

用Judd-Ofelt理论计算Nd³⁺离子在LaMgAl₁₁O₁₀单晶中的光谱参数

张秀荣

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海)

摘要: 本文根据Judd-Ofelt理论, 利用LaMgAl₁₁O₁₀单晶中Nd³⁺离子的7个吸收光谱支项和⁴F_{3/2}→⁴I_{0/2}, ^{11/2}, ^{13/2}的三个荧光带计算了谱线强度, 振子强度, 强度参量Ω_(2, 4, 6), 电偶极子跃迁几率及荧光分支比等光谱参数。

Spectroscopic parameters calculation of Nd³⁺ in LaMgAl₁₁O₁₀ crystal using Judd-Ofelt theory

Zhang Xiurong

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

Abstract: The calculation formula of the spectroscopic intensity parameters, such as line intensity, oscillator strengths (f_{ij}), intensity parameters $\Omega_{(2, 4, 6)}$, transition probability of electron dipole and branch ratio, are derived by using Judd-Ofelt theory. According to the results of measuring the absorption and fluorescence spectra of Nd³⁺ in LaMgAl₁₁O₁₀ crystal, these parameters are calculated and well accordant with several methods.

一、实验和结果

1. 吸收光谱

采用掺浓度为5at%, 厚为0.3cm的LaMgAl₁₁O₁₀:Nd³⁺单晶, 两面抛光, 用Perkin

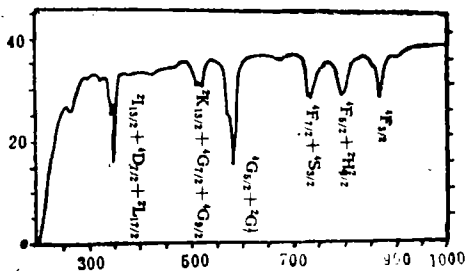


图1 室温下Nd³⁺离子在LaMgAl₁₁O₁₀晶体中的吸收光谱

Elmerλ-9型分光光度计, 测量了0.2~1μm波段内室温下的吸收光谱示于图1中。从图1看到, 在室温下, Nd³⁺离子在LaMgAl₁₁O₁₀单晶中有7个强吸收带, 相应的吸收跃迁能量如表1。

2. 荧光谱

用自制的“近红外荧光仪”测量了室温下Nd³⁺在LaMgAl₁₁O₁₀晶体中的荧光谱, 如图2所示; 相应的跃迁能级为⁴F_{3/2}→⁴I_{0/2}, ^{11/2}, ^{13/2}。每个荧光带都有两个最强的荧

光峰, 对应的峰值波长为0.87, 0.91, 1.053, 1.082, 1.34和1.39 μm 。

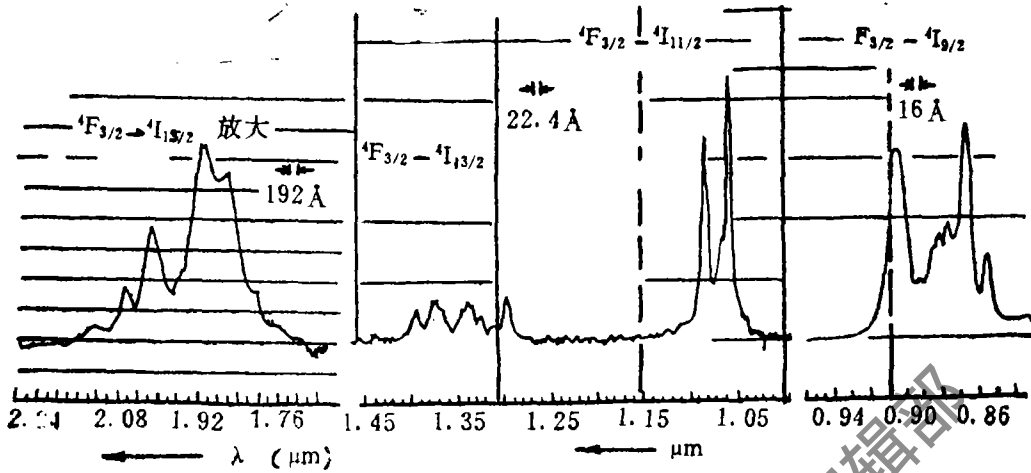


图2 室温下Nd³⁺离子在LaMgAl₁₁O₁₉晶体中的荧光谱

二、Nd³⁺在LaMgAl₁₁O₁₉晶体中的光谱参数

1. 振子强度与Ω_i参数

根据Judd-Ofelt理论^[1,2], 利用Nd³⁺在LaMgAl₁₁O₁₉晶体中的7个吸收光谱支项, 计算出实验谱线强度, 如下式:

$$S_{ij} = \frac{3hc}{8\pi^3 \tilde{\nu} e^2 N_i} \cdot \frac{9n}{(n+2)^2} \cdot g_i \int k(\tilde{\nu}) d\tilde{\nu} \quad (1)$$

式中, $\int k(\tilde{\nu}) d\tilde{\nu}$ 为谱线的积分吸收度, g_i 为简并度, $g_i = 2J + 1$, n 为折射率 ($n = 1.82$), $\tilde{\nu}$ 为平均波数, h 为普朗克常数, c 为光速, e 为电荷, N_i 为基态粒子数。

由量子力学给出振子强度为:

$$f_{ij} = x \frac{8\pi^2 m e \tilde{\nu}}{3h} \left| \overline{r} \right|^2 \quad (2)$$

式中, x 为局部场的校正因子, $x = \frac{(n^2 + 2)^2}{9n}$, r 为电子之间的距离, 如果 i, j 能级是简并的, 则

认为个别跃迁的振子强度 f_{ij} 对所有上、下态的振子强度求和, 除以简并度 g_i , 所以(2)式可写成:

$$f_{ij} = \frac{8\pi^2 m_e c \tilde{\nu}}{3h} \cdot \frac{(n^2 + 2)^2}{9n} \cdot \frac{1}{g_i} S_{ij} \quad (3)$$

式中, m_e 是电子质量, 由(3)式可求出振子强度, Judd-Ofelt理论对于⁴f_n电子组态的谱线强度可表示为:

$$S_{ij} = \sum_{t=2,4,6} \Omega_t \left| \langle \psi_j || U^{(t)} || \psi'_i \rangle \right|^2 \quad (4)$$

式中, Ω_t 为强度参数, $|\langle \psi_j || U^{(t)} || \psi'_i \rangle|^2$ 为Nd³⁺的单位张量算符约化矩阵元^[4]。

采用拟合计算要包括绝大多数吸收峰, 我们采用7个吸收带, 理论谱线强度可写成7个等式,

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= \Omega_2 U_{11}^{(2)} + \Omega_4 U_{12}^{(4)} + \Omega_6 U_{13}^{(6)} \\ S_2 &= \Omega_2 U_{21}^{(2)} + \Omega_4 U_{22}^{(4)} + \Omega_6 U_{23}^{(6)} \\ S_3 &= \Omega_2 U_{31}^{(2)} + \Omega_4 U_{32}^{(4)} + \Omega_6 U_{33}^{(6)} \\ S_4 &= \Omega_2 U_{41}^{(2)} + \Omega_4 U_{42}^{(4)} + \Omega_6 U_{43}^{(6)} \\ S_5 &= \Omega_2 U_{51}^{(2)} + \Omega_4 U_{52}^{(4)} + \Omega_6 U_{53}^{(6)} \\ S_6 &= \Omega_2 U_{61}^{(2)} + \Omega_4 U_{62}^{(4)} + \Omega_6 U_{63}^{(6)} \\ S_7 &= \Omega_2 U_{71}^{(2)} + \Omega_4 U_{72}^{(4)} + \Omega_6 U_{73}^{(6)} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

即计算 $\bar{S}_{\text{计算}} = A\bar{\Omega}$ (6)

式中, A 为7×3个数字排列的矩阵。

拟合计算要求实验谱线强度和理论计算谱线强度的差值平方和为最小, 即,

$$\sum |S_{\text{实验}} - S_{\text{计算}}|^2 = \sum |\bar{S}_{\text{实验}} - A\bar{\Omega}|^2 \text{ 为最小, 那么最小的 } \bar{\Omega}^0 \text{ 由下面方程给出,}$$

$$\bar{\Omega}^0 = (A^+A)^{-1}A^+S_{\text{实验}} \quad (7)$$

即计算

$$\bar{\Omega}^0 = (U^+U)^{-1}U^+S_{\text{实验}} \quad (8)$$

经过一系列矩阵运算, 由(8)式获得 Ω_2, \dots

2. 辐射跃迁几率, 辐射寿命, 量子效率及分支比
Nd³⁺的自发辐射电偶子跃迁几率用下式计算^[2]

$$A_{ij} = \frac{64\pi^4 \nu^2 e^2}{3hc^3} \cdot \frac{1}{g_i} \cdot \frac{n(n^2+2)^2}{9} \cdot S_{ij} \quad (9)$$

$$\text{辐射寿命: } \tau_{rad} = \sum A_{ij}^{-1} \quad (10)$$

$$\text{量子效率: } \eta = \frac{\tau_{fluo}}{\tau_{rad}} \quad (11)$$

$$\text{荧光分支比: } \beta_{ij} = \frac{A_{ij}}{\sum A_{ij}} \quad (12)$$

3. 为了比较, 我们采用荧光法计算荧光分支比

$$\text{荧光谱线强度: } I(\lambda) = I'(\lambda)/\xi(\lambda) \quad (13)$$

式中, $I(\lambda)$, $I'(\lambda)$ 分别为真实荧光谱线强度和实验测量的谱线强度, $\xi(\lambda)$ 为仪器校正系数。根据文献[3]:

$$B = \frac{\beta_{(\lambda_1)}}{\beta_{(\lambda_2)}} = \frac{I_1 \lambda_1}{I_2 \lambda_2} = 1.167x + 3.185 \quad (14)$$

式中, I_1 和 I_2 分别为波长 λ_1 和 λ_2 的荧光谱线强度, 由实验确定, 然后求出 x : $x = \Omega_4/\Omega_6$ 。然后代入下面公式^[3]中求出分支比。

$$\beta_{0.0.0.0.0} = (0.3194x + 0.07671) / (0.4247x + 0.4567) \quad (15)$$

$$\beta_{1.0.0.0.0} = (0.1053x + 0.2874) / (0.4247x + 0.4567) \quad (16)$$

$$\beta_{1.0.0.0.0} = 0.09023 / (0.4247x + 0.4567) \quad (17)$$

$$\beta_{1.0.0.0.0} = 0.00231 / (0.4247x + 0.4567) \quad (18)$$

三、结 果 和 讨 论

表1给出实验谱线强度和振子强度。

表1 室温下Nd³⁺离子在LaMgAl₁₁O₁₀单晶中实验谱线强度和振子强度计算值

| 跃迁能级 $^4I_{9/2} \rightarrow$ | 波 数 cm ⁻¹ | 实验吸收谱线强度 × 10 ²⁰ | 振子强度 × 10 ⁶ |
|--------------------------------------|-------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| $^4F_{3/2}$ | 11526 | 0.59 | 1.58 |
| $^4F_{5/2} + ^2H_{9/2}$ | 12600 | 0.50 | 1.47 |
| $^4S_{3/2} + ^4F_{7/2}$ | 13680 | 0.38 | 1.30 |
| $^4G_{5/2} + ^2G_{7/2}^1$ | 17265 | 0.54 | 2.53 |
| $^2K_{13/2} + ^4G_{7/2} + ^4G_{9/2}$ | 19309 | 0.15 | 0.74 |
| 2P_1 | 24826 | 0.34 | 2.33 |
| $^4D_{1/2} + ^2L_{15/2}$ | 28384 | 0.13 | 0.98 |

表2 室温下Nd³⁺离子在LaMgAl₁₁O₁₀单晶中的光谱参数

| 跃迁能级 | λ (μm) | A_{ij} s ⁻¹ | $\beta(1 \pm 10\%)$ | | | $\Omega_i = 2, 4, 6$ × 10 ²⁰ cm ² | | $\tau_{\text{辐射}}$ (μs) | $\tau_{\text{荧光}}$ (μs) | $\eta_{\text{量子}}$ | |
|-------------------------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------|-------|-------------|------------------------------------------------------------|-----------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------|------|
| | | | 吸收谱计算 | 荧光谱计算 | 参考文献 [5] | 吸收计算 | 文献 [6] | | | | |
| $^4F_{3/2} \rightarrow$ | | | | | | | | | | | |
| $^4I_{15/2}$ | 1.9 | 16.5 | 0.004 | 0.003 | 0.006 | Ω_2 | 0.23 | 0.21 | 354 | 315 | 0.89 |
| $^4I_{13/2}$ | 1.34 | 412.5 | 0.148 | 0.120 | 0.126 | Ω_4 | 0.49 | 0.48 | | | |
| $^4I_{11/2}$ | 1.054 | 1501.5 | 0.546 | 0.480 | 0.556 | Ω_6 | 4.5 | 4.26 | | | |
| $^4I_{9/2}$ | 0.87 | 891 | 0.300 | 0.390 | 0.312 | | | | | | |

从表2中可以看出我们计算结果和文献数据符合得很好。用荧光法计算分支比简便，而且与用吸收法计算的分支比的偏差是在误差允许范围内的均方根偏差，主要和荧光谱测试条件及光谱质量有关，文献中参数B反映了荧光谱质量。S. Lomheim, G. DeShazer^[3]已经用荧光方法计算了Nd³⁺在20多种基质晶体中的荧光分支比，都得到满意的结果。我们用两种方法进行了计算，得到一致的结果，证明了计算结果的可靠性。LaMgAl₁₁O₁₀:Nd³⁺做为新型激光晶体，各项光谱参数都是满意的，只要改进生长工艺，生长优质激光晶体，研制大功率激光器是非常有希望的。

感谢本组晶体生长同志提供样品，向马笑山，沈雅芳，朱汝德，徐军等同志致谢。

参 考 文 献

- [1] Judd B R, Phys Rev, 1962; 127: 750
- [2] Ofelt G S, J Chem Phys, 1962; 37: 511

光盘系统的信噪比、象差容限及伺服误差

巩马理

潘龙法 金国藩

(西南技术物理研究所, 成都)

(清华大学精密仪器系, 北京)

摘要: 采用脉冲响应函数方法, 分析光盘存储系统中光学头存在各种象差及伺服误差时, 对读出信号信噪比的影响, 从而导出了各类光学头的象差容限及伺服要求。

Signal-to-noise ratio, aberration tolerance and servo-error of optical storage

Gong Mali

(Southwest Institute of Technical Physics)

Pan Longfa, Jin Guofan

(Department of Precision Instrument, Tsinghua University)

Abstract: By using the impulse response function, the effects of aberration of optical head and the servo-error of the optical storage system on SNR of the read-out signal are discussed. The aberration tolerance and the servo-requirement for various optical head are presented.

一、引 言

对光盘系统的读出特性进行分析, 十分有助于对光盘存储光学系统、记录介质、编解码及信号处理的设计与评价。J. Braat利用相干扫描方法, 分析光盘系统, 从信号的空间频率特性来考察光学系统的象差影响^[1]; V. B. Jipson等人则以二维傅里叶变换的方法, 分析

[3] Lomheim T S, DeShazer L G. Opt Commun, 1978; 24 (1), 89

[4] Weber M J. Phys Rev, 1967; 157 (2), 262

[5] Phys Stat Sol (a), 1983; 75, K111

[6] Богасаров X С, Порожкин П М. Квант Электр, 1983; 10 (8), 1645~1650

作者简介: 张秀荣, 女, 1943年出生。工程师。从事激光晶体的光谱和激光的研究。

收稿日期: 1990年6月21日。 收到修改稿日期: 1991年3月15日。