

## فهرست

صفحه

عنوان

### فصل اول: پیش گفتار

- ۱-۱ - پیش گفتار ..... ۲
- ۲-۱ - تاریخچه ..... ۴
- ۳-۱ - کاربردهای لیزر بخار مس ..... ۷

### فصل دوم: لیزر بخار مس

- ۱-۲ - ثابت‌های فیزیکی و شیمیایی اتم مس ..... ۱۰
- ۲-۲ - آرایش ترازها و طول عمر گذارها ..... ۱۰
- ۱-۲-۲ - لیزرهای خودپایان‌ده ..... ۱۴
- ۳-۲ - سینتیک لیزر بخار مس ..... ۱۶
- ۱-۳-۲ - تخلیه الکتریکی در لیزر بخار مس ..... ۱۸
- ۴-۲ - پارامترهای اساسی لیزر بخار مس ..... ۲۰

## فصل سوم: سامانه‌های اجرایی لیزرهای بخار مس؛ نقش گاز کمکی

### در توان خروجی لیزر

- ۲۳ ..... ۱-۳- پیش‌گفتار
- ۲۳ ..... ۲-۳- تجزیه و تحلیل مدار تحریک
- ۲۴ ..... ۱-۲-۳- مدار انتقال بار بر پایه‌ی کلید تایروترون
- ۲۹ ..... ۱-۲-۳- تایروترون هیدروژنی
- ۳۴ ..... ۳-۳- ساختار فنی لیزر بخار مس
- ۳۴ ..... ۱-۳-۳- محفظه‌ی لوله‌ی لیزر و مشخصه‌های الکتریکی آن
- ۳۸ ..... ۲-۳-۳- سامانه‌ی خلأ
- ۳۸ ..... ۳-۳-۳- تشدیدگر نوری
- ۳۹ ..... ۴-۳-۳- منبع تغذیه
- ۴۰ ..... ۴-۳- نقش گازهای کمکی در خروجی لیزرهای بخار فلز
- ۴۳ ..... ۱-۴-۳- محدودیت‌های توان خروجی لیزر بخار مس
- ۴۴ ..... ۲-۴-۳- کاهش چگالی پیش‌تپی (کاهش دمای الکترون)
- ۴۵ ..... ۳-۴-۳- اثر مخلوط گاز نئون با افزودنی‌های هیدروژن‌دار
- ۴۷ ..... ۴-۴-۳- سینتیک اثر هیدروژن

۴۹ ..... KE-CVL لیزرهای ۵-۴-۳

## فصل چهارم: چیدمان آزمایش گاهی

۵۳ ..... ۱-۴ - پیش گفتار

۵۳ ..... ۲-۴ - مدار تحریک و چیدمان آزمایش گاهی

۵۵ ..... ۳-۴ - آماده‌سازی سامانه

۵۶ ..... ۱-۳-۴ - پرکردن آلومینا

۵۷ ..... ۲-۳-۴ - مس‌گذاری (بارگذاری مس)

۵۸ ..... ۳-۳-۴ - تست خلأ

۵۹ ..... ۴-۳-۴ - برطرف کردن نشتی سامانه‌ی خلأ

۶۰ ..... ۴-۴ - راه‌اندازی سامانه‌ی لیزر و نحوه‌ی اندازه‌گیری

۶۹ ..... ۵-۴ - تنظیم آینه‌ها

## فصل پنجم: آزمایش‌ها و نتیجه‌ها

۷۱ ..... ۱-۵ - پیش گفتار

۷۱ ..... ۲-۵ - آزمایش‌های انجام شده

۱-۲-۵ - بررسی رفتار توان خروجی کل برحسب بسامد تخلیه در فشارهای مختلف

۷۲ ..... گاز کمکی

۲-۲-۵- رفتار توان خروجی کل بر حسب فشار گاز کمکی هوا در بسامدهای مختلف ..... ۸۳

۳-۲-۵- بررسی رفتار توان خروجی کل، توان طیف سبز و زرد بر حسب بسامد در فشار

ثابت هوا برای دو شار ورودی متفاوت ..... ۸۵

۳-۵- بررسی اثر هوا بر لیزر بخار مس ..... ۸۸

۴-۵- نتیجه‌گیری ..... ۹۵

۵-۵- پیشنهادها ..... ۹۷

منابع ..... ۹۸

## فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۵۸.....	۱-۴- فشارهای اندازه‌گیری شده برحسب زمان
۷۳.....	۱-۵- توان خروجی کل و توان طیف سبز و زرد برحسب بسامد در توان ورودی $1/4kW$ در فشار $0/038torr$ گاز کمکی هوا با شار ورودی $16Lit/min$
۷۴.....	۲-۵- توان خروجی کل و توان طیف سبز و زرد برحسب بسامد در توان ورودی $1/3kW$ در فشار $3/8torr$ گاز کمکی هوا با شار ورودی $16Lit/min$
۷۶.....	۳-۵- توان خروجی کل و توان طیف سبز و زرد برحسب بسامد در توان ورودی $1/3kW$ در فشار $5/32torr$ گاز کمکی هوا با شار ورودی $16Lit/min$
۷۷.....	۴-۵- توان خروجی کل و توان طیف سبز و زرد برحسب بسامد در توان ورودی $1/3kW$ در فشار $6/08torr$ گاز کمکی هوا با شار ورودی $16Lit/min$
۷۹.....	۵-۵- توان خروجی کل و توان طیف سبز و زرد برحسب بسامد در توان ورودی $1/4kW$ در فشار $7/6torr$ گاز کمکی هوا با شار ورودی $16Lit/min$
۸۱.....	۶-۵- توان خروجی کل و توان طیف سبز و زرد برحسب بسامد در توان ورودی $1/3kW$ در فشار $3/8torr$ گاز کمکی هوا با شار ورودی $8Lit/min$
۸۳.....	۷-۵- توان‌های خروجی بر حسب فشار گاز کمکی هوا در بسامدهای مختلف
۸۶.....	۸-۵- توان خروجی کل و توان طیف سبز و زرد بر حسب بسامد برای دو شار ورودی متفاوت در فشار $3/8torr$ گاز کمکی هوا

## فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۱۰	۱-۲- ساختار عمومی ترازهای انرژی لیزرهای بخار فلز
۱۲	۲-۲- نمودار شماتیک ترازهای انرژی اتم مس و گذارهای لیزر بخار مس
۲۴	۱-۳- مدار تحریک استاندارد که در لیزر بخار مس به کار گرفته شده است
۲۶	۲-۳- مدار پرشدن در لیزرهای بخار مس
۲۸	۳-۳- مدار تخلیه در لیزرهای بخار مس
۳۳	۴-۳- مدار تحریک برپایه‌ی فشرده‌ساز مغناطیسی تپ در لیزر بخار مس
۳۳	۵-۳- مدار تحریک برپایه‌ی IGBT در لیزر بخار مس
۳۴	۶-۳- طرحواره‌ی سامانه‌ی لیزر بخار مس
	۷-۳- شبیه‌سازی کامپیوتری برای افزایش توان خروجی برحسب کاهش چگالی الکترونی
۴۴	پیش‌تپی
	۸-۳- تغییر نسبی در توان خروجی لیزر ناشی از چگالی‌های مختلف افزودنی‌های هیدروژن، دوتریم و هلیوم اضافه‌شده به گاز کمکی نئون
۴۷	
	۹-۳- مقایسه‌ی اجرای دو لیزر بخار مس به قطرهای ۲۵ و ۴۰ mm با آمیزه‌های گازی نئون خالص و نئون همراه با هیدروژن و هم‌چنین با افزودنی HCL
۵۰	
	۱-۴- (الف) درپوش، (ب) لوله‌ی سرامیک، (ج) شیشه‌ی کوارتز، (د) لوله‌ی سرامیک با درپوش، (ه) لوله‌ی سرامیک به‌همراه شیشه‌ی کوارتز با دو درپوش در ابتدا و انتها
۵۶	
	۲-۴- نمودار فشار متوسط هوای اندازه‌گیری‌شده داخل لوله‌ی لیزر بر حسب زمان
۵۹	

۱-۵- سامانه‌ی آزمایش‌گاهی چیده شده در آزمایش‌گاه ..... ۷۲

۱-۲-۵- نمودار توان خروجی کل بر حسب بسامد در توان ورودی  $\sim 1/4 \text{ kW}$

۷۳ ..... در فشار  $0/0038 \text{ torr}$  گاز کمکی هوا

۲-۲-۵- نمودار توان خروجی طیف سبز و زرد بر حسب بسامد در توان ورودی

۷۴ .....  $\sim 1/4 \text{ kW}$  در فشار  $0/0038 \text{ torr}$  گاز کمکی هوا

۱-۳-۵- نمودار توان خروجی کل بر حسب بسامد در توان ورودی  $\sim 1/3 \text{ kW}$

۷۵ ..... در فشار  $3/8 \text{ torr}$  گاز کمکی هوا

۲-۳-۵- نمودار توان خروجی طیف سبز و زرد بر حسب بسامد در توان ورودی

۷۵ .....  $\sim 1/3 \text{ kW}$  در فشار  $3/8 \text{ torr}$  گاز کمکی هوا

۱-۴-۵- نمودار توان خروجی کل بر حسب بسامد در توان ورودی  $\sim 1/3 \text{ kW}$

۷۶ ..... در فشار  $5/32 \text{ torr}$  گاز کمکی هوا

۲-۴-۵- نمودار توان خروجی طیف سبز و زرد بر حسب بسامد در توان ورودی

۷۷ .....  $\sim 1/3 \text{ kW}$  در فشار  $5/32 \text{ torr}$  گاز کمکی هوا

۱-۵-۵- نمودار توان خروجی کل بر حسب بسامد در توان ورودی  $\sim 1/3 \text{ kW}$

۷۸ ..... در فشار  $6/08 \text{ torr}$  گاز کمکی هوا

۲-۵-۵- نمودار توان خروجی طیف سبز و زرد بر حسب بسامد در توان ورودی

۷۸ .....  $\sim 1/3 \text{ kW}$  در فشار  $6/08 \text{ torr}$  گاز کمکی هوا

۱-۶-۵- نمودار توان خروجی کل بر حسب بسامد در توان ورودی  $\sim 1/4 \text{ kW}$

۸۰ ..... در فشار  $7/6 \text{ torr}$  گاز کمکی هوا

۲-۶-۵- نمودار توان خروجی طیف سبز و زرد بر حسب بسامد در توان ورودی

۸۰ .....  $\sim 1/4 \text{ kW}$  در فشار  $7/6 \text{ torr}$  گاز کمکی هوا

- ۵-۷-۱- نمودار توان خروجی کل بر حسب بسامد در توان ورودی  $\sim 1/3$  kW در فشار  $3/8$  torr گاز کمکی هوا ..... ۸۲
- ۵-۷-۲- نمودار توان خروجی طیف سبز و زرد بر حسب بسامد در توان ورودی  $\sim 1/3$  kW در فشار  $3/8$  torr گاز کمکی هوا ..... ۸۲
- ۵-۸- نمودار توان خروجی بر حسب فشار گاز کمکی هوا در بسامدهای مختلف ..... ۸۴
- ۵-۹-۱- نمودار توان خروجی کل بر حسب بسامد در توان ورودی  $\sim 1/3$  kW در فشار  $3/8$  torr گاز کمکی هوا در شارهای ورودی متفاوت ..... ۸۶
- ۵-۹-۲- نمودار توان خروجی طیف سبز بر حسب بسامد در توان ورودی  $\sim 1/3$  kW در فشار  $3/8$  torr گاز کمکی هوا در شارهای ورودی متفاوت ..... ۸۷
- ۵-۹-۳- نمودار توان خروجی طیف زرد بر حسب بسامد در توان ورودی  $\sim 1/3$  kW در فشار  $3/8$  torr گاز کمکی هوا در شارهای ورودی متفاوت ..... ۸۷
- ۵-۱۰- نمای بیرونی لوله‌ی لیزر پس از به‌کارگیری سامانه با گاز کمکی هوا ..... ۸۸
- ۵-۱۱- نمایی از سر قرمز رنگ لوله‌ی لیزر پس از به‌کارگیری هوا به‌عنوان گاز کمکی ..... ۸۹
- ۵-۱۲- نمایی از سر سیاه رنگ لوله‌ی لیزر پس از به‌کارگیری هوا به‌عنوان گاز کمکی ..... ۹۰
- ۵-۱۳- طیف FTIR سرامیک آلومینای اولیه ..... ۹۱
- ۵-۱۴- طیف FTIR سر سیاه رنگ سرامیک آلومینا ..... ۹۱
- ۵-۱۵- طیف XRD سر سیاه رنگ سرامیک آلومینا ..... ۹۱
- ۵-۱۶- طیف FTIR سر قرمز رنگ سرامیک آلومینا ..... ۹۲



٩٢ .....١٧-٥ طيف XRD سر قرمز رنگ سراميك آلومينا

## فصل اول

### پیش‌گفتار

## ۱-۱- پیش‌گفتار

با اختراع لیزر در نیمه‌ی دوم قرن بیستم دریچه جدیدی به روی دانشمندان فیزیک اتمی و مولکولی باز شد. پژوهش‌های کاربردی بسیار جدیدی در زمینه‌های برهم‌کنش لیزر با پلاسما، طراحی لیزرهای با تپ‌های بسیار کوتاه با توان‌های بسیار زیاد، و ساخت لیزرهای با طول موج کوتاه به‌ویژه در دهه‌ی گذشته توسط فیزیکدانان و پژوهش‌گران سراسر دنیا صورت گرفته است. در این پژوهش‌ها تلاش‌های زیادی برای کوچک نمودن حجم سامانه‌های لیزری مورد نیاز جهت تولید پلاسما و تابش‌های اشعه‌ی ایکس به‌عمل آمده است.

استفاده از گاز به‌عنوان ماده فعال، لیزرهای گازی را نسبت به لیزرهای جامد متفاوت ساخته است. از یک سو جمعیت‌های وارون قابل دسترس خیلی کم‌تر از جامدها است. برای مثال یک میله نئودیم یاق (Nd:YAG) نزدیک  $10^{25} \times 6$  اتم نئودیم در هر متر مکعب دارد ولی در لیزر هلیوم-نئون (He-Ne) تنها  $10^{21}$  اتم نئون در هر متر مکعب وجود دارد. بنابراین انتظار می‌رود که لیزرهای گازی پر قدرت، بسیار پر حجم و بزرگ باشند. از سوی دیگر گازها بسیار یکنواخت‌تر و همگن‌تر از جامدها هستند و می‌توان برای خنک کردن و دوباره پر کردن آن‌ها را در یک مدار بسته به حرکت درآورد [۱]. با توجه به این امر حتی در شرایط ناهنجار هم این لیزرها بازده به نسبت خوبی دارند [۲].

در مقابل چنین برتری‌هایی، این لیزرها کاستی‌هایی هم دارند. از جمله این‌که دارای سامانه‌های بزرگی هستند، که در مقایسه با یک لیزر نیم‌رسانا غول آسایند. دیگر این‌که، برای برانگیختگی به ولتاژ و جریان زیادی نیاز دارند که به‌طور معمول مشکلاتی را ایجاد می‌کنند [۱].

لیزرهای بخار فلز، لیزرهای گازی، با ماده فعال فلزی هستند. که در زمینه‌های مختلف پزشکی (تشخیص، درمان، جراحی‌ها به‌ویژه بخش‌هایی از بدن که امکان دسترسی به آن نباشد)، صنعت، مخابرات، صنایع نظامی و... به‌طور چشمگیر به‌کار برده شده‌اند. این لیزرها قابلیت رسیدن به توان و بهره‌ی بالا در گستره‌ی طیفی فرورسرخ، مرئی و فرابنفش دارند.

در این بین لیزرهای بخار مس از جمله کارآمدترین لیزرهای بخار فلزی هستند که مانند دیگر لیزرهای بخار فلزی از قله‌ی توان، بهره، کارآیی و آهنگ تکرار تپ بالا برخوردارند [۳ و ۴].

ماده‌ی فعال این لیزرهای تپی چهارترازی، بخار مس است که در ناحیه‌ی طیفی مرئی دو طول موج، خط سبز با طول موج  $510/6\text{nm}$  و خط زرد با طول موج  $578/2\text{nm}$  دارد. بهره-های کوانتومی ۵۷ درصد در خط زرد و ۶۴ درصد در خط سبز برای این لیزرها قابل توجه هستند [۳].

در لیزر بخار مس، برای به‌دست آوردن غلظت کافی مس با فشار بخار نزدیک  $1\text{mmHg}$ ، از نئون با فشار  $25-50\text{mmHg}$  استفاده شده است. در چنین شرایطی دمای لوله‌ی لیزر به کمک تخلیه الکتریکی بین  $1500-1400^\circ\text{C}$  بالا برده می‌شود.

از آن‌جا که در جریان تخلیه الکتریکی، در دماهای پایین همواره مقداری مس روی پنجره‌های کوارتزی قرار می‌گیرد، بنابراین پس از چند صد ساعت کار لیزر، مقداری مس به داخل لوله‌ی لیزر اضافه می‌شود.

## ۱-۲- تاریخچه

بیش از ۳۰ سال از طراحی و راه‌اندازی نخستین لیزر بخار مس گذشته است و تاکنون پیشرفت‌های زیادی از نظر بهبود و اصلاح توان خروجی داشته است. همان‌طور که از نام لیزر پیداست ماده‌ی فعال آن بخار فلز مس اشباع شده در یک گاز کمکی است که برای به‌دست آوردن چگالی مورد نیاز مس در لوله‌ی تخلیه به دمای نزدیک  $1500^{\circ}\text{C}$  نیاز است.

پس از کشف لیزر تپی بخار سرب توسط فالز<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۱۹۶۵، نخستین نوسان تپی در پایان آگوست همان سال در مس کشف و پیدا شد، که در آن لوله‌ی تخلیه آلومینا به‌وسیله‌ی یک کوره تا دمای  $1500^{\circ}\text{C}$  گرم شده بود. تپ تخلیه در مخلوطی از مس و هلیوم عمل می‌کرد. در این لیزر در طی یک تپ  $20\text{ns}$ ، توان قله‌ی  $1/2\text{kW}$  با بهره‌ی  $0/1$  درصد در طول موج  $510/6\text{nm}$  به‌دست آمد.

نخستین لیزر بخار مس توسط والتر<sup>۲</sup> و همکاران در سال ۱۹۶۶ ساخته شد. که در آن از یک لوله‌ی لیزر به قطر  $10\text{mm}$  و طول  $80\text{cm}$  با بسامد تکرار تپ  $660\text{Hz}$  استفاده شده بود. توان خروجی متوسط این لیزر تا  $20\text{mW}$  افزایش یافت. آن‌ها در همان سال گزارش مهمی درباره‌ی مشاهده‌ی تپ لیزری در منگنز، مس و یون کلسیم منتشر و به‌دنبال آن گذارهای لیزری مشابهی را در دیگر اتم‌ها و یون‌های فلزی پیش‌بینی کردند.

یک سال بعد گولد<sup>۳</sup> و والتر در یک لیزر بخار مس با قطر بزرگ  $50\text{mm}$  قله‌ی توان خروجی بی‌سابقه‌ی  $40\text{kW}$  در ناحیه‌ی مرئی با کارایی  $1/2$  درصد را گزارش کردند. این لیزر نخستین لیزر مرئی بود که انرژی الکتریکی را با کارایی بالای  $1$  درصد به انرژی نورانی تبدیل

---

<sup>۱</sup> Fowles  
<sup>۲</sup> Walter  
<sup>۳</sup> Gould

می‌کرد. والتر هم‌چنین برای رسیدن به توان‌های خروجی متوسط نزدیک به  $0.5W$ ، بسامد تکرار تپ را تا  $1kHz$  افزایش داد.

در سال ۱۹۷۲ نخستین لیزر بخار مس با توان متوسط چند وات در یک لیزر تپی با لوله‌ی تخلیه به قطر  $8mm$  ساخته شد، که در بسامد  $10kHz$  توان متوسط  $2/4W$  را تولید می‌کرد. در همان سال گروه ایسایف<sup>۱</sup> از ته‌مانده‌ی انرژی تخلیه با بسامد تکرار تپ چندین کیلوهرتز، برای گرم کردن لوله‌ی تخلیه تا دمای بخار مس به‌جای کوره‌ی خارجی استفاده کردند. لیزر بخار مس ساخته شده بر اساس فناوری خودگرمایش ساده‌تر در آن زمان تحول شگرفی ایجاد کرد. به‌ویژه که سبب کوچک و ساده‌تر شدن سامانه‌ی لیزری شده بود. برای نمونه از یک لیزر به قطر  $15mm$  و طول محیط فعال  $70cm$  در بسامد تکرار تپ  $15-18kHz$  در رژیم خودگرمایش، توان خروجی متوسط  $15W$  با کارایی  $1$  درصد به‌دست آمد.

در سال ۱۹۷۵ توسط دکر<sup>۲</sup> لیزر بخارمسی با توان خروجی  $270mW$  در بسامد تکرار تپ  $12kHz$  با بهره‌وری  $0.25$  درصد برای نخستین بار در دمش لیزر دای مورد استفاده قرار گرفت.

در ادامه‌ی روند تکاملی، در دهه‌ی ۱۹۸۰ فناوری حجمی تحول جدید دیگری بود که منجر به افزایش حجم محیط فعال، بسامد و به‌دنبال آن افزایش توان خروجی لیزر شد. در این فناوری تخلیه جمعیت تراز پایینی لیزر علاوه بر برخورد با دیواره‌ی محفظه، بر اثر برخورد اتم-های مس به مولکول‌های گاز و الکترون‌ها نیز صورت می‌گرفت [۳].

---

<sup>۱</sup> Isaev  
<sup>۲</sup> Decker

امروزه لیزرهای بخار مس، با توان‌های بسیار بالا در آزمایش‌گاه‌های ویژه به‌منظور انجام پژوهش‌های مختلف ساخته می‌شوند و پژوهش‌ها برای بهبود پارامترهای آن همچنان ادامه دارد.

استفاده از گازهای کمکی مختلف و یا حتی گازهای افزودنی مانند هیدروژن، نیتروژن، هوا و ... به گاز کمکی به‌منظور افزایش توان خروجی و بهبود در روند کار لیزرها متداول شده است [۵].

کمک به ایجاد وارونی جمعیت، کاهش مصرف انرژی برای فراهم آوردن محیط تخلیه الکتریکی در طول لوله‌ی لیزر در دمای پایین‌تر، افزایش طول عمر لوله‌ی لیزر با کاهش تلفات ناشی از انتشار اتم‌های ماده فعال به نواحی سرد پنجره‌ها و جلوگیری از قرارگرفتن رسوب فلزی روی آن‌ها، کمک به واهلش پلاسما و به‌دنبال آن بازیابی محیط لیزری به دلیل واکنش‌ناپذیری بالا و افزایش تطبیق آمپدانس لوله‌ی تخلیه با مدار تحریک، از جمله سودمندی‌های استفاده از گاز کمکی است.

در این بین گازهای نجیب به‌دلیل واکنش‌ناپذیری و قدرت برانگیختگی بالا بهترین گزینه به‌شمار می‌آیند. از میان گازهای نجیب، نئون و پس از آن هلیوم مناسب‌ترین گاز برای استفاده می‌باشد. گستره‌ی فشارهای گاز کمکی از یک تا چندین هزار تور است. معمولی‌ترین گستره‌ی این فشار  $1-100 \text{ torr}$  است [۳].

هیدروژن به‌دلیل داشتن سطح مقطع برخورد کشسان بزرگ و بیش‌ترین آهنگ اتلاف انرژی الکترون که در سرد کردن و فرونشاندن الکترون‌ها پس از پایان تپ تحریکی بسیار مؤثر است، به‌عنوان بهترین گاز افزودنی شناخته شده است [۵].

پژوهش در زمینه‌ی استفاده از هوا به‌عنوان گاز کمکی در راه‌اندازی لیزرهای بخار مس و طلا و بررسی پایداری این لیزرها در مقایسه با نئون و هلیوم انجام شده است [۴].

در این پژوهش ضمن راه‌اندازی یک لیزر بخار مس با استفاده از هوا به‌عنوان گاز کمکی، برای نخستین بار بهینه‌سازی توان خروجی لیزر مورد نظر با این گاز انجام شده است. سپس به بررسی اثر تخریبی هوا بر روی لوله‌ی تخلیه با کمک طیف‌های FTIR، XRD و اطلاعات به‌دست آمده از چند ایستگاه هواشناسی پرداخته شده است.

### ۱-۳- کاربردهای لیزر بخار مس

لیزر تپی و چهارترازی بخار مس، از بهترین چشمه‌های نور همدوس و قوی‌ترین لیزر بخار فلز است که از قله‌ی توان، بهره، کارایی و آهنگ تکرار تپ بالا، هم‌چون دیگر لیزرهای بخار فلزی برخوردار است از این‌رو کاربردهای عملی فراوانی در زمینه‌های مختلف علوم و صنعت پیدا کرده است [۳و۴].

این لیزرها در تصویربرداری با سرعت بالا، چشمه‌ی دمش برای لیزرهای حالت جامد و مایع (رزینه‌ای)، ماشین‌کاری ریز [۶]، کاوش‌های زیرآبی به‌ویژه برای دست‌یابی به نقشه یا نمودارهای مسطح از اقیانوس‌ها و هسته‌ی اتم‌ها، تولید مدارهای ریز و انعطاف‌پذیر، جداسازی ایزوتوپی لیزری بخار اتمی و ... به‌کار برده شده‌اند .

با وجود این‌که لیزرهای بخار فلز در پزشکی به‌طور گسترده به‌کار نمی‌روند، اما در پرتو درمانی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۳].

توان‌های خروجی بالاتر این لیزرها به روش‌های مختلف به‌ویژه با به‌کارگیری آرایه‌ی نوسان‌گر- تقویت‌کننده، دست‌یافتنی است [۴].



لیزرهای بخار مس چند سالی است که در خط مقدم فناوری ماشین‌کاری ریز لیزر بوده است. پژوهش‌های زیادی که در سال‌های گذشته انجام شده تا حد زیادی کیفیت پرتو لیزر و استفاده‌ی آسان آن را بهبود بخشیده است و موجب کاهش هزینه‌های در حال اجرا شده است، به‌طوری‌که در حفاری حفره‌های ریز و برش‌های دقیق و بسیاری از کاربردهای دیگر این لیزرها نشان داده‌اند که تنها ابزار قابل دوام هستند [۷].

## فصل دوم

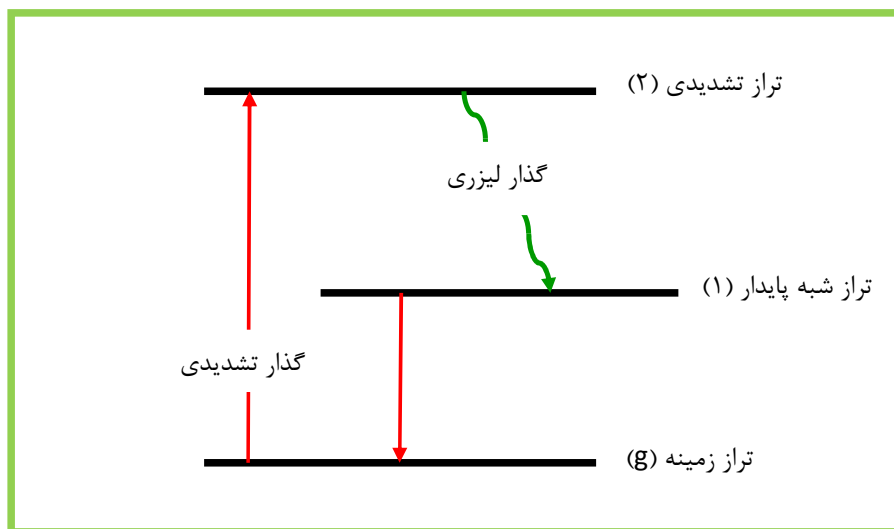
### لیزر بخار مس

## ۲-۱- ثابت‌های فیزیکی و شیمیایی اتم مس

مس عنصر نخست گروه ۱۱ فلزات واسطه‌ی جدول تناوبی، دارای دو ظرفیت ۱ و ۲، دو ایزوتوپ طبیعی  $^{63}\text{Cu}$  و  $^{65}\text{Cu}$ ، عدد اتمی ۲۹ و وزن اتمی  $63/546\text{gr/mol}$  است و آرایه ترازهای الکترونی آن به صورت  $1s^2, 2s^2 2p^6, 3s^2 3p^6 3d^{10}, 4s^1$  می‌باشد. نقطه‌ی ذوب و جوش به ترتیب  $1083^\circ\text{C}$  و  $2595^\circ\text{C}$  دارد [۸].

## ۲-۲- آرایش ترازها و طول عمر گذارها

ترازهای درگیر در لیزر تپی و چهار تراز می‌شود شامل تراز زمینه (g)، تراز شبه پایدار<sup>۱</sup> (۱) و تراز تشدید<sup>۲</sup> (۲) است. ساختار عمومی ترازهای انرژی لیزرهای بخار فلز در شکل ۱-۲ نشان داده شده است.



شکل ۱-۲: ساختار عمومی ترازهای انرژی لیزرهای بخار فلز

ترازهای ۱ و ۲ با پارایته‌ی مختلف به کمک یک انتقال فوتونی به هم مربوط می‌شوند ولی تراز یک و صفر دارای پارایته‌ی یکسان هستند بنابراین گذار از حالت زمینه g به تراز بالای

<sup>۱</sup> Metastable Level  
<sup>۲</sup> Resonance Level

لیزری یعنی  $g \rightarrow 2$  گذار مجاز تابشی است در حالی که گذار برهم کنش دو قطبی  $g \rightarrow 1$  ممنوع است. سطح مقطع الکترونی برای گذار  $g \rightarrow 2$  خیلی بزرگتر از گذار  $g \rightarrow 1$  است، بنابراین برای رسیدن به وارونی جمعیت مورد نیاز گسیل القایی، آهنگ گذارهای تابشی خود به خودی  $g \rightarrow 2$  که به طور معمول تند است، باید نسبت به آهنگ گذار تابشی  $1 \rightarrow 2$  به شدت کاهش یابد. این امر به معنی این است که باید یک چگالی اتمی به اندازه کافی بزرگ وجود داشته باشد تا یک تله‌ی تابشی<sup>۱</sup> روی گذار  $g \rightarrow 2$  ایجاد شود. این کار با استفاده از یک تپ جریان سریع، کوتاه و با دامنه‌ی زیاد، یعنی با الکترون‌های داغ انجام شدنی است. از آنجا که گذار  $g \rightarrow 1$  ممنوع و طول عمر تراز طولانی‌تر (شبه پایدار) است، تابش لیزر تنها به صورت تپی و با تپ‌هایی با دیرپایی از مرتبه کم‌تر از طول عمر تراز ۲ رخ می‌دهد. واهلش‌ها از تراز شبه پایدار به تراز پایه  $g \rightarrow 1$  به طور معمول با برخورد‌های با دیواره و یا با برخورد با دیگر اتم‌ها صورت می‌گیرد.

تراز پایه‌ی اتم مس  $S_{1/2}$ ، با آرایش الکترونی  $3d^1 4s^1$  می‌باشد. جفت‌شدگی اسپین-مدار ناشی از نزدیکی تراز  $4s$  به  $3d$  باعث شده تا تراز بالایی  $P$ ، که در واقع نخستین تراز تشدیدی است و جفت‌شدگی شدید با تراز زمینه دارد، به دو زیر تراز  $^2P_{1/2}$  و  $^2P_{3/2}$  و تراز شبه پایدار پایینی  $^2D$  هم به دو زیر تراز  $^2D_{3/2}$  و  $^2D_{5/2}$  شکافته شود.

در مدت زمان تپ سریع جریان تخلیه که  $\sim 100 \text{ ns}$ ، فرایند دمش موجب انتقال الکترون به ترازهای برانگیخته بالایی می‌شود. ترازهای بالایی و شبه پایدار پایینی به دلیل داشتن پاریته‌ی متفاوت برای گذارهای دوقطبی، منجر به انتقال فوتون تابشی از ترازهای برانگیخته بالایی به ترازهای شبه پایدار و شکل‌گیری دو طیف سبز و زرد با توجه به گذارهای لیزری زیر می‌شوند:

<sup>۱</sup> Radiative Trapping