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

تعیین نمایه دمایی پلاسما به روش توزیع بولتزمن در لیزر بخار مس با آینه‌های دی الکتریک و لایه نشانی شده با مس

میترا نم نبات [۱]، علیرضا مرادی [۲،۱]، سعید بهروزی نیا [۳]، مریم قشلاقی [۳]، سید حسن نبوی [۴] و کامران خراسانی [۳]
[۱] گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان
[۲] پژوهشکده اپتیک و فوتونیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی در علوم پایه زنجان، زنجان
[۳] پژوهشکده لیزر و اپتیک، پژوهشگاه علوم وفنون هسته ای، تهران
[۴] دانشکده فیزیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

چکیده – استفاده از آینه های فلزی در لیزر بخار مس و جایگزینی آن با آینه های دی الکتریک با توجه به امکان خنک شوندگی سریعتر آنها بسیار مورد توجه است. در این مقاله نتایج جایگزینی آینه های فلزی ساخته شده با آینه اصلی لیزر بخار مس بررسی شده است، و نمایه دمایی پلاسمای مس تشکیل شده در تیوب لیزر بخار مس با طول موج خروجی لیزر۵۷۸/۲ و۵۱۰/۶ نانومتر و با پهنای پالس ۳۰-۲۵ نانو ثانیه، با استفاده از گاز کمکی هوا در فشار 10^{-2} تور با استفاده از روش توزیع بولتزمن برای آینه لایه‌نشانی شده با مس و آینه اصلی لیزر بخار مس در شرایط تعادل ترمودینامیکی موضعی و توان ورودی یکسان در فرکانس‌های متفاوت اندازه‌گیری شده و نتایج بدست آمده تحلیل گردیده‌اند.

کلید واژه- آینه های لیزری، شرایط تعادل ترمودینامیکی، لیزر بخار مس، نمایه دمایی.

Determination of plasma temperature of copper vapor laser (CVL) by the use of Boltzmann plot method for CVL's mirror and copper coated mirror

Mitra Namnabat [1], Ali-Reza Moradi[1,2], Saeed Behroozinia[3], Maryam Gheshlaghi [3], Seyed Hasan Nabavi[4], Kamran Khorasani[3]
[1]Physics Department, University of Zanjan, Zanjan
[2]Optics Research Center, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan
[3]Laser and Optics Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran
[4]Physics Department, University of Tarbiat Modares, Tehran

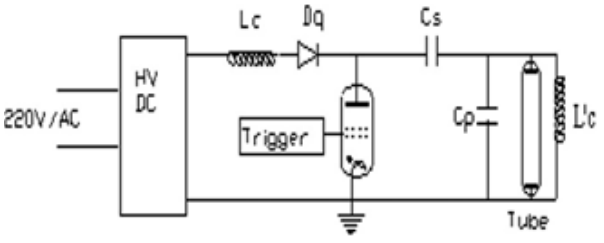
Abstract- In this paper, we determinate the temperature profile of a copper vapor laser (CVL) when its dielectric mirrors are replaced with metallic mirrors. The plasma is produced in CVL tube of 510.6 nm and 578.2 nm wavelengths, and with pulse width of 25-30 ns at about 10^{-2} Torr pressure. The experiment condition was preserved in local thermodynamic equilibrium. The temperature is obtained from the Boltzmann plot method for each cavity mirror. We examined the method for two different cases, copper coated on BK7 substrate, and the laser's fabric mirrors.

Keywords: Copper vapor laser, Laser's mirror, Local thermodynamic equilibrium, Temperature profile.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

مقدمه

لیزر بخار مس (CVL) مورد استفاده شامل چهار قسمت مهم محفظه لیزر، سیستم خلاء ، تشدیدگر نوری و منبع تغذیه می باشد. محفظه لیزر بخار مس دارای یک تیوب مرکزی است که تخلیه الکتریکی در آن صورت می‌گیرد. فلز مس داخل تیوب در دمای بالا تبخیر شده و در سرتاسر تیوب پخش می‌گردد. بخار مس به دلیل وجود گرادیان دما در راستای طولی مایل به انتشار به دو انتهای تیوب می‌باشد. لذا از هوا به عنوان گاز کمکی استفاده می‌شود تا براساس پدیده‌های برخوردی از نفوذ بخار مس به دو انتهای سرد تیوب جلوگیری کند و به این ترتیب میزان اتلاف بخار مس کاهش یافته و از آلودگی پنجره‌ها جلوگیری شود، قطر و طول تیوب استفاده شده در این سیستم به ترتیب ۱۶و ۶۰۰ میلی‌متر می‌باشد. لیزرهای بخار مس در مد پالسی و با فرکانس بالا کار می‌کنند. در این لیزرها معمولا از تخلیه الکتریکی به روش کاتد سرد استفاده می‌شود که توسط الکترون‌های شتاب گرفته در میدان الکتریکی قوی صورت می‌پذیرد [۱]. سیستم خلاء از مهم‌ترین فناوری‌های به کار رفته در لیزر بخار مس است. سیستم خلاء از یک پمپ روتاری تشکیل شده است به طوری که فشار تا حد ۵×۱۰^{-۲}Torr پایین می‌آید [۱]. بهره‌ی اپتیکی بالا (۸۰٪) و عدد فرنل بزرگ، $N=a^{۲}/۲\lambda D$ (a: شعاع آینه، λ: طول موج نور، D: فاصله‌ی بین آینه‌هاست) در لیزرهای بخار مس این امکان را به وجود می‌آورد که بتوان در آن از کاواک اپتیکی ساده متشکل از دو آینه تخت استفاده کرد. آینه عقب با درصد انعکاس حدود ۹۸٪ جهت افزایش توان لیزر و موازی کردن مسیر پرتو ها استفاده می شود. آینه جلو نیز از جنس کوارتز و با درصد انعکاس حدود ۴٪ می باشد. آینه اصلی لیزر بخار مس از چندین لایه دی الکتریک بر روی زیر لایه BK7 تشکیل شده است که در طول موج های سبز۵۱۰ نانومتر و زرد ۵۷۸ نانومتر دارای بیشترین انعکاس می باشد [۱و۲]. منبع تغذیه لیزر بخار مس مورد استفاده به صورت پالسی و در فرکانس کاری ۵ تا ۳۵ کیلوهرتز عمل می‌کند. منبع تغذیه باید بتواند جریان AC برق شهر را به یک جریان DC با ولتاژ و جریان مورد نظر تبدیل کند. مدار تخلیه الکتریکی در شکل (۱) نشان داده شده است. تایروترون روسی در مدار از نوع TGI1-1000/25 بوده و سایر اجزای مدار شامل خازن‌های L۱و L۲و سلف‌های Cp و Cs به ترتیب برابر با ۱۰۰mH، ۱۵۰μH، ۰/۶۸nF و ۱/۶۵nF انتخاب شده‌اند.



شکل۱:مدارتحریک لیزر بخار مس[۱]

در این مقاله آینه‌های لیزر را با آینه‌هایی از جنس فلزی و با پوشش محافظ از جنس MgF2 که به روش Physical Vapor Deposition (PVD) بر روی زیر لایه BK7 و زیر لایه‌ی مسی لایه نشانی شده است، جایگزین کرده، و توان خروجی لیزر در فرکانس های مختلف با هر یک از آینه‌ها اندازه‌گیری شد. سپس نمایه دمایی پلاسمای مس تشکیل شده در داخل تیوب لیزر بخار مس را با استفاده از روش توزیع بولتزمن با آینه لایه نشانی شده از جنس مس با زیر لایه‌ی BK7 و آینه اصلی لیزر بخار مس مورد بررسی قرار گرفت.

ساخت آینه

ساخت نمونه به روش لایه نشانی PVD و در خلاء توسط دستگاه لایه نشانی بالزر ۷۶۰ انجام شد. دراین لایه نشانی ترتیب و ضخامت لایه‌ها به شرح زیر است:

زیرلایه–Cr(۱۵۰nm)-Cu(۳۰۰nm)-MgF_2(۱۰۰nm)

لایه نشانی در خلاء ۵×۱۰^{-۶} Torr انجام شد. و هر یک از مواد فوق در بوته‌های جداگانه توسط باریکه تفنگ الکترونی تبخیر و روی زیرلایه‌های از جنس مس و BK7 انباشته گردید. آینه اصلی لیزر بخار مس در طول موج های مربوط به لیزر بخار مس بیشترین بازتابندگی را دارد. آینه‌های مسی با زیر لایه‌ی BK7 نسبت به آینه های مسی با زیر لایه‌ی مس بازتابندگی بهتری در طول موج‌های لیزر بخار مس دارد.

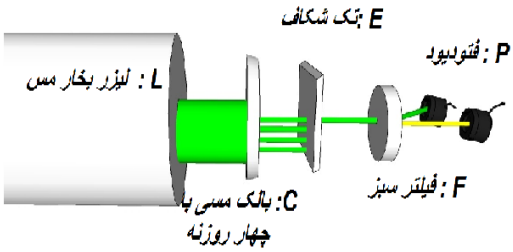
روش انجام آزمایش

برای انجام آزمایش و تعیین نمایه دمایی لیزر بخار مس با آینه اصلی و آینه لایه نشانی شده با مس، پس از تنظیمات و موازی سازی لیزر، خلاء را در فشار Torr $۱۰^{-۲}$ تنظیم می‌کنیم. پس از به لیز رسیدن لیزر و ثابت

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

ماندن توان خروجی، فرکانس را در بازه های بالاتر و پایین‌تر از فرکانس اولیه به طوری تغییر می‌دهیم که توان ورودی در محدوده‌ی ۱۳۰۰W قرار گیرد.

برای اندازه‌گیری دمای نقاط مختلف پلاسمای مس تشکیل شده در تیوب لیزر از چهار روزنه‌ی کوچک (به شعاع ۱mmو به فاصله ۲mm از مرکز یکدیگر) که در یک جرم مسی (C) ایجاد شده استفاده می‌کنیم و آن را به صورت موازی در برابر لیزر (L) قرار می‌دهیم طوری که در روزنه‌ی مرکزی در مرکز باریکه لیزری قرار گیرد. سپس با قرار دادن تک شکاف E در برابر هر یک از چهار باریکه خروجی از روزنه‌ها یکی از آن‌ها انتخاب می‌شود . باریکه



شکل ۲: چیدمان آزمایشگاهی برای اندازه گیری دمای پلاسمای مس داخل تیوب لیزر

انتخابی پس از برخورد با فیلتر سبز (F) تحت زاویه ی ۴۵ درجه به نورهای سبز و زرد شکافته می‌شود. در نهایت شدت خروجی هر یک از پرتو های سبز و زرد توسط فتودیود (P) و اسیلوسکوپ اندازه‌گیری می‌شود. این آزمایش با چند فرکانس مختلف و تحت شرایط توان ورودی تکرار می‌یابد. دمای پلاسما در داخل تیوب لیزر بخار مس و در شرایط تعادل ترمودینامیکی موضعی (LTE) و با استفاده از معادله:

$$\frac{I_1}{I_2}=(\frac{l_{nm,z}}{l_{ki,z}})(\frac{g_{k,z}}{g_{n,z}})(\frac{A_{ki,z}}{A_{nm,z}})\exp(-\frac{E_{k,z}-E_{n,z}}{K_BT})$$

می توان نسبت جمعیت اتم های مس برانگیخته (n) را به جمعیت اتم ها در تراز پایه (n_0) به دست آورد[۴].بدست می‌آید [۵و۴] . در رابطه‌ی بالا I_1 شدت خطی برای گذار $k \to i$ و I_2 شدت خطی در گذار $n \to m$ است. λ طول موج گذار خطی و $g_{k,z}$ و $E_{K,Z}$ به ترتیب انرژی و تبهگنی تراز انرژی بالا و $A_{k,z}$ احتمال گذار هستند. K_B و T به ترتیب ثابت بولتزمن و دمای موضعی داخل تیوب می باشند. همه مقادیر به صورت ثابت برای لیزر بخار مس در دسترس می باشند و بنابراین مقدار T از رابطه‌ی بالا قابل اندازه‌گیری است. همچنین با استفاده از توزیع بولتزمن

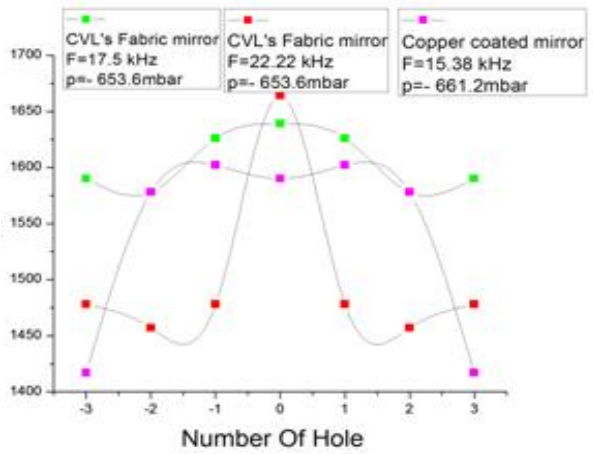
$$n = n_0 \exp(-\frac{E_K}{K_BT})$$

طرح واره چیدمان بکار رفته برای این اندازه گیری در شکل ۲ نشان داده شده است. در شکل، L لیزر بخار مس، C بالک مسی با چهار حفره، E تک شکاف، F فیلتر سبز و P فتو دیود، نمایش داده شده اند.

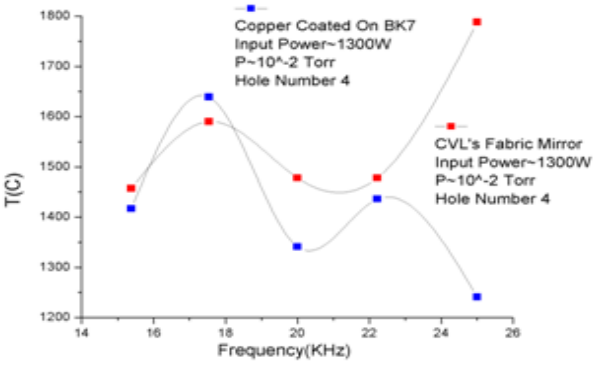
تحلیل نتایج تجربی

نمایه دمایی لیزر بخار مس برای هر یک از آینه ها، آینه اصلی لیزر و آینه لایه نشانی شده با مس در سه فرکانس مختلف در شکل ۳ آورده شده است. همانطور که در نمودار مشخص است دمای اندازه گیری شده با آینه‌ی مسی در روزنه‌ی مرکزی دارای یک فرورفتگی می باشد. در حالی که در اندازه گیری با آینه اصلی حفره‌ی مرکزی دارای بیشینه مقدار دما می باشد. همچنین دمای آن در دیواره ها کمتر است که علت آن را می توان در کوچکتر بودن قطر آینه مسی نسبت به آینه اصلی و پوشش دهی کمتر آن در دهانه‌ی تیوب لیزر یافت. در حالی که در آزمایش با آینه اصلی دمای دیواره به دلیل برخورد اتم ها با جداره و بدنه‌ی لیزر نسبت به دمای مجاور بیشتر است. شکل ۴ تغییرات فرکانس بر حسب دما برای دیواره نشان داده شده است. همانطور که در نمودار مشخص است دما برای هر دو آینه در فرکانس‌های پایین مطابقت خوبی دارد. شکل ۵ میزان تغییرات دما در حفره‌ی مرکزی را بر حسب توان خروجی با آینه مسی نشان می‌دهد همانطور که در نمودار نیز مشخص است توان خروجی طول موج سبز به زرد تقریبا نسبت ۳ به ۲ دارند. شکل ۶ تغییرات فرکانس با نسبت n/n_0 برای دو آینه مختلف در طول موج سبز نشان می دهد. در شکل مشخص است که فرکانس با نسبت n/n_0 رابطه‌ی معکوس دارد و با کاهش فرکانس نسبت اتم های برانگیخته به اتم های حالت پایه در طول موج سبز افزایش‌می‌یابد. در این پروژه نتایج تجربی تاثیر قرار دادن آینه لایه نشانی شده با مس در دمای اندازه‌گیری شده پلاسمای لیزر بخار مس ارایه و تحلیل گردید. اندازه‌گیری دما به روش توزیع بولتزمن تطبیق خوبی با اندازه‌گیری به روش‌های عددی و

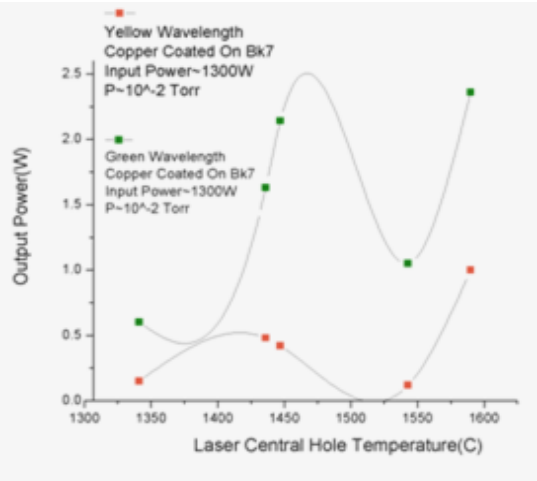
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]



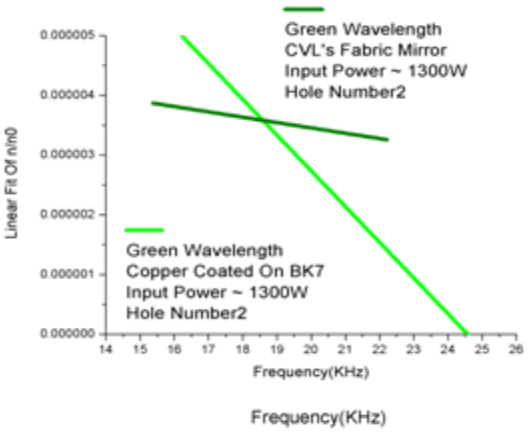
شکل۳: قرمز: نمایه دمایی لیزر بخار مس با آینه اصلی لیزر در فرکانس kHz ۲۲.۲ در فشار 10^{-2}Torr ؛ سبز: فرکانس kHz ۱۷.۵ در فشار 10^{-2}Torr؛ بنفش: نمایه دمایی لیزر با آینه مسی در فرکانس ۱۵.۳۸kHz در فشار 10^{-2}Torr.



شکل۴: قرمز: دمای دیواره لیزر بخار مس با آینه اصلی لیزر در فشار 10^{-2}Torr و با فرکانس‌های مختلف. آبی: دمای لیزر بخار مس با آینه مسی و زیر لایه BK7 در فشار 10^{-2}Torr در همان فرکانس‌ها.



شکل۵: قرمز: توان خروجی طول موج زرد لیزر بخار مس در حفره مرکزی با آینه مسی و زیر لایه BK7 در فشار 10^{-2}Torr. سبز: توان خروجی طول موج سبز لیزر بخار مس با آینه مسی در حفره مرکزی در فشار 10^{-2}Torr.



شکل ۶: نمودار فرکانس بر حسب n/n0 برای طول موج سبز روزنه دوم در فشار 10^{-2}Torr و توان ورودی حدود ۱۳۰۰W.

محاسباتی دارد. و نیز با توجه به اندازه گیری‌های انجام شده در شرایط مشابه برای هر یک از آینه ها خنک شوندگی سریعتر آینه‌های فلزی می‌توان از فلزاتی که در ناحیه ی طول موجی لیزر بخار مس بازتابندگی بیشتری دارند، به جای آینه لیزری استفاده کرد و توان قابل مقایسه‌ایی نیز داشت.

نتیجه‌گیری

در این مقاله نتایج تجربی تاثیر قرار دادن آینه لایه نشانی شده با مس در دمای اندازه‌گیری شده پلاسمای لیزر بخار مس ارایه و تحلیل گردید. اندازه‌گیری دما به روش توزیع بولتزمن تطبیق خوبی با اندازه‌گیری به روش‌های عددی و تحلیلی دارد. با توجه به نتایج بدست آمده در شرایط مشابه برای هر یک از آینه ها خنک شوندگی سریعتر آینه‌های فلزی می‌توان از فلزاتی که در ناحیه ی طول موجی لیزر بخار مس بازتابندگی بیشتری دارند، به جای آینه لیزری استفاده کرد و توان قابل مقایسه‌ایی نیز داشت.

مراجع

[1] C. Elittle, *Metal vapor laser*, John Wiley &sons, 1999
[2] William T.Silfvast, Laser Fundamentals, Cambridge University Press(2004)
multilayered structures, Plenum press,1988.
[4] vivek Bakshi and W.C. Nunnally " Measurement of temperatures in Optically Thick Railgun Plasma Armatures" IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL 31 .NO.1 January 1995.
[5] V K UNIKRISHNAN et " Measurments of plasma temperature and electron density in laser induced Copper plasma by time- resolved spectroscopy of neutral atom and ion emissions" PRAMANA journal of physics Vol. 74, no.6 June 2010 pp.983-993

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]