Quarterly Journal of Optoelectronic
Year 1, No. 1, Summer 2016 (P 15-20)

فصلنامه اپتوالکترونیک
سال اول، شماره اول، تابستان 1395 (ص 15 - 20)

طراحی و شبیه‌سازی لیزر Er:Yb:glass ایمن چشم دمش دیودی هواخنک

مریم زاوش[*1]، محسن حاتمی[2]، امیر نوفرستی[3]، امین حسینی[4]
1. کارشناسی ارشد، فیزیک، دانشگاه پیام نور
2. دانشیار، فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز
3. کارشناسی ارشد، فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز
4. کارشناسی ارشد، فیزیک، دانشگاه مالک اشتر اصفهان

تاریخ دریافت: 1395/04/24 **تاریخ پذیرش**: 1395/06/19

Design and Simulation of an Air Cooled Diode Pumped Er:Yb:glass Eye-Safe Laser

M. Zavoosh[*1], M. Hatami[2], A. Noferesti[3], A. Hoseini[4]
1. MSc., Physics, Payame Noor University
2. Associate Professor, Physics, Shiraz University of Technology
3. MSc., Physics, Shiraz University of Technology
4. MSc., Physics, Malek Ashtar University of Technology

Received: 2016/08/14 **Accepted:** 2016/09/09

Abstract
In this paper, design and simulation of a side pumped Er:Yb:glass laser is reported. We designed an air cooled system for using Close Coupling method and reduction of the volume and the weight of the system. In this case, symmetrizing and uniformity of pumping is done by using of three laser diodes to pump at a Y shape structure. To optimize system designed, energy and shape of the output laser is studied by change of the main components of the resonator parameters that we could increase the output energy, reduce the pulse width and achieve desired divergence without using of the optical elements. By this condition, we derived a pulse with output energy of 17.8 mJ, pulse width of 13.2 ns and beam with divergence of 4 mrad at repetition rate of 10 Hz in the eye safe band.

Keywords
Er:Yb:glass Laser, Side Diod Pumped, Three Side Pumping.

چکیده
در این مقاله، طراحی و شبیه‌سازی یک میلهٔ لیزری Er:Yb:galss دمش از پهلوی دیودی گزارش شده است. سیستم را به صورت هواخنک طراحی کرده‌ایم تا علاوه بر کاهش حجم و وزن امکان استفاده از روش جفت‌شدگی نزدیک را میسر سازد. در این حالت، تقارن و یکنواخت‌سازی دمش با استفاده از سه لیزر دیودی، در یک ساختار Y شکل صورت گرفت. به منظور بهینه‌سازی سیستم طراحی شده، انرژی و شکل خروجی لیزر را با تغییر پارامترهای مؤثر بر اجزای اصلی تشدیدگر مورد بررسی قرار دادیم که افزایش انرژی، کاهش پهنای پالس و دست‌یابی به واگرایی مطلوب را بدون نیاز به استفاده از عناصر نوری موجب شد. تحت این شرایط، با استفاده از یک کلیدزن Q منشور چرخان، پالسی با انرژی 17/8 mJ، پهنای 13/2 ns، واگرایی 4 mrad در نرخ تکرار 10 Hz و در ناحیهٔ ایمن چشم به دست آوردیم.

واژگان کلیدی
لیزر Er:Yb:glass، دمش از پهلوی دیودی، دمش از سه طرف.

* **نویسندهٔ مسئول**: مریم زاوش
ایمیل نویسنده مسئول:
*Corresponding Author: mzavoosh@yahoo.com

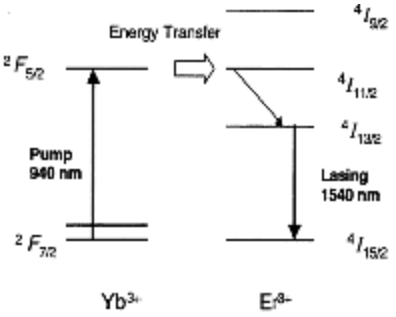
مقدمه

در یک سیستم لیزری بر حسب انرژی مورد نیاز و یا امکانات موجود، نحوهٔ چیدمان لیزر دیودی در اطراف میلهٔ لیزر می‌تواند از آرایش‌های متفاوتی برخوردار باشد. تقارن و یکنواخت‌سازی دمش یکی از عوامل مؤثر در دست‌یابی به واگرایی کمتر و کیفیت پرتوی بهتر است. در یک میلهٔ لیزری با سیستم دمش یک طرفه، برای برخورداری از دمش همگن باید از کاواکی با ضریب شکست منطبق استفاده کرد [3]. از دیگر راه‌های رسیدن به چنین دمشی را می‌توان استفاده از سه لیزر دیودی در ساختاری متقارن دانست که بیشترین و متداول‌ترین نوع دمش در لیزرهای حالت جامد است [2 و 4-6]. در این مقاله، طراحی و شبیه‌سازی یک لیزر Er:Yb:glass دمش از پهلوی دیودی هواخنک با کلیدزن Q منشور چرخان و استفاده از روش جفت‌شدگی نزدیک صورت گرفته است. در این روش، با توجه به نبود مایع خنک‌ساز پیرامون مادهٔ فعال امکان نزدیک کردن لیزر دیودها به میلهٔ لیزر فراهم می‌شود که در این صورت حتی با وجود واگرایی زیاد در لیزر دیودها به اپتیک جفت کننده پرتو دمش نیازی نخواهد بود. هدف ما علاوه بر یک طراحی کوچک و بهینه، دست‌یابی به پالسی با انرژی بالا، پهنای کم و کاهش واگرایی پرتو خروجی تنها با ایجاد تغییر در پارامترهای موثر بر اجزای اصلی تشدیدگر به گونه‌ای است که کاهش اندازهٔ سامانه را به دنبال داشته باشد. به منظور شبیه‌سازی هر چه نزدیکتر به واقعیت و بهینه‌سازی سیستم از نرم‌افزار طراحی لیزرهای حالت جامد LASCAD استفاده کرده ایم.

خصوصیات اصلی لیزر Er:Yb:glass

لیزر Er:Yb:glass به طور طبیعی یک سیستم سه ترازی است که لیزدهی آن بین حالت برانگیخته$^4I_{13/2}$ و حالت پایه $^4I_{15/2}$ صورت می‌گیرد. این لیزرها در کاربردهای بسیاری نظیر لیزرهای رادار، لیدار، فاصله یاب ها، مخابرات و... مورد استفاده قرار می‌گیرند [7و8]. از جمله خصوصیات بارز این لیزرها می‌توان به آستانهٔ بالا، سطح مقطع گسیل کوچک و طول عمر فلورانس نسبتاً طولانی (حدود 8 m) اشاره کرد. در لیزر Er:Yb:glass محیط میزبان معمولاً از سیلیکا یا شیشهٔ فسفاته تشکیل می‌شود که به موجب خواص مکانیکی نسبتاً بهتر و افزایش سطح مقطع گسیل استفاده از شیشه‌های فسفاته مرسوم‌تر است [9]. این لیزرها به طور کلی قابلیت دمش با استفاده از لامپ‌های درخشی و لیزر دیودها را دارا هستند که معمولاً به دلیل نیاز به قابلیت کار در نرخ‌های تکرار بالا و دست‌یابی به بازدهٔ بیشتر از لیزر دیودها و عملکردهای کلیدزنی Q استفاده می‌شود.

در دمش‌های دیودی، به منظور افزایش بازده، به دلیل هم‌پوشانی خوب طیف جذبی یوتربیوم با باند طیفی تولید شده در لیزرهای دیودی از عنصر واسطهٔ یوتربیوم به عنوان جاذب دمش و واسط انتقال انرژی به یون‌های اربیوم استفاده می‌شود. نمودار ترازهای انتقال انرژی در شکل 1 نشان داده شده است [10].



شکل 1. ترازهای انتقال انرژی در لیزر Er:Yb:glass

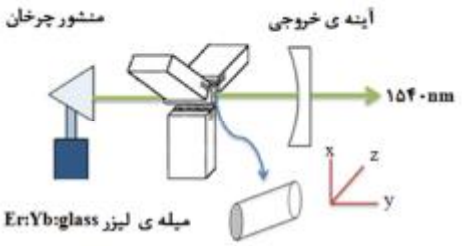
مزیت اصلی استفاده از لیزر Er:Yb:glass را علاوه بر عبور بالا در اتمسفر می‌توان گسیل در محدودهٔ تابشی ایمن چشم (1500 – 1600nm) دانست. در واقع ویژگی اصلی طول موج‌های گسیل شده از لیزرهای اربیوم جذب آن‌ها به وسیلهٔ آب است. از آنجایی که گسیل تابشی از لیزرهای شیشه‌ای آلاییده شده به اربیوم مطابق با باند جذبی زجاجیه است بدین ترتیب جذب نور گسیلی از لیزر به وسیلهٔ محیط آبی جلوی چشم مانع از رسیدن پرتو به شبکیه و آسیب دیدن آن می‌شود و به همین دلیل استفاده از آن‌ها در فاصله یاب‌ها بسیار رایج است. با وجود اینکه فاصله یاب‌های لیزری با استفاده از لیزرهای نئودمیم نیز طراحی شده‌اند اما به دلیل تأثیر مخرب این لیزرها بر روی چشم استفاده از لیزرهای اربیوم بسیار مورد توجه قرار گرفته است. شکل 2 اثرهای تابش یک لیزر Nd:YAG را بر روی شبکیه چشم به تصویر کشیده است [11].

با اینکه دست‌یابی به طول موج ایمن چشم با استفاده از روش‌های دیگری نظیر نوسانگرهای هارمونیک نوری و یا سلول رامان نیز امکان‌پذیر است اما از دیگر مزایای لیزرهای اربیوم برخلاف دیگر روش‌ها، گسیل مستقیم در باند تابشی ایمن چشم بدون نیاز به حضور عناصر اضافی در کاواک لیزر است که به نوبهٔ خود کاهش حجم و وزن سیستم را به دنبال دارد.

شکل 2. آسیب شبکیه چشم در اثر تابش لیزر Nd:YAG

شبیه‌سازی

در این شبیه‌سازی، از یک میلهٔ لیزری فسفاته به طول 35 mm و قطر 3mm استفاده شد که غلظت یون‌های اربیوم و یوتربیوم مطابق با نمونه‌های موجود از این کریستال به ترتیب برابر با $1/3\times10^{19}cm^{-3}$ و $2\times10^{21}cm^{-3}$ است. تشدیدگر لیزر متشکل از یک منشور چرخان به عنوان کلیدزن Q، میلهٔ لیزر و آینهٔ خروجی است. روش کار در کلیدزنی با استفاده از منشور بر پایهٔ چرخاندن منشور حول محوری عمود بر محور تشدیدگر استوار است. شرایط لیزدهی هنگامی فراهم می‌شود که منشور در یک لحظهٔ زمانی کوتاه درست در مکانی موازی با آینهٔ دیگر کاواک قرار گیرد. برای برقراری شرایط فوق در نرم‌افزار با تعریف منشور به عنوان یک آینهٔ تخت و تعیین پارامترهای کلیدزنی شرایط مورد نیاز برای لیزدهی را فراهم کرده‌ایم. از این نوع کلیدزنی می‌توان برای به دست آوردن همهٔ طول موج‌ها استفاده کرد که تحت شرایط یکسان انرژی بیشتری را نسبت به کلیدزن‌های الکترواپتیکی فراهم می‌کنند [10]. خنک‌سازی به صورت متقارن در اطراف میلهٔ لیزر صورت می‌گیرد. دمش مادهٔ فعال، با استفاده از سه لیزر دیود و در یک ساختار Y شکل صورت گرفته است که لیزر دیودها در زاویهٔ 120 درجه نسبت به هم قرار دارند. هر مجموعهٔ دیود شامل سه آرایهٔ دیودی هر کدام به طول 1 cm است. دمش در طول موج 940nm صورت می‌گیرد که ضریب جذب منطبق بر آن $6cm^{-1}$ می‌باشد. پهنای پالس دمش 5 ms تخمین زده شده است. زاویهٔ واگرایی لیزر دیودها در امتداد محورهای تند و کند به ترتیب برابر با 38° و 7° درجه است. از طرفی به دلیل رسانندگی گرمایی پایین (k=0/7 w/m.k) و خواص مکانیکی نسبتاً ضعیف توجه به اثرهای گرمایی در این لیزرها ضروری است؛ بنابراین به منظور متقارن‌سازی دما و انتقال حرارت در ناحیهٔ وسیع‌تری از مادهٔ فعال، از یک چیدمان دمش از پهلو استفاده کردیم. شکل 2 نمایی از کاواک طراحی شده را نشان می‌دهد که جهت x نمایانگر راستای دمش میلهٔ لیزر و محور y عمود بر آن در نظر گرفته شده است.



شکل 3. طرحی از کاواک لیزر Er:Yb: glass

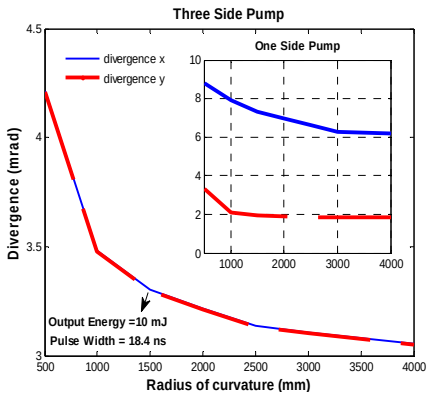
در طراحی یک سیستم لیزری بررسی پارامترهای مؤثر بر خروجی لیزر با توجه به کاربردهای متصور از آن ضروری است. از جملهٔ این عوامل می‌توان به طول کاواک، شعاع انحنای آینهٔ خروجی و بازتابندگی آن، پایداری، نحوهٔ خنک‌سازی و.... اشاره کرد. در ادامه، با استفاده از نرم‌افزار LASCAD همانند استفاده از یک آزمایشگاه مجازی به بررسی اثرهای این پارامترها بر خروجی لیزر می‌پردازیم. با استفاده از این تکنیک و با کمترین عناصر اپتیکی ممکن، بهینه‌سازی سیستم به منظور دست‌یابی به بهترین نتیجه مورد بررسی قرار گرفته است. در گام اول، تعیین شعاع انحنای آینهٔ خروجی به دلیل تأثیر مستقیم بر واگرایی و

جدول 1. پارامترهای لیزر به ازای مقادیر مختلف شعاع انحنا

شعاع انحنای آینه خروجی (mm)	انرژی خروجی (mJ)	پهنای پالس (ns)	واگرایی پرتو (mrad)
100	11/8	16/8	9/4×9/4
200	10/1	18/8	6/4×6/4
300	10/2	18/5	5×5
400	10/2	18/3	4/9×4/9

پایداری کاواک در اولویت قرار داده شد. جدول 1، انرژی خروجی، پهنای پالس و واگرایی پرتو خروجی را در دمش از سه طرف به ازای مقادیر مختلفی از شعاع انحنای آینهٔ خروجی با بازتابندگی برابر با 81% نشان می‌دهد.

با اینکه استفاده از آینه‌هایی با شعاع انحنای کم، پایداری بهتری را در کاواک لیزر به دنبال خواهد داشت [1] اما همان گونه که در جدول 1 نشان داده شده است در این حالت با واگرایی زیادی در پرتو خروجی مواجه شدیم. نتایج بیانگر این است که افزایش شعاع انحنا کاهش واگرایی را به دنبال دارد؛ بنابراین با در نظر گرفتن اهمیت پارامتر واگرایی در کاربردهای این نوع لیزرها مقادیر بیشتری از شعاع انحنا بین 500- 4000mm مورد بررسی قرار گرفت. به منظور مقایسه بهتر و بررسی اثرهای نحوهٔ آرایش دیودها بر خروجی لیزر، شبیه‌سازی را به ازای دو سیستم دمش یک و سه طرفه انجام دادیم. شکل 4 نمودار واگرایی برحسب شعاع انحنا را در سیستم‌های دمش یک و سه طرفه نشان می‌دهد.



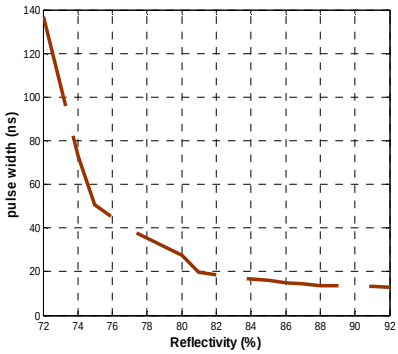
شکل 4. نمودار واگرایی بر حسب شعاع انحنای آینهٔ خروجی در سیستم دمش یک و سه طرفه.

همان‌گونه که در شکل 4 نشان داده شده است، استفاده از سیستم دمش یک طرفه در میلهٔ لیزر علاوه بر افزایش مقادیر واگرایی به دلیل جذب نامتقارن انرژی در مادهٔ فعال موجب اختلاف و عدم تقارن زیادی میان مقادیر واگرایی در دو راستا می‌شود. یکی از راه‌های برطرف کردن این معایب تغییر هندسهٔ مادهٔ فعال و استفاده از تیغهٔ لیزری است که با استفاده از آن می‌توان حتی در دمش از یک طرف به نتایج بهتری دست پیدا کرد [10] و یا مطابق با شکل 4 استفاده از سیستم دمش سه طرفه با تصحیح معایب موجود می‌تواند موجب کاهش و تطبیق مقادیر واگرایی را گردد. در واقع به‌کارگیری این نوع از آرایش دیودها به موجب متقارن و یکنواخت‌سازی دمش، علاوه بر کاهش واگرایی، تقارن و بهبود در فاکتور کیفیت پرتوی لیزر را نیز به دنبال دارد. بررسی دقیق‌تر نتایج در شکل 4 نشان می‌دهد که به ازای مقادیر شعاع انحنای بیشتر از 1500mm نمودار واگرایی با شیب کمی در حال کاهش است. از طرفی علی‌رغم دست‌یابی به واگرایی کمتر با افزایش شعاع انحنا، در نظر نگرفتن شرط پایداری کاواک می‌تواند موجب خارج شدن کاواک از حالت پایدار گردد؛ بنابراین در انتخاب شعاع انحنای آینهٔ خروجی هر دو عامل پایداری و واگرایی باید به صورت هم‌زمان در نظر گرفته شوند که با توجه به شکل 4 مقدار بهینه برای شعاع انحنای آینهٔ خروجی 1500mm تعیین شد. در این مقدار از شعاع انحنا به پالسی با انرژی 10 mJ و پهنای 18/4ns دست یافتیم این در حالی است که بازتابندگی آینهٔ خروجی در این حالت 81% در نظر گرفته شده بود.

با توجه به اینکه در این تحقیق یکی از اهداف اصلی ما دست‌یابی به پرتویی با واگرایی کم و بدون نیاز به استفاده از عناصر نوری در کاواک لیزر بوده است، به منظور بهینه‌سازی و کاهش بیشتر پارامتر واگرایی طول‌های مختلفی از تشدیدگر در محدودهٔ 75mm- 55 مورد بررسی قرار گرفت. از آنجایی که افزایش طول کاواک یکی از عوامل موثر بر کاهش واگرایی است و با توجه به کاربردهای لیزر Er:Yb:glass که نیازمند طراحی لیزری با طول کم و کوچک است، با توجهٔ هم‌زمان به دو پارامتر واگرایی و طول کاواک از تشدیدگری با طول 70 mm استفاده گردید. تا این قسمت از شبیه‌سازی، کاهش واگرایی از طریق ایجاد تغییر در پارامترهای اصلی تشدیدگر مورد بررسی قرار گرفت اما در کنار آن در نظر گرفتن انرژی خروجی لیزر نیز ضروری است. در ادامه و در تلاش برای افزایش انرژی و کارایی سیستم با توجه به استفاده از روش جفت شدگی نزدیک، به منظور جذب بهتر انرژی دمش لیزر دیودها را در نزدیک‌ترین فاصله نسبت به محور کریستال قرار دادیم. علاوه بر این تعیین درصد مناسبی از بازتابندگی آینهٔ خروجی نیز از مهم‌ترین و مؤثرترین پارامترها در دست‌یابی به بیشینهٔ انرژی خروجی است. تجربه نشان داده است که هم‌پوشانی میان باندهای جذب و گسیل با یکدیگر در طول

موج 1540nm در مقادیر پایین بازتابندگی منجر به جا به جایی طول موج لیزر Er:Yb:glass به سمت طول موج‌های کمتر خواهد شد [5]؛ بنابراین در این لیزرها ملزم به استفاده از آینه‌هایی با بازتابندگی بالا هستیم. به منظور تعیین دقیق این پارامتر مقادیر مختلفی از بازتابندگی بین 95%-70% در نظر گرفته شد که نتایج در شکل 5 نشان داده شده است. نتایج نشان داد که بیشینهٔ انرژی خروجی به ازای استفاده از آینه‌ای با بازتابندگی 89% به دست می‌آید که در مقایسه با حالت قبل انرژی 7/8mJ افزایش یافته است.

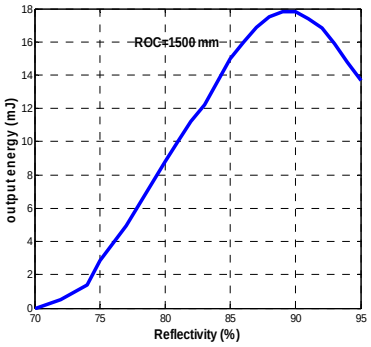
با توجه به رابطهٔ معکوس توان قلهٔ پالس خروجی لیزر با افزایش پهنای پالس به منظور تحلیل دقیق سیستم، نیازمند بررسی این پارامتر نیز هستیم. شکل 6 نمودار پهنای پالس لیزر را به ازای بازتابندگی‌های مختلف نشان می‌دهد که بیانگر کاهش پهنای پالس لیزر به‌ازای افزایش بازتابندگی است.



شکل 5. نمودار انرژی بر حسب مقادیر مختلف بازتابندگی

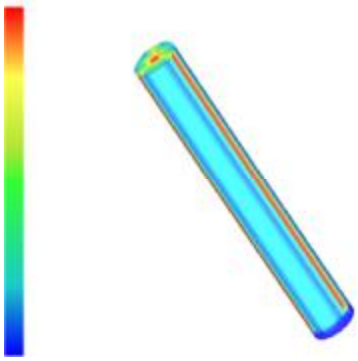
در آینه‌هایی با بازتابندگی پایین همان‌گونه که در شکل‌های 5 و 6 نیز نشان داده شده است با انرژی خروجی کم و پهنای پالس زیادی مواجه شدیم؛ بنابراین برای دست‌یابی به نتایج مطلوب باید از آینه‌هایی با بازتابندگی بالا استفاده کرد که تأیید دیگری در استفاده از بازتابندگی بالاست. با توجه به بیشینه بودن مقدار انرژی در بازتابندگی برابر با 89% و مطلوب بودن پهنای پالس لیزر در این حالت، از آینه‌ای با این درصد از بازتابندگی استفاده شد تا در کنار افزایش انرژی، کاهش پهنای پالس و افزایش توان قلهٔ پالس خروجی را نیز موجب گردد.

تحلیل اثرهای گرمایی در نرم‌افزار LASCAD با استفاده از روش FEA (تحلیل المان جزئی) صورت



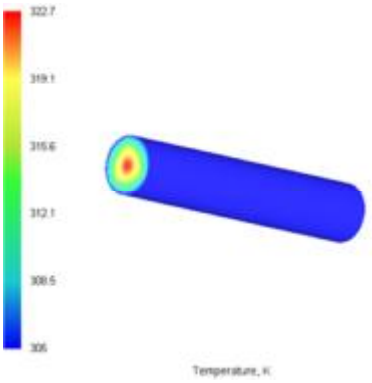
شکل 6. نمودار پهنای پالس به ازای مقادیر مختلف بازتابندگی

می‌گیرد. شکل 7 پروفایل گرمای توزیع شده در میلهٔ لیزر و نحوهٔ چیدمان لیزر دیودها را در مادهٔ فعال نشان می‌دهد. شکل 8 بیانگر توزیع دمایی میلهٔ لیزر در سیستم هواخنک طراحی شده است که نمایانگر گسترهٔ معقولی از افزایش دما در مادهٔ فعال بوده و لیزر قادر است در چنین دمایی به خوبی کار کند. با در نظر گرفتن قابلیت حلالیت شیشه‌های فسفاته در آب [12] در واقع این نوع از طراحی با حذف خنک‌کنندهٔ مایع افزایش کارایی سیستم را در طولانی مدت به دنبال دارد.



شکل 7. نحوهٔ چیدمان دیودها در میلهٔ لیزر

در نهایت و با توجه به پارامترهای بهینه شده، پالسی با انرژی 17/8 mJ، پهنای 13/2 ns، واگرایی 4 mrad در نرخ تکرار 10 Hz و در طول موج 1540 nm دست آمد.



شکل 8. نمودار توزیع دما در میلهٔ لیزر

مقایسه نتایج به‌دست آمده در این شبیه‌سازی با موارد گزارش شدهٔ قبلی [7 و13]، با توجه به یکسان بودن ابعاد مادهٔ فعال، بیانگر افزایش انرژی خروجی و کاهش پهنای پالس با استفاده از مدل طراحی شدهٔ فوق است. در این طراحی کاهش واگرایی برخلاف موارد ذکر شدهٔ قبلی، بدون نیاز به حضور عناصر نوری نظیر پرتوگستر یا عدسی و با تغییر در عناصر اصلی کاواک صورت گرفته است که این خود منجر به بهینه شدن طول کاواک و افزایش قابلیت تجاری‌سازی آن شده است.

بحث و نتیجه‌گیری

یک لیزر Er:Yb:glass دمش از پهلوی دیودی هواخنک در طول موج دمش 940nm شبیه‌سازی شد. با استفاده از این مدل، یک کاواک دمش ساده و بهینه با به کار بردن کلیدزن Q منشور چرخان طراحی گردید. به دلیل ایجاد تقارن و یکنواخت‌سازی دمش در مادهٔ فعال، دمش با استفاده از سه لیزر دیود و در یک ساختار Y شکل صورت گرفت. استفاده از روش جفت‌شدگی نزدیک به دلیل به‌کار نگرفتن خنک‌کنندهٔ مایع، موجب کاهش حجم و وزن سیستم شد. در مدل طراحی شدهٔ فوق، با بررسی و تغییر پارامترهای مؤثر بر پرتو خروجی به پالسی با انرژی بالا و پهنای کم دست یافتیم. به‌طور مشابه، تصحیح پارامتر واگرایی نیز به وسیلهٔ تغییر در اجزای اصلی تشدیدگر و بدون نیاز به استفاده از عناصر نوری صورت گرفت که منجر به بهینه شدن طول کاواک و کاهش عناصر سامانه گردید.

منابع

[1] زاوش، مریم؛ حاتمی، محسن؛ نوفرستی، امیر؛ یزدانی، علی؛ حسینی، امین؛ مقایسهٔ نتایج شبیه‌سازی لیزر Er:Yb: glass دمش دیودی هواخنک با دو هندسهٔ استوانه‌ای و تیغه‌ای توسط نرم‌افزار LASCAD. چهارمین همایش ملی مهندسی اپتیک و لیزر ایران، اصفهان، (1394) 34-29.

[2] مقتدر دیندارلو، محمدحسن؛ ملکی، عباس؛ ثقفی‌فر، حسین؛ کاوش تهرانی، مسعود؛ شبیه‌سازی آثار گرمایی در میلهٔ لیزری Nd:YAG بادمش جانبی دیودی در نرخ تکرار Hz 100، مقاله نامه کنفرانس فیزیک ایران، سیستان و بلوچستان، (1393) 1183-1180.

[3] A. Levoshkin, J.E. Montagne, Efficient Diode Pumping for Q-Switched Yb:Er:glass Lasers. Appl. Opt. 40 (2001) 3023-3032.

[4] E. Georgiou, O. Musset, J.P. Boquillon, High-Efficiency and High-Output Pulse Energy Performance of a Diode-Pumped Er:Yb:glass 1.54μm Laser .Appl. Phys. 70 (2000) 755-762.

[5] R. Wu, J. Myers, M. Myers, T. Wisnewski, 50-Hz Diode-Pumped Er: glass Eye-Safe Laser, OSA. ASSL. (1999) 121-123.

[6] E. Georgiou, O. Musset, J.P. Boquillon, B. Denker, S.E. Sverchkov, 50mJ/30ns FTIR Q -Switched Diode-Pumped Er:Yb:glass 1.54 μm Laser. Opt. commun. 198 (2001) 147-153.

[7] R.Wu, S. Hamlin & P. Plocki, High-Repetition-Rate Diode-Pumped Er^{3+}:glass Laser for Eye-Safe Radar Transmitters. SPIE. 3065 (1997) 158-161.

[8] R. Wu, J. D. Myers, S. J. Hamlin,1-KHz BBO EO Q-Switched Diode-Pumped Er:glass Laser Experiment. SPIE. 3265 (1998) 70-74.

[9] J. Sulc, H. Jelinkova, K. Nejezchleb and V. Skoda, Influence of Undoped YAG Cap on Diode - Pumped Composite YAG/Er:Yb: glass Laser. SPIE. 8235 (2012) 82351Z 1-7.

[10] W. Koechner, Solid-State Laser Engineering, Sixth Edition, Springer, New York. (2006).

[11] K. Semwal and S.C. Bhatt, Tuning of Wavelengths for Producing Eye Safe Laser Using Second Order Nonlinear Processes. Appl. Opt. 2 (2012) 20-28.

[12] W.B. Hageman, The Development of Scalable Pump Techniques for GGIAG Fiber Lasers and Passive Athermalization Techniques for Solid State Lasers. PHD Thesis, University Central Florida Orlando. (2010).

[13] R. Wu, S. Hamlin, M. Myers, J. Myers, J. Hutchinson, L. Marshall, 1.2J High Energy Diode Pumped 1535nm Er:Yb:glass Laser. Technical Digest of CLEO Europe'96. 261 (1996) 129-131.