بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

بررسی عددی میدان الکتریکی در لیزر عرضی ضربانی فشار جوی گازکربنیک با استفاده از روش واهلش متوالی

ناهید جهانیان[۱و۳]، مجید آرام[۱]، نادر مرشدیان[۲] احمد مهرآمیز[۳]

[۱]پژوهشکده لیزر و اپتیک، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، انتهای کارگر شمالی، تهران.

[۲] پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ایی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، انتهای کارگرشمالی، تهران.

[۳] گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه بین‌المللی‌امام‌خمینی، قزوین.

چکیده - در این مقاله چگونگی توزیع و نایکنواختی میدان الکتریکی ناشی از الکترودهای اصلی و پیش یونش در یک لیزر عرضی ضربانی فشار جوی گازکربنیک با استفاده از روش عددی واهلش متوالی محاسبه و بررسی گردیده است. همچنین تفاوت در انحرافات میدان در دو مدل پیش یونش کرونا و ردیف جرقه مقایسه شده است. نتایج گویای آن است که میزان انحراف میدان در مدل ردیف جرقه قدری کمتر از مدل کرونا است. همچنین نشان داده‌شده است که با مقداری انحنا در لبه‌های سطح فعال الکترودها انحراف میدان می‌تواند تا حد قابل قبولی کاهش یابد.

کلیدواژه‌ها- لیزر ضربانی عرضی گازکربنیک، شبیه‌سازی عددی میدان، واهلش متوالی، پیش یونش کرونا و ردیف جرقه

Numerical Investigation of the Electric Field in the TEA CO_2 Laser Using Successive Over Relaxation Method

Nahid Jahanian[1,3], Majid Aram[1], Nader Morshedian[2], Ahmad Mehramiz[3]

[1]Laser & Optics Research School, NSTRI, North Kargar Ave., Tehran, P.O.Box: 14155-1339,IRAN.

[2]Plasma and Nuclear Fusion Research Institute, NSTRI, North Kargar Ave, Tehran, P.O.Box: 14155-1339, IRAN.

[3]Department of Physics, Faculty of Science, Imam Khomeini International University, Qazvin, IRAN.

Abstract- In this paper the distribution and non-uniformity of electric field resulted of the main electrodes and pre-ionization in the TEA CO_2 laser is investigated using SOR method. Also the difference in uniformity of electric field related to Corona and Spark Array pre-ionization methods are compared. The results show that the deviation of the electric field in Spark Array Model is less than Corona model. Besides, it has been shown that using electrodes with curved active area edges the field deviation can be reduced to acceptable level.

Key Words: Carbon dioxide laser pulse width, Numerical simulation of electric field, Pre-ionization, S.O.R, Electrode, Corona and Spark Array pre-Ionization

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

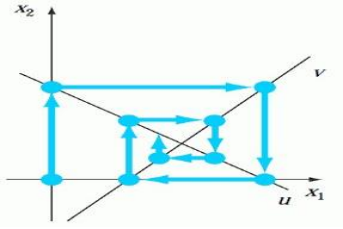
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

۱- مقدمه:

کار بر روی لیزرهای ضربانی گازکربنیک در سال ۱۹۶۸ باانرژی خروجی در حد چند ژول شروع شد. پروژه‌های لیزرهای گداخت بزرگ، محرک پیشرفت‌هایی در این حوزه بود که سیستم‌های غول‌پیکری در اندازه ۱۰۰ کیلوژول به وجود آمد [۱]. یکی از مهم‌ترین اجزای لیزرهای گازی با تخلیه الکتریکی، الکترودهای آن هستند. الکترودها با آزاد کردن الکترون‌های اولیه و چگالی زمینه‌ای الکترونی موجود نقش مهمی در ایجاد یک تخلیه الکتریکی مناسب (تخلیه افروخته-Glow Discharge) دارند و سبب القا عمل لیزر با بازدهی بهتر می‌شود [۲]. شکل هندسی الکترودها یکی از پارامترهای مهم در ایجاد یکنواختی میدان و درنتیجه تخلیه افروخته همگن‌شده و درنهایت سبب افزایش بازدهی لیزر می‌شود [۳]. برای کاهش میدان شدید موردنیاز درروش تحریک طولی، تحریک عرضی موردتوجه واقع شد و لیزر گازکربنیک موردمطالعه در اینجا نیز مبتنی بر تخلیه ضربانی عرضی با استفاده از یک مقطع نسبتا ساده و ارزان که در عمل مورداستفاده قرارگرفته، است. دو نوع پیش یونش کرونا و ردیف جرقه در نظر گرفته‌شده است که شکل هندسی آن‌ها به‌طور دقیق در مراجع [۴] و [۵] توضیح داده‌شده است. در این پژوهش اندازه میدان الکتریکی در نقاط مختلف نواحی نزدیک لبه این الکترودها و انحراف میدان به‌عنوان معیاری از میزان به‌صرفه بودن استفاده از چنین الکترودهای نسبتا ساده‌ای، ارائه شده است.

۲- اصول نظری:

روش به دست آوردن انحراف میدان الکتریکی مبتنی بر حل معادله لاپلاس با تقریب SOR (Successive Over-Relaxation) بوده است.



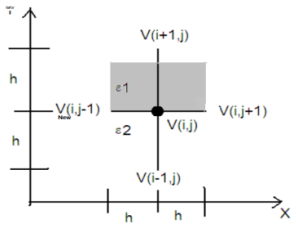
شکل ۱: روش عددی واهلش متوالی (SOR) به‌صورت نمادین [۶]

مطابق شکل (۱) در این روش جواب هر مرحله مبتنی بر جواب مرحله قبل بوده و انتخاب ضریب بزرگ‌نمایی (Scaling Factor) منجر به افزایش سرعت پردازش می‌گردد. همچنین میزان خطای محاسبات در این روش کاهش می‌یابد. در این روش مقدار تقریبی بردار پاسخ $x^{(k)}$ با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$x_i^{(k)} = (1-w)x_i^{(k-1)} + \frac{w}{a_{ii}}\left\{b_i - \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij}x_j^{(k)} - \sum_{j=i+1}^{n} a_{ij}x_j^{(k-1)}\right\} \quad (۱)$$

i=1,2,…,n و w ضریب بزرگ‌نمایی عددی بین ۰ و ۲ است و درصورتی‌که w=۱ قرار داده شود معادله بالا تبدیل به فرمول روش گاوس-سایدل می‌شود [۶]. a_{ij} درایه‌های ماتریس ضرایب و b_i بردار ثابت معادله است. $x_j^{(k-1)}$ جواب در مرحله قبل است. محاسبه پتانسیل [۷] در حالت کلی شامل محیط‌هایی با پذیرفتاری‌های مختلف، به‌صورت زیر درروش واهلش متوالی ابداع‌شده است:

$$V_{new}(i,j) = (1-w)*V(i,j) + \frac{w}{4}((V(i,j+1)+V_{new}(i,j-1) + (\varepsilon_1 V(i+1,j)+\varepsilon_2 V(i-1,j))/(\varepsilon_1+\varepsilon_2)) \quad (۲)$$



شکل ۲: نقطه مابین دو محیط با دی‌الکتریک متفاوت [۸]

همان‌طور که در شکل ۲ مشخص‌شده است ε_1 و ε_2 ضریب گذردهی دو محیط طرفین نقطه موردمحاسبه هستند. $V_{new}(i,j-1)$ استفاده‌شده در معادله (۲)، پتانسیل محاسبه‌شده برای نقطه قبل است (لازم به ذکر است که رابطه فوق با در نظر گرفتن چگالی بار الکتریکی خالص صفر از معادله پواسون به دست می‌آید) و رابطه میدان الکتریکی با استفاده از مقادیر عددی به‌دست‌آمده برای تابع پتانسیل الکتریکی در تمام نقاط با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود. ϕ_i پتانسیل در هر نقطه است و E_x و E_y به ترتیب میدان در راستای x و y محور مختصات دکارتی هستند. در این تحقیق انحراف میدان مربوط به سطح مقطع پرداخت (انحنادار) شده در دو نوع پیش یونش کرونا (Corona) و ردیف جرقه (Spark Array) مورد مقایسه قرارگرفته است. به

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

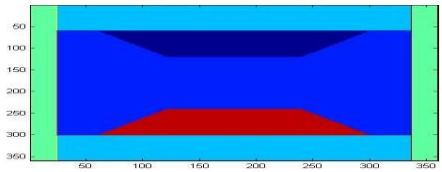
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

کمک رابطه (۴) انحراف میدان را تعیین می‌کنیم به‌طوری‌که E_0 میدان نقطه مرکزی ناحیه فعال است و ΔE اختلاف میدان نقطه مرکزی و یک نقطه در لبه ناحیه فعال الکترودها است:

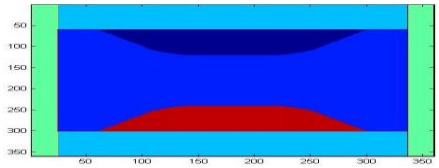
$$|E_x|=\frac{\phi_2-\phi_1}{x_2-x_1},|E_y|=\frac{\phi_2-\phi_1}{y_2-y_1},E=\sqrt{E_x^2+E_y^2} \quad (۳)$$

$$Field\ Deviation=\frac{\Delta E}{E_0}*100 \quad (۴)$$

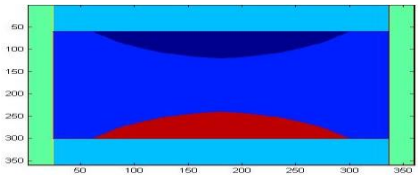
سطح مقاطع در نظر گرفته‌شده و مقایسه شده در این تحقیق به‌صورت شکل‌های ۳ و ۴ و ۵ است. البته لازم به ذکر است که مقطع شکل ۴ بیشترین مشابهت را با نمونه عملی مورداستفاده در آزمایشگاه دارد. علت در نظر گرفتن این‌گونه سطح مقطع الکترودی این است که میزان نایکنواختی میدان در نقاط نوک‌تیز و غیر نوک‌تیز قابل‌مشاهده و بررسی باشد.



شکل ۳: مقطع با شعاع خم صفر



شکل ۴: مقطع با شعاع خم ۰٫۲ میلی‌متر



شکل ۵: مقطع با شعاع خم ۰٫۵ میلی‌متر

محیط شبیه‌سازی‌شده در مورد پیش یونش Corona شامل محیط‌های شیشه‌ای در طرفین و پلکسی گلس بالا و فلز زمین شده در پایین اطراف محیط لیزری است و در مورد پیش یونش Spark Array بالای الکترودها محیطی از جنس پلکسی گلس و پایین فلز زمین شده و طرفین میله فلزی با پتانسیل صفر (به دلیل هم‌پتانسیل شدن الکترودهای پیش یونش بالا و پایین در اثر بروز جرقه) قرار داده‌شده است. ثابت ضریب گذردهی الکتریکی برای محیط گازی با توجه به نسبت اختلاط گازها به‌دست‌آمده است [۹].

۳- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

با استفاده از این روش توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی در محیط فعال لیزر TEA CO_2 با برنامه‌نویسی در محیط MATLAB کاملاً شبیه‌سازی‌شده است. مقاطع در پتانسیل‌های مختلف در نظر گرفته‌شده و مرزها نیز زمین شده‌اند. مقطع ذوزنقه‌ای شکل ۳ و پرداخته‌شده است. یکی از مقاطع در پتانسیل ۱۰- کیلوولت و دیگری در پتانسیل صفر است. در این روش ما به مش بندی محیط شبیه‌سازی‌شده لیزر پرداخته و پتانسیل اولیه هر محیط را به آن نسبت داده‌ایم، سپس با محاسبه میدان در هر نقطه به سمت محاسبه میدان نقطه بعدی پیش رفتیم و درنهایت انحراف میدان در لبه چپ و راست محیط فعال (در فاصله ۵ میلی‌متر از مرکز) نسبت به نقطه مرکزی بین الکترودها به دست آورده شده که این انحراف میزان بهینه بودن مقطع الکترودها در کاهش احتمال بروز جرقه در لیزر را مشخص می‌کند [۳]. در هر دو پیش یونش کرونا و ردیف جرقه اساس کار بر این است که مقاطع الکترودی در یک محفظه کاملاً بسته هادی و در پتانسیل‌های مشخص در نظر گرفته‌شده‌اند. برای حل معادله لاپلاس در این مسئله الکتروستاتیکی، به دلیل مشخص بودن پتانسیل مرزهای محیط که با رعایت شرایط عملی صفر در نظر گرفتیم، از شرایط مرزی دیریکله استفاده‌شده است. در جدول ۱ ثابت گذردهی خلا و ثابت دی‌الکتریک گازهای ترکیب‌شده در نسبت اختلاط مختلف نشان داده‌شده است. معادله (۵) ارتباط بین ثابت گذردهی خلأ (ε) و ثابت دی‌الکتریک (K) را بیان می‌کند. نتایج عددی حاصل در جدول ۲ آورده شده است.

$$K\times\varepsilon_0=\varepsilon \quad \varepsilon_0=8.85\times10^{-18}c\frac{C}{N.mm^2} \quad (۵)$$

جدول ۱: ε و K گاز مخلوط شده در نسبت‌های مختلف گاز

CO_2:N_2:He	K	$\varepsilon(\times10^{-18}c\frac{C}{N.mm^2})$
1:1:1	1.0007	8.8565

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

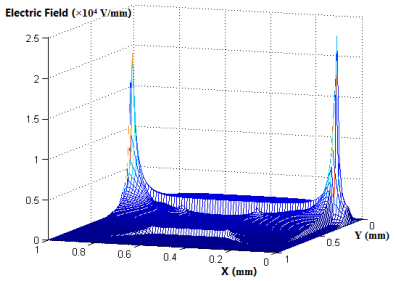
1:1:8	1.0006	8.8557
1:1:3	1.0007	8.8560

جدول ۲: تغییرات انحراف میدان الکتریکی در حضور مقاطع با شعاع انحنا لبه‌ای مختلف و ضریب اختلاط متفاوت گازها در دو مدل کرونا و ردیف جرقه

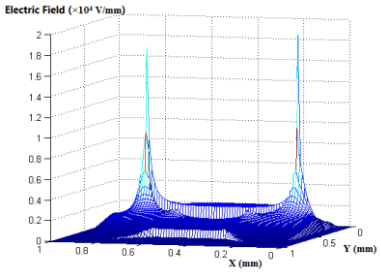
Radius / Mix	$0(mm)$		$\frac{1}{5}(mm)$		$\frac{1}{2}(mm)$	
CO_2:N_2:He	Spark Array	Corona	Spark Array	Corona	Spark Array	Corona
1:1:1	0.8907	0.8944	0.8653	0.8692	0.8065	0.8119
1:1:8	0.8907	0.8944	0.8653	0.8692	0.8065	0.8119
1:1:3	0.8907	0.8944	0.8653	0.8692	0.8065	0.8119

۴- نتیجه‌گیری

در هر دو مدل کرونا و ردیف جرقه مربوط به سطح مقطع دارای نقاط تیز انحرافات میدان و تغییرات پتانسیل بیشتر از سطح مقطع پرداخته‌شده است.



شکل ۶: شکل سه‌بعدی تغییرات میدان الکتریکی در مدل پیش یونش کرونا. محور عمودی مربوط به میدان الکتریکی ($\times 10^4$V/mm) است.



شکل ۷: شکل سه‌بعدی تغییرات میدان الکتریکی در مدل پیش یونش ردیف جرقه. محور عمودی مربوط به میدان الکتریکی ($\times 10^4$V/mm) است.

در این دو مدل در مخلوط‌های گازی متفاوت به دلیل اینکه الکترود دارای پتانسیل بالا در محیط مخلوط گازی قرارگرفته بوده است و چگالی بار آزاد محیط هم صفر در نظر گرفته‌شده، اختلاف زیادی در مقدار انحراف میدان مشاهده نمی‌شود (که طبیعی است)، اما در یک مخلوط گازی و شعاع سطح مقطع یکسان میزان انحراف میدان در مدل کرونا کمی بیشتر از ردیف جرقه بوده است که با در نظر گرفتن مزایای پیش یونش کرونا (بیناب تابشی فشرده و ارزانی نسبی) قابل‌چشم‌پوشی است.

[1] W. H. Witteman " *The CO_2 Lasers*" springer-verlag, chap۴, (1987).

[2] J. Wilson – J. F Havaks "*Laser principle and application*", Hemel Hempstead: Prentice-Hall, 1987.

[۳] فرشته ساده، مجید آرام، ابراهیم آقایاری "*بررسی مقاطع الکترودی لیزرهای گازی عرضی ضربانی فشار جوی* "، سومین کنفرانس الکترومغناطیس مهندسی کام ایران، ۱۳۹۳.

[۴] ف.سلطانمرادی، س.ا.نعیمی، "*ساخت لیزرکوچک ضربانی با منبع پیش یونش ردیف جرقه*"، نشریه علمی سازمان انرژی اتمی ایران، شماره ۷، بهار ۱۳۶۷.

[5] M.Aram, A.Behjat, M.Shabanzadeh, F.Soltanmoradi, "Parameters of a trigatron-driven low-pulse-repetition-rate TEA CO2 laser preionised by a surface corona discharge ", Quantum Electronics 37 (1) 60 - 62 (2007).

[6] http://liberica.org

[7] James R. Nagel "*Solving the Generalized Poisson Equation Using the Finite-Difference Method (FDM)*"University of Utah, 2012

[8] http://eng.utah.edu/~cfurse/NASA/User%20Guide/01%20Zo%20Catalog/Description%20of%20FDFD%20Method.pdf

[9] J. W. Schmidt and M R. Moldover,"*Dielectric Permittivity of Eight Gases Measured with Cross Capacitors*" International Journal of Thermo physics, Vol. 24, No. 2, March 2003.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]