

بررسی عملکرد لیزری محیط فعال مایع حاوی مشتقات یون های نئودیمیوم

سید احمدپور هاشمی^{۱*}، بزرگمهر مداح^۲، جواد خلیلزاده^۳، حمید سرو علی شاه^۴، داود شهابی^۵، ابراهیم حاجی علی^۶،
هادی رحیمیان^۷، سعید سعادت نژاد^۸

۱ و ۷- دکتری، ۲ و ۳- دانشیار، ۴ و ۵- دانشجوی دکتری، ۶- استادیار، ۸- کارشناسی ارشد دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۲، بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۲۸، پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۴، انتشار: ۱۴۰۲/۱۱/۰۱)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26762935.1402.14.4.3.9>

چکیده

محیط فعال لیزری مایع حاوی مشتقات یون های نئودیمیوم می تواند نامزد جایگزین مواد حالت جامد برای رفع مشکلات گرمایی لیزرهای پرتوان باشد که توجه محققان این حوزه را به خود جلب کرده است. در این مقاله ساخت، تحلیل و بررسی ویژگی های طیفی و حرارتی دو نمونه محیط فعال لیزری مایع حاوی ۰/۳ مولار نمک Nd^{3+} در دی متیل سولفوکسید دوتره (حلال آلی) و فسفر اکسی کلراید (حلال معدنی) گزارش شده است. بررسی طیفی این مواد فعال نشان دهنده کاهش شدت فلورسانس در نمونه $Nd(TFA)_3-DMSO-d_6$ نسبت به نمونه $Nd^{3+}-POCl_3-SnCl_4$ است که علی رغم کم بودن شدت فلورسانس در نمونه حلال آلی در مقایسه با حلال معدنی به دلیل کاهش قابل توجه اثرات سمیت و خوردگی این نمونه مورد توجه بیشتر قرار می گیرد. نتایج به دست آمده نشان می دهد که محیط فعال لیزری مایع حاوی مشتقات یون های نئودیمیوم با توجه به انتقال حرارت بهتر مشکلات حرارتی را برطرف کرده؛ اما به دلیل ضریب بهره بسیار کوچک از مرتبه cm^{-1} ۰/۰۰۱^۱ ایجاد نوسان لیزری را سخت و بازدهی خروجی را کاهش می دهد.

کلیدواژه ها: محیط فعال لیزری مایع، فلورسانس، جذب، لیزر حالت جامد، اثرات حرارتی، لیزر کلوئیدی.

Investigating the Laser Performance of Liquid Gain Medium Containing Derivatives of Neodymium Ions

S. A. Pourhashemi^{1*}, B. Maddah², J. Khalilzadeh³, H. Sarvalishah⁴, D. Shahabi⁵, E. Hajiali⁶, S. Rahimian⁷,
S. Saadatnejad⁸

Imam Hossein University

(Received: 2023/11/13, Revised: 2023/12/19, Accepted: 2024/01/04, Published: 2024/01/21)

Abstract

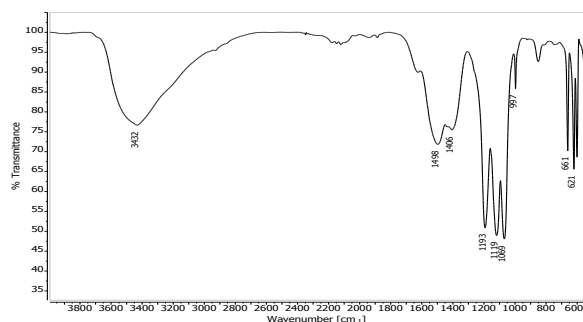
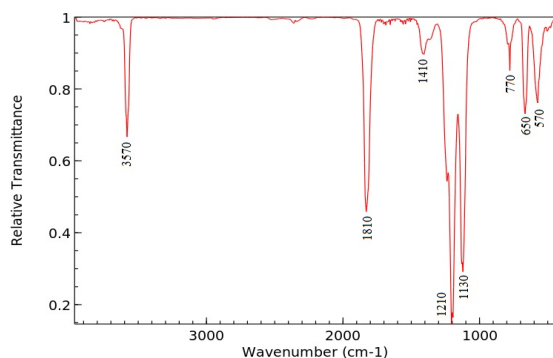
Liquid laser gain medium containing neodymium ion derivatives can be a candidate to replace solid-state materials in order to solve the thermal lensing problems of high-power lasers, which has attracted the attention of researchers in this field. This article reports the production, thermal and spectral analysis of two samples of liquid laser gain medium containing 0.3 M Nd^{3+} salt in deuterium dimethyl sulfoxide (organic solvent) and phosphorus oxychloride (inorganic solvent). Spectral investigation of these active materials shows a decrease in fluorescence intensity in the $Nd(TFA)_3-DMSO-d_6$ sample compared to the $Nd^{3+}-POCl_3-SnCl_4$ sample. Despite the low fluorescence intensity in the organic solvent versus the inorganic solvent, this sample receives more attention due to the significant reduction of the effects of toxicity and corrosiveness. The results show that the liquid laser gain medium containing neodymium ion derivatives has solved the thermal problems due to better heat transfer. Still, with a minimal gain coefficient of $0.001\ cm^{-1}$, it isn't easy to create laser oscillation and the output efficiency reduces.

Keywords: Liquid Laser Active Medium, Fluorescence, Absorption, Solid-State Laser, Thermal Effects, Colloidal Laser.

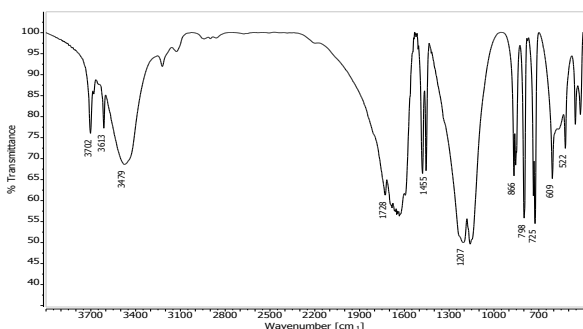
*Corresponding Author E-mail: hashemi_64@ihu.ac.ir

۱. مقدمه

شاخص در 1780 cm^{-1} و 1650 cm^{-1} مربوط به گروه استاتی (COO⁻) و 1150 cm^{-1} و 1240 cm^{-1} مربوط به گروه CF_3 است. از طرف دیگر پیک 3500 cm^{-1} مربوط به رطوبت جذب شده (آب) و پیک های اطراف 3600 cm^{-1} تری استات جذب فیزیکی شده است که در خارج از لایه کوردیناسیون هستند [۱۱]. با توجه به مقالاتی منتشر شده در زمینه تأثیر غلظت در شدت فلورسانس [۹، ۱۲، ۱۳] غلظت 0.3 مولار نتودیمیوم انتخاب شد، بنابراین 0.4374 گرم $\text{Nd}(\text{TFA})_3$ در یک ویال حاوی سه میلی لیتر DMSO-d_6 (خشک شده با الک مولکولی 4A°) توسط اولتراسونیک حل شد و محلول 0.3 مولار از نمک بدست آمد.

شکل ۱. طیف FT-IR اکسید نتودیمیوم (Nd_2O_3)

شکل ۲. طیف FT-IR مربوط به TFA گرفته شده از سایت NIST chemistry Web [۱۴]

شکل ۳. طیف FT-IR مربوط به نمک $\text{Nd}(\text{TFA})_3$

جهت ساخت محیط فعال $\text{Nd}^{3+}\text{-POCl}_3\text{-SnCl}_4$ ابتدا 0.1514 گرم پودر Nd_2O_3 در داخل بالن 10 میلی لیتری ریخته شد و به آن 3 میلی لیتر حلال POCl_3 و 0.3 میلی لیتر SnCl_4 اضافه شد. مخلوط سوسپانسیون حاصل بر روی حمام آب 50 درجه سلسیوس به مدت یک ساعت هم خورد تا کاملاً شفاف گردد (رنگ

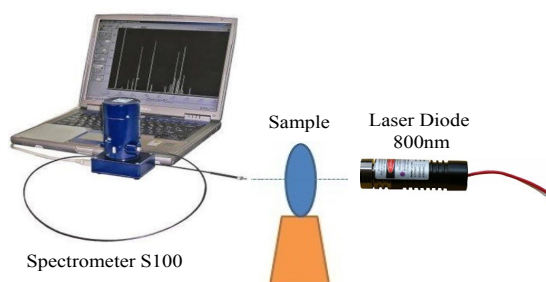
فعالیت های بسیاری در زمینه انواع لیزرها با کاربردهای مختلف دفاعی، پردازش مواد و زمینه های مختلف تحقیقات علمی انجام شده است [۱، ۲]. سیستم های لیزری پرتوان با محیط فعال شامل نتودیمیوم (Nd^{3+}) و طول موج خروجی در محدوده 1060 nm به عنوان یک منبع انرژی پرتوان کارایی زیادی دارند [۳]. نتودیمیوم در محیط های لیزر جامد، مانند بلورها و شیشه ها به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. رسیدن به نرخ تکرار بالا برای دستیابی به خروجی با توان متوسط بالا به علت هدایت گرمایی ضعیف این محیط های فعال تقریباً غیرممکن است و محیط های جامد تحت چنین شرایطی به آسانی آسیب می بینند. یک راه حل جایگزین برای این هدف، تولید محیط فعال لیزری مایع حاوی یون لاتنانید است. یکی از ادعاهای پژوهشگران فعال در موضوع این مقاله کاربرد آتی آن در حوزه دفاعی است، بنابراین محیط فعال مایع حاوی یون های Nd^{3+} مورد توجه قرار گرفته اند، زیرا مایعات علاوه بر ظرفیت گرمایی بالا با امکان ایجاد چرخش می توانند به طور مؤثرتر خنک شوند [۴، ۵].

رهیافت جدید راه حلی برای مشکل حرارتی در لیزرهای پرتوان حالت جامد است که امکان استفاده از این محیط فعال را در لیزرهای پرتوان پیوسته و پالسی فراهم می کند. هیلر و همکارانش در دهه ۱۹۶۰، لیزر اکسید Nd با کلرید را در SeOCl_2 و POCl_3 ساختند، اما به دلیل استفاده از حلال های غیر متعارف که دارای معایبی مانند سمیت و سوزاندگی بودند، نتوانستند کاربردی در کارهای تجربی پیدا کنند [۶، ۷]. اخیراً Nd^{3+} در حلال های آلی (یا غیر آبی که هیدروژن و کربن عناصر اصلی این حلال ها هستند) مورد توجه قرار گرفته اند [۸، ۹]. در این مقاله دو نمونه از این گروه جدید ماده فعال $\text{Nd}(\text{TFA})_3\text{-DMSO-d}_6$ و $\text{Nd}^{3+}\text{-POCl}_3\text{-SnCl}_4$ ساخته و مورد تحلیل و بررسی قرار می گیرند و در انتها مزیت ها و چالش های پیش رو این نمونه از محیط فعال بیان می شود.

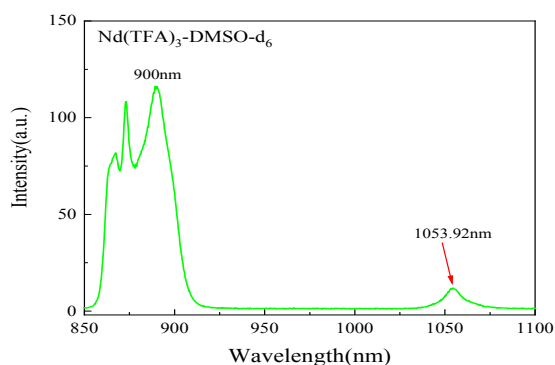
۲. بخش تجربی

۲-۱. ساخت محیط فعال لیزری مایع

جهت ساخت محیط فعال $\text{Nd}(\text{TFA})_3\text{-DMSO-d}_6$ ابتدا مقدار 1 گرم اکسید Nd_2O_3 به 22 میلی لیتر محلول $1:10$ آب و تری فلورو فلوئور استیک اسید (TFA) در بالن 50 میلی لیتری اضافه و مخلوط حاصل به مدت 4 ساعت رفلکس شد. سپس حلال تبخیر و جامد حاصل در زمان 4 ساعت و در دمای 80°C خشک شد [۱۰]. طیف FT-IR اکسید نتودیمیوم (Nd_2O_3)، تری فلورو استات (TFA) و محصول سنتز شده $\text{Nd}(\text{TFA})_3$ به ترتیب در شکل های (۱)، (۲) و (۳) نشان داده شده است. از مقایسه طیف ها مشخص می شود پیک های جدیدی در نمک ظاهر شده که مربوط به تری فلورو استات متصل شده به نتودیمیوم است. پیک های

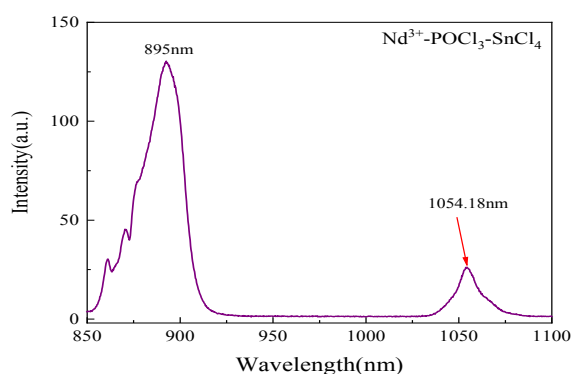


شکل ۵. طرح‌واره چیدمان آزمایشگاهی جهت بررسی فلورسانس محیط فعال مایع ساخته شده



شکل ۶. طیف فلورسانس $\text{Nd(TFA)}_3\text{-DMSO-d}_6$

طیف فلورسانس $\text{Nd}^{3+}\text{-POCl}_3\text{-SnCl}_4$ در شکل (۷) نشان داده شده است، در این طیف فلورسانس دو قله در طول موج‌های ۱۰۵۴/۱۸ و ۸۹۵ نانومتر به ترتیب متناظر با گذار $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ و $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ یون Nd^{3+} هستند. تغییر اندک در طول موج فلورسانس شکل‌های (۶) و (۷) به دلیل نوع میزبان مورد استفاده می‌باشد، که بر روی ترازهای یون Nd^{3+} تأثیر گذاشته است [۳].



شکل ۷. طیف فلورسانس $\text{Nd}^{3+}\text{-POCl}_3\text{-SnCl}_4$

۲-۳. محاسبه ضریب بهره نمونه‌های ساخته شده

رابطه بین انرژی ورودی و خروجی در محیط‌های تقویت از معادله فرانتز-نودویک^۱ پیروی می‌کند [۳، ۱۶-۲۱].

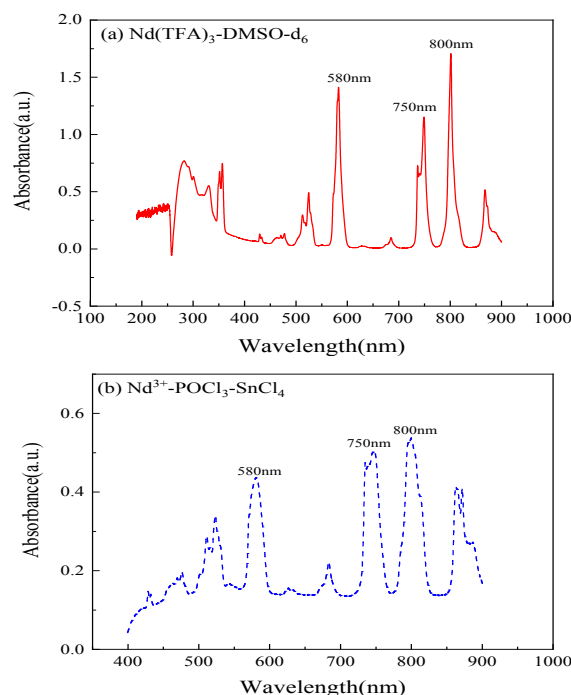
$$E_{out} = E_s \ln \left\{ 1 + \left[\exp\left(\frac{E_{in}}{E_s}\right) - 1 \right] \exp(g_0 l) \right\} \quad (1)$$

ارغوانی). سپس بالن حاوی محلول نمک نئودیمیوم به یک دستگاه تقطیر کوچک متصل و در دمای محیط با پمپ خلأ و فشار ۳۰۰ میلی متر جیوه برای نیم ساعت تقطیر شد تا آب و اسید حاصل از نمونه خارج گردد. محلول شفاف حاصل که عاری از گازهای اسیدی و ترکیبات فرار بود، بدست آمد.

۲-۲. بررسی طیف جذب و فلورسانس نمونه‌های ساخته شده

جهت بدست آوردن طیف جذبی نمونه‌های ساخته شده در محدوده ۹۰۰-۱۹۰ nm از دستگاه اسپکتروفتومتر (Rayleigh-UV2100) استفاده شد. شکل‌های (۴-ا) و (۴-ب) به ترتیب طیف جذب $\text{Nd(TFA)}_3\text{-DMSO-d}_6$ و $\text{Nd}^{3+}\text{-POCl}_3\text{-SnCl}_4$ را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود طیف جذبی نمونه‌ها دارای قله جذب در طول موج ۵۸۰، ۷۵۰ و ۸۰۰ نانومتر هستند که به ترتیب متناظر با گذارهای $^4I_{9/2} \rightarrow ^4G_{5/2} + ^2G_{7/2}$ ، $^4I_{9/2} \rightarrow ^4F_{5/2} + ^2H_{9/2}$ و $^4I_{9/2} \rightarrow ^4F_{7/2} + ^4S_{3/2}$ هستند. نتایج بدست آمده در طیف جذبی نمونه‌ها با مراجع هم‌خوانی دارد [۱۳، ۱۵].

به‌منظور بررسی فلورسانس نمونه‌های ساخته شده از دیود لیزر ۸۰۰ nm با توان ۵۰۰ mW و همچنین طیف‌سنج Spectral star جهت ثبت طیف خروجی استفاده شد. طرح‌واره چیدمان آزمایشگاهی برپا شده جهت اندازه‌گیری فلورسانس در شکل (۵) نشان داده شده است.

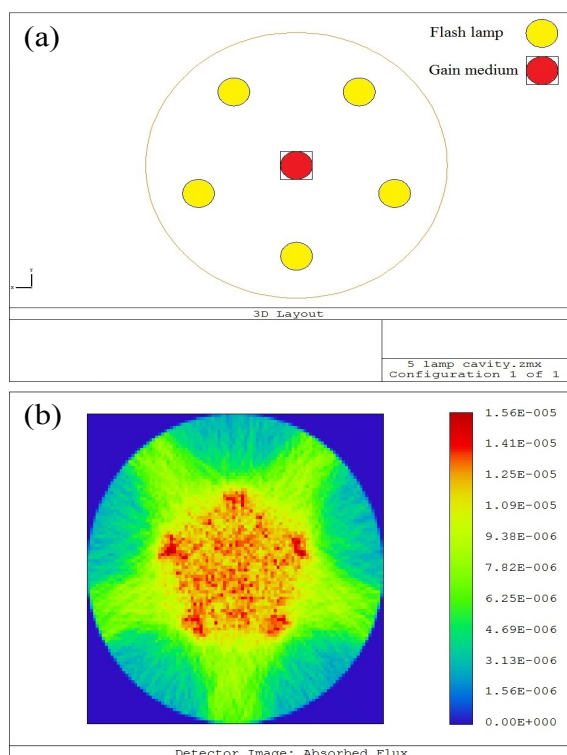


شکل ۴. طیف جذب (a) $\text{Nd(TFA)}_3\text{-DMSO-d}_6$ و (b) $\text{Nd}^{3+}\text{-POCl}_3\text{-SnCl}_4$ ثبت شده توسط دستگاه اسپکتروفتومتر (Rayleigh-UV2100)

^۱ Frantz-Nodvik

۴-۲. شبیه سازی اثرات حرارتی

جهت مقایسه بهبود عملکرد انتقال حرارت محیط فعال لیزری مایع در مقایسه با محیط فعال لیزری حالت جامد، نیاز است تا توزیع تابش دمش بر روی محیط فعال شبیه سازی شود که بدین منظور کاواک لیزری با محیط فعال به قطر ۱۲ mm و طول ۱۰۰ mm که توسط ۵ لامپ فلش با قطر ۹ mm و طول ۱۰۰ mm با انرژی ۵۰۰ W/lamp دمش می شود، توسط نرم افزار Zemax شبیه سازی شد. نحوه چینش و توزیع شدت لامپ های دمش بر روی محیط فعال به ترتیب در شکل (۱۰-ا) و (۱۰-ب) نشان داده شده است.



شکل ۱۰. (ا) نحوه چینش فلش لامپ ها و (ب) توزیع شدت بر روی محیط فعال، شبیه سازی شده با نرم افزار زیمکس

اثرات حرارتی برای بلور Nd:YAG و محیط فعال لیزری مایع، $\text{Nd(TFA)}_3\text{-DMSO-d}_6$ همگن بدون چرخه حرکت در نرم افزار LASCAD شبیه سازی شد. بدین منظور نتایج به دست آمده توسط نرم افزار Zemax به عنوان تابع ورودی در نرم افزار LASCAD قرار داده شد. در این شبیه سازی دمای آب در اطراف محیط فعال ۲۹۸ کلوین (۲۵ درجه سلسیوس) فرض شده است.

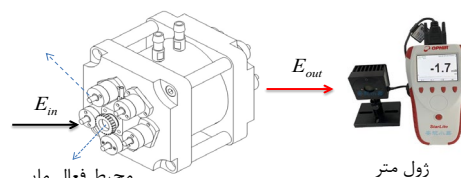
شکل (۱۱) شبیه سازی را برای محیط فعال Nd:YAG جامد نشان می دهد. در این شبیه سازی دمای مرکز محیط فعال ۳۸۵/۵ کلوین به دست آمد که بیانگر اختلاف دمای سطح و مرکز ۵۲ درجه است.

در اینجا E_{in} ، E_s ، g_0 و l به ترتیب انرژی خروجی، انرژی ورودی، انرژی اشباع، ضریب بهره و طول محیط بهره هستند. در موارد خاص رابطه بیان شده به صورت زیر ساده می شود.

$$E_{out} = E_{in} \exp(g_0 l) \quad E_{in} \ll E_s \quad (2)$$

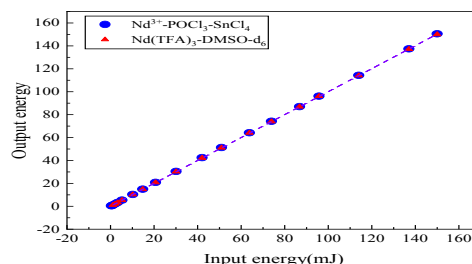
$$E_{out} = E_{in} + E_s g_0 l \quad E_{in} \gg E_s \quad (3)$$

محیط فعال مایع در داخل کاواک که طرحواره آن در شکل (۸) نشان داده شده ریخته شد. این محیط فعال توسط ۵ لامپ فلش دمش می شود و دو طرف آن (ورودی/خروجی باریکه) پنجره ضد بازتاب در طول موج ۱۰۵۴ نانومتر نصب شده است. به کمک چیدمان آزمایشگاهی شکل (۸)، با ارسال باریکه کاوش (E_{in}) و تغییر انرژی آن، انرژی خروجی (E_{out}) اندازه گیری شد.



شکل ۸. طرحواره چیدمان آزمایشگاهی جهت اندازه گیری ضریب بهره محیط فعال

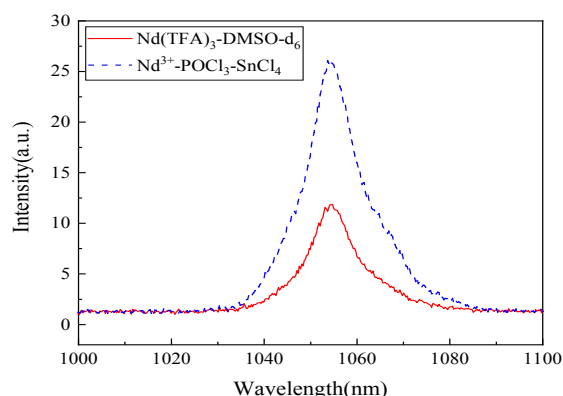
نمودار انرژی خروجی اندازه گیری شده توسط ژول متر Gentec-QE65LP باتوجه به انرژی ورودی در شکل (۹) نشان داده شده است. با استفاده از داده های شکل (۹) و فرمول (۱) به کمک روش حداقل مربعات^۱ با استفاده از نرم افزار متلب و برازش منحنی بر داده ها مقدار ضریب بهره سیگنال کوچک و انرژی اشباع با طول محیط بهره ۱۰۰ mm تخمین زده شد. نتایج بدست آمده نشان دهنده انرژی اشباع 25 mJ/cm^2 و ضریب بهره بسیار کوچک از مرتبه 10^{-1} cm^{-1} است که ایجاد نوسان لیزری در این نوع از مواد فعال را بسیار مشکل کرده و بازدهی خروجی را به شدت کاهش می دهد. کم بودن ضریب بهره می تواند به عنوان گلوگاهی اساسی در این نمونه از محیط فعال مطرح گردد که منجر به کاهش بازدهی شده و با نتایج منتشر شده در مقالات مطابقت دارد [۹، ۲۱، ۲۲].



شکل ۹. انرژی خروجی اندازه گیری شده با توجه به انرژی ورودی

^۱ Least Square Method

مقایسه شدت فلورسانس در طول موج حدود 1053 nm برای دو ماده ساخته شده در شکل (۱۳) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود شدت فلورسانس در محیط فعال مایع $\text{Nd}(\text{TFA})_3\text{-DMSO-d}_6$ نسبت به $\text{Nd}^{3+}\text{-POCl}_3\text{-SnCl}_4$ کمتر است. اما در محیط فعال مایع $\text{Nd}^{3+}\text{-POCl}_3\text{-SnCl}_4$ از حلال معدنی اکسی کلرید فسفر (POCl_3) استفاده شده است که بسیار سمی و خورنده و بخار آن تحریک کننده پوست، چشم و دستگاه تنفسی است. قرار گرفتن در معرض آن در طولانی مدت و استفاده مداوم از آن توأم با خطر مرگ است که از معایب جدی این محیط فعال است. استفاده از حلال آلی DMSO-d_6 با توجه به کاهش چشمگیر خطرات ذکر شده نسبت به نمونه معدنی مورد توجه محققان این حوزه قرار گرفته است. از معایب اصلی این نمونه محیط فعال می‌توان به وجود بازدهی کم اشاره کرد که به عنوان چالش جدی در توسعه آن مطرح است. در جدول (۱) مزایا و چالش‌های پیش روی این نمونه از محیط فعال ارائه شده است.



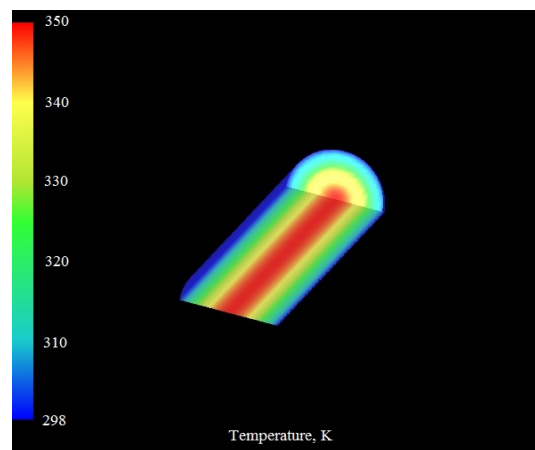
شکل ۱۳. مقایسه شدت فلورسانس یون نئودیمیوم در حلال آلی (DMSO-d_6) و معدنی (POCl_3)

جدول ۱. مزایا و چالش‌های محیط فعال لیزری مایع

محیط فعال لیزری مایع	
چالش‌ها	مزایا
ایجاد چرخه بدون ارتعاش که حداقل پراکندگی فوتون‌های تولیدی را ایجاد کند	خنک‌سازی محیط فعال در بیرون کاواک دمش با ایجاد چرخه
پایداری کم محیط فعال در اثر تبخیر یا ته‌نشینی	تعویض آسان محیط فعال
کم بودن ضریب بهره که فرآیند لیزر را با مشکل جدی مواجه کرده و بازدهی خروجی را به شدت کاهش می‌دهد	انتقال حرارت بهتر نسبت به نمونه جامد

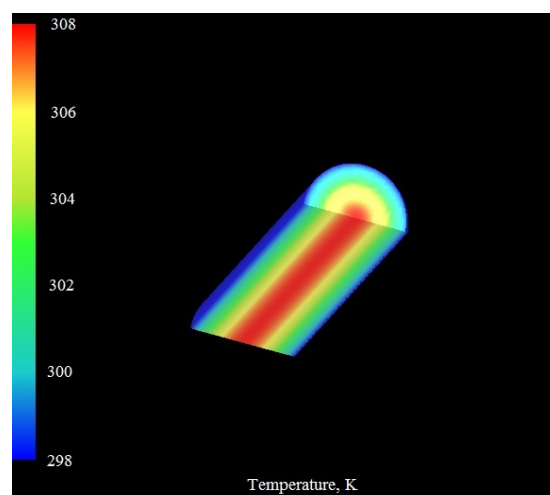
۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله ویژگی‌های حرارتی و لیزری دسته جدیدی از مواد فعال لیزری مبتنی بر یون‌های نئودیمیوم مورد بررسی قرار گرفتند. آثار حرارتی مخرب به‌عنوان یکی از مسائل پیشروی لیزرهای حالت جامد پرتوان مطرح است که در محیط فعال مایع با توجه به شبیه‌سازی صورت گرفته و همچنین قابلیت ایجاد چرخه



شکل ۱۱. توزیع حرارتی Nd:YAG شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار LASCAD

شکل (۱۲) شبیه‌سازی توزیع دمایی در محیط فعال مایع را نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی دمای مرکز محیط فعال $302/9$ کلوین به دست آمد که بیانگر اختلاف دمای سطح و مرکز 10 درجه است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که گرادیان دمایی ایجاد شده در محیط فعال مایع به مراتب کمتر از محیط فعال جامد است که این ویژگی باعث مطرح شدن این محیط به عنوان جایگزین مواد حالت جامد جهت رفع مشکلات گرمایی لیزرهای پرتوان گردیده است.



شکل ۱۲. توزیع حرارتی در محیط فعال $\text{Nd(TFA)}_3\text{-DMSO-d}_6$

۳. نتایج و بحث

اثرات گرمایی به‌عنوان یکی از گلوگاه‌های اصلی لیزرهای حالت جامد پرتوان مطرح می‌شود. این گلوگاه در محیط فعال لیزری مایع به دلیل انتقال حرارت بهتر مایعات و همچنین دارا بودن قابلیت ایجاد چرخه بسته برای انتقال گرما به خارج از کاواک برطرف می‌گردد. در نتیجه به کمک محیط فعال لیزری مایع می‌توان بر مشکلات حرارتی لیزرهای حالت جامد پرتوان غلبه نمود.

- [15] Hou, C.; Guo, H.; She, J.; Cui, X.; Qiao, Z.; Gao, F.; Lu, M.; Wei, W.; Peng, B. "A Neodymium Fluid Laser: Laser Emission in Circulating State"; *J. Optics Laser Technol.* 2012, 44, 1633-1635. DOI:10.1016/j.optlastec.2011.12.047
- [16] Frantz, L. M.; Nodvik, J. "Theory of Pulse Propagation in a Laser Amplifier"; *applied Physics B.* 1963, 34, 2346-2349. DOI:10.1063/1.1702744
- [17] Pourhashemi, S. A.; Parvin, P.; Khalilzade, J. "Measurement of Gain-Saturation Properties of a Q-Switched Nd:YAG Laser Oscillator With a Three-Pass Amplifier and Corresponding Beam Diagnosis"; *Optik* 2023, 282, 170883. DOI:10.1016/j.ijleo.2023.170883
- [18] Parvin, P.; Ilchi-Ghazaani, M.; Bananej, A.; Lali-Dastjerdi, Z. "Small Signal Gain and Saturation Intensity of a Yb: Silica Fiber MOPA System"; *Optics & Laser Technol.* 2009, 41, 885-891.
- [19] Pourhashemi, S. A.; Parvin, P.; Khalilzadeh, J.; Dibaei, B.; Khoei, R. "Design and Fabrication of a Nd:YAG Unstable Multi-Pass Telescopic Amplifier"; *Optics Laser Technol.* 2024, 168, 109851. DOI:10.1016/j.optlastec.2023.109851
- [20] Watanabe, S.; Sato, T.; Kashiwagi, H. "Small signal gain measurement of KrF and XeF laser amplifiers"; *Optics Communications* 1977, 22, 143-146.
- [21] Varshney, A. K.; Singhal, G.; Nayak, J. "Two-Dimensional Small-Signal Gain Measurements in a Laser Diode-Pumped Flowing Nd³⁺: POC13: SnCl₄ Liquid Medium"; *Infrared Phys. Technol.* 2022, 125, 104265. DOI:10.1016/j.infrared.2022.104265
- [22] Varshney, A. K.; Mainuddin, M.; Kumar, S.; Singh, V. K.; Kumar, V.; Verma, A. C.; Kumar, A.; Singhal, G., "Laser Diode Array Pumped Circulating Nd³⁺:POCl₃:SnCl₄ Liquid Laser"; *Optics Laser Technol.* 2023, 167, 109811.

خنک کننده می توان بر این مسئله غلبه نمود که این امر توجه محققان حوزه لیزر را جهت رفع گلوگاه سامانه های دفاعی لیزری توان بالا به خود جلب کرده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که محیط فعال لیزری مایع حاوی مشتقات یون های نئودیمیوم به دلیل ضریب بهره بسیار کوچک از مرتبه 10^{-1} ایجاد نوسان لیزری را سخت و بازدهی خروجی را به شدت کاهش می دهد که می تواند به عنوان نقصی مهم کارایی این نمونه از محیط فعال را دچار چالش نماید.

۵. مراجع ها

- [1] Inguscio, M.; Wallenstein, R. "Solid State Lasers: New Developments and Applications"; Springer Science & Business Media: 2012.
- [2] Siegman, A. E. "Lasers"; University Science Books: 1986.
- [3] Koechner, W. "Solid-State Laser Engineering"; Springer: 2013.
- [4] Burdukova, O. A.; Konyshkin, V. A.; Petukhov, V. A.; Senatsky, Y. V.; Zverev, P. G. "Laser With The Slurry Active Medium"; *Laser Physics Letters* 2018, 15, 095805. DOI:10.1088/1612-202X/aad1ba
- [5] Brinkschulte, H.; Perchermeier, J.; Schimitschek, E. "A Repetitively Pulsed, Q-Switched, Inorganic Liquid Laser"; *Applied Physics* 1974, 7, 1361. DOI:10.1088/0022-3727/7/10/309.
- [6] Brecher, C.; French, K. W., "Comparison of aprotic solvents for neodymium (III) ion liquid laser systems: selenium oxychloride and phosphorus oxychloride"; *J. Phys. Chem.* 1969, 73, 1785-1789.
- [7] Heller, A. "A High-Gain Room-Temperature Liquid Laser: Trivalent Neodymium in Selenium Oxychloride"; *Appl. Phys. Lett.* 1966, 9, 106-108.
- [8] Tzuk, Y.; Goren, C.; Raanan, D.; Strum, G. "Nanoparticle Dispersion Laser"; *Optics Letters.* 2012, 37, 939-941. DOI:10.1364/OL.37.000939
- [9] zuk, Y.; Goren, C.; Sturm, G.; Greenblatt, J.; Raanan, D. "Flashlamp-Pumped Nanoparticle Dispersion Laser"; *Appl. Optics* 2015, 54. DOI:10.1364/AO.54.001157
- [10] She, J.; Nie, R.; Sun, X.; Peng, B. "Crystal Structure and Optical Properties of a Neodymium Trifluoroacetate Complex for Liquid Laser"; *Second International Conference on Photonics and Optical Engineering, SPIE:* 2017, 973-978.
- [11] Redington, R. L.; Lin, K. C. "Infrared Spectra of Trifluoroacetic Acid and Trifluoroacetic Anhydride"; *Spectrochimica Acta Part A: Molecular Spectroscopy.* 1971, 27, 2445-2460. DOI: 10.1016/0584-8539(71)80143-5
- [12] Rongbiao, Y.; Kehan, Y.; Xu, X. X.; Qiu, X. M.; Liu, S.; Huang, W.; Tang, G.; Ford, H.; Peng, B. "Nd₂O₃ Nanoparticles Modified with a Silane Coupling Agent as a Liquid Laser Medium"; *Adv. Mater.* 2007, 19, 838-842. DOI:10.1002/adma.200600936.
- [13] Varshney, A. K.; Kumar, S.; Kumar, A.; Singhal, G.; Gupta, M.; Prakash, G. "Optical and Thermal Studies of Nd₃⁺ Doped Inorganic Liquid Medium for Scalable Laser Source"; *Optics Laser Technology.* 2022, 148, 107740. DOI:10.1016/j.optlastec.2021.107740.
- [14] <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C76051&Mask=80>.