



اندازه‌گیری و مقایسه‌ی پارامترهای تقویت لیزر بخار مس برمید با گازهای کمکی متفاوت

سعید بهروزی نیا*^۱، کامران خراسانی^۱، اردوان کوهی^۲، محمود فتحعلیان^۱

۱. پژوهشکده‌ی فوتونیک و فن‌آوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳-۱۴۳۹۹۵۱۱، تهران - ایران
۲. پژوهشکده‌ی پلاسما و گداحت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۵۱۱۱۳-۱۴۳۹۹، تهران - ایران

چکیده: یک جفت لیزر بخار نمک مس از نوع مس برمید به صورت آرایش نوسان‌گر- تقویت کننده ترتیب داده شد. پارامترهای تقویت لیزر شامل بهره‌ی علامت کوچک و شدت اشباع با گازهای کمکی نئون و هلیوم به طور جداگانه اندازه‌گیری و مورد مقایسه قرار گرفتند، به طوری که مقادیر 0.078 cm^{-1} و 0.07 cm^{-1} برای بهره‌ی علامت کوچک و هم‌چنین مقادیرهای $34 \mu\text{J cm}^{-2}$ و $47 \mu\text{J cm}^{-2}$ برای شدت اشباع به ترتیب برای گازهای کمکی نئون و هلیوم به دست آمده‌اند. هم‌چنین از اندازه‌گیری توان خروجی سیستم با این گازها مقادیرهای ۸ W و ۱۰ W به ترتیب با گازهای کمکی نئون و هلیوم به دست آمد. مشخص شد که استفاده از گاز کمکی هلیوم نسبت به گاز کمکی نئون در لیزر مس برمید بهتر است و از بازده و توان خروجی بیش‌تری برخوردار است. هم‌چنین شرایط عملکرد بهینه‌ی سیستم تعیین شد. نتایج به دست آمده با عملکرد سیستم‌های نوسان‌گر- تقویت کننده‌ی لیزر بخار مس خالص و بخار طلا نیز مقایسه گردید. به هر حال نوع گاز کمکی می‌تواند در پارامترهای میکروسکوپی لیزر و در نهایت بر روی عملکرد و توان خروجی لیزر اثر گذار باشد.

کلیدواژه‌ها: لیزر بخار مس برمید، نوسان‌گر- تقویت کننده، بهره‌ی علامت کوچک، شدت اشباع، گاز کمکی

Measurement and Comparison of Amplifying Parameters of Copper Bromide Laser with Different Buffer Gases

S. Behrouzinia*¹, K. Khorasani¹, A. Kouhi², M. Fathalian¹

1. Photonics and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 14399511-13, Tehran-Iran
2. Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 14399-51113, Tehran-Iran

Abstract: A pair of copper bromide lasers in an oscillator-amplifier configuration was operated to measuring the small-signal gain and saturation intensity, as amplifying parameters of the laser. The values of 0.078 cm^{-1} and 0.07 cm^{-1} were measured for small signal gain with buffer gases neon and helium, respectively, thus, the values of 34 and $47 \mu\text{J/cm}^2$ were measured for saturation intensity with neon and helium buffer gases, respectively. The output power of system was measured; the values of 8 and 10 W were obtained with buffer gases of neon and helium, respectively. It was shown that, the use of helium has more efficient and output power than that of neon in copper bromide lasers. Hence, the optimum conditions have been obtained. The results were compared to that of copper- and gold vapor lasers. The type of buffer gas used can affect the microscopic parameters, which in turn affects the operation and output power of the laser.

Keywords: Copper Bromide Laser, Oscillator-Amplifier, Small Signal Gain, Saturation Intensity, Buffer Gas



۱. مقدمه

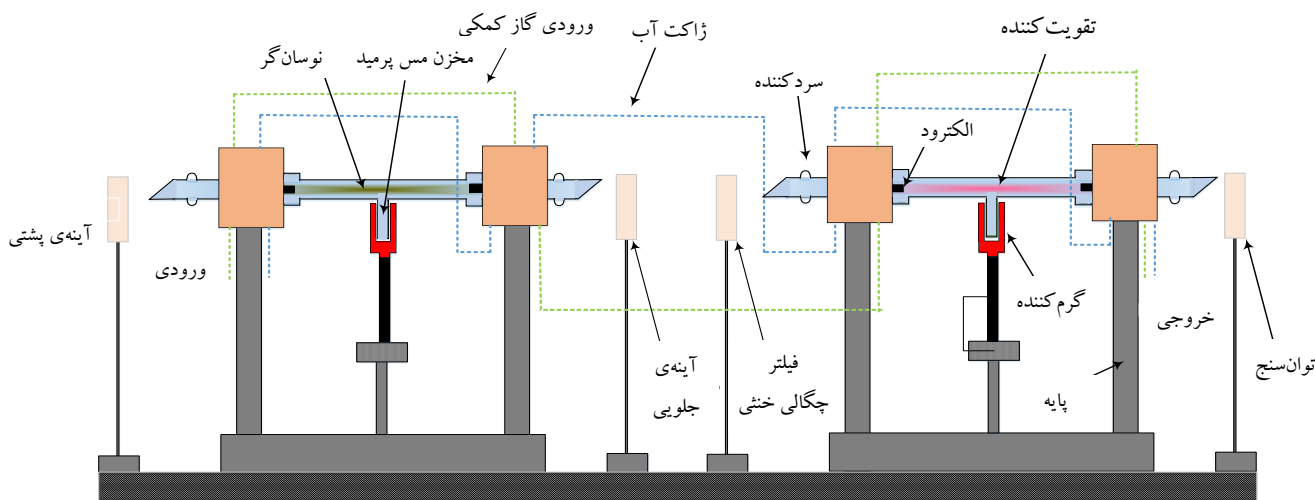
برمید نیز در خارج از کشور ساخته و راه‌اندازی شده است و در پردازش مواد و ریزپردازش با سرعت بالا و نیز در کاربردهای خاصی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۲-۱۵]. به هر حال اندازه‌گیری هم‌زمان این دو پارامتر تقویت و بستگی آن‌ها به نوع گاز کمکی تاکنون گزارش نشده است. هم‌چنین در کارهای قبلی، نشان داده شده است که نوع گاز کمکی و درصد مخلوطی از آن‌ها اثر قابل‌ملاحظه‌ای بر روی توان خروجی لیزر بخار مس دارد [۱۶-۱۸]. ضمناً اثر گازهای کمکی هلیم، نئون بر روی عملکرد لیزر بخار طلا بررسی و نشان داده شده است که گاز هلیم نسبت به نئون عملکرد بهتری را نشان می‌دهد، و این بر خلاف مورد لیزر بخار مس است که در آن گاز نئون نسبت به هلیم برتر است [۱۹]. در کار حاضر، از دو لیزر بخار مس برمید در آرایش نوسان‌گر- تقویت‌کننده استفاده شده است که ضمن اندازه‌گیری پارامترهای تقویت این نوع لیزر برای اولین بار در کشور، وابستگی آن‌ها به دو نوع گاز کمکی هلیم و نئون مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده، با مورد‌های لیزرهای بخار مس خالص و طلا نیز مقایسه شده است.

۲. ترتیب آزمایشی

از دو لوله‌ی یکسان از جنس کوارتز با قطر داخلی ۲۰ mm و طول ۲۸ cm به عنوان نوسان‌گر و ۴۸ cm به عنوان تقویت‌کننده در آرایش نوسان‌گر- تقویت‌کننده‌ی لیزر بخار مس برمید استفاده شده است (شکل ۱). هر یک از لوله‌ها دارای یک مخزن بدون هیچ دیافراگمی در وسط و حاوی پودر مس برمید با درجه‌ی خلوص بالا هستند و به طور مجزا به مدار راه‌انداز مشابهی متصل شده‌اند. الکترودهای لوله‌ها به شکل استوانه‌های توخالی و از جنس مس هستند که به وسیله‌ی آب خنک می‌شوند. با کنترل فشار بخار و اعمال توان الکتریکی ورودی به سیستم و نیز سیستم عایق‌بندی، می‌توان دمای داخل لوله را در حدود 500°C نگه‌داشت که برای عملکرد لیزر مناسب است.

لیزرهای بخار فلزی از جمله بخار مس و بخار طلا به دلیل عملکرد در نرخ‌های تکرار تپی بالا و دارا بودن توان خروجی بالا و کیفیت بالای پرتوی خروجی در شاخه‌هایی از علوم نظیر صنعت و پزشکی کاربردهای فراوانی پیدا کرده‌اند [۱]. یکی از عیب‌های این نوع لیزرها عملکرد در دماهای بسیار بالا در گستره‌ی دمایی ۱۵۰۰ تا ۱۸۰۰ درجه‌ی سلسیوس است [۲، ۳]، که این خود در ساخت و به کارگیری مواد سازنده‌ی لوله‌ی لیزر و ساختار عایق‌بندی آن‌ها با پیچیدگی‌های خاصی همراه است. برای کاهش دمای عملکرد لیزرهای بخار مس خالص، از ترکیب‌های نمکی مس نظیر مس کلرید، مس برمید و مس یدید استفاده شده است [۴-۶]. دمای عملکرد چنین لیزرهایی به فشار بخار ترکیب‌ها بستگی دارد که برای لیزر مس برمید حدود ۵۰۰ درجه‌ی سلسیوس است که به هر حال خیلی پایین‌تر از دمای عملکرد لیزر بخار مس خالص است که این خود یک مزیت به حساب می‌آید. لیزرهای بخار مس برمید همان طول موج‌های لیزر بخار مس خالص یعنی، دو طول موج 510.6 nm به رنگ سبز و 578.2 nm به رنگ زرد در ناحیه‌ی دیدگانی تولید می‌کنند. بنابراین لیزر بخار مس برمید می‌تواند همان کاربردهای لیزر بخار مس خالص در زمینه‌های مختلف علوم و فن‌آوری را داشته باشد. مزیت مهم‌تر لیزر مس برمید نسبت به مس خالص این است که پرتوی خروجی آن از کیفیت بالاتری برخوردار است که برای برخی از کاربردها مناسب‌تر است [۷، ۸]. هم‌چنین می‌توان به کاربردهایی نظیر سیستم‌های ریزپردازش و سیستم‌های نوری فعال اشاره نمود [۹].

از طرفی، دو پارامتر تقویت لیزر- یکی ضریب بهره‌ی علامت کوچک و دیگری شدت اشباع- از پارامترهای مهم لیزر هستند که در طراحی و عملکرد لیزر مورد استفاده قرار می‌گیرند. مؤلفین در کارهای قبلی‌شان این پارامترهای تقویت را برای لیزرهای بخار مس و طلا به طور جداگانه در غالب آرایش نوسان‌گر- تقویت‌کننده به دست آورده، وابستگی آن‌ها را به برخی از پارامترهای عملکرد لیزر نظیر فشار گاز کمکی و نرخ تکرار تپ مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۰، ۱۱]. سیستم نوسان‌گر- تقویت‌کننده‌ی لیزر مس



شکل ۱. ترتیب آزمایشی برای سیستم نوسان‌گر- تقویت کننده‌ی لیزر مس برمید.

در شکل ۳ تصویری از لیزر تک نوسان‌گر در وضعیت خاموش همراه با اجزای متعلقه نشان داده شده است.

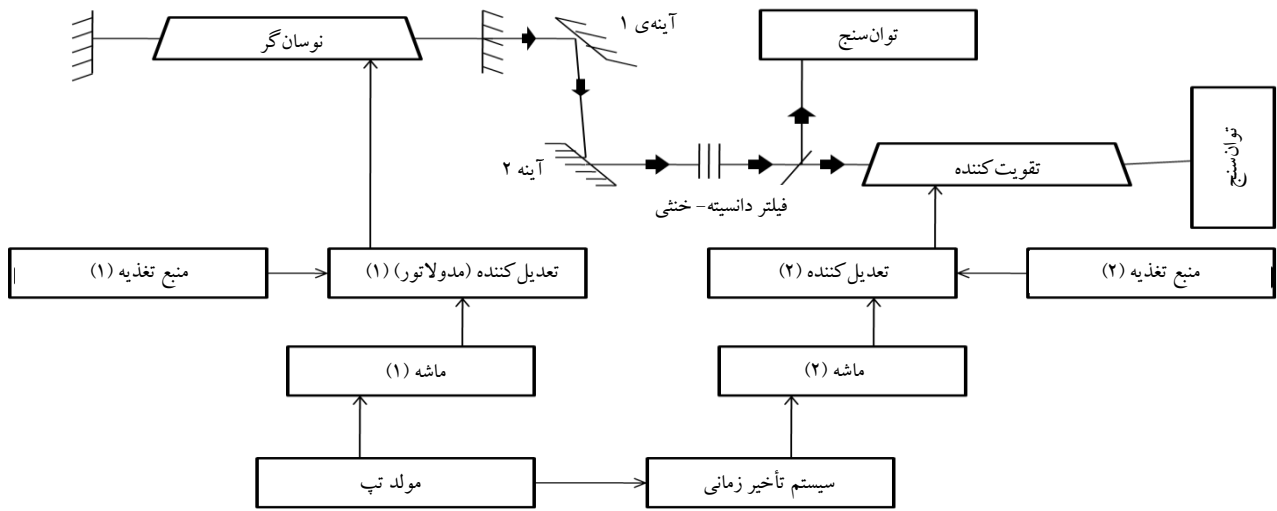
در شکل ۴ تصویری از چیدمان نوسان‌گر- تقویت کننده‌ی در حال کار نشان داده شده است که خروجی لیزر قابل مشاهده است.

۳. انجام آزمایش و تجزیه و تحلیل داده‌ها

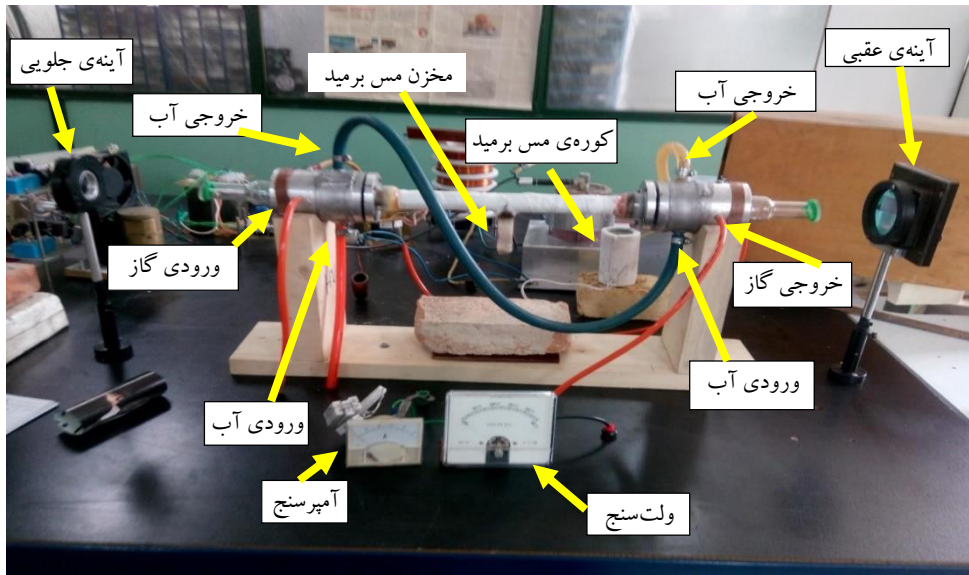
سیستم شکل ۲ با گازهای کمکی هلیوم و نئون به طور جداگانه راه‌اندازی شده و انرژی الکتریکی ورودی به نوسان‌گر و تقویت کننده به ترتیب در ۱/۲ و ۱/۸ kW ثابت نگه داشته شده‌اند. نرخ تکرار بسامد در ۲۰ kHz و نیز فشار گاز کمکی در مقدار بهینه‌ی خود ثابت نگه داشته است. در اندازه‌گیری توان خروجی سیستم مشخص شد که توان خروجی لیزر در نقش تقویت کننده به بیش از ۵۰٪ توان خروجی همان لیزر در نقش نوسان‌گر افزایش یافته است. چون در لیزر بخار مس برمید همانند لیزر بخار مس خالص، پهن‌شدگی ناشی از اثر داپلر از پهن‌شدگی برخوردی یا فشاری بیش‌تر است، از این‌رو محیط تقویت به صورت ناهمگن عمل کرده و برای محاسبه‌ی پارامترهای تقویت، بهره‌ی علامت کوچک g و شدت اشباع E_s از رابطه‌ی معروف هارگروف استفاده می‌شود [۱۱، ۱۹]

$$\text{Ln}G = g \cdot l \cdot (\Delta E / AE_s) \quad (1)$$

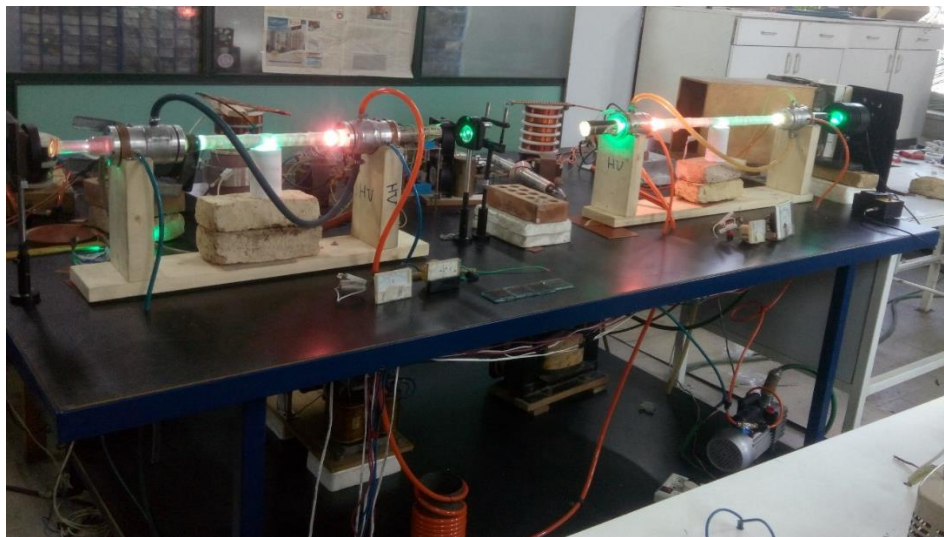
در شکل ۲ چیدمان نوسان‌گر- تقویت کننده‌ی لیزر مس برمید نشان داده شده است. پرتوی خروجی از کاواک نوسان‌گر مستقیماً وارد تقویت کننده می‌شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود هر یک از لیزرها با منبع تغذیه‌ی جداگانه راه‌اندازی شده و توسط یک سیستم هم‌زمان‌سازی، زمان ورود پرتو نوسان‌گر به درون تقویت کننده کنترل می‌شود که هم‌زمان با به حداکثر رسیدن جمعیت وارون لیزر تقویت کننده است. به دلیل تغییر این هم‌زمان‌سازی در اثر شوک‌های الکتریکی، تغییرات پارامترهای عملکرد لیزر نظیر دما، فشار و غیره و نیز ناخالصی‌های درون لوله و مقدار جیتر (پرش تپ به تپ) کلیدهای تایرترون، عمل هم‌زمان‌سازی را باید به طور دائم و دستی کنترل نمود. در این چیدمان به دلیل کوتاهی طول‌های لیزر و نزدیک بودن آن‌ها به هم، از صافی فضایی برای کاهش واگرایی استفاده نشده است. از یک سری صافی‌های چگالی خنثی بین لوله‌ها برای تغییر توان نوری ورودی به تقویت کننده استفاده می‌شود. به ازای هر صافی، توان‌های ورودی به تقویت کننده و خروجی آن به وسیله‌ی دو توان‌سنج از نوع PM500D به طور هم‌زمان اندازه‌گیری شده و از روی آن لگاریتم نسبت توان‌ها و هم‌چنین اختلاف آن‌ها محاسبه شده است. از یک شیر بسیار دقیق برای کنترل شارش گاز کمکی و یک فشارسنج برای اندازه‌گیری فشار استفاده شده است. درصد اتلاف انرژی ناشی از تقسیم‌کننده‌ی پرتو در اندازه‌گیری توان واقعی ورودی به تقویت کننده از طریق آزمایش منظور شده است.



شکل ۲. چیدمان سیستم نوسان گر- تقویت کننده‌ی لیزر مس- برمید.



شکل ۳. تصویری از لیزر تک نوسان گر در آزمایشگاه.



شکل ۴. تصویری از یک سیستم در حال کار در آزمایشگاه.



در طول انجام این آزمایش‌ها، دمای عملکرد بهینه‌ی 510°C ثابت نگه داشته شده است، بنابراین می‌توان از تغییرات پهنای خط صرف‌نظر نمود و این به معنی آن است که می‌توان سطح مقطع گسیل القایی (σ_{st}) را ثابت در نظر گرفت. بنابراین بهره‌ی علامت کوچک $g_o = \sigma_{st} \Delta N$ در این حالت فقط می‌تواند به جمعیت وارون (ΔN) وابسته باشد. بنابراین، با توجه به نزدیک بودن مقادیر g_o برای دو گاز کمکی می‌توان نتیجه گرفت که نوع گاز کمکی بر روی جمعیت وارون تأثیر چندانی ندارد. از طرفی، مقدارهای شدت اشباع با دو گاز کمکی تفاوت نسبتاً زیادی را از خود نشان می‌دهند، به طوری که شدت اشباع $E_s = h\nu / \sigma_{st} \tau_T$ در این حالت فقط می‌تواند به طول عمر گذار تراز بالایی لیزر (τ_T) وابسته باشد. در این رابطه $h\nu$ انرژی فوتون است. می‌توان این طور تفسیر نمود که چون گاز نئون نسبت به هلیوم سنگین‌تر و دارای جرم بیش‌تری است، از این رو استفاده از گاز سنگین‌تر باعث می‌شود در اثر فرایند برخورد، طول عمر تراز بالایی لیزر به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد که این خود باعث می‌شود شدت اشباع لیزر با گاز کمکی نئون کم‌تر از مقدار آن با گاز هلیوم شود. هم‌چنین می‌توان به سطح مقطع برخورد که تقریباً با سطح مقطع هندسی برابر است، اشاره نمود. با گاز کمکی نئون، اندازه‌ی سطح مقطع برخورد اتم‌های نئون (با شعاع اتمی بزرگ‌تر از هلیوم) با اتم‌های مس موجود در محیط فعال بالاتر از مقدار آن نسبت به گاز هلیوم بوده و این خود نیز باعث افت شدت اشباع می‌شود. حتی می‌توان مقدار جزئی افزایش بهره‌ی علامت کوچک با گاز نئون نسبت به گاز هلیوم را به تفاوت در سطح مقطع برخوردها نسبت داد.

در نهایت، به اختلاف توان خروجی سیستم در استفاده از نوع گاز کمکی اشاره می‌شود. توان خروجی اندازه‌گیری شده‌ی سیستم با گاز کمکی نئون حدود 8W و با گاز کمکی هلیوم حدود 10W به دست آمده است. این نشان می‌دهد که استفاده از گاز هلیوم نسبت به نئون در لیزرهای بخار مس برمید بهتر است، این در حالی است که لیزرهای بخار مس خالص با گاز کمکی نئون نسبت به هلیوم دارای خروجی و عملکرد بهتری هستند.

به طوری که $G = E_{out}/E_{in}$ بهره انرژی و $\Delta E = E_{out} - E_{in}$ اختلاف انرژی‌های خروجی و ورودی، A و l به ترتیب مساحت سطح مقطع و طول لوله‌ی تقویت‌کننده است. با اندازه‌گیری توان‌های ورودی و خروجی لیزر تقویت‌کننده و ترسیم $\text{Ln}G$ روی محور عمودی برحسب ΔE روی محور افقی، خط اشباع به دست می‌آید. محل برخورد خط اشباع با محور عمودی مقدار $l g_o$ را به دست می‌دهد که از روی آن می‌توان ضریب بهره‌ی علامت کوچک g_o را محاسبه نمود، از طرفی محل برخورد این خط اشباع با محور افقی مقدار انرژی کل دریافتی $E_s A l g_o$ را به دست می‌دهد که از روی آن می‌توان شدت اشباع E_s را محاسبه نمود.

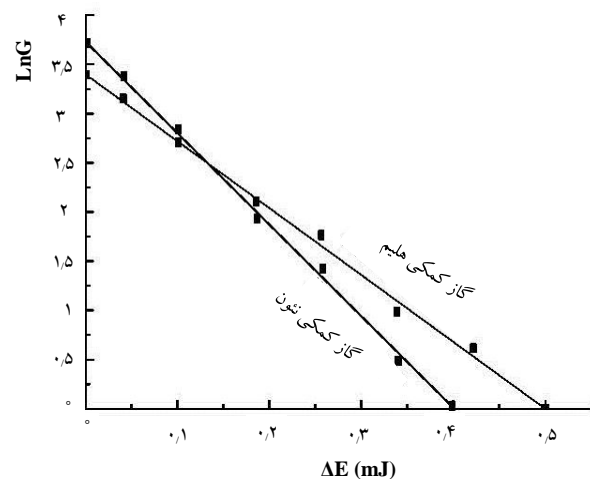
نتایج آزمایش برای دو حالت با گازهای کمکی هلیوم و نئون هر یک به طور جداگانه در شکل ۵ آورده شده است. از روی شکل ۵ می‌توان پارامترهای تقویت و با توان‌سنج توان خروجی سیستم را به دست آورد که برای گازهای کمکی نئون و هلیوم به ترتیب عبارتند از:

برای گاز کمکی نئون:

$$P_{out} = 8\text{W} \text{ توان خروجی}, E_s = 34 \mu\text{J cm}^{-2}, g_o = 0,078 \text{ cm}^{-1}$$

برای گاز کمکی هلیوم:

$$P_{out} = 10\text{W} \text{ توان خروجی}, E_s = 47 \mu\text{J cm}^{-2}, g_o = 0,07 \text{ cm}^{-1}$$



شکل ۵. تغییرات بهره انرژی برحسب اختلاف انرژی.



۴. نتیجه‌گیری و بحث

استفاده از گازهای کمکی معمولاً گازهای نادر در لیزرهای گازی باعث افزایش بازده و توان خروجی لیزر می‌گردد. در لیزرهای بخار فلزی معمولاً از یکی از گازهای کمکی نئون و هلیم یا مخلوطی از آنها بسته به نوع اتم‌های درگیر در فرایند لیزر از محیط فعال استفاده می‌شود. آزمایش‌ها نشان داده‌اند که در لیزر بخار مس گاز کمکی نئون مزیت بیشتری نسبت به دیگر گازهای نادر از جمله هلیم دارد، در حالی که در لیزر بخار طلا گاز هلیم نسبت به نئون برتری دارد و توان خروجی بیشتری می‌دهد. این تفاوت می‌تواند به دلیل اختلاف جرم و دمای تبخیر اتم‌های مس و طلا باشد. در این کار مشخص شد که لیزر بخار مس برمید، بر خلاف لیزر بخار مس خالص، با گاز کمکی هلیم دارای توان خروجی بیشتری نسبت به گاز کمکی نئون است. این تفاوت می‌تواند مربوط به اختلاف دمای عملکرد لیزرها باشد هم‌چنین می‌توان آن را به وجود جسم سوم، یعنی اتم‌های برم در محیط فعال مربوط دانست. نقش برم در ترکیب مس برمید این است که دمای ذوب و تبخیر این ترکیب نسبت به دمای تبخیر مس خالص که ۱۵۰۰ درجه است به مراتب کم‌تر است (حدود ۵۱۰ درجه)، به عبارتی در دمای ۵۱۰ درجه مولکول مس برمید شکسته و اتم‌های مس تبخیر شده و سپس برانگیخته می‌شوند و در فرایند لیزر شرکت می‌کنند در حالی که اتم‌های برم در این دما برانگیخته نمی‌شوند و در فرایند لیزر شرکت نمی‌کنند. مقدار انرژی ترازهای اتم مس، دمای عملکرد و دمای الکترون‌ها باعث می‌شوند تا فقط اتم‌های مس لیزر ایجاد کنند. هم‌چنین می‌دانیم که رسانایی گرمایی اتم هلیم از اتم نئون بیشتر است که این خود نیز می‌تواند تخیلی‌ی تراز پایینی لیزر را تسریع کند. به هر حال نوع گاز کمکی باعث می‌شود تا در پارامترهای میکروسکوپی لیزر نظیر سطح مقطع گسیل القایی، جمعیت وارون و طول عمر گذار تراز بالایی لیزر اثر داشته باشد که در نهایت می‌تواند بر روی عملکرد و توان خروجی لیزر اثر گذار باشد.

مرجع‌ها

- [1] K. Khorasani, D. Salehinia, S. Behrouzinia, B. Sajad, M. Parvzian, Frequency dependence of the output power of metal vapor lasers, *Opt. Commun*, **281** (2008) 3799-3801.
- [2] M.A. Kazaryan, G.G. Petrash, A.N. Trofimov, *J. Quantum Electron*, **10** (1980) 328.
- [3] E.S. Livingstone, D.R. Jones, A. Maitland, C.E. Little, Characteristics of a copper bromide laser with flowing Ne-Hbr buffer gas, *Optical and Quantum Electronics*, **24** (1992) 73-82.
- [4] S. Behrouzinia, A.R. Namdar, M. Zand, R. Barry, A. Hojabri, Effect of a magnetic pulse compression circuit on the operation of a halide laser, *Laser Physics*, **16** (2006) 1616-1620.
- [5] F. Rahimi Ashtari, S. Behrouzinia, B. Sajad, M. Zand, The effect of an axial external magnetic field on the output power of a small-bore CuBr laser, *Opt. Commun*, **284** (2011) 1318-1321.
- [6] G.N. Tiwari, P.K. Shukla, R.K. Mishra, V.K. Shrivastava, R. Khare, S.V. Nakhe, *Optics Commun*, **338** (2015) 322-327.
- [7] D.N. Astadjov, K.D. Dimitrov, D.R. Jones, V. Kirkov, L. Little, C.E. Little, N.V. Sabotinov, N.K. Vuchkov, Influence on operating characteristics of scaling sealed-off CuBr lasers in active length, *Opt. Commun*, **135** (1997) 289-294.
- [8] D.N. Astadjov, L.I. Stoychev, S.K. Dixit, S.V. Nakhe, N.V. Sabotinov, A CuBr laser with $1.4\text{W}/\text{cm}^3$ average output power, *IEEE J. Quantum Electron*, **41** (2005) 1097-1101.
- [9] F.A. Gubarev, V.O. Troitskiy, M.V. Trigub, V.B. Sukhanov, Gain characteristics of large volume CuBr laser active media, *Opt. Commun*, **284** (2011) 2565-2568.
- [10] S. Behrouzinia, R. Sadighi-Bonabi, P. Parvin, M. Zand, Temperature dependence of the amplifying parameters of a copper vapor laser, *Laser Physics*, **14** (2004) 1050-1053.
- [11] S. Behrouzinia, R. Sadighi-Bonabi, P. Parvin, Pressure dependence of the small-signal gain and saturation intensity of a copper vapor laser, *Applied Optics*, **42** (2003) 1013-1018.



- [12] N.V. Sabotinov, Proc. of SPIE, **5449** (2014) 103.
- [13] I.I. Blachev, N.I. Minkovski, I.K. Kostodinov, N.V. Sabotinov, J. Phys, **33** (2006) 39.
- [14] D.N. Astadjov, L.I. Stoychev, S.K. Dixit, S.V. Nakhe, N.V. Sabotinov, IEEE J. Quantum Electron, **41** (2005) 1097.
- [15] G.N. Tiwari, R.K. Mishra, R. Khare, S.V. Nakhe, Development of copper bromide laser master oscillator power amplifier system, PRAMANA- journal of Physics, **82** (2014) 217-225.
- [16] S. Behrouzina, K. Khorasani, M. Farahmandjou, Buffer gas effects on output power of a copper vapor laser, Laser Physics, **26** (2016) 324.
- [17] M. Mirzaei, S. Behrouzina, M. Sabaghi, S. Marjani, K. Khorasani, B. Sajad, Experimental optimization of the output power of a copper vapor laser using air as a buffer gas, Optics and Photonics Journal, **6** (2016) 53-59.
- [18] S. Behrouzina, K. Khorasani, S. Marjani, M. Sabaghi, M.E. Aeinehvand, S. Mohammadpour, Experimental study of buffer gas flow rate effect on output power of a copper vapor laser, Optics and Photonics Journal, **6** (2016) 24-28.
- [19] M. Aghababaei Nezhad, B. Sajad, S. Behrouzina, D. Salehinia, K. Khorasani, Pressure dependence of the small-signal gain and saturation intensity of a gold-vapor laser using various buffer gases in gain medium Opt. Commun, **283** (2010) 1386-1388.