



طراحی و ساخت لیزر CuCl-Ne و بهینه‌سازی توان ویژه

راحله محمدپور^{۱*}، مریم توکلی^۱، رسول صدیقی^۱، فریدون سلطانمرادی^۲، منصور زند^۲

۱. دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، صندوق پستی: ۹۱۶۱-۱۱۳۶۵، تهران - ایران

۲. سازمان انرژی اتمی ایران، مرکز تحقیقات و کاربرد لیزر، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران - ایران

چکیده: در این کار پژوهشی چگونگی ساخت لیزر کلرید مس شرح داده شده و تأثیر پارامترهای فشار بخار کلرید مس، فشار گاز کمکی، دما، ولتاژ و بسامد بر روی توان خروجی، همچنین نسبت طول موج نورهای زرد و سبز در فشارهای مختلف گاز کمکی مورد بررسی قرار گرفته است. با بهینه‌سازی این پارامترها و با کنترل دقیق فشار بخار کلرید مس از طریق افزایش فاصله بین تخلیه الکتریکی و ماده فعال، بیشترین توان ویژه ۱۲۳ (وات بر لیتر) و بیشینه بهره ۰/۷۲٪ از لیزر مورد بحث، بدون استفاده از هیدروژن بدست آمده است. بر اساس منابع موجود، از این لیزر بیشترین توان ویژه در مقایسه با سایر لیزرهای هالید مس که تاکنون ساخته شده است و از گاز کمکی هیدروژن استفاده نکرده‌اند، به دست آمده است.

واژه‌های کلیدی: لیزرهای بخار فلزات، لیزر بخار کلرید مس، فشار بخار کلرید مس، توان خروجی ویژه

CuCl-Ne Laser Construction and Optimization of Specific Output Power

R. Mohammadpour^{1*}, M. Tavakoli¹, R. Sedighi^{1,2}, F. Soltanmorad², M. Zand²

1. Physics Department, Sharif University of Technology, P.O. Box: 11365 -9161, Tehran-Iran

2. Laser Research Center, AEOL, P.O. Box: 11365 - 8486, Tehran - Iran

Abstract: In this work a copper chloride laser has been constructed and the effects of different parameters such as CuCl vapor pressure, buffer gas pressure, voltage and frequency on the output power and the ratio of green to yellow power at different buffer gas pressure have been measured. Thus, by optimization of these parameters and by the exact control of the copper chloride vapor pressure, as a result of increasing the distance between discharge and the lasant, a maximum specific output power of 123 (watt/lit) has been achieved. Based on the previous references, the reported specific output power in this work is the highest one among all of the copper halide lasers that have been constructed up to now, where the system is operating without any additives, like hydrogen.

Keywords: metal vapor lasers, CuCl laser, copper halide vapor pressure, specific output power

۱- مقدمه

جدول ۱- نتایج تجربی گزارش شده از لیزرهای هالید مس.

نوع هالید	قطر لوله	طول لوله	توان	توان ویژه	بازدهی	مآخذ
CuCl	۱۱	۴۰	۳	۷۹	۰/۲۹	[۶]
CuCl	۱۸	۹۰	۶۳	۲۷/۵	۰/۱۸	[۷]
CuCl	۲۵	۱۰۰	۱۲/۵	۲۵/۵	۰/۸۴	[۸]
CuCl	۱۸	۵۵	۱۳/۲	۹۴	۱	[۹]
CuBr	۱۸	۵۵	۱۳/۲	۹۴	۱	[۹]
CuI	۱۲	۴۵	۲/۶	۵۱	۰/۳۷	[۱۰]
CuCl	۳۰	۷۰	۱۸/۵	۳۷	-	[۱۱]
CuBr	۲۲	۷۵	۳/۶	۱۲/۶	۰/۳۶	[۷]
CuBr	۲۰	۵۰	۳/۲	۲۰	۰/۲۶	[۱۲]
CuBr	۱۲	۴۵	۲/۱	۴۱	۰/۲۱	[۱۳]
CuBr	۲۰	۶۰	۴/۲	۲۲	۰/۳۲	[۱۳]
CuBr	۲۲	۷۵	۷/۸	۲۷	۰/۵۶	[۱۳]
CuBr	۲۰	۶۵	۱۷/۵	۸۵/۷	۱/۲۳	[۱۴]
CuBr	۲۱	۵۰	۶	۳۸	۰/۵	[۱۵]
CuBr	۲۰	۵۰	۵/۳	۳۳/۸	۰/۴	[۱۶]
CuCl	۲۰	۵۰	۳/۵	۲۲/۳	۰/۳	[۱۶]
CuBr	۲۵	۸۰	۱۱	۲۸	۰/۵۵	[۱۷]
CuBr	۱۳	۳۳	۳/۵	۸۰	۰/۷۱	[۱۸]
CuCl	۱۰	۳۰	۲/۹	۱۲۳	۰/۷۲	کار فعلی

لیزر بخار مس در رده لیزرهای گازی پر قدرت با بازدهی بالا در محدوده طول موجهای مرئی محسوب می‌شود و کاربردهای زیادی در دمش لیزرهای رزین‌های، اسپکتروسکوپی و پزشکی دارد [۴ تا ۱۴]. این لیزر در دو طول موج سبز و زرد ۵۱۰/۶ و ۵۷۸/۲ نانومتر عمل می‌کند. با توجه به فشار پایین بخار مس در دماهای پایین، دستیابی به چگالی اتمهای مس به مقدار کافی، به دماهای بالا در حدود ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد نیاز دارد؛ ولی در عمل، رسیدن به دماهای بالا با مشکلات تکنیکی متعددی همراه است. بدین جهت، برای رسیدن به فشار بخار مس بالا در دماهای پایین، تلاشهای زیادی به عمل آمده است. یکی از راهکارها، استفاده از ترکیبات هالید مس به جای مس خالص است که بسته به نوع هالید بکار رفته، فشار بخار به اندازه کافی بالا در محدوده دمایی ۴۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد قابل حصول است. در میان هالیدهای مختلف مس، کلرید آن دارای بیشترین فشار بخار در پایین‌ترین محدوده دمایی بکار رفته یعنی حدود ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد است.

نخستین لیزر کلرید مس در سال ۱۹۷۳ توسط Chen و Nerheim ساخته شد [۵]؛ سپس تلاشهایی برای بهینه‌سازی این ترکیب و ترکیبات دیگر، مانند برمید مس و یدید مس به عمل آمد. بر اساس نتایج تجربی گزارش شده در منابع [۶ تا ۱۸] که در جدول ۱ دیده می‌شود، بیشترین توان ویژه و بازدهی بدست آمده، بدون استفاده از هیدروژن، به ترتیب ۹۴ (وات بر لیتر) و ۱/۲۳٪ است.

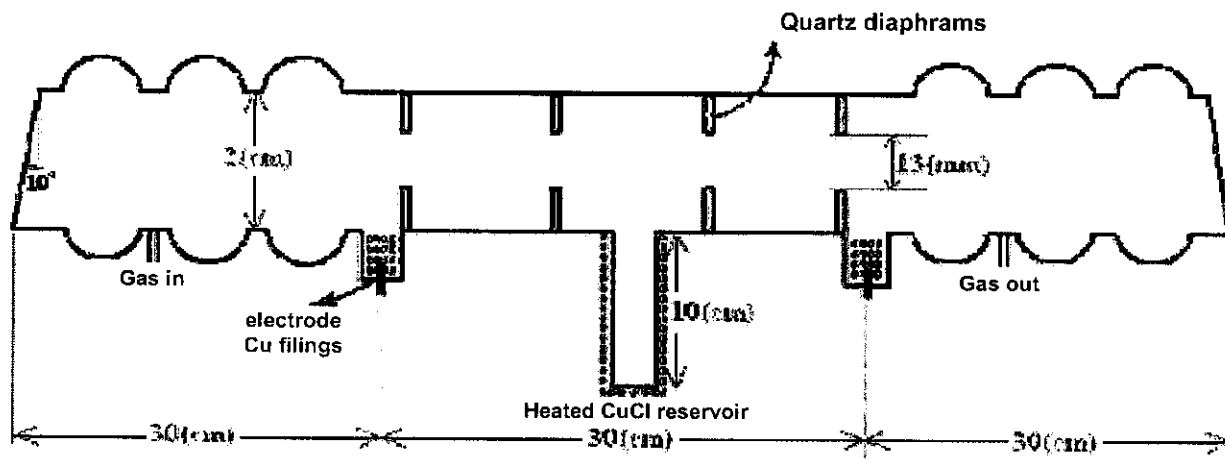
در ایران، اولین لیزر هالید مس در سال ۱۳۷۰ در مرکز لیزر سازمان انرژی اتمی ساخته شد [۱۹]. در این لیزر، ماده فعال کلرید مس بوده و برای کلیدزنی مدار از اخگر شکاف^(۱) استفاده شده است و تنها عمل لیزر مشاهده شده و توان خروجی کمتر از ۱۰۰ میلی‌وات بوده است.

در این کار پژوهشی سعی شده است با بهینه‌سازی پارامترهای مربوط، توان ویژه دستگاه را بدون افزودن گازهایی مانند هیدروژن که تأثیر به‌سزایی در افزایش توان و بازده لیزر دارند، بهینه کنیم.

۲- طراحی و ساخت لیزر بخار کلرید مس

طراحی لوله لیزر در شکل ۱ نشان داده شده است. طول این

لوله ۹۰ سانتی‌متر، قطر آن ۲ سانتی‌متر، جنس آن کوارتز و فاصله الکترودهای آن از یکدیگر ۳۰ سانتی‌متر است. به منظور توزیع یکنواخت فشار بخار کلرید مس و در نتیجه، پایدار شدن تخلیه الکتریکی، چهار دیافراگم کوارتزی به قطر داخلی ۱۳ میلی‌متر، درون محیط فعال در فواصل مساوی از یکدیگر قرار داده شده‌اند. در وسط محیط فعال، مخزن نمک (کلرید مس) به طول ۱۰ سانتی‌متر قرار دارد که به وسیله المان حرارتی گرم می‌شود. دمای مخزن تعیین‌کننده فشار بخار کلرید مس است، بنابراین با تغییر دمای مخزن می‌توان فشار بخار نمک را تنظیم کرد. مقدار نمکی که در هر نوبت درون مخزن ریخته می‌شود حدود ۳ گرم است که برای تقریباً ۲۰ ساعت کار کافی است. انتقال حرارت از پلاسما به نمک به سبب فاصله نسبتاً زیاد بین نمک و محیط پلاسما ناچیز است، و گرم شدن نمک مستقل از تخلیه الکتریکی بوده و تنها از طریق المان حرارتی صورت می‌گیرد. در نتیجه، فشار بخار آن توسط المان حرارتی کاملاً قابل تنظیم است. الکترودها از جنس براده مس هستند. در فاصله بین الکترودها و پنجره، جابجایی تعبیه شده است که به صورت تله سرد عمل کرده و مانع رسیدن بخار نمک خارج شده از محیط

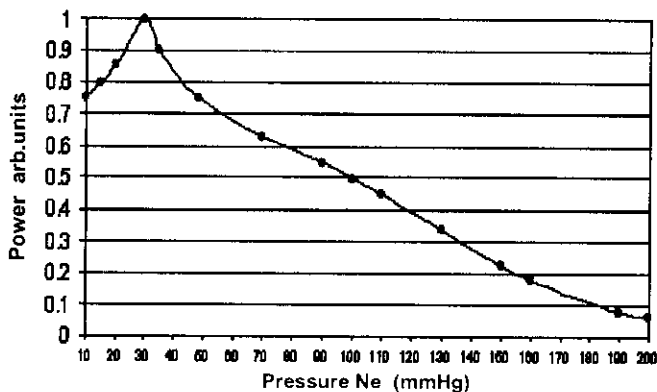


شکل ۱- طرحواره لیزر کلرید مس.

برای راه‌اندازی سیستم پس از تخلیه لوله لیزر، گاز کمکی نئون را با فشار مناسب به سیستم تزریق کرده و آن را به صورت بسته^(۲) درمی‌آوریم. سپس با اعمال ولتاژ بالا به دو سر لوله لیزر و تخلیه الکتریکی گاز نئون، سیستم را گرم می‌کنیم. همینکه دمای دیواره لوله لیزر به حدود ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد، شرایط برای ورود بخار نمک مهیا می‌شود. مخزن نمک را گرم کرده و بخار را با فشار مناسب وارد محیط فعال می‌کنیم. پس از چند دقیقه، هنگامی که بخار نمک در طول محیط فعال توزیع شود، عمل لیزر شروع می‌شود.

۳- بهینه‌سازی لیزر

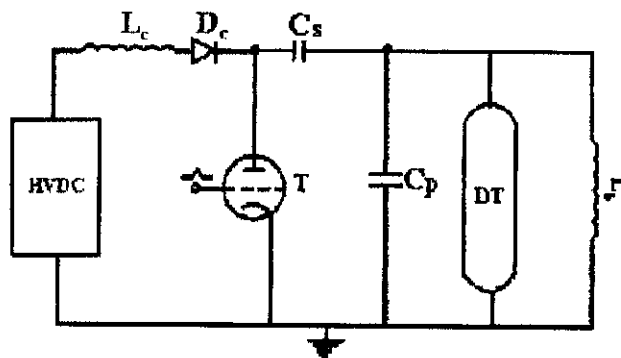
به منظور بهینه‌سازی لیزر، ابتدا تأثیر فشار گاز زمینه بر روی توان خروجی آن بررسی شد. در این بررسی به ازای توان ورودی ثابت، $\frac{1}{2} C_p V^2 f = 475 \text{ watt}$ ، فشار گاز کمکی نئون را در محدوده ۱۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر جیوه تغییر داده و اثر آن بر توان خروجی لیزر را در شکل ۳ نشان داده‌ایم. بطوری که مشاهده



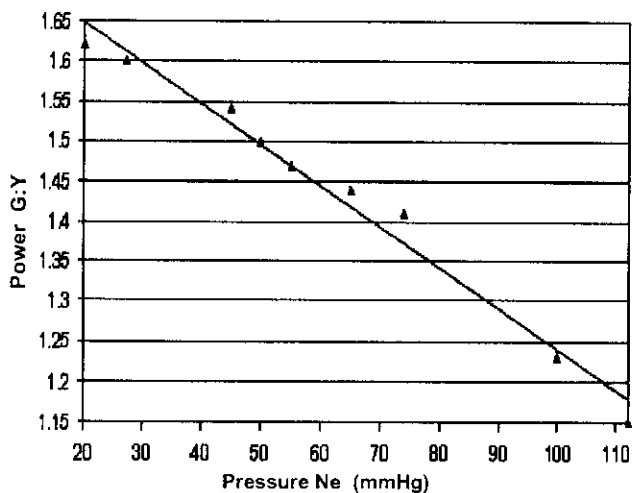
شکل ۳- وابستگی توان خروجی به فشار گاز نئون.

فعال به پنجره می‌شوند. بخارهای نمکی که از محیط فعال فرار می‌کنند، در اولین تله پس از الکترود، سرد شده و در روی انحناهای آن چگالیده می‌شوند و مسیر باریکه را مسدود نمی‌کنند. پنجره‌ها از جنس BK7 بوده و به منظور جلوگیری از ایجاد پدیده لیزر رقابتی، در زاویه ۱۰ درجه قرار گرفته‌اند. طول محیط فعال لیزر توسط یک لایه آلومینای پنبه‌ای و یک لایه نوار نسوز عایق‌بندی شده است. دمای دیواره خارجی لیزر به وسیله دماسنجی با دقت ۲ درجه سانتی‌گراد که در تماس با دیواره است اندازه‌گیری می‌شود. آینه‌های مورد استفاده تخت و دارای ضریب انعکاس ۹۹٪ برای آینه انتهایی و ۸٪ برای آینه جلویی هستند.

مدار تحریک لیزر در شکل ۲ نشان داده شده است. برای کلیدزنی مدار از تایروترون مدل TGH1000/25 که با هواخنک می‌شود، استفاده شده است. ظرفیت خازن ذخیره ساز C_s ، ۱/۱ نانوفاراد بوده و حداکثر تا ولتاژ ۱۰ کیلو ولت باردار می‌شود. برای کاستن پهنای تپ (پالس) ولتاژ و افزودن مقدار ولتاژ دو سر لوله لیزر، از خازن پیک C_p ، به ظرفیت ۰/۵ نانوفاراد استفاده شده است.

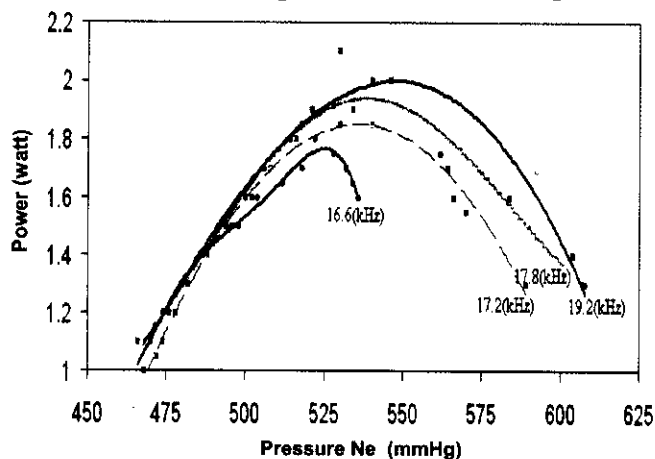


شکل ۲- مدار تحریک لیزر.



شکل ۵- نسبت توان سبز به زرد در فشارهای مختلف.

می‌شود. برای تعیین دمای بهینه لیزر، پس از توزیع بخار نمک در طول محیط فعال و شروع عمل لیزر، با کاستن ولتاژ باردار کردن خازن و نرخ تکرار تپ، به عبارت دیگر با کاستن توان ورودی، سیستم را سرد کردیم. به این ترتیب با وجود بخار نمک در محیط فعال، به علت ناکافی بودن میدان الکتریکی در این محیط و نامناسب بودن بسامد، عمل لیزر متوقف می‌شد. پس از پایین آمدن دمای سیستم تا حدود ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، یکباره ولتاژ باردار شدن خازن را در مقدار ۷/۲ کیلوولت ثابت نگه داشته و بسامد را در مقادیر معینی که در نمودارهای شکل ۶ مشخص شده است قرار داده‌ایم. در این حالت به علت وجود بخار نمک در محیط فعال و قرار گرفتن ولتاژ و بسامد در محدوده کاری لیزر، عمل لیزری شروع می‌شود. افزایش ناگهانی توان ورودی سیستم، موجب افزایش سریع دما و توان خروجی لیزر می‌گردد. بنابراین به ازای یک توان ورودی مشخص، تغییرات توان خروجی بر حسب دما اندازه‌گیری می‌شود.

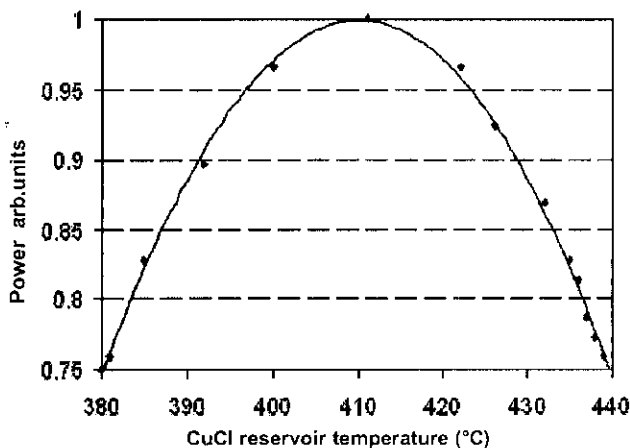


شکل ۶- وابستگی توان خروجی به دما در فرکانسهای مختلف.

می‌شود، در فشارهای پایین، با افزایش فشار، توان خروجی افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش فشار گاز زمینه، تعداد برخوردهای تحریک‌کننده افزایش یافته و اتمهای مس بیشتری در تراز برانگیخته قرار می‌گیرند و توان خروجی لیزر افزایش می‌یابد. اما افزایش بیش از حد فشار موجب کاهش توان خروجی می‌شود. زیرا در فشارهای بالا اتمهای تحریک شده قبل از گسیل القایی، در اثر برخورد با ذرات سیستم، انرژی خود را به صورت حرارتی از دست داده و بدون گسیل فوتون واهلش می‌کنند؛ در نتیجه، توان خروجی کاهش می‌یابد. بنابراین وجود یک فشار بهینه کاملاً روشن است. فشار بهینه بدست آمده از آزمایش همانطوری که در نمودار هم دیده می‌شود، ۳۰ میلی‌متر جیوه است.

مسئله مهم دیگر در بهینه‌سازی لیزر، ایجاد دمای بهینه در مخزن نمک برای تأمین فشار بهینه بخار نمک است، برای این منظور، تغییرات توان خروجی بر حسب دمای مخزن نمک به ازای فشار بهینه گاز نئون در شکل ۴ رسم شده است. دمای بهینه برای مخزن نمک کلرید مس ۴۱۰ درجه سانتی‌گراد است.

شکل ۵ نسبت طول موج سبز به زرد را در فشارهای مختلف گاز نئون نشان می‌دهد. همانطور که از نمودار پیداست با افزایش فشار گاز زمینه، طول موج زرد قدرت بیشتری یافته و در نتیجه این نسبت کوچکتر می‌شود. این نسبت به قله دمای الکترونها بستگی دارد. افزایش فشار گاز خنثی منجر به کاهش قله دمایی الکترونها شده [۱۸] و این امر باعث دمش بیشتر به ترازهای پایینی می‌شود و با توجه به اینکه تراز پایینی گذار سبز پایین‌تر از تراز پایینی گذار زرد است، آلودگی تراز شبه پایای سبز بیشتر بوده و این امر منجر به کاهش نسبت توان خروجی سبز به زرد



شکل ۴- توان خروجی بر حسب دمای مخزن نمک.



۴- نتیجه‌گیری

در این گزارش چگونگی ساخت لیزر کلرید مس شرح داده شده است. با کنترل دقیق فشار بخار نمک مس که با انتخاب مخزن طویل، به طور مستقل از دمای جدار لوله و تخلیه الکتریکی تعیین می‌شود و با بهینه‌سازی پارامترهایی نظیر فشار گاز کمکی، دمای جداره لوله، ولتاژ و بسامد، بیشینه توان ۴ وات با سطح مقطع $1/33$ سانتی‌متر مربع از حجم فعال 40 سانتی‌متر مکعب حاصل شد که معادل توان ویژه 100 (وات بر لیتر) است. با کوچکتر کردن حجم فعال از طریق محدود کردن بیشتر محیط فعال با گذاشتن دیافراگم‌های کوچکتر بیشینه توان $2/9$ وات با سطح مقطع $0/79$ سانتی‌متر مربع از حجم فعال $23/5$ سانتی‌متر مکعب حاصل شد که معادل توان ویژه 123 (وات بر لیتر) است. بر اساس منابع موجود [۶-۱۸]، از سیستم مذکور بیشترین توان ویژه در بین لیزرهای هالید مسی که تاکنون ساخته شده‌اند و از مواد افزودنی دیگر نظیر هیدروژن استفاده نکرده‌اند، حاصل شده است.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از همکاری و راهنمایی‌های مفید آقایان کامران خراسانی، داوود صالحی‌نیا و بختیار کیا تشکر و قدردانی می‌نمایم.

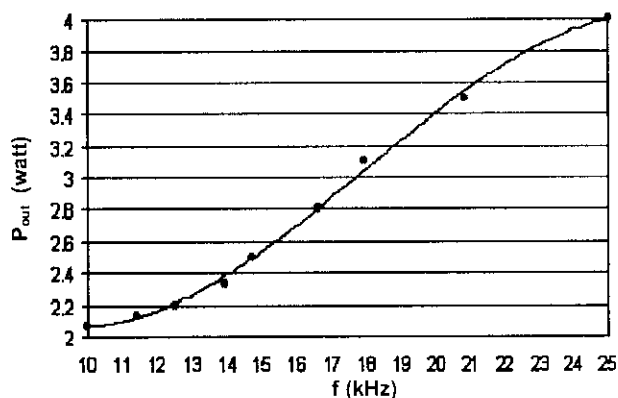
پی‌نوشت‌ها:

- ۱- Spark Gap
- ۲- Sealed

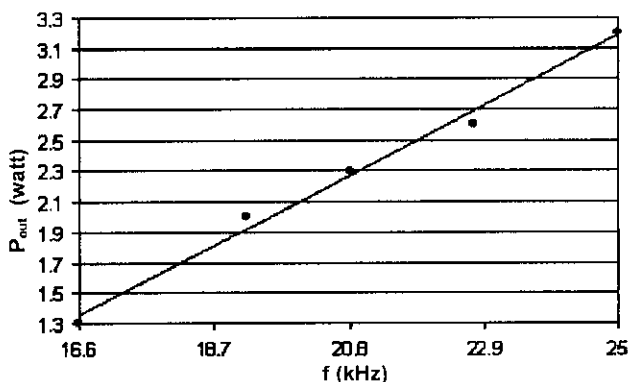
پس از تعیین دمای بهینه عملکرد لیزر، باید به ازای یک توان ورودی مشخص، عایق مناسبی انتخاب شود تا دما در گستره مطلوب قرار گیرد. بنابراین، ضخامت عایق به گونه‌ای انتخاب شد که به ازای توان ورودی ثابت 560 وات، دما در 560 درجه سانتی‌گراد ثابت بماند، با تغییر دادن ولتاژ باردار کردن خازن و نرخ تکرار تپ به گونه‌ای که توان ورودی، $\frac{1}{2} C_p V^2 f$ ، در مقدار 560 وات ثابت بماند. توان خروجی اندازه‌گیری شده و تغییرات آن بر حسب بسامد در شکل ۷ رسم شده است.

بطوری که دیده می‌شود، روند تغییرات توان خروجی صعودی است. توان خروجی، در بسامد 25 کیلوهرتز که حد بالای بسامد قابل دسترسی است، به 4 وات می‌رسد. با همین شرایط و با قرار دادن دیافراگم‌های 10 میلی‌متری در محیط فعال به جای دیافراگم‌های 13 میلی‌متری مورد استفاده و در نتیجه کوچکتر کردن حجم فعال، توان خروجی به $2/9$ وات رسید.

برای بررسی تأثیر بسامد به تنهایی، ولتاژ باردار کردن خازن را در مقدار $7/2$ کیلو ولت ثابت نگه داشته و بسامد را از $16/7$ تا 25 کیلوهرتز افزایش داده‌ایم. شکل ۸ نشان می‌دهد که با افزایش بسامد، توان خروجی نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۷- وابستگی توان خروجی به بسامد در توان ورودی ثابت 560 وات.



شکل ۸- وابستگی توان خروجی به بسامد در ولتاژ ثابت $3/6$ کیلوولت.



1. S. E. McCoy, "An evaluation of copper-bromide laser for treating telangiectasia," *Laser in Surg. Med.*, **21**, 329-37 (1997).
2. B. Warner, "Atomic vapor laser isotope separation," *Proc. SPIE*, **737**, 2-6 (1998).
3. M. A. Kazaryan, "Copper vapor lasers in oncology, in Pulsed Metal Vapor Lasers-Physics and Emerging Applications in Industry (eds. C. E. Little and N. V. Sabotinov)," Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, 353-8 (1996).
4. D. R. Pini, "Dilling and cutting transparent substrates with copper vapor lasers, in Pulsed Metal Vapor Lasers-Physics and Emerging Applications in Industry (eds. C. E. Little and N. V. Sabotinov)," Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, 359-64 (1996).
5. C. J. Chen, N. M. Nerheim and G. R. Russell, "Double-discharge copper vapor laser with copper chlorode as a lasant," *Appl. Phys. Lett.* **23**(9), 514-15 (1973).
6. A. A. Isaev, M. A. Kazaryan and G. Yu. Lemmerman, "Pulsed lasing at atomic copper transitions in a copper bromide and copper chloride vapor discharge," *KVANT.ELEKTRON.*, **3**(8), 1800-1803 (1976).
7. G. G. Petrash, "Metal vapor and metal halide vapor lasers," Nova Science Publisher (1988).
8. N. M. Nerheim, A. M. Bhanji and G. R. Russell, "A continuously pulsed copper halide laser with a cable-capacitor Blumlein discharge circuit," *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-14**(9), 686-93 (1978).
9. M. A. Kazaryan, G. G. Petrash and A. N. Trofimov, "Comprasion of the characteristics of copper, copper Chloride and copper Bromide vapor lasers," *Sov. J. Quantum Electron.* **10**(3), 328-33 (1980).
10. A. J. Andrews, R. C. Tobin and C. E. Webb, "Driving circuit for copper halide lasers-a parametric study," *J. Phys. D: Appl. Phys.* **13**, 1017-27 (1980).
11. Ya. R. Abas-Ogly, S. A. Aboyan and G. V. Abrosimov, "Copper halide laser pumped with vacuum-tube and thyatron oscillators," *Sov. J. Quantum Electron.* **11**(3), 391-3 (1981).
12. D. N. Astadzhov, N. K. Vuchkov and G. G. Petrash, "Relaxation of metastable copper atoms in a copper bromide vapor laser under regular pulse conditions," *Sov. J. Quantum Electron.* **17**(2), 245-47 (1987).
13. A. N. Trofimov, "Investigation of pulsed copper halide vapor lasers," *Phys. Mat. Sci.*, 166 (1982).
14. O. R. Marazov and E. G. Manev, "Externally heated CuBr laser," *Opt. commun.*, **78**(1), 63-66 (1990).
15. D. N. Astadjov, A. A. Isaev, G. G. Petrash and I. V. Ponomarev, "Temporal and evolution of populations of CuI levels in CuBr vapor laser," *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-28**(10), 1966-69 (1992).
16. N. V. Sabotinov, N. K. Vuchkov and D. N. Astadjov, "Effect of hydrogen in CuBr and CuCl vapor lasers," *Opt. commun.*, **95**, 55-6 (1993).
17. A. A. Isaev, G. G. Petrash, C. E. Little and D. R. Jones, "Characteristics of pulsed discharges in copper bromide and copper hybrid lasers," *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-33**(6), 919-26 (1997).
18. L. Little, "Metal vapor lasers" John Wiley & Sons, New York (1999).
19. ر. صدیقی، س.ع. گلپایگانی، ف. سلطانمرادی، "طراحی و لیزر ساخت بخار مس"، کنفرانس فیزیک اصفهان، ۲۴-۲۵ (۱۳۷۰).