بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

تحلیل تئوری رفتار جریان تخلیه در لیزر گازکربنیک تپی فشار اتمسفری با پیش یونش آرایه ای از الکترودهای سوزنی

رضا ترابی[۱]، حسین ثقفی فر[۲]، عزیز مراد کوشکی[۳] و علیرضا اشرف گنجوئی[۴]

۱ و ۲- دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۳- سازمان انرژی اتمی و ۴- دانشگاه علوم و فنون پیشرفته ی محیطی ماهان کرمان

چکیده - در این مقاله با بکارگیری یک مدل تئوری و معادل سازی محیط تخلیه الکتریکی با یک شبکه الکترونی *RLC*، تحلیلی تئوری از رفتار جریان تخلیه در یک لیزر تپی ۵ ژول *TEA CO2* با پیش یونش آرایه ای از الکترودهای سوزنی، ارائه خواهیم کرد. در این مدل با نسبت دادن یک مقاومت دینامیکی به فضای میان الکترودها و درنظر گرفتن معادلات حاکم بر مدار لیزر به تحلیل برخی رفتارهای الکتریکی آن می‌پردازیم و با حل عددی معادلات به روش رانگ-کوتا مرتبه ۴، پارامترهای مهمی از قبیل امپدانس، رفتار زمانی ولتاژ و جریان و از همه مهمتر چگالی الکترونهای محیط تخلیه را محاسبه می‌کنیم.

کلید واژه- تخلیه الکتریکی، پیش یونش آرایه ای از الکترودهای سوزنی، لیزر $TEA\ CO_2$، شبکه الکترونیRLC

Theoretical analysis of electrical discharge behavior in TEA CO2 laser with pin array pre-ionization

Reza torabi[1], Hossein saghafifar[2], Azizmorad koushki[3], Alireza ashraf ganjovi[4]

1,2-Malek-Astar University of Technology, Physics Department, Shahinshahr. 3-Laser and Optics Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran. 4-International Center for Science and High Technology and Environmental Science, Kerman.

Abstract- In this paper a theoretical model for transient behavior analysis of the discharge current pulse in the transversely excited atmospheric pressure CO_2 laser with pin array pre-ionization is presented. The laser discharge tube is modeled by a non-linear RLC electric circuit. By this method the governing partial differential equations are reduced to a system of ordinary differential equations. The equations are solved numerically by the fourth order Runge–Kutta numerical method and sum important variables such as Current and Voltage of the main discharge, Resistance of the plasma column and Electron density in the main discharge region as a function of time, will be calculated.

Keywords: Pin array pre-ionization, RLC electric circuit, TEA CO_2 laser.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-02]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

۱- مقدمه

تحقیق و مطالعه در زمینه لیزرهای TEA CO_2 بیشتر رویکردی تجربی داشته است. از اینرو تاکنون لیزرهایی با انرژی و توان‌های متفاوت با انواع دمش، اعم از DC و فرکانس رادیویی(RF) جهت کاربردهای پزشکی، صنعتی، نظامی، اسپکتروسکپی و غیره ساخته شده است. اما این رویکرد باعث نشده است تا در زمینه تئوری و شبیه‌سازی پارامترهای خروجی لیزر فعالیت‌های چشمگیری صورت نگیرد. از اولین کارهای انجام شده در زمینه‌ی شبیه سازی پارامترهای خروجی لیزرهای CO2، می توان به کار دیویس و همکارانش اسمیت و تامسون در مرکز مطالعات کامپیوتری دانشگاه لیدز انگلیس اشاره کرد که منجر به استخراج پارامترهای خروجی یک لیزر TE CO2، ازقبیل شکل پالس و انرژی شد[۱]. تاکنون کارهای متفاوتی در این زمینه انجام شده است[۲-۵]. اولین قدم و شاید اساسی ترین گام در این مسیر، محاسبه چگالی الکترونهای محیط تخلیه است که از آن بعنوان پالس دمش در شبیه سازی پارامترهای خروجی لیزر استفاده می‌شود. از اینرو بر آن شدیم تا در ادامه‌ی کار قبلی[۶]، شبیه سازی کامپیوتری یک نمونه لیزر تپی ۵ ژول TEA CO2 را با استفاده از معادل سازی محیط تخلیه الکتریکی با یک شبکه الکترونی، انجام دهیم. در این مقاله، بخش اول کار یا محاسبه چگالی الکترونهای محیط تخلیه ارائه شده است.

۲- محاسبه چگالی الکترون‌ها

در این مقاله به محاسبه چگالی الکترونها در محیط تخلیه با استفاده از معادل سازی تخلیه الکتریکی با یک شبکه الکترونی RLC می‌پردازیم. این معال‌سازی به گونه‌ای انجام می‌شود تا نه تنها جفت شدگی مناسبی با مدار خارجی لیزر داشته باشد، بلکه با ملاحظات معادلات حاکم بر پلاسما فرایندهایی همچون بازترکیب ذرات و یونیزاسیون نوری را شامل شود. اگرچه معادلات از نوع دیفرانسیل غیر خطی هستند، آنها را در حالت گذرا با استفاده از معادلات دیفرانسیل خطی تقریب می‌زنیم. در مدل سازی تخلیه الکتریکی فرض شده است که اشعه ماوراء بنفش پیش یونش کننده توسط آرایه ای از اسپارک ها که در اطراف محیط تخلیه اصلی قرار گرفته‌اند، تولید می‌شوند. بعبارتی در این مدل با نسبت دادن یک مقاومت دینامیکی به فضای میان الکترودها (حجم تخلیه) و درنظر گرفتن معادلات KVL برای کل مدار لیزر به تحلیل برخی رفتارهای الکتریکی و گذرای آن می‌پردازیم و اندازه این مقاومت وابسته به زمان، که متناسب با عکس تعداد ذرات موجود در محیط تخلیه الکتریکی لیزر است را نیز محاسبه کنیم.

از اینرو لازم است تا رفتار جریان پلاسمای موجود در فرایند تخلیه الکتریکی را نیز مورد بررسی قرار دهیم. و عملکرد دینامیکی پلاسمای سیستم لیزر را نیز درنظر بگیریم. با حل همزمان معادلات مربوط، علاوه بر محاسبه امپدانس تخلیه، به تحلیل رفتار دینامیکی آن نیز خواهیم پرداخت.

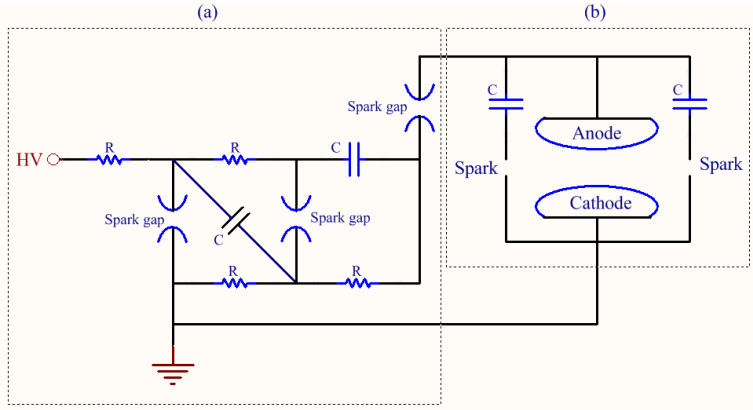
۲-۱- مشخصات لیزر

لیزری که مورد تحلیل قرار می‌گیرد یک لیزر ۵ ژول با فرکانس کاری ۱۰ هرتز می‌باشد. ابعاد الکترود ۴۰×۹ میلیمتر است و پروفایل خم آن ارنست است که فاصله‌ی الکترود ها از هم ۳/۲ سانتیمتر می‌باشد. بخش پیش یونش از ۲۴ جفت گاف جرقه که در مجاورت هم و در دو ردیف موازی نصب شده اند، تشکیل شده است. گاز توسط یک دمنده، ضمن گردش خنک می شود. سیستم راه انداز لیزر یک مدار مارکس بانک سه طبقه با یک منبع تغذیه‌ی ۲۰ کیلوولتی است. طرح کلی سیستم لیزر در شکل ۱ نشان داده شده است که از دو بخش مدار معادل جریان و محفظه‌ی لیزر تشکیل شده است.

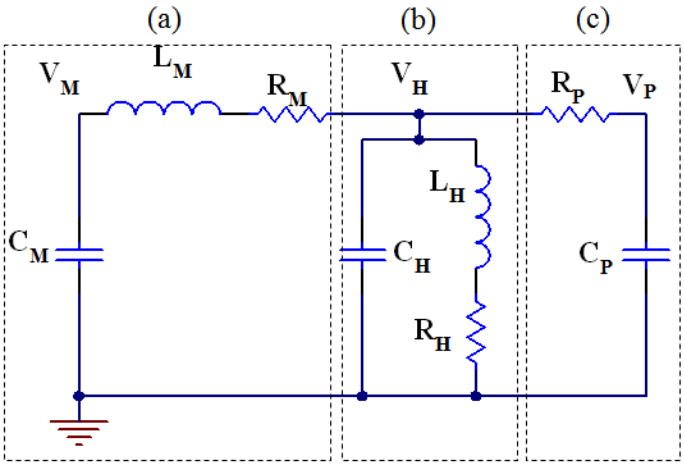
۲-۲- مدل تئوری

با اعمال ولتاژ مناسب برای شکست گاز و به دنبال آن ایجاد میدان الکتریکی در حجم تخلیه، فرایند یونیزاسیون گاز آغاز می‌شود. بر اساس یک فرمولبندی هیدرودینامیکی برای گاز یونیزه و با فرض حالت شبه تعادلی توصیف تحلیلی برخی رفتارهای الکتریکی و گذرای لیزر را انجام می‌دهیم. در شکل ۲ مدار معادل سیستم لیزر نشان داده شده است. C_M خازن اصلی مدار راه انداز لیزر است که انرژی لازم برای شکست گاز را تامین می‌کند و L_M یک ویژگی القایی است که به مدار خارجی لیزر نسبت داده می‌شود. C_H یک خازن اتلافی است که میان الکترودهای لیزر ایجاد می‌شود و L_H

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-02]



شکل ۱: طرح کلی یک سیستم لیزر TEA CO_2 با پیش یونش آرایه‌ای از الکترودهای سوزنی: a- مدار معادل جریان، b- محفظه‌ی لیزر



شکل ۲: مدار معادل سیستم لیزر TEA CO2 با پیش یونش آرایه‌ای از الکترودهای سوزنی: a- مدار راه انداز لیزر b- مدار معدل با تخلیه اصلی در محفظه لیزر c- مدار معادل با بخش پیش یونش لیزر

خاصیت القایی نسبت داده شده به محیط تخلیه اصلی لیزر است. در محاسبات پیش رو از مقادیر L_H و C_H به دلیل ناچیز بودن در مقایسه با سایر کمیت‌ها صرفنظر می‌کنیم. و مدار بخش پیش یونش یک مدار RC است. برای مدار معادل شکل ۲ قوانین KCL برای V_M، V_H و V_P، به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{dV_M}{dt} = -\frac{g_H+g_P}{C_M}V_H + \frac{g_P}{C_M}V_P \qquad (۱)$$

$$\frac{dV_H}{dt} = \frac{1}{L_M(g_H+g_P)}V_M - \frac{1/L+dg_H/dt+dg_P/dt-g_P^2/C_P}{g_H+g_P}V_H + \frac{dg_P/dt-(g_P/C_P)g_P}{g_H+g_P}V_P \qquad (۲)$$

$$\frac{dV_P}{dt} = \frac{g_P}{C_P}V_M - \frac{g_P}{C_P}V_P \qquad (۳)$$

که g یا 1/R، رسانندگی پلاسما است. و به شکل زیر با چگالی الکترونها مرتبط است:

$$g_i = \frac{e\mu A_i n_{ei}}{d_i}, \quad i = H, P \qquad (۴)$$

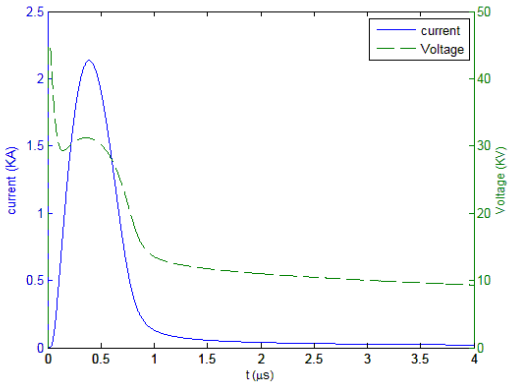
که اندیس i برای تخلیه اصلی (H) و پیش یونش (P) استفاده می‌شود. و n_e چگالی الکترون است. معادله پیوستگی برای چگالی الکترون را می‌توان به شکل زیر بیان کرد:

$$\frac{dn_{ei}}{dt} = S_i + \alpha_i|v_i|n_{ei} - \beta n_{ei}^2 - \delta n_{ei}N, \qquad (۵)$$

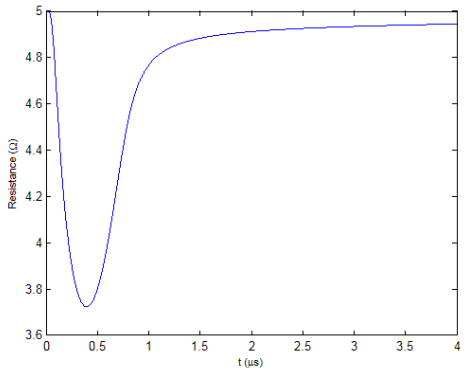
S_i منبع تولید الکترون از سیستم پیش یونش توسط پدیده یونیزاسیون نوری است. α ضریب یونیزاسیون، β ضریب بازترکیب ، δ ضریب جداسازی یونهای منفی و N غلظت مولکولهای محیط است. با حل معادلات (۵) - (۱)

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-02]

با استفاده از روش رانگ کوتاه مرتبه ۴ و اعمال شرایط اولیه، می‌توان علاوه بر محاسبه چگالی الکترونها در حجم تخلیه، متغیرهایی از قبیل ولتاژ، جریان، و مقاومت دینامیکی پلاسمای آن را نیز محاسبه کرد. در شکل‌های ۳ تا ۵ این نتایج نشان داده شده است.



شکل ۳: منحنی تغییرات ولتاژ و جریان تخلیه اصلی بر حسب زمان

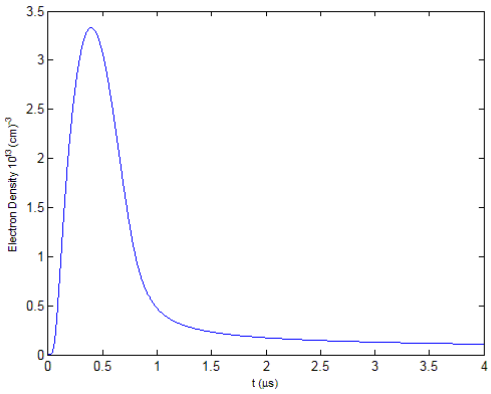


شکل ۴: منحنی تغییرات مقاومت پلاسما در ناحیه تخلیه اصلی بر حسب زمان

همانگونه که در شکل ۳ نشان داده شده است، با اعمال ولتاژ مورد نیاز برای شکست گاز، این فرایند در طی حدود ۰٫۲ میکروثانیه در حجم تخلیه رخ می‌دهد و سپس حدود نیم میکروثانیه ولتاژ ثابت و طی این زمان پیک جریان پلاسما رخ داده و مقاومت پلاسما به کمترین میزان خود می‌رسد (شکل ۴). سپس ولتاژ و جریان شروع به افت می‌کنند و از آنجاییکه مقاومت پلاسما بی‌نهایت نیست، ولتاژ به مقداری غیرصفر در طی ۴ میکروثانیه می‌رسد. و درنهایت منظور مورد نظر یعنی محاسبه چگالی الکترونها در حجم تخلیه حاصل می‌شود. تغییرات این کمیت بر حسب زمان در شکل ۵ نمایش داده شده است.

۳- نتیجه‌گیری

با استفاده از مدلی تئوری و با نسبت دادن یک مقاومت



شکل ۵: منحنی تغییرات چگالی الکترون در تخلیه اصلی بر حسب زمان

دینامیکی به فضای میان الکترودها و درنظر گرفتن معادلات حاکم بر مدار یک لیزر تپی ۵ ژول TEA CO_2 با پیش یونش آرایه ای از الکترودهای سوزنی، تحلیل برخی رفتارهای الکتریکی آن صورت گرفت و پارامترهای مهمی از قبیل رفتار زمانی ولتاژ و جریان تخلیه، امپدانس پلاسما و چگالی الکترونهای محیط تخلیه محاسبه شد. درنتیجه با دانستن توزیع چگالی الکترونها در حجم تخلیه با استفاده از یک مدل واقعی، با بهره‌گیری از مدل‌های شبیه‌سازی، می‌توان پارامترهای خروجی لیزر را شبیه سازی کرد.

مراجع

[1] K. Smith and R.M. Thomson, Computer Modelling of Gas Lasers. New York: PlenumPress. 1978.

[2] A. Bahrampour and A. Ganjovi, Theoretical analysis of electrical transient behaviour in TEA CO2 laser with dielectric coronapre-ionization, J. Phys. D: Appl. Phys. 36 (2003) 2487–2497

[3] B. Abdul Ghani TEA CO2 laser simulator: A software tool to predict the output pulse characteristicsof TEA CO2 laser. Computer Physics Communications 171 (2005), 93–106.

[4] A. M. Koushki · K. Silakhori · S. Jelvani, Kinetic modeling of a slow flow CW CO2 laser, Opt Quant Electron (2012) 43:23–33

[۵] ترابی، رضا، ثقفی فر، حسین، سویزی، مهدی و محمدی، حمیدرضا، *شبیه سازی لیزر CO2 با برانگیزش الکتریکی عرضی در فشار اتمسفر*، دومین همایش ملی مهندسی اپتیک و لیزر، ۱۳۹۰

[۶] رضا ترابی و همکاران، *طراحی و ساخت لیزر گازکربنیک تپی فشار اتمسفری با توان خروجی ۵ ژول در فرکانس ۱۰ هرتز با پیش یونش گاف جرقه*، بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران، ۱۳۹۲

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-02]