

Czochralski 방법에 의한 Nd:YAG 단결정의 육성 및 레이저 출력특성

이상호 · 김한태 · 배소의
 쌍용중앙연구소 신소재연구실

정수진
 서울대학교 재료공학부

(1997년 12월 22일 받음, 1998년 5월 4일 수정본 받음)

고체 레이저매질로 가장 널리 쓰이는 Nd:YAG 단결정을 Czochralski 방법으로 육성하였다. 자체 제작한 Czochralski 결정 육성로 및 자동 결정 직경제어 장치를 써서 유효 직경 50 mm, 길이 100 mm의 Nd³⁺ 이온농도가 0.9 at%이고 <111> 방향의 단결정을 육성하였다. 단결정 육성시 용액의 수직방향에 대한 온도구배가 중요한 변수인 것이 확인되었으며, 결정 직경은 자동 제어가 가능하도록 컴퓨터 프로그램을 제작하여서 조절하였다. 육성된 단결정을 절단, 가공, 연마, 코팅 과정을 거쳐서 레이저 발진용 Nd:YAG 막대를 제작하고 흡수 스펙트럼, 형광 스펙트럼 분석을 통하여 정확한 Nd:YAG의 레이저 발진특성을 확인하였다. 자체 가공된 레이저 막대로부터 발진된 CW 레이저의 최대 출력은 70 W이었고, 발진문턱값과 효율은 각각 1.3 kW, 1.64%이었다.

I. 서 론

일반적으로 레이저용 단결정으로 요구되는 광학적 성질로는 레이저 발진 파장에서 흡수 스펙트럼이 나오지 않아야 하며 여기광에 의해 색중심(color center)이 발생하지 않아 이로 인한 흡수가 생기지 않아야 한다. 한편 첨가된 활성이온이 유효한 흡수 스펙트럼을 가지며 동시에 유도방출 단면적이 커야하고, 활성 이온을 고농도로 첨가할 수 있고, 형광 수명이 길어야 하며 광학적으로 균일하고 결정 육성이 쉬운 것이 요구된다.

위와 같은 요구조건을 비교적 원활하게 만족시킬 수 있는 단결정이 Nd:YAG 단결정이기 때문에 현재 사용하고 있는 고체 레이저 단결정의 90% 이상을 차지하고 있다. Nd:YAG 단결정은 고출력의 단색성, 지향성이 우수한 레이저를 발진하는 소재로서 약 1970°C의 고온에서 Czochralski 방법에 의해 육성되는 고순도의 단결정이나, 이제까지 국내에서는 소재 산업의 낙후로 말미암아 전량 미국, 일본, 중국, 러시아 등으로부터 수입하여 사용되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 Nd:YAG 단결정을 자체 제작한 Czochralski 결정 육성로를 써서 유효 직경 50 mm, 길이 100 mm의 Nd³⁺이온농도가 0.9 at%이고 <111> 방향의 단결정을 육성하고, 육성된 단결정을 절단, 가공, 연마, 코팅 공정을 거쳐서 실제 레이저 발진용 Nd:YAG 막대를 제조하였으며, 이를 자체 제작한 레이저 발진기에 장착하여 CW 레이저를 발진시키고 효율을 측정함으로써 레이저 매질의 성장방법에 대한 기초기술 확립을 추진하고자 하였다.

II. Czochralski 방법에 의한 Nd:YAG 단결정의 육성

2.1. Nd:YAG 단결정의 개요

Nd:YAG 단결정이란 본래 Yttrium Aluminum Garnet

(YAG) 결정구조를 갖는 화합물에 Y³⁺ 이온의 일부가 Nd³⁺ 이온으로 치환된 결정을 말한다. YAG 결정은 3Y₂O₃ · 5Al₂O₃의 입방구조를 가지며 YAG 결정 자체로는 레이저를 전혀 발생시키지 못하지만 여기에 소량의 Nd³⁺ 이온이 치환될 경우 여기에너지에 의해 4준위의 레이저가 발생할 수 있다. YAG 결정은 결정학적으로 매우 안정된 화합물이기 때문에, 기계적, 열적, 전기적 충격에 비교적 안정하며, Nd³⁺ 이온이 YAG의 Y³⁺ 이온과 치환이 이루어지더라도 일정 범위까지는 결정구조가 깨어지지 않고, 또한 원자크도 같기 때문에 레이저 발진용 재료로 널리 쓰이고 있다. 따라서 Nd³⁺ 이온 이외에도 Cr³⁺, Er³⁺, Yb³⁺, Ho³⁺, Tm³⁺ 이온 등이 YAG에서 치환될 수 있다. 표 1에 Nd:YAG 단결정의 물리적, 광학적 특성을 요약하였다.^[1]

2.2. Czochralski법에 의한 단결정 성장

Czochralski법이란 1917년 최초로 이 방법을 시도한 사람^[2]

표 1. Nd:YAG 단결정의 물리적, 광학적 특성^[1]

항 목	물 성 치
화학식	Nd _{3x} Y _{3-3x} Al ₅ O ₁₂
결정구조	cubic
격자상수	12.01 Å
밀도	4.55 g/cm ³
열팽창계수 (<111>)	7.7 × 10 ⁻⁶ /°C
경도 (Mohs)	8.5
인성	0.8 MPa · m ^{1/2}
열전도도	0.13 W/cm · K
비열	0.14 cal/sec · °C
탄성계수	3 × 10 ³ kg/mm ²
발진파장	1064 nm
형광수명	230 μsec
line width	4.5 Å
유도방출단면적	4.58 × 10 ⁻¹⁹ cm ²

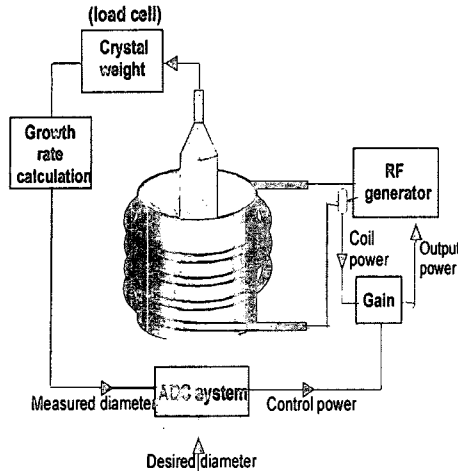


그림 1. Czochralski법에 의한 단결정 육성의 모식도.

의 이름을 따서 명명된 것으로 여러 가지 단결정 육성방법 중 대형 결정을 얻을 수 있는 가장 대표적인 방법 중의 하나이다. 그림 1과 같이 원료를 도가니에 넣고 용융시킨 뒤 용융온도로 유지된 상태에서 종자결정을 용액의 중앙에 접촉시킨 다음 윗 방향으로 서서히 회전시키면서 끌어올린다. 인장시 표면 장력에 의해 끌어 올려진 액체가 냉각되면서 고화되어 단결정이 육성된다. 이 방법은 비교적 단시간 내에 큰 결정을 얻을 수 있고, 종자결정의 방위를 선택함으로써 성장시키고자 하는 결정의 방위를 임의로 조절할 수 있으며, 전위, 균열 등의 결함 발생이 비교적 적게 나타나는 등의 장점을 지니고 있다.

이러한 장점에도 불구하고 모든 단결정이 이 방법에 의해 육성될 수는 없는데, 그 이유로는 우선 육성하고자 하는 결정이 화학적 합치 용융을 하여야 하고, 도가니가 결정 육성 온도, 사용 분위기에서 내식성 및 강도를 유지할 수 있어야 하며, 결정의 냉각도중 상변태가 일어나지 않아야 하는 등 여러 가지 제약조건이 따르기 때문이다.

2.3. Czochralski 단결정 육성 장치

Czochralski 단결정 육성 장치는 크게 단결정 육성 열원인 가열 장치, 결정의 인상 및 회전 장치, 결정 육성로 및 자동 직경 제어 장치로 구성된다. 그림 2에 본 연구에 사용한 결정 육성 장치의 모식도를 나타내었는데, 크게 RF 고주파 발전기, 결정육성로, 회전 및 인상장치, 그리고 자동 결정직경 제어장치로 나누어진다.

단결정 성장시 고주파 발전기의 출력변동이나 용액상태의 변화는 결정 성장시의 온도에 직접적인 영향을 미치게 되므로 결정의 성장속도에 큰 영향을 미친다. 즉 단결정으로 성장

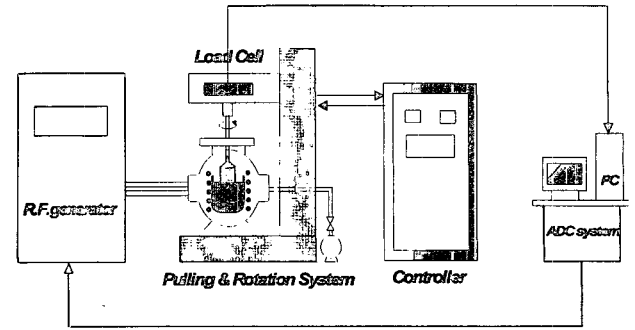


그림 2. 본 실험에 사용한 Czochralski법 단결정 육성장치.

할 수 있는 정도의 작은 과냉각범위 안에서 온도가 낮아지면 결정의 직경이 증가하고, 반대로 온도가 높아지면 결정의 직경이 감소한다. 인상속도의 감소 또한 결정의 직경을 증가시키지만 온도제어 보다 그 효과가 현저하지 못하므로 결국 결정의 직경을 일정하게 제어하기 위해서는 가열원인 고주파 발전기의 출력을 제어하여야 하는데 본 연구에서는 용액의 온도를 제어하는 자동 결정 직경 제어(ADC; Automatic Diameter Control) 시스템을 C language를 이용한 컴퓨터 프로그램으로 자체 개발하여서 사용하였다.^[3]

2.4. Nd : YAG 단결정의 농도 기울기

순수한 YAG 단결정은 레이저를 발진시키는 기능이 전혀 없다. 레이저의 발진은 앞에서 언급하였듯이 Nd³⁺, Cr³⁺, Er³⁺, Yb³⁺, Ho³⁺, Tm³⁺ 이온 등이 YAG에 치환되어야만 가능하다. 이들 이온은 YAG 단결정의 Y³⁺ 이온과 치환하게 되는데, 이때 이온반경이 서로 다르기 때문에 일정량 이상의 이온이 첨가될 경우 결정구조의 뒤틀림 등 양질의 결정육성이 불가능해지게 된다.

표 2에 YAG 단결정에 흔히 치환되는 레이저 발진 이온들의 이온반경 및 첨가 가능한 양을 나타내었다. Y³⁺ 이온반경이 0.893 Å인데 반해 Nd³⁺ 이온반경은 0.995 Å으로 약 10% 정도 크기 때문에 치환이 매우 어려운 반면, Er³⁺ 이온은 Y³⁺ 이온과 이온반경이 서로 비슷하기 때문에 약 50%까지도 치환이 가능함을 알 수 있다. 이때 이온반경의 차이가 심하면 단결정을 육성할 때 용액 속에 존재하는 첨가 이온의 농도와 실제로 석출되는 단결정 속에서의 첨가 이온농도가 서로 다르게 되며, 이때 단결정 속에서의 이온농도와 용액에서의 이온 농도의 비를 편석계수(segregation coefficient; k)라고 하는데,^[4] Nd:YAG 단결정의 경우는 k값은 약 0.2로 알려져 있다.^[5] 즉 석출되는 결정의 Nd³⁺ 이온농도는 용액 속의 Nd³⁺ 이온농도의 20%에 불과하므로, Nd_{3x}Y_{3-3x}Al₅O₁₂로 표시되는 일반식에 대해 원료조합시에는 Nd³⁺ 이온을 이론치의 5배인 Nd_{15x}Y_{3-3x}Al₅O₁₂의

표 2. 레이저 발진에 응용되는 YAG 결정의 첨가제 종류 및 첨가량

Doping Material	Nd ³⁺	Tm ³⁺	Ho ³⁺	Cr ³⁺	Er ³⁺	Yb ³⁺
doping range(at.%)	0.5-1.1	0.5-10.0	0.25-4.0	0.5-1.0	0.1-50.0	10.0-25.0
Ionic radius(Å)	0.995	0.87	0.894	0.63	0.881	0.93

remark: ionic radius of Y³⁺ is 0.893Å

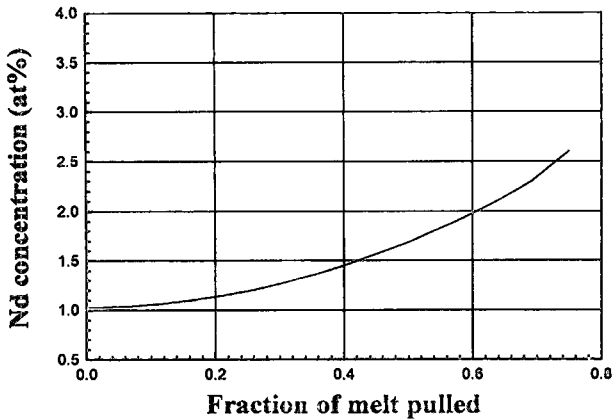


그림 3. Czochralski법에 의해 성장된 Nd:YAG 단결정에서 총 용액량에 대한 성장된 단결정의 분율에서의 Nd³⁺ 농도 계산치.

조성으로 준비하여야 한다.

결정 성장이 진행됨에 따라 용액 속에 존재하는 Nd³⁺ 이온 농도는 지속적으로 증가되며 이에 따라 석출되는 단결정 속에서의 Nd³⁺ 이온농도도 증가된다. 따라서 육성된 Nd:YAG 단결정 잉곳트(보통 boule이라고 부름)는 성장 초기인 결정 윗부분보다 성장 말기인 결정 아랫부분에서는 필연적으로 Nd³⁺ 이온농도가 증가될 수 밖에 없다. 이러한 결정 내의 상하 농도기울기는 결정을 육성할 때 도가니 속의 원료량에 대한 육성된 단결정의 무게비의 함수가 되는데, 농도기울기가 적은 단결정을 육성하자면, 도가니는 크고 육성하는 단결정의 무게가 작을수록 이상적이다. 따라서 상업화되어 있는 Nd:YAG 레이저 막대는 반드시 Nd³⁺ 이온의 편차를 명시하고 있는데 보통은 ±0.1%가 일반적으로 통용되고 있다. 그림 3은 k값이 0.2인 경우 단결정 육성이 진행됨에 따른 Nd³⁺ 농도의 계산치를 보여주고 있다.

III. 실험방법

3.1. 원료조합

순도 99.99%의 Al₂O₃, Y₂O₃ 및 Nd₂O₃ 분말을 출발원료로 사용하여, Nd_{3x}Y_{3-3x}Al₅O₁₂의 화학식에서 Nd³⁺ 이온의 유효 편석계수를 0.2로 가정하고, 성장된 결정의 Nd³⁺ 이온농도가 각각 0.9 at%가 되도록 무게를 달았다. 각 원료분말은 무기질 분순물의 혼입을 최소화 하기 위해 우레탄 항아리 및 나일론 볼을 사용하고 용매로 99.9% 이상의 에탄올을 사용하여 12시간 동안 혼합한 후 슬러리를 인출하여 건조 후 사용하였다. 건조된 분말은 고무재질의 금형에 충전하고 200 MPa의 압력으로 실린더 모양으로 냉간 정수압 성형(Cold Isostatic Pressing)하였고, 성형된 원료는 1600°C에서 구워서 일단 YAG 단일상을 합성한 다음 이리듬 도가니에 충전하였다.

3.2. Nd:YAG 단결정의 육성

이리듬 도가니에 하소(calcination)된 원료를 적재한 뒤 가열하여서 원료를 완전히 용융시켰다. 이 때 용융된 원료의 양

은 도가니 용적의 80% 이상이 되도록 하였는데 이는 용융 공정시 고주파 발전기의 출력 변화 및 용액 내부의 온도기울기 제어와 직접적으로 연관되기 때문이다. 또한 고주파 코일에 대한 도가니의 상대적 위치와 단열재의 배열 등도 결정 육성시 온도기울기에 큰 영향을 미치므로 이에 대한 세심한 고려가 필요하였다.

원료를 완전히 용융시킨 뒤 <111> 방향의 종자결정을 담그는데 이 때 용액의 온도는 용융온도에 가장 가깝게 조절하여야 한다. 담금이 이루어지면, 종자결정을 회전시키면서 일정 속도로 인상 하여야 하는데, 이때 회전속도는 10 rpm, 인상속도는 0.5 mm/h를 선택하여 결정을 성장하였다.

결정육성 공정은 담금 후 결정의 직경을 증가시키는 어깨부위 성장 공정, 그리고 원하는 직경이 얻어진 다음부터 원하는 길이까지 일정한 직경을 유지하면서 성장시키는 몸통성장 공정 및 다시 결정의 직경을 감소시켜서 결정을 용액으로부터 분리시키는 꼬리부위 성장 공정으로 크게 나뉜다. 일반적으로 길이 100 mm의 레이저 막대를 얻기 위해서 필요한 단결정의 성장시 어깨부위 4일, 몸통부위 9일, 그리고 꼬리부위에 4일로 총 17일 정도가 소요된다.

3.3. 단결정 boule로부터 레이저 발진용 막대의 가공

육성된 단결정 boule은 편광 하에서 우선 코어 영역을 확인한 다음, 결정의 어깨(shoulder) 및 꼬리(tail)부위를 결정성장 방향에 수직하게 절단하고, 절단된 면이 (111) 면과 일치하는 지를 X-선 회절분석장치(Diffraction technology, DX-Wafer)를 이용하여 확인하였다. 만일 절단된 면이 (111)면에 수직인 방향과 5°이하의 각도로 기울어져 있을 때는 그대로 막대 가공을 수행하여도 무방하지만, 그 이상인 경우는 기울어진 각도 만큼 수정하여 결정을 다시 절단하여야 한다. 그러나 실제로

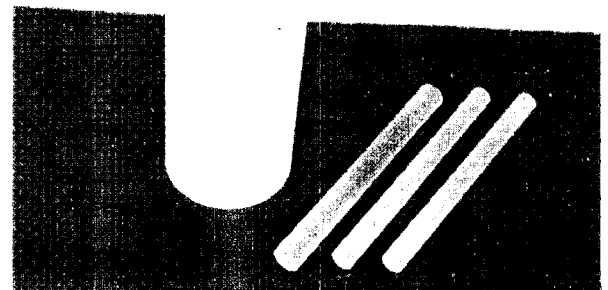
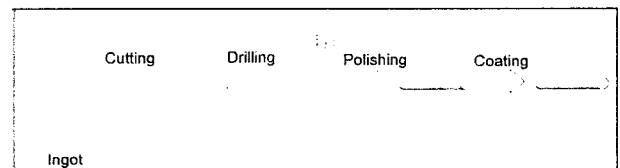


그림 4. 레이저 막대의 가공공정 및 core drilling된 Nd:YAG 레이저 막대 및 boule (boule 크기: Φ50 mm×l100 mm, 레이저 막대 크기: Φ6 mm×l100 mm).

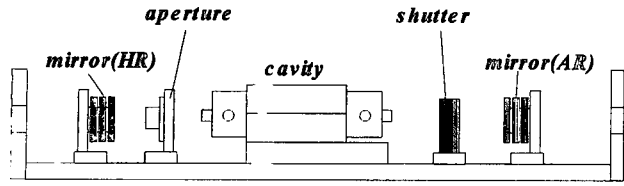


그림 5. 레이저 발진기의 구성도.

종자결정의 절단면 방향이 정확한 <111> 방향일 경우, 육성된 단결정은 종자결정의 절단면 방향과 동일한 방향으로 성장하게 되므로 절단시 종자결정과 수직한 방향으로 절단할 경우 요구방향과 일치하는 절단면을 얻을 수 있었다.

이렇게 절단된 면은 Twyman-Green 간섭계(중국 전광학원, LTY-80)로 facet 영역을 확인하고 이 facet 영역을 피하여 다이아몬드 드릴이 장착된 친공기를 이용하여서 그림 4와 같이 원하는 직경과 길이의 레이저 막대를 가공하였다.

직경 6.35 mm, 길이 100 mm의 레이저 막대형태로 친공된 단결정은 고정밀 연마기(Logitech, PM5)를 이용하여 경면 연마하였다. 레이저발진용으로 사용되는 막대는 단면의 편평도(flatness)가 $\lambda/10$ 이하가 되어야 하므로 매우 정밀한 가공공정이 필요하게 되는데, 본 연구에서는 가공하고자 하는 막대를 고정시키는 치구가 가공면에 대해 수직이 되게 하기 위해 광학 평면을 사용하여 기준면을 잡은 후 연마를 하였다. 연마된 면은 Fizeau형의 간섭계(Engis, HLI-50F)로 편평도 확인을 한 다음, 시편을 뒤집어서 반대면을 연마하였다. 이 때 두 면의 평행도는 autocollimator(Logitech, LG1)를 써서 연마할 면이 기연마된 면에 평행하도록 조절하였고 평행도는 $10''$, 직각도는 $5'$, 편평도는 He-Ne 레이저로 측정시 $\lambda/10$ 수준을 만족시키도록 가공하였다. 그리고 막대 양면을 1064 nm에 대해서 무반사 코팅을 하였으며, 분광광도계(Varian, Cary 5E)로 실측한 투과율은 99.7%를 나타내었다.

3.4. CW 레이저 발진기의 제작

준비된 막대로부터 실제 CW 레이저(1064 nm)를 발진시키기 위하여 레이저 발진기를 제작하였다. 실험을 위해 막대는 수시로 교체 가능하도록 설계하였으며, Kr lamp는 외경 6 mm, 길이 150 mm짜리 1개를 사용하였는데 최대 평균 출력은 5700 W, 최소 펄스 전압은 20 kV이었다. Nd : YAG 실제 막대의 길이는 100 mm가 되도록 내부가 금도금된 캐비티를 사용하였다. 이때 레이저 막대 양단에 사용한 거울은 평면형으로 반사율은 각각 100% 및 85%인 것을 사용하였고 레이저 발진기의 구성도를 그림 5에 나타내었다. 발진되는 레이저의 출력특성은 power meter(Molelectron, Power Max 5200)를 이용하여 발진문턱값, 효율, 출력안정성 등을 측정하였다.

IV. 실험결과

4.1. Nd : YAG 단결정의 결함 관찰

육성된 단결정 내에는 기포, 균열, 함유물, 석출물, 줄무늬, facet 등과 같은 결함이 발생할 수 있다. Czochralski법으로

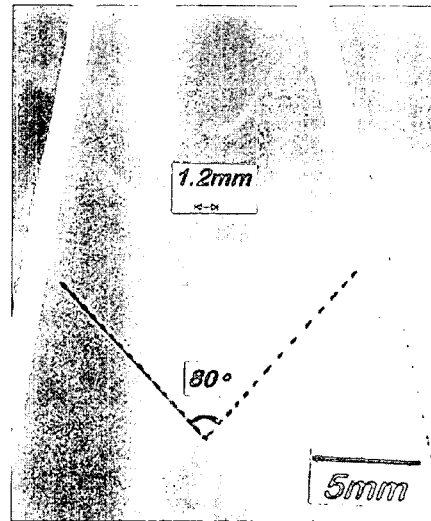


그림 6. 육성된 단결정 boule을 결정의 중심을 포함하는 수직방향으로 절단하여 연마한 뒤 편광현미경으로 관찰한 사진.

Nd : YAG 결정을 성장시킬 경우 아무리 결정성장이 잘 되었다고 하더라도 피할 수 없는 결함이 존재하게 되는데 이러한 결함이 core와 facet이다. core는 결정 단면의 중심부에 존재하는 주변부위와 다른 굴절률을 갖는 영역이며, 이는 결정성장시 결정학적으로 성장속도가 다른 면이 발생하기 때문에 생성된다. 이 영역에서는 레이저를 발생시키는 활성이온의 농도가 그 주변 영역보다 국부적으로 높게 나타나고 따라서 광학적으로 불균질한 특성을 나타내므로 레이저발진 매질로는 사용이 불가능한 영역이다.

facet은 결정학적으로 특정한 면이 선택적인 흡착에 의해 매끈한 면으로 성장되면서 발생하는데,^[6] 결정면의 표면 자유 에너지가 특정 방향에 대해 감소한다면 이 방향은 거친 면으로 성장하기 보다는 매끈한 면으로 성장하게 된다. Nd:YAG 단결정은 (211)면과 (110)면에서 facet이 발생하는 것으로 보고되어 있다.^[7] 그림 6은 육성된 단결정 boule을 결정의 중심을 포함하는 수직방향으로 절단하여 연마한 뒤 편광현미경으로 관찰한 사진으로, 중심부 core 영역의 지름은 약 1.2 mm 정도였으며, facet면은 결정 성장 방향과 약 20°의 각도를 이루고 있는데 이는 결정학적으로 (111)면과 (211)면이 이루는 사잇각인 19.4°와 잘 일치되고 있음을 알 수 있다.

4.2. 온도기울기 변화와 결함

용액인상법에서의 온도기울기는 육성로 내의 내화물 구조, after-heater 사용여부 및 도가니와 고주파 코일의 상대적 위치 조절 등으로 제어할 수 있다. 본 실험에서는 after-heater는 사용하지 않고, 내화물의 구조 및 도가니와 고주파 코일의 상대적 위치제어를 통하여 용액 내 수직방향의 온도기울기를 조절하였는데 실제 결정을 성장할 경우 도가니 상부의 내화물 구조를 조금만 변화시켜도 용액 내부의 온도기울기는 큰 차이를 보였다.^[8] 결정성장로 내부의 내화물의 구멍크기 및 형상을 변화시키기에 따라 온도기울기가 약 30°C/cm에서 55°C/cm까지 변화시킬 수 있었다. 결정 성장에 필요한 적정 온도기울기보다

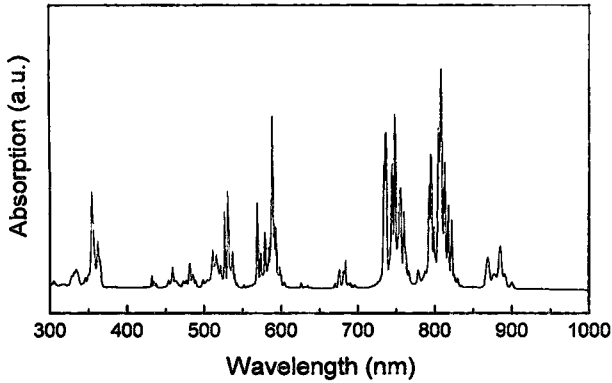


그림 7. Nd:YAG 단결정의 흡수 스펙트럼(Nd³⁺ 농도: 0.9at%).

성장 용액 내부의 온도기울기가 적을 경우에는 결정 내부에 결함이 발생함을 관찰할 수 있었으며, Nd:YAG 결정을 0.5 mm/h로 인상할 경우에는 용액 내 수직방향의 온도기울기가 40°C/cm 이상이 적정 온도기울기임을 알 수 있었다.

결정 성장시 용액 내의 온도기울기는 결정성장의 구동력이 되는 매우 중요한 요소이다. 일반적으로 용액인상법에 의해 결정을 성장할 때 고주파 유도가열방식에 의해 가열되는 경우에는 전도, 대류, 복사에 의해 열전달이 일어나므로 고·액계면을 중심으로 하여 그 주위에 온도기울기가 발생하게 된다. 도가니 내부를 생각했을 때 수평방향의 온도기울기는 도가니 외벽부분이 가장 고온이고 용액의 중심부위가 가장 차가운 온도분포를 가지며, 수직방향의 온도기울기는 도가니 바닥부분이 가장 뜨겁고 위로 올라갈수록 온도가 낮아지는 분포를 가지게 된다. 이러한 온도기울기는 조성적 과냉각 현상과 밀접한 관련을 갖는다.¹⁹⁾ 즉, 용액 중의 온도기울기가 결정성장에 요구되는 액상의 온도기울기보다 적은 부위가 발생할 경우 고·액계면에서 용질의 국부적인 축적이 발생하게 되며, 일단 이러한 현상이 발생하게 되면 그 부분의 과냉현상이 더욱 심화되므로 결정에는 결함이 유발된다. 이러한 현상은 유효편석 계수가 1보다 매우 작을 경우 더욱 심하게 나타나게 된다.

4.3. Nd:YAG 단결정의 흡수 및 형광 스펙트럼

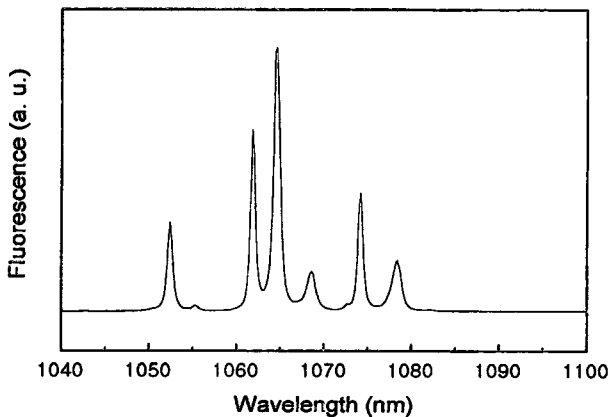


그림 8. Nd:YAG 막대의 형광 스펙트럼(Ar 레이저를 이용하여 여기).

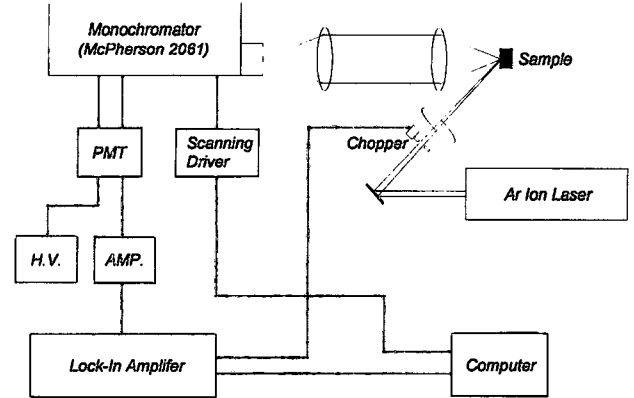


그림 9. 형광 스펙트럼 측정을 위한 장치의 모식도.

그림 7은 300~1000 nm 파장범위에서 분광광도계(Varian Cary 5E)로 상온에서 측정한 Nd:YAG 단결정의 흡수 스펙트럼이다. 흡수는 주로 500에서 850 nm에 집중되어 있었고, 최대 흡수피크는 810 nm에서 나타났다. 따라서 이 부근의 파장대가 여기서 가장 효율적임을 알 수 있었다.

그림 8은 1040~1100 nm의 파장범위에서 측정한 Nd:YAG 단결정의 형광 스펙트럼이다. 사용된 광원은 514.5 nm/10 mW의 Ar⁺ 레이저이었으며, 스펙트럼 측정시 chopper는 80 Hz로 구동하였다. 그림 9에 측정 장치의 모식도를 나타내었다. 형광파장의 주 피크는 1064 nm에 위치하였으며, 각 피크는 ⁴F₂₃→⁴I_{1/2}의 유도방출 천이에 해당된다.¹⁰⁾

4.4. 레이저 발진

그림 10은 제조된 직경 6.35 mm, 길이 100 mm의 Nd:YAG 단결정 막대 (Nd농도 0.9 at%)로부터 CW 레이저를 발진시켰을 때의 입력 및 출력치를 나타낸 것이다. 출력은 최대 70 W까지 측정하였는데, 발진문턱값은 1.3 kW, 효율은 1.64%였다. 한편 3.5 kW의 입력치로 8시간 연속하여 레이저를 발진시켰을 때 출력은 53.6±0.6 W이었고 출력 안정도(stability)는 약 ±1%이었다. 그러나 본 실험은 자체적으로 레이저 발진기를 제작하는 과정에서 Kr lamp와 Nd:YAG 막대의 길이가 일치하지 않았기 때문에 Kr lamp의 중심부에서 발열되는 빛만 레이저 발진용 여기에 사용되었고 양 끝단의 각

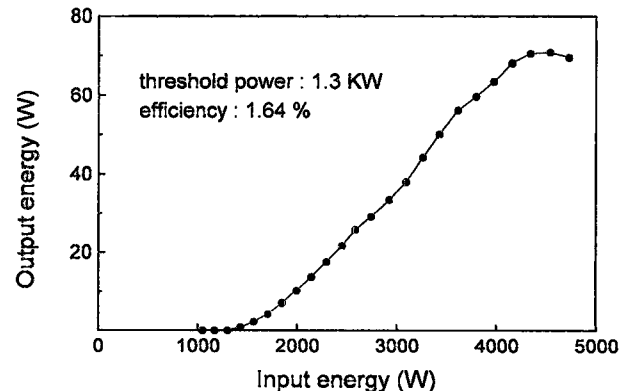


그림 10. Nd:YAG 레이저의 출력 특성.

각 약 25 mm 정도가 cavity 밖으로 노출되었기 때문에 실제 발진문턱값은 이보다 낮으며, 레이저 발진 효율은 약 2% 이상일 것으로 추측된다.

된 레이저는 8시간 연속 사용할 때 평균출력 53.6 W이었고 출력 변동 범위는 약 ±1% 이었다.

V. 결 론

Czochralski 방법에 의해 육성시킨 단결정을 직접 절단, 가공 및 연마하여 1064 nm의 CW 레이저를 발진시킬 수 있었다. 단결정 육성시 온도기울기가 품질에 큰 영향을 미치는 것이 확인되었는데 0.5 mm/h로 성장할 경우에는 용액내 수직방향의 온도기울기가 40°C/cm 이상이 적정 온도기울기임을 알 수 있었다. Nd³⁺ 이온이 첨가되어 육성된 단결정은 810 nm대에서 강한 흡수 파장이 관찰되었으며, 형광 스펙트럼 분석으로 정확한 1064 nm의 레이저 발진 peak를 관찰하였다. 레이저 발진은 Nd³⁺ 이온이 0.9at%, 직경 6.35 mm, 길이 100 mm의 막대로부터 최대 70 W까지의 레이저 발진이 가능하였으며, 이 때의 발진문턱값은 1.3 kW, 효율은 1.64% 정도로 측정되었으나 실제 효율은 약 2% 이상일 것으로 추측된다. 발진

참고문헌

[1] 유영문, Ph.D. thesis, (고려대학교, 1994).
 [2] J. Czochralski, Z. Physik, Chem, **92**, 219 (1917).
 [3] 배소익, 이상호, 김한태, 한국결정학회지, **7**, 1 (1996).
 [4] C. D. Brandle, *Crystal Growth*, edited by B. R. Pamplin, Pergamon Press, 288(1979).
 [5] K. Shiroki, Y. Kuwano, Nippon Kagaku Kaishi, **7**, 940 (1978).
 [6] R. A. Laudise, The Growth of Single Crystals, Prentice-Hall. Inc., New Jersey, **106**, 1970.
 [7] J. R. Carruthers, J. Crystal. Growth, **36**, 212 (1977).
 [8] 김한태, 이상호, 배소익, 정수진, 한국요업학회지, **34**, 1015 (1997).
 [9] W. R. Wilcox, J. Crystal Growth, **7**, 203 (1970).
 [10] 김병태, 레이저 공학, (상학당, 1993) pp 31-49.

Growth of Nd : YAG single crystal by czochralski method and characteristics of laser generation

Sang Ho Lee, Han Tae Kim, So Ik Bae,

New Ceramic Research Team, SsangYong Research Center, P.O. Box 12, Yuseong, Taejeon 305-345, Korea

Su Jin Chung

School of Material Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

(Received December 22, 1997, Revised manuscript received May 4, 1998)

Nd:YAG single crystal widely used as solid state laser was grown by Czochralski method. <111> single crystal with 0.9at% of Nd³⁺ was grown from the Czochralski furnace with a automatic diameter control system. The vertical temperature gradient in the liquid was the major factor that influence the crystal quality, and the crystal diameter was controlled by the home made computer program. The crystal boule with Φ50 mm × 1100 mm effective size was cut, polished, and antireflection coated. The optical evaluation such as absorption spectrum, fluorescence spectrum coincide with typical features of Nd:YAG single crystal. The laser rod was assembled into the CW laser generator with a Kr lamp. The maximum CW laser output was 70 W and the threshold power and efficiency was 1.3 kW and 1.64% respectively.