



دانشکده علوم پایه

پایان نامه کارشناسی ارشد

اندازه گیری و مقایسه پارامترهای تقویت لیزر بخار مس با گازهای کمکی مختلف

از

هانیه کاظمی

استاد راهنما:

دکتر حمیدرضا مشایخی

دکتر سعید بهروزی نیا

دی ۱۳۸۹



مقدمه



مقدمه

لیزر یکی از مهم ترین ابزار اختراع شده در نیمه دوم قرن بیستم است که بدون شک یکی از برجسته ترین ابزار علمی و فنی این قرن به شمار می آید. ویژگی های منحصر به فرد پرتوهای لیزر سبب شده است که این وسیله نه تنها به عنوان یک فن آوری مطرح باشد بلکه به پیشرفت، رشد و تکامل بسیاری از فن آوری های دیگر هم کمک کند.

لیزرهای بخار فلز، با ماده فعال بخار فلزی، یکی از مهم ترین لیزرهای گازی محسوب می شوند که کاربردهای فراوانی در زمینه های مختلف پزشکی، طیف نگاری، تمام نگاری، دمش اپتیکی لیزرهای رنگ و برش فلزات دارند [1].

از ویژگی هایی که لیزرهای بخار فلزات را مورد توجه قرار داده است، می توان به قابلیت رسیدن به توان و بهره بالا در محدوده فرسرخ، مرئی و فرابنفش اشاره کرد. بر اساس محاسبات انجام شده، بهره این لیزرها می تواند تا حدود 10% برسد [2]. به دلیل ضریب بهره بالای این نوع لیزرها، آن ها این قابلیت را دارند تا در کاواکی با یک آینه و یا حتی بدون آینه کار کنند.

لیزر بخار مس با ماده فعال بخار مس در رده لیزرهای بخار فلزی قرار می گیرد. این لیزر در دو طول موج سبز 510/6 nm و زرد 578/2 nm نوسان می کند. لیزرهای Cu-AuVL می توانند در سه یا چهار طول موج سبز، زرد، قرمز و فرابنفش به طور هم زمان عمل کنند.

به دست آوردن توان بالای لیزری از جمله مواردی است که همواره فکر دانشمندان را به خود مشغول کرده است. آن ها برای رسیدن به این هدف روش های مختلفی به کار گرفته اند. از آن جمله می توان به افزایش حجم محیط فعال، استفاده از گازهای افزودنی مانند هیدروژن و نیز روش کلیدزنی Q اشاره کرد. استفاده از این روش ها با محدودیت هایی همراه است. به عنوان نمونه، افزایش حجم محیط فعال از طریق افزایش طول لیزر در لیزرهای با تخلیه الکتریکی طولی نیازمند اعمال ولتاژهای بسیار بالا بوده و ساخت چنین منابع تغذیه ای با مشکلات فراوانی همراه است. یکی از دلایل استفاده از گاز هیدروژن، نزدیک بودن ترازهای انرژی این مولکول به ترازهای انرژی ماده فعال لیزری است و همین امر باعث شده است که استفاده از هیدروژن در همه لیزرها ممکن نباشد. روش کلیدزنی Q¹ تنها در مورد لیزرهایی با طول عمر به اندازه کافی بالای حالت برانگیخته (حدود ms) مانند نئودیموم و یاقوت امکان پذیر است، حال آنکه در لیزرهای گازی به دلیل کوتاهی طول عمر حالت برانگیخته (حدود چند ده نانو ثانیه)، این روش موفق نبوده است.

¹ Q-Switching



استفاده از سیستم نوسانگر - تقویت کننده لیزری یکی از روش های اصلی برای رسیدن به پرتوی لیزری با توان خیلی بالا هم زمان با کیفیت بسیار خوب است. در این روش از چند لیزر به صورت زنجیره ای استفاده می شود که یکی از این لیزرها به عنوان نوسانگر اصلی و لیزر یا لیزرهای دیگر به عنوان تقویت کننده مورد استفاده قرار می گیرند [3].

در این پایان نامه به تعیین پارامترهای تقویت، توان خروجی تقویت کننده و رفتار آن ها بر حسب فرکانس دمش، فشار و نوع گاز کمکی پرداخته شده است. ضمن این که برای اولین بار، تأثیر هوا به عنوان یک گاز کمکی بر روی پارامترهای تقویت و توان خروجی تقویت کننده بررسی شده است.

فصل اول دربرگیرنده مروری کوتاه بر تاریخچه لیزرهای بخار مس می باشد که در آن به کاربردهای این لیزر نیز اشاره شده است. فصل دوم پایان نامه به لیزر بخار مس و فصل سوم به بهره و نظریه تقویت اختصاص داده شده است. در فصل چهارم، مهندسی سیستم نوسانگر - تقویت کننده لیزر بخار مس توضیح داده شده است و در فصل پنجم به گزارش آزمایش های انجام شده و بررسی نتایج آن ها پرداخته شده است.



فصل 1

تاریخچه لیزرهای بخارمس



1-1- تاریخچه

بعد از پیدایش لیزرهای گازی، این انگیزه برای دانشمندان علوم به وجود آمد تا بتوانند در محیط بخار فلزات نیز لیزر ایجاد کنند و سرانجام در دهه 1960 به این منظور دست یافتند.

دومین لیزر گازی و اولین لیزر بخار فلزی، لیزر Cs (سزیم) با دمش نوری بود که در سال 1958 توسط گروه گلد¹ [4] معرفی و در سال 1962 ساخته شد. این لیزر به صورت موج پیوسته (CW) نوسان می کرد. اما رژیم تپی لیزر اتم های فلزات، اولین بار در سال 1965 بر روی لیزر بخار منگنز تحقق یافت [5].

اولین نوسان لیزری از لیزر بخار مس در اواخر آگوست 1965 مشاهده گردید، که در آن لوله تخلیه از جنس آلومینا تا حدود 1500°C به وسیله یک کوره گرم می شد. در این لیزر توان قله در انتقال خط سبز به $2/1\text{ kW}$ با پهنای 20 ns و بازدهی $0/1$ درصد رسید [6]. اولین CVL² در سال 1966 توسط والتر و همکارانش اختراع شد که در آن با استفاده از یک منبع تغذیه ولتاژ بالای مستقیم و یک سویچ تایروترون، توان خروجی میانگین 20 mW در ازای قطر 10 mm و طول 80 cm با آهنگ تکرار 660 Hz به دست آمد [7]. یک سال بعد والتر به همراه شخصی به نام گلد توانستند لیزری با قطر 50 mm را بسازند که در آن توان خروجی به 40 kW و بازدهی به $1/2$ درصد رسید. در ضمن با افزایش آهنگ تکرار تا 1 kHz توان خروجی میانگین به $0/5\text{ W}$ رسید و این باعث شد تا والتر برای اولین بار کمپانی لیزرهای بخار مس را در سال 1968 افتتاح کند. در اوایل دهه هفتاد، پتراش³ و همکارانش در مسکو، موفق شدند آهنگ تکرار پالس را به چندین کیلوهرتز برسانند به طوری که با آهنگ تکرار $2/5\text{ kHz}$ در لیزری به قطر 25 mm و طول 25 cm توان خروجی 25 mW به دست آمد. سپس لیزر بخار مسی با قطر لوله 8 mm و آهنگ تکرار 10 kHz در سال 1972 ساخته شد که توان $2/4\text{ W}$ را تولید کرد [8].

نخستین لیزر بخار مس خود گرمکن در سال 1974 توسط فاهلن⁴ ساخته شد که افزایش قابل توجهی در توان و بازدهی لیزر به همراه داشت [9]. این لیزر در سال 1975 توسط دکر⁵ برای دمش لیزرهای رنگ مورد استفاده قرار گرفت.

¹Gould

²copper vapor laser

³Petrash

⁴Fahlen

⁵Decker



در سال 1975 لیزرهای بسته¹ توسط بوخان² و اندرسون³ به عرصه فن آوری وارد شدند [10]. در ادامه روند تکاملی این لیزر، فشار گاز کمکی تا حدود 300 تور افزایش یافت تا ضمن جلوگیری از اتلاف مس و آلودگی پنجره ها، طول عمر لوله به 3000 ساعت رسانده شود. مجموعه این تمهیدات به فن آوری لیزر بسته تجاری Milan-10M در سال 1980 منجر شد که توان میانگینی معادل با 7-10 W تولید می کرد [11].

اولین لیزر با قطر بزرگ به قطر تیوب 60 mm و طول تخلیه 122 cm همراه با طراحی جدید، قادر به تولید توان میانگین 60-65 W با آهنگ تکرار 4-5 kHz گردید [12]. در سال 1982، لیزری به قطر 80 mm و طول 122 cm ساخته شد که توان خروجی 110 W از آن به دست آمد [13].

لویس⁴ در سال 1990 آزمایشی بر روی دو لیزر طلا و مس با قطر و طول تیوب یکسان انجام داد و رفتار توان خروجی لیزر را بر حسب فرکانس بررسی کرد. او مشاهده کرد توان خروجی هر دو لیزر با افزایش فرکانس به طور خطی افزایش می یابد ولی میزان تغییرات طلا نسبت به مس کندتر است، به طوریکه در آن فرکانس اشباعی برای توان خروجی مشاهده نکرد. او بیشترین توان خروجی به دست آمده برای لیزر طلا را در فرکانس 9 kHz، 16 W با بهره 0/2 درصد گزارش داد و پیش بینی کرد توان های بالاتری نیز با افزایش فرکانس به دست آید. وی بالاترین توان خروجی را برای لیزر بخار مس در بازه فرکانسی 20-40 kHz گزارش داد و مشاهده کرد توان خروجی با افزایش فرکانس، ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد [14].

1-1-1- تاریخچه نوسانگر - تقویت کننده لیزر

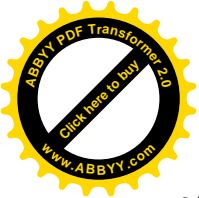
یکی از اهدافی که همواره دانشمندان در پی تحقق آن بوده اند، حصول شدت بالا از لیزرها می باشد. لذا برای به دست آوردن توان بالا هم زمان با کیفیت بالای پرتو لیزری به فکر استفاده از سیستم نوسانگر - تقویت کننده لیزری افتادند. متأسفانه تاریخچه دقیقی از این که اولین سیستم نوسانگر - تقویت کننده لیزری در چه سالی و توسط چه کسی و در مورد چه لیزری ساخته شده است وجود ندارد. در زیر به برخی از کارهای صورت گرفته در این زمینه اشاره شده است.

¹Sealed-off

²Bokhan

³Anderson

⁴Lewis



در سال 1979 هارگو¹ و همکارانش با استفاده از دو لیزر با طول های یکسان 45cm و قطرهای 1/8cm و 2/2cm به ترتیب به عنوان نوسانگر و تقویت کننده، که در آن از تشدیدگر ناپایدار استفاده شده بود، موفق به ساخت نوسانگر - تقویت کننده لیزر بخار مس شدند. آن ها به بررسی رفتار پارامترهای تقویت بر حسب چگالی عددی مس پرداختند و در بهترین شرایط، با چگالی عددی مس $1/6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ، مقادیر بهره سیگنال ضعیف $(g_0)^2$ و چگالی انرژی اشباع (E_s) را به ترتیب $0/25 \text{ cm}^{-1}$ و $67 \mu\text{j/cm}^2$ گزارش کردند. همچنین آن ها مشاهده کردند که در چگالی های عددی بالای مس، مقدار g_0 برای هر دو گذار سبز و زرد به هم نزدیک می شود [15].

کازاریان³ و همکارانش در سال 1984 مقدار g_0 را در محیط تقویت بخار مس با طول 45cm و قطر 2/1cm و در فرکانس عملکرد 7 kHz، برابر با $0/22 \text{ cm}^{-1}$ گزارش کردند [16].

در سال 1995، یپ⁴ و همکارانش با استفاده از دو لیزر N_2 با تخلیه الکتریکی عرضی به بررسی رفتار توان خروجی بر حسب فشار پرداختند. آن ها مشاهده کردند که با افزایش فشار در بازه 40-140 mbar، میزان زمان تأخیر بهینه افزایش می یابد. همچنین مشاهده کردند که در فشار حدود 80 mbar، خروجی نوسانگر به بیشینه مقدار خود می رسد در حالی که در فشار برابر با 130 mbar با وجود توان خروجی کم نوسانگر، توان خروجی از تقویت کننده، بیشینه مقداری برابر با 2 mJ داشته و در این شرایط با استفاده از تقویت کننده، توان 6 برابر تقویت شده است. در چنین شرایطی مقادیر $g_0 = 0/16 \text{ cm}^{-1}$ و $E_s = 128 \mu\text{j/cm}^2$ گزارش شد [17].

در سال 1996، دکتر سلیمی نیا⁵ و همکارانش با استفاده از سیستم نوسانگر - تقویت کننده لیزر یون نیتروژن با تخلیه الکتریکی عرضی، به بررسی رفتار پارامترهای تقویت بر حسب فشار گاز کمکی هلیوم پرداختند. آن ها لیزرهایی به طول 55cm و 48cm را به ترتیب به عنوان نوسانگر و تقویت کننده استفاده کردند و با استفاده از رابطه تقویت هوفف مقادیر g_0 را برابر با $0/0425 \text{ cm}^{-1}$ ، $0/07008 \text{ cm}^{-1}$ و $0/10113 \text{ cm}^{-1}$ و مقادیر شدت اشباع⁶ (I_s) را برابر با $7/77 \text{ kW/cm}^2$ ، $13/33 \text{ kW/cm}^2$ و $19/97 \text{ kW/cm}^2$ به ترتیب به ازای فشارهای 1/25atm، 1/7atm و 2/2atm گزارش کردند [18].

¹Hargrove

²Small signal gain

³Kazaryan

⁴Yap

⁵Saliminia

⁶Saturation intensity



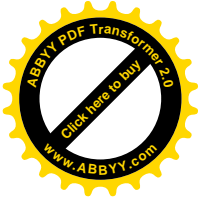
دکتر پروین¹ و همکارانش در سال 1997 با استفاده از دو لیزر ایگزایمر XeF با ابعاد $40 \times 5 \times 4 \text{ cm}$ و $62 \times 5 \times 4 \text{ cm}$ به ترتیب به عنوان نوسانگر و تقویت کننده و با استفاده از گاز کمی هلیوم، مقادیر g_0 و I_s را به کمک رابطه هوف² به ازای فشارهای 2 atm و $2/5 \text{ atm}$ به ترتیب برابر با $0/08 \text{ cm}^{-1}$ و $0/1 \text{ cm}^{-1}$ و 500 kW/cm^2 و 585 kW/cm^2 گزارش کردند و با مقایسه با کاری که دکتر صادقی و همکارانش در سال 1982 انجام داده بودند [19]، متوجه شدند با افزایش فشار، g_0 و I_s افزایش می یابند [20].

نمونه ای دیگر از سیستم نوسانگر - تقویت کننده لیزر بخار مس در سال 2003 توسط دکتر بهروزی نیا³ و همکارانش گزارش شده است. آن ها از دو تیوب استوانه ای مشابه به قطر 3 cm و طول 130 cm و تشدیدگر ناپایدار استفاده کرده بودند و با در نظر گرفتن توان الکتریکی ورودی $4/2 \text{ kW}$ ، فرکانس عملکرد $5/8 \text{ kHz}$ و فشار گاز نئون 30 torr برای محیط نوسانگر، فشار گاز نئون را برای محیط تقویت کننده در بازه $25-75 \text{ torr}$ تغییر دادند و به ازای هر فشار، شرایط هم زمان سازی را بررسی کردند و در فشار بهینه 30 torr ، توان خروجی از نوسانگر و تقویت کننده را به ترتیب 20 W و 32 W و با استفاده از رابطه هارگرو، پارامترهای تقویت را $g_0 = 0/11 \text{ cm}^{-1}$ و $E_s = 36/1 \mu\text{j/cm}^2$ گزارش کردند. همچنین مشاهده کردند که با افزایش فشار، E_s به طور خطی افزایش یافته در حالی که g_0 به طور خطی کاهش یافته است [21]. آن ها در سال 2004 به منظور تعیین دمای بهینه کاری لیزر بخار مس و رفتار پارامترهای تقویت بر حسب دما، آزمایش دیگری بر روی همین لیزرها انجام دادند و توان الکتریکی ورودی به نوسانگر برابر با 4 kW ، فرکانس $5/8 \text{ kHz}$ و فشار گاز نئون 30 torr را در نظر گرفتند در حالی که توان الکتریکی ورودی به تقویت کننده را در بازه $3/5-5 \text{ kW}$ متناظر با دمای $1500-1650^\circ \text{C}$ ، تغییر دادند و به ازای دمای 1520°C بیشینه توان خروجی را برابر با 33 W و نیز پارامترهای تقویت را برای گذار سبز $g_0 = 0/1 \text{ cm}^{-1}$ و $E_s = 31 \mu\text{j/cm}^2$ و برای گذار زرد $g_0 = 0/08 \text{ cm}^{-1}$ و $E_s = 33 \mu\text{j/cm}^2$ گزارش کردند. همچنین آن ها مشاهده کردند که با افزایش دما، E_s کاهش و g_0 افزایش یافته است [22].

¹Parvin

²Hopf

³Behrouzina



فصل 2

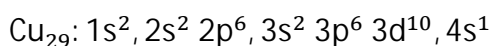
ليزر بخارمس



1-2- ثابتهای فیزیکی و شیمیایی مس

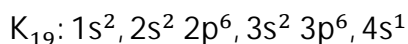
مس با علامت اختصاری Cu در گروه 9 واسطه جدول تناوبی و همراه با طلا و نقره قرار دارد. عدد اتمی آن 29 و وزن اتمی اش 63/55 gr/mol می باشد. آرایش اربیتال مس مشابه طلا بوده با این تفاوت که در مس، آرایش اربیتال در $4s^1$ کامل می شود در حالی که در طلا، آرایش اربیتال در $6s^1$ کامل می شود. بنابراین از نظر سطوح انرژی و گذارهای لیزری، مس می تواند مشابه طلا عمل کند، البته دما و فشار برای طلا افزایش می یابد. این تشابه باعث شده که لیزرهای طلا و نقره نیز همانند مس از نظر اصول فیزیکی مطالعه شوند و مورد مقایسه قرار بگیرند.

آرایش اربیتال مس به این صورت است:



و از آنجا که مس دارای یک الکترون آزاد در مدار آخر خود می باشد، مشابه فلزات قلیایی گروه 1 است. به عنوان مثال

آرایش اربیتال پتاسیم به صورت زیر است:



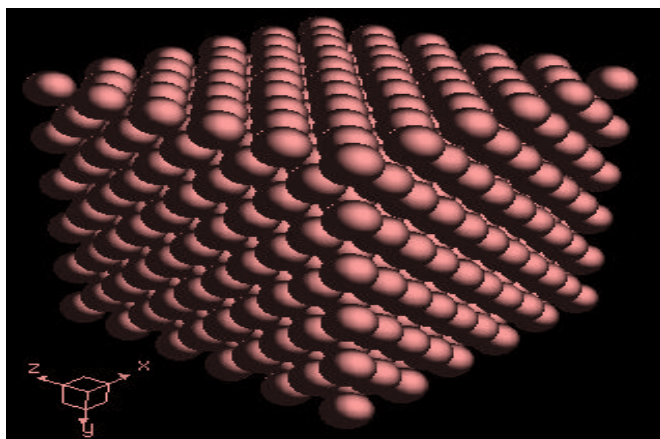
واضح است که در پتاسیم، اربیتال 3d تشکیل نمی شود در حالی که در مس این اربیتال کامل می شود و از این جهت

وابستگی مداری اسپین لایه ظرفیت مس بیشتر از پتاسیم است و این ویژگی باعث بروز خواص کوانتومی ویژه ای مانند جفت شدگی اسپین - مدار، برای مس و فلزات مشابه آن می شود.

مس عنصری جامد و غیر قابل احتراق است و به صورت خالص در طبیعت وجود دارد. مس خالص به رنگ مایل به

قرمز و دارای جلای فلزی است. این عنصر چکش خوار با قابلیت مفتول شدن، رسانای خوب جریان الکتریسیته است و

دومین عنصر رسانا بعد از نقره می باشد که از نقره به علت گرانی در سیم ها استفاده نمی کنند.



شکل 1-2: ساختار بلوری مس



اولین آلیاژ مس که اختراع شد، برنز است که این ترکیب مخلوطی از مس و 25 درصد قلع می باشد. برنج آلیاژ دیگری از

مس است که ترکیبی از مس و بین 5 تا 45 درصد روی می باشد.

این عنصر دارای دو ظرفیت 1 و 2 است و در حالت طبیعی دارای دو ایزوتوپ ^{63}Cu و ^{65}Cu با اسپین هسته $3/2$

می باشد. برخی مشخصات مهم فیزیکی مس در جدول (1-2) خلاصه شده است.

جدول 1-2: برخی از مشخصات فیزیکی مس

1357/6 K	نقطه ذوب
2840 K	نقطه جوش
8920 kgm^{-3}	چگالی جرمی
135 pm	شعاع اتمی
138 pm	شعاع کووالانسی
140 pm	شعاع واندروالسی

2-2- آرایش ترازهای لیزر بخار مس و طول عمر گذارها

حالت پایه اتم مس $^2\text{S}_{1/2}$ با آرایش الکترونی $3d^{10}4s^1$ می باشد. از آنجا که در آرایش اربیتال مس، تراز 4s به 3d

خیلی نزدیک است، بین این دو سطح انرژی، جفت شدگی اسپین - مدار به وجود می آید. به طوری که تراز بالایی لیزر، ^2P

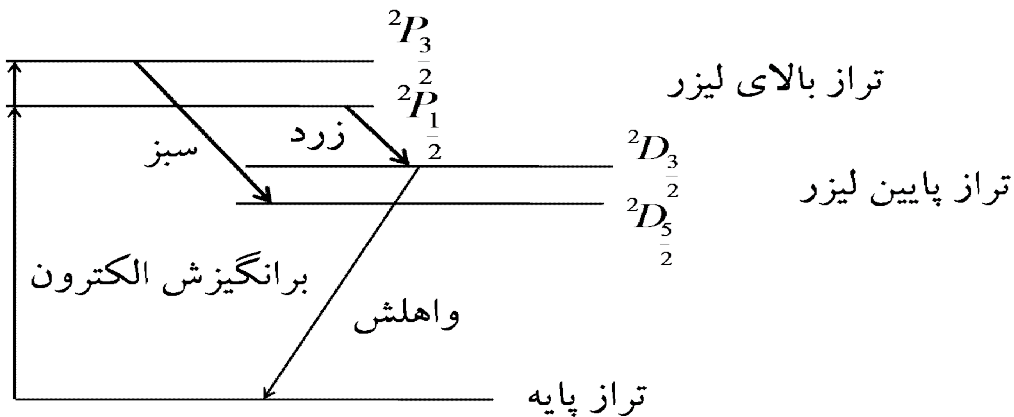
به دو زیر تراز $^2\text{P}_{1/2}$ و $^2\text{P}_{3/2}$ و تراز پایین ^2D نیز به دو زیر تراز $^2\text{D}_{3/2}$ و $^2\text{D}_{5/2}$ شکافته می شود. با ارتقاء الکترون خارجی تراز

پایه 4s به ترازهای تحریکی بالای لیزر $^2\text{P}_{1/2}$ و $^2\text{P}_{3/2}$ از طریق تخلیه الکتریکی طولی و گذار به ترازهای شبه پایدار $^2\text{D}_{3/2}$ و

$^2\text{D}_{5/2}$ ، نوسان لیزر در طول موج های زیر شکل می گیرد.

1- گذار لیزری ($4p \ ^2\text{P}_{3/2} \rightarrow 4s^2 \ ^2\text{D}_{5/2}$)، در ناحیه سبز در خط 510/6 nm (2/43 ev).

2- گذار لیزری ($4p \ ^2\text{P}_{1/2} \rightarrow 4s^2 \ ^2\text{D}_{3/2}$)، در ناحیه زرد در خط 578/2 nm (2/14 ev).



شکل 2-2: ترازهای انرژی و گذارهای لیزر بخار مس

دمش لیزر بخار مس از طریق تخلیه الکتریکی صورت می گیرد. سطح مقطع گذار $2S \rightarrow 2P$ خیلی بزرگتر از $2S \rightarrow 2D$ است. بنابراین گذارهای $2S \rightarrow 2P$ به صورت تشدید می شوند و جمعیت زیادی در $2P$ انباشته می شود. به دلیل محدودیت های کوانتومی، امکان تابش القایی بین این دو تراز فراهم نیست و تنها از طریق فروافت مؤثر از گذارهای $2D \rightarrow 2P$ و بعد $2D \rightarrow 2S$ حاصل می شود.

در اثر برخورد الکترون های با دمای معین به اتم های مس، جمعیت تراز بالا بیشتر از جمعیت تراز پایین می شود و در نتیجه جمعیت وارون و در پی آن نوسان لیزری انجام می شود. تا این که جمعیت دو تراز با هم برابر شده و اشباع رخ می دهد و در انتها در مدت زمان بین پالس های متوالی لیزر، الکترون ها از تراز پایین تخلیه شده و به تراز زمینه می روند، به طوری که شرایط برای برانگیزش تراز بالایی لیزر و تولید پالس بعدی آماده می گردد. طول عمر تابش القایی برای خط سبز و زرد به ترتیب 784 ns و 370 ns است.

طول عمر تراز پایینی لیزر در نوع عملکرد لیزر به صورت پیوسته و یا پالسی، تعیین کننده است. در این جا $\tau_{32} \ll \tau_{21}$ است، لذا لیزر مس نمی تواند به طور پیوسته لیز دهد بلکه به صورت پالسی عمل می کند و به همین دلیل به آن لیزر خودپایانده¹ می گویند.

¹Self-terminated laser



2-3- سیستیک لیزر بخار مس

لیزر بخار مس یکی از انواع لیزرهای بخار فلزی است که در آن از مس به عنوان محیط فعال به همراه یک نوع گاز کمکی (نئون یا هلیوم) بهره گرفته می شود. نوسان لیزری در گستره وسیعی از فشار گاز کمکی انجام می شود. سیستیک این لیزر شامل دمش تراز بالای لیزر از طریق تخلیه الکتریکی و برخورد الکترونی می باشد. در فرآیند دمش این نوع لیزرها، برهم کنش های مختلفی روی می دهد که ناشی از تابش های نوری و برخوردهای الکترون-اتم و اتم-اتم می باشند.

ساده ترین نوع برخورد الکترون - اتم، برخورد الاستیک¹ است که در انرژی های کم (میدان الکتریکی و یا اختلاف پتانسیل های کم) رخ می دهد. در این برخوردها، انرژی جنبشی الکترون بعد از برخورد، محفوظ مانده و الکترون نمی تواند انرژی را به اتم منتقل کند. با افزایش انرژی الکترون که همراه با افزایش ولتاژ اعمالی است، برخوردهای غیر کشسان² غالب می شوند. در این برخوردها انتقال انرژی داخلی به اتم صورت گرفته و برانگیزش اتم اتفاق می افتد. در واقع، برخوردهای ناکشسان الکترون ها با اتم های بخار مس باعث برانگیزش بخارهای مس شده که در نتیجه جمعیت وارون پدید می آید.

واکنش های فیزیکی و شیمیایی که در داخل پلاسمای یک لیزر بخار فلز صورت می گیرد به دو دسته برخوردهای در زمان تخلیه و برخوردهای بعد از زمان تخلیه تقسیم می شوند. منظور از طول زمان تخلیه الکتریکی زمانی است که در آن پالس جریان شروع می شود و به بیشینه مقدار خود می رسد. پس از افت جریان از مقدار بیشینه خود، مرحله دوم یعنی زمان بعد از تخلیه آغاز می شود و تا زمان رسیدن پالس بعدی ادامه دارد. شرح کامل این برهم کنش ها در مرجع [33] آمده است.

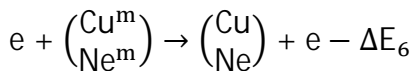
در این جا به مختصری از این برهم کنش ها اشاره شده است:

الف) سازوکارهای برخوردی در زمان تخلیه:



¹Elastic collision

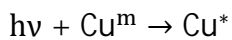
²Inelastic collision



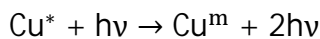
واهلش یا برخورد ابرکشسان از تراز شبه پایدار



گسیل خودبه خودی



جذب القایی



گسیل القایی

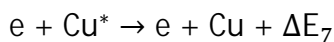
m نمایانگر اتم در تراز شبه پایدار، * نمایانگر اتم در تراز بالای لیزر و ** نمایانگر اتم در تراز بالاتر از تراز بالای لیزر

است.

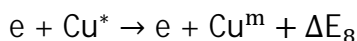
(ب) سازوکارهای برخوردی در زمان بعد از تخلیه:

زمان پس از تخلیه، از لحظه افت پالس جریان آغاز شده و تا زمان رسیدن پالس بعدی ادامه می یابد. در این حالت، واکنش ها عمدتاً به سمت بازترکیب و تولید انرژی گرمایی پیش می روند. این واکنش ها باعث ایجاد تعادل در پلاسما شده و در نهایت باعث کاهش جمعیت الکترون ها، یون ها و چگالی اتم مس در ترازهای مختلف انرژی می شوند. سازوکارهای برخوردی مهم پس از تخلیه، زمانی که دمای الکترون به اندازه کافی پایین می آید، عبارتند از:

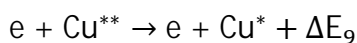
واهلش های تراز فوقانی لیزر (برخورد تابشی):



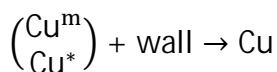
واهلش (ابركشسان)



گسیل خودبه خودی



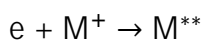
واهلش ترازهای بالاتر از ترازهای فوقانی لیزر



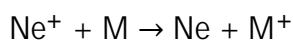
برخوردهای واهلشی (واهلش با دیواره)



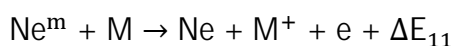
فروافت برخوردی



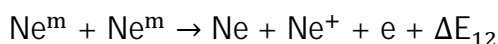
بازترکیب تابشی



برخوردهای تبادل بار



برخوردهای پنینگ

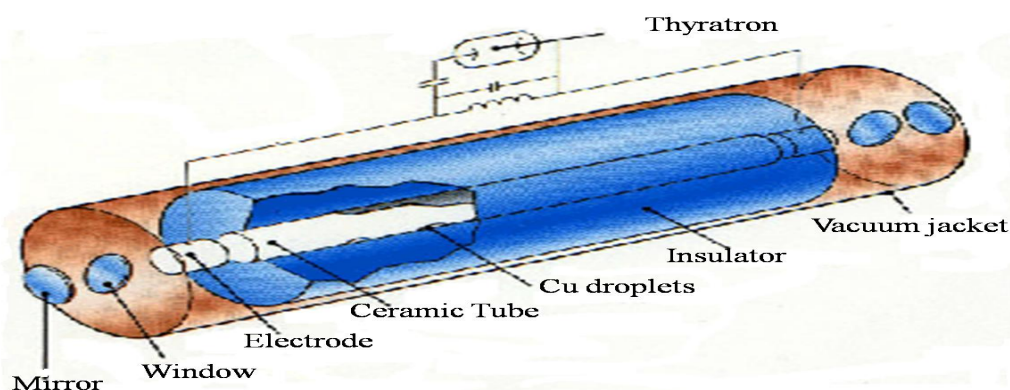


که M و M* به ترتیب نماینده تمام اتم ها و مولکول های خنثی و برانگیخته و + نمایانگر یون متناظر با اتم M می باشد.

2-3-1- تخلیه الکتریکی در لیزر بخار مس

تخلیه الکتریکی در لیزرهای بخار مس به دو روش تخلیه طولی¹ LE و تخلیه عرضی² TE انجام می شود. لیزرهای با تخلیه عرضی با هدف دست یابی به توان های بالاتر ولی در حجم های کوچک مورد توجه قرار گرفته اند. در این روش، راستای تخلیه الکتریکی عمود بر محور اپتیکی لیزر است، حال آنکه در تخلیه طولی، جریان الکتریکی در امتداد محور اپتیکی لوله عبور کرده و تخلیه در راستای محور تیوب صورت می گیرد. با وجود برخی مزایای تخلیه الکتریکی عرضی نسبت به طولی [33]، این روش تخلیه در لیزرهای بخار فلزی کارا نیست. زیرا برای حفظ دمای دیواره محفظه تخلیه در سطح دمای کاری، گرم کن های مخصوصی لازم است [34] که باعث ایجاد مشکل در طراحی محفظه تخلیه و در نتیجه کاهش کارایی کلی لیزر می شود. البته احتمال می رود که محفظه تخلیه لیزرهای با تخلیه عرضی در آینده در یک تکنولوژی پلاسما - شیمیایی کاربرد پیدا کنند، زیرا در آنجا نیازی به گرم کردن دیواره محفظه تا دماهای بالا نیست [35].

علاوه بر این، طراحی این لیزرها از نظر بستن تیوب و خنک سازی مشکل است و الکترودها نیز باید دارای طراحی مناسب باشند تا در فشار بخار کنترل شده فلز، تخلیه ای پایدار و یکنواخت ایجاد شود. بنابراین اکثر لیزرهای بخار مس نیز از نوع خود گرمکن و با تخلیه الکتریکی طولی هستند. با اعمال توان الکتریکی نسبتاً زیاد و استفاده از عایق بندی مناسب می توان درجه حرارتی در حدود 1600°C را در داخل محفظه تخلیه برقرار کرد. این عایق حرارتی، خود منبع ناخالصی می باشد که باعث افت شدید و ناپایداری عملکرد این لیزرها می گردد، اما به کمک شارش کندی از جریان گاز کمکی، می توان ناخالصی ها را از محیط تخلیه کرد. علاوه بر این، شارش گاز کمکی در یکنواخت شدن حرارت داخل تیوب نیز مؤثر است. در شکل 2-3 مقطعی از تیوب لیزر بخار مس با تخلیه طولی نشان داده شده است.



شکل 2-3: مقطعی از تیوب لیزر بخار مس با تخلیه طولی

¹Longitudinal Electric Discharge

²Transverse Electric Discharge



2-4- پارامترهای اساسی لیزر بخار مس

عوامل متعددی بر روی توان خروجی لیزر نقش مؤثری را ایفا می کنند که با تعیین مقدار بهینه هر کدام از این پارامترها، می توان به بیشینه توان خروجی لیزر دست یافت. اندازه هندسی محیط فعال، فرکانس تکرار پالس ها¹، ضرایب بازتاب آینه ها، فشار گاز کمکی و انرژی الکتریکی ورودی، مهم ترین پارامترهای تأثیر گذار بر روی توان خروجی لیزر می باشند. در این بخش اثر برخی از این پارامترها بر توان خروجی لیزر به اختصار بیان شده است.

2-4-1- حجم محیط فعال

از آنجا که حجم تیوب لیزر به طور مستقیم با حجم محیط فعال رابطه دارد، به طور مستقیم بر روی توان خروجی لیزر نیز تأثیر می گذارد. در امر بهینه سازی خروجی لیزر، عامل اصلی محدودیت در افزایش طول محیط فعال، ناشی از تلفات انرژی تولیدی در پرتوهای غیر محوری می باشد [35]. علاوه بر این در لیزرهای با تخلیه الکتریکی طولی، این محدودیت، ناشی از بیشینه ولتاژ اعمالی به دو سر تیوب می باشد.

2-4-2- آهنگ تکرار یا فرکانس (PRF)

مقدار PRF متناظر با بیشینه توان خروجی لیزرهایی به قطر 10-60 mm، تقریباً متناسب با عکس قطر لوله D می باشد، به طوری که:

$$PRF_{max} = \frac{300}{D} \quad (1-2)$$

که در آن، PRF بر حسب کیلوهرتز و قطر لوله بر حسب میلی متر می باشد [36]. با در نظر گرفتن چگالی انرژی معادل با $4 \mu\text{j}/\text{cm}^2$ برای چنین لیزرهایی، بیشینه توان خروجی میانگین را می توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$P_{av}^{max} = \frac{LD}{100} \quad (2-2)$$

که در آن P_{av}^{max} بر حسب وات، D قطر لوله بر حسب میلی متر و L طول تخلیه بر حسب سانتی متر است. در لیزرهای با قطر کوچک 1/6-8 mm مقدار PRF در بازه 100-235 kHz گزارش شده است [37 و 38]. در این نوع لیزرها با فشار پایین گاز کمکی، نفوذ اتم های مس از دیواره لوله به محور لوله عامل تعیین کننده بیشینه PRF می باشد. در لیزرهای با قطر بزرگتر از 60 mm، بسته به شرایط تخلیه، مقدار بیشینه PRF ثابت و در حدود 4-5 kHz است. در چنین لیزرهایی، اثر نفوذ

¹Pulse repetition rate



اتم های مس چندان مهم به نظر نمی رسد بلکه مقدار بیشینه PRF عمدتاً به وسیله فرآیندهای حجمی مانند واهلش و بازیافت محیط فعال تعیین می گردد. لذا بیشینه PRF بستگی کمتری به قطر لوله دارد.

2-4-3- بستگی دمای الکترونی به دمای دیواره تیوب

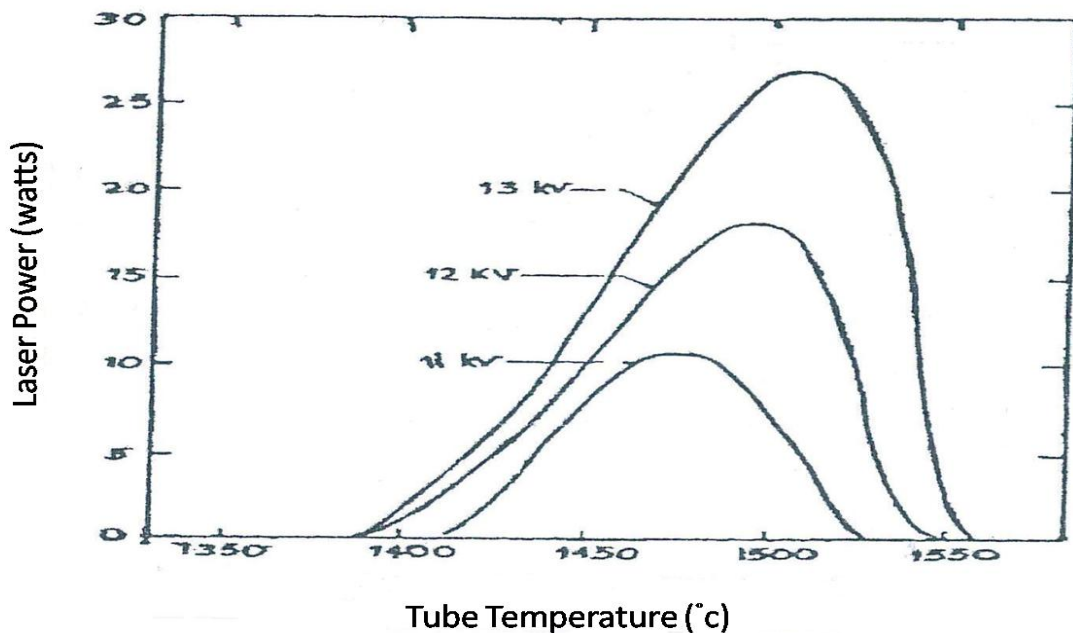
چگالی بخار مس بر حسب دمای دیواره تیوب از رابطه زیر به دست می آید [39]:

$$n_{Cu} = 1.23 \times 10^7 \exp(0.0124T_w) \text{cm}^{-3} \quad (3-2)$$

که n چگالی و T_w دمای دیواره تیوب است. با افزایش دمای تیوب، چگالی بخار مس به طور نمایی و در نتیجه فشار بخار مس افزایش می یابد. لذا دمای دیواره تیوب، عامل مهم کنترل کننده فشار بخار مس است. در دمای 1600°C فشار بخار مس در حدود $0/3 \text{ torr}$ می باشد. در دماهای پایین، پرتو خروجی عمدتاً خط سبز است و با افزایش دمای دیواره تیوب، خط زرد شروع به نوسان می کند. در بیشینه توان خروجی کل، نسبت شدت نور سبز به زرد برابر است با $3/2$ [36]. فشار بخار مس، P_{Cu} بستگی به شدت میدان الکتریکی دارد به طوری که در لیزرهای به قطر $3-40 \text{ mm}$ بایستی رابطه زیر برقرار باشد [40]:

$$\frac{E}{P_{Cu}} = 0.3 - 0.48 \left(\frac{\text{kv}}{\text{torr.cm}} \right) \quad (4-2)$$

در واقع با افزایش دمای دیواره تیوب، تعداد اتم های شرکت کننده در فرآیند لیزری زیاد شده که این امر سبب افزایش توان خروجی لیزر می گردد. از طرفی چنانچه چگالی بخار فلز بسیار زیاد شود، الکترون ها در نتیجه تعداد برخورد بیشتر، انرژی خود را از دست داده و در نهایت منجر به کاهش دمای الکترونی و توان خروجی لیزر می شوند، تا جایی که کاهش دمای الکترونی به حدی می رسد که انرژی الکترون ها قادر به انجام گذار تحریکی $^2S \rightarrow ^2P$ نخواهد بود و توان خروجی صفر می شود. به این معنا که پرتو سبز کاملاً از بین رفته و فقط پرتو زرد باقی خواهد ماند. بنابراین طبق شکل 2-4، به ازای یک دمای بهینه، توان خروجی لیزر دارای بیشینه مقدار است.



شکل 2-4: توان خروجی لیزر بر حسب دمای تیوب برای ولتاژهای 11 kV و 12 kV و 13 kV [1].

2-4-4- ولتاژ و جریان تیوب

در تیوب های کوچک و متوسط ولتاژهای 3 الی 30 کیلوولتی به کار می روند. قله جریان تخلیه به صدها آمپر می رسد که به قطر تیوب، آهنگ تکرار فرکانس و فشار گاز بستگی دارد. بسته به نوع مدار تخلیه و طراحی لیزر، زمان خیزش¹ پالس های ولتاژ و جریان به 30-100ns می رسد. با افزایش ولتاژ اعمال شده به لوله در فشار ثابت بخار مس، میزان تغییرات جریان نسبت به زمان افزایش یافته ، سرانجام عمل اشباع در انرژی خروجی لیزر اتفاق می افتد. با افزایش فشار بخار مس، برای دستیابی به بیشینه توان خروجی، بایستی ولتاژ تیوب افزایش یابد [39]. از طرفی آهنگ جریان نباید بسیار سریع باشد زیرا آهنگ بالای یونش اتم های مس باعث کاهش تحریک به تراز بالای گردیده و در نتیجه بهره لیزری به دلیل تهی سازی² حالت زمینه کاهش می یابد. با افزایش ولتاژ تا آستانه یونیزاسیون فلز، توان خروجی افزایش می یابد. اما از آنجا به بعد، افزایش توان خروجی به دمای دیواره تیوب وابسته می شود.

¹Rise time

²Depletion



2-4-5- گاز کمکی

تجربه نشان داده است که عملکرد لیزر شامل بازدهی، توان خروجی، فرکانس و ... با افزودن گاز کمکی به طور چشمگیری افزایش می یابد. گاز کمکی در محیط فعال لیزرهای بخار فلزی دارای چندین اثر مهم در عملکرد لیزر است که عبارتند از [41 و 42]:

1- گاز کمکی در ایجاد جمعیت معکوس نقش مهمی دارد. ترازهای انرژی اتم های گاز کمکی به گونه ای است که معمولاً ماده فعال لیزر از طریق انتقال انرژی گاز کمکی برانگیخته شده، دمش می شود.

2- از طریق برخورد های ناکشسان الکترون ها، روی تابع توزیع انرژی الکترون اثر می گذارد. دمای الکترون ها در اثر برخورد کشسان با گاز کمکی در زمان بین پالس ها کاهش می یابد و باعث بازترکیب پلاسما در زمان بین دو پالس اعمالی می شود و در نتیجه موجب بازیافت محیط لیزری از طریق فرآیندهای حجمی شده و محیط را برای پذیرفتن پالس بعدی آماده می کند.

3- گاز کمکی، محیط تخلیه را برای ایجاد بخار مس آماده می کند. در واقع قبل از اینکه در محیط بخار فلزی وجود داشته باشد، موجب انتقال تخلیه الکتریکی در طول لوله می شود.

4- معمولاً امپدانس لوله لیزری از امپدانس مدار کمتر است که باعث عدم تطبیق امپدانس مدار و لوله لیزر می شود. افزایش فشار گاز کمکی این مشکل را برطرف می کند. تغییر فشار گاز طبق رابطه پاشن¹، ولتاژ شکست را تغییر می دهد که در نتیجه باعث تغییر جریان و مقاومت تیوب می شود. از طرفی با افزایش فشار، چگالی اتم های شرکت کننده در عمل لیزری و در نتیجه مقاومت تیوب افزایش می یابد که این امر موجب نزدیک شدن امپدانس لوله تخلیه به امپدانس مدار تحریک می شود.

5- گاز کمکی، گرما را از مرکز لوله به دیواره آن منتقل می کند و تقریباً باعث یکنواخت شدن دما می شود.

6- گاز کمکی باعث جلوگیری از اتلاف و نفوذ اتم های بخار فلز از ناحیه گرم مرکزی به ناحیه سردتر پنجره ها می شود و در نتیجه از انباشته شدن اتم های فلز روی پنجره ها، از طریق کاهش طول پراکندگی اتم، جلوگیری می نماید و بدین ترتیب پنجره ها از آلوده شدن محفوظ می ماند و طول عمر تیوب افزایش می یابد.

7- شارش ضعیف گاز نادر باعث خروج ناخالصی های تیوب می شود [1].

¹Paschen