بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

شبیه سازی خنک کاری ترکیبی لیزرهای نیمه هادی پرتوان پیوسته

احسان فرساد، سید پیمان عباسی و محمد صادق ذبیحی

مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران، تهران

چکیده – لیزرهای نیمه هادی پرتوان در گستره وسیعی از کاربردهای صنعتی مانند منبع انرژی لیزرهای حالت جامد مورد استفاده قرار می گیرند. افزایش دما یک پدیده مهم در عملکرد بهینه این قطعات است. در این مقاله، تحلیل عددی برای بررسی انتقال حرارت در چاهک گرمایی متخلخل مسی با استفاده از نانو سیال آب – اکسید آلومینیوم به منظور خنک کاری لیزر نیمه هادی ۴۰ وات انجام شده است. نتایج نشان می دهد نرخ انتقال حرارت در چاهک متخلخل با خنک کننده نانو سیال بیشتر از چاهک معمولی و خنک کننده آب است. با استفاده از چاهک متخلخل، دمای بار لیزر ۹٪ در مقایسه با چاهک معمولی کاهش می یابد. این کاهش بدلیل افزایش ضریب انتقال حرارت در نتیجه حرکت مارپیچی سیال در ساختار فوم و همچنین افزایش ضریب انتقال حرارت هدایتی موثر نانو سیال است.

کلید واژه- لیزرهای نیمه هادی پرتوان، دما، متخلخل، نانو سیال

The combined Cooling Simulation of CW High Power Diode Lasers

Ehsan Farsad, Seyed Payman Abbasi, Mohammad Sadegh Zabihi

Iranian National center for science and technology laser

Abstract- High power diode lasers are widely used in industrial applications such as solid-state laser pumping schemes. The augmentation of the temperatures is an important issue in the optimum performance of these devices. In the present work, a numerical analysis was carried out for studying the heat transfer performance of copper porous heatsink using water- Al_2O_3 nanofluid destined to the cooling of 40 W CW diode laser. Results show the heat transfer rate of porous heatsink with nanofluid is more than the common heatsink with water coolant. Also the laser bar temperature decreases 9% by using porous heatsink comparison common heatsink due to the improved heat transfer coefficient by the tortuous flow path in the foam structure and increasing the effective thermal conductivity of nanofluid.

Keywords: High power diode lasers, Temperature, Porous, Nanofluid

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-14]

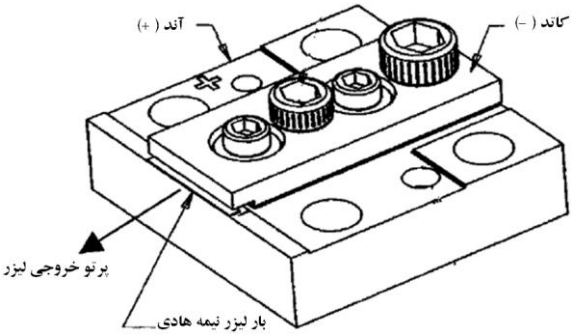
۱- مقدمه

لیزرهای نیمه هادی پرتوان، بدلیل ویژگیهای منحصر بفرد در گستره وسیعی از صنایع مانند منبع انرژی لیزرهای حالت جامد، فراوری مواد و پزشکی کاربرد دارند. بدلیل تبدیل بخشی از توان الکتریکی لیزر به تلفات حرارتی، مدیریت حرارت در لیزرها بویژه در لیزرهای نیمه هادی پرتوان بسیار مهم و ضروری است. برخی از عیوب ساختاری موجود در لیزر در اثر دما و تنشهای حراتی - مکانیکی تشدید می شوند. از طرف دیگر بدلیل وابستگی مشخصه های عملکردی لیزر به دما و همچنین افزایش طول عمر و اعتماد پذیری لیزر، یک سیستم انتقال حرارت کارآمد مورد نیاز است[۱]. معمولا برای لیزرها با چگالی حرارتی بالا، از چاهک گرمایی فعال با مجموعه ای از کانالها و سیال آب استفاده می شود. برای بهبود روش قبلی، استفاده از چاهک گرمایی با یک ساختار متخلخل غیرمنظم یک روش جدید است. در چاهک متخلخل، افزایش ذاتی سطح به حجم و همچنین حضور یک ماده با ضریب هدایت حرارتی بالا، سبب افزایش انتقال حرارت نسبت به چاهک معمولی می شود. علاوه بر این سطح تماس سیال خنک کننده با سطح متخلخل افزایش یافته و حرکت مارپیچی سیال در درون ساختار متخلخل سبب افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی می شود. از انواع پرکاربرد ساختارهای متخلخل، فوم های فلزی هستند. فوم های فلزی بدلیل ویژگیهای خاص مانند، نسبت سطح به حجم بالا، سبکی، مقاومت مکانیکی و حرارتی بالا می توانند به عنوان یک خنک کننده موثر در لیزرها استفاده شوند[۲]. از طرف دیگر، آب سیال مرسوم در چاهک های گرمایی است که بدلیل ضریب هدایت حرارتی پایین، توان حرارتی آن محدود است. افزودن نانو ذرات جامد با ضریب هدایت حرارتی بالا، به آب، یکی از روشهای موثر برای بهبود خواص حرارتی آب است. این سیال جدید اصطلاحاً نانو سیال نامیده می شود. نانو سیال سوسپانسیونی پایدار از نانو ذرات جامد مانند فلزات و یا سرامیک های اکسیدی به همراه سیالاتی مانند آب است که سبب افزایش قابل توجه خواص حرارتی سیال می شود[۳]. خنک کاری لیزر نیمه هادی با کمک یک چاهک گرمایی متخلخل و همچنین خنک کننده نانو سیال کمتر مورد توجه قرار گرفته است[۴]. در این مقاله خنک کاری لیزر نیمه هادی پیوسته با توان نوری ۴۰ وات با استفاده از چاهک گرمایی متخلخل فلزی از جنس مس و نانو سیال آب - اکسید آلومینیوم بررسی می شود.

۲- مدل هندسی

شمای هندسی لیزر نیمه هادی در مدل CS در شکل ۱ نشان داده شده است. این مدل از یک بار لیزر نیمه هادی با ساختار چاه کوانتومی و مد کاری پیوسته تشکیل شده است. بار لیزر دارای ۵۰ عدد گسیل کننده نور است. عرض هر گسیل کننده ۱۰۰ میکرون و ضریب پرشدگی آن ٪۵۴ است. ابعاد کلی بار لیزر ۱/۵×۱/۲×۱۰ میلیمتر است.

شکل ۲- الف چاهک گرمایی متخلخل را نشان می دهد. این سیستم شامل چاهک گرمایی، محیط سیال و محیط متخلخل است. پکیج لیزر بر سطح صیقلی چاهک گرمایی مسی جاگذاری می شود. گرمای تولیدی در لیزر به ترتیب به پخش کننده حرارت و چاهک گرمایی منتقل می شود. با ترکیب انتقال حرارت هدایتی و جابجایی، گرما از چاهک گرمایی به فضای فوم (شکل ۲- ب) منتقل می شود. در انتها گرما توسط نانو سیال دریافت شده و با افزایش دمای آن از سیستم خارج می شود.



شکل ۱: شمای هندسی لیزر مونتاژ شده مدل CS

۳- مدل ریاضی

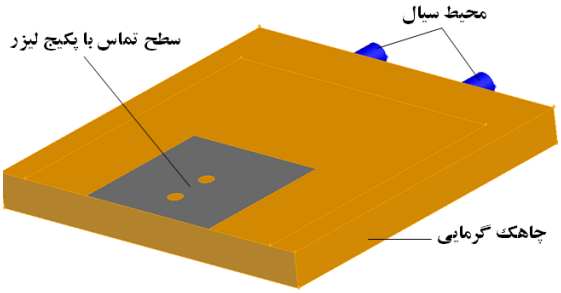
۳-۱- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر فرایند جریان سیال و انتقال حرارت در مدل ریاضی بر اساس معادلات بقاء جرم، مومنتوم، انرژی و انتقال حرارت در هر ۳ محیط جامد، سیال و متخلخل استخراج می شود. معادلات (۱-۲) بخشی از معادلات حاکم بر مسئله هستند[۵].

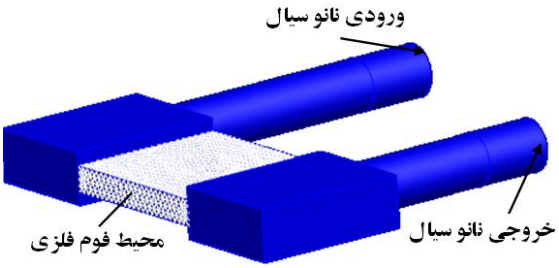
در محیط جامد معادله انرژی برابراست با:

$$\rho_s c_{p,s} \frac{\partial T}{\partial t} = k_s \nabla^2 T + q''' \qquad (۱)$$

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-14]



(الف)



(ب)

شکل ۲: الف- شمای هندسی سیستم چاهک گرمایی متخلخل،
ب- شمای هندسی محیط نانو سیال و محیط فوم فلزی

در معادله (۱)، q''' گرمای تولیدی بر واحد حجم، ρ چگالی، C_p ظرفیت حرارتی، T دما، t زمان، k ضریب هدایت حرارتی و زیرنویس s بیانگر محیط جامد است.

در محیط متخلخل معادله انرژی برابر است با:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varphi\rho_{nf}T_{nf}+(1-\varphi)\rho_s T_s)+\nabla.(\vec{v}(\rho_{nf}T_{nf}+p))=k_{eff}\nabla^2 T \qquad (۲)$$

در معادله (۲)، φ درجه تخلخل فوم فلزی، p فشار سیال و k_{eff} ضریب هدایت موثر محیط متخلخل و زیرنویس nf بیانگر نانوسیال است.

۳-۲- خواص ترمو فیزیکی

در این مقاله از نانو سیال آب- اکسید آلومینیوم (Al_2O_3/Water) به عنوان سیال خنک کننده استفاده شده است. چگالی و ظرفیت حرارتی نانو سیال با استفاده از قوانین مخلوط تعیین می شود[۶]. لزجت نانوسیال برابر است با[۷]:

$$\mu_{nf}=\mu_f(1+39.11\phi+533.9\phi^2) \qquad (۳)$$

در معادله فوق، ϕ کسر حجمی نانو ذرات و زیر نویس f بیانگر محیط سیال است. ضریب هدایت حرارتی نانو سیال Al_2O_3/Water از معادله (۴) تعیین می شود [۷]:

$$k_{nf}=k_f(1+7.47\phi) \qquad (۴)$$

خواص ترموفیزیکی سایر مواد بکار رفته در مدل ریاضی ثابت فرض می شود.

۳-۳- روش حل

مش بندی مدل هندسی با استفاده از نرم افزار گمبیت و با مش متوسط ۱۹۲۰۰۰ گره و نوع مش ترکیبی چهار وجهی انجام شده است. معادلات حاکم بر مسئله، دسته ای از معادلات جبری و دیفرانسیلی هستند که با حل آنها با استفاده از روش حجم محدود و با کمک نرم افزار محاسباتی فلوئنت در شرایط دائم، فرایند خنک کاری لیزر نیمه هادی پیوسته با کمک چاهک گرمایی متخلخل و نانو سیال تحلیل می شود.

۳-۴- صحت حل عددی

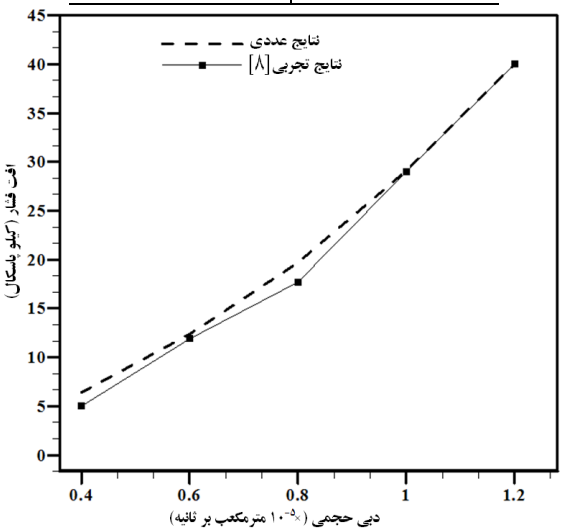
صحت شبیه سازی، با مقایسه نتایج عددی افت فشار در چاهک (اختلاف فشار ورودی و خروجی) در مقایسه با نتایج تجربی مرجع [۸] انجام شده است. افزایش دبی حجمی، سبب افزایش سرعت سیال و اصطکاک جریان سیال و در نتیجه افزایش افت فشار می شود. شکل ۳، انطباق خوبی میان نتایج عددی با مرجع نشان می دهد.

۴- نتایج

شرایط اولیه سیستم در جدول ۱ ارائه شده است.

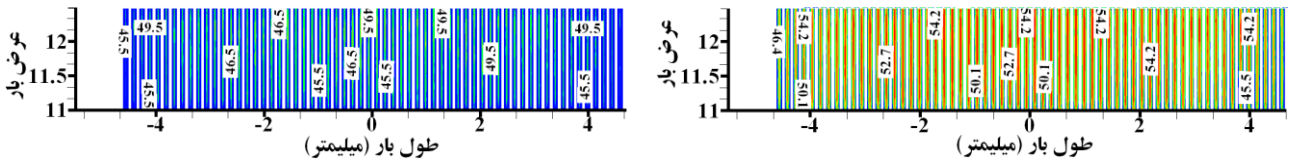
جدول ۱: شرایط اولیه سیستم برای حل عددی

پارامتر	مقدار
دمای آب ورودی	۲۰ (سانتیگراد)
سرعت آب ورودی	۱/۲۵ (متر بر ثانیه)
تلفات حرارتی بار لیزر	۴۰ (وات)
درجه تخلخل	۷۰ ٪
ابعاد فوم فلزی مسی	۱، ۱/۵، ۲ (میلیمتر)
کسر حجمی نانو سیال	۸ ٪



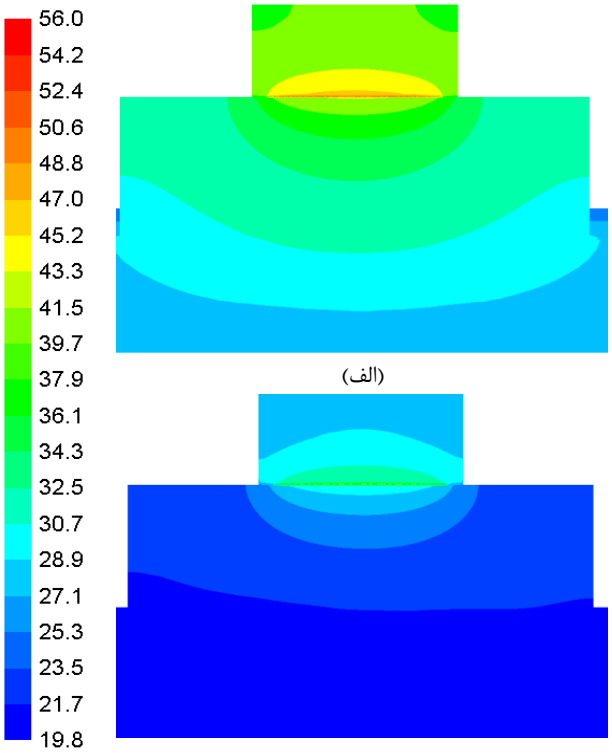
شکل ۳: مقایسه نتایج عددی افت فشار با نتایج تجربی مرجع[۸]

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-14]



شکل ۴: تغییرات دمای گسیل دهنده های نور با سیستم الف) چاهک گرمایی معمولی و خنک کننده آب، ب) چاهک متخلخل و نانو سیال

در شکل ۴ تغییرات دمای گسیل دهنده های نور در راستای طول بار و عرض آن (طول کاواک) در چاهک گرمایی متخلخل و معمولی نشان داده شده است. دمای بار لیزر در چاهک گرمایی متخلخل نسبت به چاهک معمولی و سیال آب کاهش می یابد. افزایش ضریب انتقال حرارت بدلیل حرکت مارپیچ سیال در ساختار فوم و همچنین بیشتر بودن ضریب انتقال حرارت هدایتی نانو سیال نسبت به سیال آب از دلایل کاهش دما است. حداکثر دمای بار لیزر در چاهک معمولی ۵۴٫۲ سانتیگراد و در چاهک متخلخل ۴۹٫۵ سانتیگراد است. بنابراین استفاده از چاهک گرمایی متخلخل نسبت به چاهک معمولی، حداکثر دمای بار لیزر را در حدود ۹٪ کاهش می دهد. این کاهش دما، سبب بهبود مشخصه های عملکردی لیزر می شود. در شکل ۵ توزیع دما در چاهک



شکل ۵: توزیع دما در پکیج لیزر نیمه هادی و بخشی از چاهک گرمایی الف) چاهک معمولی و خنک کننده آب، ب) چاهک متخلخل و نانو سیال

گرمایی متخلخل در مقایسه با چاهک گرمایی معمولی با کمک نرم افزار فلوئنت نشان داده شده است. توزیع حرارت در شکل ۵- ب یکنواخت تر از توزیع حرارت در شکل ۵- الف است. بنابراین استفاده از چاهک متخلخل و نانو سیال سبب کاهش گردیان دما در ساختار لیزر می شود. بنابراین تنشهای حرارتی – مکانیکی قطعه کاهش یافته و طول عمر مکانیکی قطعه افزایش می یابد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله مدل سازی انتقال حرارت در لیزر نیمه هادی پیوسته با توان نوری ۴۰ وات با استفاده از چاهک گرمایی متخلخل فلزی و نانو سیال آب - اکسید آلومینیوم انجام شد. نتایج نشان داد چاهک گرمایی متخلخل و نانو سیال Al_2O_3/Water نسبت به چاهک معمولی و سیال آب، حداکثر دمای بار لیزر را ۹٪ کاهش می دهد. این کاهش سبب بهبود مشخصه های خروجی لیزر می شود. همچنین توزیع دما در لیزر با چاهک گرمایی متخلخل یکنواخت تر از چاهک معمولی و خنک کننده آب است.

مراجع

[1] X. Liu, M. H. Hu, Co authors, "*Thermal Management Strategies for High Power Semiconductor Pump Lasers*", Inter Society Conference on Thermal Phenomena, 0-78038357-5/04 IEEE 49346, pp. 2079-2084, 2004.

[2] V. V. Calmidi, "Forced convection in high porosity metal foams", ASME Journal of Heat Transfer, 122, pp. 557-65, 2000.

[3] Choi, D. A. singer, H. P. Wang, "*Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, in developments and applications of non- Newtonian Flows*", FED 231, ASME, New York, pp. 99–105, 1995.

[4] P. Pipe, R. J. Ram, "*Comprehensive heat exchange model for a semiconductor laser diode*", IEEE, Photonics Technology Letters, 15, vol. 2, pp. 740–741, 2003.

[5] K. Vafai, "Handbook of porous media", Taylor & Francis group, CRC press, Chapter.2, 2005.

[6] P. K. Namburu, D. K. Das, K. M. Tangutari, R. S. Vajjha, "*Numerical study of turbulent flow and heat transfer characteristics of nanofluids considering variable properties*", International Journal of Thermal Sciences, 48, p.290–3022009.

[7] B.C. Pak, Y.I. Cho, *"Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, Experimental"*, Heat Transfer 11, 151–170, 1998

[8] H. Y. Zhang D. Pinjala, " *Fluid Flow and Heat Transfer in Liquid Cooled Foam Heat Sinks for Electronic Packages*", Vol.28, NO.2, pp. 272-280, 2005.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-14]