دانشگاه ولی‌عصر(عج) رفسنجان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان‌نامه‌ی کارشناسی‌ارشد رشته‌ی فیزیک گرایش لیزر

طراحی لیزر موجبر CO_2 با برانگیزش عرضی RF و مدلسازی تخلیه در فشارهای میانی

استادان راهنما:

دکتر حسین ثقفی‌فر
دکتر مهدی سویزی

استاد مشاور:

دکتر حمید رضا محمدی

دانشجو :

رضا ترابی

اسفندماه ۱۳۸۹

بسم الله الرحمن الرحیم

چکیده:

در این پایان‌نامه به بررسی ساختار یک لیزر موجبر CO_2 با برانگیزش عرضی بوسیله‌ی امواج با بسامد رادیویی می‌پردازیم. در ابتدا با اشاره به ملاحظات طراحی، نحوه‌ی تاثیر پارامترهای موثر در طراحی از قبیل ترکیب گاز، دما، فشار و ساختار اپتیکی لیزر CO_2، ویژگی‌های تخلیه‌ی الکتریکی خازنی در بسامد رادیویی را بیان می‌کنیم و فرکانس بهینه برای تزریق بیشترین توان چشمه RF به محیط تخلیه را محاسبه می‌کنیم. سازوکار شکست در تخلیه‌ی خازنی و ضرایب یونش از دیگر مباحثی است که به منظور درک بهتر فرایندهای تخلیه و مدهای کاری لیزر، بیان می‌شود. در ادامه با استفاده از یک الگوی شش‌دمایی شبیه‌سازی محیط فعال لیزر CO_2 انجام می‌شود و پارامترهای خروجی آن محاسبه می‌شود. الگوی شش‌دمایی نسبت به الگوی‌های دیگر از دقت و جامعیت بیشتری برخوردار است، زیرا در این الگو تقریباً تمام گذارهای دخیل در فرایند لیزر که بین ترازهای ارتعاشی - چرخشی مختلف در مخلوط گاز رخ می‌دهند، در نظر گرفته می‌شود. به دلیل اهمیت نحوه‌ی توزیع الکترون‌ها، بعنوان پارامتر دمش درون محیط تخلیه، این پارامتر را با در نظر گرفتن توزیع فضایی و زمانی ذرات درون پلاسما و بررسی معادله‌ی پیوستگی حاکم بر چگالی الکترونها، برای یک لیزر موجبر با برانگیزش RF بررسی می‌کنیم. سپس به بررسی شبکه‌ی تطبیق امپدانس مدار و نحوه‌ی طراحی آن می‌پردازیم. در انتها، مورد خاصی از لیزر موجبر CO_2 با برانگیزش عرضی RF و توان خروجی حدود ۱۰۰ وات، جهت ساخت پیشنهاد می‌شود.

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فصل اول: مقدمه ۱

فصل دوم: لیزر ملکولی دی اکسید کربن ٤

۲-۱- محیط فعال لیزر CO_2 ..... ٤

۲-۲- ترکیب گاز محیط فعال لیزر CO_2 ..... ٦

۲-۳- ملاحظات دما و فشار ۸

۲-٤- ملاحظات طراحی ۹

۲-٤-۱- ملاحظات رفع گرما ۹

۲-٤-۲- ملاحظات اپتیکی ۱۰

۲-٤-۳- سازوکار برانگیزش ۱۱

۲-۵- برخی مزایای تخلیه‌ی الکتریکی با امواج رادیویی ۱۱

فصل سوم: تخلیه‌ی الکتریکی خازنی با بسامد رادیویی ۱۳

۳-۱- مقدمه ۱۳

۳-۲- تخلیه‌ی الکتریکی القایی RF در گازها ۱٤

۳-۳- تخلیه‌ی الکتریکی خازنی RF ۱۵

۳-۳-۱- نوسان‌های پلاسما ۱٦

۳-۳-۲- ویژگیهای تخلیه‌های خازنی RF در فشارهای میانی ۲۰

۳-۳-۳- ویژگیهای الگوی نظری ۲۰

۳-۳-٤- جفت‌کردن بارها به یک موج الکترومغناطیسی ۲۱

۳-۳-۵- توان جذب شده بوسیله پلاسما ۲۳

۳-۳-٦- محدودیت‌های تزویج‌شدگی توان RF ۲۵

۳-٤- سازوکار شکست در تخلیه‌ی خازنی و ضریب اول یونش ۲٦

۳-۵- ضریب خروج الکترون از کاتد، ضریب دوم یونش ۲۸

۳-٦- غلاف‌های بار فضایی ۳۱

۳-۷- مشخصه ولتاژ- جریان در تخلیه‌ی خازنی بوسیله بسامد رادیویی و مدهای تخلیه ۳۲

فصل چهارم: الگوی دمایی فرآیندهای لیزر CO_2 ..... ۳۵

٤-۱- مقدمه ۳۵

٤-۲- برانگیزش ارتعاشی تراز بالایی لیزر ۳۷

عنوان صفحه

٤-٣- پدیده واهلش و دمای ارتعاشی ٣٨
٤-٤- معادلات نرخ در یک الگوی شش دمایی ٤٠
٤-٥- شبیه سازی لیزر CO_2 با برانگیزش الکتریکی عرضی در فشار اتسمفر ٤٦
٤-٦- چگالی الکترونی درون محفظه‌ی تخلیه در برانگیزش عرضی RF ٤٩
فصل پنجم: طراحی لیزر موجبر CO_2 با برانگیزش عرضی RF ٥٣
٥-١- مقدمه ٥٣
٥-٢- شبکه‌ی تطبیق امپدانس ٥٥
٥-٣- نحوه اندازه‌گیری توان ٥٩
٥-٤- طراحی لیزر موجبر CO_2 با توان خروجی حدود ١٠٠ وات ٦١
فصل ششم: نتیجه‌گیری ٦٥
پیوست الف ٦٨
مراجع ٧٤

فهرست شکل‌ها

عنوان صفحه

شکل (۲-۱) نمایش حالتهای ارتعاشی و چرخشی مولکول CO_2 و N_2 ..... ٦

شکل (۳-۱) روشهای برانگیزش محیط تخلیه بوسیله جریان RF (a) برانگیزش القایی؛ (b)-(e) برانگیزش خازنی : (b) الکترودهای صفحه‌ای بدون روکش، (c) الکترودهای روکش‌دار، (d) الکترودهای خارج از محیط تخلیه و (e) استفاده از زمین بعنوان الکترود دوم (برانگیزش مشعلی تک الکترودی) ١٤

شکل (۳-۲) نمایی از کوپل‌شدگی القایی موج RF ١٥

شکل (۳-۳) جهت میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی و نیز حرکت بارها درون محیط پلاسما ١٥

شکل (۳-٤) یک پلاسمای قطبیده‌ی صفحه‌ای میان دو صفحه‌ی موازی فلزی که در ولتاژ Va نگه داشته شده است. ١٧

شکل (۳-٥) تابش الکترومغناطیس از چشمه‌ای با بسامد $\boldsymbol{\omega = \omega 0}$ که به پلاسمای تختی با چگالی n_e و فرکانس پلاسمای الکترون $\boldsymbol{\omega p}$ تابیده می‌شود. ١٩

شکل (۳-٦) ایجاد یک پلاسمای RF غیرمغناطیسی، در یک واکنشگر پلاسما با صفحات موازی با جدایی d و بسامد راه انداز ω. ٢١

شکل (۳-۷) تولید الکترون از ملکول و تعریف ضریب یونش ٢٨

شکل (۳-۸) منحنی پاشن برای ولتاژ شکست شکاف میان دو الکترد صفحه‌ای و نقطه‌ی شکست مد $\boldsymbol{\alpha}$ ٣٠

شکل (۳-۹) (a) نمایی کلی از نحوه‌ی ایجاد غلاف در پلاسمای برانگیزش شده بوسیله جریان RF ، (b) تصویر آزمایشگاهی از تابش پلاسما درون یک موجبر مربعی ٣١

شکل (۳-۱۰) منحنی ولتاژ بر حسب جریان در RFCCD ٣٢

شکل (۳-۱۱) منحنی ولتاژ بر حسب چگالی جریان در RFCCD ٣٢

شکل (۳-۱۲) توزیع شدت در فضای بین الکتردها در تخلیه‌ی خازنی RF برای دو مد α و γ ٣٤

شکل (۳-۱۳) توزیع تابشی تخلیه در فضای بین الکترودها در تخلیه‌ی خازنی RF برای دو مد α و γ ٣٤

شکل (٤-۱) چیدمان گذار بین سطوح انرژی متفاوت لیزر CO_2 ..... ٣٩

شکل (٤-۲) نمایش پالس دمش و پالس خروجی لیزر ٤٧

عنوان صفحه

شکل (٤-٣) نمایش پالس خروجی لیزری با مشخصات ذکر شده در جدول (٣-١).....٤٧
شکل (٤-٤) نمایش بهره و شدت لیزر ٤٨
شکل (٤-٥) تغییرات زمانی دمای ترازهای لیزر.....٤٨
شکل (٤-٦) هندسه لیزر موجبر.....٤٩
شکل (٥-١) نمایی از یک لیزر موجبر ٥٤
شکل (٥-٢) مدار معادل برای تطبیق چشمه‌ی توان RF به محیط تخلیه با استفاده از یک شبکه L.....٥٦
شکل (٥-٣) توان خروجی لیزر برحسب توان ورودی برای پهناهای مختلف موجبردر فشار بهینه برای هر پهنا.....٦٣
شکل (٥-٤) بیشترین توان خروجی لیزر برحسب فاصله‌ی جدایی الکترودها (در واحدهای ٢/٢٥ میلیمتری).....٦٣
شکل (پ-الف-١) تولید یک پلاسمای RF با بسامد برانگیزش ω در یک واکنشگر پلاسما با صفحات موازی به فاصله d و القای مغناطیسی B در جهت موازی با صفحات الکترود واکنشگر ٦٩

فهرست جداول

عنوان صفحه

جدول (٤-١) معادلات بستگی زمانی نرخ‌های متناظر k_{ij}ها ٤٦
جدول (٤-٢) پارامترهای استفاده شده در برنامه شبیه ساز لیزر TEA CO_2.....٤٨
جدول (٥-١) خلاصه‌ی مشخصات لیزر پیشنهادی با توان خروجی ١٣٥ وات ٦٤

فصل اول

۱- مقدمه

لیزر موجبر لیزری است که بخشی از تشدیدگر آن را یک موجبر تشکیل می‌دهد. لیزر موجبر دی اکسیدکربن با برانگیزش بوسیله‌ی امواج رادیویی[1] RF برای اولین بار توسط مک فارلن و همکارانش[۱] در سال ۱۹۷۸ معرفی شد. از آن زمان به بعد شکل‌های گوناگونی از لیزرهای موجبر دی اکسیدکربن با برانگیزش RF مورد آزمایش قرار گرفت. لیزرهای موجبر اولیه دارای مشکلاتی از قبیل بازدهی پایین و توان اندک بودند، ولی امروزه دارای توان‌های بالا و بازده‌های قابل قبولی هستند. تقاضای روزافزون برای لیزرهای پرقدرت با حجم کم باعث شده تا هندسه‌های متفاوتی برای محیط تخلیه مورد آزمون قرار گیرند. لیزر صفحه تخت تلاشی برای افزایش قابلیت توان خروجی لیزرهای موجبر CO_2 با برانگیزش RF است که دارای حجم کم و هزینه پایین ساخت است. روش RF جهت برانگیزش پلاسمای لیزر در دهه ۱۹۸۰ همزمان با ایدهٔ خنک‌کنندگی بوسیلهٔ پخش در لیزرهای ملکولی، در ساختارهای موجبر و صفحه تخت مطرح شد[۱].

[1] -Radio Frequency

استفاده از میدان الکتریکی برای شتاب دادن به الکترونها و درنتیجه برخورد الکترونهای شتابدار به اتم-ها، سبب یونش آنها و ایجاد پلاسما می‌شود. میدان الکتریکی را می‌توان در بسامد رادیویی بصورت خازنی یا القایی تزویج کرد که به نوع اول که در این پایان نامه به ویژگی‌های آن می‌پردازیم، تخلیه‌ی خازنی[1] و به نوع دوم تخلیه‌ی القایی[2] گفته می‌شود. "تخلیه‌ی تزویج شده خازنی در بسامدرادیویی"[3] (RFCCD) اولین بار در دهه ۱۹۶۰ برای برانگیزش محیط فعال در لیزرهای He-Ne و CO_2 استفاده شد[۱]، ولی در آن زمان این روش برای برانگیزش محیط فعال موفقیت آمیز نبود بدلیل اینکه فرایندهای فیزیکی RFCCD ها کاملاً شناخته شده نبود و دیگر اینکه در برانگیزش DC که جهت برانگیزش محیط فعال استفاده می‌شد، نیاز به تجهیزات پیچیده‌ای همچون تزویج کننده‌ی توان RF نبود. زیرا تطبیق امپدانس و کنترل جریان از نیازمندی‌های اصلی سیستم‌های RFCCD است.

در این پایان نامه بررسی ساختار یک لیزر موجبر CO_2 با برانگیزش بسامد رادیویی مدنظر است. لیزر موجبر راه موثری برای تولید یک لیزر CO_2 کم حجم است. زیرا استفاده از فرکانس رادیویی جهت برانگیزش عرضی پلاسمای لیزر $\mathbf{CO_2}$ مزایای متعددی نسبت به برانگیزش DC دارد که مهمترین آنها استفاده از ولتاژ شکست پایین‌تر، پایداری تخلیه بهتر و بازده بالاتر برانگیزش محیط فعال است.

در فصل دوم به ملاحظات طراحی، نحوه‌ی تاثیر پارامترهای موثر در طراحی از قبیل ترکیب گاز، دما، فشار و ساختار اپتیکی لیزر CO_2 پرداخته می‌شود. در فصل سوم ویژگی‌های تخلیه‌ی الکتریکی خازنی در بسامد رادیویی را بیان کرده و فرکانس بهینه برای تزریق بیشترین توان چشمه RF به محیط تخلیه، محاسبه می‌شود. سازوکار شکست در تخلیه‌ی خازنی و ضرایب یونش، از دیگر مباحثی است که به منظور درک بهتر فرایندهای تخلیه و مدهای کاری لیزر، بیان می‌شود.

در فصل سوم با استفاده از یک الگوی شش‌دمایی، شبیه‌سازی محیط فعال لیزر CO_2 انجام می‌شود و پارامترهای خروجی آن محاسبه می‌شود. الگوی شش دمایی نسبت به الگوی‌های دیگر از دقت و جامعیت بیشتری برخوردار است، زیرا در این الگو تقریباً تمام گذارهای دخیل در فرایند لیزر که

[1] -Capacitive discharge
[2] -Inductive discharge
[3]- Radio frequency capacitively coupled discharge

بین ترازهای ارتعاشی - چرخشی مختلف در مخلوط گاز رخ می‌دهند، در نظر گرفته می‌شود. به دلیل اهمیت نحوه‌ی توزیع الکترون ها، بعنوان پارامتر دمش درون محیط تخلیه، این پارامتر با در نظر گرفتن توزیع فضایی و زمانی ذرات درون پلاسما و بررسی معادله پیوستگی حاکم بر چگالی الکترونها، برای یک لیزر موجبر با برانگیزش RF بررسی می‌شود. و در فصل پنجم شبکه تطبیق امپدانس مدار و نحوه‌ی طراحی آن بیان می‌شود. در پایان در فصل ششم به جمع‌بندی مطالب و نتیجه‌گیری پرداخته شده است.

فصل دوم

۲- لیزر ملکولی دی اکسید کربن

۲-۱- محیط فعال لیزر CO_2

در طی فرآیندهای طراحی لیزر CO_2 ، برخی محدودیت‌های طراحی مرتبط با پارامترهای تخلیه وجود دارد که اندازه و هندسه حجم محیط فعال را تعیین می‌کند. در طراحی حجم محیط فعال، دریافت بیشترین بهره مدنظر است. به همین جهت لازم است با محیط فعال این لیزر بیشتر آشنا شویم.

در دسته‌بندی لیزرهای موجود، لیزرهای CO_2، لیزرهای گازی از نوع مولکولی هستند. در این لیزرها از گذار بین ترازهای انرژی مولکول جهت ایجاد نور لیزر استفاده می‌شود و بسته به نوع گذار دخیل، لیزرهای گاز مولکولی خود به سه دسته تقسیم می‌شوند: (الف) لیزرهای ارتعاشی- چرخشی؛ در این لیزرها گذار بین ترازهای ارتعاشی یک حالت الکترونی رخ می‌دهد. اختلاف انرژی بین ترازهای درگیر در این نوع گذار بدان معناست که این نوع لیزرها در فروسرخ میانه و دور نوسان می‌کنند. (ب) لیزرهای ارتعاشی- الکترونی؛ در این لیزرها گذار بین ترازهای ارتعاشی حالت‌های مختلف الکترونی صورت می‌گیرد. در این نوع لیزرها طول موج نوسان در ناحیه مرئی یا فرابنفش جای می‌گیرد. (ج)

لیزرهای کاملاً چرخشی؛ که در آنها گذار بین ترازهای مختلف چرخشی یک حالت ارتعاشی انجام می‌شود. طول موج مربوط به این نوع لیزرها در فروسرخ دور جای می‌گیرد. لازم به یادآوری است که هر حالت الکترونی شامل چندین حالت ارتعاشی و هر حالت ارتعاشی چندین حالت چرخشی را دربر می‌گیرد.

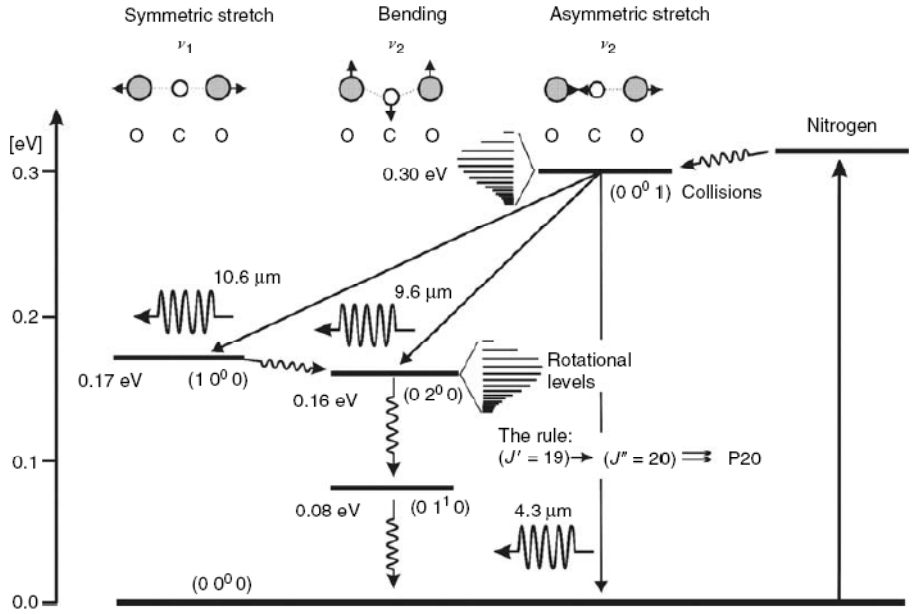
محیط فعال لیزر CO_2 از مخلوطی از گازهای مولکولی CO_2 و N_2 و گاز اتمی هلیوم تشکیل شده است. نوسان بین دو تراز ارتعاشی ملکولی CO_2 صورت می‌گیرد و در واقع از گازهای N_2 و He به منظور افزایش بازدهی عمل لیزر استفاده می‌شود. همچنین بعضاً ممکن است از گازهای مکمل Xe یا بخار آب به منظور عملکرد بهتر لیزر بواسطه تغییرات فیزیکی یا شیمیایی محیط تخلیه، استفاده شود.

در سال ۱۹۶۱ پولیانی[1] امکان استفاده از ارتعاشات ملکولی را برای عمل لیزر توضیح داد[۳] و پس از آن پاتل[2] عمل لیزر از گذارهای ارتعاشی- چرخشی ملکول CO_2 را در یک محیط تخلیه توصیف کرد[۴]. CO_2 یک ملکول سه اتمی متقارن و خطی است که در آن اتم کربن با دو اتم اکسیژن هم ظرفیت، متوازن شده است. اگر چه CO_2 یک مولکول سه اتمی است اما رفتار آن بسیار شبیه به یک مولکول دو اتمی ساده است و به دلیل ساختار خطی‌اش دارای سه مد ارتعاشی است. دو مد ارتعاشی کششی که با υ_1 و υ_3 و یک مد خمشی که با υ_2^l برچسب می‌خورند. l عدد کوانتومی برای تکانه زاویه‌ای ارتعاشی است. υ_1 و υ_3 به ترتیب به کشیدگی متقارن و نامتقارن ملکول مربوط می‌شوند و υ_2 بیانگر خمش مولکول است. مولکول‌ها CO_2 در سه حالت ارتعاشی فوق نوسان می‌کنند[۵].

یک حالت کامل توسط سه عدد ($\upsilon_1 \upsilon_2 \upsilon_3$) توصیف می‌شود. (۰۰۱) به (۱۰۰) و (۰۰۱) به (۰۲۰) مهمترین گذارهای انرژی‌ای هستند که به ترتیب تابش‌هایی در۱۰/۶ و۹/۴ میکرومتر دارند. وقتی لیزر شروع به کار می‌کند مد ارتعاشی (۰۰۱) و حالت‌های چرخشی آن بشدت جمعیت‌دار می‌شوند. این حالت‌ها نمی‌توانند به حالت پایه تابش کنند (طبق قواعد گذار) و تنها به شکل ضعیفی به مدهای چرخشی پائین‌تر تابش دارند. ترازهای انرژی ارتعاشی (۱۰۰) و (۰۲۰) نیز به سرعت جمعیت خود را از دست می‌دهند و از آنجائیکه گذارهای مادون قرمز نسبت به این تخلیه جمعیتی، کندتر

[1]-J. C. polyani
[2]-K. N. patel

هستند وارونگی جمعیت رخ می‌دهد. نمودار سطوح انرژی لیزر CO_2 برای حالت‌های چرخشی–ارتعاشی مولکول CO_2 و N_2 در شکل (۲-۱) نشان داده شده است. در این شکل ترازهای چرخشی با عدد کوانتمی J برچسب خورده‌اند.



شکل (۲-۱) نمایش حالت‌های ارتعاشی و چرخشی مولکول CO_2 و N_2 [٦]

۲-۲- ترکیب گاز محیط فعال لیزر CO_2

لیزرهای CO_2 اولیه تنها از گاز CO_2 به عنوان محیط فعال استفاده می‌کردند به همین جهت دسترسی به توان‌های بالا در آنها امکانپذیر نبود، زیرا مولکول CO_2 بوسیله برخوردهای الکترونی مستقیم، بسیار کم برانگیخته می‌شود. در سال ۱۹۶۴ مولکول N_2 برای افزایش بازدهی لیزر CO_2 استفاده شد[۷]. مولکول های CO_2 بوسیلهٔ ملکول‌های N_2 که قبلاً برانگیزش شده‌اند، دمیده می‌شوند. به دلیل بزرگتر بودن سطح مقطع برخورد الکترونی ملکول نیتروژن، ابتدا این ملکول برانگیخته شده و با توجه به نزدیک بودن تراز بالایی لیزر در مولکول CO_2 با اولین تراز برانگیخته در مولکول نیتروژن، دمش تراز بالایی مولکول CO_2 راحت‌تر انجام می‌شود. از آنجاییکه مولکول N_2 دارای دو هسته‌ی

یکسان است، از اینرو گذارهای تابشی بین ترازهای ارتعاشی آن مطلقاً ممنوع‌اند. به بیان دیگر ترازهای ارتعاشی N_2 شبه پایدارند و هنگامیکه N_2 از حالت پایه به تراز $\upsilon = 1$ برانگیزش شد، نمی‌تواند از طریق تابش به تراز پایه برگردد مگر اینکه برخوردی صورت بگیرد و با انتقال انرژی خود به ذره‌ی دیگر، به حالت پایه برگردد. و از آنجائیکه اولین حالت برانگیخته مولکول N_2 خیلی نزدیک به اولین حالت انرژی مدکششی نامتقارن مولکول CO_2 قرار دارد، اگر بتوان N_2 را برانگیخت، می‌توان این انرژی به دام افتاده را به صورت گزینشی به تراز بالایی لیزر منتقل کرد و باعث افزایش وارونی جمعیتی در تراز بالایی مولکول CO_2 شد. گاز دیگری که در محیط تخلیه این لیزر استفاده می‌شود، He است. بدلیل اینکه انرژی لازم برای برانگیزش He به اولین حالت برانگیخته ، ۶۷/۷۱ برابر فاصله $\upsilon = 0$ تا $\upsilon = 1$ در مولکول نیتروژن است، این اتم به تراز برانگیخته نمی‌رود، بلکه از طریق برخوردهای کشسان با اتمها و مولکولهای دیگر باعث انتقال انرژی گرمایی آنها به جداره‌های محفظه تخلیه می‌شود. در حقیقت هلیوم باعث واهلش دو تراز پائینی لیزر CO_2 یعنی (۰۲۰) و (۱۰۰) و نیز کاهش جمعیت تراز چرخشی (۰۱۰) می‌شود.

اضافه کردن گاز هلیوم باعث کنترل پارامتر E/N (نسبت میدان الکتریکی به چگالی مولکول های گاز) می‌شود و E/N لازم برای ایجاد تخلیه مناسب را تنظیم می‌کند و درنتیجه توان الکتریکی تزریق شده در محیط لیزر، بیشتر صرف برانگیزش تراز بالایی لیزر می‌شود.

در فرآیند تخلیه ممکن است ملکول CO_2 به اکسیژن و CO تجزیه شود، به همین دلیل در طراحی یک سیستم دقیق برای جبران شکست ملکول CO_2 و کاهش نسبت آن در محیط، گازهای O_2 یا CO را به محیط فعال لیزر اضافه می‌کنند. همچنین از برخی کاتالیست‌های دیگر از قبیل آب یا H_2 ممکن است برای حل این مشکل استفاده شود. بخار آب تأثیر بسزایی در واهلش ترازهای برانگیزش-شده بالایی ملکول CO_2 دارد[۵].

۲-۳- ملاحظات دما و فشار

یکی دیگر از جنبه‌های مهم طراحی کـه از اهمیـت ویـژه‌ای در فرآینـد لیزدهـی مولکـول CO_2 برخوردار است، دمای گاز در پلاسما است. به عبارتی بدون خنک‌سازی موثر گاز نمی‌تـوان بـه بـازدهی بالایی دست یافت. اگرچه بازدهی کوانتمی نظری لیزرهـای CO_2 حـدود ۴۰٪ اسـت[۵] ولـی بـازدهی عملی آنها کمتر از ۲۰٪ است و قریب ۸۰٪ از توان ورودی با تبدیل توان الکتریکـی بـه گرمـا از طریـق گرم شدن مخلوط گاز در محیط فعال به هدر می‌رود.

دماهای بالای ۶۰۰K موجب اخلال در عملکرد لیزر می‌شود[۵]. بـه همـین جهـت در طراحـی عملی لیزر CO_2 ، باید به دفع حرارت از محیط لیزر توجه خاصی کرد. فراهم کردن یک برطرف کننـده حرارتی اجتناب ناپذیر است. یکی از راه‌های خروج گرما، هدایت آن به دیوارهای محفظه تخلیه اسـت و راه دیگر استفاده از جریان سریع گاز درون کاواک است. روش اول بـرای لیزرهـای کوچـک و بـا تـوان متوسط مناسب است و در لیزرهای با توان بالا به منظور خنک سازی، از جریان سریع گاز استفاده می‌شود. گرمای زیاد باعث می‌شود که توان ورودی صرف سازوکارهای مخـرب دیگـری از قبیـل تجزیـه‌ی ملکول CO_2 شود. به همین جهت حرارت غالباً موجب کاهش توان متوسط در سیستم می‌شود.

بهره لیزر با فشار گاز در محیط تخلیه مرتبط است و با افزایش فشار تـا مقـدار مشخصـی، تـوان خروجی لیزر افزایش می‌یابد. مشخصات پلاسما نیز بطـور مسـتقیم تحـت تـاثیر فشـار گـاز قـرار دارد. حاصلضرب اندازهٔ فاصله‌ی جدایی الکترودها و فشار ، pd، یکی از فاکتورهای مهم در تعیـین مشخصـات پلاسمای درون حجم محیط فعال است که شدیداً به رفتار جریان و ولتاژ وابسته است. بنابراین برای هر مجموعه از پارامترهای لیزری داده شده، یک مقدار pd بهینه وجـود دارد. در طراحـی لیـزر CO_2 بهتـر است، پارامتر فشار متغیر نگه داشته شود. روند معمول آن است که فشار را در بازه‌ی فشارهای میانی ۱ تا ۱۰۰ تور انتخاب می‌کنند.

۲-٤- ملاحظات طراحی

مسئله‌ی اصلی در طراحی لیزر CO_2 بدست آوردن بیشترین توان خروجی از کمترین حجم ممکن با بهترین بازده و کیفیت پرتو است. هیچ لیزر CO_2 بهینه‌ای که تمام نیازها را با هم ارضا کند، وجود ندارد.

۲-٤-۱- ملاحظات رفع گرما

اهمیت خارج کردن گرما از لیزر تا اندازه‌ای است که منجر به دسته بندی لیزرهای CO_2 گوناگون با توجه به نوع خنک‌سازی در آنها می‌شود. محیط فعال در لیزر CO_2 بوسیله یکی از دو راه انتقال گرما بهمراه پخش‌شدگی حرارتی به دیواره های کاواک و یا حرکت سریع مخلوط گاز، خنک می‌شود.

در لیزرهای CO_2 حداکثر توانی که از هر متر محفظه لوله‌ای لیزر بدست می‌آید، بین ۵۰ تا ۸۰ وات قرار دارد. در این لیزرها لوله لیزر از طریق انتقال حرارت خنک می‌شود و مخلوط گاز به آرامی در محیط لیزر جریان دارد. این محدودیت به سازوکار برانگیزش، دستگاه اپتیکی استفاده شده یا قطر لوله بستگی ندارد و تنها ناشی از نوع خنک سازی است. می‌توان با استفاده از آرایش‌های هندسی متفاوت، لیزرهای توان بالایی درست کرد که بوسیلهٔ پخش‌شدگی گرمایی خنک شوند. این قبیل لیزرهای خنک شونده از طریق پخش‌شدگی گرمایی را، لیزرهای CO_2 صفحه تخت[1] می‌نامند[۸]. مزیت عمدهٔ این نوع لیزرها، کم‌حجم بودن و توان خروجی بالای آنها است. سازوکار برانگیزش لیزرهای صفحه تخت، برانگیزش با موج RF است. چرا که برانگیزش آنها با جریان DC کار ساده‌ای نیست. اما هنگامی که توان خروجی چندین کیلووات مدنظر باشد، لیزرهای موسوم به شارش سریع[2] مقرون به صرفه‌تر هستند. اگر چه مشکلات عمده‌ای در طراحی ساخت آنها وجود دارد[۹]. در این لیزرها مخلوط گاز با سرعت بالایی در سیستم شارش می‌یابد. بگونه‌ای که مخلوط گاز با عبور از سیستم‌های خنک‌کننده

[1]-Slab Co_2 lasers
[2]-Fast flow

برای تزریق دوباره به محیط، خنک می‌شود. دو نوع معمول از لیزرهای با جریان سریع گاز بر اساس جهت جریان گاز عبارتند از: شارش سریع عرضی [1] و شارش سریع محوری [2]. لیزرهای با شارش سریع محوری برای افزایش توان، نیازمند طراحی U شکل هستند زیرا در لوله‌های طویل، شارش سریع گاز مشکل است. در نوع شارش سریع عرضی ، مخلوط گاز، محیط فعال را بسیار سریع در جهت عرضی ترک می‌کند. و یکی از راه‌های بسیار موثر در دستیابی به توان‌های بالا را در یک طراحی نسبتا کم حجم، مهیا می‌کند. کیفیت بد پرتو خروجی یکی از معایب این لیزرها است.

۲-٤-۲- ملاحظات اپتیکی

لیزر موجبر راه موثری برای تولید یک لیزر CO_2 کم حجم است. این لیزر شامل دو الکترود عرضی جهت انتقال موج RF است که تشکیل یک خازن می‌دهند و محیط فعال در بین آنها قرار می‌گیرد. این ساختار به دو صورت وجود دارد: دو صفحه تخت موازی و دو صفحه استوانه‌ای موازی که درون هم قرار گرفته‌اند و فاصله این دو صفحه از هم چند میلیمتر بیشتر نیست. و پرتو در مد موجبر [3] منتشر می‌شود. حفره کوچک موجب کار در فشارهای بالا و نیز خنک‌سازی سریع می‌شود و این مزایا باعث می‌شود تا بتوان توان خروجی بالایی را از این سیستم کم‌حجم استخراج کرد. تخلیه‌ی الکتریکی بوسیله‌ی موج RF با بکاربردن میدان‌های الکترومغناطیسی بسامد بالا انجام می‌شود. در این نوع تخلیه سازوکار عمده‌ای که توسط آن توان به پلاسما تزویج می‌شود، توسط برخوردهای کشسان ذرات باردار با گاز پایه صورت می‌گیرد[۱۰].

[1]-Fast transverse flow
[2]-Fast axial flow
[3]-Waveguide mode

۲-٤-۳- سازوکار برانگیزش

برانگیزش یا دمش محیط فعال در لیزر CO_2 بوسیله منبع تغذیه‌ی جریان مستقیم[۱] (DC)، منبع تغذیه‌ی جریان متناوب[۲] (AC)، منبع تغذیه‌ی بسامد بالا[۳] (HF)، بسامد رادیویی یا (RF) و در نهایت مایکروویو[۴] امکان پذیر است. اگر چه معمولاً از برانگیزش بوسیلهٔ AC و مایکروویو استفاده نمی‌شود، اما روش‌های دیگر برانگیزش، بسیار مرسوم است. همچنین از ترکیب این روش‌ها نیز استفاده می‌شود. همانند استفاده‌ی همزمان برانگیزش DC و RF در لیزرهای CO_2 با شارش سریع محوری[۱۱]. استفاده از برانگیزش DC مقرون به صرفه، ساختار ساده و رفتار شناخته‌شده تری دارد. با این حال در ساختن لیزرهای کم‌حجم، برانگیزش DC قابل استفاده نیست و امکان استفاده از آن با هر نوع هندسهٔ کاواک وجود ندارد. عملکرد HF شبیه به عملکرد RF است. عملکرد HF برای بسامد های ۴۰۰ kHz تا ۱ MHz با نوع خاصی از رژیم پلاسما که تخلیه‌ی بی‌صدا[۵] نامیده می‌شود، امکان‌پذیر است[۱۱].

توان بسامد رادیویی می‌تواند به دو صورت القایی یا خازنی و یا ترکیبی از آنها با پلاسما بر همکنش داشته باشد که به ذکر ویژگی‌های آنها خواهیم پرداخت. بطور خلاصه تخلیه خازنی با بسامد رادیویی، جهت استفاده در لیزرهای CO_2 با بسامدی در بازهٔ ۱ تا ۱۰۰ MHz و فشار تا چندصد تور انجام می‌شود.

۲-۵- برخی مزایای تخلیه‌ی الکتریکی با امواج رادیویی

استفاده از فرکانس رادیویی جهت برانگیزش عرضی پلاسمای لیزر $\mathbf{CO_2}$ نسبت به برانگیزش DC مزایای متعددی دارد که مهمترین آنها استفاده از ولتاژ شکست پایین‌تر (چند صد ولت)، پایداری تخلیه‌ی بهتر و بازده بالاتر برانگیزش محیط فعال و از همه مهمتر کم‌حجم بودن شکل کلی لیزر است.

---

[1]-Direct current
[2]-Alternative current
[3]-High frequency
[4]-Micro waves
[5]-Silent discharge

در تخلیه‌ی الکتریکی DC شیب منحنی ولتاژ – جریان منفی است از اینرو از مقاومت‌های سری برای مثبت نگاه داشتن شیب منحنی مشخصه‌ی ولتاژ – جریان استفاده می‌شود که اتلاف توان زیادی را به همراه دارد. درحالیکه در برانگیزش بوسیله امواج رادیویی شیب مثبت منحنی ولتاژ – جریان نیاز به مقاومت بالاست را ازبین می‌برد.

در لیزرهای با برانگیزش DC برای افزایش توان، طول محیط فعال را افزایش می‌دهند که باعث بروز مشکلاتی ازقبیل ولتاژ شکست بالا و خنک سازی می‌شود درحالیکه در لیزرهای با برانگیزش RF افزایش سطح الکتردها راه مناسبی برای افزایش توان و جبران مسایل حرارتی و ولتاژ شکست بالا است.

فصل سوم

۳- تخلیه‌ی الکتریکی خازنی با بسامد رادیویی

۳-۱- مقدمه

همانگونه که قبلاً اشاره شد در تخلیه‌ی الکتریکی با بسامد رادیویی توان RF می‌تواند به دو شکل القایی یا خازنی یا ترکیبی از آنها (تزویج شدگی ماکروویو یا شبه اپتیکی) با پلاسما برهم‌کنش داشته باشد. انواع مختلف برانگیزش محیط تخلیه بوسیله جریان RF در شکل (۳-۱) نمایش داده شده است. هرکدام از این روش‌ها دارای ویژگی‌هایی است که در ادامه به ذکر آنها می‌پردازیم. اینکه چه مقدار از این میدان‌های نوسانی با پلاسما برهم‌کنش می‌کند، به بسامد اعمال شده RF، بسامد پلاسمای الکترون و بسامد برخورد الکترون درون پلاسما بستگی دارد. این پارامترها رسانندگی الکتریکی، بسامد عبور انرژی از پلاسما و نیز عمق پوسته پلاسما را تعیین می‌کنند.

در برانگیزش RF اگر بسامد اعمالی به الکترودها در حدود ۵۰ یا ۶۰ هرتز باشد (بسامدهای پایین جریان AC)، وضعیت تخلیه شبیه به مورد DC خواهد بود زیرا دوره تناوب بسامد اعمال شده خیلی طولانی‌تر از مقیاس زمانی اکثر فرآیندهای فیزیکی پلاسما است و این تخلیه می‌تواند همانند مورد DC بررسی شده و تمام معادلات حاکم همانند مورد DC است. وقتی بسامد اعمال شده به اندازه