

생체의용계측을 위한 극초단 Cr4+:Forsterite 레이저의 이론 해석

김신자* · 황대석* · 이승용* · 고대영* · 류광렬* · 이호근** · 이영우*
*목원대학교 · **(주)한백전자

Theoretical Analysis of Ultra Short Pulse Cr4+:Forsterite Laser for the Biomedical Applications

Sheen-ja Kim* · Dae-seok Hwang* · Seung-Young Lee* · Dae-young Ko* · Kwang-Ryol Ryu*
Ho-Guen Lee** · Young-Woo Lee*
*Mokwon University · **Hanback electronics co., ltd.

요 약

본 논문에서는 생체 계측용 OCT의 광원으로 사용될 광대역 Cr4+:Forsterite 레이저의 동작 특성을 알아보기 위해 이론 해석과 수치 해석을 수행하였다. 수치해석에 사용된 Cr4+:Forsterite 매질 모델은 직경이 3mm이고, 길이는 5mm로 0.04%의 크롬 도핑 농도를 갖는다. 해석 결과에 의해 펄핑 광원이 600mW일 때 발진하고, 펄핑 광원이 5W 부근일 때 포화된다는 것을 알 수 있었다.

ABSTRACT

We present the theoretical and numerical analysis of ultra short pulse Cr4+:Forsterite laser for the biomedical. We use a Cr4+:Forsterite that has a diameter of 3mm, a crystal length of 5mm and a chromium concentration of 0.04%. As a result of this experiment, We can know that lasing at pump power of 600mW, and saturated at pump power of 5W around.

키워드

Cr4+:Forsterite, Biomedical application, Ultra short pulse

1. 서 론

의학과 생물학에서 광학 기술의 응용은 현미경의 출현과 레이저의 발명으로 인체의 내부기관을 관찰 할 수 있는 놀라운 성과를 얻어냈다.

의학 분야에서의 의료영상은 환자를 정확하게 진단하고 치료하기 위한 중요한 자료이다. 기존의 의료영상 획득기술로는 X-ray, 초음파, MRI (Magnetic Resonance Imaging), CT (computed Tomography)가 있으며 100 μ m~1mm의 해상도로 large-scale의 측정을 얻었다. 그러나 보다 미세한 구조를 측정하기 위한 기술이 요구되었으며, 이에 따라 OCT (Optical coherence Tomography)가 부

각되었다.

OCT는 생체조직에서 내부 미세구조의 고해상도 단면을 얻는 기술로 OCT의 광원은 광대역폭, 근적외선 파장, 높은 방출 에너지 등을 필요로 한다. 또한 OCT의 광원으로는 SLD, EELED, 극초단 레이저 등이 있다. 그러나 SLD나 EELED의 경우 방출 에너지가 요구치에 미치지 못하여 나쁜 SNR을 갖고 SNR의 문제를 해결한 레이저의 경우 원하는 대역폭을 갖지 못하는 단점이 있다.

본 논문에서는 이러한 단점을 보완하여 고출력과 넓은 대역폭을 얻을 수 있는 광대역 Cr4+:Forsterite 레이저의 이론해석과 수치해석을 수행하였다.

II. Cr4+:forsterite 레이저 수치해석 모델 같다.

1. Cr4+:forsterite 레이저의 에너지 모델

일반적인 4-level 에너지 구조에서는 이온은 일정한 에너지를 흡수하여 최고 레벨로 여기 되고, 여기된 이온은 비 방사 천이를 거쳐 빛을 방출하고 다시 비 방사 천이를 거쳐 바닥상태로 떨어지는 과정을 겪는다. 그러나 Cr4+ 도핑 된 경우의 구조는 그림 1에서 보듯이 여기 상태 흡수가 가능하다.

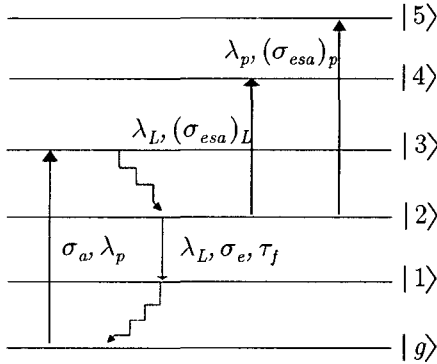


그림 1. Cr4+ 도핑 된 레이저 모델

그림에서 보듯이 바닥상태 |g>에서 여기 상태 |3>으로 여기된 이온은 비 방사 붕괴로 빠르게 상태 |2>로 천이된다. 상태 |2>로 천이된 이온은 펌핑과 레이징 파장 λ_p, λ_L 에 의하여 상태 |4>나 |5>로 여기 되기도 하고 상태 |1>로 방출되기도 한다. 이때, 상태 |4>나 |5>로 여기된 이온은 비 방사 천이의 결과로 다시 |2>로 돌아간다. 상태 |3>과 |1>로부터의 비 방사 천이가 매우 빠르다고 가정하면 이들의 밀도는 무시할 수 있다. 따라서 여기 레벨 분포 밀도 $N_2(r, z)$ 는 다음과 같다.

$$N_2(r, z) = N_T \frac{I_p(r, z)/I_{sa}}{1 + I_c(r, z)/I_{se} + I_p(r, z)/I_{sa}} \quad (1)$$

여기서 $N_T(N_T = N_2(r, z) + N_g(r, z))$, N_g 는 바닥상태에서의 분포 밀도, $I_p(r, z)$ 는 λ_p 에서 펌프 방사의 강도, $I_c(r, z)$ 는 λ_L 에서 모든 cavity 강도이며, I_{sa} 와 I_{se} 는 각각 흡수와 방출 포화 농도이다.

2. Cr4+:forsterite 레이저의 이론 해석

그림 2는 미소 평면 dz 를 지나가는 펌핑과 레이저 빔이다. 단위 시간당 펌프 빔으로부터 제거된 광자들의 총 수는 유도된 바닥상태와 여기 상태 흡수를 거쳐 높은 레벨로 여기된 이온들의 수와

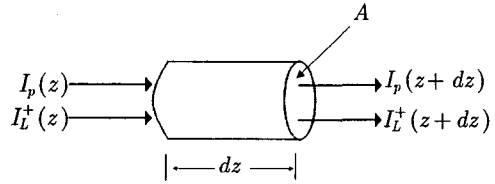


그림 2. 면적이 A인 미소 평면 dz를 지나가는 펌핑과 레이저 빔

$$\frac{\partial I_p}{\partial z} = -(\sigma_a N_g + (\sigma_{esa})_p N_2) I_p \quad (2)$$

$(\sigma_{esa})_p$ 는 펌핑 파장 λ_p 에서 단위 면적당 여기 상태 흡수이다. 그리고 N_2 와 N_g 의 안정 상태의 미분 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{I}{I_p} \frac{\partial I_p}{\partial z} = -\alpha_{p0} \left[\frac{1 + I_c/I_{se} + f_p I_p/I_{sa}}{1 + I_p/I_{sa} + I_c/I_{se}} \right] \quad (3)$$

$\alpha_{p0}(\alpha_{p0} = N_T \sigma_a)$ 는 소신호 미분의 펌핑 흡수 계수이다. counter-propagating 레이저 빔의 미분 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{I_L^{\pm}} \frac{\partial I_L^{\pm}}{\partial z} = \pm \left[\frac{g_T(1-f_L)I_p/I_{sa}}{1 + I_p/I_{sa} + I_c/I_{se}} - \alpha_{L0} \right] \quad (4)$$

f_L 은 레이저 파장에서 표준화된 여기 상태 흡수 강도이고 g_T 는 최대 얻을 수 있는 소신호 미분 이득 계수이다. 식 (3)과 (4)는 Cr4+ 레이저의 파워 분석에 유용하게 사용된다.

펌프 파장과 레이징 파장에서 포화효과를 무시할 수 있는 경우 레이징 문턱 값에 도달하기 위한 필요 흡수 파워는 다음 식으로 주어진다.[1, 2]

$$P_{abs}^{th} = \frac{\pi(w_p^2 + w_L^2)hc(T+L)}{4\sigma_e(1-f_L)\tau_f\lambda_p\eta_p} \quad (5)$$

w_p 와 w_L 은 각각 펌프와 레이저 빔의 초점 크기이고, T는 출력 커플러의 전도, L은 단편의 왕복 cavity 손실, 그리고 η_p 는 펌핑 효율이다. 식 (5)를 정리하면, 펌프 파장에서 여기상태의 흡수는 무시할 수 있고 레이저의 흡수된 power slope 효율은 다음 식으로 계산된다.

$$\eta_{abs} = \frac{\lambda_p}{\lambda_L} \eta_p (1-f_L) \frac{T}{T+L} \quad (6)$$

마지막으로 레이징 문턱 값에 이르기 위한 문턱 흡수 펌프 에너지 E_{abs}^{th} 는 다음과 같다.[2]

$$E_{abs}^{th} = \frac{P_{abs}^{th} \tau_p}{1 - \exp(-\tau_p \tau_f)} \quad (7)$$

P_{abs}^{th} 는 식 (5)에서 주어졌으며 τ_f 는 형광체 수명 시간이다.

3. Cr4+:forsterite 레이저의 극초단 발생 이론 해석

일반적으로 종단 모드 레이저들의 많은 수가 함께 locked 되면, pulse envelope $E_p(t)$ 는 스펙트럼 증폭 분포 $E_p(w)$ 의 식으로 쓸 수 있다.

$$E_p(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} dw [E_p(w) e^{i\Phi_p(w)} e^{iwt}] \quad (8)$$

w 는 각 주파수, $\Phi_p(w)$ 는 위상이다. $\Phi_p(w)$ 는 정확한 mode locking을 하기 위해 w 의 함수에서 상수 값을 갖는다. 그러나 실제적으로는 locked 대역폭이 커지는 것처럼 분산과 비선형 효과는 위상을 왜곡하고 보상 기술은 이득 대역폭의 분산을 최소화 한다.

펄스 사이의 시간 지연 τ 는 간섭계의 arm의 변위 Δl 로 계산하며 그 식은 다음과 같다.

$$\tau = \frac{2\Delta l}{c} \quad (9)$$

여기서 c 는 빛의 속도이다. 동일 직선상에 있는 두 빔을 느린 시간 응답 검출기를 사용하여 검출하면, 생성된 신호는 다음 함수 $A(\tau)$ 에 비례 한다.[3]

$$A(\tau) = 1 + 2G^{(2)}(\tau) \quad (10)$$

이 때 τ 는 식 (9)로 주어졌고, $G^{(2)}(\tau)$ 는 펄스 강도 $I(t)$ 로 표현되며 식은 다음과 같다.

$$G^{(2)}(\tau) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} dt I(t) I(t+\tau)}{\int_{-\infty}^{+\infty} dt I^2(t)} \quad (11)$$

표 1은 Cr4+:forsterite의 이론 해석에 사용되어진 상수 값들이다.

표 1. Cr4+:forsterite의 해석에 사용된 상수

Parameter name	Symbol	Unit	Cr ⁴⁺ :forsterite
Absorption cross section at 1064nm	σ_a	cm ²	1.36-12
Normalized excited-state absorption at $\lambda_p = 1064$ nm	f_p	Dimensionless	0.3-0.48
Stimulated emission cross section	σ_e	cm ²	0.66-3.27
Normalized excited-state absorption cross section at the lasing wavelength	f_L	Dimensionless	0.16
Heat conductivity	k	W/cmK	0.05
Fluorescence lifetime at 273K	τ_f	μ s	3.87
Radiative lifetime	τ_r	μ s	27
thermal lifetime coefficient	τ_{fT}	μ s/°C	0.049
Refractive index	n_0	Dimensionless	1.635

III. 수치 해석 결과

그림은 3은 본 논문에 사용된 Cr4+:Forsterite 매질의 레이저 출력특성 곡선이다.

이론해석에 사용된 Cr4+:Forsterite 매질은 직경이 3mm이고 길이는 5mm이며 출력경은 2%의 투과율을 갖는다.

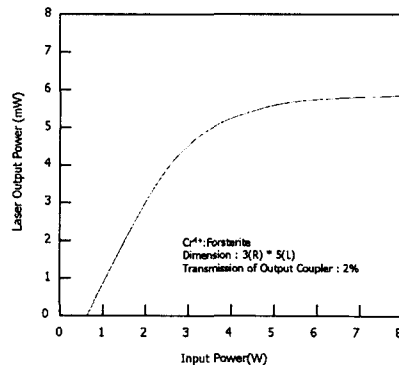


그림 3. Cr4+:Forsterite 매질의 레이저 출력특성

펌핑 광원이 600mW일 때 Cr4+:Forsterite레이저가 발진하며, 펌핑 광원이 약 5W 부근일 때 출력이 포화됨을 알 수 있다.

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.

IV. 결 론

생체 계측용 OCT의 광원으로 사용될 광대역 Cr4+:Forsterite 레이저의 동작 특성을 알아보기 위해 이론 해석과 수치 해석을 수행하였다. 해석 결과에 의해 직경이 3mm, 길이는 5mm, 출력경이 2%의 투과율인 Cr4+:Forsterite는 펌핑 광원이 600mW일 때 발진 하며, 펌핑 광원이 5W 부근일 때 포화된다는 것을 알 수 있었다.

학회 발표에서는 극초단 펄스의 발생과 극초단 펄스폭에 대해 발표한다.

참고문헌

- [1] S.A. Payne, L.L. Chase, H.W. Newkirk, L.K. Smith, W.F. Krupke, IEEE Journal of Quantum Electronics 24 (1988) 2243.
- [2] P.F. Moulton, IEEE Journal of Quantum Electronics QE-21 (1985) 1582.
- [3] E.P. Ippen, C.V. Shank, in: S.L. Shapiro(Ed.), Ultrashort Light Pulses, Springer Topics in Applied Physics, Springer, Berlin, 1977, 83.