

### اندازه گیری چگالی الکترون در پلاسمای کلید تریگاترون

مجید آرام<sup>× ۱</sup>، نادر مرشدیان<sup>۲</sup>، سجاد اسدی<sup>۲</sup>، اسماعیل اسلامی<sup>۳</sup>، فریبا منصوری<sup>۱</sup> ۱. پژوهشکدهی لیزر و اپتیک، پژوهشگاه علوم و فنون هستهای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۵۰۸–۱۱۳۵۰، تهران – ایران ۲. پژوهشکدهی فیزیک پلاسما و گداخت هستهای، پژوهشگاه علوم و فنون هستهای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۱۳۵–۱۷۳۹۱، تهران – ایران ۳. دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، کدپستی: ۱۳۱۴–۱۸۵۵، تهران – ایران

چکید: بهینه سازی سنجه های محیط پلاسمایی کلید گازی سه الکترودی تریگاترون، به دلیل کاربرد گسترده ی آن در اغلب تجهیزهای پلاسمایی، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. مبانی نظری کار مبتنی بر شبیه سازی مدار تخلیه شامل: خازن اصلی، ضریب القایی مدار و مقاومت پلاسما در حالت کلید بسته، با یک نوسان گر کندمیرا بوده است. ولتاژ کلید در محدوده ی ۶ تا ۱۵ کیلوولت، فشار داخل کلید در بازه ی ۱ تا ۱۸ اتمسفر و شکاف جرقه در گستره ی ۱۴ تا ۲۸ میلی متر بود. چگالی الکترون محیط پلاسمایی درون کلید گازی در حالت شکست خودبه خود با استفاده از اندازه گیری جریان و ولتاژ وابسته به زمان کلید تعیین شد. چگالی الکترونی پلاسما در محدوده ی ۱۰۴×۰۵، تا ۲۰<sup>۱۳</sup> ۲۰۰۰ ۲۰۵ بر متر مکعب به دست آمد و این بازه با مقدارهای گزارش شده برای محیط پلاسمایی مربوط به تخلیه ی قوس و جرقه در فشار جو و بالاتر از آن، که مبتنی بر عملکرد جویباری شکست الکتریکی است، در تطابق خوبی است.

**ىلىدواژەھا:** كلىد تريكاترون، چگالى الكترون، پلاسما

## Measurment of the plasma electron density of a trigatron switch

M. Aram<sup>\*1</sup>, N. Morshedian<sup>2</sup>, S. Asadi<sup>3</sup>, A. Eslami<sup>3</sup>, F. Mansori<sup>1</sup>

1. Laser and Optics Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-8486, Tehran – Iran 2. Plasma physics and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, 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  $(0.5-3.5)\times10^{24}$  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

<sup>\*</sup>email: mjaram@aeoi.org.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۹۳/۲/۲۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۸/۲۵



#### ۱. مقدمه

کلید گازی سه الکترودی تریگاترون(۱) از جمله کلیدهای گازی پر کاربرد است [۱، ۲] که در زمینه های گوناگونی، از انواع لیزرهای گازی ضربانی (۳، ۴، ۵] و دستگاههای مولد پلاسما [۶] گرفته تا شتابدهنده های ذرات [۷] مورد استفاده قرار می گیرد. کلید تریگاترون هم مانند تایراترون (۲) اساساً دارای دو الکترود اصلي و يک الکترود آتش ولي با فشار گاز محيطي بسيار بـالاتر از تایراترون است به نحوی که ناحیهی کاری آن در شاخهی سمت راست منحنی پاشن (۳) و بسیار دور از کمینه ی آن قرار می گیرد؛ از این رو نیازمند ضربان آتش با قله ی 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 عبوري زياد در عين دارا بودن ولتاژ قطع بالا (از مرتبهي چندصد کیلوولت)، بر کلید تا پراترون برتری دارد. همچنین آرایش های متفاوتی برحسب قطبش نسبی ضربان ولتاژ آتش و ولتاژ الکترودهای مجاور و مقابل برای کلید تریگاترون متصور است. تأثير آرايش هاى قطبشي ضربان ولتاژ راهانداز برحسب ولتاژ تغذيهي اصلي در فرمانيذيري و سرعت وصل يک نمونه از کليد فوق پيش از اين به صورت تجربي بررسي شده است [٨]. در این جا هدف، بررسی اثر عوامل بیرونی بر چگالی پلاسمای تخليه یالکتريکي درون کليد در حالت متصل، براي يافتن شرایط کاری هر چه مناسب تر برای کلید و افزایش کار آیی کل مدار شکل دهندهی تپ (۴)، بوده است. از آنجا که روش های استاندارد اندازه گیری چگالی پلاسما [۹] نیازمند کاربرد تجهیزهای جانبی گرانقیمت بوده و عموماً برای پلاسمای با چگالي بالا مورد استفاده قرار مي گيرند. در اين جا نظر بر اين بوده است تا با استفاده از ثبت مشخصه های الکتریکی تجربی کلید و تحلیل سادهی مداری، چگالی الکترون پلاسمای کلید اندازه گیری 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]  $I(t) = Le^{-\gamma} Sin (\omega t)$   $\gamma = -\frac{R}{2}$   $\omega = -\frac{1}{2}$ 

 $I(t) = I_{\circ} e^{-\gamma t} \operatorname{Sin}(\omega t), \quad \gamma = -\frac{R}{L}, \quad \omega = \sqrt{\omega_{\circ}^{t} + \gamma^{t}}, \quad \omega_{\circ} = \frac{1}{\sqrt{LC_{m}}}$ (1)

که در آن R و L به ترتیب، مقاومت اهمی و اندو کتانس معادل کل حلقه و Cm ظرفیت بانک خازن حلقه است. با وارد نمودن فایل های رقمی ثبت شده به وسیلهی نوسان نما برای تغییرات زمانی جریان، در محیط نرم افزار Matlab به صورت یک ماتریس ۲×n و برازش معادلهی ۱ به ماتریس فوق مقدار عددی γ و ۵، و با حل دو معادله و دو مجهول برحسب R و L مقدار عددی مقاومت اهمی و مقاومت ظاهری<sup>(۵)</sup> کل حلقه به دست می آید. هم چنین در نبود میدان مغناطیسی رابطه ی بین چگالی الکترون پلاسما، en، با رسانش الکتریکی محیط پلاسما، σ۶، و ضریب تحرک الکترون، μ، این است [۱۱]

$$n_e = \frac{\sigma_P}{e\mu_e}, \quad \sigma_P = \frac{d_p}{R_p A_p}, \quad A_p = \pi r_p^r$$
 (Y)

که در آن rp و dp 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 – بالای متغیر (مدل NINTROL ساخت P.S منبع تغذیهی ولتاژ – بالای متغیر (مدل A، ساخت Cn مقاومت بالاست<sup>(۴)</sup> مگااهم)، Cn بانک خازن اصلی (که برای عملکرد یک لیزر عرضی ضربانی فشار جوی گاز کربنیک استفاده می شود) (۷۵ عرضی ضربانی فشار جوی گاز کربنیک استفاده می شود) (۵۵ نانوفاراد سرامیکی Murata)، T.S کلید تریگاترون، کاونده ی ولتاژ (۷.P) با نسبت تبدیل هزار ولت به ازای یک ولت خروجی ولتاژ (۷.P) با نسبت تبدیل هزار ولت به ازای یک ولت خروجی ازای یک ولت خروجی (مدل 2015 nc. امپر به ازای یک ولت خروجی (مدل 1025 nc. این با نسبت ۲۰ آمپر به ازای یک ولت خروجی (مدل 1025 nc. این با نسبت کا آمپر به مقدارهای ولتاژ و فشار درون کلید و نیز فاصله الکترودها به عنوان سنجه های محیطی آزمایش در جدول ۱ درج شده اند.

ل ۱. مقدارهای سنجههای محیطی به کار رفته در آزمایش
---

فاصلهي الكترودها	فشار درون کلید	ولتاژ	
 (cm)	(torr)	(kV)	
•_14	٧۶.	6	
•/14	114.	٩	
• ,YA	٧۶.	۱۰/۴	
•/14	107.	11	
• ,YA	114.	۱۵	



شکل ۱. آرایش تجربی آزمایش.

٤. یافتههای تجربی

یک نمونه از اختلاف پتانسیل دو سر کلید و جریان عبوری از آن که به طور همزمان ثبت شده است با ذکر سنجه های محیطی مورد استفاده، در شکل ۲ نشان داده شده است. از شکل دیده می شود که حالت تغییرهای نوسانی کندمیرا برای جریان در کلید، در حالت وصل و در مدار شامل خازن اصلي و کليد، 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 می شود. اتصال های فلزی به کار رفته در مدار به صورت نواره ایی از جنس آلومینیم در اندازه های ۴ در ۱۵ سانتی متر (دو عدد) و ۱۵ در ۴۰ سانتی متر (دو عدد) و همگی به ضخامت ۵٫۰ میلی متر بوده است، با محاسبهی مقاومت اهمی کل حاصل از اتصالهای فوق (۷۳ میلی اهم) و كم كردن اين مقدار از مقاومت اهمي كل حلقه، مقدار مقاومت اهمی معادل پلاسمای کلید در حالت وصل، Rp، مشخص شد. شعاع مسير پلاسمايي با توجه به شواهد تجربي [۱۲] و در تقريب اول معادل شعاع الکترود آتش کلید در نظر گرفته شـد کـه برابـر ۰٫۵ میلیمتر بود و طول مسیر هم معادل شکاف بین الکترودهای کلید در نظر گرفته شد. مقدارهای شرایط تجربی به کار گرفته شده شامل: ولتاژ تغذیه، فشار گاز (ازت) درون کلید و فاصلهی الکترودها بود که در جدول ۱ ثبت شدهاند. ضریب تحرک الکترون با استفادہ از معادلہ ی  $\frac{Fr}{p} = \frac{Fr}{P}$  در آن فشار محیط برحسب تور است و از رابطه ی ۲ چگالی الکترون درون کلید در حالت وصل محاسبه شد. مقدار چگالی الکترون درون

کلید از مرتبهی <sup>۳</sup>-m<sup>-۳</sup> 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 (P/E) نشان داده شده است. برای توجیه رفتار وn برحسب P/F لازم است به نمودار تغییرات ولتاژ شکست کلید (Vb) و (P/E) برحسب حاصل سل خور فشر د فاصله توجه می شود ولتاژ شکست کلید (شکل های ۶ و ۷). همان طور که دیده می شود ولتاژ شکست کلید مطابق انتظار با حاصل ضرب فشار در فاصله افزایش می یابد 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 ۳.** برازش رابطهی ۱ به تغییرات زمانی جریان نوسانی کلید.



شکل ٤. رابطهی بین چگالی الکترون و شدت میدان کاهیدهی کلید (E/P).



شکل ٦. رابطهی بین ولتاژ شکست و حاصل ضرب فشار در فاصله.

حاصل ضرب فشار در فاصله (cm.torr)



شکل ۲. رابطهی بین شدت میدان کاهیده (E/P) و حاصل ضرب فشار در فاصله.

٥. نتیجه گیری و بحث

با استفاده از جریان ضربانی ثبت شدهی تجربی و روش محاسباتی شرح داده شده، چگالي الكترون پلاسما در شرايط مختلف تعيين و نمودار تغییرات آن نسبت به دو سنجهی بسیار مهم کلیدهای گازی- پلاسمایی یعنبی حاصل ضرب فشار در فاصله (Pd) و شدت میدان کاهیده (E/P) نمایش داده شد. همان طور که دیده مي شود چگالي الکترون کليد با افزايش حاصل ضرب فشار در فاصله و کاهش شدت میدان کاهیده افزایش می یابد 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 ایـن معنـا کـه کاهش شیب منحنی شکست با حاصل ضرب فشار در فاصله در این ناحیه به معنای کاهش شدت میدان کاهیده بوده و در نتیجه طبيعي است که رفتار چگالي الکترون و کارآيي کليـد 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 می یابد [۸]، برای عملکرد بهینه ی کلید لازم است تعادلي بين چگالي بيشينهي الكترون و زمان گذار کمینه، ایجاد شود.



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

پینوشتھا

نو بسندگان، مراتب تشکر خود را از آقایان حسین اسماعیلی و داود احدیور به خاطر همکاریاشان در انجام آزمایش های تجربی و آقايان رحمان لايق آهن، احمد علوي سر شكه و مجتبي اكبر زاده برای همکاریاشان در تهیهی اقلام و ساخت کلید ابراز میدارند.

### مرجعها

قدردانی

- [1] E. Kauffel, W.S. Zaengl, High voltage engineering: fundamentals, Elsevier. Ltd, 2<sup>nd</sup>. 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 preionization TEA CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> laser preionized 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) N<sub>2</sub> 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.
- I.H. Hucthinson, Principles of plasma [9] diagnostics, Cambridge Academic Press (2005).
- [10] J.R. Reitz, F.J. Milford, R.W. Christy, Foundation of electromagnetic theory, 4<sup>th</sup> ed., ch 12, (2008).
- [11] J.T. Verdeyne, Laser electronics, 3<sup>rd</sup> 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).