

Judd-Ofelt 방법을 이용한 Nd:glass의 광학적 특성

최철호, 유선종*, 김혜정*, 김정호**, 박용필
동신대학교 전기전자공학과, (주)Neolaser*, 한국광기술원**

Optical Characteristics of Nd:glass by Using the Judd-Ofelt Method

cheol-ho Choi, sun-jong You*, hea-jeong Kim*, jeong-ho Kim**, and yong-pil Park
Dongshin Univ., Neolaser*, KOPTI**

Abstract

The Judd-Ofelt theory is becoming basis that induced of ligand field of electric dipole transitions of between 4f electric states. It is developed for the rare earth ions through judd and ofelt. This theory be applicate success to the raer earth ions in solid, liquid and gas state. This paper reports a optical characteristics of Nd:glass by using the Judd-Ofelt Method.

Key Words : Judd-Ofelt Method, Rare-Earth ion, Nd:glass, 4f electronic level transfer

1. 서 론

레이저는 1960년 최초 개발된 이후 다양한 레이저 관련 요소 기술들의 비약적인 발전으로 광통신, 간섭계, 산업용 용접 및 절단 의료용 수술, 광소자 등의 다양한 분야에 폭넓게 활용되고 있다. 또한, 1970년대부터는 산업용 가공레이저 및 레이저 핵융합 등의 기술 분야 발전으로 고출력 레이저가 핵심기술로 부상함에 따라 고출력 레이저시스템의 개발이 요구되었다. 이를 위해 선진국을 비롯한 세계 각 국은 고출력 레이저 개발에 심혈을 기울이고 있으며, 미국, 일본 등의 선진국들은 일부 tera watt급의 고출력 레이저개발에 성공하는 등 많은 성과를 거두고 있다. 이러한 고출력 레이저개발에 가장 중요한 요소는 고효율, 고출력의 레이저 활성물질의 개발이 선행되어야 하는바 현재 Co₂, Iodine, KrF 등의 기체와 Nd doped glass가 고출력 발전용 레이저 매질로 사용되고 있으며, 이들 중 기체 활성물질은 큰 부피에 pumping이 곤란하여 tera watt급 이상은 Nd:glass가 활성물질로서 각광 받고 있다. Nd:glass의 경우 일반적으로 glass의 조성은 크게 규산염 glass와 인산염 glass로 나누어지는데 규산염 glass는 열적인 특성과 내후성면에서 우수한 장점이 있으나 Laser특성이 뒤떨어지는 단점이 있어 산업용 Laser에는 규산염 glass가 활성매질로서 사용되고 있으나 대출력 Laser System에는

인산염 glass로 대체되고 있는 추세이다.

본 연구에서는 고출력 레이저 활성물질로 사용하고 있는 Nd:glass (LHG8, LHG9, LHG10 ; HOYA사)의 광학적 특성을 측정하고, 희토류 이온을 활성매질로 하여 Laser 광특성 평가에 이용되는 Judd-Ofelt 이론을 도입하여 그 결과를 비교·검토하였다.

2. 이 론

Judd-Ofelt 이론은 4f 전자상태들간 결정장으로 유도되는 전기쌍극자 전이들의 상호작용에 대한 이론이 근간이 된 것으로써 고체, 액체 및 기체중에 함유된 희토류 이온들의 광특성 해석 분야에 적용되고 있다.

Judd-Ofelt 이론에 의하면 전기쌍극자의 적분된 흡수계수 $\int k(\lambda) d\lambda$ 와 선강도 S 간의 관계는 다음과 같다.

$$\int K(\lambda)d\lambda = \frac{8\pi^3 e^2 \lambda \rho}{3ch(2J+1)} \frac{1}{n} \frac{(n^2-2)^2}{9} S \quad \dots(1)$$

여기서, K(λ)는 파장 λ에서의 흡수계수, c는 광속, h는 플랑크상수, ρ는 Nd³⁺ 이온농도, λ는 흡수 밴드의 평균파장, J는 첫번째 레벨(J=9/2 in Nd³⁺)의 전체각운동량이며 n은 파장 λ에서의 굴절율이다. (n²+2)/9 는 Tightly Binding Approximation 하에서 유전체의 이온에 대한 Local

Field Correction을 나타낸다.

$\int k(\lambda) d\lambda$ 를 구하기 위해서 Nd^{3+} 이온에 대한 전이과정과 준위간의 전이를 살펴보면 기저상태인 $^4I_{9/2}$ 준위에서 그 이상의 준위들로 여기 되고, 이들은 흡수밴드들로 나타날 수 있다.

Judd-Ofelt 이론에 의하면, 시준위(S,L)J>와 종준위(S',L')J>사이에서 전기쌍극자전이의 선강도는 다음과 같다.

$$S_c = \sum_{i=2,4,6} \Omega_i |\langle (S,L)J || U^{(i)} || (S',L')J' \rangle|^2 \quad \dots(2)$$

여기서, $\langle U^{(i)} \rangle$ 는 방사천이의 전기쌍극자연산자의 행렬요소이다.

시준위에서 종준위 까지의 자연방출 천이확률은

$$A[(S,L)J; (S',L')J'] = \frac{64\pi^4 e^2}{3h(2J+1)\lambda^3} n \left[\frac{(n^2+2)^2}{9} \right] \times \sum_{i=2,4,6} \Omega_i |\langle (S,L)J || U^{(i)} || (S',L')J' \rangle|^2 \quad \dots(3)$$

으로 구할 수 있다.

한편, 분기비(β)는

$$\beta[(S,L)J; (S',L')J'] = \frac{A[(S,L)J; (S',L')J']}{\sum_{S',L',J'} A[(S,L)J; (S',L')J']} \quad \dots(4)$$

발광수명(τ_c)

$$\tau_{rad}^c = \left(\sum_{S',L',J'} A[(S,L)J; (S',L')J'] \right)^{-1} = A_{Total}^{-1} \quad \dots(5)$$

J는 시준위의 전각 운동양자수를 나타낸다.

양자효율(η)

$$\eta_c = \tau_f^M / \tau_{rad}^c \quad \dots(6)$$

여기서, τ_f^M 은 발광수명의 측정치이다.

유도방출단면적(σ)

$$\sigma_p(\lambda_p) = \frac{\lambda_p^4}{8\pi c n^2 \Delta\lambda_{eff}} A[(^4F_{3/2}); (^4F_{11/2})] \quad \dots(7)$$

여기서, λ_p 는 발광의 피크파장, $\Delta\lambda_{eff}$ 는 피크 파장의 발광 스펙트럼의 반폭이다.

Fig 1에 광특성 평가에 이용되는 Judd-Ofelt이론의 블록선도를 나타낸다.

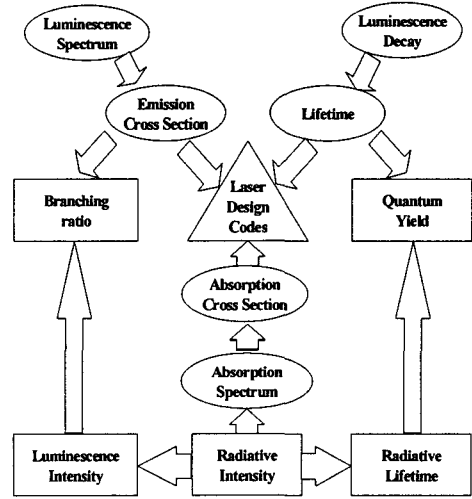


Fig 1. Judd-ofelt 이론 시스템의 블록선도.

3. 실험

본 연구에서 Nd:glass의 투과스펙트럼은 Cary 500 uv/vis Spectrophotometer (Varian사 : Australia)를 사용하여 측정하였다. 광원으로는 중수소 방전등과 필라멘트램프를 이용하였으며 이때 중수소 방전등은 360 nm이하의 짧은 파장, 필라멘트램프는 350 nm에서 2.5 um까지의 근적외선 영역에 각각 사용하였다. 투과스펙트럼의 측정방법으로서 피 측정 시료를 200 nm에서 1000 nm까지의 대역에 걸쳐 매질투과도를 측정하였다.

Fig 2에 측정에 사용된 광학계인 carry500 uv/vis spectrophotometer의 내부 광학계 구조도를 나타낸다.

본 연구에 사용된 레이저 활성매질은 Nd:glass (LHG9, LHG10)으로서 일본의 HOYA사에서 구입하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig 3은 Carry500 uv/vis spectrophotometer를 이용하여 LHG-9, LHG-10의 투과 스펙트럼을 측정 한 결과이다.

Fig 3에서 $B(\lambda)$ (베이스라인)는 측정데이터를 최소자승법으로 연산하여 얻어낸 것으로 Nd^{3+} 이온 이외의 흡수에 의한 손실분의 최소자승법을 사용한 시뮬레이션 계수를 나타내고 있다. 투과스펙트럼 측정결과로부터 Nd^{3+} 이온의 흡수스펙트럼을 구할 수 있다.

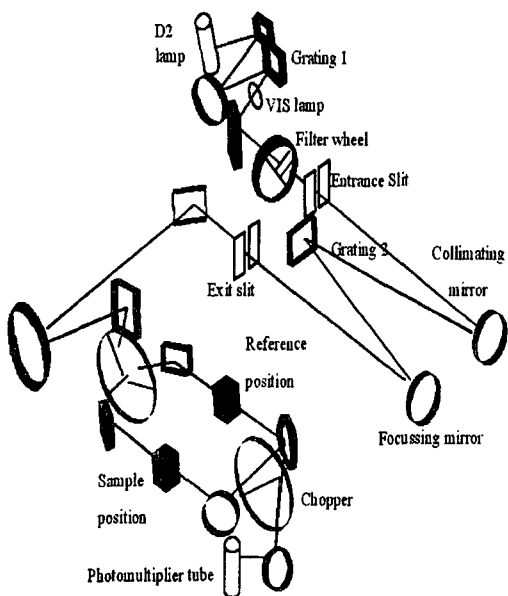


Fig 2. Cary 500 uv/vis Spectrophotometer 내부광학계 구조도.

Nd³⁺ 이온의 흡수계수스펙트럼 $\alpha(\lambda)$ 는, 투과스펙트럼과 베이스라인 $B(\lambda)$ 를 이용해 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\alpha(\lambda) = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{T(\lambda)}{B(\lambda)}\right) \dots \dots (8)$$

여기서, d는 샘플의 두께를 나타낸다.

또한, (8)식을 이용하여 Nd:glass의 흡수스펙트럼 및 파장별 흡수계수를 구하고 식(1)로부터 파장별 선강도를 구하였다. 본 연구에서는 LHG9와 LHG10에 관해서 파장 200-1000 nm의 흡수스펙트럼으로부터 6개의 선강도 측정치(S_M)를 구한 후 이 결과를 Judd-Ofelt 해석으로부터 얻은 선강도(S_C)와 비교하였다. 이 결과를 Table 1에 나타낸다.

Table 1. Compare of line strength.

Transition from $^4I_{9/2}$	Peak Wavelength (nm)	LHG-8		LHG-9H	
		S_M	S_C	S_M	S_C
$^4G_{7/2} + ^2G_{9/2} + ^2K_{13/2}$	521	2.381	2.148	1.06	1.86
$^4G_{5/2} + ^2G_{7/2}$	585	7.219	7.235	6.14	6.17
$^4F_{9/2}$	683	0.267	0.257	0.18	0.23
$^4F_{7/2} + ^4S_{3/2}$	746	3.462	3.559	3.14	3.23
$^4F_{5/2} + ^2H_{9/2}$	803	4.095	3.999	3.69	3.56
$^4F_{3/2}$	875	1.322	1.586	1.20	1.36

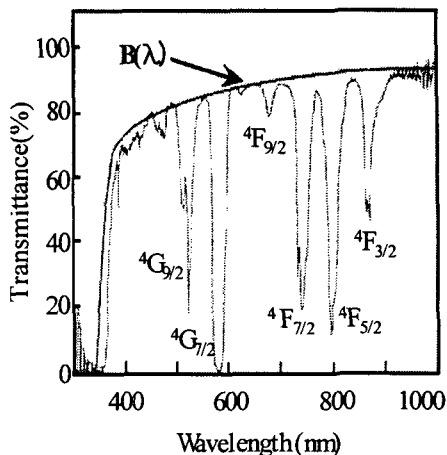


Fig 3. Transmittance of LHG-9.

5. 결론

본 연구는 고효율·고출력 레이저개발의 초기단계로 Nd:glass(LHG9, LHG10)의 레이저 매질 사용가능성을 검토하기 위하여 Nd:glass의 투과스펙트럼, 흡수스펙트럼을 측정하고 레이저 매질로서의 광특성을 고찰하기 위하여 Judd-Ofelt 이론을 도입하여 파장별 선강도의 실험치와 계산치를 비교·검토하였다.

연구결과 실험치와 계산치가 거의 일치함을 알 수 있었고, 이러한 연구 결과를 통하여 희토류 이온을 활성 중심이온으로 하는 레이저 매질의 연구개발에 Judd-Ofelt 이론의 적용이 유효함을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] B. R. Judd, "Optical Absorption Intensities of Rare-Earth Ions", Phys. Rev., 127 p.750, 1962.
- [2] G. S. Ofelt, "Intensities of Crystal Spectra of Rare-Earth Ions", J. Chem. Phys., Vol. 37, p. 511, 1962.
- [3] W. F. Krupke, "Induced-Emission Cross Sections in Neodymium Laser Glasses", IEEE J. Quantum Electron, Vol. QE-10, p. 450, 1974.
- [4] W. F. Krupke, M. D. Shinn, J. W. Marion, J. A. Caird and S. E. Stokowski, "Spectroscopic, Optical, and thermomechanical properties of neodymium-and chromium-doped gadolinium scandium gallium garnet", J. Opt. Soc. Am, Vol. B3, p. 102, 1986.
- [5] 金正鎬, 레이저-매체としてのNd³⁺およびYb³⁺に関する研究, p.71, 1998.
- [6] 장주녕, 희토류 원소 함유 중금속 산화물 유리의 광학적 특성, 1993.