



اندازه‌گیری چگالی الکترون در پلاسمای کلید تریگاترون

مجید آرام*^۱، نادر مرشدیان^۲، سجاد اسدی^۳، اسماعیل اسلامی^۳، فریبا منصوری^۱

۱. پژوهشکده‌ی لیزر و اپتیک، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران - ایران
۲. پژوهشکده‌ی فیزیک پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۵۱۱۳-۱۴۳۹۹، تهران - ایران
۳. دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، کدپستی: ۱۳۱۱۴-۱۶۸۴۶، تهران - ایران

چکیده: بهینه‌سازی سنج‌های محیط پلاسمای کلید گازی سه الکترونی تریگاترون، به دلیل کاربرد گسترده‌ی آن در اغلب تجهیزات پلاسمایی، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. مبانی نظری کار مبتنی بر شبیه‌سازی مدار تخلیه شامل: خازن اصلی، ضریب القایی مدار و مقاومت پلاسما در حالت کلید بسته، با یک نوسان‌گر کندمیرا بوده است. ولتاژ کلید در محدوده‌ی ۶ تا ۱۵ کیلوولت، فشار داخل کلید در بازه‌ی ۱ تا ۱٫۵ اتمسفر و شکاف جرقه در گستره‌ی ۱٫۴ تا ۲٫۸ میلی‌متر بود. چگالی الکترون محیط پلاسمای درون کلید گازی در حالت شکست خودبه‌خود با استفاده از اندازه‌گیری جریان و ولتاژ وابسته به زمان کلید تعیین شد. چگالی الکترونی پلاسما در محدوده‌ی $۰٫۵ \times 10^{24}$ تا $۳٫۵ \times 10^{24}$ بر متر مکعب به دست آمد و این بازه با مقدارهای گزارش شده برای محیط پلاسمایی مربوط به تخلیه‌ی قوس و جرقه در فشار جو و بالاتر از آن، که مبتنی بر عملکرد جویباری شکست الکترونیکی است، در تطابق خوبی است.

کلیدواژه‌ها: کلید تریگاترون، چگالی الکترون، پلاسما

Measurement of the plasma electron density of a trigatron switch

M. Aram*¹, N. Morshedian², S. Asadi³, A. Eslami³, F. Mansori¹

1. Laser and Optics Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 11365-8486, Tehran - Iran
2. Plasma physics and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 14399-5113, Tehran - Iran
3. Department of Physics, Iran University of Science and Technology, P.O.Box: 16846-13114, Tehran - Iran

Abstract: Because of its wide applications in plasma based equipment, plasma parameters of a trigatron switch are investigated with the intention of the switch optimization. The theoretical method is based on the simulation of a closed switch discharge circuit, included the main capacitor, total circuit inductance, and plasma resistance, in an under damped oscillator. The charging voltage is between 6 to 15 kilovolts, the switch pressure is between 1 to 1.5 atmospheres and the gap is 1.4 or 2.8 mm. The density of the discharge plasma of the switch in self-breakdown mode is determined using the recorded time varying voltage and the switch current. The obtained electron density of plasma is $(0.5-3.5) \times 10^{24}$ per cubic meter, which is in good agreement with the results published in standard references for arc and spark plasma in atmospheric pressure, based on the streamers mechanism.

Keywords: Trigatron switch, Electron density, Plasma



۱. مقدمه

که در آن R و L به ترتیب، مقاومت اهمی و اندوکتانس معادل کل حلقه و C_m ظرفیت بانک خازن حلقه است. با وارد نمودن فایل‌های رقمی ثبت شده به وسیله‌ی نوسان‌نما برای تغییرات زمانی جریان، در محیط نرم‌افزار Matlab به صورت یک ماتریس $2 \times n$ و برازش معادله‌ی ۱ به ماتریس فوق مقدار عددی γ و ω ، و با حل دو معادله و دو مجهول برحسب R و L مقدار عددی مقاومت اهمی و مقاومت ظاهری^(۵) کل حلقه به دست می‌آید. هم‌چنین در نبود میدان مغناطیسی رابطه‌ی بین چگالی الکترون پلاسما، n_e ، با رسانش الکتریکی محیط پلاسما، σ_p ، و ضریب تحرک الکترون، μ_e ، این است [۱۱]

$$n_e = \frac{\sigma_p}{e\mu_e}, \quad \sigma_p = \frac{d_p}{R_p A_p}, \quad A_p = \pi r_p^2 \quad (2)$$

که در آن r_p و d_p به ترتیب، شعاع مقطع و طول مسیر پلاسمایی درون کلید است.

۳. شرح آزمایش

آرایش تجربی آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده است. در این شکل P.S منبع تغذیه‌ی ولتاژ- بالایی متغیر (مدل MINTROL ساخت Universal Voltronics)، R_b مقاومت بالاست^(۶) (۱٫۵ مگا اهم)، C_m بانک خازن اصلی (که برای عملکرد یک لیزر عرضی ضربانی فشار جوی گاز کربنیک استفاده می‌شود) (۷۵ نانوفاراد سرامیکی Murata)، T.S کلید تریگاترون، کاونده‌ی ولتاژ (V.P) با نسبت تبدیل هزار ولت به ازای یک ولت خروجی (Tektronix P6015A)، C.T مبدل جریان با نسبت ۴۰ آمپر به ازای یک ولت خروجی (مدل Pearson elec. Inc. 1025) و D.S.O نوسان‌نمای رقمی^(۷) (Tektronix 3052) است. مقدارهای ولتاژ و فشار درون کلید و نیز فاصله‌ی الکترودها به عنوان سنج‌های محیطی آزمایش در جدول ۱ درج شده‌اند.

جدول ۱. مقدارهای سنج‌های محیطی به کار رفته در آزمایش

ولتاژ (kV)	فشار درون کلید (torr)	فاصله‌ی الکترودها (cm)
۶	۷۶۰	۰٫۱۴
۹	۱۱۴۰	۰٫۱۴
۱۰٫۴	۷۶۰	۰٫۲۸
۱۱	۱۵۲۰	۰٫۱۴
۱۵	۱۱۴۰	۰٫۲۸

کلید گازی سه الکترودی تریگاترون^(۱) از جمله کلیدهای گازی پر کاربرد است [۱، ۲] که در زمینه‌های گوناگونی، از انواع لیزرهای گازی ضربانی [۳، ۴، ۵] و دستگاه‌های مولد پلاسما [۶] گرفته تا شتاب‌دهنده‌های ذرات [۷] مورد استفاده قرار می‌گیرد. کلید تریگاترون هم مانند تایراترون^(۲) اساساً دارای دو الکترودی اصلی و یک الکترودی آتش ولی با فشار گاز محیطی بسیار بالاتر از تایراترون است به نحوی که ناحیه‌ی کاری آن در شاخه‌ی سمت راست منحنی پاشن^(۳) و بسیار دور از کمینه‌ی آن قرار می‌گیرد؛ از این رو نیازمند ضربان آتش با قله‌ی بین ۲۰ تا ۳۰ کیلوولت برای شروع مرحله‌ی اتصال و تبدیل محیط به پلاسما با رسانایی بالا است. این کلید به سبب سادگی نسبی و تحمل توان عبوری زیاد در عین دارا بودن ولتاژ قطع بالا (از مرتبه‌ی چند صد کیلوولت)، بر کلید تایراترون برتری دارد. هم‌چنین آرایش‌های متفاوتی برحسب قطبش نسبی ضربان ولتاژ آتش و ولتاژ الکترودهای مجاور و مقابل برای کلید تریگاترون متصور است. تأثیر آرایش‌های قطبشی ضربان ولتاژ راه‌انداز برحسب ولتاژ تغذیه‌ی اصلی در فرمان‌پذیری و سرعت وصل یک نمونه از کلید فوق پیش از این به صورت تجربی بررسی شده است [۸]. در این جا هدف، بررسی اثر عوامل بیرونی بر چگالی پلاسمای تخلیه‌ی الکتریکی درون کلید در حالت متصل، برای یافتن شرایط کاری هر چه مناسب‌تر برای کلید و افزایش کارایی کل مدار شکل‌دهنده‌ی تپ^(۴)، بوده است. از آن جا که روش‌های استاندارد اندازه‌گیری چگالی پلاسما [۹] نیازمند کاربرد تجهیزهای جانبی گران‌قیمت بوده و عموماً برای پلاسمای با چگالی بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این جا نظر بر این بوده است تا با استفاده از ثبت مشخصه‌های الکتریکی تجربی کلید و تحلیل ساده‌ی مداری، چگالی الکترون پلاسمای کلید اندازه‌گیری شود.

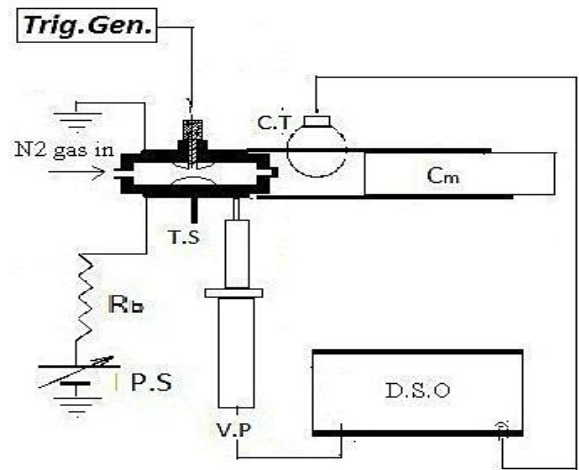
۲. مبانی نظری

با در نظر گرفتن مقاومت معادل محیط درون کلید به صورت مقاومت اهمی پلاسما، سری شده با یک امپدانس القایی، رابطه‌ی تغییرات زمانی جریان کلید را می‌توان چنین نوشت [۱۰]

$$I(t) = I_0 e^{-\gamma t} \sin(\omega t), \quad \gamma = -\frac{R}{L}, \quad \omega = \sqrt{\omega_0^2 + \gamma^2}, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_m}} \quad (1)$$



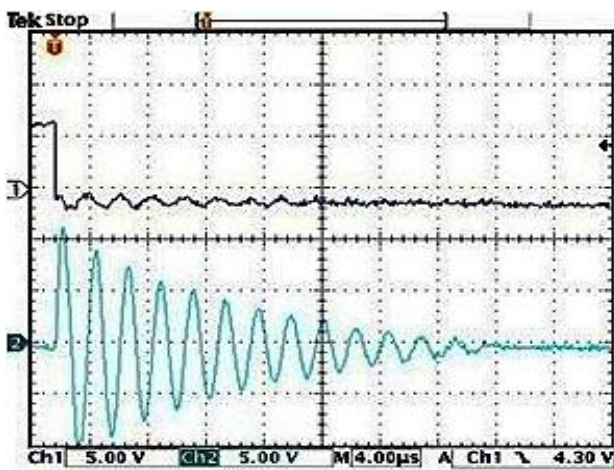
کلید از مرتبه 10^{24} m^{-3} به دست آمد که با توجه به مرتبه‌ی گزارش شده برای پلاسمای جرقه [۱۳] قابل قبول است. در شکل‌های ۴ و ۵ رابطه‌ی بین چگالی الکترون و حاصل ضرب فشار در فاصله (Pd) و شدت میدان کاهیده‌ی کلید (E/P) نشان داده شده است. برای توجیه رفتار n_e برحسب E/P لازم است به نمودار تغییرات ولتاژ شکست کلید (V_b) و (E/P) برحسب حاصل ضرب فشار در فاصله توجه نمود (شکل‌های ۶ و ۷). همان‌طور که دیده می‌شود ولتاژ شکست کلید مطابق انتظار با حاصل ضرب فشار در فاصله افزایش می‌یابد که نشانه‌ی عملکرد کلید در شاخه‌ی سمت راست منحنی پاشن است. با این وجود رفتار شدت میدان کاهیده مطابق ولتاژ شکست نیست و به همین دلیل هم رفتار نمودارهای ۴ و ۵ معکوس یکدیگرند.



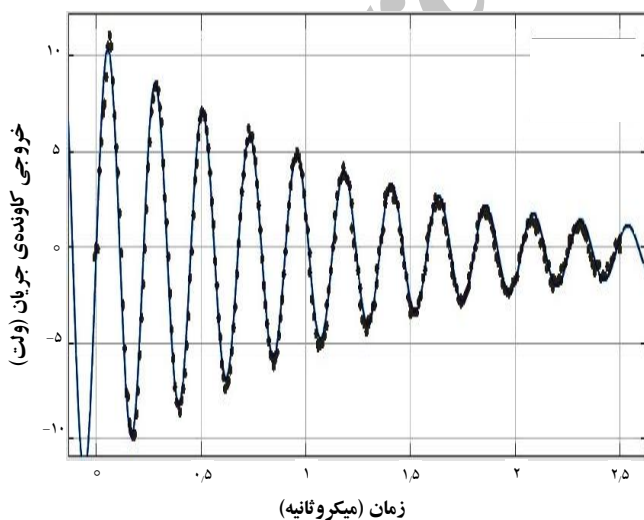
شکل ۱. آرایش تجربی آزمایش.

۴. یافته‌های تجربی

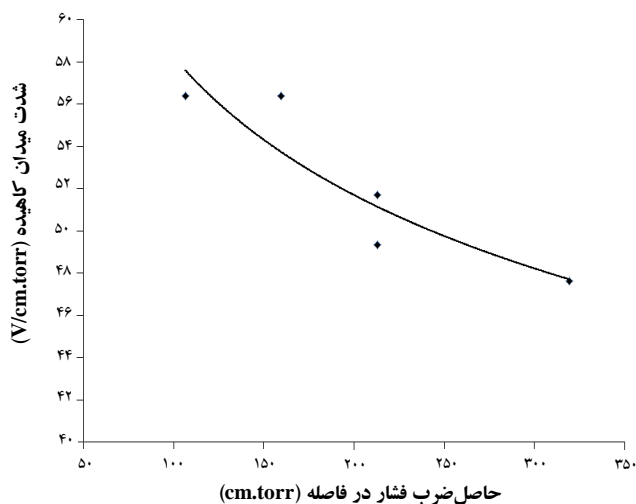
یک نمونه از اختلاف پتانسیل دو سر کلید و جریان عبوری از آن که به طور هم‌زمان ثبت شده است با ذکر سنججه‌های محیطی مورد استفاده، در شکل ۲ نشان داده شده است. از شکل دیده می‌شود که حالت تغییرهای نوسانی کندمیرا برای جریان در کلید، در حالت وصل و در مدار شامل خازن اصلی و کلید، برقرار بوده است و به این دلیل رابطه‌ی ۱ به جریان فوق به خوبی برازش شد که یک نمونه از آن در شکل ۳ دیده می‌شود. اتصال‌های فلزی به کار رفته در مدار به صورت نوارهایی از جنس آلومینیم در اندازه‌های ۴ در ۱۵ سانتی‌متر (دو عدد) و ۱۵ در ۴۰ سانتی‌متر (دو عدد) و همگی به ضخامت ۰/۵ میلی‌متر بوده است، با محاسبه‌ی مقاومت اهمی کل حاصل از اتصال‌های فوق (۰/۷۳ میلی‌اهم) و کم کردن این مقدار از مقاومت اهمی کل حلقه، مقدار مقاومت اهمی معادل پلاسمای کلید در حالت وصل، R_p ، مشخص شد. شعاع مسیر پلاسمایی با توجه به شواهد تجربی [۱۲] و در تقریب اول معادل شعاع الکتروود آتش کلید در نظر گرفته شد که برابر ۰/۵ میلی‌متر بود و طول مسیر هم معادل شکاف بین الکتروودهای کلید در نظر گرفته شد. مقدارهای شرایط تجربی به کار گرفته شده شامل: ولتاژ تغذیه، فشار گاز (ازت) درون کلید و فاصله‌ی الکتروودها بود که در جدول ۱ ثبت شده‌اند. ضریب تحرک الکترون با استفاده از معادله‌ی $\mu_e = \frac{42}{P}$ [۱۳] که در آن فشار محیط برحسب تور است و از رابطه‌ی ۲ چگالی الکترون درون کلید در حالت وصل محاسبه شد. مقدار چگالی الکترون درون



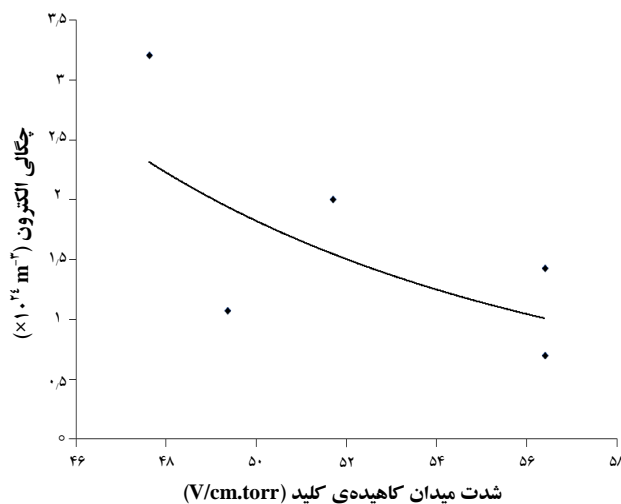
شکل ۲. (بالا) اختلاف پتانسیل دو سر کلید و (پایین) جریان عبوری از آن.



شکل ۳. برازش رابطه‌ی ۱ به تغییرات زمانی جریان نوسانی کلید.



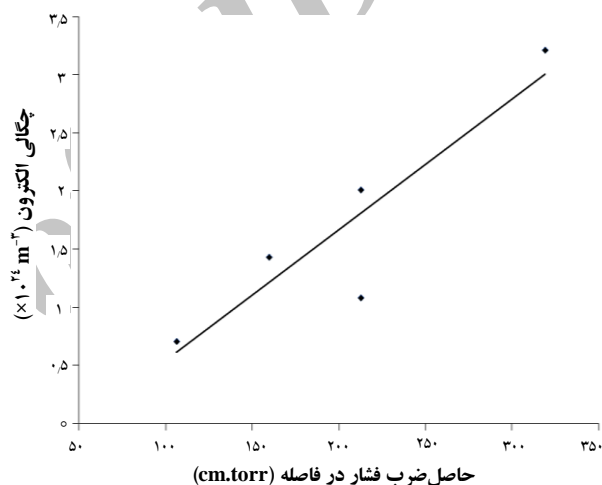
شکل ۷. رابطه‌ی بین شدت میدان کاهیده (E/P) و حاصل ضرب فشار در فاصله.



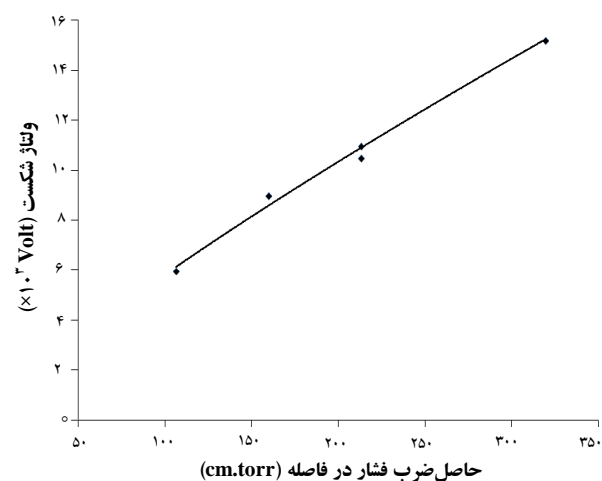
شکل ۴. رابطه‌ی بین چگالی الکترون و شدت میدان کاهیده‌ی کلید (E/P).

۵. نتیجه‌گیری و بحث

با استفاده از جریان ضربانی ثبت شده‌ی تجربی و روش محاسباتی شرح داده شده، چگالی الکترون پلاسما در شرایط مختلف تعیین و نمودار تغییرات آن نسبت به دو سنجی بسیار مهم کلیدهای گازی-پلاسمایی یعنی حاصل ضرب فشار در فاصله (Pd) و شدت میدان کاهیده (E/P) نمایش داده شد. همان‌طور که دیده می‌شود چگالی الکترون کلید با افزایش حاصل ضرب فشار در فاصله و کاهش شدت میدان کاهیده افزایش می‌یابد این موضوع با توجه به شکل ۷ به دلیل کاهش شدت میدان کاهیده با افزایش حاصل ضرب فشار در فاصله است و این خود به دلیل رفتار غیرخطی ولتاژ شکست کلید گازی با حاصل ضرب فشار در فاصله در شاخه‌ی راست منحنی پاشن است [۱]، به این معنا که کاهش شیب منحنی شکست با حاصل ضرب فشار در فاصله در این ناحیه به معنای کاهش شدت میدان کاهیده بوده و در نتیجه طبیعی است که رفتار چگالی الکترون و کارآیی کلید برحسب حاصل ضرب فشار در فاصله و شدت میدان کاهیده به صورت معکوس باشد. اما از آن‌جا که زمان گذار کلید با افزایش شدت میدان کاهیده کاهش می‌یابد [۸]، برای عملکرد بهینه‌ی کلید لازم است تعادلی بین چگالی بیشینه‌ی الکترون و زمان گذار کمینه، ایجاد شود.



شکل ۵. رابطه‌ی بین چگالی الکترون و حاصل ضرب فشار در فاصله (Pd).



شکل ۶. رابطه‌ی بین ولتاژ شکست و حاصل ضرب فشار در فاصله.



پی‌نوشت‌ها

1. Trigatron
2. Thyatron
3. Paschen curve
4. Pulse forming network
5. Inductance
6. Ballast resistor
7. Digital storage oscilloscope

قدردانی

نویسندگان، مراتب تشکر خود را از آقایان حسین اسماعیلی و داود احدپور به خاطر همکاری‌اشان در انجام آزمایش‌های تجربی و آقایان رحمان لایق آهن، احمد علوی سرشکه و مجتبی اکبرزاده برای همکاری‌اشان در تهیه اقلام و ساخت کلید ابراز می‌دارند.

مرجع‌ها

- [1] E. Kauffel, W.S. Zaengl, High voltage engineering: fundamentals, Elsevier. Ltd, 2nd. ed, ch5 (2000).
- [2] F.B.A. Frungel, High speed pulse technology, Academic Press, 1, Sec.B (1965).
- [3] M. Aram, F. Soltanmoradi, A. Behjat, Investigation on parallel spark array pre-ionization TEA CO₂ laser Proceedings of SPIE, 5483 (2004) 43-50.
- [4] M. Aram, F. Soltanmoradi, A. Behjat, F. mansoore, Parameters of a Trigatron-driven low-pulse-repetition-rate TEA CO₂ laser pre-ionized by a surface corona discharge, Q.E. 37(1) (2007) 60-62.
- [5] A. Hariri, M. Tarkashvand, F. Ardavani, A.A. Yaraghchi, Experimental investigation of the T E (transversely excited) N₂ laser, Scientific Bulletin of the Atomic Energy Organization of Iran, 3 (1362) 62-79.
- [6] J.J. Rocca, Capillary discharge tabletop soft X-ray lasers reach new wavelengths and applications, in C.R. Acad. Sci. Paris, t. 1, Série IV, (2000) 1065-1081.
- [7] S.L. Maron, M.G. Grothaus, L.W. Hardesty, Hydrogen spark switches for rep-rated accelerators, International Conference on High-Power Particle Beams, 1 (1992).
- [8] M. Aram, Characteristics study of a trigatron with homo and hetero-polar triggering configurations, Journal of Nuclear Science and Technolog, 34(2) (1384) 33-38.
- [9] I.H. Huchthinson, Principles of plasma diagnostics, Cambridge Academic Press (2005).
- [10] J.R. Reitz, F.J. Milford, R.W. Christy, Foundation of electromagnetic theory, 4th ed., ch 12, (2008).
- [11] J.T. Verdeyne, Laser electronics, 3rd ed., ch17, (1995).
- [12] H. Raether, Electron Avalanches and Breakdown in gases, Butter Worths (1964).
- [13] Y.P. Raizer, Gas Discharge physics, Springer-Verlag (1991).