

طراحی و برپایی آزمایشگاهی لیزر نئودیمیوم یاگ دمش از انتها با تشدیدگر تاشو

محمدجواد عشقی^۱، عباس مجدآبادی^۲، رضا گودرزی^۳ و مسعود صباغی^۴

چکیده:

در این پژوهش، یک لیزر نئودیمیوم یاگ پیوسته با آرایش تشدیدگر Z شکل و دمش دیودی انتهایی طراحی و ساخته شده است. طول کل تشدیدگر ۱/۳۸ متر می باشد. هم پوشانی بین پرتو پمپ و مد اصلی لیزر در نرم افزار متلب شبیه سازی شده است و پایداری تشدیدگر در سرتاسر توان دمش تحلیل شده است. در نهایت در توان دمشی ۷/۶ وات، بیشینه ی توان خروجی ۱/۴۸ وات با بازده نوری به نوری ۲۴ درصد بدست آمد.

کلمات کلیدی: لیزر نئودیمیوم یاگ پیوسته، تشدیدگر Z شکل، لیزر پیوسته.

۱. مقدمه

گسیلی این لیزر در پنجره ی عبوردهی اتمسفر قرار داشته که این امر باعث می شود در کاربردهایی نظیر فاصله یابی، طیف سنجی از راه دور و جز پرکاربردترین لیزرها قرار گیرد. علاوه بر آن دیودهای مورد نیاز دمش این بلور به راحتی قابل ساخت بوده و در بازار نیز فراوانی زیادی دارند. لیزرهای نئودیمیوم متداول ترین نوع لیزرهای حالت جامد هستند. در میان لیزرهای حالت جامد یون فلزی، لیزر Nd:YAG بیشترین کاربرد را دارد. در واقع میزبان YAG دارای خواص فیزیکی ویژه ای است که آن را برای عمل لیزر مناسب ساخته است. بلور میزبان YAG سخت است و کیفیت اپتیکی خوب و ضریب هدایت بالایی دارد. این لیزر پهنای خط باریک، بهره بالا و آستانه لیزری پائینی دارد. لیزر Nd:YAG در شرایط عادی و دمای محیط در طول موج ۱۰۶۴ نانومتر گسیل دارد. با تغییر شرایط کاواک لیزری، انتخاب مناسب آینه ها و یا سرد کردن بلور طول موج های دیگری نیز در دسترس می باشد. همچنین با توجه به چگالی بالای تولید فوتون در این

لیزرهای حالت جامد به دلیل حجم کم، قابل حمل بودن، منابع دمشی متنوع و کیفیت پرتو بهتر در مقایسه با سایر لیزرها، کاربردهای وسیعی در حوزه های مختلف صنعت، پزشکی و نظامی دارند. لیزرهای حالت جامد مزیت های فراوانی نسبت به سایر لیزرها نظیر لیزرهای گازی و رنگینه ای دارند که از جمله ی آنها می توان به وزن کمتر، ابعاد کمتر و قابلیت حمل آسان تر اشاره کرد. از میان محیط های فعال مورد استفاده در این لیزرها، بلور Nd:YAG به دلیل خواص مکانیکی، ترموپاتیکی مطلوب و نیز گذارهای گسیلی گوناگون نظیر ۱۰۶۴nm, ۱۳۳۸nm و ۹۴۶nm همواره مورد توجه طراحان لیزر بوده است [۱]. همچنین طول موج

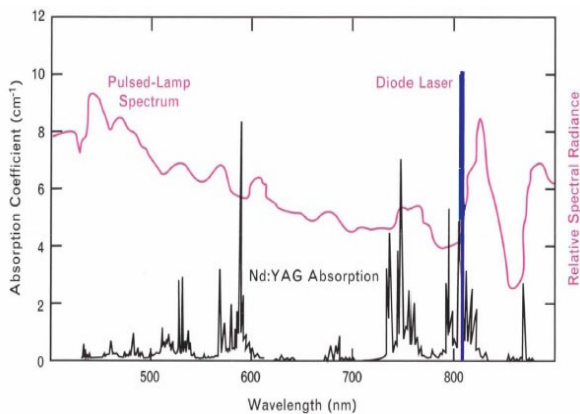
۱) کارشناسی ارشد، دانشکده فیزیک، دانشگاه تهران. آدرس پست الکترونیک: m.j.eshghi@alumni.ut.ac.ir

۲) استادیار، پژوهشکده لیزر و اپتیک، سازمان انرژی اتمی.

۳) دکتر، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف.

۴) کارشناسی ارشد، پژوهشکده لیزر و اپتیک، سازمان انرژی اتمی.

گیرند. به عنوان مثال لیزرهای حالت جامد با دمش لامپی دارای بازده الکتریکی به نوری ۱ الی ۲ درصد هستند در صورتی که لیزرهای دمش دیودی بازده بیش از ۱۰ درصد دارند که این مسئله ناشی از هم پوشانی طیف گسیلی دیودها با طیف جذب بلور می باشد [۲]. در شکل (۱) طیف گسیلی یک لیزر دیود و یک لامپ درخشی به همراه طیف جذب بلور Nd:YAG مشخص شده است. همانطور که از شکل مشخص است قسمت قابل توجهی از طیف گسیلی لامپ ها به دلیل عدم انطباق با طیف جذب بلور حول 808 nm بدون استفاده می ماند که منجر به کاهش بازده کلی لیزر می شود. علاوه بر آن عمر لامپ های پیوسته در لیزرهای دمش لامپی حدود ۲۰۰ ساعت می باشد در حالیکه دیودها دارای عمر ۲۰۰۰۰ ساعتی می باشند [۴].

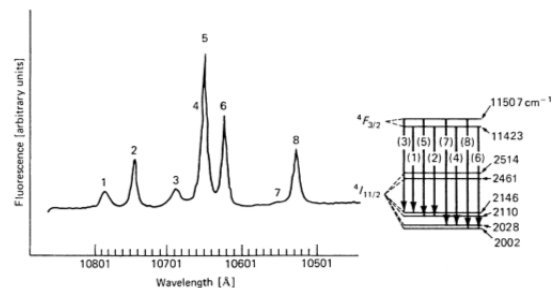


شکل ۳. مقایسه طیف جذب Nd:YAG و طیف گسیلی دیود و لامپ

۲. انواع هندسه‌ی دمش دیودی

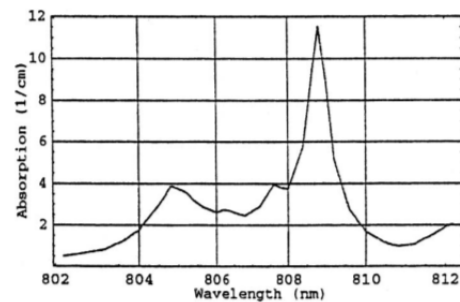
آرایش دیودها به منظور دمش لیزرهای حالت جامد به دو دسته دمش از انتها و دمش عرضی تقسیم می شوند. در دمش عرضی باریکه ی پمپ نسبت به محور تشدیدگر عرضی است. در این حالت می توان تمام حجم ماده فعال را تحت دمش قرار داد. بنابر این امکان دسترسی به توان بالاتر فراهم می شود زیرا می توان در صورت لزوم تعداد دیودهای مورد استفاده را زیاد کرد و

لیزر امکان تولید هماهنگ های بالاتر با استفاده از بلور های غیر خطی نیز وجود دارد. لیزر Nd:YAG به دو صورت پالسی و پیوسته عمل می کند. در هر دو مورد استفاده از لامپهای خطی در آرایش های تک بیضی، جفت شدگی نزدیک و یا چند بیضی نیز وجود دارد. در موارد استفاده از لامپ های خطی بازده شیب حدود ۱ الی ۲ درصد می باشد. طیف فلورسانس مربوط به بلور Nd:YAG نیز در شکل زیر نشان داده شده است. همانطور که در شکل زیر نیز نشان داده شده است بیشترین گسیل مربوط به طول موج ۱۰۶۴ نانومتر می باشد.



شکل ۱. طیف مربوط به فلورسانس Nd:YAG

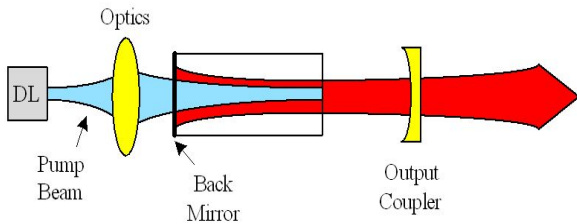
همچنین طیف جذب بلور Nd:YAG در شکل زیر آورده شده است. مقدار جذب این بلور در حوالی ۸۰۸ نانومتر قابل توجه است.



شکل ۲. جذب بلور Nd:YAG از ۸۰۲ تا ۸۱۲ نانومتر

منابع دمشی مورد استفاده برای لیزر Nd:YAG به دو دسته لامپ ها و دیودها تقسیم می شوند. لیزرهای حالت جامد با دمش دیودی در مقایسه با لیزرهای حالت جامد با دمش لامپی، به دلیل بازده بالا، حجم کم، عمر بیشتر و کیفیت اپتیکی بهتر، بیشتر مورد توجه قرار می-

در آرایش دمش از انتها به دلیل هم پوشانی بهتر پرتو دمش با مد پایه تشدیدگر، دستیابی به مد TEM₀₀ بدون استفاده از روزنه امکان پذیر خواهد بود [۵-۶]. البته با استفاده از بلورهای ترکیبی دست یابی به توان های بالا با استفاده از دیودهای لیزری آرایه ای^۱ نیز امکان پذیر است [۷].



شکل ۶. نمایش دمش از انتهایی یک لیزر حالت جامد

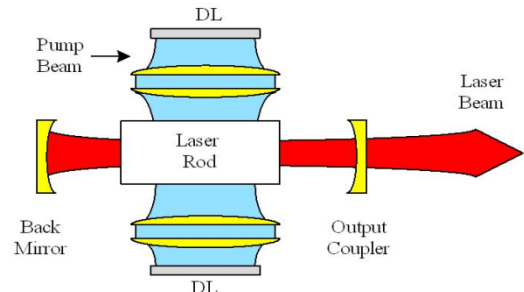
همچنین در مواردی که اندازه لکه درون تشدیدگر به عنوان یک پارامتر حیاتی تلقی می شود (نظیر لیزرهای قفل شدگی مد) از تشدیدگرهای تاشو نظیر X, Z و W و با آرایش دمشی انتهایی استفاده می شود [۸-۱۱]. هدف از این پژوهش، طراحی و برپایی آزمایشگاهی لیزر Nd:YAG در آرایش تشدیدگری Z شکل و با دمش دیودی انتهایی می باشد.

۳. طراحی تشدیدگر

یکی از مهمترین عوامل در تشدیدگرهای دمش از انتها، هم پوشانی مناسب بین پرتو دمش و مد اصلی تشدیدگر می باشد. بنابر این پارامترها باید به گونه ای انتخاب شوند که در سرتاسر توان دمش هم پوشانی بین پرتو دمش و مد اصلی برقرار باشد. از مهمترین عوامل تاثیر می توان به عدسی گرمایی اشاره کرد. در لیزرهای دمش از انتها فاصله ی کانونی عدسی گرمایی از رابطه ی زیر بدست می آید [۳]:

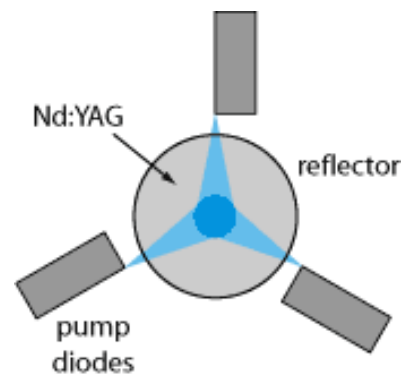
$$f = \frac{\pi K \omega_p^2}{P_h \left(\frac{dn}{dT} \right)} \left(\frac{1}{1 - \exp(-\alpha_0 L)} \right) \quad (1)$$

همچنین در روش عرضی به علت شکل دمش، توزیع گرمایی خواهیم داشت و بنابراین مشکلات گرمایی کم تر است.



شکل ۴. نمایش دمش عرضی در یک لیزر حالت جامد

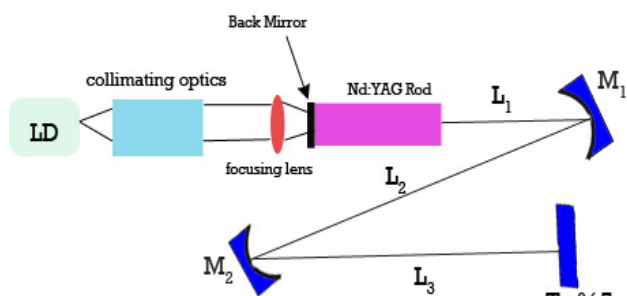
همچنین از آرایش های مقارنی جهت دستیابی به کیفیت پرتو بهتر نیز استفاده می شود. متداول ترین آرایش دمش عرضی جهت دستیابی به پرتو مقارن استفاده از دمش عرضی سه طرفه می باشد که در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۵. شماتیک دمش سه طرفه جهت دستیابی به کیفیت پرتو مطلوب

در دمش طولی، باریکه ی پمپ در طول محور تشدیدگر قرار دارد. در این حالت امکان جفت شدگی هندسی پرتو دمش و پرتو پمپ زیادتر و کارایی لیزر بالاتر است. زیرا تابش دمش در هندسه ی طولی هم خط با مد اصلی لیزر است ولی در این روش امکان رسیدن به توان بالا کمتر است زیرا در زیاد کردن تعداد دیودها محدودیت داریم و همچنین در آنجا توزیع گرمایی نداریم و به دنبال آن مشکلات گرمایی وجود خواهد داشت.

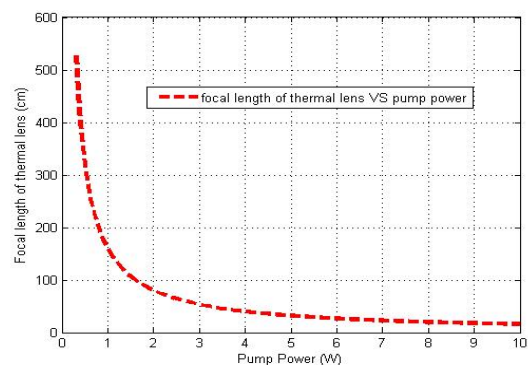
تشدیدگر استفاده شده در شکل (۷) نشان داده شده است. محیط فعال Nd:YAG استوانه ای شکل و دارای قطر ۵ mm و طول ۱۰ mm می باشد. سطح انتهایی محیط فعال به گونه ای لایه نشانی شده است که نسبت به طول موج ۸۰۸ nm دارای ضریب عبور ۹۹٪ و نسبت به طول موج ۱۰۶۴ nm دارای بازتاب کامل می باشد. این سطح به عنوان آینه عقبی لیزر عمل می کند. سطح دیگر بلور دارای لایه های ضد بازتاب در این دو طول موج می باشد.



شکل ۷. نمای تشدیدگر استفاده شده با آرایش Z شکل

همچنین از دو آینه M_1 و M_2 با بازتاب کامل در طول موج لیزر به عنوان آینه های تاشو استفاده کردیم. نهایتاً از یک آینه ی تخت با عبوردهی ۵ درصد به عنوان آینه ی خروجی لیزر استفاده شده است. در آرایش فوق، طول کل تشدیدگر ۱۳۸ سانتی متر می باشد. از آنجایی که پرتوها با زاویه ی غیر صفر بر روی آینه ها فرود می آیند، ابیراهی آستیگماتیسم بوجود می آید که با استفاده از تیغه های مسطح و یا طراحی زاویه ی مناسب فرود پرتوها، می توان این ابیراهی را در بعضی از بازوهای تشدیدگر به صفر رساند. به منظور کاهش ابیراهی آستیگماتیسم و نیز وجود محدودیت در همراستاسازی و قطعات اپتومکانیک، زاویه ی فرود پرتو روی آینه ها حدود ۱۰ درجه تنظیم شده است. اندازه ی لکه ی پرتوهای پیکانی و مماسی در این زاویه درون بلور و نیز روی آینه ی خروجی محاسبه شده و با دقت قابل قبولی با یکدیگر برابر هستند. به منظور بررسی هم پوشانی

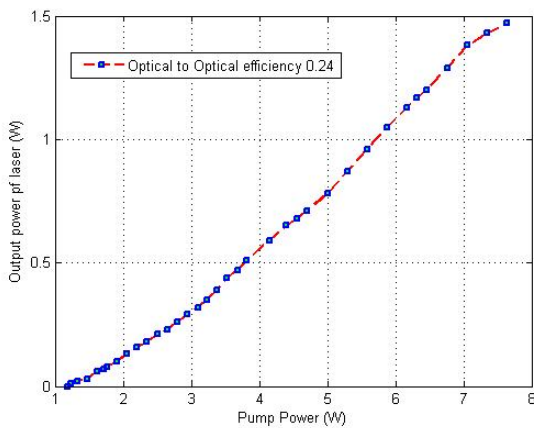
که در رابطه ی (۱) K ضریب هدایت گرمایی محیط فعال لیزر، dn/dT ضریب تغییرات ضریب شکست با دما، P_H کسری از توان دمش که درون محیط فعال به گرما تبدیل می شود که حدود ۳۰ درصد از توان دمشی را شامل می شود. همچنین α_0 ضریب جذب و L طول محیط فعال لیزر می باشد. ω_p نیز اندازه ی لکه ی پمپ روی محیط فعال می باشد. دیود لیزر استفاده شده به عنوان منبع دمش دارای بیشینه ی توان خروجی ۱۰ وات پیوسته، پهنای نوار ۳ نانومتر و خروجی آن از نوع جفت شدگی فیبری^۱ می باشد. با استفاده از یک خنک ساز الکتریکی^۲ دمای دیود لیزر و در نتیجه طول موج گسیلی آن قابل تنظیم است. از آنجایی که بیشینه ی جذب بلور نئودیمیوم یاگ در طول موج ۸۰۸ می باشد با تنظیم دمای خنک ساز الکتریکی طول موج خروجی دیود لیزر ۸۰۸ نانومتر تنظیم شده است. پرتو خروجی دیود لیزر بوسیله ی یک موازی ساز موازی شده و سپس بوسیله ی یک عدسی غیرکروی روی محیط فعال کانونی می شود. شعاع پرتو دمش روی محیط فعال ۱۵۰ میکرومتر می باشد. بنابر این فاصله ی کانونی عدسی گرمایی مطابق شکل (۶) بر حسب توان دمش شبیه سازی شده است.



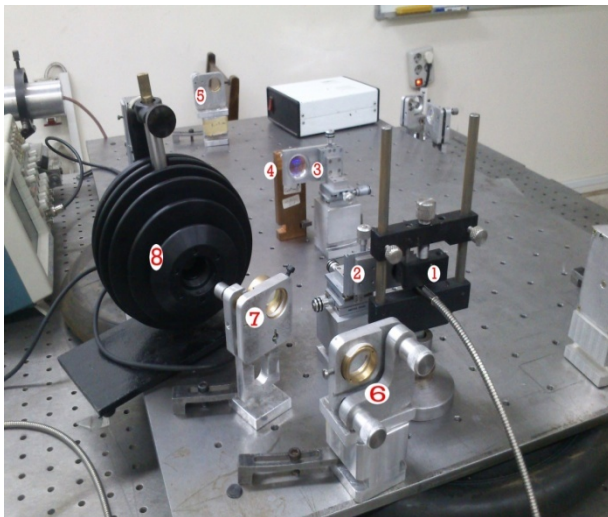
شکل ۶. فاصله ی کانونی عدسی گرمایی بر حسب توان دمش

^۱ Fiber coupling
^۲ TEC

نوری به نوری ۲۴ درصد می باشد. نمای چیدمان آزمایشگاهی در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۹. توان خروجی لیزر بر حسب توان دمشی دیود لیزر



شکل ۱۰. نمای چیدمان آزمایشگاهی لیزر Nd:YAG با

آرایش دمش انتهایی

۱: دیود لیزری با کوپلینگ فیبری ۲: موازی ساز

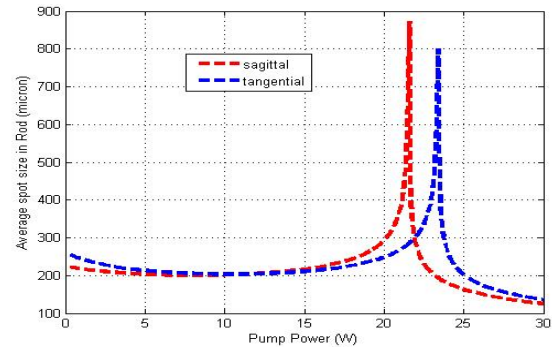
۳: عدسی غیر کروی ۴: بلور Nd:YAG نصب شده روی گرماگیر

۵: آینه M_1 ۶: آینه M_2 ۷: آینه‌ی خروجی لیزر

۸: توان سنج

توان خروجی لیزر با استفاده از یک توان سنج شرکت Coherent به مدت ۵ دقیقه مورد بررسی قرار گرفت که تغییرات توان لیزر کمتر از ۵ درصد می باشد.

فضایی بین پرتو دمش و مد اصلی تشدیدگر، اندازه‌ی لکه مد اصلی درون بلور بر حسب توان دمش برای پرتوهای پیکانی و مماسی شبیه سازی شده است که نتایج در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل ۸. اندازه‌ی لکه پرتوهای مماسی و عمودی درون بلور بر حسب توان دمش

همانطور که در شکل (۸) نیز مشخص است تا توان دمشی ۱۵ وات اندازه‌ی لکه‌های مماسی و پیکانی با دقت قابل قبولی با یکدیگر مساوی و بیش از ۲۰۰ میکرومتر هستند. این تشدیدگر تا توانهای دمشی ۲۰ وات نیز دارای عملکرد خوبی بوده ولیکن برای توان‌های بیش از ۲۱ وات، اندازه‌ی لکه تکینه شده که نشان از ناپایدار شدن تشدیدگر ناشی از عدسی گرمایی می باشد. (در شکل (۸) برای توان‌های بیش از ۲۱ وات قسمت حقیقی اندازه‌ی لکه نیز رسم شده است). با توجه به آنکه توان دمش شده، در بیشینه ۱۰ وات می باشد، انتظار می رود در سرتاسر توان دمشی اندازه‌ی لکه‌ی مد اصلی TEM₀₀ درون بلور بیش از ۲۰۰ میکرومتر باشد لذا می توان انتظار داشت شرایط هم پوشانی پرتو پمپ و مد اصلی با دقت خوبی برقرار شود.

۴. برپایی آزمایشگاهی

با توجه به نتایج حاصل از شبیه سازی به برپایی لیزر در محیط آزمایشگاه اقدام شد. نمودار توان خروجی لیزر بر حسب توان دمش در شکل (۹) رسم شده است. بازده

- [7]. M. Frede, D. Kracht and et al, "Compact high-power end-pumped Nd:YAG laser", Optics & Laser Technology 38, 2006, pp 183-185,
- [8]. G. Lin, H. Wie and et al, "Diode-end-pumped passively mode-locked ceramic Nd:YAG Laser with a semiconductor saturable mirror", OPTICS EXPRESS, Vol. 13, No. 11, 2005, pp. 485-490,.
- [9]. Y. Yang, J. Hou and et al, "Diode-pumped passively mode-locked Nd:YAG laser at 1338 nm with a semiconductor saturable absorber mirror", Applied Optics, Vol. 50, No. 36, 2011, pp. 6713-6718,.
- [10]. L. Qin, D. Tang and et al, "Diode-end-pumped passively mode-locked Nd:GGG laser with a semiconductor saturable mirror", Optics Communications, Vol. 281, 2008, pp. 4762-4764,.
- [11]. J. Spuhler, U. Keller, and et al, "Diode-pumped passively mode-locked Nd:YAG laser with 10-W average power in a diffraction-limited beam", Optics Letters, Vol. 24, No. 8, 1999, pp. 528-531.

۵. نتیجه گیری

در این پژوهش نمونه ی آزمایشگاهی یک لیزر نئودیمیوم یاق پیوسته با تشدیدگر Z شکل و با طول ۱۳۸ سانتی متر طراحی و ساخته شد. سامانه ی دمش از نوع انتهایی و بوسیله ی یک دیود لیزری با کوپلینگ فیبری استفاده شده است. در نهایت در توان دمشی ۷/۶ وات، خروجی ۱/۴۸ وات و با بازده نوری به نوری ۲۴ درصد حاصل شد.

۶. سپاسگزاری

از همکاری آقایان مهندس فتحعلیان، مهندس حسن پور، مهندس نوری و مهندس احمدی کارشناسان محترم سازمان انرژی اتمی، تشکر و قدردانی می نمایم.

مراجع

- [1]. W. T. Silfvast, "Laser Fundamental", Cambridge, Second edition, 2002.
- [2]. O. Svelto, "Principles of Lasers", Springer, Fifth Edition, 1998
- [3]. W. Koechner, "Solid State Laser Engineering", Springer, Sixth Edition, 2006.
- [4]. T. Y. Fan, "Diode-pumped Solid State Lasers", The Lincoln Laboratory Journal, Vol. 3, No. 3, 1990, pp. 413-426.
- [5]. V. Kushawaha, Y. Chen, "Diode-end pumped high efficiency Nd:YAG laser", Appl Phys B, 1994, pp. 659-661.
- [6]. R. Zhou, T. Zhang and et al, "8.3 W diode-end-pumped continuous-wave Nd:YAG laser operating at 946-nm", OPTICS EXPRESS, 2005, Vol. 13, No. 25, pp. 10115-10119.

