بیست و هفتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و سیزدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه سیستان و بلوچستان،
زاهدان، ایران.
۱۴-۱۶ بهمن ۱۳۹۹

کد مقاله : A-۱۰-۱۹۹۵-۲

شبیه‌سازی و بهینه‌سازی لیزر پرتوان Ho:YLF با دمش لیزر فیبری Tm:Fiber

مجید بابایی توسکی[۱] ، عباس ملکی[۲]، عبدالله اسلامی مجد[۲]، حسن عبادیان[۲]

[۱]دانشجوی دکتری فوتونیک دانشگاه صنعتی مالک اشتر - majid2017bt@gmail.com

[۲] هیات علمی دانشگاه صنعتی مالک اشتر، پژوهشکده علوم و فناوری اپتیک و لیزر

چکیده –در این مقاله به شبیه‌سازی لیزر پرتوان Ho:YLF دمیده شده توسط لیزر فیبری Tm:fiber پرداخت شده است. ابتدا بازده جذبا در نظر گرفتن تبهگنی ترازها، برای ساختار دمش یک بار و دوبار عبور دربلور Ho:YLF به طول ۳۰ میلی متر با آلاییدگی ۰/۵ درصد محاسبه شده است. مقدار بازده دمش یک بار عبور،۰/۴۳ بدست آمد. با استفاده از نرم افزار LASCAD پارامترهای طراحی مشدد (طول مشدد، شعاع انحنا، آینه‌ها و پارامترهای همپوشانی پرتو) بهینه شد. توان خروجی ۲۰/۸۲ وات در مشدد تخت-کاو با بازده نوری ۳۴ درصد استخراج گردید.

کلید واژه- «بازده جذب»، «لیزر Ho:YLF»، «دمش از انتها»

Simulation and Optimization ofthehigh-powerHo:YLF Laser pumped withTm:Fiber laser

Majid BabaiyTooski*, AbassMaleki,AbdollahEslamiMajd, Hassan Ebadian

*majid2017bt@gmail.com

Abstract-In this paper, the simulation and optimization of high power Ho: YLF Laser pumped with Tm:fiber laser is presented. First, we calculate absorption efficiency for single and double pass end pumped structure by consideration the levels degeneracy.The simulation was done for Ho:YLF crystal of 0.5 at% Ho dopant concentration and the length of 30 mm. The efficiency of end-pumped regime 0.43 is obtained. By using of the LASCAD software, the design parameters of resonator such as;cavity length, radius curvature of mirrors and beam overlap efficiency were optimized. The output power of laser with Plano-Concave resonator 20.82 W is extracted. The optical to optical efficiency 34 % is obtained.

Keywords:absorption efficiency,Ho:YLF laser ,end of pump

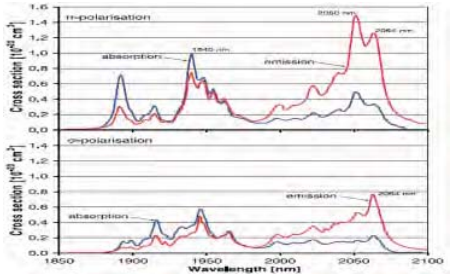
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترس باشد.

مقدمه

لیزرهای ۲ میکرون پر انرژی برای کاربردهای متنوعی شامل جراحی لیزری، برش مواد پلاستیکی، لیدار، بیناب نمایی، سنجش از راه دور و کاربردهای دفاعی جذاب هستند. آنها چشم ایمن و در پنجره عبوردهی اتمسفر عمل می کنند. و بعلاوه در کاربردهای مستقیم، آنها برای دمش نوسانگر پارامترنوری در گستره مادون قرمز میانی مناسب هستند. یک چالش اصلی در این رویکرد توسعه یک منبع دمش ۲ میکرون Q- سوئیچ شده با کیفیت پرتو خوب و دستیابی به توان متوسط بالا می‌باشد[۱].یون $Ho3+$با مواد میزبان فلوئوراید YLF برای تولید لیزر ۲ میکرون پرانرژی در لیزرهای حالت جامد مورد مطالعه قرار گرفته اند، زیرا دارای طول عمر تراز بالایی بلند ($14\ ms$) و سطح مقطع گسیل قابل قبولی است، این پارامترها به طور خیلی زیاد روی توانایی ذخیره‌سازی انرژی در ماده اثر گذار است و دارای اهمیت حیاتی در گسیل لیزر پالسی است. فلوئورایدها معمولاً ناحیه عبورپذیری خیلی وسیع‌تر از اکسیدها دارند از سوی دیگر رسانندگی گرمایی آنها کمتر می‌باشد. به علاوه، عدسی گرمایی خیلی ضعیف روی قطبش σ، حتی در حضور پرتو پرشدت دمش از انتها، استخراج پرتو های محدود به پراش را ممکن می کند [۲]. یک مشخصه دیگر از لیزرهای هولمیوم ۲ میکرون، طبیعت ۳ ترازی سطوح انرژی در آن می‌باشد. این سیستم‌ها دارای جمعیت گرمایی قابل توجهی در تراز پایینی لیزر در دمای اتاق هستند که بطور قابل توجهی آستانه لیزر را افزایش داده و بازدهی خروجی را در عملکرد Q-سوئیچ با انرژی بالا محدود می‌کند[۳]. دمش HO با لیزرهای فیبری $Tm:fiber$ با کیفیت بالا خیلی کارآمد است، زیرا نقص کوانتومی کمی در باند دمش ۱/۹ میکرون دارند و به همپوشانی فضایی خوبی بین پرتو دمش و مد مشدد می توان دست یافت[۴] یک رویکرد بنیادی برای محاسبه بازده جذب و طراحی جمع جور لیزر ۲میکرون برای دمش نوسانگر پارامتریک نوری با بلور$Ho:YAG$ دمش شده با لیزر فیبری $Tm:fiber$ ارائه شد[۵]. عملکرد لیزر در دمای اتاق با مد TEM_{00} در$Ho:YLF$ دمش شده توسط لیزر فیبریTm گزارش شده است بترتیب بازده شیب و بازده نوری به نوری ۶۵و ۵۵ درصد حاصل شده است[۶]و دست‌یابی به سیستم نوسانگر-تقویت کننده جمع‌وجور در یک چیدمان جدید با استفاده از توان دمش غیر قطبیده حاصل شده است[۷-۸].در ساختارهای دمش از انتها به درجه همپوشانی بالایی بین پرتو دمش و مد لیزر، با طراحی بهینه مشدد لیزر و ساختار دمش می توان دست یافت بطوریکه منجر به بازده نوری به نوری، توان خروجی بالا و عملکرد TEM_{00} لیزر شود. در این مقاله، محاسبات ضریب جذب بهینه در بلور $Ho:YLF$ انجام شده است. همچنین با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی $LASCAD$، بهینه سازی مشدد برای استخراج توان خروجی بهینه انجام شده است.

محاسبه بازده جذب دمش

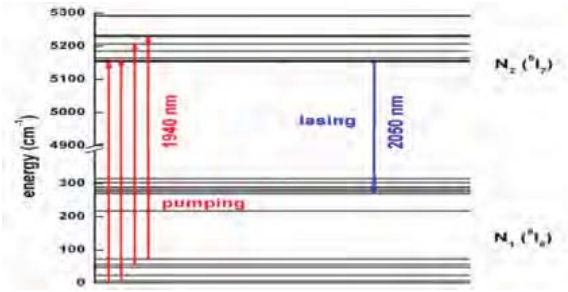
در لیزرهای $Ho:YLF$زمانی که از پرتو دمش با قطبش π استفاده شود، آستانه لیزر کاهش و بازده آن افزایش می-یابد[۶]. سطح مقطع جذب در طول موج ۱۹۴۰ نانومتر نسبتاً پایین بوده و به نوع قطبش وابسته است[۳].به این دلیل یک طراحی مناسب برای دست یابی به جذب کارآمد و آستانه پایین، نیاز است.شکل۱ طیف گسیل و جذب بلور نشان داده شده است. گسیل روی قطبش π قوی‌تر از قطبش σ است، ولی قطبش σ اثر عدسی گرمایی خیلی ضعیف تری از قطبش π دارد[۷].



شکل ۱: سطح مقطع جذب و گسیل[۸]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترس باشد.

در ساختار ترازهای انرژی بلور *Ho:YLF* مشاهده می‌شود که زیر تراز پایینی دمش(یعنی تراز صفر) دارای تبهگنی ۲ ($g_a = 2$) می‌باشد در حالی که برای زیر تراز بالای دمش، تبهگنی ۱ ($g_b = 1$) است و همچنین برای زیر ترازهای گذار لیزری با طول موج ۲۰۵۰ نانومتر تبهگنی وجود ندارد.



شکل۲: نمایی از سطوح انرژی Ho:YLF [۸]

برای تخمین بازده جذب دمش، باید در نظر گرفت که *Ho:YLF* بصورت تشدیدی دمش شده است و این بدان معنی است که جذب دمش فقط ناشی از کاهش جمعیت حالت پایه نیست بلکه جمعیت دار شدن در تراز بالایی لیزر نیز دلیل آن می باشد[۵]:

$$\frac{di_p}{dz} = \sigma_{12}^{(p)} \Delta N^{(p)} i_p = \sigma_{12}^{(p)} [f_b N_2 - f_a \left(\frac{g_b}{g_a}\right) N_0] i_p \quad (۱)$$

که f_a و f_b فاکتور بولتزمن برای تراز پایین و تراز بالایی دمش، N_0 و N_2 جمعیت تراز پایین و بالایی دمش، g_a و g_b بترتیب تبهگنی تراز پایین و بالایی دمش، $\sigma_{12}^{(p)}$ سطح مقطع جذب برای طول‌موج دمش و i_p شدت نور ورودی دمش است. بازده جذب با رابطه زیر بیان می شود:

$$\eta_{abs} = 1 - \left(G^{\left(\frac{\sigma_{abs}^{(p)} f_a}{2\sigma_{em}^{(L)} f_l}\right) f_x f_s} e^{-\sigma_{abs}^{(p)} f_a N_0 l_m (1 - f_s f_x)}\right)^p \quad (۲)$$

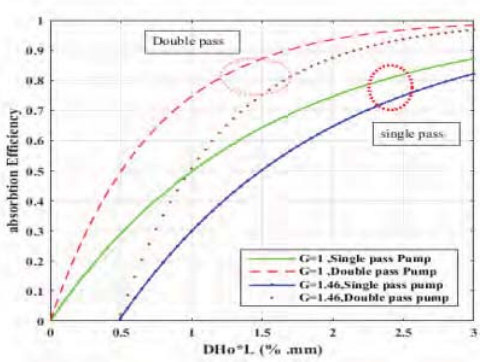
که p تعیین کننده تعداد عبور پرتو دمش می باشد. $\sigma_{abs}^{(p)}$ سطح مقطع جذب و $\sigma_{em}^{(L)}$ سطح مقطع گسیل موثر است.

در رابطه (۲)، $G = exp(2gl_{m,})$ است، که از $2gl_m = \delta - Ln(R_{out})$ برای محاسبه g را می توان استفاده نمود، کمیت g ضریب بهره، δ اتلاف رفت و برگشت مشدد، R_{out} درصد بازتاب آینه خروجی است.

جدول۱: کمیت‌های حرارتی و نوری بلور HO:YLF در دمای ۳۰۰ کلوین

Parameter	Value
$\sigma_{em,\pi}$, (cm^2)	1.8×10^{-20}
$\sigma_{abs,\pi}$, (cm^2)	1.3×10^{-20}
f_a	0.218
f_l	0.088
f_l	0.029
f_l	0.088
f_x	1.81
Upper level lifetime (ms)	14
Ground state population, N_0, (cm-3)	1.4×10^{21}
Thermal conductivity ,(w/mmk)	6×10^{-3}
Coefficient of thermal expansion,(1/k)	1×10^{-5}
Refractive index	1.47
Temperature depend of, $\frac{dn}{dT}$, (1/k)	-4.6×10^{-6}

دو حالت قبل از آستانه لیزر و حالت لیزدهی برای محاسبه ضریب جذب در نظر گرفته می شود، در حالت قبل از آستانه لیزر($G = 1$) و در حالت لیزدهی با $R_{out} = 0.7$، ضریب تلفات *δ=0.02* (معادل بهره $G = 1.46$) ضریب جذب با استفاده از جدول ۱ استخراج و در شکل ۳ رسم شده است. همانطور که از نمودار مشاهده می شود برای بلور با آلاییدگی ۵/ درصد و با بهره *G=1.46*، مقدار بازده جذب برای حالت یک بار عبور ۰/۵ و برای حالت دو بار عبور ۰/۶۵ استخراج شده است.



شکل ۳: محاسبه بازده جذب یک بار و دوبار عبور در طول‌موج ۱۹۴۰ نانومتر در بلور Ho:YLF برای G=1 (نادیده گرفتن دمش) و G=1.46

شبیه سازی و طراحی مشدد لیزر

تحلیل مشخصه‌های مشدد نوری با تعیین شعاع انحنای آینه‌های مشدد نوری، فاصله بهینه آینه های مشدد و فاصله

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترس باشد.

کانونی عدسی گرمایی، انجام می شود.فاصله کانونی عدسی گرمایی طبق رابطه زیر محاسبه می شود[۹ و ۱۰]:

$$f = \frac{\pi k \omega_p^2}{P_h(\frac{dn}{dt})}\left(\frac{1}{1-\exp(-\alpha l_m)}\right) \qquad (۳)$$

که k رسانندگی گرمایی، $\frac{dn}{dt}$ تغییرات ضریب شکست با دما، ω_p شعاع پرتو دمش، P_h کسری از توان دمش که به گرما تبدیل می شود($P_h = 1 - \frac{\lambda_p}{\lambda_L}$)، α ضریب جذب در طول موج دمش و l_m طول محیط بهره *Ho:YLF* است. واگرایی پرتو دمش و کمیت‌های محیط بهره کمیت‌های مهمی در بهینه سازی لیزرهای دمش از انتها هستند. عدسی گرمایی ایجاد شده در میله لیزر *Ho:YLF* روی مد لیزر، حجم محیط دمش شده و مقدار همپوشانی بین لیزر و پرتو دمش تاثیر گذار است[۹].بازده دمش $\eta_p = \eta_{abs}\eta_t\eta_s\eta_Q$ می‌باشد که η_t بازده انتقال پرتو دمش محیط فعال *Ho:YLF* در ساختار دمش از انتها می باشد، η_{abs} بازده جذب طول‌موج دمش، η_s بازده استوکس و η_Q بازده کوانتومی است.

با استفاده از مقدار بازده جذب (شکل ۳) برای طول بلور ۳۰ میلی‌متر و آلاییدگی هلمیوم ۰/۵ درصد و استفاده از مقادیر جدول (۲)، بازده دمش برای دمش یک بار عبور و دوبار عبور در جدول (۳) آورده شده است.

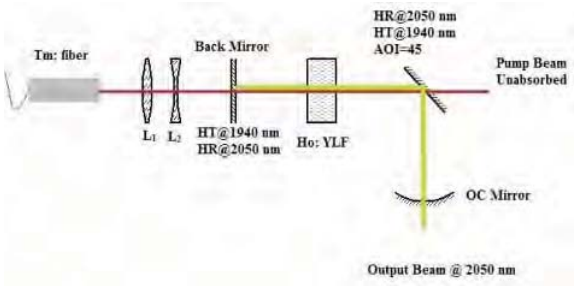
جدول ۲:مقادیر بازده برای لیزر دمش از انتها Ho:YLF

Parameter	Value
Transfer Efficiency,η_t	0.9
Quantum Efficiency,η_Q	1
Stokes Efficiency,η_S	0.95

جدول ۳: بازده دمش برای حالت یک بار عبور و دوبار عبور لیزر Ho:YLF

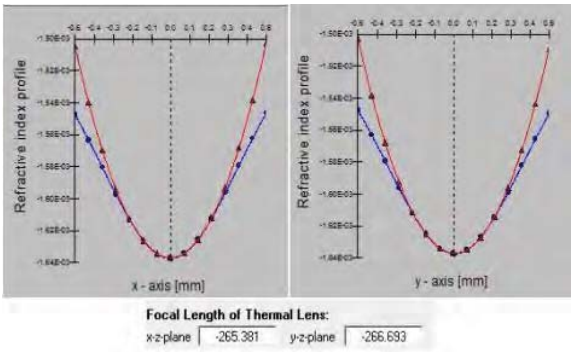
parameter	value
Pump efficiency single pass	0.43
Pump efficiency double pass	0.56

همچنین با استفاده از نرم افزار *LASCAD* به طراحی و شبیه‌سازی مشدد نوری لیزر، تحلیل حرارتی و محاسبه فاصله کانونی عدسی گرمایی پرداخته شده است. در این شبیه‌سازی،لیزر فیبری *Tm* با طول موج ۱۹۴۰ نانومتر با توان خروجی ۶۰ وات و $M^2 = 1.1$با پرتو موازی شده با قطر ۲/۵ میلی متر در جهت دمش بلور *Ho:YLF* استفاده شده است. طبق شکل ۴ پرتو خروجی از لیزر فیبری با یک کاهنده که شامل دو عدسیL_1 و L_2 با فاصله کانونی $f_1 = 100mm$ ، $f_2 = -50\ mm$است داخل بلور به ۱/۲ میلی‌متر کاهش می یابد. مشدد لیزر، ساختارL شکل، با آینه پشتی تختدارای بازتاب دو طول موجی (*HT @ 1940 nm*و *HR @ 2050 nm*) و آینه خروجی ۷۰ درصد بازتاب و شعاع انحنا *mmr=250* و یک آینه دو طول موجی با زاویه ۴۵ درجه (*HT @ 1940 nm*و *HR @ 2050 nm*) می باشد.



شکل۴: طرحواره‌ای از مشدد نوری لیزر را نشان می دهد.

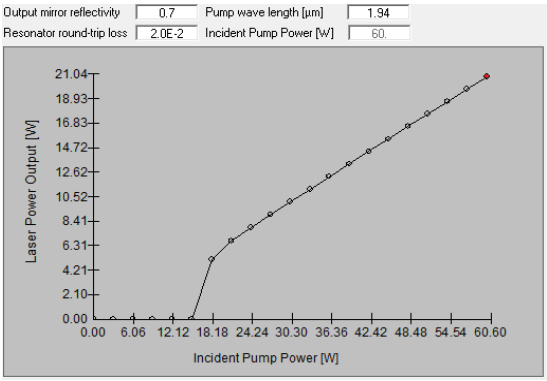
بهینه‌سازی طراحی سیستم با کنترل کمر پرتو دمش، کنترل مد مشدد حاصل می شود، پارامتری که می‌تواند در طراحی مشدد و استخراج توان خروجی با کیفیت پرتو بالا بهینه شود، کمر پرتو دمش و بازده همپوشانی است. نسبت بین ω_L و ω_P روی عملکرد سیستم تاثیر گذار است. در شکل ۵ نمایه تغییرات ضریب شکست عدسی گرمایی و فاصله کانونی عدسی گرمایی در صفحه *x-z* و *y-z* نشان داده شده است.



شکل۵: نمایه تغییرات ضریب شکست و فاصله کانونی عدسی گرمایی ۲۶۵/۴- میلی متر .

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترس باشد.

در شکل ۶ نمودار توان خروجی لیزر بر حسب توان نوری دمش شده آورده شده است، به ازای توان دمش ۶۰ وات، توان خروجی ۲۰/۸۲ وات بدست آمد.



شکل۶: توان خروجی بر حسب توان دمش Tm:Fiber

نتیجه‌گیری

در این شبیه‌سازی، مقدار بازده جذب برای بلور با طول ۳۰میلی متر و درصد داپ ۰/۵ درصد محاسبه شده است سپس با استفاده از آن بازده دمش ۰/۴۳ و ۰/۵۶ برای ساختار یک بار عبور و دوبار عبور محاسبه گردید و در ادامه با استفاده از نرم افزار *LASCAD* مقدار توان خروجی برای قطر پرتو های مختلف در یک مشدد تخت–کاو شبیه سازی شد و مقدار توان ۲۰/۸۲ وات برای دمش توسط لیزر فیبری ۶۰ وات با شعاع دمش ۵۰۰ میکرون معادل بازده نوری به نوری ۳۴ درصد با مد TEM_{00} استخراج گردید.

مرجع‌ها

[1] H.Fonnum, E. Lippert, and M. W. Haakestad, “550 mJ Q-switched cryogenic Ho:YLF oscillator pumped with a 100 W Tm:fiber laser”, Opt. Lett.,Vol. 38, No. 11,pp.1884-1886, 2013.

[2] H.Fonnum, E. Lippert, and M. W. Haakestad, “Fiber laser pumped high energy cryogenically cooled Ho:YLF laser”, Proc. of SPIE ,Vol. 8543, pp. 1-6, 2012.

[3] H. J. Strauss, W. Koen, C. Bollig, M. J. D. Esser, D. Preussler, K. Nyangaza and C. Jacobs, “Efficient Fiber-Laser-Pumped Ho:YLF Oscillator andAmplifier Utilizing the Transmitted Pump Power of the Oscillator”, Optical Society of America, Conference on Lasers and Electro-Optics, 2009.

[4] E. Lippert, H. Fonnum, G. Arisholm, and K. Stenersen, “A 22-watt mid-infrared optical parametric oscillator with V-shaped 3-mirror ring resonator”, Opt. Express, vol. 18, No. 25,pp. 26475-26483,2010.

[5] E. Lippert, S. Nicolas, G. Arisholm, K. Stenersen, and G. Rustad, “Mid infrared laser source with high power and beam quality”, Appl. Opt, Vol. 45, No. 16,pp. 3839-3845 2006.

[6] Y.Bia, M.Petros, J.Yu,P. Petzar, B. Trieu, S. Chen, H Lee, U. Singh,“Highly efficient operation of Tm:Fiber laser pumped Ho:YLF laser”,Optical Society of America, vol. ,2006.

[7] W. Koen, C. Bollig, H. Strauss, M. Schellhorn, C. Jacobs, M.J.D. Esser, “Compact fibre-laser-pumped Ho:YLF oscillator–amplifier system”, Appl Phys B, vol. 99, pp. 101–106,2010.

[8] J.Kwiatkowski, W.Zendzian, J.K.Jabczynski, J. Swiderski, “Continuous-waveandhighrepetitionrateQ-switchedoperationof Ho:YLF laserin-bandpumpedbyalinearlypolarizedTm:fiber laser”, Optics & Laser Technology,vol. 63, pp.66–69,2014.

[9] G.Shayeganrad, “Efficient design considerations for end-pumped solid-state-lasers”, Optics & Laser Technology, Vol. 44, No.4, pp. 987–994, 2012.

[10] W Koechner, Solid state laser engineering. 5th version. Springer; 1999.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترس باشد.