Nd/Cr:YAG媒質における蛍光と反転分布形成の理論的解析

椿本 孝治, 吉田 英次

大阪大学 レーザーエネルギー学研究センター (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-6)

Theoretical Analysis of Fluorescence and Population Inversion in Nd/Cr:YAG Medium

Koji TSUBAKIMOTO and Hidetsugu YOSHIDA

Institute of Laser Engineering, Osaka University, 2-6 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871

(Received May 14, 2009)

The Nd/Cr:YAG medium is very useful for the flash lamp or sunlight pumped lasers. Theoretical analysis demonstrates that the fluorescence lifetime of the Nd ions depends on the ratio of the population inversion of the Cr and Nd ions. The ratio of population inversion remarkably changes due to such factors as the pumping rate, the pumping time, and the dopant concentration. Therefore measuring the effective lifetime of Nd ions is difficult. The benefit of the Cr ions may not appear soon after the start of pumping until short period of the lifetime of the Nd ions. When the medium is pumped by the short pulse at the absorbed wavelength of the Cr ions, the gain peak is delayed from the end edge of the pump light. The energy transfer rate to the Nd ions from the Cr ions is a crucial parameter. We suggest a method for calculating the transfer rate from two kinds of fluorescence.

Key Words: Nd/Cr:YAG, Theoretical analysis, Fluorescence lifetime, Population inversion, Rate equation

1. はじめに

Nd:YAGレーザー媒質は、高い誘導放出断面積や熱伝導性などにより、多数のレーザー装置に用いられている。近年では、多結晶性セラミックスの登場で、Nd:YAGを基本とした複合体の生成やNd添加量の増加、共添加物の制御などにより、利得の上昇や、レーザー効率の改善といった改良がなされている。なかでも、Crを共添加したNd:YAGセラミックス¹⁾は、Cr³⁺からNd³⁺へのエネルギー移譲を利用することで、Crの広い吸収帯を活用できることから、フラッシュランプや太陽光といった広帯域励起光を使う場面において、非常に有用な材料となっている²⁻⁹⁾。

Nd/Cr:YAG媒質に対する理論的なアプローチは佐伯ら¹⁰⁾によってなされているが、彼らの解析は定常近似によるものであり、蛍光の発光特性や反転分布の形成過程についてはなら議論されていない。

本論文では、Nd/Cr:YAGといった共添加元素からレーザー遷移元素へエネルギーの移譲が発生するような媒質における励起、発光特性をレート方程式を用いて解析した結果について報告する。

2. 連続励起における反転分布形成

Fig. 1にNd/Cr:YAG媒質のエネルギー準位を示す¹¹⁾。

Cr³⁺は、青色領域(⁴T₁)と緑色領域(⁴T₂)に大きな吸収を持っている。これら2つの準位から上準位(²E)に熱的に緩和する。Nd³⁺へのエネルギー移譲はこの準位から行われる。エネルギー準位関係からレート方程式を導くと次式が得られる。

Fig. 1 Energy levels of Cr³⁺ and Nd³⁺ co-doped YAG medium.

$$\begin{cases} \frac{dN_{Nd}}{dt} = \frac{N_{Cr}}{\tau_F} - \frac{N_{Nd}}{\tau_{Nd}} + \Delta N_{Ndp} \\ \frac{dN_{Cr}}{dt} = -\frac{N_{Cr}}{\tau_F} - \frac{N_{Cr}}{\tau_{Cr}} + \Delta N_{Ccp} \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 N_{Nd} および N_{Cr} はそれぞれレーザー上準位における粒子数密度、 τ_{Nd} 、 τ_{Cr} はNd、Crのレーザー上準位から下準位への緩和寿命である。また、 τ_F はCrからNdへのエネルギー移譲の寿命である。 ΔN_{Ndp} 、 ΔN_{Ccp} はそれぞれの単位時間あたりに励起される数密度(今後、励起レートと呼ぶ)を表している。式(1)において、励起している間は励起レートが時間によらず一定であると仮定する。この仮定は、矩形パルスによる励起や一定値での連続励起に相当する。この条件で式(1)を解くと、

$\tau_{Nd} \neq \tau_{Cr}$ のとき

$$\begin{aligned} N_{Nd} = & A_1 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{Nd}}\right) \right\} \\ & + B_1 \left\{ 1 + \frac{\tau_{Nd}}{\tau_{Cr} - \tau_{Nd}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{Nd}}\right) \right. \\ & \left. - \frac{\tau_{Cr}}{\tau_{Cr} - \tau_{Nd}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{Cr}}\right) \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

$\tau_{Nd} = \tau_{Cr}$ のとき

$$\begin{aligned} N_{Nd} = & A_1 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{Nd}}\right) \right\} \\ & + B_1 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{Nd}}\right) - \frac{t}{\tau_{Nd}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{Nd}}\right) \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

となる。ただし、 τ_{Cr} はCrの実効的な寿命であり、

$$\frac{1}{\tau_{Cr}} = \frac{1}{\tau_{Cr}} + \frac{1}{\tau_F} \quad (4)$$

で表される。また、

$$\begin{aligned} A_1 &= \Delta N_{Ndp} \tau_{Nd} \\ B_1 &= \Delta N_{Ccp} \frac{\tau_{Cr}}{\tau_F} \tau_{Nd} \end{aligned} \quad (5)$$

である。また熱平衡状態での数密度は無視している。十分な時間が経過した場合、つまり、式(2)、(3)に $t \rightarrow \infty$ を代入すると、

$$N_{Nd}(\infty) = \left(\Delta N_{Ndp} + \Delta N_{Ccp} \frac{\tau_{Cr}}{\tau_F} \right) \tau_{Nd} = A_1 + B_1 \quad (6)$$

となる。式(6)から、Crの共添加によって上準位数密度が B_1 だけ増加することがわかる。 B_1 に含まれる τ_{Cr}/τ_F は、Crイオンからのエネルギー移譲率を表している。Fig. 2に式(2)より計算した数密度の時間変化の様子を示す。ただし、 B_1/A_1 を0から4まで変化させた。 $B_1/A_1=0$ はNd:YAG単独の場合に相当する。また、図の横軸はNdの寿命で規格化している。Fig. 2 (a)は $\tau_{Cr}=2\tau_{Nd}$ と仮定した場合であり、Fig. 2 (b)は $\tau_{Cr}=0.5\tau_{Nd}$ とした場合の結果である。Fig. 2 (a)、(b)ともに、Nd:YAG($B_1/A_1=0$)に比べて上準位数密度が飽和するまでに要する時間が増加し

Fig. 2 (a), (b) Temporal profiles of number density at upper laser transition level of Nd^{3+} ion obtained by CW pumping. (c) Ratio of energy transfer from Cr^{3+} upper level.

ていることがわかる。特に B_1 の割合が大きくなるとその傾向がより顕著になる。これは、Ndの寿命が見かけ上長くなることを意味する。Fig. 2 (a)、(b)を比較すると、(b)の方が、つまり、Crの実効的な寿命 τ_{Cr} が短い方が数密度の飽和に必要な励起時間が短い。なお、Ndの蛍光寿命については3章で詳細に述べる。

Fig. 2 (c)に式(2)右辺第2項の括弧内のみを計算した結果を示す。ただし、 τ_{Cr} を $0.1\tau_{Nd}$ から $2\tau_{Nd}$ まで変化させている。図からわかるように、励起開始からの経過時間が短い場合には、Crからのエネルギー移譲割合は少ない。これは、CrからNdへのエネルギー移譲にCrの寿命が関わっているためである。したがって、Crの寿命が短くなれば短時間でエネルギー移譲は完了することになる。

次に、Crの上準位にどの程度の数密度が生じるかを検討してみる。Crの上準位は、Ndでの発光、増幅作用に対してエネルギー供給源として働く。式(1)より、Crの数密度は

$$\begin{aligned} N_{Cr} &= \Delta N_{Cr} \tau_{Cr} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{Cr}}\right) \right\} \\ &= B_1 \frac{\tau_F}{\tau_{Nd}} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{Cr}}\right) \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

となる。式(2)および式(7)より、CrとNdの数密度の比 $NR = N_{Cr}/N_{Nd}$ を計算する。NRはNdの蛍光寿命を決定する非常に重要なパラメータとなる。このことについては次章で詳しく述べる。Crの実効的な寿命 $\tau_{Cr} = \alpha \tau_{Nd}$ とし、エネルギー移譲率 $\tau_{Cr}/\tau_F = \gamma$ と仮定すると、NRは次式により与えられる。

$$NR = \frac{B_1 \frac{\alpha}{\gamma} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{1}{\alpha} \frac{t}{\tau_{Nd}}\right) \right\}}{\left(A_1 - \frac{B_1}{\alpha-1} \right) \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{Nd}}\right) \right\} + \frac{\alpha}{\alpha-1} B_1 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{1}{\alpha} \frac{t}{\tau_{Nd}}\right) \right\}} \quad (8)$$

ただし、 $\alpha \neq 1$ としている。

まず、 α が1より大きい場合のNRについて考えると、 $A_1 - B_1/(\alpha-1)$ が正のときには、増加関数となり零のときには時間に依らず一定値 $(\alpha-1)/\gamma$ に、そして、負のときには減少関数となる。また、励起開始直後には、NRは B_1/A_1 に対して大きく変化し、特に、 $A_1 - B_1/(\alpha-1)$ が負の場合、 A_1 (Ndの励起レート)が小さいと、非常に大きな値となる。一方、 α が1より小さい場合には、NRは常に減少関数となる。

参考として、Fig. 3に B_1/A_1 を変えた場合のNRの時間変化を示す。Fig. 3 (a)は $\alpha=2$, $\gamma=1$, (b)は $\alpha=0.5$, $\gamma=1$ として計算した。縦軸は対数表示である。図から、NRは、時間とともに減少する場合、増加する場合および一定の値となる場合の3種類に分類できることがわかる。

いま、十分な時間が経過した場合($t \rightarrow \infty$)を考えると、

$$\lim_{t \rightarrow \infty} NR = \frac{\alpha}{\gamma + \frac{\Delta N_{Nd}}{\Delta N_{Cr}}} \quad (9)$$

となる。式(9)から、最終的に得られる数密度の比NRは、寿命の比 α 、移譲率 γ および励起レートの比で決まることがわかる。

3. 蛍光特性

式(1)において、励起レートを零にすることで蛍光の時間依存性を予測することができる。式(1)より、

$\tau_{Nd} \neq \tau_{Cr}$ のとき、

$$N_{Nd} = (A_2 - B_2) \exp\left(-\frac{t}{\tau_{Nd}}\right) + B_2 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{Cr}}\right) \quad (10)$$

$$A_2 = N_{Nd}(0)$$

$$\begin{aligned} B_2 &= \frac{\tau_{Cr}}{\tau_F} \frac{\tau_{Nd}}{\tau_{Cr} - \tau_{Nd}} N_{Cr}(0) \\ &= \frac{\gamma}{\alpha-1} NR \cdot A_2 \end{aligned}$$

$\tau_{Nd} \neq \tau_{Cr}$ のとき、

$$N_{Nd} = \exp\left(-\frac{t}{\tau_{Nd}}\right) \left\{ N_{Cr}(0) \frac{t}{\tau_F} + N_{Nd}(0) \right\} \quad (11)$$

が得られる。ただし、 $N_{Nd}(0)$, $N_{Cr}(0)$ はそれぞれの初期値であり、その比はNRとなる。

まず、蛍光特性の時間依存性について考える。Fig. 4に B_2/A_2 をパラメータにしたときの計算結果を示す。ただし、Fig. 4 (a)は $\alpha=2.0$, (b)は $\alpha=0.5$ である。

$|A_2| < |B_2|$ の場合、最初はCrからの供給がNdの自然放出より多いため、数密度が上昇するが、その後逆転し、減少に転じる。さらに $\alpha > 1$ の場合は、減衰傾向はNd単体のものよりも緩やかになる。逆に $\alpha < 1$ の場合は、Ndの蛍光寿命が支配的となる。 $|B_2/A_2|$ が大きくなると数密度の上昇割合も大きくなり、上昇する時間幅も長くなる。このとき、同じ $|B_2/A_2|$ の値に対して、 $\alpha < 1$ の方が最大値は大きくなるが、上昇する時間幅は $\alpha > 1$ の方が

Fig. 3 Ratio of the populations of the upper Cr³⁺ and Nd³⁺ levels.

Fig. 4 Temporal profiles of the fluorescence from Nd^{3+} ions. (a) $\alpha = 2.0$. (b) $\alpha = 0.5$.

長い。このような数密度が上昇する現象は、利得のピークが励起終了時から遅れて現れることを意味している。前章で述べたように、初期数密度の比は励起時間が短い場合や、Crの吸収帯のみで励起した場合などは非常に大きな値をとるため、利得のピークが励起パルスよりも大きく遅れることになる。利得が最大となる時間を計算するために、式(10)を時間 t で微分する。

$$\frac{dN_{\text{Nd}}}{dt} = \frac{1}{\tau_{\text{Nd}}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{Nd}}}\right) \left[-N_{\text{Nd}}(0) + \frac{\gamma}{\alpha-1} N_{\text{Cr}}(0) - \frac{\gamma}{\alpha(\alpha-1)} N_{\text{Cr}}(0) \exp\left\{\left(1-\frac{1}{\alpha}\right)\frac{t}{\tau_{\text{Nd}}}\right\} \right] \quad (12)$$

式(12)において $\frac{dN_{\text{Nd}}}{dt} = 0$ とし、 t について解くと、

$$t = \frac{\alpha}{\alpha-1} \tau_{\text{Nd}} \ln \alpha \left\{ 1 - \frac{\alpha-1}{\gamma NR} \right\} \quad (13)$$

が得られる。式(13)より、 $t > 0$ においてピークを持つためには、

$$1 < \alpha < \gamma NR \quad (14)$$

または

$$\gamma NR < \alpha < 1 \quad (15)$$

が成立する必要がある。

$A_2 > B_2$ および、 $\alpha > 1$ の場合、速い緩和と遅い緩和が現れる bi-exponential となり、比較的単純な減少傾向を示す。 $\alpha < 1$ の場合、初期はCrからの供給で減衰量が減るが、その後はNdの蛍光寿命が支配的となる。

次にNdの実効的な蛍光寿命について考える。 $\alpha < 1$ の場合、Fig. 4 (b) からわかるように、Ndの実効的な蛍光寿命はNd:YAGの蛍光寿命とほとんどかわらない。 $\alpha > 1$ の場合は、Crからのエネルギー移譲の状況により大きく変化する。式(10)の右辺第1項が正の場合 ($A_2 > B_2$)、通常の bi-exponential となり、その蛍光寿命は、平均蛍光寿命により近似可能である。平均蛍光寿命は、

$$\langle \tau_{\text{Nd}} \rangle = \frac{(A_2 - B_2) \tau_{\text{Nd}}^2 + B_2 \tau_{\text{Cr}}^2}{(A_2 - B_2) \tau_{\text{Nd}} + B_2 \tau_{\text{Cr}}}$$

$$= \frac{1 + (\alpha^2 - 1) \frac{B_2}{A_2}}{1 + (\alpha - 1) \frac{B_2}{A_2}} \tau_{\text{Nd}} \quad (16)$$

で計算することができる。Fig. 5は τ_{Cr} 経過後の波形に対して mono-exponential でフィッティングしたときの寿命をプロットしたものである。曲線は式(16)で計算した。縦軸はNdの本来の寿命で規格化し、横軸は初期数密度の比 B_2/A_2 である。また、 τ_{Cr} と τ_{Nd} の比 α を 1.2 ~ 3.0 まで変化させた。初期数密度の比が1以下の場合、実効的なNdの寿命は式(16)によく一致しており、 B_2/A_2 に対する変化が大きい傾向がある。しかし、 B_2/A_2 が大きくなるにつれ、式(16)で計算された値よりも小さくなり、一定値に落ち着く。 B_2/A_2 が1より大きい場合には、mono-exponential でのフィッティングは、波形のどの部分から始めるかで値が変化しやすい。 B_2/A_2 が1以下なら平均蛍光寿命で実効的な寿命を表すことが可能であるが、 α が大きく、 B_2/A_2 が1以上なら、式(10)を使った方が良いと思われる。特に、 $B_2 \gg A_2$ の場合、 $A_2 = 0$ と見なせるので、減衰曲線は

$$\exp\left(-\frac{t}{\alpha \tau_{\text{Nd}}}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{Nd}}}\right) \quad (17)$$

に従うことになる。

4. 蛍光寿命の濃度依存性と励起波長依存性

これまでの考察を元にして参考文献2)の計測データを解析してみる。参考文献2)では、Crの濃度が異なる3種類のサンプルを、励起波長440 nmおよび590 nm、パルス幅10 μs 以下で励起したときの波長1064 nmにおける実効的な蛍光寿命を計測している。Table 1に参考文献2)の結果を示す。この表から3つのことが読み取れる。(1)励起波長440 nmの場合、つまり、Crのみを励起した場合にはCr濃度が増加するにつれNdの寿命が短くなっている。(2)励起波長590 nmの場合、つまり、CrとNdを同時に励起した場合にはCr濃度の増加によりNdの寿命が長

Fig. 5 Effective lifetime of the fluorescence from Nd³⁺ ions. These are fitted by mono-exponential equation. The solid lines are calculated by the equation of the averaged fluorescence lifetime.

くなる。(3)Crのみの励起とCrとNdを同時に励起した場合では同時に励起した方がNdの寿命が短くなる。参考のため、Fig. 6 (b)にNd:YAGとCr:YAGの吸収断面積を示しておく。

まず、590 nm励起における計測値からNd単体での寿命 τ_{Nd} を推測する。今、NdからCrへのエネルギー移譲はないので、Cr濃度の違いによる影響を無視し、3種類のサンプルで同じ値をとると仮定する。 τ_{Nd} の値は、Cr濃度0.1 at%の計測値から228 μ s以下になっている可能性が高い。また、590 nm付近にはNdの強い吸収があり、Cr濃度をNdの3倍以上にしなければNdの励起レートの方が大きくなる。このような場合、数密度の比NRは1以下の小さな値となる。したがって、実効的なNdの寿命は式(16)により近似できる。式(16)の中の B_2/A_2 を式(10)から計算すると、

$$\frac{B_2}{A_2} = \frac{\gamma}{\alpha - 1} NR(t) \quad (18)$$

となる。 $NR(t)$ は式(8)で記述されている。 A_1 および B_1 は励起レート、 α 、 γ 、およびNdとCrの寿命から計算できる。また、 γ は、 α およびNdとCrの寿命を使って、

$$\gamma = 1 - \alpha \frac{\tau_{Nd}}{\tau_{Cr}} \quad (19)$$

Table 1 Effective lifetime of Nd/Cr:YAG at 1064 nm measured by H. Yagi, et al.

Sample	Pumped at 440 nm	Pumped at 590 nm
1 at%Nd, 0.1 at%Cr	732 (μ s)	228
1 at%Nd, 0.7 at%Cr	459	306
1 at%Nd, 3.0 at%Cr	389	365

H. Yagi, et al.²⁾

Fig. 6 (a) Wavelength dependence of the number density ratio, NR. (b) Absorption cross section of Nd:YAG and Cr³⁺:YAG medium.

となる。したがって、式(8)、(16)、(18)、および(19)を使うと、Ndの実効的な寿命は励起レート、 α 、励起時間 t およびNdとCrの寿命によって表すことができる。今、Crの自発光の寿命が、Ndの添加の影響を受けないとすれば、Cr³⁺:YAGで計測したCrの寿命(約1.5 ms~2.0 ms)¹²⁾と励起時間 t 、および励起レートを代入でき、最終的な式はNdの寿命 τ_{Nd} と α の関数となる。 τ_{Nd} と α をパラメータとして計算した結果、590 nm励起におけるCr濃度依存性を満たすためには、少なくとも τ_{Nd} は210 μ s以下になると推測できる。

次に、濃度依存性と励起波長依存性を計算するために、 α を推測する。波長440 nmでの励起では、Crのみを励起することから、NRは非常に大きな値となる。そのため、Ndの実効的な寿命は式(16)に従わず、飽和値になる。Fig. 5の計算結果から、Cr濃度0.1 at%の時は $\alpha > 3$ 、0.7 at%の時は $\alpha \sim 1.8$ 、3.0 at%の時は $\alpha \sim 1.4$ ぐらいであると推測できる。推測した α とFig. 6 (b)に示している吸収断面積を用いてNRを計算した。励起時間は10 μ sとしている。計算結果をFig. 6 (a)に示す。横軸は波長であり、縦軸はNRである。Ndの吸収がない波長域ではCr濃度に関係なくNRは大きな値をとる。NRが大きくなると実効的な寿命はNRの変化によらず一定となることから、この領域での励起では寿命は波長依存性を持たない。Cr濃度が3.0 at%の場合、NRが1以下になるのは520 nm付近で、その他の領域では1以上となっている。590 nm付近ではNRが1に近く、440 nmによる励起よりも寿命が短くなることが予測できる。ただ、Fig. 5に示しているように、 $\alpha = 1.4$ の場合には実効的な寿命の変化はそれほど大きくない。一方、Cr濃度が0.1 at%の場合は、

Ndの吸収が存在する波長域で NR が大きく変化し、1以下となる領域が多いことがわかる。さらに、 α の値も大きいと考えられることから、実効的な寿命は励起波長によって大きく変化する可能性が高い。590 nm付近での励起では NR は0.1以下となり、実効的な寿命はNdの本来の寿命に近い値となる。

これらの検討は励起時間10 μ sの時のものであるが、十分に長い励起時間で励起した時は NR の波長依存性は小さくなる。

5. Nd/Cr:YAGの蛍光寿命計測

Nd/Cr:YAGの蛍光は、励起波長やCr, Ndの励起レート、励起パルス幅、などの影響を受けて複雑な振る舞いをみせると考えられる。しかし、すべての要因は、CrからNdへのエネルギー移譲である。エネルギー移譲を特徴づけるパラメータである τ_F がわかれば、その振る舞いも予測可能となる。 τ_F を計測するためには、2段階のステップを踏む必要がある。まず、Nd本来の寿命を計測するために、Ndのみに吸収される波長で励起を行う。このとき、励起時間は任意でよい。この励起での蛍光の減衰は単純なmono-exponentialとなるから τ_{Nd} を容易に計算できる。次に、 α を特定するためにCrのみに吸収される波長で励起を行う。このときの励起時間は反転分布が定常状態になるまで行う必要がある。定常状態での NR は式(9)となるが、今、Ndの励起レートは零なので、 NR は α/γ となり、 B_2 は α と A_2 で書き換えることができる。したがって、蛍光の減衰曲線を式(10)によりフィッティングすることで α を求めることができる。残りの γ については、Nd/Cr:YAG媒質のみから求めることは困難である。一つは、Cr³⁺:YAGを使って τ_C を計測しておく方法が考えられる。 τ_C がわかっていれば γ は容易に計算できる。もう一つはNd:YAGとNd/Cr:YAGの吸収断面積を計測し、NdとCrの励起レートを明らかにしておくことで可能となる。励起レートの比がわかれば、NdとCrの両方を励起できる波長で十分な時間励起すれば式(9)、(10)から γ を計算することが可能である。

6. まとめ

Nd/Cr:YAG媒質の蛍光と励起の特性についてレート方程式を使って解析した。Cr添加によるNdの反転分布の上昇量は、エネルギー移譲率とCrの励起レートによって決まるが、励起開始直後の τ_{Nd} よりも短い時間では効果が現れない。

CrとNdの数密度の比 NR は、Crの吸収帯域のみを励起するような場合には極端に大きな値をとる可能性がある

が、十分に長い時間が経過した後は、一定値となる。蛍光は、 NR が大きくなればなるほど、発光のピークが励起終了時刻よりも遅れて現れる。つまり、利得が最大となる時間が励起パルスからずれることを意味しており、増幅器を構成する場合には十分に考慮する必要がある。

蛍光寿命の測定において、実効的なNdの寿命を測るのは難しいといえる。Ndの実効的な蛍光寿命は、 NR に依存しており、 NR が1よりも小さい場合には、mono-exponentialによるカーブフィットにより求めることができるが、 NR が1以上ではフィッティングの仕方によって変化する可能性がある。

Ndの実効的な寿命は、励起波長に対する依存性をもつ。特にCr濃度が低い場合には顕著となり、Ndの吸収が存在する波長域で寿命が短くなる。Crの濃度が濃くなると、励起波長にあまり依存しなくなる。

Nd/Cr:YAG媒質を特徴づける重要なパラメータは、CrからNdへのエネルギー移譲の寿命 τ_F である。これは、 τ_C が既にわかっているなら、Crのみを励起した場合の発光特性およびNdのみを励起した場合の発光特性を計測し、式(9)、式(10)から、反転分布の状況によらずに求めることが可能である。

参考文献

- 1) A. Ikesue, K. Kamata, and K. Yoshida: J. Am. Ceramic Soc. **78** (1995) 2545.
- 2) H. Yagi, T. Yanagitani, H. Yoshida, M. Nakatsuka, and K. Ueda: Opt. and Laser Technol. **39** (2007) 1295.
- 3) H. Okada, H. Yoshida, K. Sumimura, H. Fujita, and M. Nakatsuka: Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies, Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2006), paper CTuEE6.
- 4) 佐伯 拓, 今崎 一夫, 本越 伸二, 内田 成明, 藤田 尚徳, 中塚 正大, 井澤 靖和, 山中 千代衛: レーザー研究 **34** (2006) 374.
- 5) T. Saiki, K. Imasaki, S. Motokoshi, C. Yamanaka, H. Fujita, M. Nakatsuka, and Y. Izawa: Opt. Commun. **268** (2006) 155.
- 6) T. Saiki, S. Motokoshi, K. Imasaki, H. Fujita, M. Nakatsuka, and C. Yamanaka: Jpn. J. Appl. Phys. **46** (2007) 156.
- 7) T. Saiki, S. Motokoshi, K. Imasaki, K. Fujioka, H. Fujita, M. Nakatsuka, and C. Yamanaka: Opt. Commun. **282** (2009) 936.
- 8) T. Saiki, S. Motokoshi, K. Imasaki, K. Fujioka, H. Yoshida, H. Fujita, M. Nakatsuka, and C. Yamanaka: Opt. Commun. **282** (2009) 1358.
- 9) T. Yabe, T. Ohkubo, S. Uchida, K. Yoshida, M. Nakatsuka, T. Funatsu, A. Mabuti, A. Oyama, K. Nakagawa, T. Oishi, K. Daito, B. Behgol, Y. Nakayama, M. Yoshida, S. Motokoshi, Y. Sato, and C. Baasandash: Appl. Phys. Lett. **90** (2007) 261120.
- 10) T. Saiki, S. Motokoshi, K. Imasaki, K. Fujioka, H. Fujita, M. Nakatsuka, Y. Izawa, and C. Yamanaka: Jpn. J. Appl. Phys. **47** (2008) 7896.
- 11) Z. J. Kiss and R. C. Duncan: Appl. Phys. Lett. **5** (1964) 200.
- 12) K. Fujioka, T. Saiki, S. Motokoshi, Y. Fujimoto, H. Fujita, and M. Nakatsuka: J. Luminescence, submitted.