



بررسی عددی و تجربی طراحی بهینه لیزر دیسک نازک Yb:YAG

فرشته حاج اسماعیل بیگی، محمد جوادی داشکسن، حسین رزاقی، محمد مهدی زاده، محمدرضا عبدالحسینی مقدم

پژوهشکده لیزر و اپتیک، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، صندوق پستی ۱۱۳۶۵-۸۴۸۶

چکیده- در این مقاله بر اساس سیستم لیزری نیمه سه تراز، برای لیزر دیسک نازک با مد پیوسته یک مدل عددی ارائه می‌شود. در این مدل، اثرات خاموشی غلظت، بستگی ضریب شکست به غلظت و همچنین توزیع دمایی در محیط بهره لحاظ شده است. از این مدل برای تعیین و بهینه‌سازی پارامترهای طراحی لیزر دیسک نازک نظیر ضخامت دیسک، تعداد عبور پرتوی دمش، دمای مایع خنک‌ساز و غلظت یونهای فعال Yb^{+3} استفاده می‌شود. از چیدمان تجربی $303 W$ توان خروجی پیوسته تحت $494 W$ توان دمش حاصل شده است. نتایج عددی توافق خوبی با نتایج تجربی نشان می‌دهند.

کلید واژه- المان محدود، دمش لیزر دیسک، لیزر دیسک نازک، لیزرهای توان بالا و یتربیم

کد مقاله - 140.3615

۱- مقدمه

نازک، پرتوهای جذب نشده برای چندین بار متوالی به درون دیسک بازگردانده می‌شوند. شکل ۱ طرحواره‌ای از یک لیزر دیسک را نشان می‌دهد. عبور متوالی نور دمش از میان بلور نه تنها باعث افزایش بازده جذب می‌شود بلکه چگالی مؤثر توان دمش را نیز افزایش می‌دهد. بنابراین طرح دیسک نازک برای سیستمهای نیمه سه تراز ی همانند Yb:YAG که بطور همزمان هم به چگالی زیاد توان دمش جهت چیرگی بر آستانه شفافیت و هم به خنک‌سازی موثر و کارآمد نیاز دارند، مناسب می‌باشد. مدل‌هایی که تاکنون برای طراحی لیزر دیسک نازک ارائه شده‌اند، فقط بستگی به توزیع دمایی را لحاظ کرده‌اند [۳ و ۲]. با افزایش غلظت یونهای فعال (بیش از ۱۰٪)، مهاجرت یا تبادل انرژی برانگیخته بین یونهای Yb رخ می‌دهد و در نتیجه بخشی از انرژی تحریکی به ناخالصی‌های شبکه بلوری منتقل شده و نهایتاً کاهش طول عمر، بازده کوانتومی فلوروسانس Yb را کاهش می‌دهد [۴]. با در نظر گرفتن بستگی طول عمر به غلظت، پارامترهای طراحی تحت تأثیر قرار می‌گیرند. مدل ارائه شده در این مقاله علاوه بر لحاظ کردن همپوشانی بین مد دمش و لیزر و توزیع دمایی محیط

در بیشتر کاربردهای صنعتی، لیزرهای پرتوان با کیفیت بالا مورد نیاز است [۱]. هندسه و نوع ماده فعال لیزر، ساختار دمش و آرایش تشدیدگر از جمله عوامل مؤثر در دستیابی به یک لیزر توانمند با بازده بالا و کیفیت خوب می‌باشند.

با انتخاب محیط فعال به شکل دیسک نازک، نسبت سطح خنک شونده به حجم دمیده شده در مقایسه با لیزر میله‌ای افزایش می‌یابد که مزیت مهمی در استخراج توان خروجی زیاد از حجم کوچک می‌باشد. در لیزر دیسک نازک، جهت همپوشانی خوب بین مد دمش و مد لیزر و همچنین ایجاد چگالی زیاد توان دمش، از روش دمش نیمه- طولی استفاده می‌شود. به دلیل آن که دیسک از سطح زیرین خنک می‌شود، شار گرمایی و محور پرتوی لیزر باهم موازی هستند، بنابراین در راستای شعاعی گرادیان دمایی به وجود نمی‌آید که در مقایسه با لیزر میله‌ای این امر نیز مزیت بسیار مهمی است. بدلیل ضخامت کم دیسک، بازده جذب کم می‌باشد. اگر پرتوی دمش جذب نشده از سطح زیرین بازتابیده شود، طول مؤثر جذب تنها دو برابر ضخامت دیسک خواهد بود. بمنظور افزایش طول جذب در طرح لیزر دیسک



باشد. توزیع بار گرمایی بر طبق توزیع توان جذب شده می‌باشد که بر المانهای یک مدل دو بعدی (صفحه ۱۷) اعمال شده و در نهایت پروفایل دمایی با استفاده از روش المان محدود محاسبه می‌شود. در یک سیستم لیزری واقعی، یک مقاومت گرمایی گسسته در مرز بین بلور لیزری و سیستم خنک‌سازی وجود دارد که در محاسبات ما این فاکتور وارد می‌شود. همچنین بستگی رسانش گرمایی بلور، λ_{th} ، به غلظت آلاینده، C_{Yb} ، و دما، T ، بر طبق معادله ۱ بیان می‌شود [۱].

$$\lambda_{th}(T, C_{Yb}) = \lambda_{th}(300K, C_{Yb}) \left(\frac{204K}{T - 96K} \right)^{0.48 - 0.46 * C_{Yb}}$$

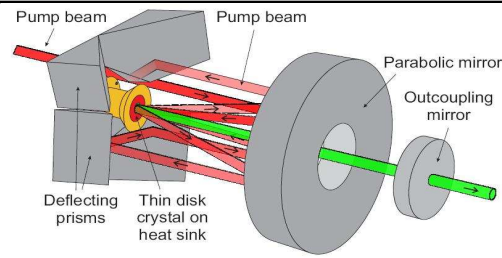
$$\lambda_{th}(300K, C_{Yb}) = (7.28 - 7.3 * C_{Yb}) \frac{W}{mK} \quad (1)$$

در محاسبه توان خروجی، فرض می‌کنیم که توزیع تابش دمش تقارن دایروی دارد. تشدیدگر به صورت تخت-موازی و کوتاه در نظر گرفته می‌شود. در این گونه تشدیدگرها، نسبت قطر دمش به قطر مد اصلی بزرگ است، چرا که در این حالت پروفایل مد لیزر بر پروفایل بهره بلور منطبق است. جمعیت ترازهای بالایی $N_b(r, z)$ و پایینی $N_a(r, z)$ بر حسب جمعیت مانیفولد بالایی N_2 و پایینی N_1 به ترتیب به صورت $N_b = f_b(r, z)N_2(r, z)$ و $N_a = f_a(r, z)N_1(r, z)$ بیان می‌شوند که $f_a(r, z)$ و $f_b(r, z)$ فاکتورهای اشغال بولتزن هستند. بستگی دمایی این توابع به صورت معادله ۲ است [۶].

$$f_{a,b}(r, z) = g_{a,b} \frac{e^{-E_{a,b} / KT(r, z)}}{\sum_{i,j} g_{i,j} * e^{-E_{i,j} / KT(r, z)}} \quad (2)$$

که برای $f_a(r, z)$ و $f_b(r, z)$ عمل جمع به ترتیب بر روی کل ترازهای مانیفولد بالایی و پایینی انجام می‌گیرد. E_a و E_b انرژی ترازهای لیزری a و b، g_a و g_b تبهگنی حالات a و i مانیفولد پایینی، g_j و g_b تبهگنی حالات b و j مانیفولد بالایی، K ثابت بولتزن و $T(r, z)$ دمای موضعی بلور است.

در این مدل، علاوه بر لحاظ کردن بستگی دمایی جمعیت ترازهای لیزری و همپوشانی مد دمش و لیزر، بستگی طول عمر تراز بالایی و ضریب شکست به میزان غلظت آلاینده نیز در نظر گرفته می‌شوند.



شکل ۱: طرحواره‌ای از یک لیزر دیسک نازک چند عبوری

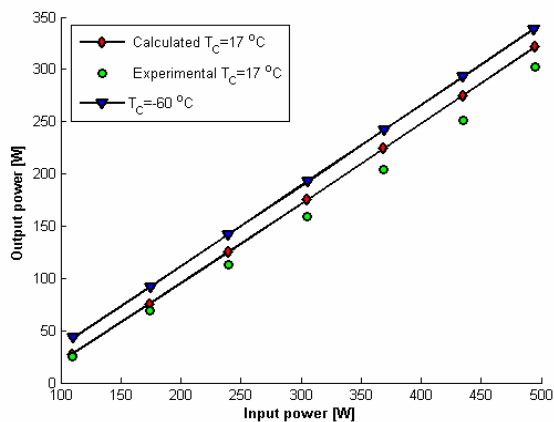
بهره، اثرات خاموشی غلظت و بستگی ضریب شکست به غلظت را نیز در نظر گرفته است.

۲- مدل عددی

برای تعیین پارامترهای طراحی بهینه لیزر دیسک نازک، از یک مدل عددی استفاده می‌شود. مدل عددی شامل سه مرحله اصلی است. در اولین گام، توزیع دمش در درون بلور با تقریب یک تابع تحلیلی محاسبه می‌شود. در گام دوم توزیع دمایی داخل بلور محاسبه می‌شود و مرحله سوم هم محاسبه توان خروجی، با در نظر گرفتن توزیع دمش و دما است. محاسبات نیازمند به دانستن پارامترهای اسپکتروسکوپی و مکانیکی و همچنین دیاگرام انرژی Yb:YAG است که این پارامترها در مرجع [۵] فهرست شده‌اند.

پرتوی دمش از سطح جلویی دیسک به طور مایل وارد شده و n بار بعد از بازتابش از سطح پشت دیسک از طریق آینه سهموی و منشورها بازگردانده می‌شود. بنابراین کل دفعات عبور پرتوی دمش از میان دیسک $N_p = 2 * n$ بار می‌شود. از آنجایی که پروفایل عرضی دیود لیزر جفت‌شده فیبری سوپرگوسین است [۲]، توزیع عرضی پرتوی دمش سوپرگوسین در نظر گرفته می‌شود. توزیع بهنجار جذب در درون دیسک با در نظر گرفتن کل توان جذب شده در چرخه رفت و برگشتی بدست می‌آید. چون توزیع انرژی جذب شده معمولاً در پیرامون محور، تقارن دایروی دارد دما نیز برای تقارن دایروی محاسبه می‌شود. فرض می‌شود که تولید گرما در نتیجه دو مکانیسم باشد. اولین مکانیسم، اثر استوکس ۸/۷٪ بین انرژی فوتون دمش و لیزر است. چشمه دوم گرما، جذب تابش لیزر و دمش بعلاوه جذب فلونورسانس توسط لایه‌نشانی تمام بازتابنده بلور است که تخمین زده می‌شود در حدود ۶٪ توان دمش جذب شده

درونی تشدیدگر = 0.2% ، گذردهی آینه خروجی = 3% ، دمای مایع خنک‌ساز = $17^\circ C$.



شکل ۲: توان خروجی بر حسب توان ورودی

با توان $494W$ و چگالی توان بیشینه $3/4 kW/cm^2$ ، توان خروجی $303W$ و بازده اپتیکی 61% حاصل می‌شود. بازده اپتیکی - اپتیکی در اینجا به صورت نسبت بین توان خروجی و توان دمشی وارد شده به اپتیک دمش تعریف می‌شود. شیب بازده محاسبه شده $\eta_{sl} = 77\%$ با داده‌های تجربی، $\eta_{sl} = 73\%$ ، توافق بسیار خوبی دارد. برای بررسی بیشتر، توان خروجی به ازای $T_c = -60^\circ C$ نیز رسم شده است.

یکی از دلایل اختلاف بین مقدار تجربی و مقدار محاسبه شده، نادیده گرفتن اتلاف اپتیک دمش است. چرا که حداقل 5% اتلاف ناشی از این پدیده است. دلیل دیگری که مهم به نظر می‌رسد، ناپیکنواختی پروفایل جذب به خاطر قطر بزرگ کلاف فیبری است که به طور تجربی این ناپیکنواختی مشاهده می‌شود. در محدوده توانهای پایین، به خاطر حذف شدن این ناپیکنواختی، تطابق بهتری بین مقدار پیش بینی شده و مقدار تجربی وجود دارد. بنابراین می‌توان انتظار داشت که با حذف دو عامل اتلاف اپتیک دمش و ناپیکنواختی پروفایل جذب، توان خروجی تا مقداری که مدل ما پیش‌بینی می‌کند، افزایش یابد.

۳-۱- تغییرات غلظت آلیبدگی

شکل ۳ بستگی بازده اپتیکی به ضخامت بلور را بازای غلظت‌های متفاوت نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که بازای هر C_{Yb} ، با افزایش ضخامت بلور، شیب بازده و به تبع آن تعداد یونهای لیزری که بایستی برای رسیدن به

در واقع با افزایش میزان غلظت، فاصله بین یونهای فعال کاهش می‌یابد و وقتی این فاصله به اندازه کافی (کوچکتر از $2-1 nm$) کوتاه باشد، بر هم کنش بین یونهای فعال اتفاق افتاده و باعث ایجاد خاموشی غلظت می‌شود [۷]. معمولاً خاموشی غلظت از چندین طریق صورت می‌گیرد که مهمترین آنها عبارتند از: ۱- تبادل و اهلس بین یونهای فعال ۲- انتقال انرژی فعال بین یونها که در انتها به یونهای ناخالص انتقال می‌یابد و باعث ایجاد مراکز خاموشی می‌شود. اثر میزان غلظت بر خواص اسپکتروسکوپی $Yb:YAG$ در مراجع [۷و۴] بررسی شده است. در این مقاله ما از داده‌های تجربی آنها برای طول عمر $\tau(C_{Yb})$ جهت محاسبه توان خروجی استفاده کرده‌ایم.

پارامتر دیگری که با افزایش غلظت تغییر می‌کند و در طراحی لیزر مهم به نظر می‌رسد، ضریب شکست است. پاتل و همکارانش در مرجع [۸] این بستگی را به صورت تجربی بررسی کرده و در نهایت یک معادله عمومی برای ضریب شکست $Yb:YAG$ به صورت معادله زیر ارائه داده‌اند.

$$n_{Yb:YAG}(N, \lambda) = (1.4651 * 10^{-4}) * N + n_{YAG}(\lambda) \quad (3)$$

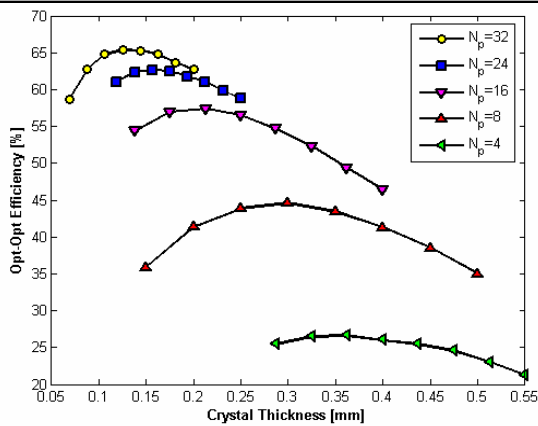
که N غلظت Yb^{3+} بر حسب $\%$ و $n_{YAG}(\lambda)$ ضریب شکست YAG بدون آلیبدگی در طول موج λ است. برای دو طول موج دمش و لیزر داریم:

$$n_{YAG}(1030nm) = 1.8153 \text{ و } n_{YAG}(1030nm) = 1.8153$$

در این تحقیق معادلات نرخ لیزر نیمه سه ترازوی که توسط تایرا و بایر در مرجع [۹] ارائه شده است بوسیله انتگرال تکراری حل می‌شود و نتایج بدست آمده از مدل با نتایج تجربی مقایسه می‌گردد. از این مدل می‌توان برای مواد دیگر نظیر Er ، Tm نیز استفاده کرد.

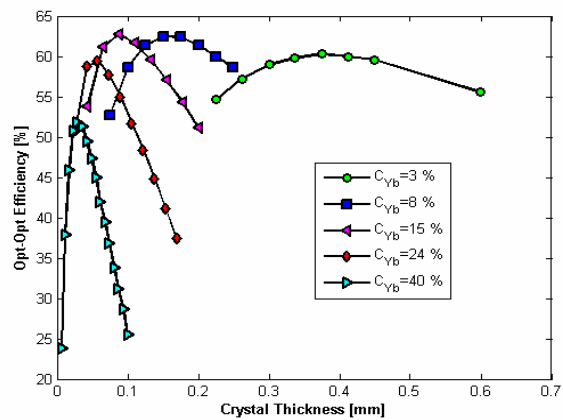
۳-۲- بحث و نتایج

با صرفنظر از اتلاف در ساختار دمش و همچنین نادیده گرفتن حد شکست مکانیکی، توان خروجی بر حسب توان ورودی در شکل ۲ رسم شده است. نمادهای درون این شکل و سایر شکلهای آتی بیانگر داده‌های گسسته تجربی و محاسباتی هستند. ساختاری که در این بخش و دو بخش بعدی مورد محاسبه قرار می‌گیرد دارای ویژگیهای زیر است: ضخامت بلور = $198 \mu m$ ، غلظت آلیبدنه = 7 اتم درصد، تعداد عبور پرتوی دمش = 24 ، قطر لکه دمش = $4/3 mm$ ، اتلاف

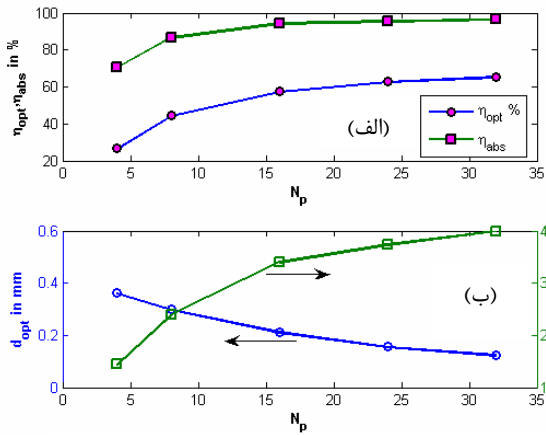


شکل ۵: بستگی بازده اپتیکی به ضخامت بلور برای تعداد عبورهای متفاوت

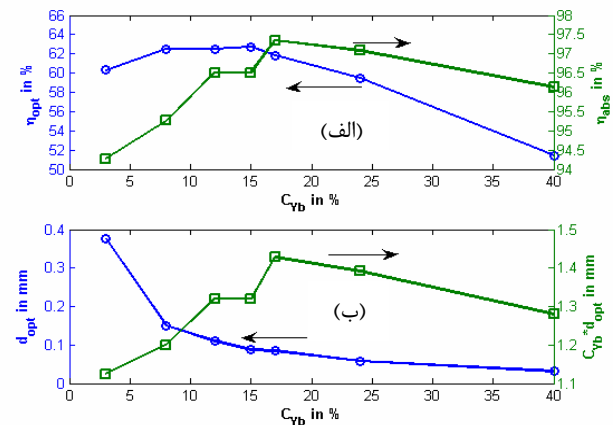
آستانه دمیده شوند، افزایش می‌یابند، بنابراین آستانه لیزری نیز زیاد می‌شود. این بدان معنی است که برای هر بلوری



شکل ۳: بستگی بازده اپتیکی به ضخامت بلور برای



شکل ۶: بستگی بازده اپتیکی و جذب (الف) و ضخامت بهینه و طول مسیر جذب (ب) به تعداد عبور پرتوی دمش



شکل ۴: بستگی بازده اپتیکی و جذب (الف) و ضخامت بهینه و طول مسیر جذب (ب) به غلظت یونهای فعال

غلظت رخ می‌دهد، اما به علت بالا بودن بازده جذب تا $C_{Yb} = 15\%$ ، این نقص جبران شده و بازده اپتیکی افزایش می‌یابد. اما بعد از آن، همانطور که در شکل ۴-ب می‌بینیم گرچه طول مسیر جذب برای هر دو حالت ۴۰٪ و ۱۵٪ C_{Yb} تقریباً یکسان است، ولی بعلت پایین بودن طول عمر تراز بالایی در غلظت ۴۰٪، بازده توان اپتیکی تا ۵۱٪ افت می‌کند. بنابراین با غلظت بهینه ۱۵٪ و ضخامت $110 \mu m$ ، بیشترین بازده اپتیکی، ۶۲٪، حاصل می‌شود.

۳-۲- تغییرات تعداد عبور

شکل ۵ نشان می‌دهد که بازده اپتیکی توسط تعداد عبور پرتوی دمش و ضخامت بلور تحت تأثیر قرار می‌گیرد. برای مثال برای $N_p = 4$ ، با افزایش ضخامت بلور، بازده اپتیکی افزایش پیدا می‌کند تا اینکه به یک مقدار بهینه می‌رسد. بعد از آن، با افزایش ضخامت، به علت بالا رفتن دمای درون

(بازای هر C_{Yb}) برای رسیدن به بالاترین بازده اپتیکی یک ضخامت بهینه وجود دارد. بازده اپتیکی و جذب بر حسب غلظت آلاینده در شکل ۴-الف رسم شده است. با افزایش غلظت تا حدود ۱۵٪ بازده اپتیکی و جذب افزایش می‌یابند، چون با افزایش آلاینده، ما می‌توانیم ضخامت بلور را کاهش دهیم در نتیجه دمای درون بلور پایین می‌آید که این امر به افزایش توان خروجی می‌انجامد. اما بعد از $C_{Yb} = 15\%$ ، بازده اپتیکی کاهش یافته و از ۶۲٪ به ۵۱٪ در $C_{Yb} = 40\%$ می‌رسد. بازده جذب نیز تا غلظت ۱۷٪ روند صعودی داشته و بعد از آن سیر نزولی دارد. علت این امر صرفاً در کاهش ضخامت بلور است که این کاهش در شکل ۴-ب نشان داده شده است که در $C_{Yb} = 40\%$ این کمیت به $30 \mu m$ می‌رسد. کاهش بازده اپتیکی بعد از $C_{Yb} = 15\%$ را می‌توان اینگونه توجیه کرد: با اینکه در غلظت‌های بالاتر از ۱۰٪، خاموشی

بلور و افزایش اتلاف بازجذبی، بازده اپتیکی مسیر نزولی خود را شروع می‌کند. بازده اپتیکی و جذب در شکل ۶-الف و همچنین ضخامت بهینه و طول مسیر جذب بر حسب تعداد عبور جذبی در شکل ۶-ب رسم شده است. این شکلها نشان می‌دهند که با افزایش تعداد عبور از ۴ به ۳۲ بار، بازده اپتیکی از ۶/۲۶٪ به ۶۵٪ افزایش می‌یابد. در همین حین گرچه ضخامت بلور کاهش می‌یابد، اما طول مسیر جذب از ۱/۵ mm به ۴ mm و به تبع آن بازده جذب نیز تا ۹۸٪ افزایش می‌یابد. بنابراین علت افزایش بازده را می‌توان در سه دلیل عمده جمع نمود: ۱- با افزایش تعداد عبور جذب، بازده جذب زیاد و در عین حال ضخامت بهینه از ۳۶۲μm به ۱۲۵μm کاهش می‌یابد. ۲- بیشینه دمای بلور از ۲۰۰ °C به ۸۰ °C می‌رسد. ۳- با کاهش ضخامت، تعداد یونهای لیزری کاهش می‌یابد که با کاهش آن، چگالی توان دمش آستانه سیستم نیمه سه ترازلی لیزر کاهش می‌یابد.

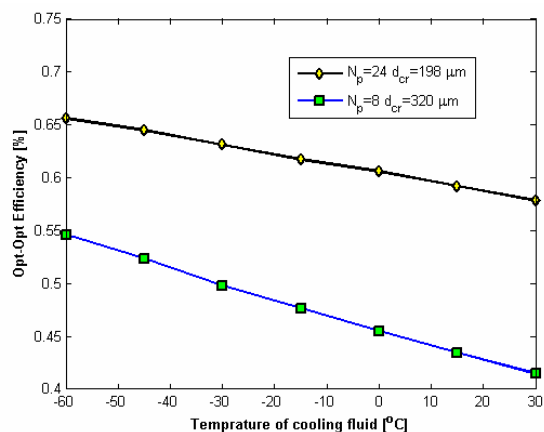
۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، با استفاده از مدل نیمه سه ترازلی و با در نظر گرفتن توزیع دمایی محیط بهره، همپوشانی مد لیزر و دمش، خاموشی غلظت و وابستگی ضریب شکست به غلظت، شرایط لازم برای افزایش توان خروجی لیزر دیسک نازک بررسی می‌شود. پارامترهای سیستم بهینه که این مدل پیش‌بینی می‌کند، با چیدمان آزمایشگاهی توافق کامل دارد. با غلظت آلاینده ۷ اتم درصد و ضخامت ۱۹۸μm و توان دمش ۴۹۴ وات، توان خروجی ۳۰۳ وات حاصل شد.

مراجع

- [1] C. Stewen, K. Contag, M. Larionov, A. Giesen, and H. Hügel, "1-kW CW thin disk laser," *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, 6, pp. 650-657, 2000.
- [2] Karszewski, C. Stewen, and A. Voss, "Simulations of the lasing properties of a thin disk laser combining high output powers with good beam quality," in *Proc. SPIE: Modeling and Simulation of Higher-Power Laser Systems IV*, vol. 2989, U. O. Farrukh and S. Basu, Eds., 1997, pp. 23.
- [3] K. Contag, M. Karszewski, C. Stewen, A. Giesen, and H. Hügel, "Diode pumped thin disc Yb:YAG lasers: Theoretical modeling and experimental investigations," *Quantum Electron.*, 29, pp. 697, 1999.
- [4] K. Petermann, and et al., "Highly Yb-doped oxides thin-disk lasers," *Journal of Crystal Growth*, 275, pp.135-140, 2005
- [5] H. W. Bruesselbach, D. S. Sumida, R. A. Reeder, and R. W. Byren, "Low-heat high-power scaling using InGaAs-diode-pumped Yb: YAG lasers," *IEEE J. Select. Topics in Quantum Electron.*, 3, pp. 105-115, 1997.
- [6] F. Augé, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, F. Mougel, G. P. Aka, and D. Vivien, "Theoretical and experimental investigations of a diode-pumped quasi-three-level laser: The Yb-doped Ca₄GdO(BO₃)₃ (Yb:GdCOB) laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, 36, pp. 598-606, 2000.
- [7] P. YANG, P. DENG, Z. Yin, "Concentration quenching in Yb: YAG," *Journal of Luminescence.*, 97, pp.51-54, 2002.
- [8] Patel, F.D., Honea, E.C., Speth, J., Payne, S.A., Hutcheson, R., Equall, R. "Laser demonstration of Yb₃Al₅O₁₂ (YbAG) and materials properties of highly doped Yb: YAG," *IEEE J. Quantum Electron.*, 37, pp. 135-143, 2001.
- [9] T. Taira, W. M. Tulloch, and R. L. Byer, Modeling of quasi-three-level lasers and operation of cw Yb:YAG lasers, *Appl. Opt.* 36, pp. 1867-1874, 1997.

شکل ۷: وابستگی بازده اپتیکی به دمای مایع خنک‌ساز



شکل ۷: وابستگی بازده اپتیکی به دمای مایع خنک‌ساز

۳-۳- افزایش بازده اپتیکی

یکی از روشهای افزایش بازده در لیزر دیسک نازک، کاهش دمای مایع خنک‌ساز است. در شکل ۷ بستگی بازده اپتیکی به دمای مایع خنک‌ساز برای دو ساختار با تعداد عبور ۲۴ و ۸ بار رسم شده است. ضخامت بلور و توان دمش متناظر، به ترتیب برابر ۱۹۸μm و ۵۰۰ وات و ۳۲۰μm و ۲۵۰ وات است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در حالت ۲۴ بار عبور با کاهش دما منحنی توان خروجی- دما با شیب $3/3 \text{ mW}/^\circ\text{C}$ افزایش می‌یابد. یعنی به ازای هر یک درجه کاهش دما، توان خروجی ۰/۳۳ وات افزایش می‌یابد. همانگونه که این شکل نشان می‌دهد با اینکه طول مسیر جذب ۲۴ عبور (۶/۱۳ mm) با طول مسیر جذب ۸ عبور (