된다. 일부 실시양태들에서, 태양 전지의 상대 효율은 45°C 미만의 온도에서 0.7 sun에 상당하는 광에 24시간 노출 후에 약 2% 이하, 또는 약 1% 이하, 0.5% 이하, 또는 0.3% 이하 만큼 열화된다. 본 명세서에서 표현되는 바와 같은 상대 효율은 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들에 조명(illumination)을 가하고, 예컨대, 45°C 미만의 온도에서 0.7 sun에 상당하는 광에 24시간 노출시키고, 초기 상태 웨이퍼의 효율과 비교해서 효율 감소를 측정함으로써 결정된다. 효율의 차이(초기 상태 웨이퍼의 효율에서 조명 후의 웨이퍼의 효율을 뺀 것)를 초기 상태 웨이퍼의 효율로 나눈다. 결과적인 값에 100을 곱해서 본 명세서에 표현되는 백분율들을 도출할 수도 있다.

[0109]

인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들은 또한 효율의 낮은 절대 광 유도 열화를 갖는 것을 특징으로 한다. 절대 광 유도 열화는 초기 상태 웨이퍼의 효율(백분율로서 표현됨)로부터 열화된 웨이퍼의 효율(또한 백분율로서 표현됨)을 뺀으로써 결정된다. 일부 실시양태들에서, 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼를 포함하는 태양 전지의 절대 효율은 45°C 미만의 온도에서 0.1 sun 내지 10 sun에 상당하는 광에 1시간 내지 300시간 노출 후에 약 0.5% 이하, 또는 약 0.2% 이하, 또는 약 0.1% 이하, 또는 약 0.06% 이하 만큼 열화된다. 일부 실시양태들에서, 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼를 포함하는 태양 전지의 절대 효율은 45°C 미만의 온도에서 0.7 sun에 상당하는 광에 24시간 노출 후에 약 0.5% 이하, 약 0.2% 이하, 약 0.1% 이하, 또는 약 0.06% 이하 만큼 열화된다. 일부 실시양태들에서, 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼를 포함하는 태양 전지의 절대 효율은 45°C 미만의 온도에서 태양광에 4시간 노출 후에 약 1.0% 이하, 약 0.5% 이하, 약 0.2% 이하, 약 0.1% 이하, 또는 약 0.06% 이하 만큼 열화된다.

[0110]

본 발명을 상세하게 설명하였지만, 첨부된 청구범위에서 정의되는 발명의 범주로부터 벗어나지 않는 한 수정예들 및 변경예들이 가능하다는 것이 명백할 것이다.

[0111]

실시예

[0112]

하기 실시예들은 비제한적이다.

[0113]

실시예 1. 배치식 초크랄스키법에 의해 성장된 인듐 도핑된 단결정 실리콘 잉곳

[0114]

인듐 도핑된 단결정 실리콘 잉곳을 종래의 배치식 초크랄스키법에 의해 성장시켰다. 잉곳을 200 mm 초과 직경으로 성장시켰고, 이어서 산업에서의 한 방법 표준에 의해 200 mm의 균일한 직경으로 연삭하였다.

[0115]

잉곳을 와이어쏘에 의해 약 180 마이크로미터 내지 약 200 마이크로미터의 두께를 갖는 웨이퍼들로 슬라이싱하였고, 웨이퍼들을 시드 콘으로부터 다양한 길이들의 분석을 위해 선택하였다. 웨이퍼들을 웨이퍼의 중심에서 그리고 웨이퍼의 에지로부터 6 mm에서의 저항률, 웨이퍼의 중심에서 인듐 농도, 웨이퍼의 중심에서 산소 농도, 웨이퍼의 중심에서 탄소 농도, 및 반경방향 저항률 분산에 대해 시험하였다. 인듐 농도는 DIN 50444, SEMI MF723-0307에 기술된 Irvin 곡선을 사용하여 결정되었다. 이들 데이터는 하기 표 1에서 제공된다.

표 1

섹션 (시드 콘으로 부터의 거리)	웨이퍼 중심에서의 저항률	[In]	[O]	[C]	반경방향 저항률 분산
cm	Ohm-cm	원자/cm ³	PPMA	PPMA	%
0	16.50	8.10x10 ¹⁴	17.65	0.011	8.3
23	15.76	8.48x10 ¹⁴	17.60	0.001	10.6
45	16.15	8.27x10 ¹⁴	17.21	0.027	8.5
65	16.95	7.88x10 ¹⁴	17.34	0.034	9.7
91	17.73	7.53x10 ¹⁴	15.23	0.077	6.5

실시예 2. 배치식 초크랄스키법에 의해 성장된 인듐 도핑된 단결정 실리콘 잉곳

인듐 도핑된 단결정 실리콘 잉곳을 배치식 초크랄스키법에 의해 성장시켰다. 성장 공정 동안, 본 명세서에 설명된 방법들에 따라 성장된 잉곳에서의 인듐 도펀트 농도를 제어하기 위해 불활성 기체 유량 및 내부 챔버 압력의 비를 조정하였다. 잉곳을 200 mm 초과 직경으로 성장시켰고, 이어서 산업에서의 한 방법 표준에 의해 200 mm의 균일한 직경으로 연삭하였다.

잉곳을 와이어쏘에 의해 약 180 마이크로미터 내지 약 200 마이크로미터의 두께를 갖는 웨이퍼들로 슬라이싱하였고, 웨이퍼들을 시드 콘으로부터 다양한 길이들의 분석을 위해 선택하였다. 웨이퍼들을 웨이퍼의 중심에서 그리고 웨이퍼의 에지로부터 6 mm에서의 저항률, 웨이퍼의 중심에서 인듐 농도, 웨이퍼의 중심에서 산소 농도, 웨이퍼의 중심에서 탄소 농도, 및 반경방향 저항률 분산에 대해 시험하였다. 인듐 농도는 DIN 50444, SEMI MF723-0307에 기술된 Irvin 곡선을 사용하여 결정되었다. 이들 데이터는 하기 표 2에서 제공된다.

표 2

섹션 (시드 콘으로 부터의 거리)	웨이퍼 중심에서의 저항률	[In]	[O]	[C]	반경방향 저항률 분산
cm	Ohm-cm	원자/cm ³	PPMA	PPMA	%
0	5.43	2.49x10 ¹⁵	16.57	0.001	10.1
23	5.07	2.67x10 ¹⁵	16.46	0.004	12.0
45	4.99	2.71x10 ¹⁵	15.93	0.026	8.6
60	4.76	2.88x10 ¹⁵	15.94	0.034	6.8
91	3.04	4.50x10 ¹⁵	13.23	0.131	6.5

실시예 3. 배치식 초크랄스키법에 의해 성장된 인듐 도핑된 단결정 실리콘 잉곳

인듐 도핑된 단결정 실리콘 잉곳을 배치식 초크랄스키법에 의해 성장시켰다. 성장 공정 동안, 본 명세서에 설명된 방법들에 따라 성장된 잉곳에서의 인듐 도펀트 농도를 제어하기 위해 불활성 기체 유량 및 내부 챔버 압력의 비를 조정하였다. 잉곳을 200 mm 초과 직경으로 성장시켰고, 이어서 표준 방법에 의해 200 mm의 균일한 직경으로 연삭하였다.

잉곳을 와이어쏘에 의해 약 180 마이크로미터 내지 약 200 마이크로미터의 두께를 갖는 웨이퍼들로 슬라이싱하였고, 웨이퍼들을 시드 콘으로부터 다양한 길이들의 분석을 위해 선택하였다. 웨이퍼들을 웨이퍼의 중심에서 그리고 웨이퍼의 에지로부터 6 mm에서의 저항률, 웨이퍼의 중심에서 인듐 농도, 웨이퍼의 중심에서 산소 농도, 웨이퍼의 중심에서 탄소 농도, 및 반경방향 저항률 분산에 대해 시험하였다. 인듐 농도는 DIN 50444, SEMI MF723-0307에 기술된 Irvin 곡선을 사용하여 결정되었다. 이들 데이터는 하기 표 3에서 제공된다.

표 3

섹션 (시드 콘으로부터의 거리)	웨이퍼 중심에서의 저항률	[In]	[O]	[C]	반경방향 저항률 분산
cm	Ohm-cm	원자/cm ³	PPMA	PPMA	%
2	4.18	3.23x10 ¹⁵	16.38	0.058	8.7
22	3.94	3.45x10 ¹⁵	15.84	0.088	13.4
44	3.52	3.87x10 ¹⁵	15.40	0.111	6.9
67	3.03	4.52x10 ¹⁵	14.91	0.15	4.1
78	2.60	5.29x10 ¹⁵	14.51	0.166	5.6
90	1.90	7.34x10 ¹⁵	11.14	0.368	0.04

실시예 4. 배치식 초크랄스키법에 의해 성장된 인듐 도핑된 단결정 실리콘 잉곳

인듐 도핑된 단결정 실리콘 잉곳을 배치식 초크랄스키법에 의해 성장시켰다. 성장 공정 동안, 본 명세서에 설명된 방법들에 따라 성장된 잉곳에서의 인듐 도펀트 농도를 제어하기 위해 불활성 기체 유량 및 내부 챔버 압력의 비를 조정하였다. 잉곳을 200 mm 초과와 직경으로 성장시켰고, 이어서 표준 방법에 의해 200 mm의 균일한 직경으로 연삭하였다.

잉곳을 와이어쏘에 의해 약 180 마이크로미터 내지 약 200 마이크로미터의 두께를 갖는 웨이퍼들로 슬라이싱하였고, 웨이퍼들을 시드 콘으로부터 다양한 길이들의 분석을 위해 선택하였다. 웨이퍼들을 웨이퍼의 중심에서 그리고 웨이퍼의 에지로부터 6 mm에서의 저항률, 웨이퍼의 중심에서 인듐 농도, 웨이퍼의 중심에서 산소 농도, 웨이퍼의 중심에서 탄소 농도, 및 반경방향 저항률 분산에 대해 시험하였다. 인듐 농도는 DIN 50444, SEMI MF723-0307에 기술된 Irvin 곡선을 사용하여 결정되었다. 이들 데이터는 하기 표 4에서 제공된다.

표 4

섹션 (시드 콘으로부터의 거리)	웨이퍼 중심에서의 저항률	[In]	[O]	[C]	반경방향 저항률 분산
cm	Ohm-cm	원자/cm ³	PPMA	PPMA	%
0	2.34	5.90x10 ¹⁵	14.1	0.069	7.0
30	2.05	6.76x10 ¹⁵	11.5	0.058	10.3
60	1.71	8.19x10 ¹⁵	10.0	0.093	8.0
85	1.21	1.18x10 ¹⁶	9.2	0.202	4.4

비교를 위해, 각 웨이퍼의 인듐 도펀트 농도를 또한 SIMS 및 LT-FTIR을 사용하여 저항률과는 독립적으로 측정하였다. 이들 데이터는 하기 표 5에서 제공된다.

표 5

섹션 (시드 콘으로부터의 거리)	웨이퍼 중심에서의 저항률	[In] 저항률	[In] SIMS	[In] LT-FTIR
cm	Ohm-cm	원자/cm ³	원자/cm ³	원자/cm ³
0	2.34	5.90x10 ¹⁵	8.05x10 ¹⁵	7.10x10 ¹⁵
30	2.05	6.76x10 ¹⁵	9.50x10 ¹⁵	8.20x10 ¹⁵
60	1.71	8.19x10 ¹⁵	1.30x10 ¹⁶	1.20x10 ¹⁶
85	1.21	1.18x10 ¹⁶	2.30x10 ¹⁶	1.90x10 ¹⁶

실시예 5. 배치식 초크랄스키법에 의해 성장된 인듐 도핑된 단결정 실리콘 잉곳으로부터 취해진 웨이퍼들

[0132] 실시예 3에 기재된 방법에 따라 성장된 잉곳으로부터 200개의 웨이퍼들을 선택하였다. 웨이퍼들은 주요 치수들의 편평한 부분에서 편평한 부분까지 길이들(flat to flat lengths)이 156 mm \pm 0.5 mm였다. 웨이퍼 대각선 치수는 200 mm \pm 0.5 mm였다. 모서리 길이는 15.4 mm \pm 1 mm였다. 웨이퍼들의 두께들은 200 마이크로미터 \pm 20 마이크로미터 또는 180 마이크로미터 \pm 20 마이크로미터였다.

[0133] 200개의 웨이퍼들의 저항률은 3.03 ohm-cm 내지 3.5 ohm-cm의 범위 내에 있었다. 웨이퍼들의 산소 농도들은 14.9 PPMA 내지 15.4 PPMA의 범위 내에 있었다. 웨이퍼들의 수명들은 325 마이크로초 내지 651 마이크로초의 범위 내에 있었다($5 \times 10^{14}/\text{cm}^3$ 의 주입 레벨(injection level)에서의 결정 레벨에서 측정됨; 신티온(Sinton) BCT 400).

[0134] 실시예 6. 90 ohm/sq 이미터에 의해 주입되는 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들의 초기 상태 시험

[0135] 실시예 5에 기재된 방법에 따라 제조된 인듐 도핑된 웨이퍼들로부터 태양 전지들을 제작하였다. 웨이퍼들은 3.5 ohm-cm의 저항률을 갖도록 선택되었고, 90 ohm/sq 이미터에 의해 주입되었다.

[0136] 태양 전지들을 그들의 초기 상태 특징들을 결정하기 위해 측정하였다. 결과들은 하기 표 6에 표시되어 있다.

표 6

ID	V _{OC} (mV)	J _{SC} (mA/cm ²)	FF	효율	N-인자	R _S	R _{SH}
1	0.638	38.2	78.8	19.2	1.05	0.635	4280
2	0.638	38.0	79.1	19.2	1.05	0.585	4810
3	0.638	38.0	78.8	19.1	1.07	0.644	4670
4	0.636	37.9	78.9	19.0	1.07	0.631	5340
5	0.636	38.0	78.7	19.0	1.07	0.650	7246
평균	0.637	38.0	78.9	19.2	1.06	0.629	5269

[0137]

[0138] 이 예 및 하기 예들의 표는 태양 전지들을 비교하기 위한 여러 성능 특징들을 제공한다. V_{OC}는 태양 전지로부터 이용가능한 개방회로 전압, 즉 최대 전압을 나타낸다. FF는 충전율을 나타내고, 이는 V_{OC}와 I_{SC} (단락 전류)의 곱에 대한 태양 전지로부터 최대 전력의 비로서 정의되는, 태양 전지로부터의 최대 전력이다. 효율은 태양으로부터의 입력 에너지에 대한 태양 전지로부터 출력되는 에너지의 비로서 정의된다. N-인자(N-factor)는 다이오드 이상성 인자(diode ideality factor)를 나타내고, 이는 1 내지 2의 범위에 이를 수도 있다. 값이 1에 더 가까울수록 이상적인 거동을 나타낸다. R_S는 직렬 저항을 나타낸다. R_{SH}는 션트 저항(shunt resistance)을 나타낸다.

[0139] 실시예 7. POCL3-HNS 65 ohm/sq에 의해 확산되는 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들의 초기 상태 시험

[0140] 실시예 5에 기재된 방법에 따라 제조된 인듐 도핑된 웨이퍼들로부터 태양 전지들을 제작하였다. 웨이퍼들은 3.5 ohm-cm의 저항률을 갖도록 선택되었고, POCL3-HNS 65 이미터에 의해 확산되었다.

[0141] 태양 전지들을 그들의 초기 상태 특징들을 결정하기 위해 측정하였다. 결과들은 하기 표 7에 표시되어 있다.

표 7

ID	V _{OC} (mV)	J _{SC} (mA/cm ²)	FF	효율	N-인자	R _S	R _{SH}
1	0.628	37.2	79.3	18.5	1.00	0.659	5350
2	0.629	37.2	78.9	18.5	1.06	0.611	1140
3	0.629	37.2	78.1	18.3	1.05	0.791	1340
4	0.629	37.2	79.5	18.6	1.02	0.560	2120
5	0.629	37.4	79.0	18.6	1.05	0.594	1390
평균	0.629	37.3	79.0	18.5	1.04	0.643	2268

[0142]

비교예 1. 연속식 초크랄스키법에 의해 성장된 붕소 도핑된 단결정 실리콘 잉곳

연속식 초크랄스키법에 따라 성장된 붕소 도핑된 잉곳으로부터 200개의 웨이퍼들을 선택하였다. 웨이퍼들은 주요 치수들의 편평한 부분에서 편평한 부분까지 길이들이 156 mm \pm 0.5 mm였다. 웨이퍼 대각선 치수는 200 mm \pm 0.5 mm였다. 모서리 길이는 15.4 mm \pm 1 mm였다. 웨이퍼들의 두께들은 200 마이크로미터 \pm 20 마이크로미터 또는 180 마이크로미터 \pm 20 마이크로미터였다.

200개의 붕소 도핑된 웨이퍼들의 저항률은 약 2.4 ohm-cm 내지 약 2.73 ohm-cm였다. 웨이퍼들의 산소 농도들은 약 14.6 PPMA였다. 웨이퍼들의 수명들은 약 320 마이크로초였다($5 \times 10^{14}/\text{cm}^3$ 의 주입 레벨에서의 결정 레벨에서 측정됨; 신티론 BCT 400).

비교예 2. 90 ohm/sq 이미터에 의해 주입되는 붕소 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들의 초기 상태 시험

비교예 1에 기재된 방법에 따라 제조된 붕소 도핑된 웨이퍼들로부터 태양 전지들을 제작하였다. 웨이퍼들은 2.4 ohm-cm의 저항률을 갖도록 선택되었고, 90 ohm/sq 이미터에 의해 주입되었다.

태양 전지들을 그들의 초기 상태 특징들을 결정하기 위해 측정하였다. 결과들은 하기 표 8에 표시되어 있다.

표 8

ID	V _{oc} (mV)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF	효율	N-인자	R _s	R _{sh}
1	0.642	37.8	78.9	19.1	1.10	0.524	3060
2	0.642	37.7	79.1	19.2	1.08	0.552	4500
3	0.641	37.5	78.7	18.9	1.11	0.566	5690
4	0.634	37.4	77.9	18.5	1.18	0.585	5340
5	0.641	37.6	79.0	19.0	1.11	0.479	4867
평균	0.640	37.6	78.7	18.9	1.12	0.541	4691

비교예 3. POCL3-HNS 65 ohm/sq에 의해 확산되는 붕소 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들의 초기 상태 시험

비교예 1에 기재된 방법에 따라 제조된 붕소 도핑된 웨이퍼들로부터 태양 전지들을 제작하였다. 웨이퍼들은 2.4 ohm-cm의 저항률을 갖도록 선택되었고, POCL3-HNS 65 이미터에 의해 주입되었다.

태양 전지들을 그들의 초기 상태 특징들을 결정하기 위해 측정하였다. 결과들은 하기 표 9에 표시되어 있다.

표 9

ID	V _{oc} (mV)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF	효율	N-인자	R _s	R _{sh}
1	0.632	36.9	79.5	18.6	1.03	0.579	6910
2	0.632	37.1	79.1	18.6	1.03	0.613	6470
3	0.633	37.0	79.5	18.6	1.04	0.633	7140
4	0.633	37.0	79.8	18.7	1.02	0.574	7420
5	0.632	37.1	78.8	18.5	1.05	0.659	5480
평균	0.633	37.0	79.3	18.6	1.03	0.612	6684

실시예 8. 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들로부터 제작된 태양 전지들 및 붕소 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들로부터 제작된 태양 전지들의 광 유도 열화 시험

태양 전지들의 다양한 성능 특징들의 광 유도 열화를 시험하기 위해 실시예 6의 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들로부터 제작된 태양 전지들 및 비교예 2의 붕소 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들로부터 제작된 태양 전지들에 대해 45°C 미만의 온도에서 24 시간 동안 0.7 sun에 상당하는 태양 스펙트럼 방사조도를 가하였다. 초기 태양 전지들의 성능 특징들 및 24시간 동안 방사조도 적용 후에 태양 전지들의 성능 특징들이 하기 표 10에 제시되어 있다.

표 10

도펀트	웨이퍼 ID	초기 V_{oc} (mV)	V_{oc} LID (mV)	초기 FF	FF LID	초기 J_{sc} (mA/cm ²)	J_{sc} LID (mA/cm ²)
인듐	1	0.638	0.636	79.1	78.9	38.0	38.1
	2	0.638	0.637	78.8	78.5	38.0	38.0
붕소	1	0.642	0.635	79.1	78.2	37.7	37.4
	2	0.641	0.643	79.0	77.8	37.6	37.3

도펀트	웨이퍼 ID	초기 효율	효율 LID	효율의 변화	초기 n-인자	n-인자 LID
인듐	1	19.2	19.1	-0.06	1.05	1.08
	2	19.1	19.0	-0.10	1.07	1.09
붕소	1	19.2	18.6	-0.56	1.08	1.19
	2	19.0	18.4	-0.59	1.11	1.21

[0156]

[0157]

산소 농도 및 도펀트 농도에 있어서 가깝게 매칭되도록 선택된 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들로부터 제작된 태양 전지들 및 붕소 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들로부터 제작된 태양 전지들에 대해 광 유도 열화 평가를 수행하였다. 인듐 도핑된 웨이퍼들로부터 제작된 태양 전지들은 붕소 도핑된 웨이퍼들로부터 제작된 태양 전지들과 비교해서 조명 후에 상당히 감소된 광 유도 열화를 나타냈다. 보다 구체적으로, 인듐 도핑된 웨이퍼들로부터 제작된 태양 전지들의 효율은 조명 후에 19% 초과로 유지되었고, 상대 열화는, 붕소 도핑된 셀들의 경우 약 3%의 상대 열화(약 0.6%의 절대 열화)와 비교해서, 인듐 도핑된 셀들의 경우 단지 약 0.4%였다(0.08%의 절대 열화). 이러한 결과들을 감안하여, 인듐 도핑된 셀들로부터 제작된 태양 전지들은 붕소 도핑된 셀들로 제작된 태양 전지들보다 상당히 더 적은 광 유도 열화를 나타냈다.

[0158]

실시예 9. 90-110 ohm/sq 이미터에 의해 주입되는 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들의 초기 상태 시험

[0159]

인듐 도핑된 웨이퍼들로부터 태양 전지들을 제작하였다. 웨이퍼들은 3.4 ohm-cm의 저항률을 갖도록 선택되었고, 90-110 ohm/sq 이미터에 의해 주입되었다.

[0160]

태양 전지들을 그들의 초기 상태 특징들을 결정하기 위해 측정하였다. 결과들은 하기 표 11에 표시되어 있다.

표 11

ID	V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF	효율	N-인자	R_s	R_{sh}
1	0.638	37.9	79.0	19.1	1.08	0.58	4453
2	0.638	37.7	79.0	19.0	1.08	0.56	3002
3	0.638	37.7	79.0	19.0	1.08	0.55	4150
4	0.637	37.7	79.0	19.0	1.10	0.55	2310
최대	0.638	37.9	79.0	19.1	1.08	0.58	4453
평균	0.638	37.7	79.0	19.0	1.09	0.56	3479

[0161]

[0162]

실시예 10. 90-110 ohm/sq 이미터에 의해 주입되는 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들의 초기 상태 시험

[0163]

인듐 도핑된 웨이퍼들로부터 태양 전지들을 제작하였다. 웨이퍼들은 3.1 ohm-cm의 저항률을 갖도록 선택되었고, 90-110 ohm/sq 이미터에 의해 주입되었다.

[0164]

태양 전지들을 그들의 초기 상태 특징들을 결정하기 위해 측정하였다. 결과들은 하기 표 12에 표시되어 있다.

표 12

ID	V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF	효율	N-인자	R_s	R_{sh}
1	0.637	37.9	79.2	19.1	1.09	0.50	5730
2	0.637	37.9	79.1	19.1	1.08	0.54	4316
3	0.638	37.7	79.0	19.0	1.08	0.55	5170
4	0.638	37.7	79.0	19.0	1.11	0.50	3810
5	0.638	37.8	78.8	19.0	1.12	0.52	2712
최대	0.637	37.9	79.2	19.1	1.09	0.50	5730
평균	0.638	37.8	79.0	19.0	1.10	0.52	4348

비교예 4. 90-110 ohm/sq 이미터에 의해 주입되는 붕소 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들의 초기 상태 시험

붕소 도핑된 웨이퍼들로부터 태양 전지들을 제작하였다. 웨이퍼들은 2.6 ohm-cm의 저항률을 갖도록 선택되었고, 90-110 ohm/sq 이미터에 의해 주입되었다.

태양 전지들을 그들의 초기 상태 특징들을 결정하기 위해 측정하였다. 결과들은 하기 표 13에 표시되어 있다.

표 13

ID	V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF	효율	N-인자	R_s	R_{sh}
1	0.643	37.6	78.1	18.9	1.10	0.73	8628
2	0.641	37.5	78.7	18.9	1.12	0.58	4261
3	0.642	37.4	78.5	18.8	1.13	0.61	6310
4	0.642	37.5	78.6	18.9	1.12	0.59	6010
5	0.642	37.6	78.2	18.9	1.15	0.61	2930
최대	0.643	37.6	78.1	18.9	1.10	0.73	8628
평균	0.642	37.5	78.4	18.9	1.12	0.62	5628

비교예 5. 90-110 ohm/sq 이미터에 의해 주입되는 붕소 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들의 초기 상태 시험

붕소 도핑된 웨이퍼들로부터 태양 전지들을 제작하였다. 웨이퍼들은 2.5 ohm-cm의 저항률을 갖도록 선택되었고, 90-110 ohm/sq 이미터에 의해 주입되었다.

태양 전지들을 그들의 초기 상태 특징들을 결정하기 위해 측정하였다. 결과들은 하기 표 14에 표시되어 있다.

표 14

ID	V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF	효율	N-인자	R_s	R_{sh}
1	0.642	37.5	79.2	19.1	1.12	0.48	2457
2	0.643	37.4	78.9	19.0	1.11	0.53	3847
최대	0.642	37.5	79.2	19.1	1.12	0.48	2457
평균	0.643	37.4	79.0	19.0	1.12	0.51	3152

실시에 11. 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들로부터 제작된 태양 전지들 및 붕소 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들로부터 제작된 태양 전지들의 광 유도 열화 시험

태양 전지들의 다양한 성능 특징들의 광 유도 열화를 시험하기 위해 실시예 9 및 실시예 10의 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들로부터 제작된 태양 전지들 및 비교예 4 및 비교예 5의 붕소 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들로부터 제작된 태양 전지들에 대해 45℃ 미만의 온도에서 24 시간 동안 0.7 sun에 상당하는 태양 스펙트럼 방사 조도를 가하였다. 초기 태양 전지들의 평균 성능 특징들 및 24시간 동안 방사조도 적용 후에 태양 전지들의 성

능 특징들이 하기 표 15에 제시되어 있다.

표 15

도펀트	웨이퍼 ID	초기 V_{oc} (mV)	V_{oc} LID (mV)	초기 FF	FF LID	초기 J_{sc} (mA/cm ²)	J_{sc} LID (mA/cm ²)
인듐	실시예 8	0.637	0.637	79.0	78.8	37.7	37.9
	실시예 9	0.638	0.636	78.8	78.7	37.8	37.9
붕소	비교예 4	0.643	0.635	78.1	77.8	37.6	37.2
	비교예 5	0.643	0.635	78.9	78.1	37.4	37.2

도펀트	웨이퍼 ID	초기 효율	효율 LID	효율의 변화	초기 n-인자	n-인자 LID
인듐	실시예 8	19.0	19.0	0.0	1.10	1.10
	실시예 9	19.0	18.9	-0.1	1.12	1.10
붕소	비교예 4	18.9	18.4	-0.5	1.10	1.20
	비교예 5	19.0	18.5	-0.5	1.11	1.22

[0176]

[0177]

산소 농도 및 도펀트 농도에 있어서 가깝게 매칭되도록 선택된 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들로부터 제작된 태양 전지들 및 붕소 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들로부터 제작된 태양 전지들에 대해 광 유도 열화 평가를 수행하였다. 인듐 도핑된 웨이퍼들로부터 제작된 태양 전지들은 붕소 도핑된 웨이퍼들로부터 제작된 태양 전지들과 비교해서 조명 후에 상당히 감소된 광 유도 열화를 나타냈다. 보다 구체적으로, 인듐 도핑된 웨이퍼들로부터 제작된 태양 전지들의 효율은, 붕소 도핑된 셀들의 경우 약 0.5%의 절대 열화와 비교해서, 조명 후에 19%에 또는 19%에 매우 가깝게 유지되었다. 이러한 결과들을 감안하여, 인듐 도핑된 셀들로부터 제작된 태양 전지들은 붕소 도핑된 셀들로 제작된 태양 전지들보다 상당히 더 적은 광 유도 열화를 나타냈다.

[0178]

실시예 12. 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들로부터 제작된 태양 전지들 및 붕소 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들로부터 제작된 태양 전지들의 소수 캐리어 수명에 대한 광 유도 열화의 영향

[0179]

3개의 상이한 결정들로부터 웨이퍼들의 3개의 그룹들을 선택하였다. 웨이퍼들의 각 그룹은 동일한 세그먼트로부터 나왔다. 각 그룹에는 4개의 웨이퍼들이 있다. 웨이퍼들의 제1 그룹은 높은 수명의 붕소 도핑된 연속식 Cz 세그먼트로부터 슬라이싱되었다. 웨이퍼들의 제2 그룹은 평균 수명의 붕소 도핑된 연속식 Cz 세그먼트로부터 슬라이싱되었다. 웨이퍼들의 제3 그룹은 인듐 도핑된 Cz 결정으로부터 슬라이싱되었다.

[0180]

모든 웨이퍼들을 동일한 용기들 내에서 동시에 에칭하고 세정하였다. 초기 절삭 손상(initial saw damage) 제거 및 텍스처링 에칭 단계는 각 웨이퍼로부터 대략 16 마이크로미터 제거하였다. 웨이퍼들을 텍스처링 에칭 후에 세정하였고, 최종 플루오르화수소산(HF) 세정 단계 후에 요오드-에탄올 용액으로 즉시 패시베이션하였다. 웨이퍼들을 6일 동안 실외에서 광 소킹한 전후에 요오드-에탄올 패시베이션된 웨이퍼들에 대해 수명 측정을 실시하였다. 과도 모드(transient mode)에서 신티온 WCT-120 웨이퍼 툴을 사용하여 주입 레벨 수명 측정을 실시하였다. 실외 광 소킹 후에 수명 측정을 실시하기 이전에 웨이퍼들을 동일한 방식으로 에칭하고 세정하였다. 유일한 차이는 광 소킹 후에 각 웨이퍼로부터 대략 12 마이크로미터의 재료를 제거한 점이었다.

[0181]

3개의 그룹들 전부에 대한 결정 세그먼트 수명 및 저항률이 표 16에 나타나 있다. 수명은 신티온 인스트루먼트(Sinton Instruments) BCT-400를 사용하여 $MCD=5e14cm^{-3}$ 에서 측정되었다. 6일 동안 실외 광 소킹 전후에 4개의 P01GJ-A4 웨이퍼들(높은 수명, 붕소 도핑됨) 전부에 대한 주입 레벨 수명이 도 9에 도시되어 있다. 6일 동안 실외 광 소킹 전후에 4개의 P00PC-C2 웨이퍼들(평균 수명, 붕소 도핑됨) 전부에 대한 주입 레벨 수명이 도 10에 도시되어 있다. 6일 동안 실외 광 소킹 전후에 4개의 210TON 웨이퍼들(인듐 도핑됨) 전부에 대한 주입 레벨 수명이 도 11에 도시되어 있다.

표 16

웨이퍼들의 3개의 그룹들 전부에 대한 결정 데이터

	시드 단부	대향 단부
P01GJ – A4 (붕소 CCz)	898.37 μ s	859.65 μ s
	2.55 Ω -cm	2.55 Ω -cm
P00PC – C2 (붕소 CCz)	208.20 μ s	156.90 μ s
	2.10 Ω -cm	2.05 Ω -cm
210T0N (인듐 Cz)	310.9 μ s	227.8 μ s
	3.25 Ω -cm	2.80 Ω -cm

[0182]

[0183]

12개의 웨이퍼들 모두의 $1e15\text{cm}^{-3}$ 의 주입 레벨(MCD)에서 측정된 소수 캐리어 수명의 비교가 표 17에 나타나 있다.

표 17

붕소 도핑된 실리콘 웨이퍼와 인듐 도핑된 실리콘 웨이퍼 간의 수명 비교

	웨이퍼 #	초기	광 소킹 (야외에서 6 일) 후
P01GJ-A4	1	255 μ s	64 μ s
(~ 3.0 Ω -cm)	2	264 μ s	62 μ s
	3	256 μ s	63 μ s
	4	269 μ s	64 μ s
P00PC-C2	1	144 μ s	33 μ s
(~ 2.2 Ω -cm)	2	146 μ s	34 μ s
	3	146 μ s	35 μ s
	4	149 μ s	34 μ s
210T0N	1	314 μ s	308 μ s
(~ 3.1 Ω -cm)	2	313 μ s	307 μ s
	3	282 μ s	293 μ s
	4	308 μ s	311 μ s

[0184]

[0185]

인듐 도핑된 Cz 웨이퍼들의 소수 캐리어 수명은 6일 동안 태양광에 노출 후에 열화되지 않았고, 붕소 도핑된 CCz 웨이퍼들의 소수 캐리어 수명은 열화되었다. 붕소 도핑된 실리콘 웨이퍼 및 인듐 도핑된 실리콘 웨이퍼에 대한 LID 시험 - 여기서 소수 캐리어 수명은 측정 가능한 성능 파라미터임 - 은 인듐 도핑된 Cz 실리콘 웨이퍼 및 붕소 도핑된 CCz 실리콘 웨이퍼 상에 제조된 태양 전지들에 대한 태양 전지 효율 데이터에 대응한다. 특히, 인듐 도핑된 Cz 웨이퍼들 상에 제조된 태양 전지들의 효율은 광 노출 후에 열화되지 않고, 붕소 도핑된 CCz 상에 제조된 태양 전지들은 광 유도 열화를 나타냈다.

[0186]

실리콘 태양 전지의 효율은 실리콘 웨이퍼의 소수 캐리어 수명에 관련된다. 하기 식들은 공간 전하 영역에서 전자 재결합이 없는 이상적인 반도체 다이오드와 관계가 있다. 보다 일반적인 공식화가 이루어질 수 있지만, 전반적인 관계는 이상적인 다이오드 모델로 증명될 수 있다. 태양 전지 효율은 식 9에 의해 주어진다.

[0187]

<식 9>

$$\eta = \frac{V_{oc}I_{sc}FF}{P_{in}}$$

[0188]

[0189]

식 9에서, V_{oc} 는 태양 전지의 개방회로 전압이고, I_{sc} 는 단락 전류이고, FF는 다이오드 충전율이고, P_{in} 은 태양

전지에 입사하는 조명의 전력 밀도이다. P_{in} 은 AM1.5 태양 스펙트럼의 경우 1 kW/m^2 이다.

[0190] V_{oc} 는 베이스 실리콘의 소수 캐리어 확산 길이의 강한 함수이다. 이상적인 다이오드에 대한 개방회로 전압의 함수는 식 10에서 주어진다.

[0191] <식 10>

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right)$$

[0192] 식 10에서, k 는 볼츠만 상수이고, T 는 온도이고, q 는 전자의 기본 전하이고, I_L 은 조명으로 인해 발생하는 전류이고, I_0 는 이상적인 p-n 접합을 가정한 태양 전지의 포화 전류이다. 개방회로 전압은 태양 전지의 포화 전류를 통한 소수 캐리어 확산 길이에 관련되고, 이는 식 11에서 주어진다.

[0194] <식 11>

$$I_0 = A \left(\frac{qD_e n_i^2}{L_e N_A} + \frac{qD_h n_i^2}{L_h N_D} \right)$$

[0195] 식 11에서, A 는 태양 전지의 면적이고, $D_{e,h}$ 는 각각 전자 및 정공의 확산성 상수이고, N_A 는 도펀트 억셉터들의 개수이고, N_D 는 도펀트 도너들의 개수이고, $L_{e,h}$ 는 각각 전자 및 정공의 확산 길이이다. 표준 산업 태양 전지에서, p형 실리콘 웨이퍼가 사용되고, 고농도로 도핑된(heavily doped) n형 이미터에 의해 접합이 이루어진다. 이러한 전자 구조의 경우, 식 11에서의 둘째 항은 첫째 항보다 현저하게 더 작아서, 무시할 수 있다. 첫째 항의 모든 변수들은 공정에 따라 고정되거나, 또는 전자의 확산 길이를 제외하고는 물리적 상수들이다. 이것이 p형 재료이기 때문에, L_e 는 소수 캐리어 확산 길이이다. 이 파라미터는 결정 완성의 척도로서 사용되고 있다. 그것은 소수 캐리어가 다수 캐리어와 재결합하기 전에 결정 내에서 이동하게 될 평균 거리를 나타낸다. 그 값은 금속 불순물, 결정 결함(전위, 공공 등), 의도된 불순물(도펀트), 및 다른 결함과 같은 많은 결정 특성에 의해 영향을 받는다. 소수 캐리어 확산 길이는 소수 캐리어의 확산성 상수를 통한 소수 캐리어 수명에 관련된다. p형 실리콘에서 소수 캐리어인 전자에 대한 이러한 관계가 식 12에 나타나 있다.

[0197] <식 12>

$$L_e = \sqrt{D_e \tau_e}$$

[0199] τ_e 는 전자의 소수 캐리어 수명이다.

[0200] 따라서, 더 높은 소수 캐리어 수명을 갖는 재료가 더 낮은 포화 전류를 가질 것이고, 이는 더 큰 개방회로 전압 및 태양 전지 효율을 야기한다.

[0201] 더 높은 소수 캐리어 확산 길이가 태양 전지 효율을 향상시킨다는 다른 중요한 메커니즘이 식 10의 I_L 항에서 알 수 있다. 태양 전지의 광 전류(illuminated current)(I_L)는 식 13에 의해 주어진다.

[0202] <식 13>

$$I_L = qAG(L_e + W + L_h)$$

[0204] G 는 실리콘에 대한 전자-정공 쌍의 발생률이다. 그것은 결정 실리콘이 광을 얼마나 흡수하는지에 기초하고, 스펙트럼 의존적이다. W 는 태양 전지의 접합의 공핍 영역의 폭이다. 다른 변수들은 이전에 설명되었다. 식 13은 조명으로 인한 전류가 공핍 영역의 양측에서의 하나의 확산 길이 내에서 주로 발생한다는 것을 나타낸다. 표준 산업 태양 전지에서, 공핍 폭은 작다고 - 0.5 마이크로미터 미만 - 간주될 수 있고, n형 확산 이미터 영역의 두께는 공핍 폭보다 더 짧고, 조명으로 인한 전류 발생의 활성 영역은 p형 실리콘 웨이퍼 내로 하나의 확산 길이일 것이다. 전자-정공 쌍 재결합률은 소수 캐리어, p형 실리콘에서 전자에 의해 결정될 것이다. 이것은 태양 전지 효율에 대한 2개의 의미를 갖는다. 첫 번째 의미는 식 10에서 설명되는 바와 같이, I_L 을 증가시키며

따라 V_{oc} 가 증가될 것이라는 것이다. 두 번째 의미는 소수 캐리어 확산 길이를 증가시키에 따라 전자-정공 쌍을 활발히 발생시키게 될 실리콘 웨이퍼의 부분이 증가되어, 단락 전류(I_{sc})를 증가시킬 것이라는 것이다.

[0205]

따라서, 소수 캐리어 확산 길이, 및 더 나아가 소수 캐리어 수명은 태양 전지의 베이스로서 사용되는 실리콘 웨이퍼의 가장 중요한 재료 특성들 중 하나이다. 그것은 결정 완성의 척도이며, 이는 태양 전지의 개방회로 전압(V_{oc})에 현저한 영향을 갖는다. 또한, 그것은 태양 전지의 개방회로 전압(V_{oc}) 및 단락 전류(I_{sc})에 기여하는, 베이스 실리콘 웨이퍼의 전기적으로 활성인 체적을 증가시킨다. 궁극적으로, 더 긴 소수 캐리어 수명을 갖는 실리콘 웨이퍼들은 산업 표준 확산 접합 스크린 인쇄된 태양 전지와 같은 동일한 전자 구조물 내에 있다면 더 양호한 태양 전지 효율을 갖는다. 따라서, 붕소를 인듐으로 대체함으로써 웨이퍼의 소수 캐리어 수명을 지킴에 따라, 태양 전지의 효율이 조명 때문에 열화되지 않고, 광 노출 후에 태양 전지의 효율은 인듐 도핑된 웨이퍼들 상에 제작된 태양 전지들의 경우 더 높을 것이다.

[0206]

실시에 13. 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들로부터 제작된 태양 전지들 및 모듈들 그리고 붕소 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들로부터 제작된 태양 전지들 및 모듈들의 소수 캐리어 수명에 대한 광 유도 열화의 영향의 비교 시험

[0207]

(대규모 산업 태양 전지 제조업자에 의해) 생산 라인 장비를 사용하여 태양 전지들의 집합체를 제작하였다. 붕소 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들 및 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들 둘 다에 대한 태양 전지들을 제작하였다. 태양 전지들을 초기에 신포인 인스트루먼트 FCT-400 광 전류 대 전압 시험기에서 측정하였다. 붕소 도핑된 실리콘 웨이퍼들 상에 제작된 27개의 태양 전지들 및 인듐 도핑된 실리콘 웨이퍼들 상에 제작된 66개의 태양 전지들을 포함하여, 총 93개의 태양 전지들을 측정하였다. 붕소 기반 태양 전지 및 인듐 기반 태양 전지 둘 다에 대해 초기 태양 전지 효율은 19.1% 내지 19.2%였다. 초기 측정 후에, 93개의 태양 전지들 전부를 동시에 실외에서 광 소킹하였다. 광 소킹은 미국 미주리주 세인트 피터스에서 가을에 12:00PM부터 4일 후 10:00AM까지 태양 전지들을 옥외에 놓아둠으로써 수행되었다.

[0208]

추가적으로, 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들 및 붕소 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들 상에 제작된 태양 전지들로부터 태양광 모듈들(solar modules)을 제작하였다. 인듐 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들로부터 6개의 모듈들을 제작하였다. 붕소 도핑된 단결정 실리콘 웨이퍼들로부터 하나의 참조 모듈을 제작하였다. 표준 모듈 재료들을 사용하여 모듈들을 제작하였다(엠이엠씨 싱가포르 인크.(MEMC Singapore, Inc.)). 각 모듈을 72개의 태양 전지들로부터 제조하였다. 이들 모듈들이 대략 150kW-hr/m^2 의 총 태양 방사조도에 노출될 때까지 모듈들을 싱가포르에서 옥외에 놓아둠으로써 이들 모듈들에 광 소킹을 실시하였다. 태양 전지 성능과 비교하기 위해, 대략 20 kW-hr/m^2 의 총 방사조도 노출 후의 태양광 모듈 성능 데이터가 사용되었다.

[0209]

광 소킹 후에, 전부 93개의 태양 전지들을 신포인 인스트루먼트 FCT-400 광 전류 대 전압 시험기를 사용하여 측정하였다. 가장 적절한 성능 파라미터들: 태양 전지 효율, 개방회로 전압, 단락 전류, 및 충전율의 측정들을 각 태양 전지의 초기 값으로 정규화하였다. 각 태양 전지의 시작 값은 1이다. 광 소킹 후의 측정은 정규화된 열화를 보인다. 광 소킹 전후의 정규화된 태양 전지 효율, 개방회로 전압, 단락 전류, 및 충전율이 각각 도 12, 도 13, 도 14, 및 도 15에 플롯되어 있다. 비교를 위해, 태양광 모듈들에 대한 동일한 성능 파라미터들도 또한 포함시켰다.

[0210]

광 소킹 후에 붕소 도핑된 실리콘 웨이퍼들 및 인듐 도핑된 실리콘 웨이퍼들로부터 제작된 태양 전지들의 평균 정규화된 성능 파라미터들이 하기 표 18에 나타나 있다. 도 12에 도시된 정규화된 태양 전지 효율은, 인듐 도핑된 실리콘 웨이퍼들 상에 제작된 태양 전지들이 1% 미만 만큼 열화되고, 붕소 도핑된 실리콘 웨이퍼들 상에 제작된 태양 전지들이 2% 초과 만큼 열화되는 것을 나타낸다. 붕소 도핑된 실리콘 웨이퍼들 상에 제작된 태양 전지들에 대한 열화는 인듐 도핑된 실리콘 웨이퍼들 상에 제작된 태양 전지들보다 현저하게 더 크고, 모든 성능 파라미터: V_{oc} , I_{sc} , 및 FF에서 발생한다. 붕소 도핑된 실리콘 웨이퍼들 상에 제작된 태양 전지들과 비교해서 이와 인듐 도핑된 실리콘 웨이퍼들 상에 제작된 태양 전지들 사이의 가장 큰 차이는 충전율에서 알 수 있다. 이것은 주로 광 소킹 후에 붕소 도핑된 실리콘의 주입 레벨 수명 거동의 결과이고, 모든 주입 레벨들에서 수명의 급감을 보인다.

표 18

광 소킹 후의 평균 정규화된 태양 전지 성능 파라미터들

	태양 전지들의 개수	평균 정규화된 효율	평균 정규화된 V_{oc}	평균 정규화된 I_{sc}	평균 정규화된 FF
인듐 태양 전지들	66	0.9926 ± 0.0018	$.9962 \pm 0.0007$	0.9990 ± 0.0009	0.9975 ± 0.0017
붕소 태양 전지들	27	0.9774 ± 0.0017	$.9934 \pm 0.0004$	0.9963 ± 0.0059	0.9875 ± 0.0014

[0211]

[0212]

또한, 태양광 모듈 LID 성능은 태양 전지 데이터와 거의 동일한 거동을 보여준다. 유일한 차이는 개방회로 전압에서 알 수 있다. 그러나, 더 긴 태양광 노출 시간(150 kW-hr/m^2) 후에, 태양 전지 및 모듈 개방회로 전압 데이터는 더 가깝게 된다.

[0213]

고용적 제조 설비에서 이루어진 붕소 도핑된 실리콘 웨이퍼들 및 인듐 도핑된 실리콘 웨이퍼들 상에 제작된 태양 전지들의 비교는 또한 % 상대 LID 및 절대 효율 손실 면에서 나타내질 수 있다. 둘 다는 통상 광 유도 열화로 인한 손실을 보고하기 위해 광전지 산업에서 사용된다. 붕소 도핑된 실리콘 웨이퍼들 및 인듐 도핑된 실리콘 웨이퍼들 상에 제작된 태양 전지들에 대한 % 상대 LID 및 절대 효율 손실은 각각 도 16 및 도 17에 도시된다.

[0214]

고용적 제조 태양 전지 라인에서 이루어진 산업 표준 확산 집합 스크린 인쇄된 실리콘 태양 전지들의 실외 광 소킹 시험은 붕소 도핑된 실리콘 웨이퍼들과 비교해서 인듐 도핑된 실리콘 웨이퍼들의 경우 광 유도 열화가 현저하게 더 작다는 것을 나타낸다. 게다가, 붕소 도핑된 실리콘 웨이퍼들 상에 제작된 태양 전지들의 열화의 크기가 상당하지만, 인듐 도핑된 실리콘 웨이퍼들 상에 제작된 태양 전지들에서는 거의 무시할만한 양의 열화가 있다. (붕소 도핑된 실리콘 웨이퍼들 및 인듐 도핑된 실리콘 웨이퍼들로부터 제작된) 태양 전지들의 동일한 그룹들로부터 제작되는 태양광 모듈들은 또한 개별 태양 전지들과 유사하게 실시한다. 인듐 도핑된 실리콘 웨이퍼들로부터 제작된 태양 전지들을 포함하는 태양광 모듈들은 1% 미만의 효율 열화를 나타냈지만, 붕소 도핑된 실리콘 웨이퍼들로부터 제작된 태양 전지들을 포함하는 태양광 모듈들은 2% 초과 효율 열화를 나타냈다.

[0215]

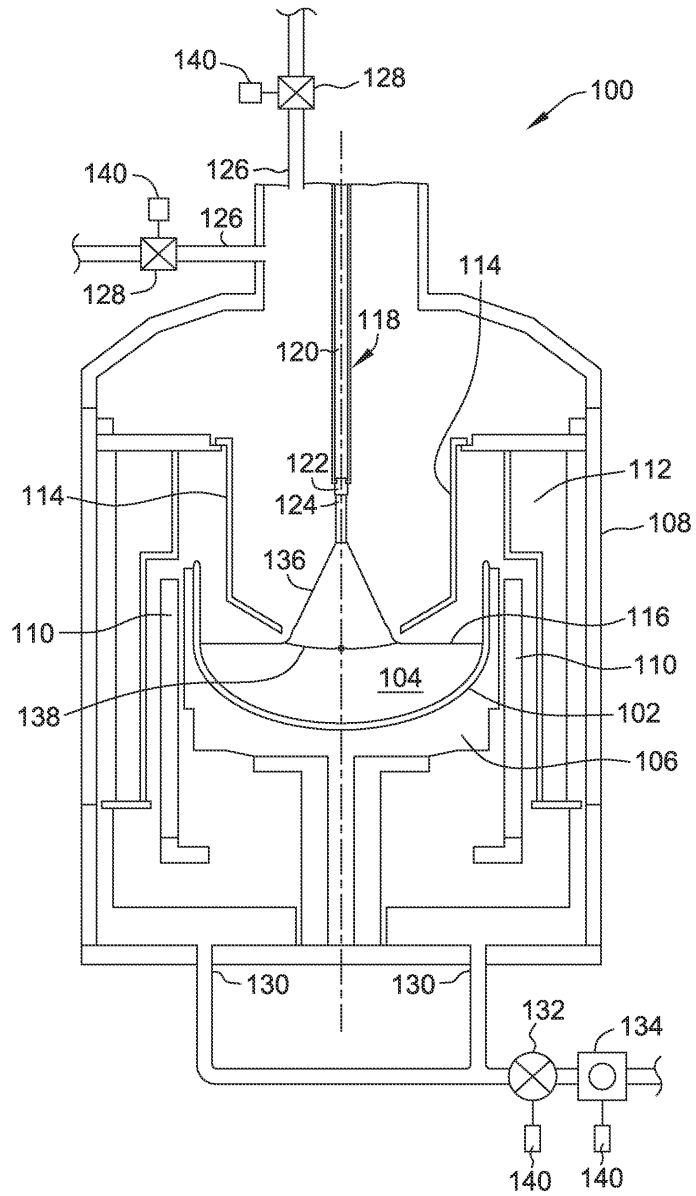
본 발명의 범주로부터 벗어나지 않는 한 상술한 공정에 다양한 변형이 이루어질 수 있으므로, 상기 설명에 포함된 모든 사항들은 예시적이며 제한하는 의미가 아닌 것으로 해석되는 것을 의도한다. 또한, 본 발명 또는 그의 바람직한 실시양태(들)의 요소들을 도입할 때, 단수 표현 및 상기는 하나 이상의 요소들이 존재함을 의미하는 것을 의도한다. "포함하는", "포함한" 및 "갖는"이라는 용어는 포괄적이며 나열된 요소들 이외에 추가 요소들이 존재할 수 있음을 의미하는 것을 의도한다.

[0216]

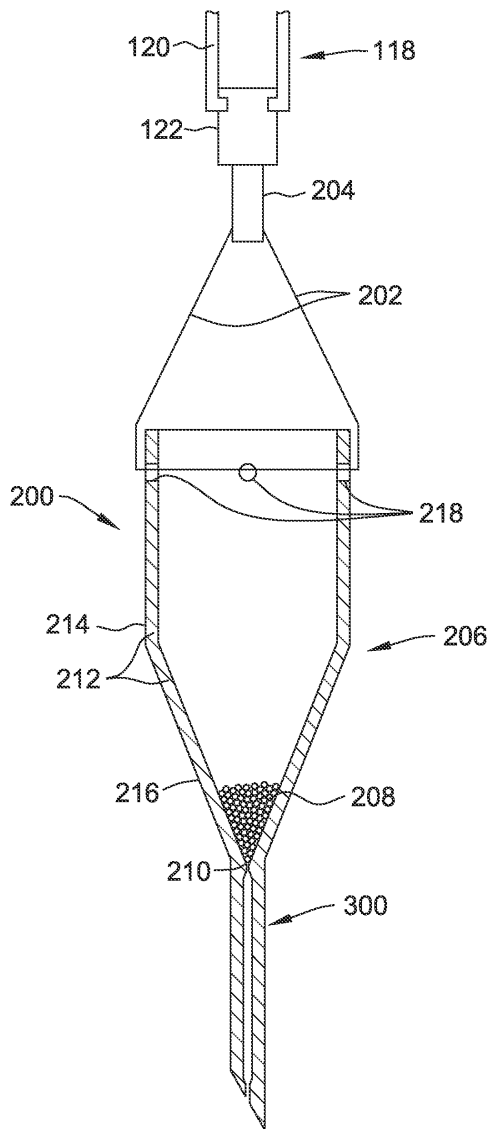
상기 상세한 설명은 최상의 양태를 포함하여 본 발명을 개시하기 위해서 그리고 또한 임의의 디바이스 또는 시스템을 제조 및 이용하고 임의의 포함된 방법을 수행하는 것을 포함하여 관련 기술분야에서의 통상의 기술자가 본 발명을 실시할 수 있도록 하기 위해 예들을 사용한다. 본 발명의 특허받을 수 있는 범주는 청구범위에 의해 정의되며, 관련 기술분야에서의 통상의 기술자에게 발생할 수 있는 다른 예들을 포함할 수도 있다. 이러한 다른 예들은 청구범위의 문언적 언어와 상이하지 않은 구조적 요소들을 가질 경우, 또는 청구범위의 문언적 언어와 비실질적 차이를 갖는 균등한 구조적 요소들을 포함할 경우 청구범위의 범주 이내인 것으로 의도된다.

도면

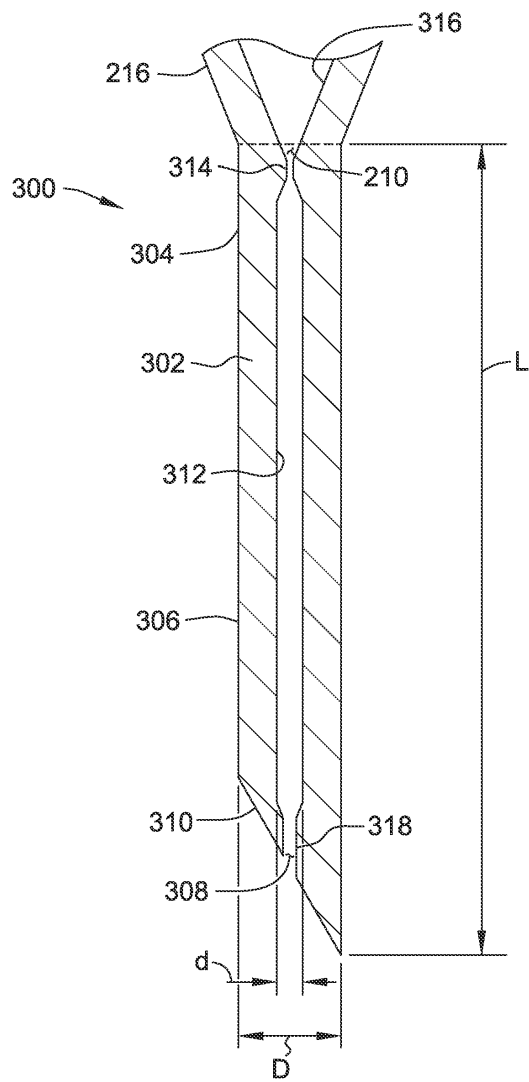
도면1



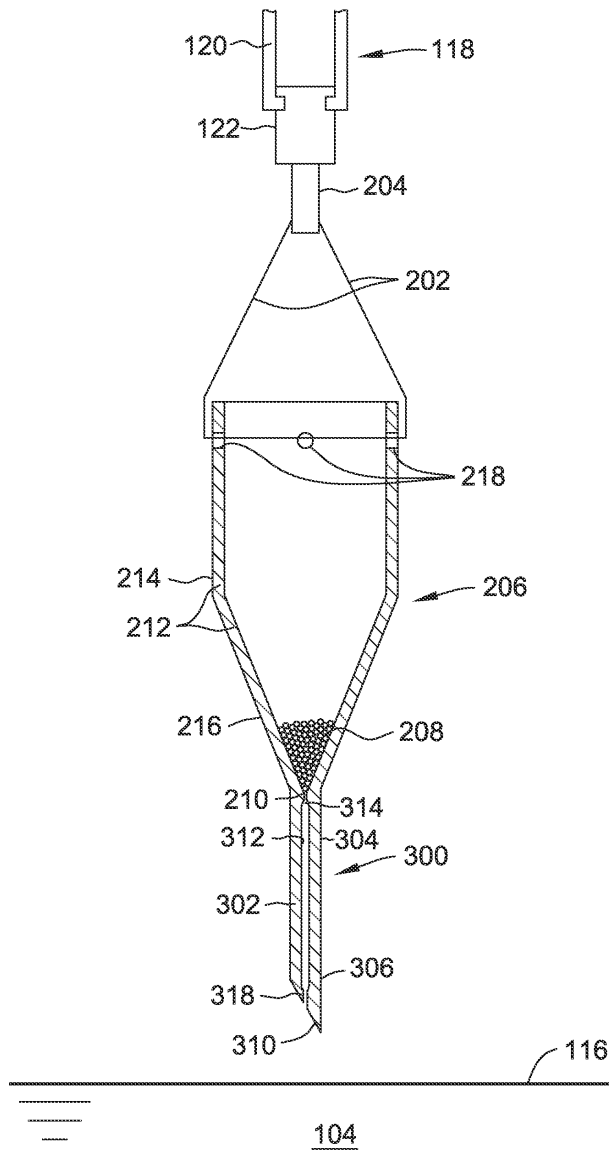
도면2



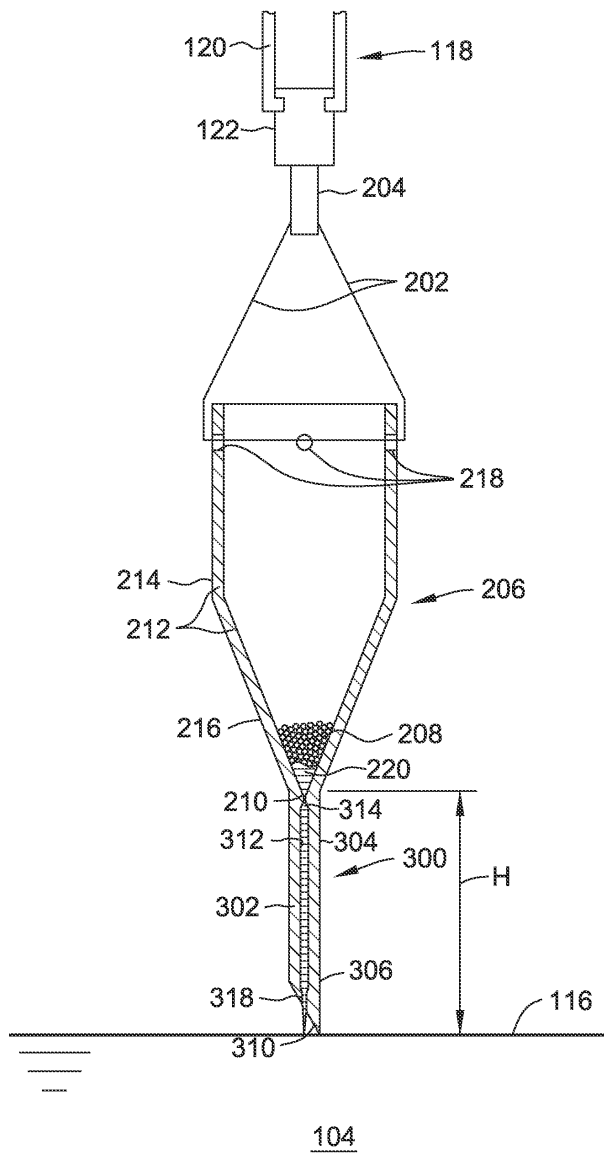
도면3



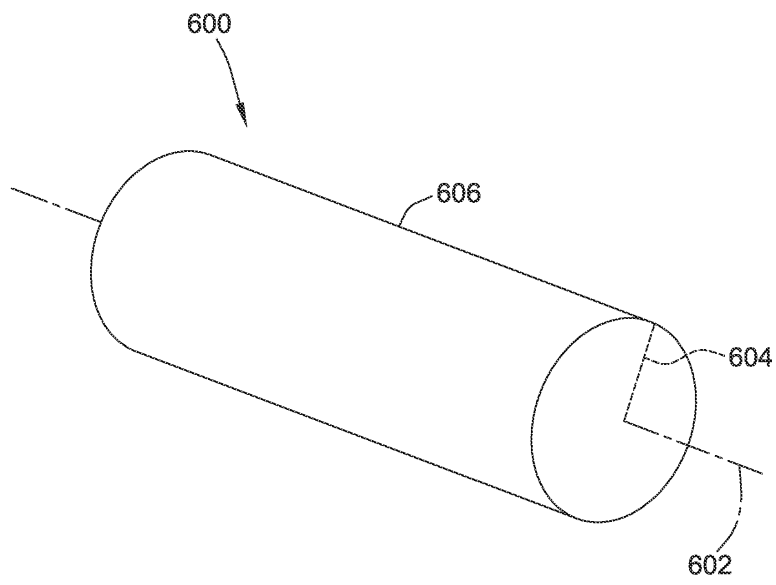
도면4



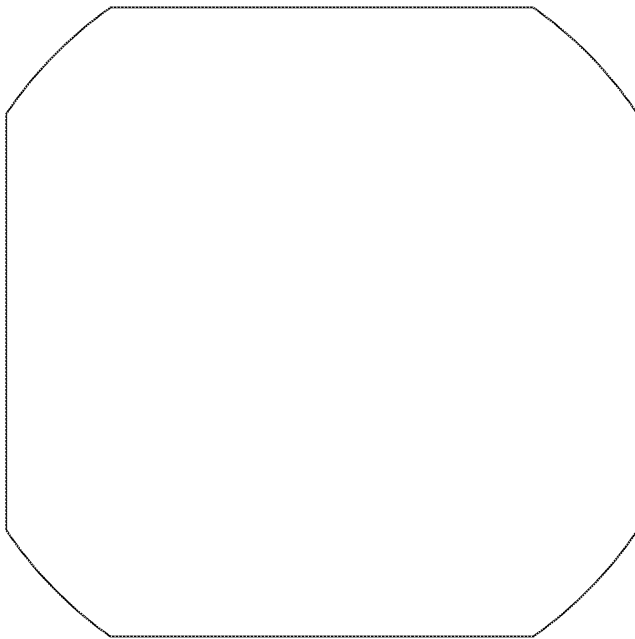
도면5



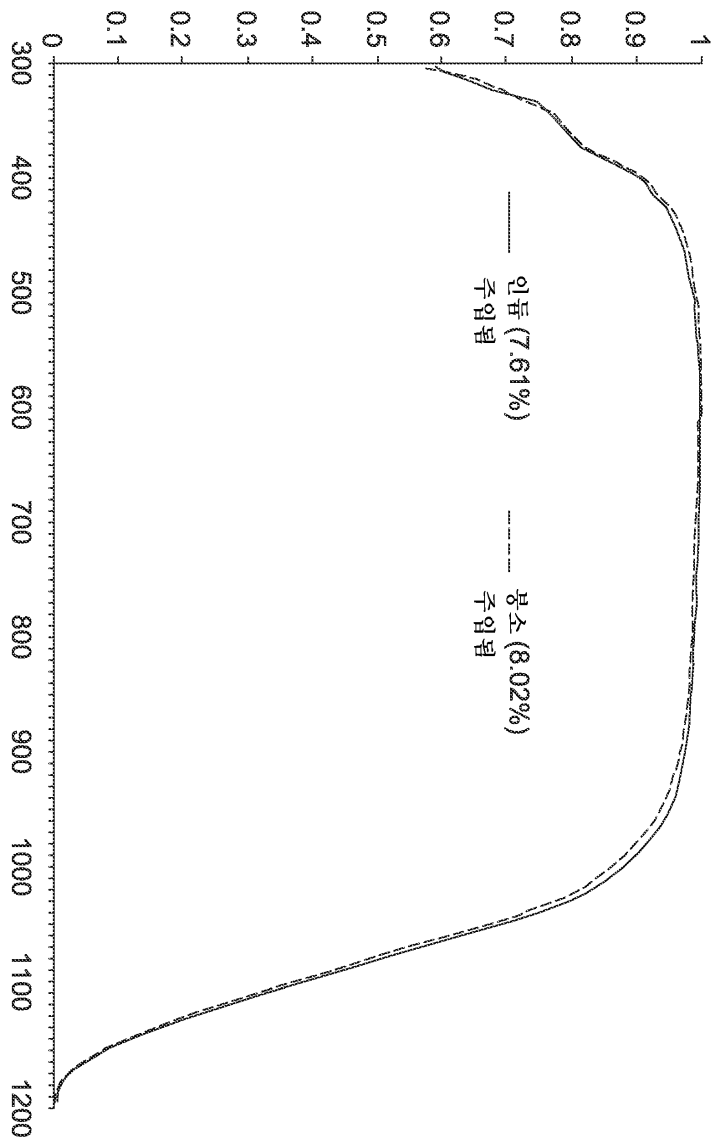
도면6



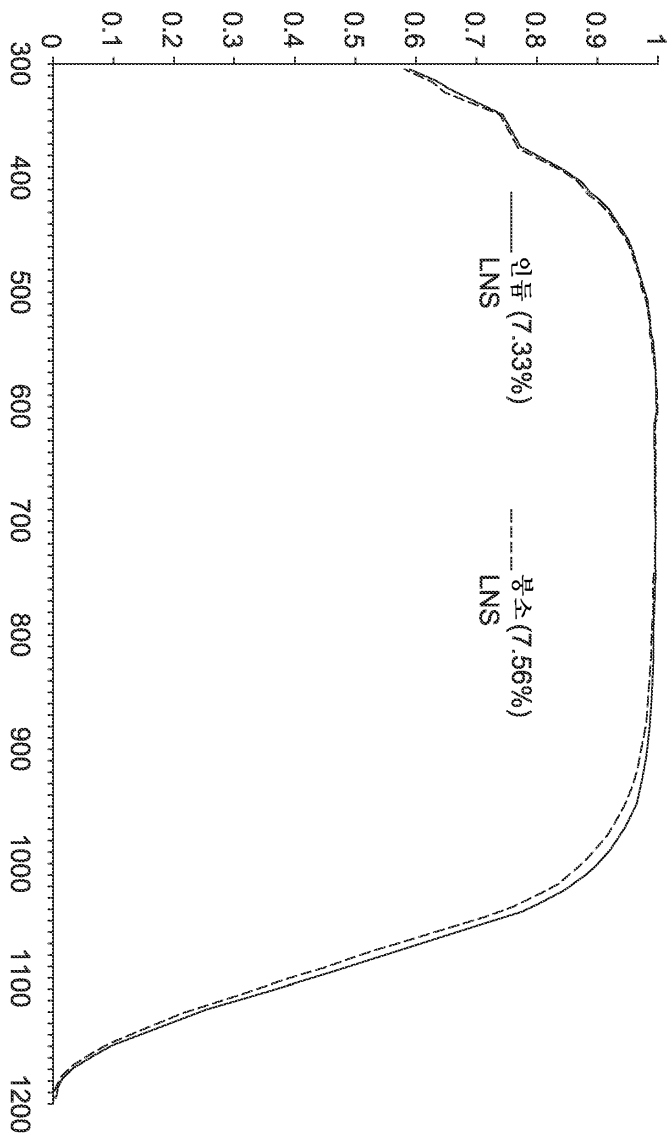
도면7



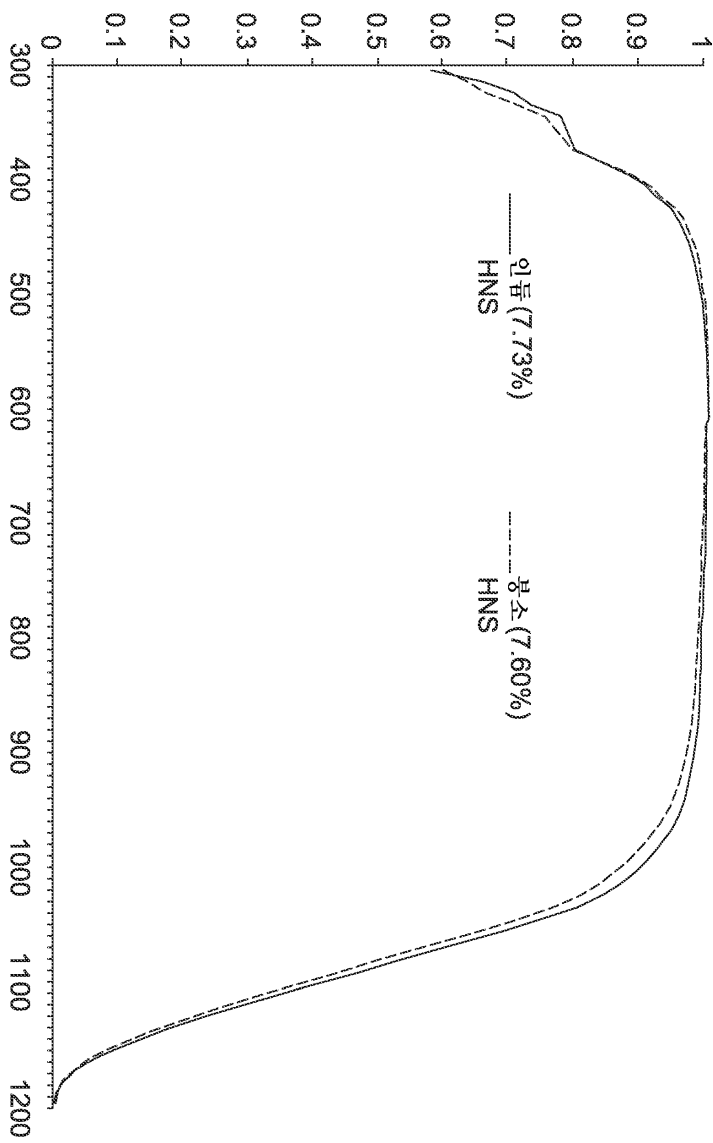
도면8a



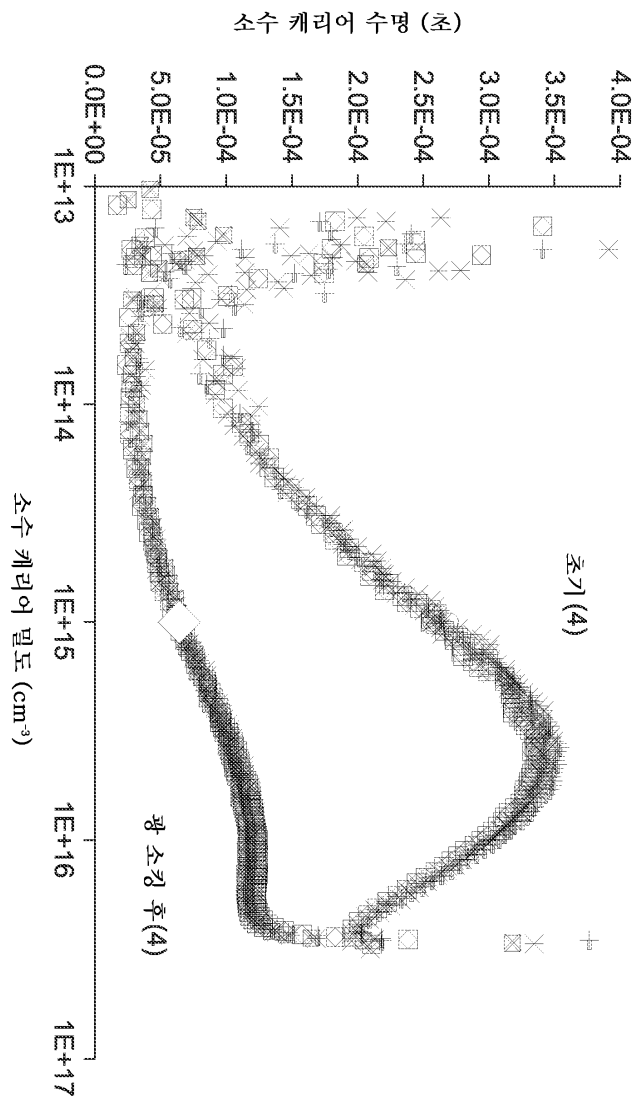
도면8b



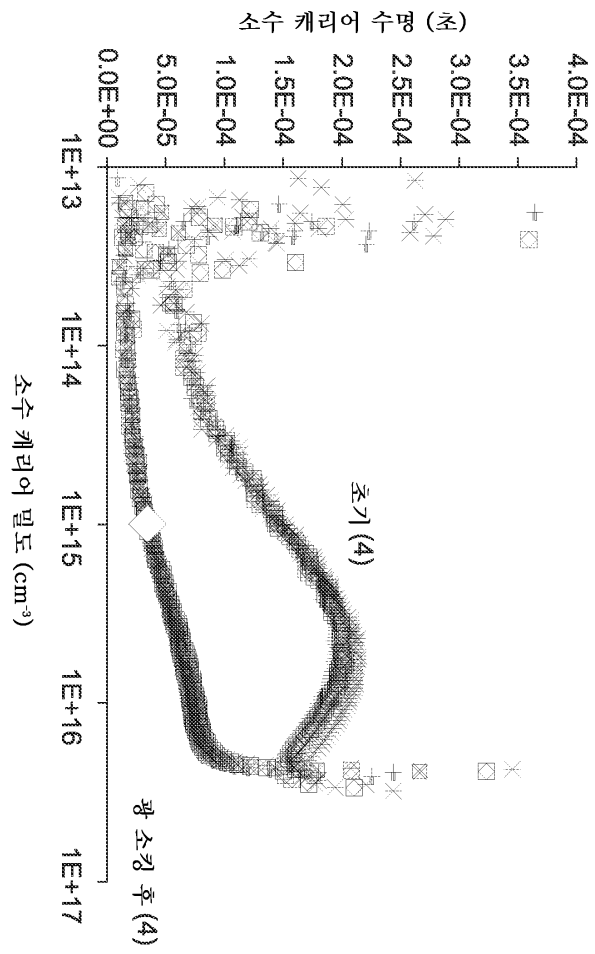
도면8c



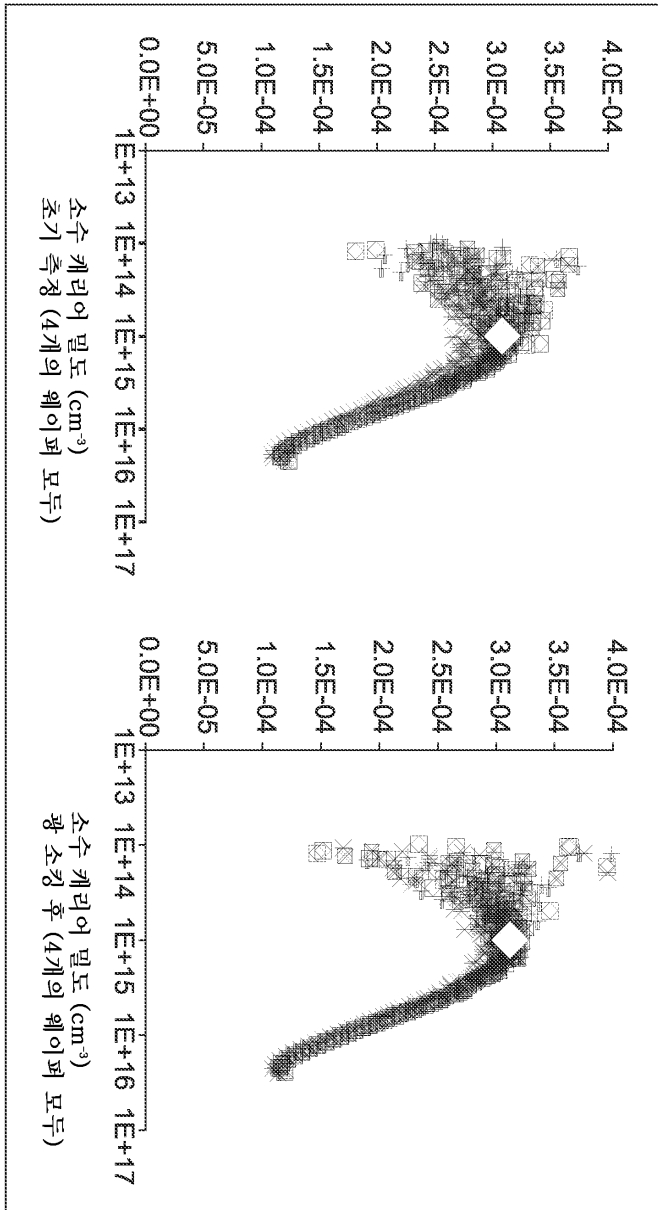
도면9



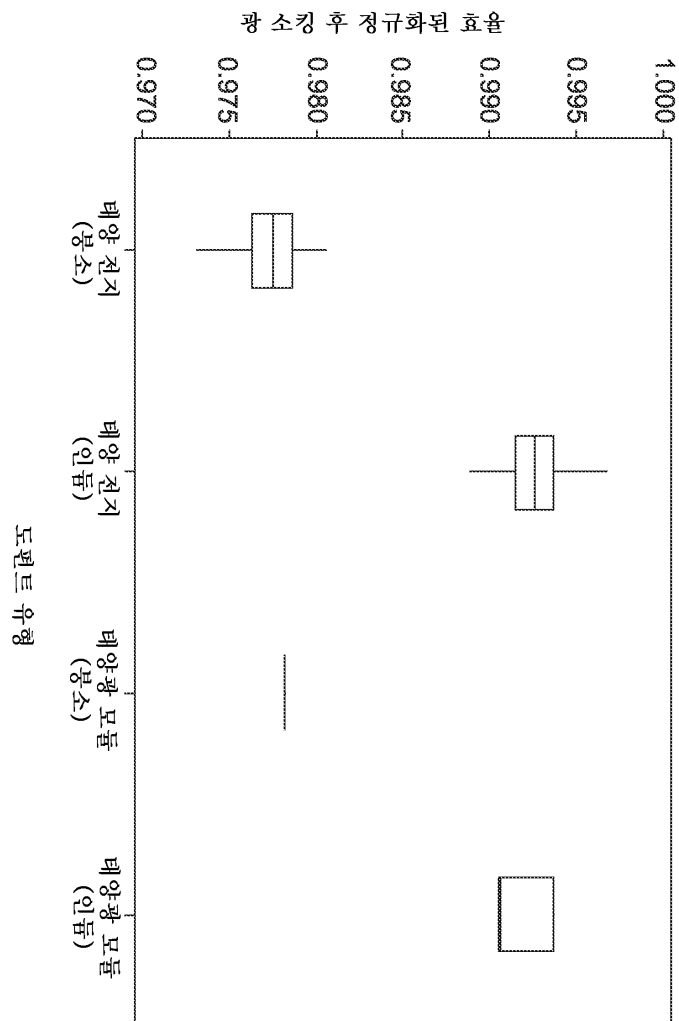
도면10



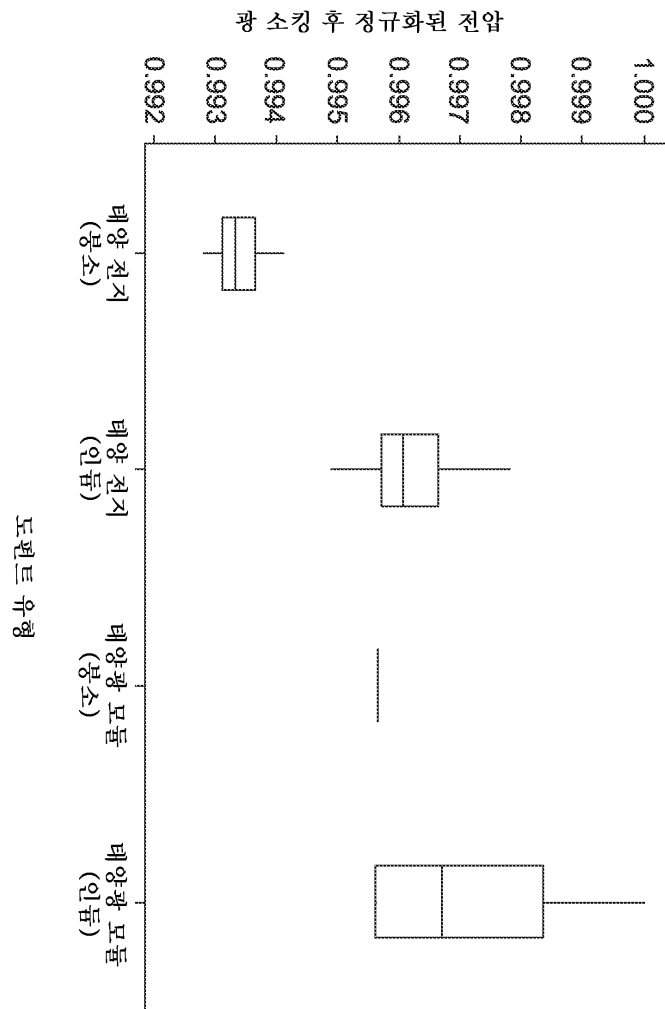
도면11



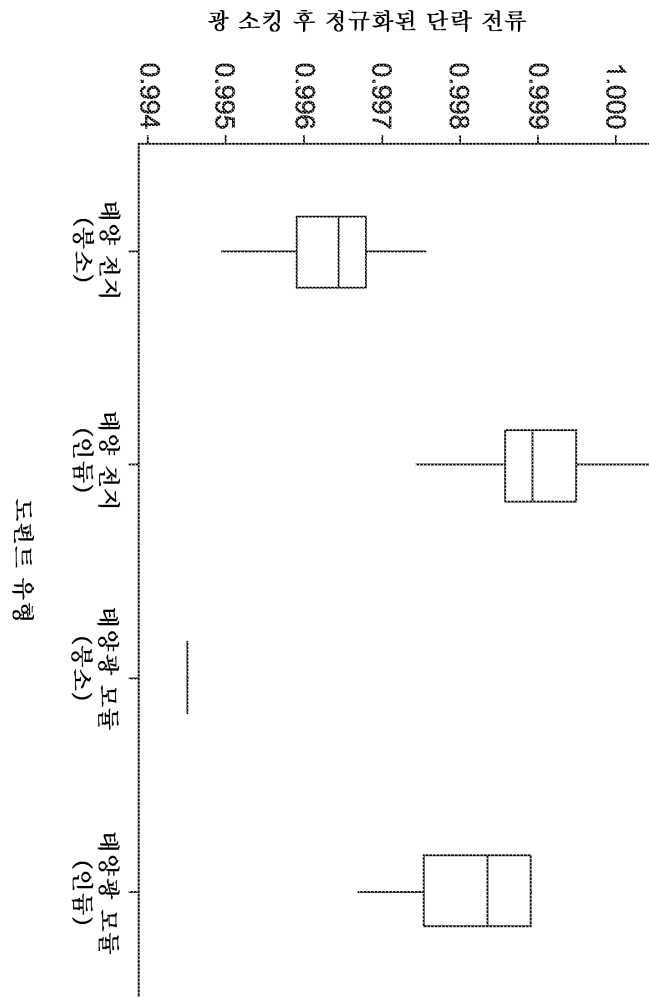
도면12



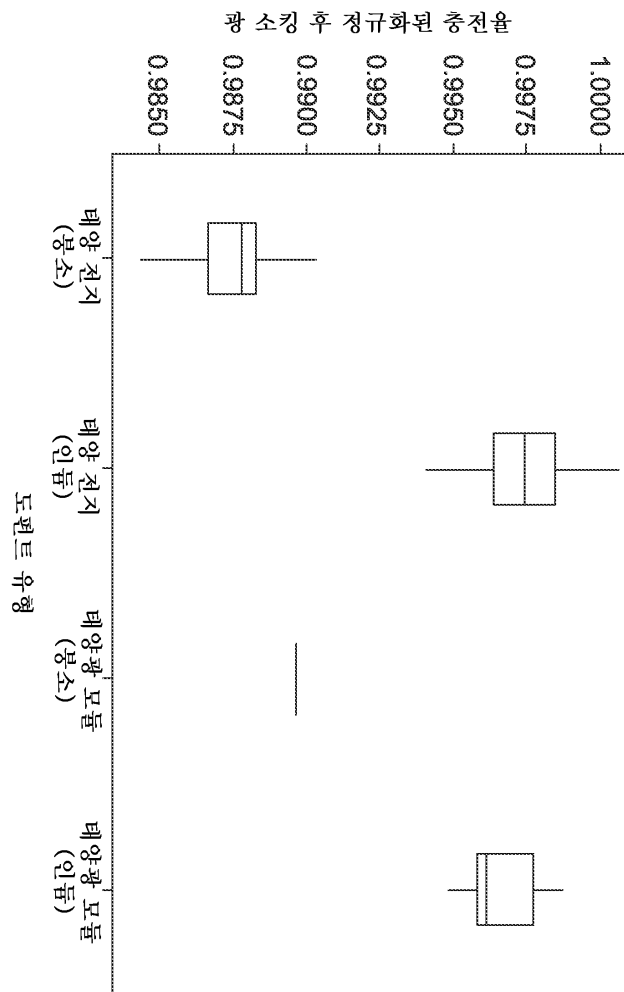
도면13



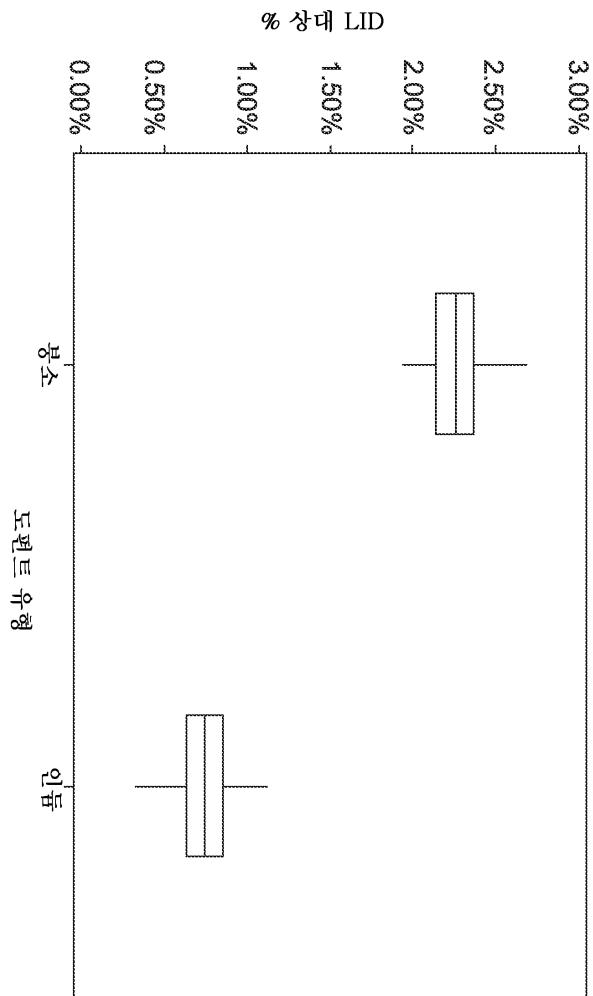
도면14



도면15



도면16



도면17

