بستگی نمایه مدی به آرایش دمش برای لیزر Ce:Nd:YAG با دمش دیود نورگسیل

فائزه حکم‌آبادی^{۲،۱}، امیرحسین فرهبد^{۱*}، اکبر نظری گلشن^۲

۱. پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی ۵۱۱۳-۱۴۳۹۹، تهران-ایران

۲. گروه فیزیک، دانشگاه شاهد، صندوق پستی ۱۸۵۱/۱۵۹، تهران-ایران

*Email: afarahbod@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۱/۲۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۴/۳۱

چکیده

چگونگی توزیع عرضی شدت باریکه لیزر یا نمایه مدی از مهم‌ترین شاخصه‌های یک نوسانگر لیزر به شمار می‌آید. در این پژوهش رفتار نمایه مدی نوسانگر لیزر Ce:Nd:YAG با دمش دیود نور گسیل و بستگی آن به آرایش هندسی و شدت منابع نوری مورد مطالعه تجربی و نظری قرار گرفته است. مشاهدات تجربی نشان می‌دهند که با انتخاب مناسب توزیع شدت به روش کنترل توان الکتریکی اعمال شده به دیودهای نورگسیل به همراه هندسه مناسب برای سامانه دمش می‌توان به گستره وسیعی از توزیع عرضی و نمایه‌های مدی اینس-گوسی باریکه لیزر با پایداری مناسب دست یافت. بررسی‌های عددی بر پایه محاسبه نمایه عرضی توان جذب شده در واحد حجم محیط فعال و بهره به روش ردیابی تصادفی پرتوهای دمش و انتشار میدان نوری درون تشدیدگر نیز بیانگر تأثیر آرایش دمش و فاصله سطح تابنده دیودهای نورگسیل تا سطح جانبی محیط فعال بر نمایه مدی نوسانگر لیزر است.

کلیدواژه‌ها: دمش نوری، دیود نورگسیل، نمایه مدی اینس-گوسی، لیزر Ce:Nd:YAG

Dependence of mode profile on the pumping configuration of a LED-pumped Ce:Nd:YAG laser

F. Hokmabadi^{1,2}, A.H. Farahbod^{1*}, A. Nazari-Golshan²

1. Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.BOX:14399-5113, Tehran, Iran.

2. Physics Department, Shahed University, P.O.BOX: 1851/159, Tehran, Iran.

Research Article

Received 17.4.2020, Accepted 21.7.2020

Abstract

Transverse intensity distribution or laser mode profile is one of the most important characteristics of a laser oscillator. In the present study, mode profile of a LED-pumped Ce:Nd:YAG laser oscillator and its dependency on the geometrical configuration and intensity of optical pump sources have been experimentally and theoretically investigated. Experimental observations show that with a proper pumping geometry and the control of electrical pumping power of the light-emitting diodes, a wide spectrum of stable transverse beam profiles with Ince-Gaussian mode pattern can be generated. In addition, numerical computations based on randomly ray tracing and calculation of the absorbed pump power per unit volume of the active medium, gain profile, and the propagation of optical field inside the optical resonator were confirmed the effect of the pumping configuration and distance between the emitter surface of LEDs and lateral surface of the active medium on the mode profile of the laser oscillator.

Keywords: Optical pumping, Light-emitting diode, Ince-Gaussian mode profile, Ce:Nd:YAG laser

۱. مقدمه

کیفیت باریکه خروجی نوسانگر لیزر با دمش دیود نورگسیل، به دلیل نرخ پایین دمش و ویژگی‌های نمایه فضایی شدت دیودهای نورگسیل (LED)^۱، به دمش و بهره نوری نایک‌نواخت محیط فعال لیزر منجر می‌شود. از این‌رو نوسانگر لیزر می‌تواند به سادگی و با کم‌ترین انحراف زاویه‌ای آینه‌های تشدیدگر بر روی مدهای عرضی مراتب بالا به نوسان درآید و از مد نوسانی پایه دور شود. علاوه بر این، هندسه منابع نوری دمش به صورت تعداد محدودی چیدمان‌های نواری متشکل از منابع نقطه‌ای از مرتبه ۱۰۰ دیود نورگسیل، سبب می‌شود که در حالت کلی توزیع عرضی شدت میدان لیزر به صورت توزیع‌های کلاسیک شناخته شده لاگر-گوسی^۲ برای هندسه استوانه‌ای یا هرمیت-گوسی^۳ برای هندسه دکارتی نباشد [۱] و نوسانگر لیزر به سهولت بر روی مدهای عرضی اینس-گوسی $IG_{p,m}^{\sigma}$ با تقارن زوج $\sigma = e$ یا فرد $\sigma = o$ نوسان کند که از اهمیت کاربردی خاصی برخوردار است [۲-۴].

علی‌رغم پژوهش‌های درخور توجه صورت گرفته طی یک دهه گذشته در زمینه فن‌آوری دمش لیزرهای حالت جامد به کمک دیودهای نورگسیل [۵-۱۲]، تاکنون چگونگی تأثیر دمش نوری نامتقارن دیودهای نورگسیل بر روی مدهای عرضی لیزرهای کم‌توان، به جز گزارش مرجع [۱۳]، مورد مطالعه قرار نگرفته است. در این پژوهش، دمش نامتقارن محیط فعال حالت جامد از جنس بلور Ce:Nd:YAG به کمک دیودهای نورگسیل در ناحیه آبی بیناب با تابندگی بیشینه در ۴۶۰ nm و پهنای بینایی در حد ۲۰ nm مورد بررسی تجربی قرار گرفته است. نوارهای جذبی بسیار قدرتمند حاصل از حضور یون‌های Ce^{3+} در میزبان بلور YAG سبب بروز جذب نوری با ضریب جذب در حد 4.5 cm^{-1} در نزدیکی طول‌موج ۴۶۰ nm می‌شود، که از قوی‌ترین نوار جذبی Nd:YAG با قله ضریب جذب 2 cm^{-1} در نزدیکی ۸۱۰ nm و ۵۹۲ nm برای دمش یون‌های Nd^{3+} به مراتب کارآمدتر است [۷].

علاوه بر این، برخی ویژگی‌های دیگر که با استفاده از ساختار دمش موجود به سهولت قابل بررسی تجربی نمی‌باشد، به کمک پرتویابی تصادفی و محاسبه توان جذب شده در واحد حجم محیط فعال، نرخ دمش و بهره نوری و سپس محاسبه شدت میدان لیزر، مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲. ساختار تجربی نوسانگر لیزر

تشدیدگر نوسانگر لیزر و سامانه دمش، مشابه با ساختار مرجع [۱۲] است. به منظور چیره شدن بر اتلاف نوری ناشی از پراش، جذب و گذردهی آینه‌ها، از یک تشدیدگر نوری با کم‌ترین طول هندسی قابل حصول و آینه‌هایی با ضریب بازتابندگی بالا استفاده شد. آینه عقب تشدیدگر (BM) یک آینه کروی با شعاع انحنای ۵۰ cm و آینه خروجی (OC) تخت است (شکل ۱). ضریب بازتابندگی BM و OC در طول موج 1064 nm به ترتیب $R_{bm} = 0.99$ و $R_{oc} = 0.91$ و فاصله آن‌ها از دو انتهای میله لیزر $L_1 = 5.5 \text{ cm}$ و $L_2 = 2.5 \text{ cm}$ است. محیط فعال نوسانگر لیزر از جنس Ce:Nd:YAG با چگالی یک درصد اتمی Nd^{3+} ، طول $L_r = 60 \text{ mm}$ و قطر $2a_r = 3 \text{ mm}$ است.

مدار الکتریکی دمش به نحوی طراحی شده است که جریان عبوری از هر یک از نوارهای دیودهای نورگسیل، به طور مستقل به کمک مقاومت‌های قابل تنظیم ۱۰۰ اهمی VR1-4 قابل کنترل باشد (شکل ۲). هر یک از نوار دیودها متشکل از ۳۲ دیود نورگسیل است. فاصله سطح تابنده دیودها از سطح جانبی میله لیزر کم‌تر از ۱ mm است، زیرا با توجه به زاویه واگرایی ۱۲۰ درجه‌ای پرتوهای گسیل یافته از دیودهای نورگسیل، جفت‌شدگی پرتوهای خروجی از دیودها با سطح خارجی میله لیزر از اهمیت به سزایی برخوردار است. هم‌چنین به منظور اجتناب از گرمایش بیش از حد و آسیب رسیدن به دیودهای نورگسیل، مدار تخلیه در نرخ تکرار پایین (در حد یک تپ هر ۹۰ s) مورد استفاده قرار گرفت. رفتار زمانی تپ جریان دیودهای نورگسیل متناظر با تپ نوری دمش محیط فعال در طی تمام اندازه‌گیری‌ها مربعی بوده و پهنای زمانی آن $310 \mu\text{s}$ است. این زمان بیش از طول عمر تابشی $240 \mu\text{s}$ تراز بالایی لیزر برای گذار در 1064 nm است و بدین ترتیب فرایند دمش به نحو کاملاً مؤثری صورت می‌پذیرد [۱].

شکل ۱. آرایش نوری نوسانگر Ce:Nd:YAG با دمش دیود نورگسیل.

1. Light-emitting diode (LED)
2. Laguerre-Gaussian
3. Hermite-Gaussian

به کمک ثبت نمایه شدت مقطع عرضی باریکه لیزر به وسیله دوربین نمایه‌سنج CCD مدل WincamD ساخت شرکت Gentec، به همراه صافی‌های نوری تضعیف‌کننده شدت و در فاصله ۲۵ cm از آینه خروجی نوسانگر صورت گرفته است.

۴. یافته‌های تجربی

به منظور بررسی حساسیت نمایه مدی نوسانگر به توان و توزیع شدت دمش، ۶ آرایش گوناگون دمش مطابق با جدول ۱ مورد مطالعه قرار گرفت [۱۳]. قسمتی از داده‌های تجربی و تحلیل آن‌ها، به جز داده‌های مربوط به آرایش دمش LB234 و LB24، در مرجع ۱۳ ارایه شده است.

توان و انرژی الکتریکی کل دمش اعمال شده به دیودها به ترتیب از رابطه‌های $P_p = V_{ch} I_{total}$ و $E_p = V_{ch} I_{total} t$ قابل محاسبه است، که در آن‌ها V_{ch} ولتاژ شارژ بانک خازنی، τ_p پهنای تپ دمش و I_{total} مجموع جریان عبوری از تمام نوارهای دیود است. در تمام موارد، $\tau_p = 310 \mu s$ است. مشاهدات تجربی نشان می‌دهند که دو عامل توان الکتریکی کل و نسبت توان‌های اعمال شده به نوارهای LED در توزیع عرضی شدت میدان لیزر سهمیم هستند و نقش مدی پایدار و تثبیت شده به ازای کمینه توان دمش $P_p = P_{min}$ حاصل می‌شود. پس از عبور از کمینه توان دمش برای تثبیت نمایه مدی P_{min} ، نمایه مدی کاملاً تکرارپذیر است و با افزایش توان تا بیشینه توان قابل تحمل برای دیودهای نورگسیل، نمایه مدی تغییر نمی‌کند.

شکل ۳. مقطع ساختار دمش حاوی محیط فعال AM و چهار نوار دیود نورگسیل LB هر یک حاوی ۲ ردیف دیود که با شماره‌های ۱ الی ۸ نشان داده شده است.

جدول ۱. آرایش‌های گوناگون دمش

آرایش دمش	نوارهای فعال دیودهای نورگسیل
LB123 LB234	LB2, LB3 LB1, LB3, LB4 LB2,
LB34	LB3, LB4
LB14	LB1, LB4
LB24	LB2, LB4
LB13	LB1, LB3

شکل ۲. مدار الکتریکی برای کنترل و تنظیم جریان نوارهای LED به وسیله چهار مقاومت قابل تنظیم VR1 الی VR4.

دمش محیط فعال به صورت عرضی و به کمک ۱۲۸ دیود نورگسیل آبی ۱ واتی در ناحیه ۴۶۰ nm صورت می‌گیرد. شکل ۳ موقعیت چهار نوار دیود نورگسیل (LB)، هر یک حاوی دو ردیف ۱۶ تایی LED، را نشان می‌دهد که محیط فعال (AM) را از سطوح جانبی آن و در راستای محور هندسی میله لیزر احاطه کرده‌اند. هر LB متشکل از دو قطعه و هر قطعه حاوی دو ردیف ۸ عددی دیود است که به فاصله ۳ mm از یکدیگر قرار گرفته‌اند. قطعات LED آبی، بخشی از یک ماتریس LED سه‌رنگ RGB ساخت کارخانه EPILEDs است که پس از برش و جداسازی دیودهای آبی، اتصالات الکتریکی میان آن‌ها به نحو مناسبی برقرار شده است.

۳. روند انجام آزمایش

برای انجام مطالعات تجربی، ابتدا تنظیمات نوری نوسانگر به نحو دقیق انجام شد و فرایند دمش با فعال بودن تمام نوارهای دیودهای نورگسیل به صورت متقارن صورت گرفت. سپس جریان الکتریکی عبوری از LEDها و توان اعمال شده به هریک از آن‌ها به کمک چهار مقاومت قابل تنظیم VR1-4 تغییر یافته و نقش LEDهای فعال، که در مقابل و یا مجاورت یکدیگر قرار دارند، و نیز تأثیر فرایند دمش نامتقارن بر روی نمایه مدی نوسانگر لیزر مورد بررسی قرار گرفت. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهند که بیشینه انرژی خروجی نوسانگر، هنگامی که تمامی چهار نوار دیود نورگسیل فعال بوده و دمش به صورت متقارن صورت می‌گیرد، در حد ۲۰۰ μJ است.

برای اندازه‌گیری جریان تخلیه شاخه‌های فعال نوار دیودهای نورگسیل، از دو پیچ کالیبره شده روگوسکی به همراه انتگرال‌گیر با پهنای باند ۲۰ MHz ساخت شرکت Pearson استفاده شد. بررسی رفتار مد عرضی نوسانگر نیز

در شکل ۱ هشت ردیف آرایه دیود نورگسیل آبی (به ترتیب از شماره ۱ الی ۸) هر یک حاوی ۸ دیود، هر دیود با توان میانگین نوری ۱ W و بیشینه گسیل بینایی در ۴۶۰ nm، پیرامون میله لیزر به قطر ۳ mm قرار گرفته‌اند. نرم‌افزار مذکور با فرض بی‌نهایت بودن طول محیط بهره، محاسبات ردیابی پرتو را بر پایه راستای تصادفی انتشار اولیه هر پرتو از موضع معلوم منابع نوری، تنها در صفحه‌ای عمود بر محور تقارن میله لیزر انجام می‌دهد و به ازای هر گام محاسباتی، توان جذب شده در محیط بر واحد طول منابع نوری دمش و محیط فعال به صورت چگالی حجمی توان جذب شده برحسب $W.cm^{-3}$ محاسبه می‌شود [۱۴].

جدول ۲. مقادیر تجربی توان دمش برای آستانه نوسان، کمینه توان کل الکتریکی لازم و نسبت توان اعمال شده به نوارهای دیودهای نورگسیل برای تثبیت نمایه مدی نوسانگر لیزر.

نسبت توان	P_{min} (W)	P_{th} (W)	آرایش دمش
$P_{12}/P_{24} \approx 1$	۴۸۰	۴۸۰	LB1234
$P_{12}/2P_{24} \approx 1/2$	۶۲۰	۴۶۰	LB123
$P_{23}/2P_{24} \approx 0.8$	۷۰۰	۵۵۰	LB234
$P_2/P_4 \approx 1/5$	۹۷۰	۸۷۰	LB34
$P_1/P_4 \approx 1/5$	۱۱۵۰	۷۶۰	LB14
$P_1/P_4 \approx 1$	۱۰۵۰	۹۳۰	LB14
$P_2/P_4 \approx 1$	۸۰۰	۵۲۰	LB24
$P_1/P_4 \approx 1$	۱۰۱۰	۷۷۵	LB13

$IG_{..}^e$	IG_{64}^e	IG_{55}^e	IG_{33}^e
LB1234	LB123	LB234	LB34
IG_{42}^o	IG_{42}^e	IG_{51}^o	IG_{66}^e
LB14	LB14	LB24	LB13

شکل ۴. نمایه‌های مدی تجربی مشاهده شده برای نوسانگر لیزر متناظر با آرایه نوارهای دیودهای نورگسیل فعال در سامانه دمش.

شکل ۵ مطابق با جدول ۳، نمایه‌های محاسبه شده برای درصد توان نوری جذب شده در واحد حجم محیط فعال را

برای $P_p < P_{min}$ ، غالباً پرش میان مدهای عرضی با تلفات پراشی نزدیک به یکدیگر مشاهده می‌شود. رفتار اخیر به تبهگنی تلفات پراشی میان مدهای عرضی مراتب بالا باز می‌گردد که ویژه‌مقدار عملگر انتگرالی میدان γ_{nm}^e برای آن‌ها عملاً یکسان است [۱۶].

مقادیر تجربی برای نسبت توان اعمال شده به نوارهای دیودهای نورگسیل و کمینه توان کل الکتریکی موردنیاز برای تثبیت نمایه مدی نوسانگر لیزر در جدول ۲ گزارش شده است. $P_{24} = P_2 + P_4$ و $P_{23} = P_2 + P_3$ ، $P_{12} = P_1 + P_2$ به ترتیب مجموع توان اعمال شده به نوار دیودهای ۱ و ۲، دیودهای ۲ و ۳ و دیودهای ۳ و ۴ است. برای حالت LB123 و LB234 از نسبت توان میانگین دو نوار به توان نوار دیودهای P_2 و P_3 به صورت $P_{12}/2P_4$ و $P_{23}/2P_4$ استفاده شده است.

نمایه‌های مدی اینس-گوسی شکل ۴ متناظر با آرایش های دمش جدول ۲ نشان می‌دهند که توان آستانه دمش، P_{th} ، برای مد پایه $IG_{..}^e$ به دلیل کم‌ترین تلفات ناشی از پراش، عملاً از توان آستانه دمش برای تمام مراتب بالاتر مدی نوسانگر کوچک‌تر است. تفاوت‌های موجود میان توان آستانه نوسان و کمینه توان تثبیت نمایه مدی میان آرایه‌های دمش، که با توجه به شکل ۳ از تقارن هندسی یکسانی برخوردار هستند، ناشی از تفاوت‌های جزیی میان فاصله سطوح تابنده دیودهای نورگسیل تا سطح جانبی میله لیزر، چرخش زاویه-ای جزیی صفحه هر نوار دیود در هنگام نصب و هم‌چنین یکسان نبودن توان تابشی دیودهای نور گسیل موجود در هر نوار دیود است. نکته اخیر برای آرایش (LB13, LB24) به ازای $P_1/P_4 = P_2/P_4 \approx 1$ و هم‌چنین (LB34, LB14) تحت شرایط $P_2/P_4 = P_3/P_4 \approx 1/5$ ، که در حالت آرمانی از تقارن هندسی و همانندی کامل برخوردارند، دیده می‌شود.

۵. بررسی‌های عددی

برای محاسبه توزیع انرژی جذب شده در حجم محیط فعال ناشی از دمش نوری، از رویکرد عددی پرتویابی تصادفی و محاسبه مقدار انرژی جذب شده برای هر گام محاسباتی در هر موضع درون محیط فعال استفاده شد. برای این منظور نرم‌افزار تجاری OptiChamber به کار گرفته شد [۱۴]. طیف جذبی محیط فعال Ce:Nd:YAG به همراه طیف تابشی دیودهای نورگسیل به صورت فایل‌های داده ورودی در اختیار نرم‌افزار قرار گرفت و هندسه دمش مطابق با شکل ۱ برای نرم‌افزار تعریف شد.

جدول ۳. بیشینه چگالی توان جذب شده در محیط فعال برحسب ردیف دیودهای نورگسیل فعال و دو وضعیت در تماس و با فاصله میان سطوح تابنده دیودها و سطح جانبی میله لیزر.

آرایش دمش	ردیف های فعال	$PD_{max} (Wcm^{-2})$	
		T	S
LB1234	۱-۲-۳-۴-۵-۶-۷-۸	۱۲,۴۰	۵,۵۳
LB123	۱-۲-۳-۴-۵-۶	۱۴,۲۹	۵,۸۰
LB14	۱-۲-۳-۴	۱۶,۷۳	۶,۲۵
LB24	۳-۴-۷-۸	۱۳,۳۱	۶,۲۷

پس از محاسبه نمایه بهنجار شده چگالی حجمی توان جذب شده پرتوهای دمش در محیط فعال $PD_{abs}(x,y)(cm^{-3})$ به کمک نرم افزار OptiChamber می توان نرخ دمش وابسته به مکان $W(x,y)(cm^{-2}s^{-1})$ را با استفاده از رابطه ۱ به دست آورد [۱۵].

$$W(x,y) = N_{led} \frac{P_{led}}{P_{led_opti}} \eta PD_{abs}(x,y) \times \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \frac{\lambda}{hc} \Phi_o E_{led}(\lambda) \alpha(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

در این رابطه، λ طول موج نور، h ثابت پلانک، c سرعت نور، η بازدهی جذب، N_{led} تعداد دیودهای نورگسیل در واحد طول در راستای محور هندسی میله لیزر، P_{led} توان نوری هر دیود، P_{led_opti} توان نوری تعریف شده برای هر دیود در نرم افزار OptiChamber است. $\alpha(\lambda)$ ، $E_{led}(\lambda)$ و Φ_o نیز به-ترتیب ضریب جذب وابسته به طول موج برای محیط فعال، نمایه بینایی بهنجار شده تابش دیود نور گسیل و توان تابشی بر واحد طول موج (برحسب $W.nm^{-1}$) است.

با حل معادلات نرخ مستقل از مکان برای محیط فعال Ce:Nd:YAG به ازای مقادیر گوناگون نرخ دمش [۱۲] و برآزش نتایج به یک تابع خطی، رابطه بین بهره نوری و نرخ دمش به دست می آید. در رابطه ۲، ضرایب موردنظر برابر است با: $\alpha_g = 3.283 \times 10^{-5} cm^{-1}$ ، $\beta_g = 5.648 \times 10^{-23} cm^2s$.

$$g_m(x,y) = \alpha_g + \beta_g W(x,y) \quad (2)$$

برای مطالعه چگونگی انتشار باریکه لیزر از میان محیط فعال و آینه های تشدیدگر نیز کد محاسباتی جامعی در محیط نرم افزار ریاضی Mathcad نوشته شد که در آن از روش انتگرال تعمیم

برای چهار آرایش دیودهای نورگسیل و دو موقعیت T و S به ترتیب برای فاصله سطوح تابنده دیودها و سطح جانبی میله لیزر در تماس^۱ و با فاصله^۲ ۱ mm از یکدیگر نشان می دهد. در تمام تصاویر قطر میله لیزر ۳ mm و توان تابشی هر دیود نور گسیل $1 W.cm^{-1}$ در راستای طول محیط فعال است. برای محاسبات شکل ۵، از پانصد هزار پرتو با راستای انتشار تصادفی به ازای هر دیود نوری استفاده شده است. مختصات شعاعی و زاویه ای نیز هر یک به ۹۶ قسمت تقسیم شده است.

شکل ۵. نمایه های محاسبه شده در مقطع میله لیزر برای درصد توان نوری جذب شده در واحد حجم محیط فعال برای چهار آرایش دیودهای نورگسیل و دو موقعیت در تماس (T) و با فاصله (S) میان سطوح تابنده دیودها و سطح جانبی میله لیزر.

1. Touched (T)
2. Separated (S)

شکل ۶ برخی از نمایه‌های مدی محاسبه شده برای چهار وضعیت متفاوت دیودهای نورگسیل فعال، متناظر با دو موقعیت دیودهای در تماس و دور از سطح میله لیزر را در مجاورت آینه خروجی نوسانگر نشان می‌دهد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند که الگوهای متفاوت مدی اینس-گوسی نوسانگر علاوه بر موقعیت زاویه‌ای منابع دمش، به فاصله شعاعی آن‌ها از سطح میله محیط فعال لیزر نیز وابسته است که با مشاهدات تجربی سازگار است.

شکل ۶. نمایه‌های مدی تشدیدگر لیزر با دمش دیود نورگسیل در مجاورت آینه خروجی برای وضعیت‌های متناظر برای دو موضع متفاوت میان سطوح تابنده دیودها و سطح جانبی میله لیزر. در تمام حالت‌ها بیشینه نرخ دمش یکسان و برابر با $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ است.

یافته هویگنس و ماتریس‌های پرتو [۱۶] به همراه مدل بهره اشباع‌پذیر با پهن‌شدگی همگن گذار لیزر برای محیط فعال [۱۰] و داده‌های حاصل از محاسبه توزیع وابسته به مکان و موقعیت عرضی نرخ دمش نوری به‌صورت خودسازگار استفاده شده است. محاسبات نشان می‌دهند که برای تشکیل مد عرضی تشدیدگر لیزر، به 1200 تا 1800 گردش کامل نور درون تشدیدگر نیاز است. برای آن‌که محاسبات میدان نوری تا حد امکان واقع‌گرایانه باشد، فرض میدان اولیه از گسیل خودبه-خودی تقویت‌شده (ASE)^۱ پس از آغاز دمش محیط فعال مورد استفاده قرار گرفت. برای این منظور و با فرض پهن‌شدگی همگن خط بینایی، رابطه ۳ برای محاسبه شدت اولیه میدان نوری به‌صورت ASE در محاسبه میدان طی عبورهای متعدد از میان تشدیدگر به‌کار رفت [۱۷]:

$$I_{ASE_hom}(x, y) = I_s \frac{\phi}{4} \ln \left(1 + \frac{\gamma_{ase} \Omega_{ase}}{4} e^{\delta_{ase} g(x, y) L_r} \right) \quad (3)$$

در این رابطه مقدار عددی ضرایب ثابت به‌کار رفته برابر است با $\gamma_{ase} = 1/1$ و $\delta_{ase} = 0.89$. همچنین ϕ بهره کوانتومی فلورسانس^۲ گذار لیزر است و مقدار $\phi = 1$ برای آن اختیار شده است [۱۷]. زاویه فضایی منتهی به روزنه و طول میله لیزر است [۱۷]. $\Omega_{ase} = \pi(a_r/L_r)^2$ تقریب مناسبی از زاویه انتشار تابش ASE است. برای محیط فعال لیزر Ce:Nd:YAG شدت اشباع گذار لیزر برای خط 1064 nm با توجه به پارامترهای سطح مقطع گسیل القایی و طول عمر مؤثر گذار لیزر، برابر با $I_s = 2357 \text{ W cm}^{-2}$ است [۱]. با توجه به رابطه موجود میان چگالی انرژی میدان الکتریکی با شدت و دامنه میدان برای یک موج روان به‌صورت حاصل از گسیل خودبه‌خود تقویت شده طبق رابطه ۴ به‌دست می‌آید:

$$|u_o(x, y)| = \sqrt{\frac{2}{c \epsilon_o} I_{ASE}(x, y)} \quad (4)$$

1. Amplified spontaneous emission (ASE)
2. Fluorescence quantum yield

تغییر تلفات درونی تشدیدگر حاصل از پراش همراه است، معرفی شده و مورد بررسی قرار گرفته است. در این رویکرد، تنظیم و کنترل بهره نوری به روش تغییر جریان الکتریکی عبوری از دیودهای نوری به‌ازای تلفات نوری ثابت تشدیدگر سبب پدید آوردن مدهای عرضی مراتب گوناگون می‌شود. به نظر می‌رسد که این روش برای دستیابی به مدهای عرضی گوناگون برای یک نوسانگر لیزر با بهره نوری کوچک و دمش به کمک دیودهای نورگسیل از جذابیت کاربردی خاصی برخوردار است.

مراجع

1. W. Koechner, *Solid-state laser engineering*, 6th edition, Springer (2006).
2. M.A. Bandres, J.C. Gutiérrez-Vega, *Ince-Gaussian beams*, *Optics Lett.*, **29** (2):144-6 (2004).
3. M.A. Bandres, J.C. Gutiérrez-Vega, *Ince-Gaussian modes of the paraxial wave equation and stable resonators*, *JOSA A*, **21**(5), 873-80 (2004).
4. M. Woerdemann, C. Alpmann, C. Denz, *Optical assembly of microparticles into highly ordered structures using Ince-Gaussian beams*, *Applied physics letters*, **98** (11), 11110 (2011).
5. A. Barbet, et al., *Revisiting of LED pumped bulk laser: first demonstration of Nd:YVO₄ LED pumped laser*, *Opt. Lett.*, **39**, 6731 (2014).
6. A. Barbet, et al., *Light-emitting diode pumped luminescent concentrators: a new opportunity for low-cost solid-state lasers*, *Optica*, **3**, 465 (2016).
7. B. Villars, E.S. Hill, C.G. Durfee: *Design and development of a high-power LED-pumped Ce:Nd:YAG laser*, *Opt. Lett.*, **40**, 3049 (2015).
8. K.Y. Huang, et al., *Efficient 750-nm LED-pumped Nd:YAG laser*, *Opt. Express*, **24**, 12043 (2016).
9. C.Y. Cho, et al., *LED-side-pumped Nd:YAG laser with >20% optical efficiency and the demonstration of an efficient passively Q-switched LED-pumped solid-state laser*, *Opt. Lett.*, **42**, 2394 (2017).
10. C.Y. Cho, et al., *Energy scale-up and mode-quality enhancement of the LED-pumped Nd:YAG Q-switched laser achieving a millijoule green pulse*, *Opt. Lett.*, **44**, 3202 (2019).

نمایه‌های مدی محاسبه شده، به‌وضوح وابستگی نمایه مدی به هندسه دمش را نشان می‌دهد. عدم‌شباهت کامل نمایه‌های محاسبه شده به مشاهدات تجربی شکل ۴ به‌دلیل وابستگی قابل‌توجه جذب انرژی دمش به فاصله سطوح تابنده دیودهای نورگسیل تا سطح میله لیزر و سایر عواملی است که در عمل تقارن کامل هندسه دمش را بر هم می‌زنند و در انتهای بخش ۴ به آن‌ها اشاره شد. همچنین عدم‌امکان قابلیت تغییر مستقل و جداگانه جریان هر یک از دو ردیف دیود نورگسیل موجود در هر نوار در عمل، و محدودیت نرم‌افزار OptiChamber در تعریف مستقل شدت هر یک از ردیف‌های دیود نورگسیل از دیگر عوامل عدم‌شباهت کامل نمایه‌های محاسبه‌شده با مشاهدات تجربی است.

۶. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، بستگی ساختار مدی یک نوسانگر لیزر با محیط فعال Ce:Nd:YAG و دمش دیودهای نورگسیل در ناحیه بینایی آبی به توزیع شدت دمش مورد مطالعه تجربی قرار گرفته است. مشاهدات تجربی نشان می‌دهند که به‌ازای یک هندسه و طراحی معلوم، می‌توان با کنترل جریان عبوری از نوارهای دیودهای نورگسیل به ساختارهای گوناگون مد عرضی برای نوسانگر لیزر دست یافت. ساختارهای مدی مشاهده‌شده طیف وسیعی از مدهای ویژه اینس-گاوسی و حالت‌های مرزی هرمیت-گاوسی و لاگر-گاوسی تشدیدگر لیزر را شامل می‌شوند و از پایداری مدی قابل‌توجهی برخوردار هستند.

هم‌چنین محاسبات عددی بر پایه محاسبه توزیع توان نوری جذب شده دیودهای نورگسیل در محیط فعال حاصل از دمش محیط فعال به روش پرتویابی تصادفی دوبعدی و محاسبه توزیع عرضی مد نوسانگر به روش حل معادلات انتگرالی میدان و انتشار مکرر میدان از میان تشدیدگر نوری با در نظر گرفتن بهره محیط فعال و لحاظ نمودن اثر اشباع همگن بهره نوری نشان می‌دهد که توزیع مکانی منابع دمش نقش مهمی در چگونگی تشکیل مد عرضی نوسانگر لیزر ایفا می‌کند.

در پژوهش حاضر رویکردی متفاوت با روش‌های مرسوم برای دستیابی به مدهای عرضی مراتب بالای یک تشدیدگر نوری نظیر انحراف و ایجاد نامیزانی آینه‌های تشدیدگر، که با

11. M. Tarkashvand, A.H. Farahbod, S.A. Hashemizadeh, *First demonstration of green and amber LED-pumped Nd:YAG laser*, *Laser Physics* **28**, 055801, 1-7 (2018).
12. M. Tarkashvand, A.H. Farahbod, S.A. Hashemizadeh, *LED-pumped passively Q-switched Ce:Nd:YAG laser*, *Iranian Journal of Physics Research*, **18** (3), 477-484 (2018) (In Persian).
13. F. Hokmabadi, et al., *Experimental study of mode structure of a LED-pumped laser oscillator*, *ICOP 25th*, Shiraz University, Shiraz (2019).
14. A.E. Siegman, *Lasers*, *University Science Books*, Chapter 21 (1986).
15. Software (version 2.1) for Modeling Laser-Pumping Trains ©, OptiChamber 2014, (Centre "TOM" (C) 2000-2014, Centre "Technology of Optical Materials", 36/1 Babushkina str., [St. Petersburg](#) 193171, Russia, 2014).
16. U. Ganiel et al., *Amplified spontaneous emission and signal amplification in dye-laser systems*, *IEEE J.Q. E. QE-11*, 11, 882 (1975).
17. G. Ghani Moghadam, A.H. Farahbod, *General formula for calculation of amplified spontaneous emission intensity*, *Opt. Quant. Electron* **48**, 227 (2016).

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

استناد به این مقاله

فائزه حکم آبادی، امیرحسین فرهبد، اکبر نظری گلشن (۱۴۰۰)، بستگی نمایه مدی به آرایش دمش برای لیزر Ce:Nd:YAG با دمش دیود نورگسیل، ۹۵، ۴۰-۴۷

DOI: [10.24200/nst.2021.1183](https://doi.org/10.24200/nst.2021.1183)

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1183.html