



## لیزر بخار طلای کم توان

داود صالحی نیا\*، کامران خراسانی، بختیار کیا، منصور زند  
مرکز تحقیقات و کاربرد لیزر، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران - ایران

**چکیده:** در این کار پژوهشی به طراحی و ساخت یک دستگاه لیزر بخار طلای کم توان پرداخته شده است. قسمت مرکزی این دستگاه لیزر، لوله‌ای سرامیکی است که محیط فعال در آن جای دارد. این قسمت از جنس آلومینا به طول ۵۸cm و قطر ۱۱mm تهیه شده است. ولتاژ مستقیم در تغذیه این لیزر ۴/۲kV، شدت جریان متوسط در آن ۳۹۰mA و بسامد کاری آن ۱۸/۲kHz است. توان خروجی لیزر در خط قرمز در طول موج ۶۲۷/۸nm در عملکرد گاز ساکن به مقدار بیشینه، ۷۱۰mW و در حالت جریان گاز ۴۵۰mW به دست آمد. از نئون به عنوان گاز کمکی در فشار ۴۰mbar استفاده شد. این لیزر با یک لیزر بخار مس، با ابعاد مشابه، مقایسه شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که توانهای خروجی این دو لیزر نسبت به زمان و فشار گاز کمکی نئون دارای رفتاری مشابه‌اند، اما به نظر می‌رسد که در مورد بسامد، رفتار متفاوت نشان می‌دهند. تغییرات توان خروجی لیزر طلا نسبت به تغییر فشار گاز کمکی نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند که توان خروجی دارای بیشینه‌ای در فشار ۶۰ میلی‌بار گاز نئون است. توان خروجی لیزر در فشار ۱۷۰ mbar گاز نئون به صفر می‌رسد. بهره خروجی در لیزر طلا به مراتب کمتر از بهره لیزر بخار مس است.

**واژه‌های کلیدی:** لیزر بخار فلز، لیزر بخار مس، لیزر بخار طلا

## Low Power Gold Vapor Laser

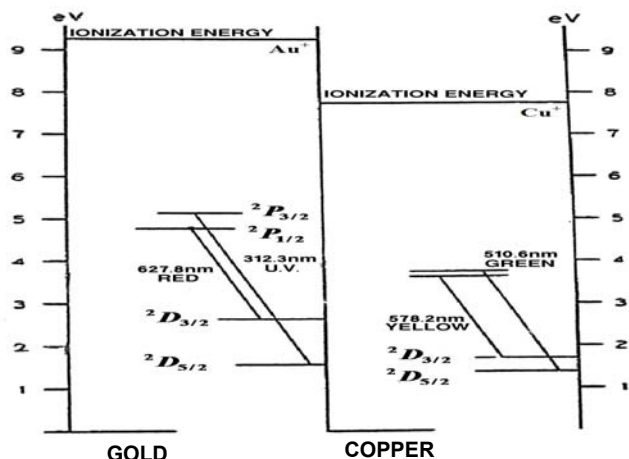
D. Salehinia\*, K. Khorasani, B. Kia, M. Zand  
Laser Research Center, AEOL, P.O. Box: 11365-8486, Tehran - Iran

**Abstract:** In this study, the design of a low power gold vapor laser is presented. The laser tube is an alumina ceramic of cylindrical shape, having the length of 58cm and the inner bore diameter of 11mm. The maximum applied DC voltage is 4.2kV, and the average current is ~ 390mA. The system is operating at the pulse repetition rate of 18.2 kHz, with 40 mbar neon gas pressure. The maximum measured output power in sealed off and gas flow conditions are 710 and 450mW, respectively. The operational behavior of the present system has been compared with that of a copper vapor laser of the same dimensions, showing that the power efficiency is much lower in the case of the gold vapor laser. While both systems have similar time behavior and introducing similar response to the operational gas pressure, it seems, however, the laser output powers versus the pulse repetition rate are different in each laser. The measured output power versus the neon gas pressure has a maximum at 60 mbar gas pressure with a cutoff which occurs at 170 mbar.

**Keywords:** Gold Vapor Laser, Copper Vapor Laser, Metal Vapor Laser

\*email: dsalehi@aeoi.org.ir

## ۱- مقدمه

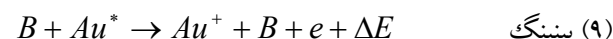
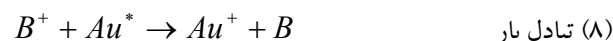


شکل ۱- نمودار ترازهای انرژی گذارهای مربوط به لیزرهای بخار مس و طلا.

در این روابط  $M$  معرف اتمهای طلا و گاز خنثی،  $M^*$  حالت تحریک مرتبه اول،  $M^{**}$  حالت تحریک مرتبه دوم و  $\Delta E$  میزان تغییر انرژی است. برخورد اتم-اتم، بیشتر شامل موارد زیر است.



(در قطره‌های کم مهم است) واهش دیواره‌ای

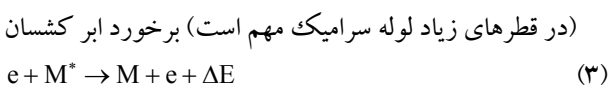
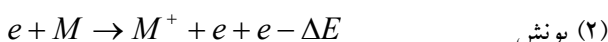


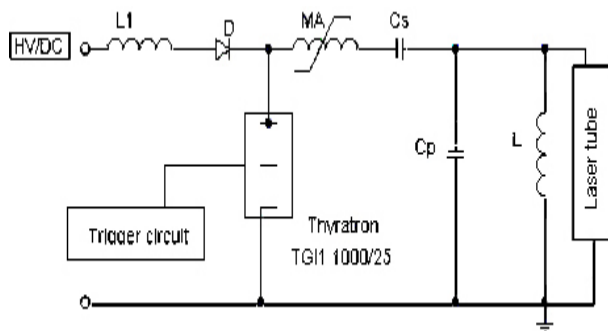
ساختار کلی لوله این لیزر تا حد زیادی شبیه به لوله لیزر بخار مس است، جز آنکه عایق حرارتی آن باید به نحوی تعیین شود تا حداقل، دمای  $1600^\circ\text{C}$  حاصل گردد [۲]. سرامیک بکار رفته معمولاً دارای قطر ۱۵mm تا ۴۰mm و طول آن بین ۵۰cm تا ۱۵۰cm انتخاب می‌شود. این لیزر بیشتر در دمای  $1600^\circ\text{C}$  بکار می‌رود تا مدت عمر لوله افزایش یابد. از سرامیک‌های بریلیا و سافیر که گران‌قیمت‌تر هستند و دمای بالاتری را تحمل می‌کنند می‌توان استفاده کرد. مدارهای استاندارد و متداول انتقال بار در منابع تغذیه آنها بکار می‌روند که خازن ذخیره‌سازی آنها در حدود چند نانوفاراد و ولتاژ شارژ آنها ۱۰ تا ۲۰ کیلوولت است. پالس‌های جریان دارای دامنه چند صد آمپر، پهنای ۳۰۰-۱۰۰ns زمان خیزش ۱۰-۵۰ns می‌باشند که برای خط قرمز کافی

لیزر طلا در دو خط گذار لیزری  $312/2\text{nm}$  و  $627/8\text{nm}$  که در ناحیه UV است و  $(6P^2P_3^0 \rightarrow 6S^2D_5^2)$  که در ناحیه قرمز است نوسان می‌کند. همچنین تراز  $D_3^2$  در لیزر طلا به اندازه ۱eV بالاتر از تراز مشابه در لیزر مس است، ولی تراز  $D_5^2$  آن به اندازه ۰/۴eV نسبت به تراز مشابه در مس پایین‌تر است. ترازهای لیزری در شکل ۱ نشان داده شده‌اند [۱].

بهره کوانتومی گذارهای  $312/2\text{nm}$  و  $627/8\text{nm}$  به ترتیب ۴۷٪ و ۲۹٪ هستند. از آنجا که دمای مورد نیاز در لیزر طلا حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به لیزر مس بیشتر است، جمعیت حرارتی تراز تحتانی لیزر طلا هم در گذارهای UV این لیزر نسبت به تراز متناظر سبز در لیزر بخار مس بیشتر است. برعکس، جمعیت حرارتی تراز تحتانی گذار قرمز طلا به لحاظ بالاتر بودن از تراز تحتانی متناظر در گذار سبز لیزر بخار مس، خیلی کمتر است، بنابراین تفاوت عملکرد و رفتار دو لیزر توجیه‌پذیر است [۲].

آبرتشعش<sup>(۱)</sup> خط قرمز لیزر طلا در سال ۱۹۶۶ توسط والتر گزارش شده است [۳]. نوسان در خط UV نیز توسط والتر گزارش داده شد. در سال ۱۹۶۸ اسموس و همکارانش یک لیزر طلا با تحریک عرضی ارائه دادند که در آن بخار طلا به وسیله یک تفنگ پلاسما ایجاد می‌شد [۴]. اولین لیزر بخار طلای خودگرمکن<sup>(۲)</sup> ترکیب مس و طلا نیز توسط فاهلن گزارش شده است [۵]. در فرایند لیزری این لیزرها برهمکنش‌های مختلفی روی می‌دهند که ناشی از برخوردهای الکترون-اتم، اتم-اتم و تابشهای نوری هستند. برخوردهای الکترون-اتم، شامل فرایندهای زیر است.





شکل ۲- ساختار کلی سیستم لیزر بخار طلا.

توسط یک تنظیم‌کننده (رگولاتور) ولتاژ  $20A$  از برق شهر تأمین می‌شود، استفاده شده است. یک خازن  $4\mu F/8kV$  هم بعنوان خازن صافی یکبار رفته است که بدنبال دیود پل قرار گرفته است. به این ترتیب ولتاژ مستقیم تولید شده دارای امواج (ریپل)  $0.25\%$  خواهد بود. تایروترون بکار رفته مدل TGH 1000/25 است.  $L_1$  سلف باردار کردن خازن انباره است و دیود D که به آن دیود خاموش‌کننده<sup>(۴)</sup> نیز می‌گویند، عمل نگه‌داشتن ولتاژ روی خازن انباره را قبل از وصل شدن تایروترون انجام می‌دهد.  $C_s$  خازن انباره<sup>(۵)</sup> است که ظرفیت آن در حدود چند نانو فاراد است.  $C_p$  خازن فشرده‌کننده<sup>(۶)</sup> است که ظرفیت آن بین یک چهارم تا یک برابر ظرفیت خازن انباره است.  $L$  سلف فیدبک می‌باشد. ابتدا قبل از عمل کردن تایروترون، در حلقه شامل HV،  $L_1$ ، D،  $L_1$  و  $L$ ، که مدار شارژ را تشکیل می‌دهد، خازن  $C_s$  بصورت تشدید شارژ می‌شود. انرژی ذخیره شده در این خازن برابر  $\frac{1}{2} C_s V^2$  می‌شود که در آن V ولتاژ دوسر آن است.

پس از پر شدن خازن  $C_s$ ، فرمان از تریگر به تایروترون اعمال می‌شود. بسامد تریگر باید کمتر از بسامد تشدید مدار، که به وسیله  $L_1$  و  $C_s$  تعیین می‌شود، باشد تا بعد از پر شدن خازن فرمان به تایروترون برسد. پس از وصل شدن تایروترون، خازن  $C_s$  تخلیه می‌شود و پالسی با دامنه بسیار زیاد در حدود دو برابر ولتاژ مستقیم مدار خواهیم داشت. چون معمولاً  $C_s > C_p$ ، پالس تولید شده دارای ولتاژ بیشتری نسبت به ولتاژ  $C_s$  است. خازن  $C_p$  شارژ شده و انرژی آن در لوله تخلیه می‌شود. یکی از عوامل محدود کننده عملکرد تایروترون میزان اتلاف حرارتی در خود آنها است که بستگی به میزان همپوشانی پالسهای ولتاژ و جریان در آنود تایروترون دارد. استفاده از یک سلف کوچک غیر خطی (در حد چند میکروهنر) به عنوان کمک‌کننده مغناطیسی (MA)<sup>(۷)</sup>

است. برای ایجاد پالسهای سریعتر جریان (زمان خیزش کوچکتر از  $30$  نانو ثانیه) لازم برای تولید خط فرابنفش، نیاز به لوله‌هایی به قطر کمتر از  $10mm$  می‌باشد.

از گاز کمی نئون با فشار چند ده تور برای خط قرمز و از نئون یا هلیوم برای خط فرابنفش در فشارهای  $5$  تا  $15$  تور استفاده می‌شود. فشار بخار فلز در حدود  $0.1$  torr است و طلا به میزان  $0.1$  gr/h مصرف می‌شود [۶].

بین الکترودها و لوله سرامیکی فاصله‌ای جهت افزایش طولی ناشی از انبساط حرارتی لوله سرامیکی، که بیش از  $1cm$  به ازای هر متر از طول این لوله می‌باشد، منظور شده است. طراحی الکترودها از اهمیت زیادی برخوردار است، زیرا نقش مهمی در پایداری تخلیه و عملکرد لیزر دارد. از فلزاتی نظیر W، Ta، Mo (تنگستن، تالیوم، مولیبدن) برای ساخت الکترودها نیز استفاده می‌شود.

خط قرمز لیزر کاربردهای مهمی در پزشکی و دستگاههای لیدار و هواشناسی دارد، در سیستم‌های چند رنگی تلویزیونی نیز بکار می‌رود. لیزرهای Cu-AuVL را می‌توان در سه یا چهار طول موج سبز، زرد، قرمز و فرابنفش بطور همزمان بکار برد؛ خط فرابنفش آن در لیتوگرافی نوری هم بکار رفته است.

رژیم عملکرد خطوط لیزری قرمز و فرابنفش با هم تفاوت دارند بطوریکه یک لوله لیزر طلا را فقط باید برای یک خط بهینه کرد [۷]. محاسبات نشان می‌دهند که در شرایط بهینه برای هر خط، قله توان قابل حصول در خط فرابنفش  $15$  تا  $20$  درصد کمتر از خط قرمز است. در مقایسه با لیزر بخار مس بهره خروجی لیزر طلا، که هر دو از نظر ابعاد محیط فعال یکسان هستند، کمتر می‌باشد [۸]. عملکرد در زیر دمای بهینه، یکی از دلایل کم بودن بهره این لیزرها است.

## ۲- روش کار

سیستم لیزری طراحی شده در این کار پژوهشی در شکل ۲ نشان داده شده است. مدار بکار رفته از نوع مدار انتقال بار CT<sup>(۳)</sup> است.

موگد خط ولتاژ طراحی شده می‌تواند ولتاژی «DC» بصورت متغیر تا  $5kV$  تأمین نماید. برای ساخت آن از یک ترانسفورمر افزایشنده تک فاز  $2kW$  با ولتاژ خروجی  $4kV$  که ورودی آن

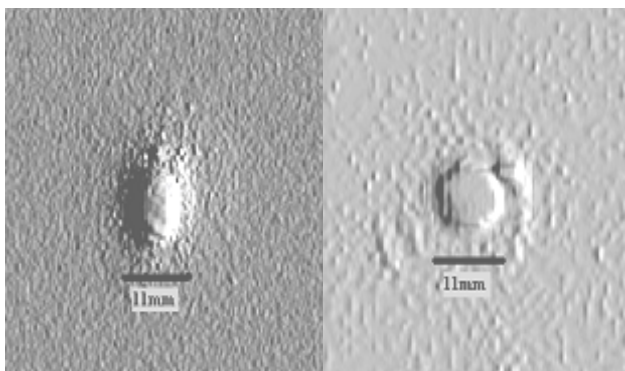


فاصله بین آینه‌های کاواک است، لذا می‌توان از ساده‌ترین نوع کاواک تشدید یعنی کاواک با آینه‌های تخت موازی استفاده کرد که در آنها  $g_1 \cdot g_2 = 1$  ( $g_i = 1 - \frac{1}{r_i}$ ). آینه تمام بازتابان عقبی لیزر یک آینه تخت دی‌الکتریک یا فلزی لایه‌نشانی شده است، در صورتی که آینه جلو یک شیشه BK7 تخت ساده بدون لایه‌نشانی است. میزان بازتابندگی آینه جلو در حدود ۴٪ است. آینه عقب از نوع تخت دی‌الکتریک با بازتابندگی ۹۹٪ است. بالا بودن بهره تقویت این لیزرها مبنی آن است که لازم نیست پنجره‌ها تحت زاویه بروستر قرار داشته باشند بلکه تحت زاویه ۵ تا ۱۰ درجه نسبت به خط عمود بر محور لوله لیزر قرار داده می‌شوند تا از بازتابش لیزر به درون محیط فعال و ایجاد نوفه جلوگیری به عمل آید (شکل ۳) [۹].

نور لیزری حاصل با بیشینه توان خروجی ۷۱۰ mW در حالت گاز ساکن و ۴۵۰ mW در حالت گاز جاری با فشار ۴۰ mbar و توان الکتریکی ورودی در حدود ۱۶۰۰ W به دست آمد. ولتاژ مستقیم ۴/۲ kV و جریان متوسط ۳۹۰ mA بود.

در شکل ۴ تصاویری از مقاطع عرضی نور خروجی لیزرهای بخار طلا و مس به ترتیب در خطهای قرمز و سبز داده شده است و شکل ۵ پالس لیزری را، که به وسیله آشکارساز نوری با ترانزیستور BPX65A گرفته شده است، نشان می‌دهد.

تغییرات توان خروجی لیزر در خط قرمز نسبت به زمان بررسی و با نمونه‌ای از لیزر بخار مس به ابعاد مشابه در فشار ۴۰ mbar گاز کمکی نئون، مورد مقایسه قرار گرفت که در شکل‌های ۶ و ۷ آورده شده‌اند و رفتار مشابه توان خروجی نسبت به زمان را در این دو لیزر نشان داده‌اند. مبدأ اندازه‌گیری زمان در هر یک از این نمودارها، لحظه شروع نور خروجی لیزر است [۱۰].



(ب) لیزر بخار مس

(الف) لیزر بخار طلا

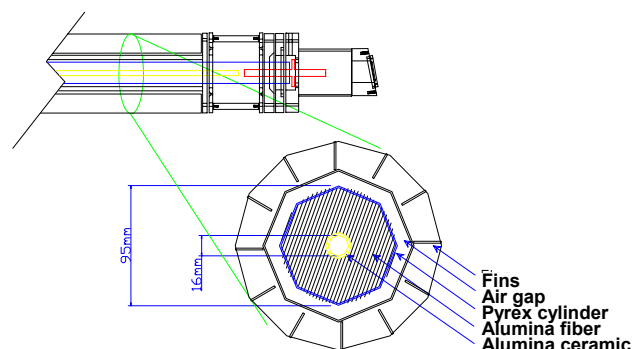
شکل ۴- تصاویری از مقاطع عرضی نور خروجی لیزر بخار طلا و مس.

باعث ایجاد تأخیر بیشتر بین پالسهای جریان و ولتاژ، در نتیجه کاهش اتلاف حرارتی از طریق کم کردن همپوشانی پالسهای ولتاژ و جریان در آنود تایروترون و افزایش عمر مفید آن می‌شود. جریانی که در اثر فرایند تخلیه از لوله لیزر می‌گذرد در انتهای پالس جهتش معکوس می‌شود و تایروترون بکار رفته باید تحمل این جریان معکوس را داشته باشد. گاهی از مدار پاد منفی<sup>(۸)</sup> که شامل یک مقاومت و یک دیود معکوس، موازی با تایروترون است، استفاده می‌شود.

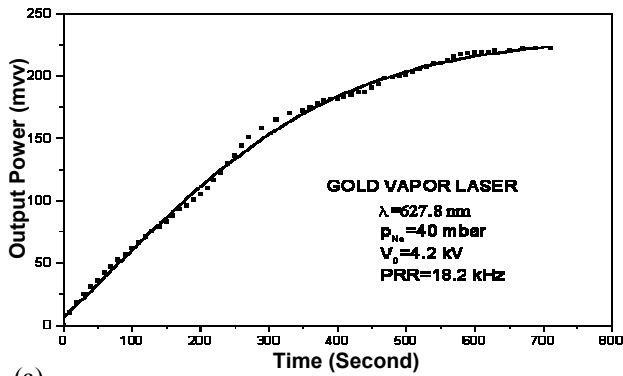
مقطع لوله لیزر در شکل ۳ نشان داده شده است. محفظه تخلیه، لوله‌ای سرامیکی از جنس آلومینا ( $Al_2O_3$ ) با درجه خلوص ۹۹/۷٪ و تحمل دمای  $1800^\circ C$  به طول ۵۸ cm و قطر ۱۱ mm است، که به وسیله عایقی از نوع الیاف آلومینا به ضخامت ۴۰ mm با تحمل دمای  $1700^\circ C$ ، در برگرفته شده و مجموعه درون لوله‌ای از جنس پیرکس قرار داده شده و الکترودها در دو سر آن قرار دارند و یک پوسته فلزی آلومینیومی کل این مجموعه را می‌پوشاند.

بین الکترودها و لوله سرامیکی فاصله‌ای برای افزایش طولی ناشی از انبساط حرارتی لوله سرامیکی، که بیش از ۱ cm به ازای هر متر از طول لوله است، در نظر گرفته شده است. طراحی الکترودها از اهمیت زیادی برخوردار است، زیرا نقش مهمی در پایداری تخلیه و عملکرد لیزر دارد؛ الکترودهای بکار رفته از جنس مولیبدن بوده و به شکل استوانه توخالی به قطر ۳ cm است. در مدار طراحی شده شکل ۲، مقادیر  $C_s = 1/47$  nF،  $L_1 \approx 100$  mH و  $L_2 \approx 100$   $\mu$ H بکار رفته‌اند.

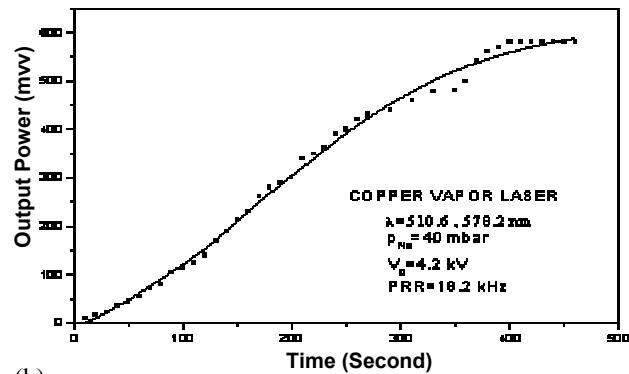
با توجه به بالا بودن بهره تقویت در لیزرهای بخار طلا و مس ( $25\% - 8\%$ ) همچنین بزرگ بودن عدد فرنل  $N_F = \frac{2.44 \lambda}{D}$  که در آن D قطر باریکه خروجی لیزر و  $\lambda$



شکل ۳- مقطع لوله لیزر.

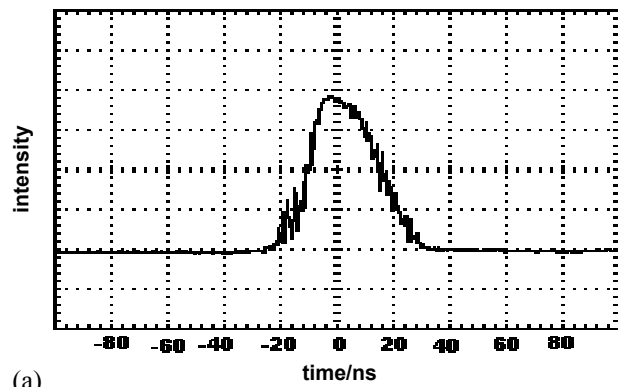


(a)

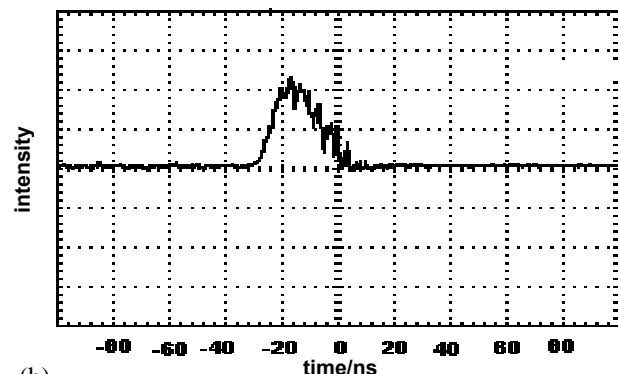


(b)

شکل ۶- توان خروجی بر حسب زمان در لیزر بخار، a: طلا، b: مس. داده‌های زمانی هر ۱۰ ثانیه گرفته شده‌اند.

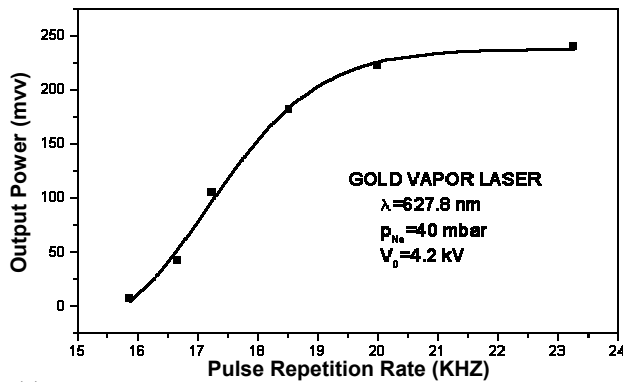


(a)

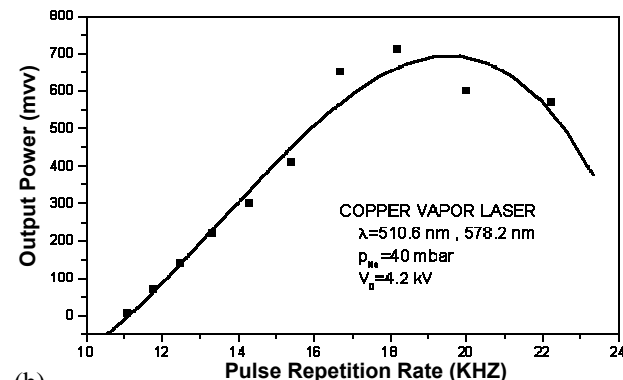


(b)

شکل ۵- شکل پالس نوری لیزری a: خط سبز لیزر بخار مس، b: خط قرمز لیزر بخار طلا.



(a)



(b)

شکل ۷- توان خروجی بر حسب نرخ تکرار پالسهای دمش در لیزر بخار، a: طلا، b: مس.

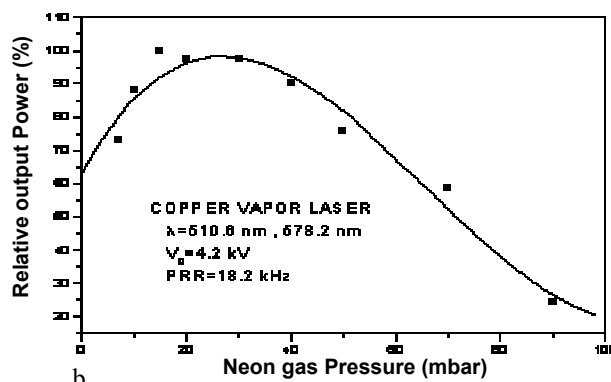
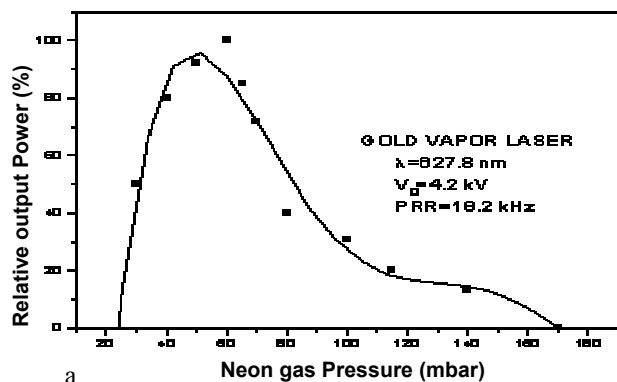
تغییرات توان خروجی نسبت به نرخ تکرار پالسهای دمش در این دو لیزر در شکل ۷ نشان داده شده است.

با توجه به این نمودارها در بازه مورد بررسی، به نظر می‌رسد که در لیزر بخار مس بر خلاف لیزر بخار طلا، با افزایش نرخ تکرار پالس دمش ابتدا توان خروجی افزایش یافته و پس از رسیدن به مقداری بیشینه در بسامد ۱۸/۲kHz شروع به کاهش می‌نماید [۱۱].

در شکل ۸ تغییرات نسبی توان خروجی لیزر طلا نسبت به تغییر فشار گاز کمکی نئون نشان داده شده است که نشان دهنده وجود نقطه بیشینه‌ای در ۶۰ mbar بوده و در فشار ۱۷۰ mbar به صفر می‌گراید رفتار مشابهی برای لیزر بخار مس مشاهده شده است [۱۲].

### تشکر و قدردانی

در پایان از زحمات و حمایت‌های مدیریت و همکاران مرکز تحقیقات و کاربرد لیزر سازمان انرژی اتمی ایران در به ثمر رسیدن این طرح تشکر نموده و آرزومند توفیقات روزافزون آن عزیزان هستیم.



شکل ۸- تغییرات توان خروجی لیزر، a: بخار طلا، b: بخار مس، نسبت به تغییرات فشار گاز کمکی نتون.

### پی نوشت ها:

- ۱- Super Radiance
- ۲- Self-Heating
- ۳- CT: Charge Transfer
- ۴- D-Quenching

- ۵- Storage
- ۶- Peaking
- ۷- MA: Magnetic Assist
- ۸- Anti Negative

### References:

1. C.E. Moore, "Atomic Energy Levels," Circular 476, Vol.1 (1H-23V), Vol.2 (24Cr-41Nb), Vol.3 (42Mo-57La; 72Hf-89Ac), Natl. Bureau Standards: Washington, DC (1949, 1952 & 1958).
2. C.E. Webb, "Copper and gold vapor lasers: recent advances and applications," Proc. Int. Conf. on Lasers' 87, STS Press: McLean, VA, 276-84 (1988).
3. W.T. Walter, N. Solimene, M. Piltch G. Gould, "Efficient pulsed gas discharge lasers," IEEE J. Quantum Electron., QE-2(9) 474-9(1966).
4. J.F. Asmus and M.K. Moncur, "Pulse broadening in a MHD. copper vapor laser," Appl. Phys. Lett. **13**(11) 384-5 (1968).
5. T.S. Fahlen, "Self-heated, multiple-metal-vapor laser," IEEE J. Quantum Electron. QE-**12** 200-1 (1976).
6. B. Cai, X. Lin, Z. Jiang, F. Li, "A practical low-cost gold vapor laser," Chin. Phys-Lasers **15**(3) 182-3 (1988).
7. S.V. Markova, G.G. Petrash, V.M. Cherezov, "A study of pulsed gold and bismuth vapor lasers," in Proc. Lebedev Phys. Inst. **181**, "Metal and metal halide vapor lasers," (ed.G.G. Petrash) Commack: Nova Science, 23-48 (1989).
8. B. Singh, S.V. Nakhe, J.K. Mittal, S.K. Dixit, H.S. Vora, R. Bhatangar, "Large bore copper vapor laser with a double thyatron pulse modulator," Rev. Sci. Instrum. Vol.64 (2), pp. 314-318, (1993).
9. V.N. Borisov, A.M. Gorokhov, G.S. Evtushenko, A.E. Kirilov, V.I. Kruglyakov, N.A. Filonova, "Investigation and development of Au-vapor UV-laser," SPIE **1811**, High-Resolution Molecular Spectroscopy, 410-12 (1991).
10. د. صالحی‌نیا، ک. خراسانی، ب. کیا، م. زند "لیزر بخار طلا و مقایسه آن با لیزر بخار مس"، مقاله نامه دوازدهمین کنفرانس سالانه اپتیک و فوتونیک ایران، صفحه ۳-۳۹۱ (۱۳۸۴).
11. R.R. Lewis, "The operating regime of longitudinal discharge copper vapour lasers," Opt. Quantum Electron. **23** S493-512 (1991).
12. ه. رحیمی، س. بهروزی‌نیا، ع. نامدار، م. زند، "بررسی پارامترهای مؤثر بر توان خروجی لیزر بخار مس با قطر کوچک و آهنگ تکرار بالا"، مقاله نامه یازدهمین کنفرانس سالانه اپتیک و فوتونیک ایران، صفحه ۹-۱۳۴ (۱۳۸۳).