'99 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

원자력 산업용 전고체형 단일종모드 Ti:Sapphire 레이저의 설계

Design of All Solid State Tunable Single-Mode Ti:Sapphire Laser for Nuclear Industry

이종훈, 남성모, 이용주, 이종민
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150번지, 305-353

Roland E. Horn and Klaus Wendt
University of Mainz, Staudinger Weg 7 D-55099 Mainz

요 약

다이오드 여기 전고체형 녹색광 레이저를 사용하여 펌핑하는 Ti:Sapphire 레이저를 설계하였다. 여기용 녹색광 레이저의 출력은 20 W, 반복율 10 kHz를 가정하였다. Ti:Sapphire 레이저는 에탈론을 사용하여 단일종모드 발진이 이루어지게 설계하였다. 레이저출력의 시간적 변화와 각 종모드들의 증폭율을 비율방정식을 사용하여 계산하였으며, 단일모드 발진이 가능함을 보였다.

Abstract

We designed a Ti:Sapphire laser pumped by a diode laser pumped solid state laser (DPSSL). The DPSSL was intra-cavity frequency doubled and it had 20 W output power. The Ti:Sapphire laser was designed for single longitudinal mode lasing. For single mode lasing, the laser used several solid etalons. We simulated temporal evolution of the laser pulse and single pass amplification rate of the photons in each modes from rate equations. From the result, we found that single mode lasing is viable in this cavity.

1. 서 론

다이오드 여기 전고체형 레이저 (Diode Pumped Solid State Laser; DPSSL)는 종래의 섬광등 (flashlamp) 여기 레이저에 비하여 효율이 매우 높은 장점을 갖고 있다. 또한, 레이저의 수명이 매우 길어져 이 레이저를 이용한 여러 가공장치의 안정성과 생산성을 매우 높이고 있다. 한편, DPSSL을 분광연구에 사용하고자하는 시도가 증가하고 있다. 분광 연구에 사용하는 레이저는 임의로 파장을 가변시킬 수 있어야 원자의 여기준위에 공명시킬 수 있다. DPSSL에서는 고정된 파장의 레이저만 발생된다. 한편, 색소레이저나 Ti:Sapphire와 같은 파장을 가변시킬 수 있는 레이저는 자체적으로 발진이 되지 못하고 다른 레이저에 의하여 여기되어야만 레이저 발진이 이루어진다. 따라서 DPSSL을 이용하여 파장 가변 레이저를 여기 시킨다면 장수명, 고효율, 파장 가변성의 장점을 가진 유용한 레이저 시스템이 될 것이다. 파장가변 레이저 중에서 색소레이저는 용액을 사용하므로 레이저의 수명이 매우 짧은 것이 단점이다. 이득매질이 고체의 결정으로 이루어진 Ti:Sapphire 레이저는 수명이 반영구적이다. 결국, DPSSL을 사용하여 Ti:Sapphire 레이저를 여기하면 레이저의 전 부분이 고체로 이루어져 이상적인 특성을 가진 레이저를 구성하게 될 것이다.

본 연구는 장수명, 고효율, 파장가변성의 장점을 가진 전고체형 Ti:Sapphire 레이저를 개발하는 것이 목표이다. 파장 가변 레이저는 원자력 산업의 여러 분야에 있어 매우 유용하게 활용되고 있다. 원자력 산업에서 빈번히 사용되는 란타나이드 계열이나 악티나이드 계열에 속하는 각종 원자를 여기시킨 다음 원자에서 나오는 형광을 측정하거나, 여기 된 원자를 다른 레이저를 사용하여 이온화시킨 다음 질량을 측정하면 매우 고감도의 측정 시스템이 된다. 이 시스템을 사용하면 극미량으로 존재하는 원소도 검출이 가능하게 되어 환경에 큰 영향을 미치는 각종의 핵종 원소를 감시하는데 사용할 수 있다. 또한 레이저의 지향성이 매우 우수한 점을 이용하면 매우 먼거리에 있는 원소도 여기시켜 형광을 측정할 수 있게 된다. 이 같은 방법으로

방사능 오염 지역에 접근하지 않고도 핵종의 분포를 삼차원적으로 측정할 수도 있다.

원자의 분광선은 흡수선폭이 매우 좁다. 더구나 원자력산업에서 활용되는 원소는 대부분 그 분광선이 매우 복잡하다. 본 연구에서 개발하고자 하는 시스템은 전고체형 레이저의 장점인 고효율을 유지한 채, 원자의 여기에 필요한 정도의 고분해능 특성을 가진 레이저이다. 본문에서는 이러한 목적을 달성하기 위하여 설계한 레이저의 특성을 전산 시늉한 결과를 설명하겠다.

2. 본 론

2.1 단일 종모드 공진기 구조의 선택

분광연구에 필요한 고출력을 달성하기 위하여 펄스형 레이저를 선택하였다. DPSSL에서 펄스레이저를 발생시키기 위해서는 펄스형 다이오드로 여기시키거나 연속발진 다이오드로 여기시킨 다음, acousto-optic Q-switching 등을 사용하여 펄스 출력을 발생시켜야 한다. 펄스 다이오드로 발생시키는 경우, 펄스 반복율은 대개 1 kHz 이하로 낮은 편이나, 펄스당 에너지는 수 J까지도 가능하다. 연속 발진 다이오드 레이저를 사용하는 경우, 반복율은 30 kHz 이상까지도 가능하나, 펄스당 에너지가 수 mJ 정도로 낮게 된다. 어느 경우이든 평균 출력은 수 kW까지도 도달이 가능하다. 본 연구에서는 연속발진 다이오드를 사용하여 펌핑한 고반복율 DPSSL을 Ti:Sapphire 레이저 여기에 사용하는 것을 가정하였다.

DPSSL이 갖는 고효율의 장점을 유지하기 위해서는 파장 가변 레이저 공진기 또한, 손실이 매우 적은 구조를 가져야 한다. 연속발진 레이저의 경우, 고리형(ring) 공진기를 사용하여 단일모드 레이저를 발진시키는 것이 일반적이다. 그러나 단일모드에 가까운 정도의 매우 좁은 선폭을 가지는 펄스형 Ti:Sapphire 레이저의 공진기 유형에는 여러 가지가 있다. 펄스형의 경우는

연속발진에 비하여 이득은 크되, 증폭시간이 매우 짧은 특징이 있다. 이러한 특성 때문에 연속 발진 레이저에서 요구되는 저손실 공진기를 사용하지 않고 일반 색소 레이저와 같이 회절 격자를 사용하기도 한다[1]. 이 공진기는 매우 단순한 구조로도 단일모드 레이저를 발생시킬 수가 있는 것이 장점이다. 그러나 공진기 손실이 매우 크고, 공진기에 너무 많은 여기 레이저를 입사하면 선폭 특성이 저하되는 단점이 있어서 고출력 레이저를 발생시키기 위해서는 공진기-증폭기 시스템을 사용하여야 한다[2].

단일모드 레이저가 잘 개발된 연속 발진 레이저를 이용하는 방법도 있다. 연속발진 색소레이저를 증폭하거나[3], 연속발진 Ti:Sapphire 레이저를 Ti:Sapphire 결정을 이용한 증폭장치로 출력을 증폭하여[4] 펄스형 단일모드 레이저를 발생시키는 방법이다. 최근에는 700 nm에서 900 nm 사이의 여러 파장대에서 발진하면서도 단일모드로 연속발진하는 다이오드 레이저를 활용하는 방법이 활발히 연구되고 있다[5]. 다이오드 레이저는 간편하면서도 소형이어서 사용이 매우 편리하나 Ti:Sapphire 레이저로 발진가능한 전 파장을 모두 다이오드 레이저로 발생시킬 수가 없다는 한계가 있다.

본 연구에서 사용하고자 하는 여기 레이저는 펄스폭이 100-200 ns 사이이고, 펄스에너지가 2-4 mJ 사이이다.[6] 펄스폭이 상당히 길고 첨두 출력이 낮은 편인 점을 고려하면, 기존의 연속발진 레이저에서 사용되던 공진기 구조를 그대로 사용하는 것이 유리하리라 본다. 일본의 JAERI에서는 본연구에서 사용하는 레이저와 비슷한 펄스 특성을 가진 섬광등 여기 Nd:YAG 레이저를 여기레이저로 사용하여 V-형 공진기 구조를 가진 단일 종모드 색소 레이저를 발진시켰다.[7] 따라서 동일한 구조를 가진 공진기를 사용하여 Ti:Sapphire 레이저를 개발하는 것도 가능하리라 여겨지며 본 연구에서 고찰하고자 한다.

2.2 단일 종모드 공진기의 설계

그림 1은 본 연구에서 사용한 V-형 공진기의 구조를 나타낸다. Ti:Sapphire 결정은 곡면경 사이의 중심에 놓이게 되며, 긴팔이 나와 있는 부분에 여러개의 에탈론이 배치된다. 공진기 전체의 길이는 60 cm 이며, 곡면경의 곡률은 20 cm, 곡면경으로부터 평면경 사이의 거리는 40 cm이다. 결정의 길이는 5 mm이며 두 팔 사이의 각은 7.5도로 두었다.

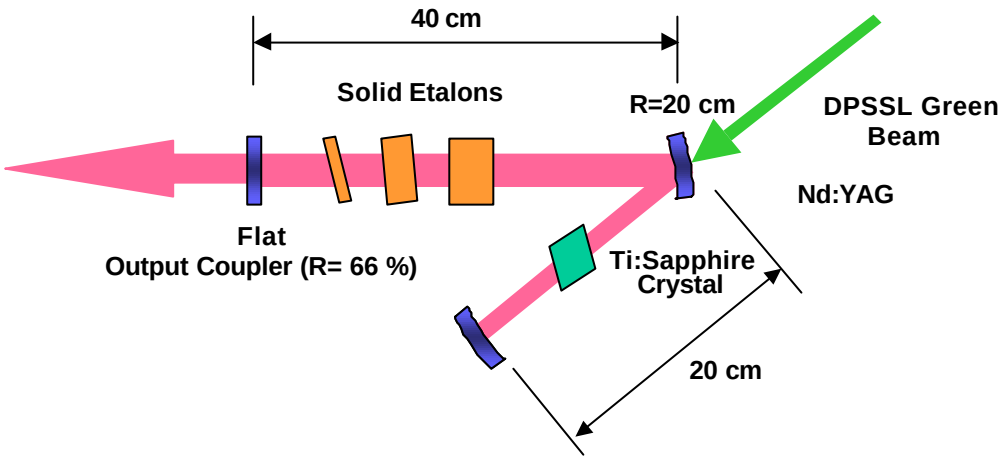

그림 1. 단일종모드 Ti:Sapphire 레이저의 공진기 구성도

DPSSL에 의하여 여기된 Ti:Sapphire 결정에서는 발진가능한 여러 모드가 동시에 증폭되면서 모드 사이의 경쟁이 발생하게 된다. 이 과정에서 각 모드들의 손실을 적절히 조절함으로써 단일모드 발진이 가능하게 유도한다. 단일모드 발진이 가능한 조건을 찾고 레이저가 발진하는 과정을 계산하기 위해서 비율방정식을 수립하고 수치해석법으로 풀었다. 이 과정에서 레이저 펄스의 시간적 변화도 계산할 수 있었다. Ti:Sapphire 레이저는 4 준위계 에너지 준위를 가진 시스템이지만, 본 연구에서는 레이저 발진이 이루어지는준위만 고려하여 2 준위계로 단순화하였으며, 사용한 비율방정식은 아래와 같다[8].

$$\frac{dN_2}{dt} = -\frac{c\sigma}{L\pi\omega^2} N_2 \sum_i (p_i + 1) + \frac{\lambda_{pump} E_{pulse}}{hc} (1 - e^{-at}) \beta^2 t e^{-\beta t} - \frac{N_2}{\tau_2} \quad (1)$$

$$\frac{dp_i}{dt} = -\frac{c\sigma}{L\pi\omega^2} N_2 (p_i + 1) - \frac{p_i}{\tau_i^{ph}} \quad (2)$$

위 식에서 N_2는 레이저 발진이 이루어지는 상위 준위로 여기된 Ti^{3+} 이온의 밀도이며, c는 광속이고, σ는 여기 방출 단면적으로써 파장에 따라 $3 \sim 5 \times 10^{-23}\ m^2$의 값을 갖는다. p_i는 공진기 내부에서 발진하는 모드 i 에 있는 광자의 수, L은 공진기 길이, λ_{pump}는 여기용 DPSSL 레이저의 파장으로써 $532\ nm$ 이며, E_{pulse}는 Ti:Sapphire 결정에 흡수된 여기 레이저 펄스의 에너지이다. τ_2는 상위 준위의 형광수명으로써 $3.2\ \mu s$로 알려져 있다. 레이저 펄스의 시간적 모양은 $te^{-\beta t}$의 함수를 따르는 것으로 가정하였으며, 이 식에서 β는 DPSSL의 펄스폭 (FWHM) Δt 와 $\beta = 2.4464/\Delta t$ 의 관계가 있다. τ_i^{ph} 는 공진기 내부에서 i 모드에 있는 광자의 감쇄시간이며, 이는 공진기 내부에 비치된 에탈론에서의 손실을 포함한 공진기내부의 손실 f_{loss}와 출력경에서의 손실 f_{out} 에 의하여 아래의 식으로부터 결정된다.

$$\frac{1}{\tau_i^{ph}} = -\frac{c}{2L} \ln(1 - f_{out}) - \frac{c}{2L} \ln(1 - f_{loss}) + \frac{c}{L} \ln\left[1 + \frac{4F^2}{\pi^2} \sin^2\left(\frac{\delta_i}{2}\right)\right] \quad (3)$$

위 식에서 δ_i 는 에탈론의 자유대역폭 (free spetral range ; FSR)을 $\Delta\nu$ 라 했을 때, i 모드의 광자의 주파수 ν_i 에 의하여 $\delta_i = 2\pi\nu_i/\Delta\nu$ 로 결정되어지는 변수이며 에탈론에서 투과도를 결정한다. F는 에탈론의 Finesse를 나타낸다.

위 비율방정식을 Runge-Kutta 방법으로 풀었다. 그림 2는 600 ns의 시간동안에 일어나는 밀도반전과 공진기 내의 광자수의 시간적 변화를 보여준다. 계산에서는 레이저빔의 시간폭은 150 ns, 에너지는 3 mJ, 결정에서의 빔의

직경은 130 μm로 가정하였다. 발진파장에서의 유도방출 단면적은 $4\times10^{-23}\ m^2$, 흡수계수는 280/m, 결정의 길이는 5 mm로 가정하였다. 초기의 종모드 수는 7개, 공진기 길이는 60 cm이다. 에탈론의 Finesse는 12, FSR은 10 GHz로 가정하였다. 에탈론의 반사율이 90 % 일 때 단일 통과시의 손실이 10-15 % 정도이다. 3개의 에탈론을 사용하므로 공진기를 한번 왕복할 때 에탈론에 의한 손실이 11 % 정도라고 가정한다면 $1-(1-0.11)^6\approx0.503$ 정도이다. 출력경의 반사율은 66 %로 두었다.

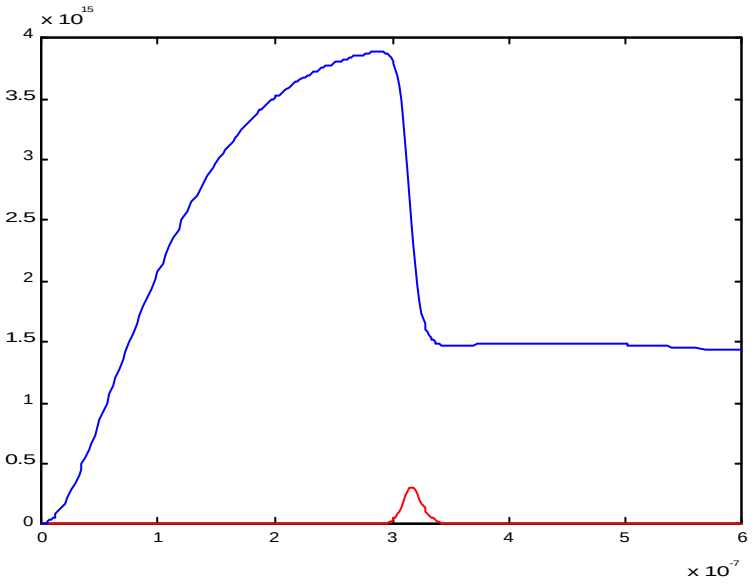

그림 2. 단일종모드 Ti:Sapphire 레이저 공진기내의 결정에서의 밀도반전(위쪽 그래프)과 광자수(아래쪽 그래프)의 시간적 변화

그림 3은 각 모드에 속한 광자가 이득매질 (Ti:Sapphire 결정)을 한번 지나면서 증폭되는 율을 나타낸다. 모드에 따라서 증폭율이 다른 이유는 각 모드들의 파장 차이로 인하여 에탈론에서의 투과율이 다르기 때문이다. 그림 2에서 보듯, DPSSL 레이저와 Ti:Sapphire 레이저 사이에는 약 150 ns 정도의 시간 지연이 있다. 이 시간 지연 동안에 각 모드가 증폭을 거듭하는 과정에서 모드 사이의 경쟁이 생긴다. 공진기의 길이가 약 60 cm이면, 150 ns 시간

사이에 레이저 펄스는 이득매질과 에탈론을 약 35번 왕복하며 이는 70번 단일 통과하는 것에 해당한다. 그림 3에서 가장 증폭이 잘되는 모드의 증폭율을 f_1 이라 하고, 이웃한 모드의 증폭율을 f_2 라 하면 n번 통과한 다음에 두 모드 사이의 광자수의 비는 $(f_1/f_2)^n$이 된다. 단일 모드 레이저 발진이 이루어지고 있다고 판단하는 기준을 이웃한 모드의 광자수에 비해 중심 모드의 광자수가 10^4배 이상으로 많은 상태라고 정의한다면, f_1/f_2 의 비는 $(10^4)^{1/70} \approx 1.14$ 정도가 되면 단일모드 발진이 가능하게 된다. 그림 3에서의 증폭율을 보면, 증폭율의 비가 1.14보다는 모두 크므로 단일모드 발진이 예상된다. 그림 4에 각 모드의 광자수를 실제 계산한 결과가 나와 있으며 단일모드로 발진함을 보여준다.

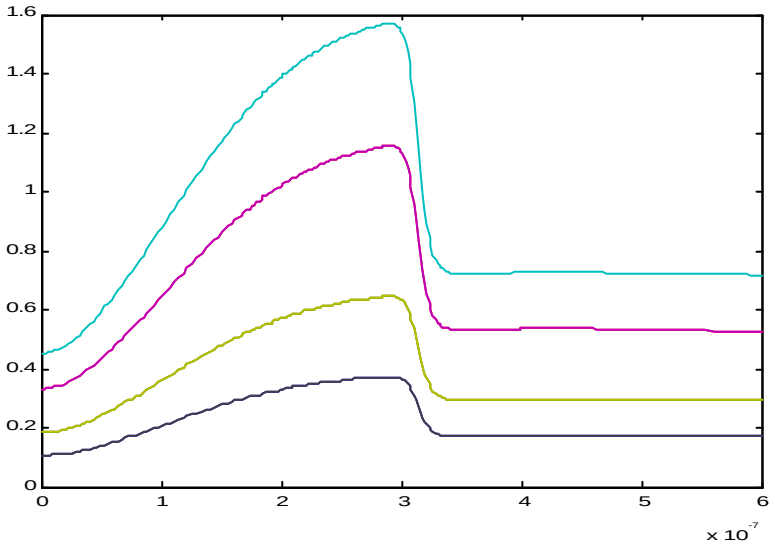

그림 3. 레이저 공진기내부를 1회 통과할 때의 각 종모드의 증폭율

만일 여기레이저를 레이저 결정에 매우 강하게 집속시킨다면, 증폭율도 매우 상승한다. 이 경우 여기 이온의 밀도가 급속히 감소하면서 레이저 발진 개시 시간도 앞당겨 질 것이다. 그 결과, 공진기 내에서의 왕복회수 n 이 작

아져서 단일모드 발진이 힘들어지리라 예상된다. 또한 에탈론의 FSR을 크게 하고 Finnesse를 줄인다면 모드 사이의 증폭율 차이가 작아져 다중모드 발진을 할 것이 예상된다.

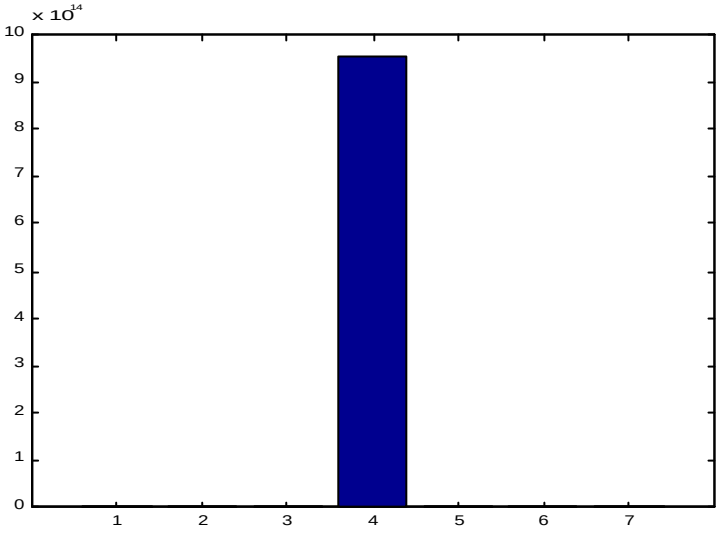

그림 4. 레이저 출력에서 각 모드에 포함된 광자수.

3. 결 론

펄스폭이 수백 ns정도로 긴 DPSSL을 이용하여 단일모드 Ti:Sapphire 레이저를 발진시키기 위한 공진기를 설계하였다. 또한, 수치해석을 통하여 단일모드 발진이 가능한 제반 조건을 조사하였다. 그 결과, 공진기에서 에탈론의 FSR과 Finesse를 적절히 조절하면 단일모드 발진이 가능함을 보았다. 현재, 설계한 공진기를 제작하여 발진 특성을 고찰하기 위한 시도가 진행중이다.

References

1) K. W. Kangas, D. D. Lowenthal, and C. H. Muller III, Opt. Lett. 14, 21 (1989)

2) J. C. Barnes, N. P. Barnes, and G. E. Miller, IEEE J. Quantum Electron., 24, 1029 (1988)

3) P. Georges, F. estable, F. Salin, J. P. Poizat, P. Grangier, and A. Brun, Opt. Lett., 16, 144 (1991)

4) N. J. vasa, . Tanaka, M. maeda, O. Uchino, Appl. Phys. B, 62, 51 (1996).

5) A. Kasapi, G. Y. Yin, and M. Jain, Appl. opt., 35, 1999 (1996).

6) Hee-Jong Moon, Jonghoon Yi, Yongjoo Rhee, Byungheon Cha and Jongmin Lee, J. Kor. Phys. Soc., 35, 254 (1999).

7) Y. Maruyama, M. Kato, M. Ohba, T. Arisawa, Jpn. J. Appl. Phys., 34, L1045 (1995).

8) M. R. H. Knowlea and C. E. Webb, Optics Comm., 89, 493 (1992).