بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

روشی جهت تعیین غلظت کروم در بهینه انتقال انرژی از کروم به نئودمیوم در بلور لیزری Nd,Cr:GSGG

مژده جان فدا[۱]، بهنام عباسی[۲] و سید نورالدین نعمت اله زاده[۲]

[۱] دانشگاه شیراز، دانشکده علوم، بخش فیزیک

[۲] صنایع الکترونیک شیراز

چکیده – در این مقاله به طور تئوری به بررسی تاثیر میزان غلظت آلاینده کروم در یک نوع لیزر گارنت به نام *Cr,Nd:GSGG* که دارای دو نوع آلاینده کروم و نئودمیوم می باشد، پرداخته شده است. در این کار از مدل های موجود برای بدست آوردن نمودار فروافت لومینسان یون کروم در بدست آوردن طول عمر این یون در ماده میزبان خاص و در حضور تبادل انرژی با یون های آلاینده نوع دوم(یون پذیرنده) استفاده شده است و از این طریق نرخ تبادل انرژی میان یون های کروم و نئودمیوم بدست آمده است. با داشتن نرخ انتقال انرژی می توان تعداد یون های پذیرنده (که مسئول لیزینگ هستند) در تراز برانگیخته انرژی و نیز بازدهی انتقال انرژی از یون بخشنده انرژی به یون پذیرنده انرژی را با استفاده از روابط ذکر شده بدست آورد.

کلید واژه-نئودمیوم ، بازدهی، گادولیوم اسکاندیوم گالیوم گارنت، گارنت، لیزرحالت جامد.

A Method for Determin the Chromium Concentration in Optimized Energy Transfer from Chromium to Neodmium in Cr,Nd:GSGG Laser Crystal

Mozhde Janfada[1], Behnam Abbasi[2], and Seyed Nooradin Nematollah Zade[2]

[1] Physics department, college of Science, Shiraz University

[2] Shiraz Electronic Industries

Abstract- In this paper we try to investigate theorically the effect of chromium concentration on efficiency of Nd,Cr:GSGG laser. For this purpose we use current models for drawing luminescence decay of chromium and obtaining lifetime of chromium in present of interaction with other ions. Thus we calculate rate of nonradiative energy transfer between ions, then we calculate the number of excited acceptor ions and efficiency of energy transfer from donors to acceptors.

Keywords: Solid state laser, garnets,GSGG, efficiency,neodymium.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

۱- مقدمه

مواد لیزری دارای دو آلاینده برای افزایش بازده و بهبود عملکرد لیزر استفاده می شوند، به عنوان مثال Cr,Nd:GSGG. که دو یون آلاینده Cr^{+3} و Nd^{+3} به ماده گارنت میزبان GSGG اضافه شده اند. یون Cr^{+3} (یون بخشنده D) ، به علت دارا بودن نوار جذبی پهن، مسئول جذب انرژی از لامپ درخشی و انتقال انرژی جذب شده بصورت غیر تابشی به یون های Nd^{+3} (یون پذیرندهA)، که مسئول عمل لیزینگ هستند، می باشد. از طرف دیگر محاسبه میزان بازدهی بلور لیزری از روش های تئوری برای پیش بینی نسبی میزان کارایی آن در اهداف عملی خاص، با توجه به قیمت بالای این بلورها، بسیار مفید خواهد بود. ازینرو در این مقاله سعی شده است گامی در جهت محاسبه بازدهی لیزرهای حالت جامد دارای دو آلاینده برداشته شود. برای محاسبه بازدهی بلور لیزر، لازم است ابتدا نرخ انتقال انرژی و فرایند انتقال انرژی میان آلاینده ها و طبیعت برهمکنش میان یون ها بررسی شود. در فرایند انتقال انرژی غیر تابشی، یک یون بوسیله یک منبع خارجی برانگیخته می شود، مقداری تابش می کند و مقداری دیگر از انرژی آن به یون های پذیرنده منتقل می شود[۱و۲].

۲- مدلسازی نرخ انتقال انرژی

از سال ۱۹۲۰ گروه های تحقیقاتی مختلفی برای مدل سازی فرایند انتقال انرژی غیر تابشی در مواد مختلف، مانند جامدات و مایعات، تلاش کردند[۳-۷]. مدل ها بر اساس کار پیشگام Foster-Dexter (FD) و توجه به سایر فرایندها گسترش یافته است. بیشتر این مدل ها می توانند تنها یک برهمکنش میان آلاینده ها را در انتقال انرژی در نظر بگیرند. مدل سازی فرایند انتقال غیر تابشی انرژی بین یون های آلاینده، در داخل ماتریس بلورینی فرض می شود که آلاینده ها به صورت تصادفی در شبکه بلوری جایگزین می گردند (دو نوع یون آلاینده در شبکه در نظر گرفته می شودD و A). به علت انتقال انرژی، برانگیختگی از یون D به یون A منتقل می شود. برای بدست آوردن انتقال انرژی، وجود یک برهمکنش میکروسکوپیک میان یون های آلاینده فرض می شود و بین تک تک یون های D و A تابش فلورسان باید محاسبه گردد. و پس از میانگین گیری برروی این تابش ها می توان آن را با داده های تجربی مقایسه کرد[۷]. این کار معمولا بوسیله شبیه سازی و حل معادلات اصلی انتقال انرژی انجام می شود. پس از اعمال یک تحریک پالسی بر نمونه کریستال، احتمال برانگیختگی برای i امین D، با رابطه زیر داده می شود.

$$\frac{dP_{Di}^{k}(t)}{dt} = -\left[\frac{1}{\tau_{D0}} + \sum_{j=1}^{N_A} W_{Di}^{Aj} + \sum_{m=1,m\neq i}^{N_D} W_{Di}^{Dm}\right] P_{Di}^{k}(t) + \sum_{m=1,m\neq i}^{N_D} W_{Dm}^{Di}\, P_{Dm}^{k}(t) + \sum_{j=1}^{N_A} W_{Aj}^{Di}\, P_{Ai}^{k}(t) \quad (۱)$$

τ_{D0} و τ_{A0} نیمه عمر یون‌های D و A است در زمانی که هیچ انتقال انرژی وجود ندارد. N_A و N_D تعداد کل یون های آلاینده موجود در نمونه بلور است. W_{Di}^{Aj} نرخ انتقال انرژی غیر تابشی از D_i به A_j است و این فرایند به عنوان انتقال مستقیم انرژی از یون D به A شناخته می شود. $W_{D_i}^{Dm}$ نرخ انتقال انرژی غیر تابشی از D_i به D_m و این فرایند به عنوان نرخ انتقال انرژی در میان یون های بخشنده(D) مشهور است و W_{Aj}^{Di} نرخ انتقال انرژی غیر تابشی از A_j به D_i است و فرایند بازگشت انرژی از یون A به D را مشخص می کند. W_{Aj}^{Al} نرخ انتقال انرژی غیر تابشی ازA_j به A_l است و به عنوان فرایند انتقال انرژی میان یون‌های پذیرنده (A) شناخته می شود[۷].

در جمله برهمکنش میکروسکوپی ، نرخ انتقال انرژی غیر تابشی از i امین یون نوع D به j امین یون نوع A، W_{Di}^{Aj} با رابطه (۲) داده می شود[۸].

$$W_{D_i}^{A_l} = \frac{1}{\tau_{D0}} \exp\left[\frac{2R_0^{DA}}{L^{DA}}\left(1-\frac{R_{ij}}{R_0^{DA}}\right)\right] + \frac{1}{\tau_{D0}}\left[\left(\frac{R_{06}^{DA}}{R_{ij}}\right)^6 + \left(\frac{R_{08}^{DA}}{R_{ij}}\right)^8 + \left(\frac{R_{010}^{DA}}{R_{ij}}\right)^{10}\right] \quad (۲)$$

اولین جمله سمت راست رابطه بالا به انتقال انرژی ناشی از برهمکنش مبادله الکترونیک مربوط می شود در صورتیکه جمله دوم به انتقال انرژی ناشی از برهمکنش چند قطبی الکترونیک تا سقف چهار قطبی- چهار قطبی می باشد. پارامتر های R_0^{DA} فاصله بحرانی انتقال L^{DA} شعاع بوهر موثر ، R_{0s}^{DA} فاصله بحرانی انتقال برهمکنش چند قطبی است (S=6,8,10)(دو قطبی- دو قطبی، دو قطبی- چهار قطبی، چهارقطبی- چهار قطبی) و R_{ij} فاصله بین i امین D با j امین A و τ_{D0} نیمه عمر D ، وقتی که انتقال انرژی وجود ندارد، می باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

۲-۱- مدل مورد استفاده در بدست آوردن نمودار تابش لومینسان یون دهنده انرژی

این مدلسازی بدون در نظر گرفتن بازگشت انرژی از A ها به D ها و مهاجرت انرژی میان A ها انجام شده است. اگر P(t) تابع انتقال انرژی میان D ها باشد، شدت تابش لومینسان D چنین خواهد بود[۹]،

$$\phi(t)_{lum}=\phi(0)_{lum}\exp\left[-\frac{t}{\tau_{D0}}-P(t)\right] \quad (۳)$$

تابع انتقال انرژی، کانالی برای به حالت پایه برگشتن یون های D با توجه به اتلاف های غیر تابشی در زمان های پس از تحریک پمپ را می دهد. برای زمان های بالاتر از چند ۱۰میکرو ثانیه تابع انتقال انرژی از روابط زیر بدست می آید.

$$P(t)=\frac{4\pi}{3}\frac{C_A}{(R_{0S}^{DA})^3}\Gamma\left(1-\frac{3}{S}\right)\left(\frac{t}{\tau_{D0}}\right)^{0.5}\left(\frac{1+10.87y+15.5y^2}{1+8.743y}\right)^{\frac{3}{4}} \quad (۴)$$

$$y=\frac{1}{2}\left(\frac{4}{3}\pi C_D\right)^{4/3}\left(\frac{(R_{06}^{DD})^6}{\tau_{D0}}\right)\left(\frac{(R_{06}^{DA})^6}{\tau_{D0}}\right)^{\frac{1}{3}}t^{2/3} \quad (۵)$$

R_{0s}^{DA} فاصله بحرانی انتقال با $S=6,8,10$ ، Γ تابع گاما، C_D غلظت D و y تنها برای حالت $S=6$ (برهمکنش دو قطبی- دو قطبی) نوشته شده است.

۲-۲- بدست آوردن نرخ انتقال انرژی از روی نمودار فرو افت لومنینسان D و محاسبه جمعیت وارون

در اینکار ما از تابع انتقال انرژی (۴) برای بدست آوردن نمودار شدت تابش لومینسان D استفاده می کنیم. زمانی که در آن نمودار شدت تابش به $\frac{1}{e}$ مقدار اولیه خود می رسد، طول عمر تابش لومینسان است[۱۲]. بنابراین می توانیم طول عمر تابش لومینسان اتم های D را در غلظت های متفاوت D و A و یون های مختلف با میزبان های متفاوت بدست آوریم. با تحلیل نمودار تابش لومینسان D (در این بررسی Cr^{+3}) که در منابع [۱۰] و[۱۱] و برای Cr,Nd:GSGG انجام شده است نشان می دهد که اگر غلظت Cr^{+3} بیش از $10^{20}\ Cm^{-3}$ باشد، منحنی اضمحلال توسط رابطه زیر توصیف می شود

$$I(t)=I_0\exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{D0}}+\gamma\sqrt{t}+\overline{W}t\right)\right] \quad (۶)$$

I_0 شدت اولیه نرمال شده شدت لومینسان است

$$\gamma=\frac{4}{3}\pi^{\frac{3}{2}}n_A[C_{DA}(D-A)]^{\frac{1}{2}} \quad (۷)$$

n_A غلظت A (در اینجا نئودمیوم) و$C_{DA}(D-A)$ ثابتی است که نشان دهنده احتمال برهمکنش یون D و یون A در فاصله ۱ سانتیمتری از یکدیگر است و $\overline{W}$ نرخ واهلش انتقالی محدود است[۱۱].

$$\overline{W}=\frac{1}{\tau_{meas}}-\frac{1}{\tau_{D0}} \quad (۸)$$

τ_{meas} ،طول عمر اندازه‌گیری شده یون D از نمودار شدت لومینسان است و τ_{D0}، طول عمر یون D در غیاب برهمکنش با دیگر یون ها می باشد.

بنابراین با رسم نمودار تابش لومینسان با استفاده از رابطه (۴) و (۵) می توان τ_{meas} را بدست آورد و با مشخص بودن τ_{D0} می توان مقدار $\overline{W}$ را تعیین کرد. با حل معادله (۱) و با قرار دادن شرایط اولیه $N_D=N_D(0)$ ، $N_A=N_A(0)$ در $t=0$ تحول زمانی جمعیت یون های پذیرنده انرژی بدست می آید[۱۰].

اگر $\frac{1}{\tau_A}-\frac{1}{\tau_D}-w<0$

$$N_A(t)=N_A(0)exp\left[-\frac{t}{\tau_A}\right]+N_D(0)exp\left[-\frac{t}{\tau_A}\right]\times\left\{\frac{\sqrt{\pi}\gamma\exp(-\frac{\gamma^2}{4B^2})}{2B}\left(1-\frac{W}{B^2}\right)\left\{\phi\left(B\sqrt{t}+\frac{\gamma}{2B}\right)-\phi\left(\frac{\gamma}{2B}\right)\right\}+\left(\frac{W}{B^2}\right)\left[1-exp\left(-B^2t-\gamma\sqrt{t}\right)\right]\right\} \quad (۹)$$

$$B=\left(\frac{1}{\tau_A}-\frac{1}{\tau_D}+w\right)^{1/2}$$

رابطه (۹) را می توان به شکل کلی زیر نوشت.

$$N_A(t)=N_{0A}(t)+\Delta N_A(t) \quad (۱۱)$$

$\phi(x)=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^x\exp(-z^2)\,dz$ تابع خطا است.

بازده کوانتومی حساسگر، به عنوان نسبت تعداد کوانتاهای تابش شده توسط یون های پذیرنده انرژی که انرژی برانگیختگی را از یون های بخشنده انرژی دریافت کرده اند، بر تعداد کوانتاهای جذب شده توسط یون های بخشنده انرژی تعریف می شود. مقدار بازده کوانتومی توسط رابطه زیر محاسبه می گردد[۱۰].

$$\eta=\frac{\int\Delta N_A(t)dt}{\tau_A N_D(0)} \quad (۱۲)$$

برای مورد خاصی که مورد نظر ماست می توان رابطه را به شکل زیر نوشت.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

$$\eta = \frac{1}{\tau_A N_D(0)} \int N_D(0) exp\left[-\frac{t}{\tau_A}\right] \times \left\{\frac{\sqrt{\pi}\gamma \exp(\frac{\gamma^2}{4B^2})}{2B}\left(1-\frac{W}{B^2}\right)\left\{\phi\left(B\sqrt{t}+\frac{\gamma}{2B}\right)-\phi\left(\frac{\gamma}{2B}\right)\right\}+\left(\frac{W}{B^2}\right)\left[1-exp\left(-B^2 t-\gamma\sqrt{t}\right)\right]\right\} dt \qquad (۱۳)$$

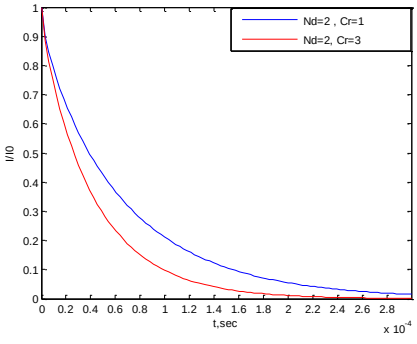
۲-۳- نمونه محاسبات

ابتدا برای اطمینان از درستی کار، مقادیر $\overline{W}$ را برای چند غلظت مختلف که در مرجع [۱۰و ۱۱] آورده شده است محاسبه کرده و با مقادیر ذکر شده در این مراجع مقایسه می نماییم. بنابراین نمودار تابش لومینسان را با استفاده از رابطه (۳) و (۴) برای Cr,Nd:GSGG و غلظت های مختلف از Cr و Nd که در زیر ذکر شده را رسم نموده و زمانی را که در آن نمودار به $\frac{1}{e}$ مقدار اولیه خود می رسد را به عنوان طول عمر لومینسان در نظر می گیریم.

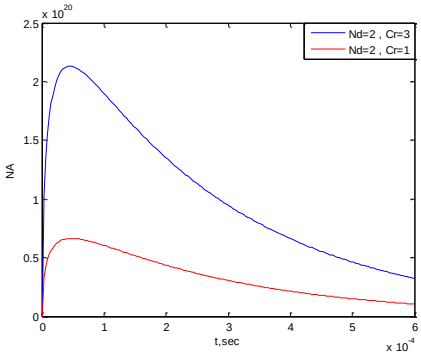
الف) $(Cr = 1, \mathrm{Nd} = 2) \times 10^{20}\ cm^{-3}$

ب) $(Cr = 3, Nd = 2) \times 10^{20}\ cm^{-3}$

که این مقادیر برای مورد الف) ۶۷ میکروثانیه ب) ۵۱ میکروثانیه بدست می آید. با داشتن مقادیر طول عمر لومینسان کروم در حالتی که برهمکنشی با سایر یون ها ندارد (۱۲۰ میکروثانیه) و استفاده از رابطه (۸) مقادیر $\overline{W}$ به شرح زیر بدست می آید. الف) $6.6 \times 10^3\ s^{-1}$ که مقدار آن در مقاله مورد نظر $4.8 \times 10^3\ s^{-1}$ ذکر شده است. ب) $1.1 \times 10^4\ s^{-1}$ که مقدار آن در مقاله $1.3 \times 10^4\ s^{-1}$ ذکر گردیده است. نسبت مقادیر بدست آمده توسط ما و مقادیری که در مقالات آمده به شرح زیر می باشد. الف) 1.37 ب) 0.85



شکل (۱): نمودار فرو افت لومینسان کروم برای Cr,Nd:GSGG با غلظت های داده شده با استفاده از روابط (۳) و (۴) .



شکل (۲): نمودار تعداد اتم های برانگیخته acceptor بر حسب زمان برایCr,Nd:GSGG با استفاده از رابطه (۹) و با غلظت‌های مشخص

با محاسبه بازدهی انتقال انرژی از D به A توسط رابطه (۱۳) برای این دو غلظت مذکور، برای مورد الف) ۰.۸۳۹ و برای مورد ب) ۰.۸۷۳ بدست می آید.

۳- نتیجه گیری

بنابراین با استفاده از این روش می توانیم جمعیت اتم های پذیرنده انرژی (A) در تراز برانگیخته که انرژی خود را از اتم های بخشنده انرژی (D) دریافت کرده اند را بر حسب زمان برای غلظت های مختلف بدست آوریم و با استفاده از رابطه (۱۳) بازدهی انتقال انرژی از یون D به A را محاسبه کرد. حتی در صورت مشخص بودن پارامترهای مورد نیاز در روابط (۳) و (۴) و (۵) و (۹) ، می توان این مقادیر را برای انواع لیزرهای حالت جامد بدست آورد. لازم به ذکر است که اتم های پذیرنده انرژی مسئول عمل لیزینگ هستند. با داشتن جمعیت اتم های پذیرنده در تراز برانگیخته، می توان برآوردی از بهره لیزر را بدست آورد.

مراجع

[1] Koechner, Walter, *Solid-State Laser Engineering*, Springer, 2006.
[2] Silvia-Moreno, et. al., Direct energy transfer and migration among Cr ions in the Cr,Nd:GSGG luminescent system, Optical Material, Vol.16: 221-226, 2001.
[3] Foster, T., Ann. Phys. Vol. 2, P. 55,1948.
[4] Dexter, D. L., *J.* Chem. Phys. Vol. 21, P. 836, 1953.
[5] Yokota, M., Tanimoto, O., J. Phys. Soc. Jpn., Vol. 22, P. 779, 1967.
[6] Burshtein, A. I., Sov. Phys. JETP, Vol. 31, P. 882, 1972.
[7] Vega-Duran, J. T., et. Al., Exact solution to the general non-radiative energy transfer master equation in crystalline materials, J. Luminescence, Vol. 91, P.233-241, 2000.
[8] Barbosa-Garcia, O., et. al., J. Opt. Soc. Am. B, Vol. 14, P. 2731, 1997.
[9] Voron' ko, Yu. K., et. al., Sov. Phys. JETP. Vol. 44, P. 251, 1976.
[10] Ostroumov, V. G., Privis, Yu. S., Smirnov, V. A., Shcherbakov, I. A., *Sensitizing of Nd^{+3} luminescence by Cr^{+3} in gallium garnets* ,Solid-State Laser Materials, Vol. 3, No. 1,1986.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]