

명세서

발명의 명칭: 마이크로 웨이브를 이용한 단결정 성장장치 및 그 성장방법

기술분야

- [1] 본 발명은 단결정 성장장치 및 그 성장방법에 관한 것으로서, 보다 상세하게는 마이크로웨이브를 이용하여 단결정 성장장치 및 그 성장방법에 관한 것이다.

배경기술

- [2] 최근 전기 전자 기술의 발달과 더불어 디스플레이 분야에서 광학적 물리적 성질이 우수한 세라믹 단결정의 수요가 증가하고 있다.
- [3] 특히, 사파이어는 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 의 단결정으로서 기계적 성질, 내식성, 내열성이 우수하고 광범위한 투광성을 가지고 있을 뿐 아니라, 경도, 열전도도, 전기 저항성이 높고 내충격성이 크며 유전강도가 강하기 때문에, 이피텍셀 성장용 기관, 질화 갈륨(GaN)의 대리기관으로서 청색, 녹색 발광 다이오드(LED), 청색 레이저 다이오드(LD), DVD의 데이터 저장장치 등의 기초 소자로서 사용되며, 미사일 Dome, 바이오 세라믹, 시계유리 등 매우 다양한 용도로 널리 사용되고 있다.
- [4] 그러나 사파이어는 룬보헤드랄(rhombohedral) 구조를 갖는 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 의 격자 이방성으로 인하여 결정 성장시, 크랙 및 기공 발생 등의 어려움이 있어 이런 내부결함이 없는 대구경의 고품질 사파이어를 만들기 위해 다양한 결정 성장 방법이 연구되고 있다.
- [5] 현재까지 사파이어 단결정을 얻을 수 있는 제조 방법으로는, 베르누이법, Czochralski법, Bridgman법, EFG법, Kyropolos법, HEM법(Heat Exchange Method)을 예로 들 수 있다.
- [6] 베르누이법은 알루미늄 분말을 자유 낙하시키는 동안에 산소-수소의 토치 화염으로 용융시켜 시드(seed) 결정 위로 떨어뜨림과 동시에 회전 하강시키면서 결정화 시키는 방법이다. 이 방법은 단결정 내부에 불순물, 기공, 결정왜곡, 잔류응력 등이 많아 시계유리용과 다른 사파이어 단결정 제조장치의 원료로 사용되는 이외의 용도로는 사용이 어려운 문제점이 있다.
- [7] Czochralski 법은 시드 결정을 알루미늄 용액의 표면에 접촉시켜 회전 인상시키면서 단결정을 제조하는 방법으로, 현재 대리 기관의 약 80% 정도가 이 방법에 의해 제조되고 있으나, 사파이어 단결정과 같이 취성이 큰 재료의 결정 성장에서는 높은 온도 구배와 풀러(puller)에 의해 생기는 진동이나 네크부의 응력 집중 및 용탕 내의 요동 등에 의해서 결정 결함 발생 가능성이 증가되고, 균열이 발생되기 쉽다는 문제점을 갖고 있다.
- [8] EFG법은 Czochralski법의 단점을 해결하고자 원하는 형상으로 이루어진 폴리브덴 다이를 알루미늄 용액에 침적시켜 표면장력에 의해 성장시키는

방법이나, 결합 밀도가 높고, 생산성이 좋지 않다는 문제점을 내포하고 있다.

- [9] 열교환법인 HEM(Heat exchange method)은 온도가 균일한 고온부의 하단 부분에 열교환기를 설치하여 온도를 정밀하게 조절함으로써 단결정을 성장시키는 방법으로, 고화를 위해 결정자체를 움직일 필요가 없기 때문에 대구경의 품질이 우수한 단결정을 성장시킬 수 있는 방법이다. 그러나 이러한 방법은 우수한 특성에도 불구하고 단결정이 대구경으로 갈수록 열 대류가 심해지고 안정된 온도 구배의 실현이 힘들어 기공과 격자 결함이 많이 나타나는 문제점을 내포하고 있다.

발명의 상세한 설명

기술적 과제

- [10] 본 발명의 예시적인 실시예들은 세라믹 단결정을 성장시킬 수 있으며, 마이크로웨이브를 이용하여 히터와 세라믹 단결정 원료의 자체 발열에 의해 온도를 상승 및 유지시킴으로써 도가니 내 온도 편차가 작고, 온도 구배 및 온도 조절이 용이한 단결정 성장장치 및 그 성장방법을 제공한다.

과제 해결 수단

- [11] 본 발명의 예시적인 실시예에 따른 단결정 성장장치는, 내부에 단열 펠트를 구성하는 성장로; 상기 단열 펠트의 내부에 설치되며, 시드 결정이 위치하고 단결정 원료를 수용하는 도가니; 상기 도가니의 외측에 구성되며, 상기 도가니로 열을 제공하는 메인 히팅유닛; 상기 성장로에 장착되며, 상기 히팅유닛과 상기 도가니 내 상기 단결정 원료를 마이크로웨이브로서 가열하는 보조 히팅유닛; 상기 도가니의 하측에 구성되며, 상기 도가니와 열교환이 이루어지는 열교환부; 및 상기 성장로의 외벽에 설치되는 냉각 챔버를 구비하며, 상기 냉각 챔버로 냉매를 공급하는 쿨링유닛;을 포함한다.
- [12] 또한, 상기 단결정 성장장치에 있어서, 상기 보조 히팅유닛은 상기 성장로의 내부에서 마이크로 웨이브를 발생시키는 마그네트론(magnetron)을 포함할 수 있다.
- [13] 또한, 상기 단결정 성장장치에 있어서, 상기 메인 히팅유닛 및 상기 도가니 내의 단결정 원료는 상기 마이크로 웨이브에 의해 자체 발열할 수 있다.
- [14] 또한, 상기 단결정 성장장치에 있어서, 상기 단결정 원료는 알루미늄(Al_2O_3), 질화알루미늄(AlN), 실리콘(Si) 및 질화갈륨(GaN) 중에서 선택된 어느 하나일 수 있다.
- [15] 또한, 상기 단결정 성장장치에 있어서, 상기 메인 히팅유닛은 상기 도가니의 외측에 순차적으로 설치되는 단수 또는 복수개의 히터를 포함할 수 있다.
- [16] 또한, 상기 단결정 성장장치에 있어서, 상기 히터는 상단의 두께가 하단의 두께보다 크거나 같은 것을 특징으로 한다.
- [17] 또한, 상기 단결정 성장장치에 있어서, 상기 메인 히팅유닛은 상기 도가니의 외측에 순차적으로 설치되는 제1 히터, 제2 히터, 및 제3 히터 중에서 선택된 1종

- 이상을 포함할 수 있다.
- [18] 또한, 상기 단결정 성장장치에 있어서, 상기 제1 내지 제3 히터는 그래파이트(Graphite), 실리콘카바이드(SiC), 파이로리틱보론나이트라이드(pyrolytic boron nitride, PBN), 몰리브덴(Mo), 텅스텐(W) 및 지르코늄디옥사이드(ZrO_2)로 이루어진 군에서 선택된 1종 이상을 포함할 수 있다.
- [19] 또한, 상기 단결정 성장장치에 있어서, 상기 도가니는 그래파이트(Graphite), 실리콘카바이드(SiC), 파이로리틱보론나이트라이드(pyrolytic boron nitride, PBN), 몰리브덴(Mo), 텅스텐(W) 및 지르코늄디옥사이드(ZrO_2)로 이루어진 군에서 선택된 1종 이상을 포함할 수 있다.
- [20] 또한, 상기 단결정 성장장치에 있어서, 상기 성장로는 진공 분위기, 비활성가스 분위기로 이루어진 군에서 선택된 어느 하나의 분위기에서 단결정이 성장할 수 있다.
- [21] 본 발명의 다른 예시적인 실시예에 따른 단결정 성장 방법은 히터의 내측에 구성되는 도가니의 바닥에 시드 결정을 위치시키는 단계(a); 상기 시드 결정 위에 단결정의 원료를 충전하는 단계(b); 마이크로 웨이브를 이용함으로써 상기 히터 및 상기 단결정의 원료를 가열하여 균일한 용융상태 원료를 형성시키는 단계(c); 단계(c)와 병행하여 상기 시드 결정이 용융되지 않도록 상기 도가니의 하측에 구비된 열교환부를 이용하여 상기 시드결정을 냉각시키는 단계(d); 상기 균일한 용융상태 원료를 상기 시드 결정 위에서부터 단결정으로 성장시키는 단계(e); 및 단계(e)와 병행하여 상기 균일한 용융상태 원료와 상기 성장시키는 단결정 사이의 온도구배(temperature gradient)를 조절하여 상기 균일한 용융상태 원료를 단결정으로 성장시키는 단계(f);를 포함할 수 있다.
- [22] 또한 상기 단결정 성장방법에 있어서, 상기 히터 및 상기 단결정 원료는 상기 마이크로 웨이브를 조사함에 의해 자체 발열할 수 있다.
- [23] 또한 상기 단결정 성장방법에 있어서, 상기 히터는 상기 도가니의 외측에 순차적으로 설치되는 제1 히터, 제2 히터 및 제3 히터로 이루어진 군에서 선택된 1종 이상을 포함할 수 있다.
- [24] 또한 상기 단결정 성장방법에 있어서, 상기 제1 히터, 제2 히터 또는 제3 히터는 그래파이트(Graphite), 실리콘카바이드(SiC), 파이로리틱보론나이트라이드(pyrolytic boron nitride, PBN), 몰리브덴(Mo), 텅스텐(W) 및 지르코늄디옥사이드(ZrO_2)로 이루어진 군에서 선택된 1종 이상을 포함할 수 있다.
- [25] 또한 상기 단결정 성장방법에 있어서, 상기 도가니는 그래파이트(Graphite), 실리콘카바이드(SiC), 파이로리틱보론나이트라이드(pyrolytic boron nitride, PBN), 몰리브덴(Mo), 텅스텐(W) 및 지르코늄디옥사이드(ZrO_2)로 이루어진 군에서 선택된 1종 이상을 포함할 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [26] 이 도면들은 본 발명의 예시적인 실시예를 설명하는데 참조하기 위함이므로, 본 발명의 기술적 사상을 첨부한 도면에 한정해서 해석하여서는 아니 된다.
- [27] 도 1은 본 발명의 예시적인 실시예에 따른 단결정 성장장치를 개략적으로 도시한 구성도이다.
- [28] 도 2는 본 발명의 예시적인 실시예에 의해 제조된 사파이어 단결정을 나타낸 도면이다.
- [29] 도 3은 본 발명의 예시적인 실시예에 의해 제조된 사파이어 단결정으로 제조한 웨이퍼의 단면을 나타낸 도면이다.
- [30] 도 4는 도 3의 웨이퍼의 단면 중에서 1 부분의 X선 회절사진을 나타낸 도면이다.
- [31] 도 5는 도 3의 웨이퍼의 단면 중에서 2 부분의 X선 회절사진을 나타낸 도면이다.
- [32] 도 6은 도 3의 웨이퍼의 단면 중에서 3 부분의 X선 회절사진을 나타낸 도면이다.
- [33] 도 7은 도 3의 웨이퍼의 단면 중에서 4 부분의 X선 회절사진을 나타낸 도면이다.
- [34] 도 8은 본 발명의 예시적인 실시예에 의해 제조된 단결정의 결정성장방위를 측정하기 위한 X선 회절사진을 나타낸 도면이다.

발명의 실시를 위한 최선의 형태

- [35] 이하, 첨부한 도면을 참고로 하여 본 발명의 실시예에 대하여 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자가 용이하게 실시할 수 있도록 상세히 설명한다. 그러나 본 발명은 여러 가지 상이한 형태로 구현될 수 있으며 여기에서 설명하는 실시예에 한정되지 않는다.
- [36] 본 발명을 명확하게 설명하기 위해서 설명과 관계없는 부분은 생략하였으며, 명세서 전체를 통하여 동일 또는 유사한 구성요소에 대해서는 동일한 참조 부호를 붙이도록 한다.
- [37] 또한, 도면에서 나타난 각 구성의 크기 및 두께는 설명의 편의를 위해 임의로 나타내었으므로, 본 발명이 반드시 도시된 바에 한정되지 않는다.
- [38] 도면에서 여러 층 및 영역을 명확하게 표현하기 위하여 두께를 확대하여 나타내었다. 그리고 도면에서, 설명의 편의를 위해, 일부 층 및 영역의 두께를 과장되게 나타내었다. 층, 막, 영역, 판 등의 부분이 다른 부분 “위에” 또는 “상에” 있다고 할 때, 이는 다른 부분 “바로 위에” 있는 경우뿐 아니라 그 중간에 또 다른 부분이 있는 경우도 포함한다.
- [39] 도 1은 본 발명의 예시적인 실시예에 따른 단결정 성장장치를 개략적으로 도시한 구성도이다.
- [40] 도 1을 참조하면, 본 발명의 예시적인 실시예에 따른 단결정 성장장치(100)는

세라믹의 단결정을 성장시키기 위한 것으로, 보다 바람직하게는 광학적 물리적 특성이 우수하여 디스플레이 분야에 적용되고 있는 알루미늄(Al_2O_3) 단결정인 사파이어 단결정을 성장시키기 위한 것이다.

- [41] 여기서, 본 실시예에 의한 상기 단결정 성장장치(100)는 온도가 균일한 고온부의 하단 부분에 열교환 수단을 구성하여 온도를 정밀하게 조절함으로써 세라믹 단결정을 성장시키는 열교환법(Heat Exchange Method)이 적용될 수 있다.
- [42] 이 경우, 상기 열교환법은 단결정이 제조되는 동안 온도 구배가 안정된 상태에서 성장이 일어나며, 고화시키기 위해 결정 자체를 움직일 필요가 없기 때문에 직경과 품질이 우수한 단결정을 성장시킬 수 있는 방법이다.
- [43] 본 발명의 예시적인 실시예에 따른 상기 단결정 성장장치(100)는 기본적으로, 성장로(10)와, 도가니(20)와, 메인 히팅유닛(30)과, 보조 히팅유닛(60)과, 열교환부(70)와, 쿨링유닛(80)을 포함하여 구성되며, 이를 구성 별로 설명하면 다음과 같다.
- [44] 본 실시예에서, 상기 성장로(10)는 내부에 진공 분위기, 비활성 기체 분위기 또는 대기 분위기를 조성할 수 있는 챔버 유닛으로서, 하기의 각종 구성 요소들을 실질적으로 지지하는 기능을 하게 된다.
- [45] 상기에서와 같은 성장로(10)는 하나의 설비 또는 분획된 설비로 이루어질 수 있으며, 각종 브라켓, 블록, 플레이트, 커버, 칼라 등과 같은 부속 요소들을 구비하고 있다.
- [46] 이들 부속 요소는 본 장치(100)를 구성하는 요소들을 성장로(10)에 설치하기 위한 것이므로, 본 명세서에서는 예외적인 경우를 제외하고 이들 부속 요소들을 성장로로 통칭하는 것을 원칙으로 한다.
- [47] 또한, 상기 성장로(10)에는 본 장치(100)를 구동하기 위한 각종 모터 구동유닛, 펌프유닛, 고압 에어 유닛, 진공 조성 유닛, 및 전자 제어 유닛 등을 포함하고 있다.
- [48] 한편, 상기에서와 같은 성장로(10)의 내부에는 뒤에서 더욱 설명될 메인 히팅유닛(30)으로부터 방사되는 열이 외부로 방출되는 것을 방지하기 위한 단열수단이 구성될 수 있다.
- [49] 이러한 단열수단은 성장로(10)의 내부에서 상부, 중앙 및 하부에 고정 설치되는 단열 펠트(11)를 포함한다.
- [50] 상기 단열 펠트(11)는 고온에서도 사용이 가능하고 단열 효과가 우수한 BN(boron nitride), PBN(pyrolytic boron nitride), 지르코늄디옥사이드(ZrO_2), Al_2O_3 (알루미나)로서 이루어질 수 있다.
- [51] 여기서, 상기 단열 펠트(11)와 성장로(10)의 내벽 사이에는 보다 효과적인 단열 작용을 수행할 수 있도록 텅스텐 링 또는 Mo링(도면에 도시되지 않음)이 설치될 수도 있다.
- [52] 다른 한편으로, 상기 성장로(10)는 위에서 언급한 바 있는 진공 조성 유닛(도면에 도시되지 않음)을 통하여 진공 분위기를 조성할 수 있다.

- [53] 상기 진공 조성 유닛은 로터리 펌프와 같은 진공 펌프를 사용하며, 성장로(10) 하측에 위치하는 진공 형성 구멍인 가스 입구(13)를 통하여 성장로(10)의 내부를 대략 10-3Torr까지 진공 형성시킬 수 있다.
- [54] 또한, 상기 성장로(10)는 가스 주입 밸브(도면에 도시되지 않음)를 통하여 내부에 Ar, N₂와 같은 비활성가스 분위기를 조성할 수도 있다.
- [55] 본 실시예에서, 상기 도가니(20)는 단결정 원료(1)(이하에서는 편의 상 “원료”라고 한다), 보다 바람직하게는 사파이어 단결정 원료를 수용하며, 뒤에서 더욱 설명될 메인 히팅유닛(30) 및 보조 히팅유닛(60)을 통하여 원료를 용융시키기 위한 것이다.
- [56] 한편 상기 단결정 원료는 알루미늄(Al₂O₃), 질화알루미늄(AlN), 실리콘(Si) 및 질화갈륨(GaN) 중에서 선택된 어느 하나일 수 있다.
- [57] 상기 도가니(20)는 0.6t 정도의 두께로서 이루어지고, 내부의 하단(저면부)에 시드 결정(도면에 도시되지 않음)이 위치하며, 단열 펠트(11)의 내부에 구성될 수 있다.
- [58] 본 발명의 단결정 성장장치를 이용하여 다양한 세라믹 단결정의 제조가 가능하며, 이하 사파이어 단결정을 성장시키는 예를 중심으로 설명하기로 한다.
- [59] 상기한 도가니(20)는 세라믹 원료의 용점 이상(예를 들어 사파이어의 경우 용점 2050°C 이상)의 고온에서 사용 가능하고, 이 고온에서 세라믹과 반응하지 않으며, 성형이나 가공이 용이하고, 세라믹 단결정 성장 후에 단결정의 분리가 용이하며, 고온에서 용액을 지지할 수 있을 정도의 충분한 기계적 강도를 가지며 경제적인 재료로서 제작될 수 있다.
- [60] 이를 만족하기 위해 상기 도가니(20)는 그래파이트(Graphite), 실리콘카바이드(SiC), 파이로리틱보론나이트라이드(pyrolytic boron nitride, PBN), 몰리브덴(Mo), 텅스텐(W) 및 지르코늄디옥사이드(ZrO₂)로 이루어진 군에서 선택된 1종 이상을 포함하여 이루어질 수 있다.
- [61] 본 실시예에서, 상기 메인 히팅유닛(30)은 원료를 용융시킬 수 있도록 도가니(20)에 대하여 일정 온도의 열을 제공하기 위한 것으로서, 그 도가니(20)의 외측에 구성될 수 있다.
- [62] 상기 메인 히팅유닛(30)은 도가니(20)의 외측에 순차적으로 설치되는 단수 또는 복수의 히터를 포함하여 이루어질 수 있고, 보다 바람직하게는 제1 히터(41), 제2 히터(42), 및 제3 히터(43) 중에서 1종 이상을 포함하여 이루어질 수 있다. 여기서 제1 히터(41), 제2 히터(42), 및 제3 히터(43)는 각각 독립적으로 단수 또는 복수의 제1 히터, 단수 또는 복수의 제2 히터, 및 단수 또는 복수의 제3 히터를 구비할 수 있다. 여기서 상기 히터(41, 42, 43)는 상단의 두께가 하단의 두께보다 크거나 같을 수 있다.
- [63] 상기 제1 내지 제3 히터(41, 42, 43)는 마이크로 웨이브의 조사에 의해 자체발열하여 가열될 수 있는 발열체로서 이루어진다.
- [64] 이러한 제1 내지 제3 히터(41, 42, 43)는 이의 측면이 도가니(20)의 측면과 닮은

- 풀로 이루어지며, 원기둥, 삼각기둥, 사각기둥, 오각기둥, 육각기둥, 칠각기둥, 팔각기둥, 삼각뿔대, 사각뿔대, 오각뿔대, 육각뿔대, 칠각뿔대 및 팔각뿔대 중에서 선택되는 어느 하나 또는 그 이외의 다양한 형상으로 이루어질 수 있다.
- [65] 여기서, 상기 제1 히터(41)는 다공질로서 형성되어 급격한 열 충격의 완충작용과, 도가니(20) 내의 온도 보존을 위해 설치된다.
- [66] 상기 제2 히터(42)는 고밀도 재질로서 형성되어 열을 도가니(20)로 충분히 공급할 수 있다.
- [67] 그리고, 상기 제3 히터(43)는 표면이 연마된 고밀도 재질로서 형성되어 복사열을 차단 및 분산시킴으로써 열 분포를 일정하게 유지시키는 기능을 하게 된다.
- [68] 이 경우, 상기 제1 내지 제3 히터(41, 42, 43)는 그래파이트(Graphite), 실리콘카바이드(SiC), 파이로리틱보론나이트라이드(pyrolytic boron nitride, PBN), 몰리브덴(Mo), 텅스텐(W) 및 지르코늄디옥사이드(ZrO_2)로 이루어진 군에서 선택된 1종 이상을 포함하는 발열체로서 이루어질 수 있다.
- [69] 본 실시예에서는 성장로(10)의 진공 분위기 또는 불활성 기체분위기에서 단결정을 성장시킬 경우에는 다공성 그래파이트로 이루어진 제1 히터(41), 고밀도 그래파이트로 이루어진 제2 히터(42), 및 몰리브덴, 텅스텐 또는 표면을 연마한 고밀도 그래파이트로 이루어진 제3 히터(43)를 사용할 수 있으며, 여기서 상기 그래파이트를 대신하여 실리콘카바이드(SiC), 파이로리틱보론나이트라이드(pyrolytic boron nitride, PBN), 몰리브덴(Mo), 텅스텐(W), 지르코늄디옥사이드(ZrO_2) 또는 이들의 혼합물을 용도에 맞게 다공성, 고밀도 또는 표면을 연마한 고밀도로 재료로서 사용할 수 있다.
- [70] 그러나, 성장로(10)의 대기 분위기에서 단결정을 성장시킬 경우에는 다공성 세라믹 복합소재로 이루어진 제1 히터(41), 고밀도 세라믹 복합소재로 이루어진 제2 히터(42), 및 표면을 연마한 고밀도 세라믹 복합소재로 이루어진 제3 히터(43)를 사용할 수 있고, 여기서 상기 세라믹 복합소재로서 그래파이트(Graphite), 실리콘카바이드(SiC), 파이로리틱보론나이트라이드(pyrolytic boron nitride, PBN), 지르코늄디옥사이드(ZrO_2) 및 이들의 혼합물 중에서 선택된 1종 이상을 용도에 맞게 다공성, 고밀도 또는 표면을 연마한 고밀도 재료로서 사용할 수 있다.
- [71] 여기서, 상기와 같은 제1 내지 제3 히터(41, 42, 43)는 고온에서 반응이 일어나지 않도록 최소 3mm 이상 이격되게 설치되는 것이 바람직하다.
- [72] 특히, 상기 제2 히터(42)는 성장하는 단결정 및/또는 단결정 원료의 용액에 온도 구배를 부여하기 위해 하부 보다 상부를 더 두껍게 가공 설치하는 것이 바람직한데, 이는 우수한 품질의 세라믹 단결정으로 성장할 수 있는 조건의 온도 구배로 조절할 수 있도록 하기 위함이다.
- [73] 본 실시예에서, 상기 보조 히팅유닛(60)은 메인 히팅유닛(30)의 제1 내지 제3 히터(41, 42, 43)와 도가니(20) 원료를 마이크로 웨이브(micro-wave)로서

가열하기 위한 것이다.

- [74] 즉, 상기 보조 히팅유닛(60)은 메인 히팅유닛(30) 및 도가니(20) 내의 원료가 마이크로 웨이브에 의해 자체 발열이 이루어지게 한다.
- [75] 이러한 보조 히팅유닛(60)은 성장로(10)의 상측부에 구성되는 바, 그 성장로(10)의 내부에서 마이크로 웨이브를 발생시키는 마그네트론(61)을 포함한다.
- [76] 상기 마그네트론(61)은 자기장 속에서 마이크로 웨이브를 발진하는 2극 진공관으로서 자전관이라고도 하는데, 마그네트론(61)의 단계별 동작 원리는 다음과 같다.
- [77] 1)외부에서 DC 자기장을 가해준다.
- [78] 2)음극을 고온으로 가열하여 열전자가 방출될 수 있는 준비 상태로 만들어 준다.
- [79] 3)양극과 음극 사이에 DC 고전압이 가해진다.
- [80] 4)음극 표면에서 방출된 열전자가 양극 쪽으로 가속된다.
- [81] 5)양극 쪽으로 가속되는 열전자가 자기장에 의해 휘어져 음극 주변을 회전한다.
- [82] 6)음극 주변을 회전하는 열전자와 마그네트론 회로가 공진하면서 마이크로 웨이브를 발생한다.
- [83] 이러한 마이크로 웨이브는 제1 내지 제3 히터(41, 42, 43) 및 도가니(20) 내 원료의 분자들을 빠르게 진동시켜 그 진동 마찰열을 통하여 제1 내지 제3 히터(41, 42, 43) 및 도가니(20) 내 원료의 자체 발열을 유도한다.
- [84] 여기서, 상기 마그네트론(61)에는 마이크로 웨이브의 분포가 성장로(10)의 내부 전체에 골고루 퍼질 수 있도록 마이크로 웨이브를 반사시키는 가이드부재(도면에 도시되지 않음)가 수평하게 연장 설치될 수도 있다.
- [85] 한편, 상기에서와 같이 도가니(20)와 메인 히팅유닛(30) 및 보조 히팅유닛(60)을 구성하는 성장로(10)에는 온도를 측정하기 위한 고온계(pyrometer)(51)가 설치될 수 있다.
- [86] 이러한 고온계(51)는 메인 히팅유닛(30)의 제2 히터(42)에서 나오는 빛을 측정하여 온도로 변환하는 광온도계로서 이루어진다.
- [87] 그리고, 상기 성장로(10)의 상측부에는 도가니(20) 내 원료 또는 시드 결정의 용융 상태를 파악하기 위한 탐침봉(53)이 설치될 수 있다.
- [88] 상기 탐침봉(53)은 텅스텐 봉으로서 이루어지며 그 텅스텐 봉을 도가니(20) 쪽으로 낙하시켜 텅스텐 봉의 낙하 길이를 측정함으로써 도가니(20) 내 원료 또는 시드 결정의 용융 상태를 파악할 수 있다.
- [89] 본 실시예에서, 상기 열교환부(70)는 도가니(20) 내 시드 결정과의 직접적인 열교환이 이루어지는 것으로서, 고온에서 나타나는 급격한 부피 팽창으로 인한 진동을 제거하고 냉매 온도를 일정하게 유지시키는 기능을 하게 된다.

- [90] 상기 열교환부(70)는 도가니(20)의 하측에 접촉되며 성장로(10)에 결합되는 냉각 구리봉(71)을 포함하는 바, 냉각 구리봉(71)은 냉매가 공급되며 고정시켜 설치될 수 있고, 상하로 승, 하강 가능하게 설치될 수 있다.
- [91] 냉각 구리봉에 냉매를 공급하기 위해 냉매 온도 조절부, 냉매 보조탱크, 냉매 분배장치, 유량계 등을 구비할 수 있고, 여기서 상기 냉매로서 공지된 냉매를 제한 없이 사용할 수 있고, 보다 바람직하게는 냉각수를 사용할 수 있다.
- [92] 한편 본 발명에서는 냉각 구리봉(71)이 상하 방향으로 승하강 가능하게 설치되는 것에 특별히 한정되지 않고, 도가니(20)가 상하 방향으로 승하강 가능하게 설치될 수도 있다.
- [93] 따라서, 본 실시예에서는 메인 히팅유닛(30)으로부터 방사되는 대부분의 열은 도가니(20)의 벽과 용액 표면을 통하여 결정 내부로 유입되고, 그 유입된 열의 대부분이 냉각 구리봉(71)을 통하여 외부로 빠져나가게 된다.
- [94] 여기서, 상기 냉각 구리봉(71)의 체적과 형상은 단결정의 품질에 큰 영향을 미치며, 단결정 내의 온도 분포와 온도 구배를 지배하기 때문에, 본 발명에서 어느 특별한 수치와 형상으로 한정되지 않는다.
- [95] 또한, 상기 냉각 구리봉(71)은 이의 상부에 고온, 특히 사파이어 단결정제조の場合 2050°C 이상에서 견딜 수 있는 폴리브덴 또는 텅스텐 냉각봉(도면에 도시되지 않음)이 설치될 수 있다.
- [96] 본 실시예에서, 상기 쿨링유닛(80)은 성장로(10)의 외벽에 설치되는 냉각 챔버(81)를 구비하며 그 냉각 챔버(81)로 냉매, 바람직하게는 냉각수를 공급할 수 있는 구조로 이루어진다.
- [97] 상기 쿨링유닛(80)은 냉각 챔버(81)와 냉각 구리봉(71)으로 냉각수를 공급하기 위해 냉각수 온도 조절부, 냉각수 보조 탱크, 냉각수 분배장치, 유량계 등을 구비하고 있다.
- [98] 이러한 쿨링유닛(80)의 구성은 당 업계에서 널리 알려진 공지 기술의 냉각수 공급장치로서 이루어지므로, 본 명세서에서 그 구성의 더욱 자세한 설명은 생략하기로 한다.
- [99] 상기에서, 냉각 챔버(81)는 성장로(10)의 외벽, 상면 커버, 하면 커버에 냉각 방식으로서 구성될 수 있다.
- [100] 한편, 상기에서와 같은 단결정 성장장치(100)는 성장로(10) 내의 온도, 진공도, 공급 전원, 성장로 커버의 상하 이동, 냉각수 공급 등을 제어하기 위한 전자 제어 유닛(도면에 도시되지 않음)이 외부에 구성되고, 이 전자 제어 유닛에는 온도, 진공도 및 공급 전원 등을 기록하기 위한 기록계 및 변환기 등이 포함될 수 있다.
- [101] 본 발명의 다른 예시적인 실시예에 따른 단결정 성장 방법은 히터의 내측에 구성되는 도가니의 바닥에 시드 결정을 위치시키는 단계(a); 상기 시드 결정 위에 단결정의 원료를 충전하는 단계(b); 마이크로 웨이브를 이용함으로써 상기 히터 및 상기 단결정의 원료를 가열하여 균일한 용융상태 원료를 형성시키는 단계(c); 단계(c)와 병행하여 상기 시드 결정이 용융되지 않도록 상기 도가니의 하측에

- 구비된 열교환부를 이용하여 상기 시드 결정을 냉각시키는 단계(d); 상기 균일한 용융상태 원료를 상기 시드 결정 위에서부터 단결정으로 성장시키는 단계(e); 및 단계(e)와 병행하여 상기 균일한 용융상태 원료와 상기 성장시키는 단결정 사이의 온도구배(temperature gradient)를 조절하여 상기 균일한 용융상태 원료를 단결정으로 성장시키는 단계(f);를 포함할 수 있다.
- [102] 또한 상기 단결정 성장방법에 있어서, 상기 히터 및 상기 단결정 원료는 상기 마이크로 웨이브를 조사함에 의해 자체 발열할 수 있다.
- [103] 또한 상기 단결정 성장방법에 있어서, 상기 단결정 원료는 알루미늄(Al_2O_3), 질화알루미늄(AlN), 실리콘(Si) 및 질화갈륨(GaN)으로 이루어진 군에서 선택된 어느 하나일 수 있다.
- [104] 또한 상기 단결정 성장방법에 있어서, 상기 히터는 상기 도가니의 외측에 순차적으로 설치되는 제1 히터, 제2 히터 및 제3 히터를 포함할 수 있다.
- [105] 또한 상기 단결정 성장방법에 있어서, 상기 제1 내지 제3 히터는 그래파이트(Graphite), 실리콘카바이드(SiC), 파이로리틱보론나이트라이드(pyrolytic boron nitride, PBN), 몰리브덴(Mo), 텅스텐(W) 및 지르코늄디옥사이드(ZrO_2)로 이루어진 군에서 선택된 1종 이상을 포함할 수 있다.
- [106] 또한 상기 단결정 성장방법에 있어서, 상기 도가니는 그래파이트(Graphite), 실리콘카바이드(SiC), 파이로리틱보론나이트라이드(pyrolytic boron nitride, PBN), 몰리브덴(Mo), 텅스텐(W) 및 지르코늄디옥사이드(ZrO_2)로 이루어진 군에서 선택된 1종 이상을 포함할 수 있다.
- [107] 이하, 상기와 같이 구성되는 본 발명의 단결정 성장장치(100)에 따른 예시적인 실시예 및 작용 효과를 상세하게 설명한다.
- [108] 본 실시예에서는 몰리브덴으로 이루어진 도가니(20)의 바닥에 시드 결정과 냉각 구리봉(71)이 일직선을 이루도록 지름 36mm, 높이 12mm인 사파이어 시드 결정을 위치시키고 그 위에 알루미늄 원료(1)를 4kg 장입한다.
- [109] 그리고 나서, 상기 도가니(20)의 덮개(도면에 도시되지 않음)를 덮고 로킹시킨 후, 메인 히팅유닛의 제1 히터, 제2히터 및 제3히터의 덮개를 덮고 그 덮개를 로킹시킨 상태에서, 메인 히팅유닛(30)을 통해 온도를 200°C로 올린 후, 일정 시간 유지시킨 다음, 진공 조성 유닛(도면에 도시되지 않음)을 통해 성장로(10)로의 내부를 대략 10-3Torr까지 진공 형성 시킨다.
- [110] 그 후, 가스 주입 밸브(도면에 도시되지 않음)를 통하여 성장로(10)의 내부에 Ar 또는 N_2 와 같은 비활성가스 분위기를 주입하고 배출하는 과정을 반복하여 성장로(10) 내부의 진공도를 대략 10-3Torr로 유지시킨다.
- [111] 또한, 상기 냉각 구리봉(71)으로 공급되는 냉각수를 1900°C까지 5ℓ/min로 셋팅시키고, 온도 프로그램을 1900°C까지 4시간으로 셋팅시킨 후 온도를 올리고, 1900°C에서 탐침봉(53)을 통해 시드 결정의 용융 유무를 파악하여 시드 결정이 녹지 않는 범위의 온도까지 올린 후 2시간 유지시킨다.

- [112] 여기서, 상기 메인 히팅유닛(30)의 제1 히터(41)는 다공성의 그래파이트로 이루어지고 급격한 열 충격을 완충하며 도가니(20) 내의 온도를 보존하고, 제2 히터(42)는 고밀도 그래파이트로 이루어지고 열을 도가니(20)로 충분히 공급하며, 제3 히터(43)는 표면을 연마한 고밀도 그래파이트로 이루어지고 복사열을 차단 및 분산시킴으로써 열 분포를 일정하게 유지시키고 온도구배를 조절할 수 있다.
- [113] 본 실시예에서는 보조 히팅유닛(60)의 마그네트론(61)을 통해 성장로(10)의 내부에 마이크로 웨이브를 발생시킨다.
- [114] 그러면, 상기 마이크로 웨이브는 메인 히팅유닛(30) 및 도가니(20) 내 원료의 분자들을 빠르게 진동시켜 그 진동 마찰열을 통하여 메인 히팅유닛(30) 및 도가니(20) 내 연료의 자체 발열을 유도한다.
- [115] 본 실시예에서는 마이크로 웨이브를 통해 메인 히팅유닛(30)과 사파이어 단결정 원료인 알루미늄의 자체 발열에 의하여 온도를 상승 및 유지시킬 수 있게 되고, 초기에 수분 및 이물질을 제거함으로써 보다 안정적으로 온도를 빠르게 올릴 수 있게 되며, 도가니(20) 내의 온도 편차를 줄여 원료의 용융 시 열 대류 현상을 최대한 억제시키며 균일하게 용융시킬 수 있다.
- [116] 이로써, 본 실시예에서는 마그네트론(61)에서 발생하는 마이크로 웨이브를 통해 히팅유닛(30) 및 도가니(20) 내 연료를 자체 발열시키게 되므로, 성장로(10) 내의 불순물이 증발되면서 고체에서 액체로의 상변화 과정에 있는 시드 결정의 일부를 제외하고 도가니(20) 내의 원료를 액상으로 변화시키며, 이와 병행하여 상기 시드 결정이 용융되지 않도록 상기 도가니의 하측에 구비된 열교환부를 이용하여 상기 시드결정을 냉각시킨다.
- [117] 본 실시예에서는 냉각 챔버(81)와 냉각 구리봉(71)으로 냉각수를 각각 공급함으로써 일정한 냉각 속도(예컨대 0.05°C/h)로 온도를 하강시킨다.
- [118] 도 2를 참고하면, 본 실시예에서는 상기한 냉각 과정을 거치는 동안, 용액(액상) 내부에 온도 구배가 생기게 되면서 시드결정으로부터 성장하기 시작한 사파이어 단결정을 얻을 수 있었다.
- [119] 도 3 내지 도 7을 참고하면, 이와 같이 성장된 사파이어 단결정의 X선 회절실험 결과, 사파이어 단결정은 균일하게 결정성이 우수한 것으로 나타났으며, 도 8을 참고하면, (0001)방향의 결정방위 편차는 +0.06~0.07°로 나타났으며, 반치폭(Full width at half maximum, FWHM) 값도 0.120~0.126 값을 나타내어 방향성이 아주 좋은 것으로 나타났다. 에치핏 밀도(Etch Pit Density, EPD)는 1.57×10^2 pcs/cm²로 결함밀도가 좋은 것으로 평가되었다.
- [120] X선 회절(XRD) 실험
- [121] Rigaku 사의 x-선 회절시험기를 사용하였고, CuK α ($\lambda=1.542$)를 사용하고, 40KV와 30mA에서 주사속도 4°/min로 측정하였으며, 회절범의 범위는 20°~80°(2 θ)로 하여 세라믹 결정의 결정성을 조사하였다. 단결정성장의 방위측정은 Laue법을 이용하여 측정하였다.

- [122] 지금까지 설명한 바와 같이 본 발명의 예시적인 실시예에 따른 단결정 성장장치(100)에 의하면, 마이크로 웨이브를 이용하여 메인 히팅유닛(30)과 도가니(20) 내 원료를 동시 가열함으로써 온도 상승 초기에 수분 제거를 통한 도가니(20) 내의 반응 안정성을 확보할 수 있다.
- [123] 또한, 본 실시예에서는 메인 히팅유닛(30)의 제1 내지 제3 히터(41, 42, 43)의 단면적, 중량, 및 형상에 따라 임의적으로 온도 구배를 형성시켜 단결정의 성장 속도를 조절함으로써 대구경 고품질의 단결정을 경제적으로 성장시킬 수 있다.
- [124] 또한, 본 실시예에서는 마이크로 웨이브를 이용하여 고순도(99.995%)의 α -Al₂O₃의 분말을 1850°C까지 가열하면 재결정이 일어나고, 이러한 결정 내에 불순물과 기포가 없고 입자 사이즈 또한 작기 때문에 원료의 장입 높이를 최대한 낮출 수 있으며, 온도 상승 시 저온뿐만 아니라, 고온에서도 반응물질을 최대한 줄여 노 내의 안정화를 가져올 수 있고, 원료의 충전률을 최대한 높여 대구경의 사파이어를 작은 장비로 생산 할 수 있기 때문에 장비 가격 및 전력비 면에서 제조원가를 낮출 수 있다.
- [125] 또한, 본 실시예에서는 마이크로 웨이브를 이용하여 메인 히팅유닛(30)과 도가니(20) 내 원료를 동시 가열함으로써 전기로와 고주파로가 가지는 문제점인 히터와 피가열체의 온도 편차 및 온도 구배를 없앨 수 있어 용융 상태에서 용탕의 대류현상을 최대한 억제하여 고품질의 단결정을 성장시킬 수 있다.
- [126] 또한, 본 실시예에서는 메인 히팅유닛(30)과 원료의 동시 가열로 인해 온도 상승 시간을 대폭 줄임으로써 제조 원가를 낮출 수 있으며, 전력 사용량을 줄임으로써 경제적으로 우수한 효과를 발휘할 수 있다.
- [127] 또한, 본 실시예에서는 메인 히팅유닛(30)을 구성하는 제1 내지 제3 히터(41, 42, 43)의 재질, 두께, 및 형상을 다르게 설정하여 핫-존(hot-zone) 내 온도를 임의적으로 조절할 수 있으며, 탐침봉(53)을 이용하여 시드 결정의 용융 상태를 확인할 수 있으므로 사파이어 단결정의 실패 확률을 현저하게 줄일 수 있다.
- [128] 이상을 통해 본 발명의 바람직한 실시예에 대하여 설명하였지만, 본 발명은 이에 한정되는 것이 아니고 특허청구범위와 발명의 상세한 설명 및 첨부한 도면의 범위 안에서 여러 가지로 변형하여 실시하는 것이 가능하고 이 또한 본 발명의 범위에 속하는 것은 당연하다.

산업상 이용가능성

- [129] 상술한 바와 같은 본 발명의 예시적인 실시예에 따르면, 마이크로웨이브를 이용하여 메인 히팅유닛과 도가니 내 원료를 동시 가열함으로써 온도 상승 초기에 수분 제거를 통한 도가니 내의 반응 안정성을 확보할 수 있다.
- [130] 또한, 본 실시예에서는 메인 히팅유닛의 제1 내지 제3 히터의 단면적, 중량, 및 형상에 따라 임의적으로 온도 구배를 형성시켜 단결정의 성장 속도를 조절함으로써 대구경 고품질의 단결정을 경제적으로 성장시킬 수 있다.
- [131] 또한, 본 실시예에서는 원료의 장입 높이를 최대한 낮출 수 있고, 온도 상승 시

저온뿐만 아니라, 고온에서도 반응물질을 최대한 줄여 노 내의 안정화를 가져올 수 있으며, 원료의 충진률을 최대한 높여 대구경의 단결정을 작은 장비로 생산할 수 있기 때문에 장비 가격 및 전력비 면에서 제조원가를 낮출 수 있다.

[132] 또한, 본 실시예에서는 마이크로 웨이브를 이용하여 메인 히팅유닛과 도가니 내 원료를 동시 가열함으로써 전기로와 고주파로가 가지는 문제점인 히터와 피가열체의 온도 편차 및 온도 구배를 조절할 수 있어 용융 상태에서 용탕의 대류현상을 최대한 억제하여 고품질의 단결정을 성장시킬 수 있다.

[133] 또한, 본 실시예에서는 메인 히팅유닛과 원료의 동시 가열로 인해 온도 상승 시간을 대폭 줄임으로써 제조 원가를 낮출 수 있으며, 전력 사용량을 줄임으로써 경제적으로 우수한 효과를 발휘할 수 있다.

[134] 또한, 본 실시예에서는 메인 히팅유닛을 구성하는 제1 내지 제3 히터의 재질, 두께, 및 형상을 다르게 설정하여 핫-존 내 온도를 임의적으로 조절할 수 있으며, 탐침봉을 이용하여 시드 결정의 용융 상태를 확인할 수 있으므로 단결정 성장의 실패 확률을 현저하게 줄일 수 있다.

청구범위

- [청구항 1] 내부에 단열 펠트를 구성하는 성장로;
 상기 단열 펠트의 내부에 설치되며, 시드 결정이 위치하고 단결정 원료를 수용하는 도가니;
 상기 도가니의 외측에 구성되며, 상기 도가니로 열을 제공하는 메인 히팅유닛;
 상기 성장로에 장착되며, 상기 히팅유닛과 상기 도가니 내 상기 단결정 원료를 마이크로 웨이브로서 가열하는 보조 히팅유닛;
 상기 도가니의 하측에 구성되며, 상기 도가니와 열교환이 이루어지는 열교환부; 및
 상기 성장로의 외벽에 설치되는 냉각 챔버를 구비하며, 상기 냉각 챔버로 냉매를 공급하는 쿨링유닛;
 을 포함하는 단결정 성장장치.
- [청구항 2] 제1 항에 있어서,
 상기 보조 히팅유닛은,
 상기 성장로의 내부에서 마이크로 웨이브를 발생시키는 마그네트론(magnetron)을 포함하는 것을 특징으로 하는 단결정 성장장치.
- [청구항 3] 제2 항에 있어서,
 상기 메인 히팅유닛 및 상기 도가니 내의 단결정 원료는 상기 마이크로 웨이브를 조사함에 의해 자체 발열하는 것을 특징으로 하는 단결정 성장장치.
- [청구항 4] 제3 항에 있어서,
 상기 단결정 원료는 알루미늄(Al_2O_3), 질화알루미늄(AlN), 실리콘(Si) 및 질화갈륨(GaN)으로 이루어진 군에서 선택된 어느 하나인 것을 특징으로 하는 단결정 성장장치.
- [청구항 5] 제1 항에 있어서,
 상기 메인 히팅유닛은,
 상기 도가니의 외측에 순차적으로 설치되는 단수 또는 복수개의 히터를 포함하는 것을 특징으로 하는 단결정 성장장치.
- [청구항 6] 제1 항에 있어서,
 상기 히터는 상단의 두께가 하단의 두께보다 크거나 같은 것을 특징으로 하는 단결정 성장장치.
- [청구항 7] 제1 항에 있어서,
 상기 메인 히팅유닛은,
 상기 도가니의 외측에 순차적으로 설치되는 제1 히터, 제2 히터 및 제3 히터로 이루어진 군에서 선택된 1종 이상을 포함하는 것을

- 특징으로 하는 단결정 성장장치.
- [청구항 8] 제7 항에 있어서,
상기 제1 히터, 제2 히터 또는 제3 히터는 그래파이트(Graphite), 실리콘카바이드(SiC), 파이로리틱보론나이트라이드(pyrolytic boron nitride, PBN), 몰리브덴(Mo), 텅스텐(W) 및 지르코늄디옥사이드(ZrO_2)로 이루어진 군에서 선택된 1종 이상을 포함하는 것을 특징으로 하는 단결정 성장장치.
- [청구항 9] 제1 항에 있어서,
상기 도가니는 그래파이트(Graphite), 실리콘카바이드(SiC), 파이로리틱보론나이트라이드(pyrolytic boron nitride, PBN), 몰리브덴(Mo), 텅스텐(W) 및 지르코늄디옥사이드(ZrO_2)로 이루어진 군에서 선택된 1종 이상을 포함하는 것을 특징으로 하는 단결정 성장장치.
- [청구항 10] 제1 항에 있어서,
상기 성장로는 진공 분위기, 비활성가스 분위기 및 대기 분위기로 이루어진 군에서 선택된 어느 하나의 분위기에서 단결정이 성장하는 것을 특징으로 하는 단결정 성장장치.
- [청구항 11] 히터의 내측에 구성되는 도가니의 바닥에 시드 결정을 위치시키는 단계(a);
상기 시드 결정 위에 단결정의 원료를 충전하는 단계(b);
마이크로 웨이브를 이용함으로써 상기 히터 및 상기 단결정의 원료를 가열하여 균일한 용융상태 원료를 형성시키는 단계(c);
단계(c)와 병행하여 상기 시드 결정이 용융되지 않도록 상기 도가니의 하측에 구비된 열교환부를 이용하여 상기 시드결정을 냉각시키는 단계(d);
상기 균일한 용융상태 원료를 상기 시드 결정 위에서부터 단결정으로 성장시키는 단계(e); 및
단계(e)와 병행하여 상기 균일한 용융상태 원료와 상기 성장시키는 단결정 사이의 온도구배(temperature gradient)를 조절하여 상기 균일한 용융상태 원료를 단결정으로 성장시키는 단계(f);
를 포함하는 단결정 성장 방법.
- [청구항 12] 제11 항에 있어서,
상기 히터 및 상기 단결정 원료는 상기 마이크로 웨이브를 조사함에 의해 자체 발열하는 것을 특징으로 하는 단결정 성장 방법.
- [청구항 13] 제11 항에 있어서,
상기 히터는 상기 도가니의 외측에 순차적으로 설치되는 제1 히터,

제2 히터 및 제3 히터로 이루어진 군에서 선택된 1종 이상을 포함하는 것을 특징으로 하는 단결정 성장 방법.

[청구항 14]

제13 항에 있어서,

상기 제1 히터, 제2 히터 또는 제3 히터는 그래파이트(Graphite), 실리콘카바이드(SiC), 파이로리틱보론나이트라이드(pyrolytic boron nitride, PBN), 몰리브덴(Mo), 텅스텐(W) 및

지르코늄디옥사이드(ZrO_2)로 이루어진 군에서 선택된 1종 이상을 포함하는 것을 특징으로 하는 단결정 성장 방법.

[청구항 15]

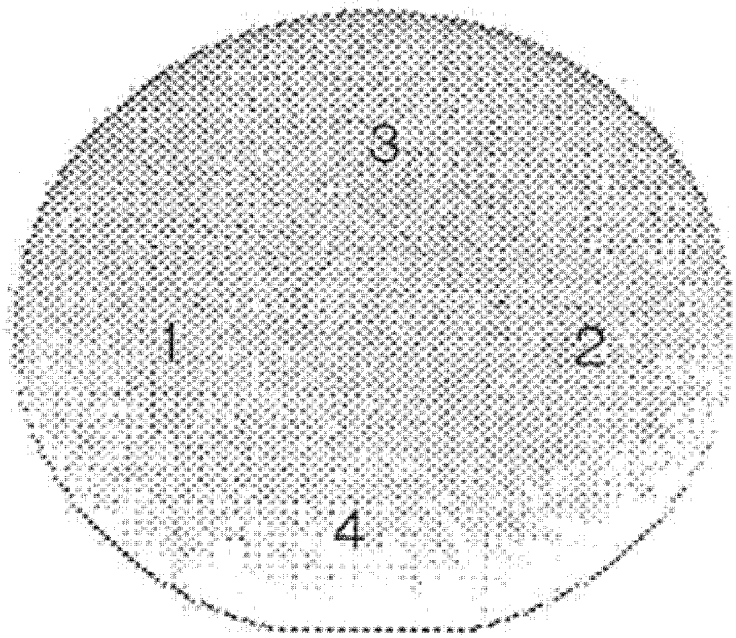
제11 항에 있어서,

상기 도가니는 그래파이트(Graphite), 실리콘카바이드(SiC), 파이로리틱보론나이트라이드(pyrolytic boron nitride, PBN),

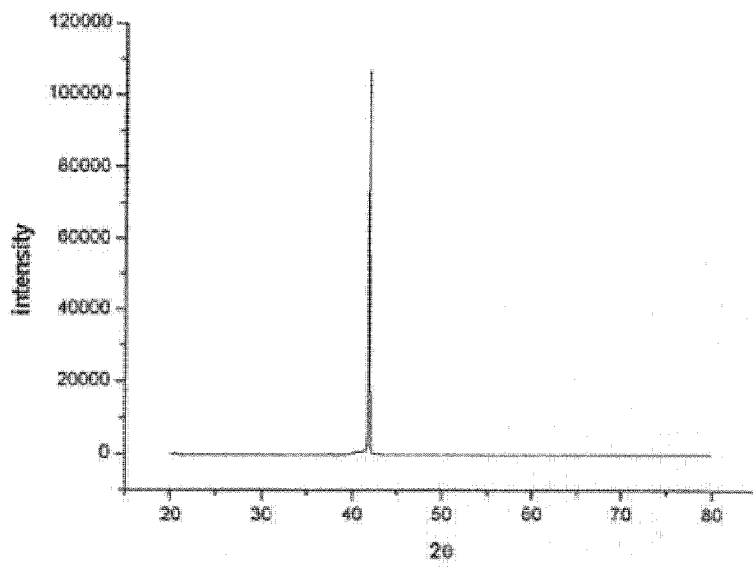
몰리브덴(Mo), 텅스텐(W) 및 지르코늄디옥사이드(ZrO_2)로

이루어진 군에서 선택된 1종 이상을 포함하는 것을 특징으로 하는 단결정 성장 방법.

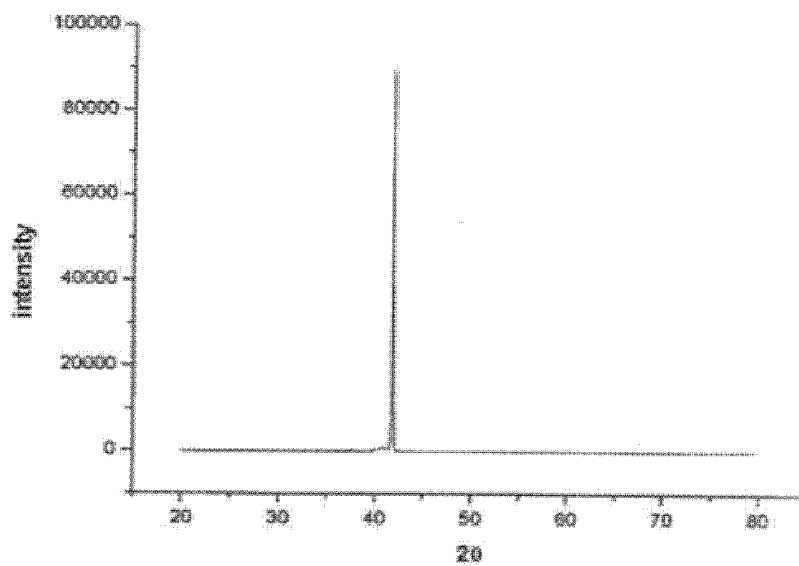
[Fig. 3]



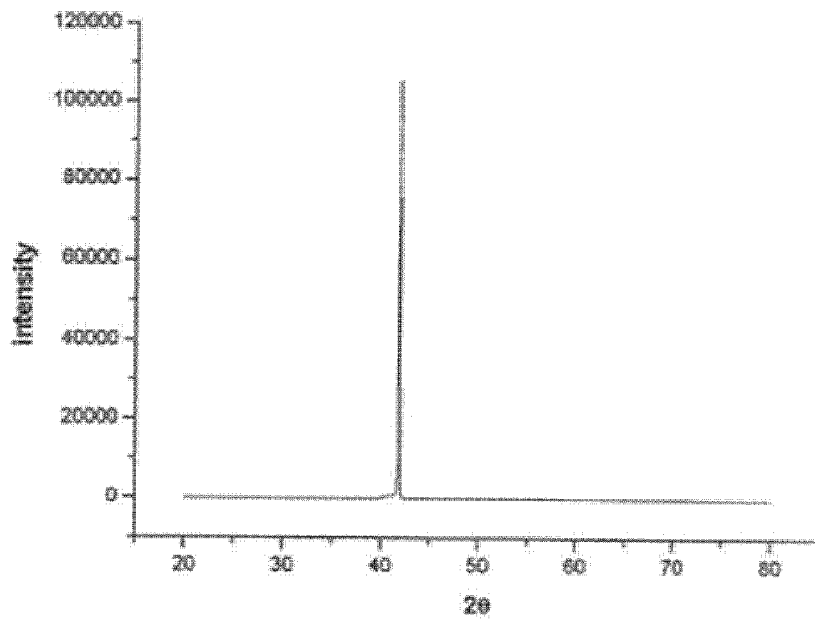
[Fig. 4]



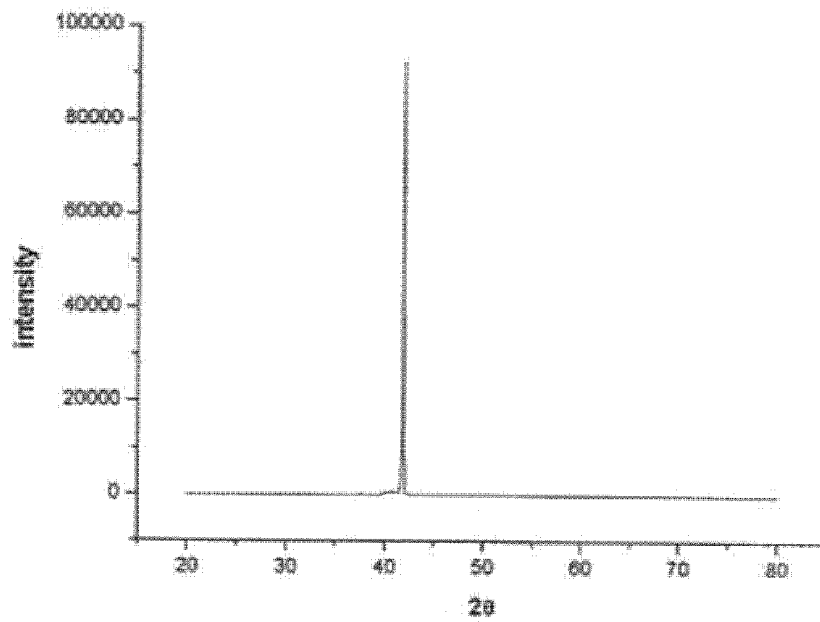
[Fig. 5]



[Fig. 6]



[Fig. 7]



[Fig. 8]

