

고출력 microchip laser용 Yb:YAG 단결정의 결정성장 및 분광 특성

Crystal Growth and Spectroscopic Properties of Yb:YAG Crystals for High Power Microchip Laser Applications

유영문, 정석중, 이성영*, 김병호*
 한국화학연구소, *고려대학교 재료공학과
 ymyu@pado.kriect.re.kr

Yb³⁺ 이온은 InGaAs LD 및 Ti:sapphire 레이저로 펌핑할 수 있는 940 nm에서의 흡수대를 가지고 있고, 1.03 μm의 형광방출 특성을 가지고 있으며, 지금까지 알려진 1 μm 파장대의 레이저 활성이온 중에서 가장 적게 열을 발생하는 특성을 가지고 있음이 알려져 최근에는 Yb³⁺ 이온을 첨가한 여러 가지 레이저 매질이 연구되고 있다.[1] 그 중에서도 Yb³⁺ ion doped yttrium aluminum garnet (Yb:YAG) 단결정은 충분히 넓은 흡수선폭, 좋은 열광학적 특성, 고출력 작동을 하게 하는 stokes shift, 그리고 LD에 의한 펌핑을 가능하게 하는 940 nm 영역에서의 흡수 및 긴 여기시간을 가진 이상적인 매질로 알려져 있다.[2] 이러한 특성으로 인해 Yb:YAG 단결정은 femtosecond 레이저 등 각종 레이저 시스템의 소형화[3]를 가져왔으며, 레이저 결정의 양산 가능성 및 레이저 기기의 소형화에 따르는 시스템의 가격 감소가 가능하므로 Yb:YAG microchip 레이저는 향후 고출력 레이저 기기 산업의 증추가 될 것으로 기대된다.

한편 결정성장의 관점에서 볼 때 Nd:YAG 단결정에 비해 결정성장 속도가 크고, 대구경의 단결정을 낮은 결함 밀도의 고품질 결정으로 용액인상법에 의해 결정 성장시킬 수 있는 조건을 갖추고 있다. 그러나 이러한 Yb:YAG 단결정의 장점에도 불구하고 이 단결정에 대한 부유대용융(Floating Zone)법 및 용액인상(Czochralski)법에 의한 결정성장 연구 보고는 매우 드물며, Yb³⁺ 이온의 농도에 따르는 결정성장 특성 및 분광 특성은 보고되지 않고 있다.

따라서 이 연구에서는 고출력 microchip laser 소자를 개발하기 위하여 부유대용융법 (Floating Zone 법) 및 용액인상법 (Czochralski법)에 의하여 Yb:YAG 단결정을 고품질로 성장하기 위한 결정성장 조건을 조사하고자 하였다. 또한 Yb³⁺ 이온의 주입 농도에 따르는 결정성장 특성의 변화, 흡수 특성 및 형광 특성 등 분광물성의 변화를 조사하고자 하였다. 또한 성장된 결정을 이용하여 microchip laser 소자의 제조를 시도하였다.

Yb³⁺ 이온의 주입농도의 변화에 따르는 결정성장 특성의 변화 및 분광 특성의 변화를 조사하기 위하여 부유대용융법에 의해 결정성장을 시도하였다. 부유대용융법에 의한 결정성장시 질소 분위기 중에서 x = 5, 10, 15, 20, 25, 33, 50, 75 및 100 at%의 값을 갖는 (Y_{1-x}Yb_x)₃Al₅O₁₂ 화학식의 용액 조성으로부터 9개 조성의 Yb:YAG 단결정을 성장하였다. 양질의 결정성장 조건은 결정성장 속도 3.5 mm/h 및 회전 속도 20 rpm에서 얻어졌다. 성장된 결정은 연한 하늘색의 투명하였으며, 결정형이 잘 발달되어 있었다. 결정의 색은 결정성장 중에 산소 결핍에 의해 발생한 것으로서 결정성장 후 공기 분위기 중에서 1500°C에서 2 시간 동안 열처리함으로써 무색 투명하게 변화하였다.

성장된 결정의 조성 변화에 대한 결정 구조의 변화를 분말법에 의한 X선 회절법에 의하여 조사하였으며, 편광계에 의하여 결정 중에 분포하는 응력복굴절상을 조사하였다. 실험 결과, Y₃Al₅O₁₂와 Yb₃Al₅O₁₂의 혼합상에서 격자상수의 선형적 변화가 관찰되었으며, 모두 동일한 garnet 구조를 갖는 것으로 동정됨으로써 전율고용체를 형성하는 것으로 판단되었다. 부유대용융법은 비교적 높은 온도구배 환

경 하에서 자라므로 결정 직경이 크게 성장하는 경우 결정의 중앙부에 기포가 발생되어 균열이 발생하기 쉬웠고, 결정 직경이 작은 경우에도 큰 응력유도 복굴절상이 존재함이 검출되었다.

실온에서 FT-IR 분광광도계에 의하여 흡수스펙트럼을 측정된 결과 940, 970 및 1030 nm를 중심으로 선폭확대된 흡수대가 관찰되었다. 각 파장에서의 Yb^{3+} 주입 이온의 농도 변화에 따르는 흡수계수를 측정된 결과 주입 이온의 농도에 비례하여 선형적으로 증가하였다. 실온에서 형광방출 스펙트럼 및 형광수명을 측정된 결과 1031과 1051 nm를 정점으로 하여 1020-1050 nm 범위에서 선폭 확대된 형광방출 특성이 관찰되었다. 이같은 형광특성은 ${}^2F_{5/2}(1) \rightarrow {}^2F_{7/2}(3)$ and ${}^2F_{5/2}(1) \rightarrow {}^2F_{7/2}(4)$ 에 의한 형광방출인 것으로 분석되었다. 성장된 결정의 형광수명은 주입농도에 따라 2.7 - 0.9 ms의 값으로 측정되었는데 이는 radiation trapping현상에 의하여 다소 높게 측정된 것으로 생각되지만 약 30-50%의 이온 주입이 있는 경우 형광수명이 현저히 감소하는 현상을 관찰할 수 있었다.

부유대용융법에 의하여 얻어진 결정성장 조건 및 분광특성에 근거하여 용액인상법에 의하여 대형 결정의 성장을 시도하였다. 용액인상법에 의한 결정성장시 질소 분위기 중에서 x = 5, 15 및 25 at%의 값을 갖는 $(Y_{1-x}Yb_x)_3Al_5O_{12}$ 화학식의 용액 조성으로부터 3개 조성의 Yb:YAG 단결정을 성장하였다. 양질의 결정성장 조건은 결정성장 속도 2 mm/h 및 회전속도 10 rpm에서 얻어졌다. 이 조건 하에서 성장된 결정의 일 예를 Fig. 2에 나타내었다. 성장된 결정은 편광계에 의한 결정결함 분석 결과 중앙에 존재하는 core facet 이외에는 결정결함이 검출되지 않은 양질의 결정임이 확인되었다. 성장된 결정을 이용하여 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 직경 3 mm, 길이 3 mm 크기의 microchip laser rod의 시제품을 제조하였다.

참고문헌

1. L. D. Deloach et al., IEEE J. Quantum Electronics, 29(4), 1179-1190 (1993)
2. P. Lacovara et al., Opt. Lett., 16, 1089-1091 (1991)
3. A. Giesen et al., Appl. Physics B, 58, 365-372 (1994)

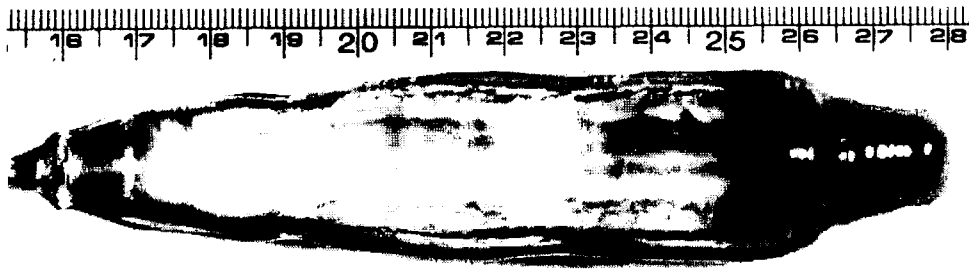


Fig 1. Photograph of 5% Yb:YAG single crystal grown by Czochralski method.

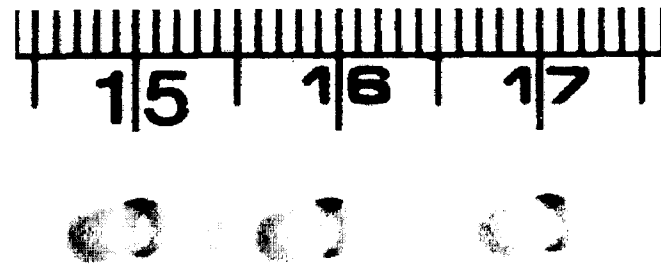


Fig.2 The prototypes of microchip laser devices fabricated from Fig. 1.