



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2011년01월18일
 (11) 등록번호 10-1009074
 (24) 등록일자 2011년01월11일

(51) Int. Cl.
 C30B 15/30 (2006.01) C30B 15/00 (2006.01)
 C30B 15/22 (2006.01)
 (21) 출원번호 10-2007-7015069
 (22) 출원일자(국제출원일자) 2005년11월29일
 심사청구일자 2008년03월18일
 (85) 번역문제출일자 2007년06월29일
 (65) 공개번호 10-2007-0102675
 (43) 공개일자 2007년10월19일
 (86) 국제출원번호 PCT/US2005/042928
 (87) 국제공개번호 WO 2006/073614
 국제공개일자 2006년07월13일
 (30) 우선권주장
 11/026,780 2004년12월30일 미국(US)
 (56) 선행기술조사문헌
 Journal of CRYSTAL GROWTH, ELSEVIER,
 Amsterdam, Vol. 193, No.3, 402-412
 Journal of CRYSTAL GROWTH, ELSEVIER,
 Amsterdam, Vol. 98, No.4, 777-781
 전체 청구항 수 : 총 15 항

(73) 특허권자
 엠이엠씨 일렉트로닉 머티리얼즈, 인크.
 미합중국 미주리 (우:63376-5000) 세인트 피터스
 피.오.박스 8 펄 드라이브 501
 (72) 발명자
 루, 쟁
 미국 63376 미주리주 세인트. 피터스 피.오. 박스
 8 펄 드라이브501 엠이엠씨 일렉트로닉 머티리얼
 즈, 인크.
 (74) 대리인
 양영준, 백만기

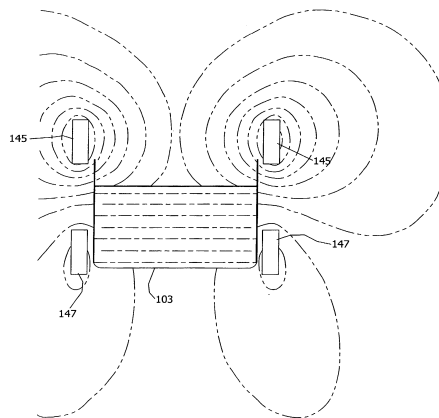
심사관 : 김영민

(54) 가변 자기장을 사용한 성장 실리콘 결정의 용융물-고체 계면 형상의 제어

(57) 요약

초크랄스키 결정 성장 장치에서 결정 성장을 제어하기 위한 방법 및 시스템이 제공된다. 잉곳이 용융물로부터 인상되고 있는 동안, 자기장이 결정 성장 장치 내에 인가되고 용융물-고체 계면의 형상을 제어하기 위하여 변화된다. 용융물-고체 계면의 형상은 잉곳의 길이의 함수로서 변화되는 자기장에 응답하여 원하는 형상으로 형성된다.

대표도 - 도6A



특허청구의 범위

청구항 1

결정 성장 장치에서 결정 성장을 제어하기 위한 시스템으로서,

상기 결정 성장 장치는 단결정 잉곳이 초크랄스키 프로세스(Czochralski process)에 따라 성장되는 반도체 용융물을 포함하는 가열된 도가니를 갖고, 상기 잉곳은 상기 용융물로부터 인상되는 시드 결정(seed crystal)상에 성장되고,

상기 시스템은,

상기 용융물에 커스프(cusp) 자기장을 인가하기 위하여 상기 도가니 근처에 위치되는 제1 코일 및 제2 코일;

상기 코일에 에너지를 공급하기 위한 가변 전원; 및

상기 잉곳이 상기 용융물로부터 인상되고 있는 동안 상기 전원을 가변시키기 위한 컨트롤러를 포함하고, 상기 가변 전원은 상기 컨트롤러에 응답하여, 상기 용융물-고체 계면의 원하는 형상을 생성시키기 위하여 상기 용융물과 상기 잉곳 간의 용융물-고체 계면에 대하여 상기 자기장의 커스프 위치를 제어하도록 상기 자기장을 가변시키고, 상기 용융물-고체 계면의 원하는 형상은 상기 잉곳의 길이의 함수인 결정 성장의 제어를 위한 시스템.

청구항 2

제1항에 있어서, 상기 가변 전원은 상기 컨트롤러에 응답하여 상기 용융물-고체 계면에 대하여, 수평 방향으로 우세한 비대칭 자기장 구성; 축 방향으로 우세한 비대칭 자기장 구성; 및 대칭인 자기장 구성의 자기장 구성 유형 중 하나 이상에 따라 상기 자기장을 변화시키는 결정 성장의 제어를 위한 시스템.

청구항 3

제2항에 있어서, 상기 수평 방향으로 우세한 비대칭 자기장은, 상기 잉곳에 비하여 오목한 부분이 더욱 평평한 걸쭉식(gull-wing) 형상을 갖는 용융물-고체 계면 형상; 상기 용융물-고체 계면에서 증가된 축 방향 온도 구배(gradient); 및 상기 용융물-고체 계면 근처의 잉곳에서 상기 축 방향 온도 구배의 감소된 반경 방향의 변화 중 하나 이상을 생성하고,

상기 축 방향으로 우세한 비대칭 자기장은, 상기 잉곳에 비해 더욱 볼록한 형상을 갖는 용융물-고체 계면 형상; 안정된 용융물 흐름; 및 상기 잉곳내의 감소된 레벨의 산소 농도 중 하나 이상을 생성하는 결정 성장의 제어를 위한 시스템.

청구항 4

제1항에 있어서, 상기 제1 코일은 상기 용융물-고체 계면보다 높이 위치되고, 상기 제2 코일은 상기 용융물-고체 계면보다 낮게 위치되는 결정 성장의 제어를 위한 시스템.

청구항 5

제4항에 있어서, 상기 가변 전원은 상기 컨트롤러에 응답하여 수평 방향으로 우세한 비대칭 자기장 구성을 실현하기 위하여 상기 용융물-고체 계면의 아래로 상기 커스프 위치를 이동시키도록 상기 제2 코일에 비해 상기 제1 코일에 전력 배분을 증가시키는 결정 성장의 제어를 위한 시스템.

청구항 6

제4항에 있어서, 상기 가변 전원은 상기 컨트롤러에 응답하여 축 방향으로 우세한 비대칭 자기장 구성을 실현시키기 위하여 상기 용융물-고체 계면의 위로 상기 커스프 위치를 이동시키도록 상기 제1 코일에 비해 상기 제2 코일에 전력 배분을 증가시키는 결정 성장의 제어를 위한 시스템.

청구항 7

제4항에 있어서, 상기 가변 전원은 상기 컨트롤러에 응답하여 대칭인 자기장 구성을 실현시키기 위하여 상기 용융물-고체 계면 근처로 상기 커스프 위치를 이동시키도록 균일한 전력 배분에 따라 상기 제1 코일과 제2 코일에 에너지를 공급하는 결정 성장의 제어를 위한 시스템.

청구항 8

제5항에 있어서, 상기 컨트롤러는 자기장 강도를 변화시키기 위하여, 상기 잉곳의 길이; 및 상기 잉곳의 성장 단계 중 하나 이상의 함수로서 상기 제1 코일 및 제2 코일의 전력 배분을 선택적으로 조절하기 위하여 상기 전원을 가변시킴으로써, 상기 용융물-고체 계면의 위 또는 아래의 원하는 위치로 상기 커스프 위치를 이동시키고, 상기 성장 단계는, 네킹(necking); 크라운(crown); 및 몸체 하부로부터 엔드 콘(late body to end cone)까지의 성장 중 하나 이상을 포함하는 결정 성장의 제어를 위한 시스템.

청구항 9

제1항에 있어서, 상기 컨트롤러는 상기 잉곳에 원하는 레벨의 산소 농도를 생성하도록 상기 용융물-고체 계면의 상기 형상을 제어하기 위하여 상기 자기장을 선택적으로 조절하고자 상기 전원을 가변시키기 위하여 상기 원하는 레벨의 산소 농도에 응답하는 결정 성장의 제어를 위한 시스템.

청구항 10

제1항에 있어서, 상기 컨트롤러는 상기 잉곳에 원하는 레벨의 산소의 반경 방향 구배를 생성하도록 상기 용융물-고체 계면의 형상을 제어하기 위하여 상기 자기장을 선택적으로 조절하고자 상기 전원을 가변시키기 위하여 상기 원하는 레벨의 산소의 반경 방향 구배에 응답하는 결정 성장의 제어를 위한 시스템.

청구항 11

초크랄스키 프로세스에 의해 단결정 반도체 잉곳을 생성하는 방법으로서,
반도체 용융물로부터 인상(pull)되는 시드 결정상에 단결정 잉곳을 성장시키는 단계;
상기 잉곳의 성장 기간 동안 상기 용융물에 비대칭 자기장을 인가하는 단계; 및
상기 잉곳이 상기 용융물로부터 인상되고 있는 동안, 상기 용융물-고체 계면의 형상을 제어하기 위하여 상기 자기장을 변화시키는 단계를 포함하고, 상기 용융물-고체 계면의 형상은 상기 잉곳의 길이의 함수인 단결정 반도체 잉곳의 생성 방법.

청구항 12

제11항에 있어서, 상기 비대칭 자기장을 인가하는 단계는,
상기 잉곳에 비해 덜 오목하면서 더욱 결빙식 형상을 갖는 용융물-고체 계면 형상; 상기 용융물-고체 계면에서 증가된 축 방향 온도 구배; 상기 용융물-고체 계면 근처의 상기 잉곳에서 상기 축 방향 온도 구배의 감소된 반경 방향 변화; 및 상기 잉곳내의 증가된 레벨의 산소 농도 중 하나 이상을 생성시키기 위하여 상기 용융물-고체 계면에 대해 수평 방향으로 우세한 비대칭 자기장을 인가하는 단계, 또는 상기 잉곳에 비해 더욱 볼록한 형상을 갖는 용융물-고체 계면 형상; 안정된 용융물 흐름; 및 상기 잉곳내의 감소된 레벨의 산소 농도 중 하나 이상을 생성하기 위하여 상기 용융물-고체 계면에 대해 축 방향으로 우세한 비대칭 자기장을 인가하는 단계를 포함하는 단결정 반도체 잉곳의 생성 방법.

청구항 13

제11항에 있어서, 상기 비대칭 자기장을 인가하는 단계는, 상이한 전력 레벨로, 상기 용융물-고체 계면보다 높게 위치된 제1 자석에 에너지를 공급하고, 상기 용융물-고체 계면보다 낮게 위치된 제2 자석에 에너지를 공급하는 단계를 포함하는 단결정 반도체 잉곳의 생성 방법.

청구항 14

제11항에 있어서, 상기 자기장을 변화시키는 단계는,
상기 용융물-고체 계면의 형상을 제어하여 상기 잉곳에 원하는 레벨의 산소 농도를 생성하기 위하여 상기 자기장을 선택적으로 조절하는 단계; 및
상기 용융물-고체 계면의 형상을 제어하여 상기 잉곳에 원하는 레벨의 산소의 반경 방향 구배를 생성하기 위하여 상기 자기장을 선택적으로 조절하는 단계

중 하나 이상을 포함하는 단결정 반도체 잉곳의 생성 방법.

청구항 15

단결정 잉곳의 결정 성장의 산소 특성을 제어하는 방법으로서,

상기 잉곳은 초크랄스키 프로세스에 따라 결정 성장 장치에서 성장되고, 상기 결정 성장 장치는 잉곳이 성장되는 반도체 용융물을 포함하는 가열된 도가니를 갖고, 상기 잉곳은 용융물로부터 인상된 시드 결정상에 성장되고,

상기 용융물에 커스프 자기장을 인가하는 단계; 및

상기 잉곳과 상기 용융물 사이의 용융물-고체 계면에 대해 상기 자기장의 커스프 위치를 제어하여 상기 용융물-고체 계면의 원하는 형상을 생성하기 위해 상기 용융물로부터 상기 잉곳이 인상되고 있는 동안, 상기 자기장을 변화시키는 단계를 포함하고, 상기 용융물-고체 계면의 원하는 형상은 상기 잉곳에 원하는 산소 특성을 생성하는 산소 특성의 제어 방법.

명세서

기술분야

[0001] 본 발명의 실시예는 전자 부품의 제조에 사용되는 단결정 실리콘을 생성하는 분야에 관한 것이다. 특히, 본 발명의 실시예는 가변 자기장을 인가함으로써 성장 결정의 용융물-고체 계면(melt-solid interface) 형상을 제어함에 관한 것이다.

배경기술

[0002] 반도체 전자 부품을 제조하기 위한 대부분의 프로세스에서의 시작 물질인 단결정 실리콘은, 일반적으로 소위 초크랄스키(Czochralski) 프로세스에 따라 준비된다. 이 프로세스에서, 다결정 실리콘, 즉 폴리실리콘을 도가니에 넣고 용융시켜, 시드 결정이 용융된 실리콘과 접촉하게 되고, 단결정 잉곳이 비교적 느린 추출에 의해 성장하게 된다. neck(neck)의 형성이 완료된 후, 원하는 직경 또는 목표 직경에 이를 때까지 인상 속도 및/또는 용융물 온도를 감소시킴으로써 결정의 직경을 확대한다. 대략 일정한 직경을 갖는 일반적인 결정의 원통형의 본체는, 감소되는 용융물 레벨을 보상하는 한편 인상 속도 및 용융물 온도를 제어함으로써 성장하게 된다. 성장 프로세스의 종료에 가깝지만 도가니에 용융된 실리콘이 없어지기 전에, 엔드 콘(end-cone)을 형성하기 위해 결정 직경을 점진적으로 저감시킨다. 전형적으로, 도가니에 공급되는 열 및 결정 인상 속도를 증가시킴으로써 엔드 콘을 형성하게 된다. 직경이 충분히 작게 되면, 결정이 용융물로부터 분리된다.

[0003] 당해 기술에 알려져 있듯이, (약 1420°C에서) 용융된 실리콘은 용융물을 함유하는 실리카(SiO₂) 도가니의 표면을 용해시킬 것이다. 용해된 실리카의 일부는, 용해된 실리카의 일부가 성장하는 결정 내로 포함되면서 용융물의 표면으로부터 SiO(실리콘 일산화물)로서 증발된다. 용해된 실리카의 나머지는 용융물에 남아 있다. 이러한 방식으로, 실리콘 용융물을 함유하는 도가니는, 종래의 초크랄스키 기술에 의해 성장된 실리콘 결정에서 발견되는 산소원으로서 작용한다.

[0004] 실리콘 결정의 산소는 바람직한 결과와 바람직하지 못한 결과 모두를 가질 수 있다. 다양한 전기 장치들의 제조 동안의 다양한 열 처리 프로세스에서, 결정내의 산소는 침전물, 전위 루프(dislocation loop) 및 적층 결함과 같은 결정 결함을 야기할 수 있고, 또는 전기적으로 활성인 결함을 일으켜 전기 장치들의 성능 특성을 열등하게 할 수 있다. 그러나, 결정내의 산소의 고용체는 실리콘 웨이퍼의 기계적인 강도를 증가시키고, 결정 결함은 증금속의 오염물질을 포획함으로써 생산물의 수율을 개선시킬 수 있다. 이에 따라, 실리콘 결정내에서의 산소량은 생산물 품질을 위한 중요한 인자라서 실리콘 웨이퍼의 최종 응용에 따라 신중하게 제어되어야 한다.

[0005] 당업계에 널리 알려진 초크랄스키 조건 하에서 성장된 종래의 실리콘 결정에서의 산소 농도는 결정의 길이에 따라 가변된다. 예를 들어, 이 농도는 전형적으로 결정의 중간 엔드 및/또는 바닥 엔드 혹은 탭(tang) 엔드에서보다 시드 엔드에서 높다. 또한, 산소 농도는 전형적으로 결정의 단면 슬라이스의 반경을 따라 가변된다.

[0006] 이러한 산소 제어 문제점을 다루고자, 산소의 농도와 반경 방향 분포를 제어하도록 자기장을 이용하여 금속 및 반도체 용융물에서의 대류를 안정화시킴으로써 도펀트 줄무늬 등을 제거하는 방안이 주목되었다. 예를 들어, 전도성 용융물내의 자기장에 의해 발생하는 로렌츠힘을 이용하여 자연적인 대류 및 난류를 감소시킬 수 있다.

전도성 용융물내에서의 대류를 안정화시키기 위하여 사용된 3가지 유형, 즉 축 방향, 수평 방향 및 커스프(cusp) 형태의 종래의 자기장 구성이 있다.

[0007] 축 방향(또는 수직 방향) 자기장 구성(예컨대, 도 1 참조)은 결정 성장 방향과 평행한 자기장을 생성한다. 도 1에서, 단면으로 도시되어 있는 자석 코일(21)은 도가니(23)에 자기장을 공급한다. 도시된 바와 같이, 도가니(23)는 결정(27)이 성장되는 실리콘 용융물(25)을 포함한다. 이 구성은 상대적으로 단순한 구조와 축 방향 대칭이라는 이점을 갖고 있다. 그러나, 축 방향 자기장 구성은 그 우세적인 축 방향 자기장 성분 때문에 반경 방향의 균일성을 파괴한다.

[0008] 수평 방향(또는 횡 방향) 자기장 구성(예컨대, 도 2 참조)에서, 2개의 자극(29)이 대향 배치되어 결정 성장 방향과 수직인 자기장을 생성한다. 이 수평 방향 구성은 용융물 표면에서의 대류를 감소시키는데 효과적인 이점을 갖고 있다. 그러나, 축 방향과 반경 방향 모두 균일하지 않고 복잡하고 부피가 큰 구조로 인해, 직경이 큰 초크랄스키 성장 프로세스에서 수평 방향의 자기장 구성의 적용을 어렵게 한다.

[0009] 커스프(cusp) 자기장 구성(예컨대, 도 3 참조)은 축 방향 자기장 및 수평 방향 자기장 구성의 결합을 극복하기 위하여 설계된다. 용융물-고체 계면의 위와 아래에 동축으로 배치되어 있고 반대의 전류 모드로 동작하는 한 쌍의 코일(31, 33)(예컨대, 헬름홀츠 코일(Helmholtz coil))은, 용융물 표면 근처에 순전히 반경 방향 자기장 성분만 갖고 용융물의 중심 근처에는 순전히 축 방향 자기장 성분만을 갖는 자기장을 생성한다. 이와 같은 방식으로, 커스프 자기장 구성은 용융물과 결정 사이의 계면에 회전 대칭을 보전하려는 시도를 한다. 그러나, 커스프 자기장의 효율성은 용융물의 중심에서 감소된다. 또한, 커스프 위치는 용융물 표면에서 유지되기 때문에, 용융물 내에서의 축 방향 균일성은 점차 감소되고, 결국에는 용융물 깊이가 결정 성장의 엔드(end) 부분을 향하여 감소됨에 따라 사라진다.

[0010] 따라서, 이러한 종래의 자기장 구성의 단점을 처리함에 있어, 결정 성장 프로세스의 개선된 제어가 요구된다.

발명의 상세한 설명

[0011] 본 발명의 실시예는 종래의 기술의 하나 이상의 결함을 극복하고, 가변 자기장을 인가함으로써 용융물과 결정 사이의 계면 형성의 제어를 제공한다. 일 실시예에서, 본 발명은 계속적으로 변화 가능한 자기장 강도 및 구성을 갖는 비대칭 자기장을 통해 결정이 성장되는 실리콘 용융물 내의 흐름을 제어한다. 따라서, 본 발명의 실시예는 결정-용융물 계면의 형상, 그 계면에서의 축 방향 온도 구배(gradient), 및 원하는 계면 형상 및 값을 실현하기 위하여 그 계면에 그리고 계면 근처에 축 방향 온도 구배의 반경 방향 변화를 허용한다. 본 발명의 양태에 따르면, 가변하는 비대칭 자기장은 결정-용융물 계면 형상을 제어함에 있어서 종래의 자기장 구성에 비해 보다 더 탄력적이고 많은 가능성을 제공한다. 또한, 본 발명의 실시예는 원하는 용융물 흐름의 제어 및 균일함을 유지하기 위하여 결정의 길이에 기초하여 결정-용융물 계면의 위 또는 아래 중 어느 한 부분에서 자기장의 커스프 위치의 이동을 허용한다. 본 발명의 가변하는 비대칭 자기장은, 하드웨어 구조 및 물리적인 위치의 변화 없이, 종래의 자기장 구성의 단점을 회피하면서 이점을 가지고 있다.

[0012] 본 발명의 방법의 실시양태는 결정 성장 장치에서의 결정 성장을 제어하는 것이다. 이 방법은 단결정 잉곳(ingot)이 초크랄스키 프로세스에 따라 성장되는 반도체 용융물에 커스프 자기장을 인가하는 단계를 포함한다. 또한, 이 방법은 용융물-고체 계면의 원하는 형상을 생성하기 위하여 용융물과 잉곳 사이의 용융물-고체 계면에 대하여 자기장의 커스프 위치를 제어하기 위하여 잉곳이 용융물로부터 인상(pull)되는 동안, 자기장을 가변시키는 단계를 포함한다. 용융물-고체 계면의 원하는 형상은 잉곳의 길이의 함수이다.

[0013] 다른 실시예에서, 결정 성장 장치에서의 결정 성장을 제어하기 위한 시스템은 단결정 잉곳이 초크랄스키 프로세스에 따라 성장되는 반도체 용융물을 포함하는 도가니 근처에 위치한 제1 코일 및 제2 코일을 포함한다. 코일은 용융물에 커스프 자기장을 인가한다. 또한, 이 시스템은 코일에 에너지를 공급하기 위한 가변 전원을 포함한다. 잉곳이 용융물로부터 인상되는 동안, 컨트롤러는 전원을 가변시킨다. 가변 전원은 컨트롤러에 응답하여 용융물과 잉곳 사이의 용융물-고체 계면에 대한 자기장의 커스프 위치를 제어하도록 자기장을 변화시킨다. 이로써 용융물-고체 계면의 원하는 형상이 생성된다. 용융물-고체 계면의 원하는 형상은 잉곳의 길이의 함수이다.

[0014] 또 다른 실시예는 초크랄스키 프로세스에 의해 단결정 반도체 잉곳을 생성하기 위한 방법을 포함한다. 이 방법은 반도체 용융물로부터 인상된 시드 결정(seed crystal)상에 단결정 잉곳을 성장시키는 단계를 포함한다. 또한, 이 방법은 잉곳의 성장 기간 동안 용융물에 비대칭 자기장을 인가하는 단계 및 용융물로부터 잉곳을 인상하는 동안 용융물-고체 계면의 형상을 제어하기 위하여 잉곳의 길이의 함수로서 자기장을 변화시키는 단계를 포함

한다.

[0015] 본 발명의 다른 방법의 실시 양태는 단결정 잉곳의 결정 성장의 산소 특성을 제어하는 것이다. 잉곳은 초크랄스키 프로세스에 따라 결정 성장 장치에서 성장된다. 결정 성장 장치는 잉곳이 성장되는 반도체 용융물을 포함하는 가열된 도가니를 갖는다. 잉곳은 용융물로부터 인상된 시드 결정상에 성장된다. 이 방법은 용융물에 커스프 자기장을 인가하는 단계를 포함한다. 또한, 이 방법은 용융물-고체 계면의 원하는 형상을 생성하도록 용융물과 잉곳 사이의 용융물-고체 계면에 대한 자기장의 커스프 위치를 제어하기 위하여 잉곳이 용융물로부터 인상되고 있는 동안, 자기장을 변화시키는 단계를 포함한다. 용융물-고체 계면의 원하는 형상은 잉곳에 원하는 산소 특성을 생성한다.

[0016] 이와 달리, 본 발명의 실시에는 다양한 다른 방법 및 장치를 포함할 수 있다.

[0017] 다른 특징들은 이하에서 어느 정도 명백하게 밝혀질 것이다.

실시예

[0040] 도 4를 참조하면, 본 발명의 초크랄스키 결정 성장 장치의 실시 양태이 블록도 형식으로 도시되어 있다. 일반적으로, 결정 성장 장치는 도가니(103)를 에워싸는 진공 챔버(101)를 포함한다. 저항 히터(105)와 같은 가열 수단은 도가니(103)를 둘러싼다. 가열 및 결정 인상 기간 동안, 도가니 구동 유닛(예컨대, 모터)(107)은 예컨대 화살표로 나타낸 시계 방향으로 도가니(103)를 회전시킨다. 또한, 도가니 구동 유닛(107)은 성장 프로세스 동안 원하는 대로 도가니(103)를 상승 및/또는 하강시킬 수 있다. 도가니(103) 내에는 용융물 레벨(111)을 갖는 실리콘 용융물(109)이 존재한다. 동작 중, 이 장치는 시드 결정(115)을 인상 샤프트(pull shaft) 또는 케이블(117)에 부착시키는 것을 시작하여, 용융물(109)로부터 단결정(113)을 인상한다. 본 기술에서 알 수 있듯이, 인상 샤프트 또는 케이블(117)의 일 단부는 도르레(도시 안됨)를 통해 드럼(도시 안됨)에 연결되어 있고, 다른 단부는 시드 결정(115) 및 시드 결정(115)으로부터 성장된 결정(113)을 유지하는 척(chuck)(도시 안됨)에 연결되어 있다.

[0041] 도가니(103) 및 단결정(113)은 공통의 대칭축(119)을 갖는다. 도가니 구동 유닛(107)은 용융물(109)이 그 레벨(111)을 원하는 높이로 유지하도록 감소됨에 따라 척(119)을 따라 도가니(103)를 상승시킬 수 있다. 결정 구동 유닛(121)은 마찬가지로 도가니 구동 유닛(107)이 도가니(103)를 회전시키는 방향과 반대 방향으로 인상 샤프트 또는 케이블(117)을 회전시킨다(예컨대, 카운터 로테이션(counter-rotation)). 동방향 회전(iso-rotation)을 사용하는 실시예에서는, 결정 구동 유닛(121)은 도가니 구동 유닛(107)이 도가니(103)를 회전시키는 방향과 동일한 방향(예컨대, 시계 방향)으로 인상 샤프트 또는 케이블(117)을 회전시킬 수 있다. 또한, 결정 구동 유닛(121)은 성장 프로세스 동안 원하는대로 결정(113)을 용융물 레벨(111)에 대해 상승 및 하강시킨다.

[0042] 초크랄스키 단결정 성장 프로세스에 의하면, 다량의 다결정 실리콘, 즉 폴리실리콘이 도가니(103)에 채워진다. 히터 전원(123)은 저항 히터(105)에 전력을 공급하고, 진공 챔버(101)의 내벽을 절연체(125)로 채운다. 진공 펌프(131)가 진공 챔버(101)로부터 가스를 제거함에 따라, 가스 공급 장치(예컨대, 병)(127)는 가스 흐름 컨트롤러(129)를 통해 진공 챔버(101)에 아르곤 가스를 공급한다. 급수통(135)으로부터 냉각수가 공급되는 챔버 냉각 재킷(133)이 진공 챔버를 둘러싼다. 그 후, 냉각수는 냉각수 리턴 기관(137)으로 배수된다. 전형적으로, 포토셀(139)(또는 고온계)과 같은 온도 센서는 그 표면에서 용융물(109)의 온도를 측정하고, 직경 트랜스듀서(transducer)(141)는 단결정(113)의 직경을 측정한다. 제어 유닛(143)과 같은 프로세서는 포토셀(139) 및 직경 트랜스듀서(141)에 의해 생성되는 신호를 처리한다. 제어 유닛(143)은 프로그래밍된 디지털 컴퓨터 또는 아날로그 컴퓨터일 수 있다; 제어 유닛(143)은 도가니 구동 유닛(107)과 단결정 구동 유닛(121), 히터 전원(123), 펌프(131) 및 아르곤 흐름 컨트롤러(129)를 제어한다.

[0043] 도 4에 도시된 바와 같이, 솔레노이드 코일(145)과 같은 상부 자석, 및 솔레노이드 코일(147)과 같은 하부 자석은 용융물 레벨(111)의 위와 아래에 각각 배치될 수 있다. 도시된 실시예에서, 단면이 도시된 코일(145, 147)은 진공 챔버(101)를 둘러싸고, 대칭축(119)과 축을 공유한다. 상부 코일(145) 및 하부 코일(147)은 별개의 전원, 즉 상부 코일의 전원(149) 및 하부 코일의 전원(151)을 가지며, 이들 각각은 제어 유닛(143)에 접속되어, 제어 유닛(143)에 의해 제어된다.

[0044] 본 발명의 실시예에 의하면, 자기장을 생성하기 위해 두 개의 솔레노이드 코일(145, 147)에서는 전류가 반대 방향으로 흐른다. 급수통(153)은 냉각수 리턴 기관(137)을 통해 배수하기 전에 상부 코일(145) 및 하부 코일(147)에 냉각수를 제공한다. 철 재료의 차폐물(155)이 표유 자기장(stray magnetic field)을 감소시키기 위해,

또한 생성된 자기장의 강도를 강화시키기 위해 도시된 실시예와 같이 코일(145, 147)을 둘러싼다.

[0045] 본 발명의 실시예는 결정 성장 장치 제조에서 사용하는데 적합한 실리콘 결정 잉곳의 생성 단계를 포함한다. 본 발명은 상당 부분 또는 전부에 응집된 고유 점결함(agglomerated intrinsic point defect)이 거의 없는 실리콘 결정(113)을 생성하기 위해 사용될 수 있다는 이점이 있다. 즉, 본 발명의 실시예에 의해 생성된 결정(113)의 상당 부분 또는 전부는 약 1×10^4 결함/cm³ 보다 작은 결함 밀도, 약 5×10^3 결함/cm³ 보다 작은 결함 밀도, 약 1×10^3 결함/cm³ 보다 작은 결함 밀도를 가질 수 있고, 또는 검출할 수 있는 응집된 고유 점결함 자체가 없을 수도 있다. 다른 실시예에서, 본 발명은 직경이 약 60nm 보다 큰 응집된 고유 점결함을 실질적으로 갖지 않는 결정(113)을 생성하는데 사용될 수 있다.

[0046] 본 발명의 실시 양태는 응집된 고유 점결함의 형성을 제한 및/또는 억제하기 위하여 결정 성장 기간 동안 용융물-고체 또는 용융물-결정 계면의 형상을 제어한다. 도 5는 용융물 표면(161)을 포함한 예시적인 용융물-결정 계면을 도시한다. 용융물(109)과 실리콘 결정(113) 사이의 이 계면의 형상은 결정(113)에 비하여 오목한 형상 또는 볼록한 형상일 수 있다. 용융물-고체 계면 형상은 결정(113)에 비하여 오목한 형상과 볼록한 형상을 모두 갖는 형상("결빙"식 형상)일 수도 있다. 이하와 같이, 용융물-고체 계면 형상은 결정 성장 기간 동안의 결함을 제어하기 위한 중요한 파라미터이다.

[0047] 일 실시예에서, 본 발명은 용융물-고체 계면 형상에 영향을 미치는 용융물 대류를 이용한다. 대류란 액체 그 자체의 움직임에 의한 액체 내의 열 전달 과정을 말한다. 일반적으로, 2가지 형태의 대류 ; 자연 대류와 강제 대류가 있다. 자연 대류는 용융물(109)의 움직임이 예컨대, 농도 구배를 상승시키는 히터(105)의 존재에 의할 때 발생된다. 강제 대류는 용융물(109)의 움직임이 도가니(103) 내의 자기장과 같은 외부적 요소에 의할 때 발생된다. 따라서, 자기장 강도를 제어하면 원하는 용융물-고체 계면 형상을 생성할 수 있다.

[0048] 예컨대, 자기장이 실리콘 용융물(109)과 같은 전도성 액체의 흐름 패턴에 영향을 줄 수 있기 때문에, 본 발명의 실시예는 용융물 대류에 영향을 주는 자석(예컨대, 코일(145, 147)의 형태)을 사용하므로, 용융물(109)의 온도 분포를 변화시키고, 이는 이어서 용융물-고체 계면 형상에 영향을 준다. 또한, 이하와 같이, 본 발명의 실시예는 그 구성 및 자기장 강도가 계속적으로 변화될 수 있는 축 방향 비대칭 자기장을 통해 실리콘 용융물(109)의 흐름을 제어한다. 이와 같이, 원하는 계면 형상 및 값을 생성하기 위해 용융물-고체 계면 형상, 계면에서의 축 방향 온도 구배, 및 계면에 있는 또한 계면 가까이에 있는 결정(113)의 축 온도 구배의 반경 방향 변화를 조작시킬 수 있다. 도 6A, 도 7A 및 도 8을 참조하여 이하에서 상술하는 바와 같이, 본 발명의 실시예는 원하는 용융물-고체 계면 형상을 생성하기 위하여 결정 성장 장치 내에 가변 자기장을 제공하고, 이는 이어서 원하는 결정 특성을 생성한다.

[0049] 본 기술분야에서 숙련된 사람이라면 알 수 있는 바와 같이, 용융물로부터 성장된 실리콘 결정은 과도한 결정 격자 베이컨시(crystal lattice vacancy)("V") 또는 격자간 실리콘 원자(silicon self interstitial)("I")를 가질 수 있다. 본 발명의 실시예에 의하면, 결정 성장 기간 동안의 용융물-고체 계면 형상의 조작은 고품화(이뤄지는 경계(solidification front)에서의 점결함의 초기 분포 및 용융물-고체 계면으로부터 다양한 정도로 점결함의 확산 경로를 제어하기 위해 사용될 수 있다. 지배적인 점결함의 종류는 일반적으로 고화 근처에서 결정된다. 따라서, 지배적인 점결함 농도가 임계 과포화 레벨에 이르면, 또한 점결함의 이동도가 충분히 높으면, 반응 또는 응집이 발생하기 쉬워진다. 실리콘내에서의 응집된 고유 점결함은 복잡한 고집적 회로의 생성에 있어서 재료의 잠재적인 수율에 영향을 줄 수 있다. 용융물-고체 계면 형상을 제어함으로써, 본 발명의 실시예는 응집 반응을 감소시키거나 회피하여 응집된 고유 점결함이 실질적으로 없는 실리콘을 생성한다.

[0050] 축 방향 온도 구배 G에 대한 결정의 인상 속도 v의 비는 성장하는 결정에서 발생하기 쉬운 고유 점결함의 형태를 나타낸다. 예컨대, 인상 속도가 빠르면, 일반적으로 지배적인 점결함이 베이컨시이다. 이와 달리, 인상 속도가 느리면, 일반적으로 지배적인 점결함이 격자간 실리콘 원자이다. 따라서, 동적인 성장 프로세스 동안(즉, v/G가 결정의 반경의 함수 및/또는 축 방향 길이의 함수로서 변화 가능함), 성장하는 실리콘 결정 내의 점결함은 베이컨시가 지배적인 것에서 격자간 실리콘 원자가 지배적인 것으로 변화될 수 있고, 그 역도 가능하다. 또한, 식별가능한 베이컨시/격자간 실리콘 원자(V/I) 전이는 이러한 변화와 연관된다. 무결함 영역은 응집된 베이컨시 결함과 응집된 격자간 실리콘 원자 결함의 사이에 존재할 수 있다. 구체적으로, V/I 전이는 이 무결함 영역 내에 발생한다. 즉, 이 무결함 영역은 과도한 베이컨시가 지배적인 영역으로부터 과도한 격자간 실리콘 원자가 지배적인 영역으로의 전이 영역에 대응한다. 무결함 영역은 베이컨시가 지배적인 재료 및/또는 격자간 실리콘 원자가 지배적인 재료일 수 있다. 무결함 영역은 임의의 결함을 형성하는 임계적으로 과도한 점결함을

포함하지 않고, 일반적으로 V/I 전이를 포함한다.

- [0051] 식별된 V/I 전이가 본원에서 제공되는 바와 같은 특정한 형상을 갖는 경우, 결정(113)은 이 전이에서 응집된 결함이 실질적으로 없다. 예컨대, 동적인 성장 시뮬레이션 하에서 인상 축(119)과 수직인 실질적으로 평평한 V/I 전이는 응집된 결함이 실질적으로 없는 결정(113)의 부분에 대응한다. 따라서, 용융물-고체 계면 형상을 제어하면 실질적으로 결함이 없는 단일 실리콘 결정의 개선을 가져온다. 특히, 축 방향 길이의 함수로서 목표한 용융물-고체 계면 형상에 따라 용융물-고체 계면 형상을 제어함으로써, 본 발명의 실시예는 결정에 응집된 결함이 실질적으로 없는 영역을 생성할 수 있다.
- [0052] 목표한 계면 형상은 결정의 핫존(hot zone) 설계 및 결정(113)의 축 방향 길이에 따른 위치에 대하여 고유하다. 따라서, 목표한 계면 형상은 결정(113)의 길이에 따른 다양한 위치에서 특정의 핫존을 위해 결정된다. 이러한 결함이 형성되는 속도를 제한하거나, 또는 결함이 형성된 후에 일부의 결함을 제거시키기 위한 시도를 하기보다는, 응집 반응을 억제하거나 아니면 응집 반응을 제어하면 바람직하지 않은 양의 또는 사이즈의 응집된 고유 점 결함이 실질적으로 없는 실리콘 기판이 산출된다. 또한, 응집 반응을 억제 또는 제어하면, 웨이퍼당 획득되는 집적 회로의 수의 측면에서 또한 에피택셜(epitaxial) 프로세스와 관련된 높은 비용을 지출하지 않고도, 에피택셜형(epi-like)의 산출 가능성을 갖는 단결정 실리콘 웨이퍼를 산출할 수 있다.
- [0053] 용융물-고체 계면 형상에 영향을 끼침으로써, 본 발명의 실시예에 따른 용융물(109)에 인가되는 자기장은 상대적으로 큰 직경을 갖는 단결정 잉곳에 대해서는, 특히 상대적으로 낮은 산소 농도로 축 방향과 반경 방향의 산소 농도를 조절할 수 있다. 전류는 (도면에서 나오는 전류를 "·"으로, 도면으로 들어가는 전류를 "X"로) 도시된 바와 같이 상부 코일(145)과 하부 코일(147)을 통과함으로써, 도가니(103)와 실리콘 용융물(109)에 자기장이 인가된다. 자기장은 도가니(103)의 저부와 측벽을 수직으로 교차하는 수평 성분과 수직 성분을 갖는다. 또한, 자기장은 실리콘 용융물 표면(161)과 수직으로 교차하는 수직 성분을 갖는다. 용융된 실리콘 표면(161)과 수직으로 교차하는 평균 자기장 성분은 용융물(109)과 접하는 도가니(103)의 저부와 측벽을 수직으로 교차하는 평균 자기장 성분보다 작을 수 있다. 즉, 용융물 표면(161)과 수직으로 교차하는 평균 자기장 성분은 용융물(109)의 용융된 실리콘과 접한 도가니(103)의 저부와 측벽을 수직으로 교차하는 평균 자기장 성분의 약 1/10보다 작지 않을 수 있다. 또한, 용융물 표면(161)과 수직으로 교차하는 평균 자기장 성분은 0이거나 0에 가까울 수 있다. 즉, 자기장이 0인 수평면은 실리콘 용융 레벨(111)에 또는 그 근처에 위치된다. 두 코일(145, 147)의 수직 방향 위치, 권선 수 및 상대적인 전류는 용융물 레벨(111)의 수평면에서 또는 그 근처에서 값이 0인 자기장을 위치시킬 수 있다.
- [0054] 본 발명의 실시예는 커스프 자기장 구성(도 3 참조)과 동일한 하드웨어 구성을 사용하는 장점이 있는 가변하는 비대칭 자기장 구성(도 6A 및 도 7A 참조)을 제공한다. 일 실시예에 따르면, 제어 유닛(143)은 상부 코일(145)과 하부 코일(147)의 전력 배분을 조절하기 위하여 상부 코일의 전원(149)과 하부 코일의 전원(151)을 제어하여, 상부 코일(145)과 하부 코일(147)에서 생성된 축 방향의 비대칭 자기장 강도가 용융물 레벨(111)의 위 또는 아래로 (예컨대, 용융물-고체 계면에서) 커스프 위치를 이동시킨다. 또한, 제어 유닛(143)은 상부 코일의 전원(149)과 하부 코일의 전원(151)을 제어하여 용융물-고체 계면에 상이한 비대칭 자기장 구성을 적용시킬 수 있어, 축 방향으로 우세한 비대칭 자기장 구성, 수평 방향으로 우세한 비대칭 자기장 구성 또는 대칭 자기장 구성(예컨대, 커스프 자기장 구성)이 임의의 결정 길이에서 실현될 수 있다. 따라서, 본 발명의 실시예는 3개의 종래의 자기장 구성으로부터의 결점은 회피하면서 이점을 결합하여 개선된 효율, 가요성 및 성능을 제공함과 동시에 원하는 용융물 흐름 제어와 용융물 흐름 균일성을 제공한다.
- [0055] 커스프 위치를 상하로 이동시키기 위하여, 또한 축 방향 또는 수평 방향 자기장의 우세한 정도(또는 크기)를 변화시키기 위하여, 제어 유닛(143)은 상부 코일의 전원(149)과 하부 코일의 전원(151)을 조절하여 상부 코일(145)과 하부 코일(147)의 전력 배분을 변화시킨다. 본 발명의 실시예에서, 상부 코일(145)과 하부 코일(147)은 동일한 전력 배분(예컨대, 둘다 동일한 퍼센트의 최대 전력 입력을 가짐)을 사용할 때, 커스프 위치가 용융물 표면(111)(예컨대, 용융물-고체 계면)에서 유지되도록 구성된다. 최대 전력 입력을 사용하면 전형적으로 단일의 코일(예컨대, 상부 코일(145) 또는 하부 코일(147))로도 코일의 사이즈에 따라 수백 내지 수천 가우스의 자기장을 생성시킬 수 있다.
- [0056] 본 발명의 실시예에 따르면, 제어 유닛(143)은 (예컨대, 상부 코일의 전원(149)과 하부 코일의 전원(151)을 통해) 상부 코일(145)과 하부 코일(147)에 대한 전력 배분의 차를 조절함으로써, 커스프 위치를 용융물 레벨(111)의 위 또는 아래로 가변 거리로 이동시키도록 구성된다. 또한, 제어 유닛(143)은 상이한 결정 성장 단계 및 상이한 결정 길이에서 가변 커스프 위치가 변화되도록 시간 또는 결정 길이의 함수로서 용융물 레벨(111)의 위

또는 아래로 가변 거리를 조절하도록 구성된다.

- [0057] 결정 인상 프로세스에서, 전류는 코일(145, 147)을 통과하여 미리 정해진 강도로 도가니(103)와 실리콘 용융물(109)에 자기장을 인가한다. 이 미리 정해진 강도는 결정(113)의 직경, 도가니(103)의 직경, 폴리실리콘 충전량 및 원하는 산소량에 따라 변화된다. 일반적으로, 본 발명은 예컨대, 약 400 가우스와 2000 가우스 사이와 같은 수천 가우스보다 작은 미리 정해진 강도의 최대치를 갖는 자기장을 포함한다. 결정(113)의 길이가 증가됨에 따라 (즉, 고화된 용융 충전량의 부분이 증가됨에 따라), 제어 유닛(143)은 코일을 통과하는 전류의 양을 감소시킴으로써(예컨대, 상부 코일의 전원(149)과 하부 코일의 전원(151)을 제어함으로써), 도가니(103)에 대하여 코일을 이동시킴으로써, 또는 자기 차폐를 이동시키거나 또는 제거함으로써 자기장의 강도를 감소시킨다.
- [0058] 제어 유닛(143)이 자기장의 강도를 감소시키므로, 도가니(103)의 저부와 측벽을 수직으로 교차하는 자기장 성분이 감소된다. 그러나, 자기장이 0인 수평면이 실리콘 용융물 표면(161)에 또는 그 근처에서 유지되기 때문에, 실리콘 용융물 표면(161)과 수직으로 교차하는 평균 자기장 성분과 용융물(109)의 용융된 실리콘과 접하는 도가니(103)의 저부 및 측벽과 수직으로 교차하는 평균 자기장 성분 사이의 비는 변하지 않을 수 있다.
- [0059] 단결정의 명목(nominal) 직경, 결정 길이, 도가니 직경, 충전량 사이즈 및 자기장 특성과 같은 파라미터에 따라, 제어 유닛(143)은 용융물(109)에 인가되는 자기장의 강도를 증가 또는 감소시키기 위하여 상부 코일의 전원(149)과 하부 코일의 전원(151)을 제어한다. 예컨대, 제어 유닛(143)은 결정(113)의 길이가 증가되고 고화된 용융 충전량의 단편이 증가됨에 따라 자기장의 강도를 그 초기 레벨보다 작은 어떤 값으로 조절하기 위하여 상부 코일의 전원(149)과 하부 코일의 전원(151)을 제어할 수 있다. 또한, 제어 유닛(143)은 용융된 충전량의 미리 정해진 부분을 결빙시킨 후에 자기장을 완전히 제거할 수 있다. 일 실시예에서, 제어 유닛(143)은 용융된 충전량의 약 50% 내지 80%가 결빙된 후에 자기장을 제거한다. 그 후, 제어 유닛(143)은 단결정 회전 속도에 비해 도가니 회전 속도를 증가시킴으로써 산소량을 조절할 수도 있다.
- [0060] 본 발명의 일 실시예에서, 자기장의 강도를 제어함으로써 용융물-고체 계면 형상을 HDR(높이 편차 비(height deviation ratio))의 어떤 범위 또는 퍼센트 내로 유지하는 것이 바람직하다. HDR은 다음의 식으로 정해진다.
- [0061]
$$HDR = [H_c - H_e] / \text{반경} \times 100$$
- [0062] 여기서, H_c 는 용융물 레벨(111)로부터의 결정 중심의 높이이고, H_e 는 용융물 레벨(111)로부터의 결정 에지의 높이이다. 예컨대, 본 발명의 일 실시예는 200 밀리미터(mm) 결정에 대한 용융물-고체 계면을 제어하여, 결정 중심과 결정 에지 사이의 HDR이 약 플러스 또는 마이너스 11%, 9%, 7% 또는 5%가 되도록 한다. 200 mm 이외의 직경을 갖는 결정에 대하여는, 최대 HDR이 결정 반경에 의해 약 -0.06의 구배만큼 점차 감소될 수 있다.
- [0063] 본 발명의 실시예는 상대적으로 낮은 산소 농도(예컨대, 산소의 농도가 PPMA(parts per million atoms)보다 작음)를 갖는 단결정에서의 산소 농도를 제어하기 위해 사용될 수 있다. 이들 단결정 잉곳은 반경 방향에서 5%보다 작고 축 방향에서 5% 내지 10%보다 작은 산소 구배를 가질 수 있다.
- [0064] 구체적인 실시예로서, 본 발명의 실시예는 200 mm 실리콘 웨이퍼 제조 프로세스의 성능을 향상시키기 위해 사용될 수 있다. 이 제조 프로세스는 전형적으로 다음의 방법에 의존한다. 첫째, 결정을 (v/G)_s의 임계값인 (v/G)_c에 가깝지만 이보다 약간 작은 (v/G)_s로 성장시켜, 결정은 격자간 실리콘 원자가 약간 더 풍부해진다. 그 후, 결정의 온도를 확산을 증진시킴으로써 베이컨시 및 격자간 실리콘 원자를 제거시키기 위해 결함의 핵성장 온도인 900°C 이상의 온도에서 유지시킨다. 결정 성장 후에, 결함의 핵성장 및 성장을 억제하기 위해 상부 챔버로 결정을 이동시킴으로써 결정을 급냉(quench)시킨다. 전형적으로, 양질의 실리콘이 높은 인상 속도로 실현되어 처리량이 많아질 수 있도록 용융물-고체 계면에서 축 방향 온도 구배가 큰 것이 바람직하다. 그러나, 핫존의 제한 때문에, 축 방향 온도 구배가 크면 용융물-고체 계면 및 그 근처에서 결정의 축 방향 온도 구배의 높은 반경 변화를 가져올 수 있다. 그 후, 축 방향 온도 구배의 큰 변화는 결정에서의 (v/G)_s의 균일함을 감소시킬 수 있다. 때때로, 축 방향 온도 구배를 증가시키기 위한 노력이 그 변화의 증가를 야기시켜, V와 I 결함의 공존을 가져온다.
- [0065] 본 발명의 실시예는 이 문제를 해결하기 위해 사용될 수 있다. 예컨대, 제어 유닛(143)은 하부 코일(147)보다 상부 코일(145)에 높은 전력 배분을 적용하여, 비대칭 자기장이 도 6A에 도시된 바와 같이 용융물 표면(161)에서의 수평 방향으로 우세한 비대칭 자기장을 생성하기 위하여 용융물 레벨(111)의 아래로 커스프 위치를 이동시킬 수 있다. 이 자기장 조건으로 용융물-고체 계면이 덜 모퉁하면서 더욱 결빙식 형상이 되고, 이 계면은 용융물-고체 계면 및 그 근처의 결정(113)에서 축 방향 온도 구배의 평평한 반경 변화와 높은 축 방향 온도 구배를

갖는다. 도 6B는 수평 방향으로 우세한 비대칭 자기장의 전력 배분을 나타내는 예시적인 그래프를 도시한다. 특히, 도 6B는 결정 길이의 변화의 함수로서 상부 코일(145)과 하부 코일(147) 모두에 대한 전력 입력의 퍼센트의 변화를 도시한다. 도 6C는 수평 방향으로 우세한 비대칭 자기장과 표준 커스프 자기장에 의해 생성되는 용융물-고체 계면 형상 사이의 차이를 나타내는 예시적인 그래프를 도시한다. 알 수 있는 바와 같이, 수평 방향으로 우세한 비대칭 자기장에 의해 생성되는 용융물-고체 계면 형상은 원하는 방향으로 조절되었다.

[0066] 보다 안정된 용융물 흐름을 실현하기 위하여, 네킹(necking), 크라운(crown) 및 몸체 하부로부터 엔드 콘(late-body to end-cone)까지의 성장과 같은 일부의 성장 단계에서, 제어 유닛(143)은 비대칭 자기장이 도 7A와 같이 용융물 레벨(111) 위로 커스프 위치를 이동시키도록, 상부 코일(145)보다 하부 코일(147)에 높은 전력 배분을 적용함으로써 용융물 표면(161)에서 축 방향으로 우세한 비대칭 자기장을 발생시킬 수 있다. 이 자기장 조건으로 결정(113)에서 형상의 용융물-고체 계면이 보다 불룩해지고 산소 농도가 낮아진다. 도 7B는 축 방향으로 우세한 비대칭 자기장의 전력 배분을 나타내는 예시적인 그래프를 도시한다. 특히, 도 7B는 결정 길이의 변화의 함수로서 상부 코일(145)과 하부 코일(147) 모두에 대한 전력 입력의 퍼센트의 변화를 도시한다. 도 7C는 축 방향으로 우세한 비대칭 자기장과 표준 커스프 자기장에 의해 발생하는 용융물-고체 계면 형상 사이의 차이를 나타내는 예시적인 그래프를 도시한다. 알 수 있는 바와 같이, 축 방향으로 우세한 비대칭 자기장에 의해 생성된 용융물-고체 계면 형상이 원하는 방향으로 조절되었다. 도 7D는 결정 길이의 함수로서 축 방향으로 우세한 자기장과 표준 커스프 자기장에 의해 생성되는 산소 농도(O_i) 사이의 차를 나타내는 예시적인 그래프를 도시한다. 도 7E는 결정 길이의 함수로서 수평 방향으로 우세한 자기장과 표준 커스프 자기장에 의해 발생하는 산소 농도(O_i) 사이의 차이를 나타내는 예시적인 그래프를 도시한다.

[0067] 표준 커스프 자기장(예컨대, 대칭 자기장)이 바람직한 결정 길이의 성장 단계에서, 제어 유닛(143)은 도 8에 도시된 바와 같이 용융물 레벨(111) 근처로 커스프 위치를 이동시키기 위하여 상부 코일(145)과 하부 코일(147) 간에 실질적으로 균일한 전력 배분을 적용함으로써 이런 대칭 구조를 구성할 수 있다. 도 9는 커스프 위치가 용융물 레벨(111)의 위 또는 아래(즉, 비대칭 자기장)에 있을 때, 및 커스프 위치가 용융물 레벨(111) 근처(즉, 대칭 자기장)에 있을 때, 결정 길이의 변화의 함수로서 산소의 반경 방향의 구배(ORG)의 변화를 나타내는 예시적인 그래프를 도시한다.

[0068] 앞에서 언급한 바와 같이, 다양한 결정 길이에 가변하는 자기장을 인가하면, 다양한 원하는 계면 형상을 발생시킬 수 있고, 그 결과 원하는 반경 방향과 축 방향 온도 구배를 발생시킬 수 있을 뿐만 아니라, v/G_s 가 원하는 본체 길이로 실현될 수 있다. 도 6A, 6B 및 6C는 용융물 표면(161)의 수평 방향으로 우세한 비대칭 자기장이 덜 오목하면서 더욱 곁윈식 형상인 용융물-고체 계면을 생성시킬 수 있다. 도 10A는 480mm의 결정 길이에서의 표준 계면과 더욱 곁윈식 형상인 계면 사이의 용융물-고체 계면 비교를 나타내는 예시적인 그래프를 도시한다. 도 10B는 표준 계면과 더욱 곁윈식 형상인 계면의 계면 구배 사이의 차이를 나타내는 예시적인 그래프를 도시한다. 특히, 도 10B는 계면의 축으로부터의 거리의 변화의 함수로서 표준 계면과 더욱 곁윈식 형상인 계면의 축 방향의 온도 구배의 변화를 도시한다. 도 10C는 표준 계면과 더욱 곁윈식 형상인 계면의 계면 v/G_s 사이의 차이를 나타내는 예시적인 그래프를 도시한다. 특히, 도 10C는 계면의 축으로부터의 거리의 변화의 함수로서 표준 계면과 더욱 곁윈식 형상인 계면의 용융물-고체 계면의 v/G_s 의 변화를 도시한다.

[0069] 도 11을 참조하면, 대표적인 플로우차트에 의해 초크랄스키 프로세스에 따라 단결정 잉곳을 성장시키는 결정 성장 장치와 결합하여 사용하기 위한 본 발명의 일 실시예에 따른 프로세스 흐름을 도시한다. 결정 성장 장치는 잉곳이 인상되는 반도체 용융물을 포함하는 가열된 도가니를 갖는다. 잉곳은 용융물로부터 인상된 시드 결정상에 성장된다. 용융물-결정 계면의 형상은 잉곳의 길이의 함수로서 형성된다. 단계(1002)에서, 외부 자기장이 잉곳의 인상 기간 동안 용융물과 잉곳 사이의 용융물-고체 계면의 근처에 인가된다. 예컨대, 외부 자기장은 용융물-고체 계면 위에 위치한 제1 자석(예컨대, 제1 솔레노이드)과 용융물-고체 계면 아래에 위치한 제2 자석(예컨대, 제2 솔레노이드)에 의해 인가될 수 있다.

[0070] 단계(1004)에서, 잉곳이 용융물로부터 인상되고 있는 동안, 외부 자기장이 용융물-고체 계면의 형상을 제어하기 위하여 선택적으로 조절된다. 예컨대, 수평 방향으로 우세한 비대칭 자기장 구성, 축 방향으로 우세한 비대칭 자기장 구성, 또는 대칭 자기장 구성이 용융물-고체 계면의 근처에 적용될 수 있다. 수평 방향으로 우세한 비대칭 자기장 구성이 적용되면, 본 발명의 실시예는 평평하고 더욱 오목한 계면을 갖는 잉곳에 비해 덜 오목하면서 더욱 곁윈식 형상인 계면 형상, 용융물-고체 계면에서의 높은 축 방향 온도, 및 용융물-고체 계면 및 그 근처에서 축 방향 온도 구배의 낮은 반경 방향의 변화를 실현한다. 축 방향으로 우세한 비대칭 자기장 구성이 적용되면, 본 발명의 실시예는 잉곳에 비해 더욱 불룩한 계면 형상, 실질적으로 안정된 용융물 흐름, 및 잉곳내의

낮은 레벨의 산소 농도를 실현한다.

- [0071] 외부 자기장을 선택적으로 조절하기 위하여, 제1 자석과 제2 자석의 전력 배분은 제1 자석과 제2 자석에서 생성되는 자기장 강도를 통해 용융물-고체 계면의 위 또는 아래로 (예컨대, 잉곳의 길이 및/또는 잉곳의 성장 단계의 함수로서의 가변하는 거리로) 커스프 위치를 이동시키기 위하여 조절된다. 따라서, 수평 방향으로 우세한 비대칭 자기장 구성을 실현하기 위하여 용융물-고체 계면의 아래로 커스프 위치를 이동시키도록 제2 자석보다는 제1 자석에 높은 전력 배분을 적용할 수 있다. 마찬가지로, 축 방향으로 우세한 비대칭 자기장 구성을 실현하기 위하여 용융물-고체 계면의 위로 커스프 위치를 이동시키도록 제1 자석보다는 제2 자석에 높은 전력 배분을 적용할 수 있다. 또한, 대칭 자기장 구성을 실현하기 위하여 용융물-고체 계면 근처로 커스프 위치를 이동시키도록 제1 자석과 제2 자석 사이에 실질적으로 균일한 전력 배분을 적용할 수 있다.
- [0072] 외부 자기장을 선택적으로 조절하기 위하여, 잉곳의 길이 및/또는 잉곳의 성장 단계(예컨대, 네킹, 크라운 또는 몸체 하부로부터 엔드 콘(late-body to end-cone)까지의 성장)에 따라 잉곳이 용융물로부터 인상되고 있는 동안 외부 자기장의 구성 및/또는 외부 자기장의 강도를 변화시킬 수 있다. 또한, 외부 자기장은 잉곳내의 산소의 반경 방향 구배의 레벨 및/또는 산소 농도의 레벨을 유지하도록 용융물-고체 계면의 형상을 제어하기 위하여 조절될 수 있다. 외부 자기장은 잉곳의 원하는 길이에서 용융물-고체 계면의 원하는 형상(예컨대, 잉곳에 비해 볼록한 계면 형상, 잉곳에 비해 오목한 계면 형상, 또는 결빙식 계면 형상)을 실현하도록 조절될 수 있다.
- [0073] 달리 특정되어 있지 않다면, 여기서 기술되고 설명된 방법의 실행 또는 실시 순서는 중요하지 않다. 즉, 달리 특정되어 있지 않다면, 본 방법의 요소들은 임의의 순서로 실행될 수도 있고, 여기서 기재된 것보다 다소의 요소들을 포함할 수도 있음이 발명자들에 의해 예상되었다.
- [0074] 본 발명 또는 그 실시예의 구성 요소를 도입할 때, "하나", "그" 및 "상기"란 단어는 하나 이상의 구성 요소가 있음을 의미하는 것이다. "포함하는", "구비하는" 및 "갖는"이란 용어는 나열된 구성 요소 이외에 추가적인 구성 요소가 있을 수도 있음을 내포하고 의미하는 것이다.

도면의 간단한 설명

- [0018] 도 1은 종래의 기술에 따른 결정 성장 장치에 대한 축 방향 자기장을 도시하는 블록도.
- [0019] 도 2는 종래의 기술에 따른 결정 성장 장치에 대한 수평 방향 자기장을 도시하는 블록도.
- [0020] 도 3은 종래의 기술에 따른 결정 성장 장치에 대한 커스프 자기장을 도시하는 블록도.
- [0021] 도 4는 결정 성장 장치를 제어하기 위한 본 발명의 실시예에 따른 장치 및 결정 성장 장치의 도면.
- [0022] 도 5A는 잉곳에 비하여 일반적으로 볼록한 형상을 갖는 예시적인 용융물-고체 계면의 도면.
- [0023] 도 5B는 잉곳에 비하여 일반적으로 오목한 형상을 갖는 예시적인 용융물-고체 계면의 도면.
- [0024] 도 5C는 일반적으로 결빙식(gull-wing) 형상을 갖는 예시적인 용융물-고체 계면의 도면.
- [0025] 도 6A는 본 발명의 일 실시예에 따른 수평 방향으로 우세한 비대칭 자기장을 도시하는 블록도.
- [0026] 도 6B는 본 발명의 일 실시예에 따른 수평 방향으로 우세한 비대칭 자기장에서의 전력 배분을 도시하는 예시적인 그래프.
- [0027] 도 6C는 종래의 커스프 자기장에 의해 생성된 용융물-고체 계면 형상과 비교하여 본 발명의 일 실시예에 따른 수평 방향으로 우세한 비대칭 자기장에 의해 생성되는 용융물-고체 계면을 도시하는 예시적인 그래프.
- [0028] 도 7A는 본 발명의 일 실시예에 따른 축 방향으로 우세한 비대칭 자기장을 도시하는 블록도.
- [0029] 도 7B는 본 발명의 일 실시예에 따른 축 방향으로 우세한 비대칭 자기장에서의 전력 배분을 도시하는 예시적인 그래프.
- [0030] 도 7C는 종래의 커스프 자기장에 의해 생성된 용융물-고체 계면 형상과 비교하여 본 발명의 일 실시예에 따른 축 방향으로 우세한 비대칭 자기장에 의해 생성되는 용융물-고체 계면을 도시하는 예시적인 그래프.
- [0031] 도 7D는 결정 길이의 함수로서 종래의 커스프 자기장에 의해 생성된 산소 농도와 비교하여 본 발명의 일 실시예에 따른 축 방향으로 우세한 자기장에 의해 생성되는 산소 농도를 도시하는 예시적인 그래프.
- [0032] 도 7E는 결정 길이의 함수로서 종래의 커스프 자기장에 의해 생성된 산소 농도와 비교하여 본 발명의 일 실시예

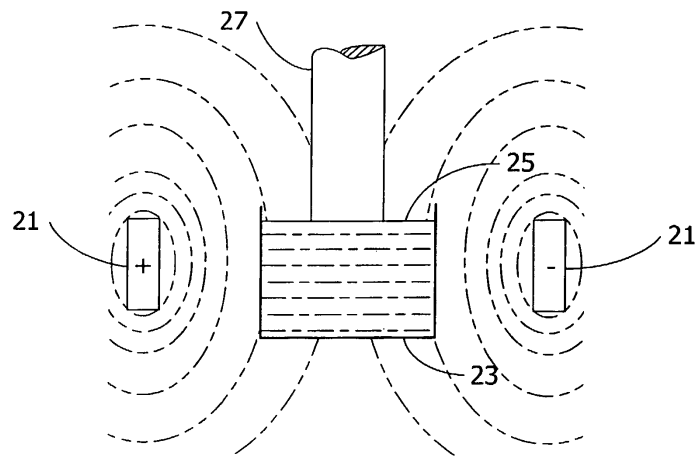
에 따른 수평 방향으로 우세한 자기장에 의해 생성되는 산소 농도를 도시하는 예시적인 그래프.

- [0033] 도 8은 본 발명의 일 실시예에 따른 대칭 자기장을 도시하는 블록도.
- [0034] 도 9는 본 발명의 일 실시예에 따라 커스프 위치가 용융물 표면의 위 또는 아래일 때 및 커스프 위치가 용융물 표면 근처일 때, 결정 길이의 변화의 함수로서 변화하는 산소의 반경 방향 구배를 도시하는 예시적인 그래프.
- [0035] 도 10A는 본 발명의 일 실시예에 따른 도가니 회전 변조와 표준 실리콘 성장 프로세스 간의 용융물-고체 계면 비교를 도시하는 예시적인 그래프.
- [0036] 도 10B는 종래의 실리콘 성장 프로세스의 계면 구배와 비교하여 본 발명의 일 실시예에 따른 도가니 회전 변조의 계면 구배를 도시하는 예시적인 그래프.
- [0037] 도 10C는 종래의 실리콘 성장 프로세스의 계면 v/G_s 와 비교하여 본 발명의 일 실시예에 따른 도가니 회전 변조의 계면 v/G_s 를 도시하는 예시적인 그래프.
- [0038] 도 11은 초크랄스키 프로세스에 따라 단결정 잉곳을 성장시키기 위한 결정 성장 장치와 조합하여 사용하기 위한 본 발명의 일 실시예에 따른 프로세스 흐름을 도시하는 예시적인 플로우차트.
- [0039] 대응하는 참조 부호는 도면 전체에서 대응하는 부분을 나타낸다.

도면

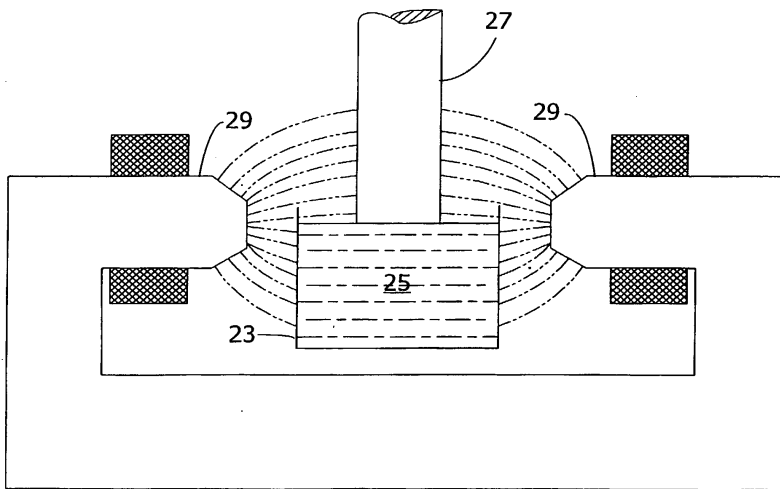
도면1

(종래의 기술)



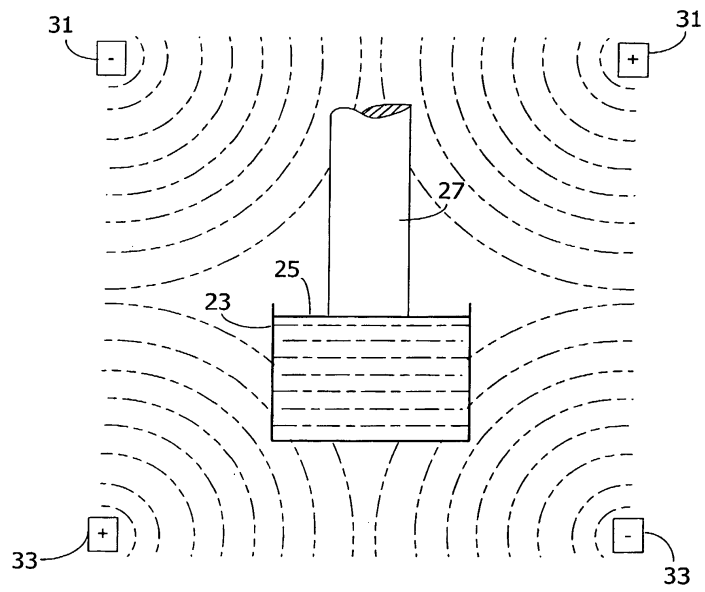
도면2

(종래의 기술)

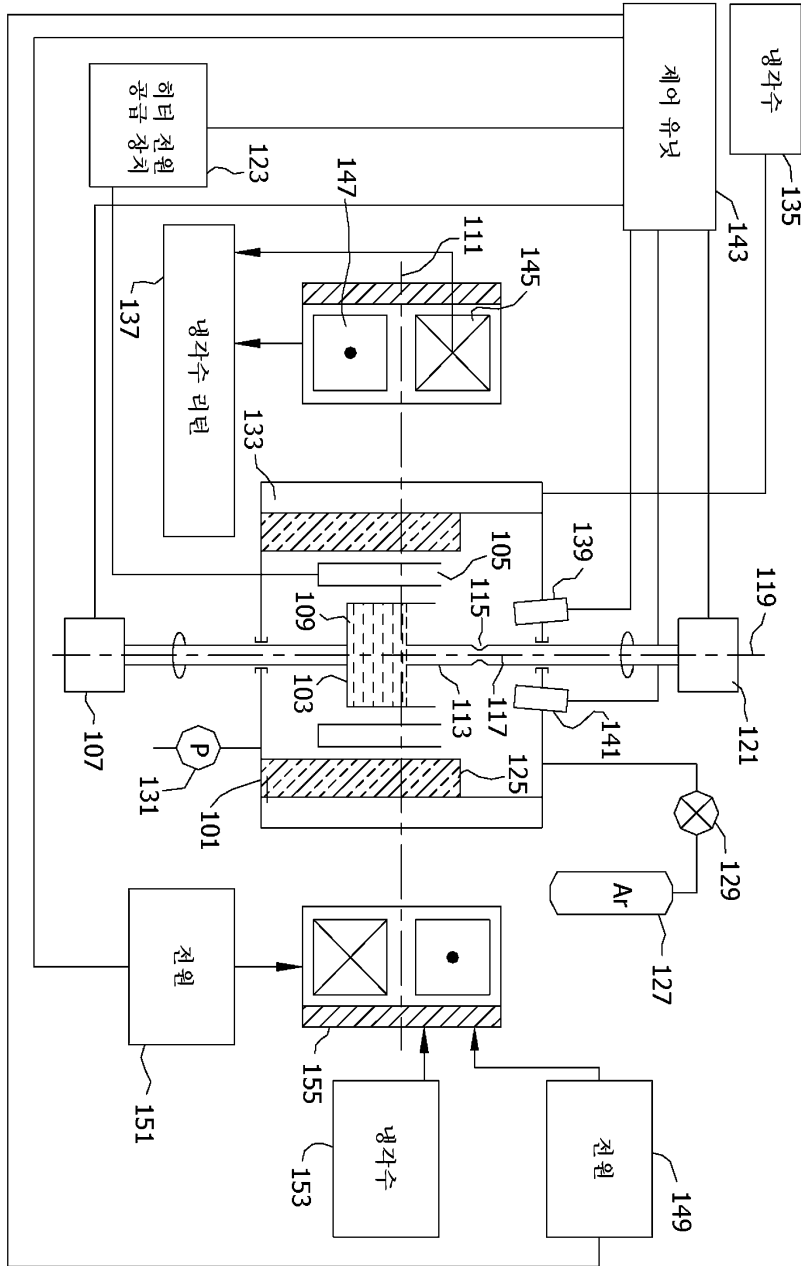


도면3

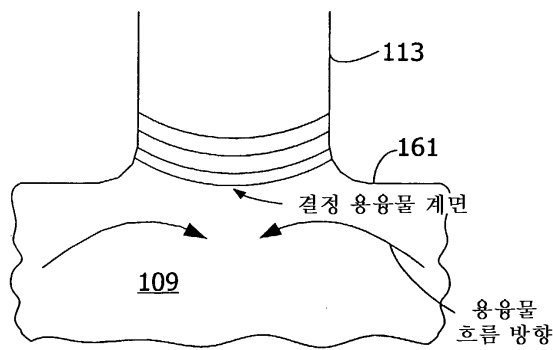
(종래의 기술)



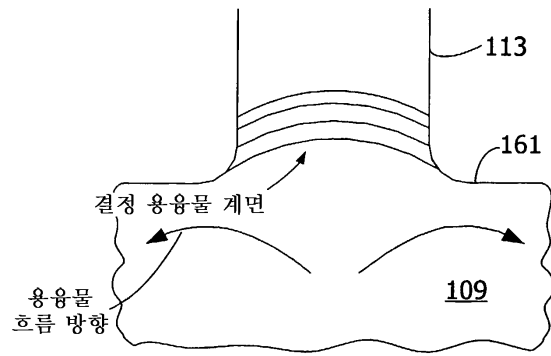
도면4



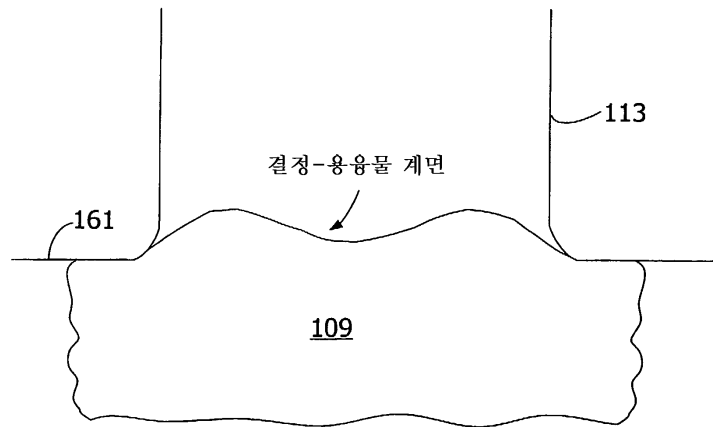
도면5A



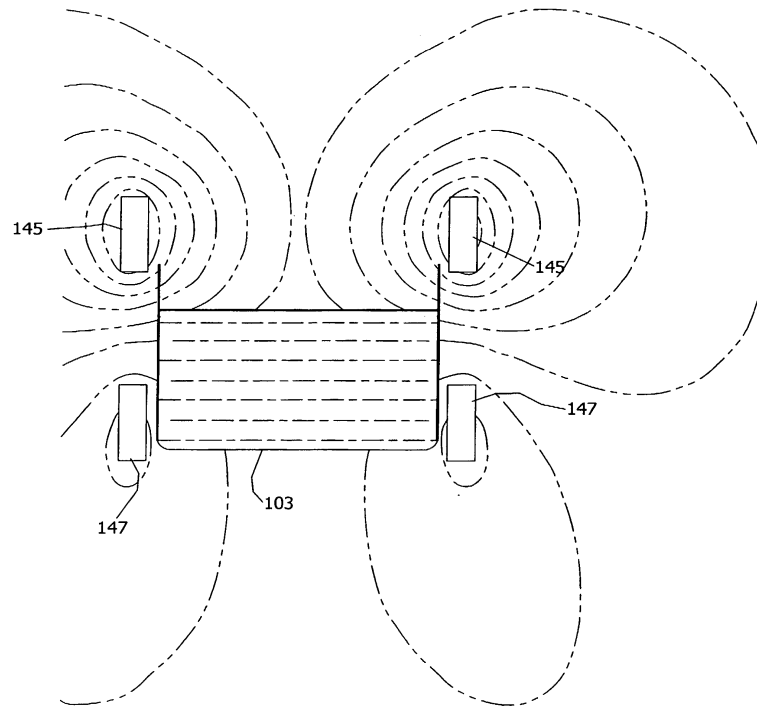
도면5B



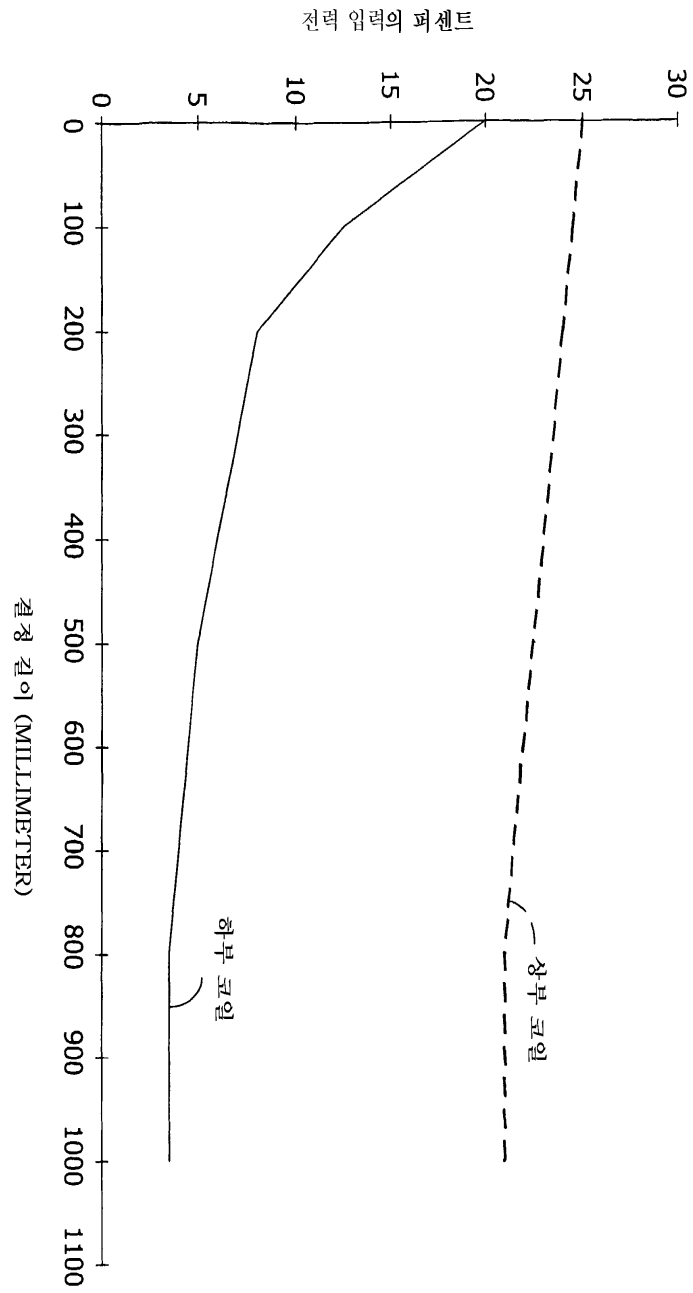
도면5C



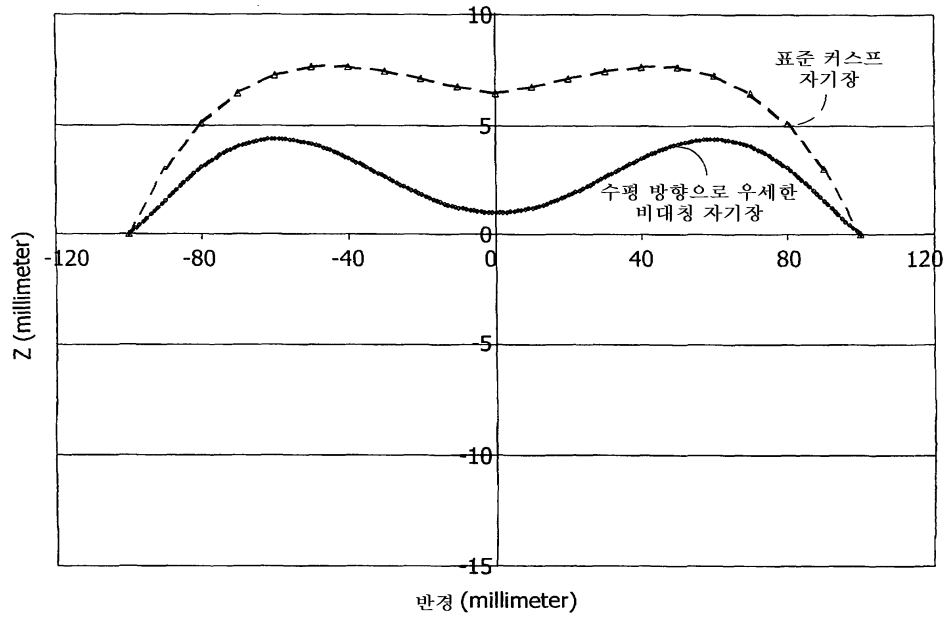
도면6A



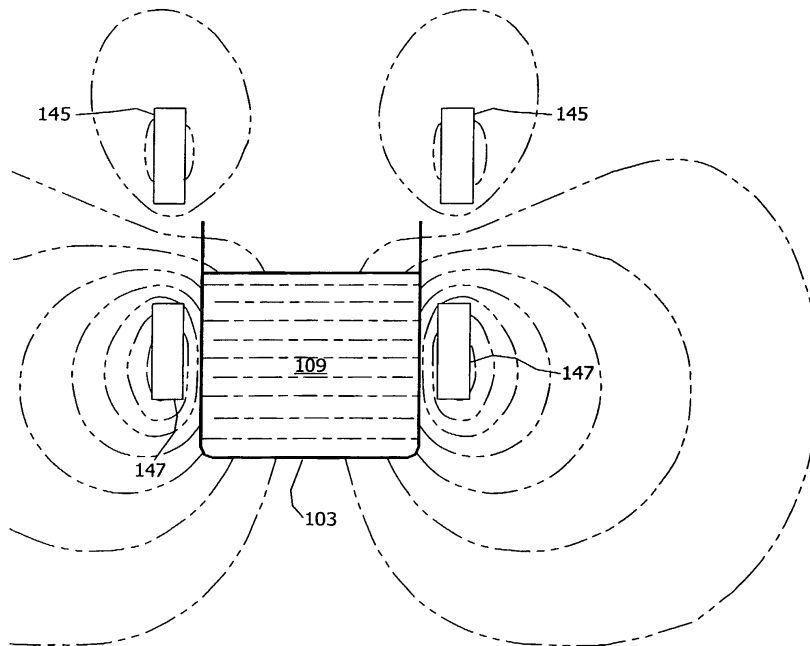
도면6B



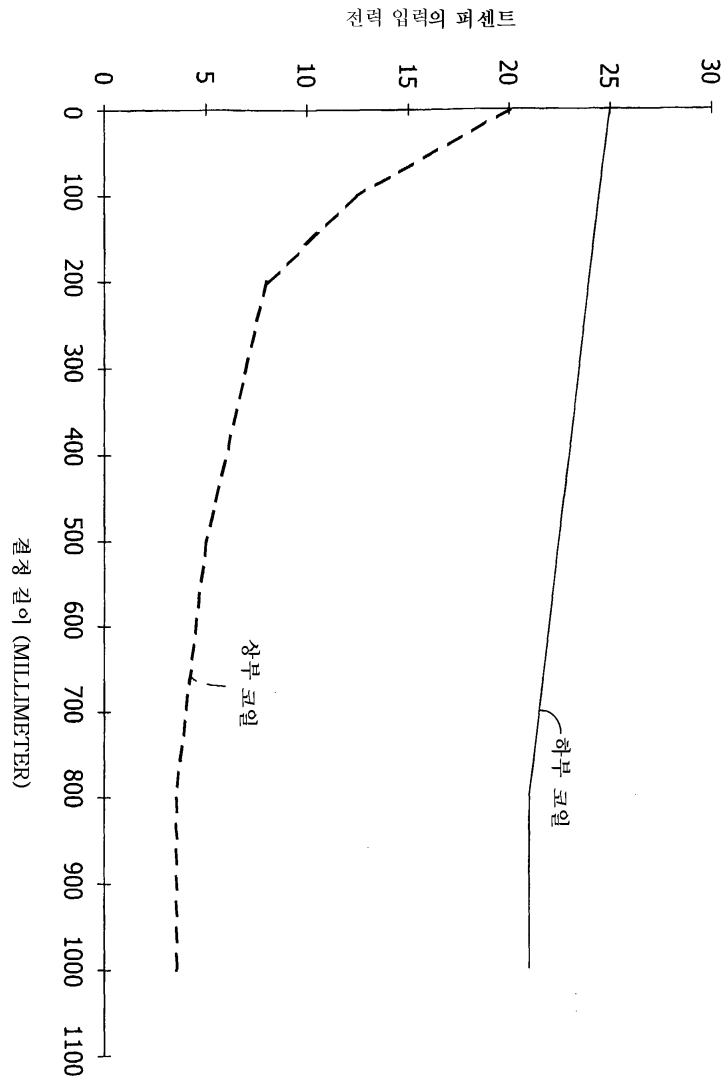
도면6C



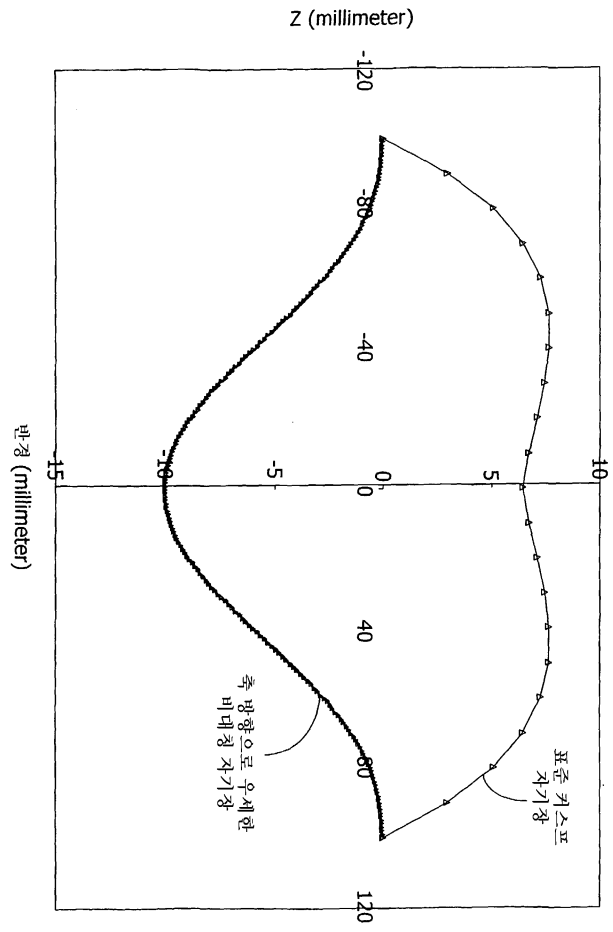
도면7A



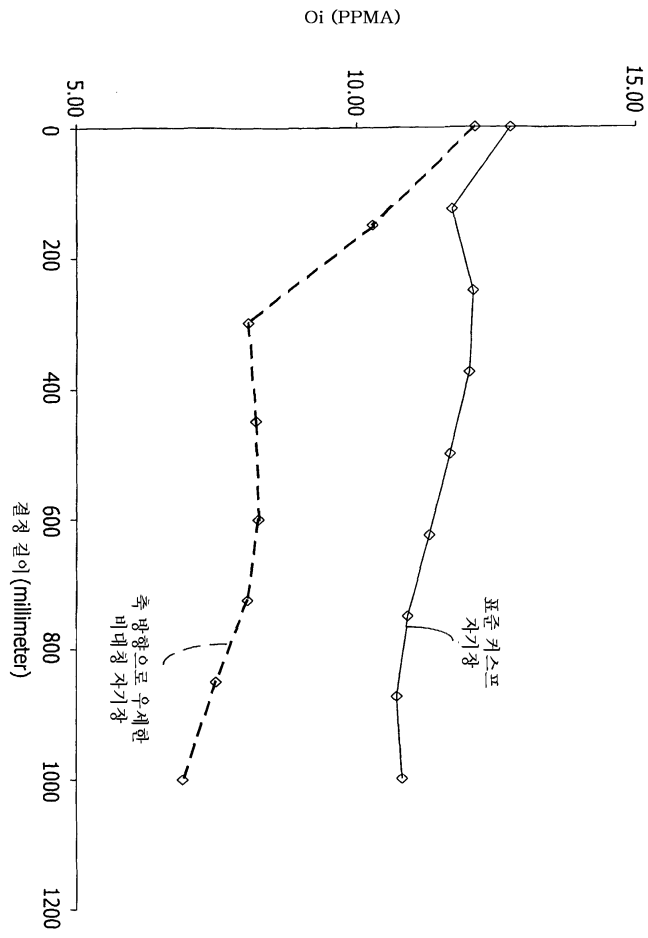
도면7B



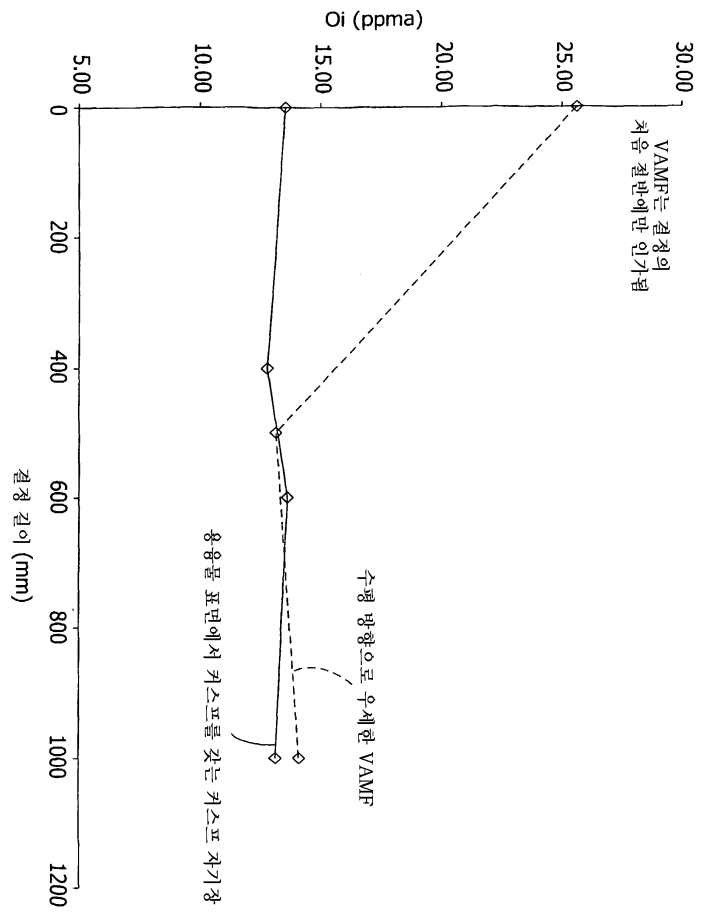
도면7C



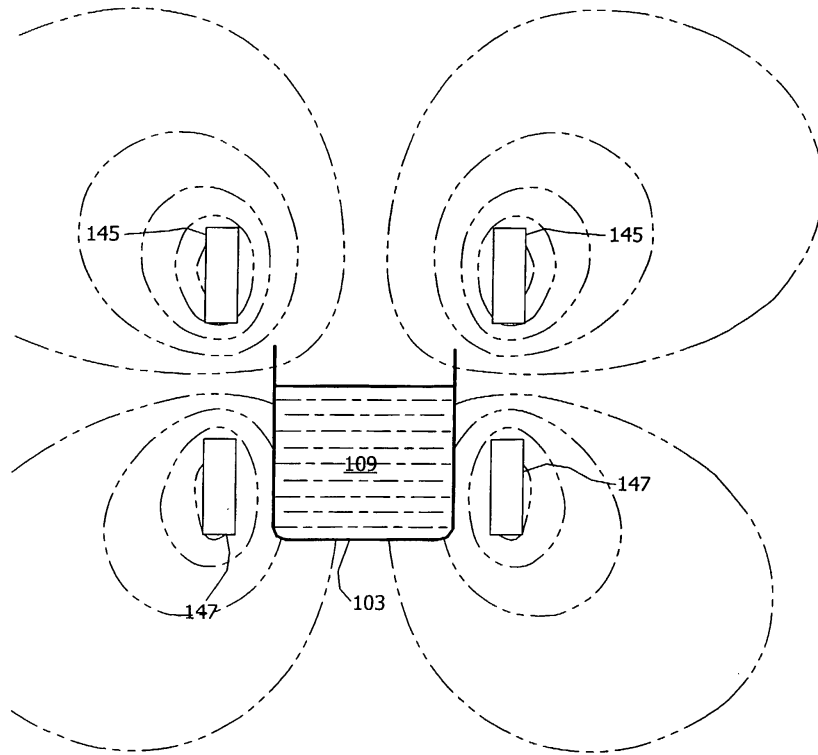
도면 7D



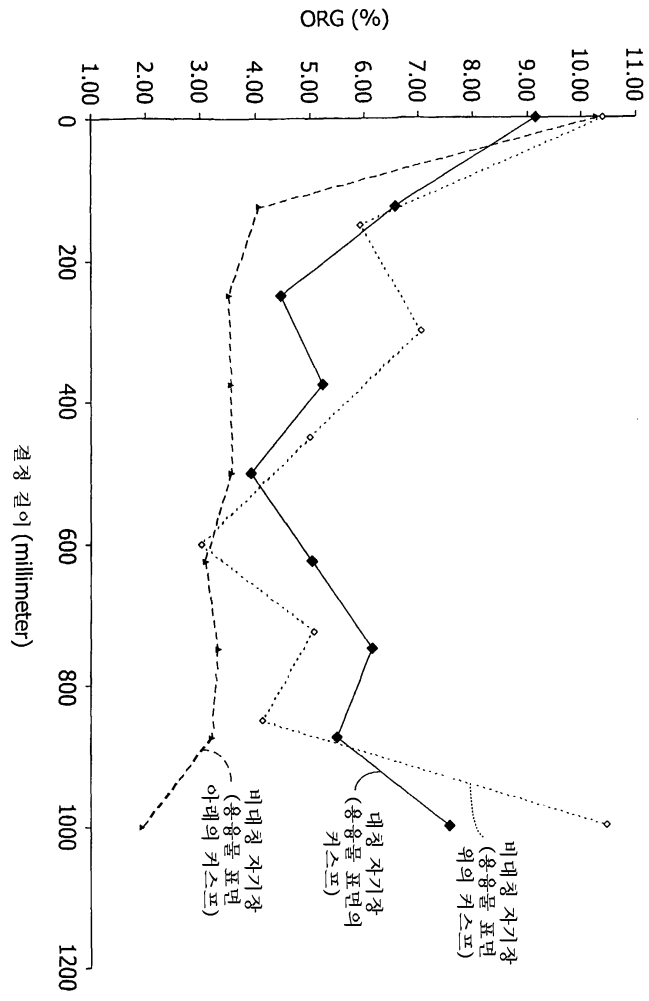
도면 7B



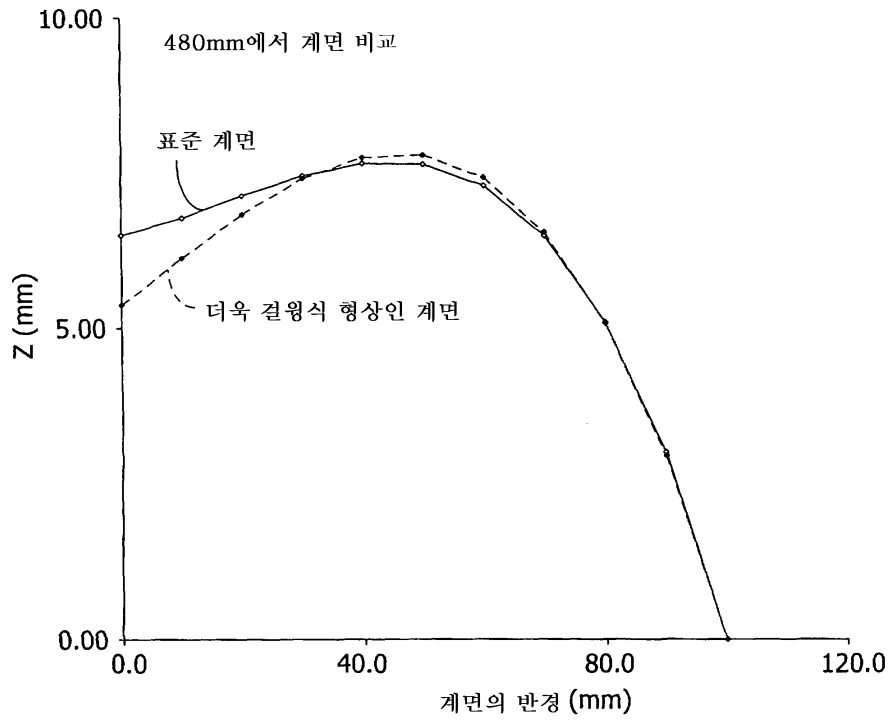
도면8



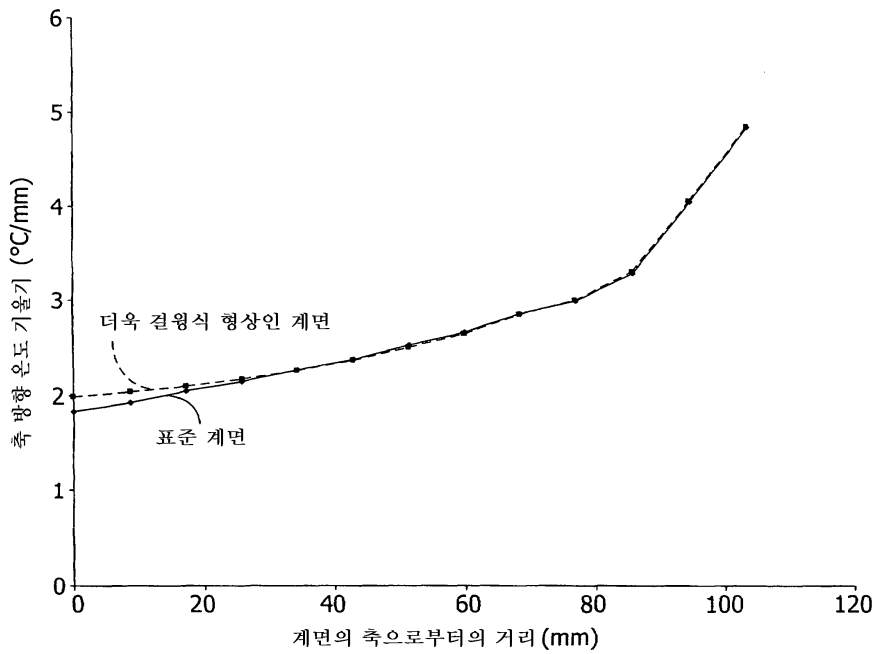
도면9



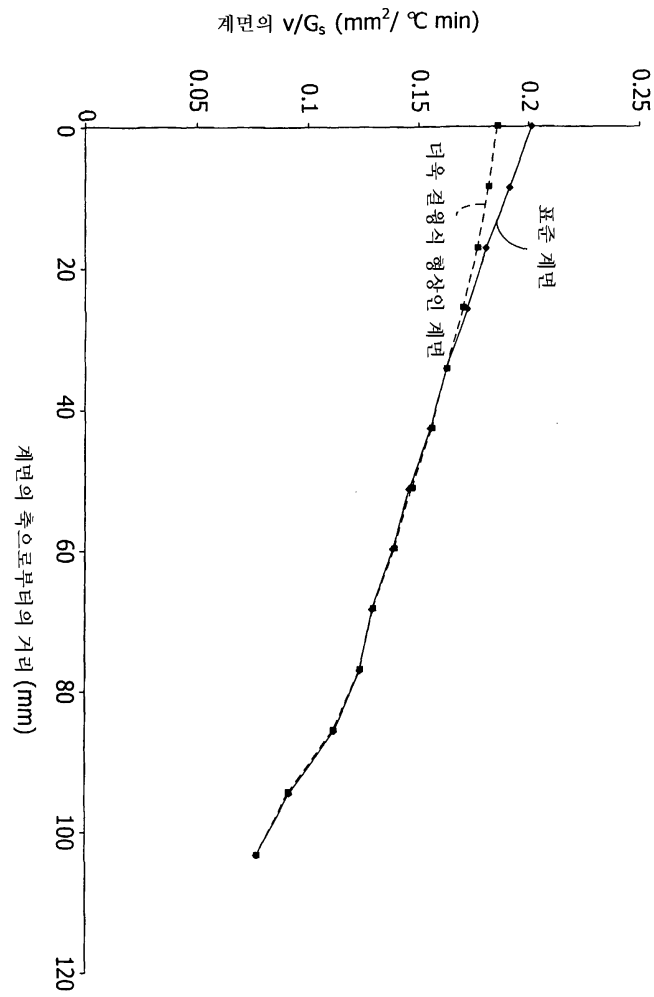
도면10A



도면10B



도면10C



도면11

