



تحلیل فیزیک حاکم بر عملکرد محافظ‌های پلاسمایی به منظور جلوگیری از ورود امواج

توان بالای میکرو موج به تجهیزات الکترونیکی و سامانه‌های راداری

اتحادی ابری، مهدی^۱؛ ذاکری خطیر، هادی^۲؛ صامت عمران، محسن^۳؛ اطاعتی، غلامرضا^۴

^۱گروه فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی.

^۲گروه فیزیک دانشگاه تهران.

^۳گروه فیزیک دانشگاه بابلسر.

^۴دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

چکیده:

همان‌طور که می‌دانیم، امواج توان بالای میکروموج (HPM)، خطری جدی برای سامانه‌های راداری و تجهیزات الکترونیکی به شمار می‌روند زیرا دارای پالس‌های بسیار کوتاه و همچنین زمان عملکرد بسیار پایین می‌باشند. وسایل محافظتی مرسوم از جمله محدود کننده‌های دیودی حالت جامد سیلیکونی در برابر این امواج کارآمد نیستند. حال در این مقاله به منظور فراهم ساختن محافظت در برابر پالس‌های توان بالا با دوره زمانی بسیار کم، محدود کننده‌های پلاسمایی را پیشنهاد می‌کنیم و به خصوصیات چشمه پلاسمایی مطلوب در گازهای مختلف نظیر زمان شکست گاز، آستانه میدان الکتریکی شکست لازم، فرکانس پلاسمای مناسب، دمای گاز، فرکانس برخورد می‌پردازیم.

کلمات کلیدی: محافظ پلاسما، میکرو موج توان بالا، پلاسمای کم چگال، برهمکنش میکرو موج و پلاسما

The physics of plasma protector operation for preventing the entrance of high power microwaves to the electronic equipment and radar systems

Ettehad Abari, Mehdi^{1,*}; Zakeri-Khatir, Hadi²; Samet-Omran, Mohsen³; Etaati, Gholam Reza⁴

¹Physics Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

² Physics Department, Tehran University, Tehran, Iran.

³ Physics Department, Babolsar University, Mazandaran, Iran.

⁴Energy engineer and Fusion collage, Amir Kabir Technology University, Tehran, Iran.

Abstract

As we know, high power microwaves (HPM) are very important threats for radar and other electronic systems, because these waves have very short pulse duration and very low time operation. Conventional protecting devices such as solid state diode limiters don't protect against HPM. In the current work, in order to provide protection against high power and fast rise time pulses, plasma limiter (PL) is proposed and the suitable plasma source with the characteristics such as (gas time breakdown, breakdown electric field, plasma frequency, gas temperature, and collisional frequency) as a protecting device is presented for different gases.

Key words: Plasma Protector, High Power Microwave, Underdense Plasma, Microwaves and Plasma Interaction



مقدمه :

از سال ۲۰۰۱، با به وجود آمدن چشمه‌هایی جهت ایجاد فرکانس رادیویی پهن باند^۱ و همچنین میکروامواج توان بالا^۲ نظیر مگنترون و جایترون، تجهیزات الکترونیکی و سامانه‌های راداری در معرض خطر جدی حمله از طرف این چشمه‌ها مواجه شده‌اند. محدود کننده‌های پلاسمایی با وجود برقراری امنیت بالا، دارای هزینه پایین و همچنین طراحی نسبتاً ساده نسبت به دیگر محافظ‌های رایج هستند. این گونه محافظ‌ها، فیوزهایی هستند که از سیستم‌های الکترونیکی حساس در برابر اختلال و یا تخریب توسط چشمه توان بالای فرکانس رادیویی و میکروموج محافظت می‌کنند [1]. چنین محدود کننده‌هایی غیر فعال هستند و روی عملکرد سایر اجزای شبکه مداری تاثیر نمی‌گذارند. محافظت کننده‌های رایج غیر پلاسمایی تاکنون به دو دسته دیودهای حالت جامد همچون واریستورهای اکسید فلز^۳ و دیودهای بهمنی سیلیکونی تقسیم می‌شوند. این وسایل زمان فعال سازی سریعی دارند (زمان عملکرد پایین) اما قابلیت ذخیره توان‌های بالا را ندارند. این در حالیست که محافظت کننده‌های پلاسمایی دارای قابلیت ذخیره توان‌های بسیار بالا می‌باشند، اما زمان فعال-سازی (عملکرد) بالاتری نسبت به دیودهای حالت جامد دارند [2-5]. هدف اصلی در این مقاله، طراحی موجبر پلاسمایی در نقش محافظ با زمان شکست حدود نانوثانیه می‌باشد که با تحقق یافتن چنین زمانی برای شکست گاز می‌توانیم ساخت محدود کننده پلاسمایی را در کارهای آتی پیشنهاد کنیم. چنین محدود کننده‌هایی قابلیت حفاظت موثر در برابر پالس‌های الکترومغناطیسی توان بالا و همچنین پالس‌های هسته‌ای را دارند. به منظور طراحی چنین سیستمی در ابتدا یک مطالعه پارامتریک برای تخمین زدن آستانه میدان شکست الکتریکی و زمان شکست گاز انجام می‌شود.

نحوه عملکرد و معادلات اساسی:

در این قسمت بایستی آستانه شکست میدان الکتریکی و همچنین زمان شکست لازم برای گازهای مختلف به همراه فشارهای مختلف را محاسبه کنیم تا در مرحله بعدی بتوانیم خصوصیات چشمه پلاسمایی را به صورت کامل ارائه دهیم. در یک گاز کم‌فشار فرآیند پخش آزاد غالب است و معادله جنبشی یونیزاسیون برای آن به صورت زیر نوشته می‌شود [6]:

$$v_i(E_t) = v_d \quad (1)$$

میزان دریافت انرژی توسط آن‌ها نیز برابر است با :

$$\Delta \varepsilon_E = \frac{e^2 E_0^2}{2m_e(\omega^2 + \nu_m^2)} \propto f \left(\frac{E_0}{\omega} \right) \quad (2)$$

Ultra Wide Band Radio Frequency(UWB-RF)^۱
High Power Microwave (HPM)^۲
Metal Oxid Varistors^۳



که در آن انرژی $\Delta \varepsilon_E$ به دست آمده توسط الکترون‌ها در واحد برخورد، E_0 دامنه میدان الکتریکی فرودی، m_e جرم الکترون، ω فرکانس موج فرودی، و v_m فرکانس برخورد بین الکترون‌ها و اتم‌های خنثی می‌باشد. حال چون چنین انرژی بایستی پتانسیل لازم جهت یونیزاسیون (ϕ_i) را تأمین کند، زمان مورد نیاز برای انجام یونیزاسیون و همچنین تعداد یونیزاسیون انجام شده بر واحد ثانیه یا نرخ یونیزاسیون عبارتند از:

$$\tau_i = \frac{\phi_i}{\Delta \varepsilon E v_m} \quad (۳)$$

$$v_i(E_t) = \tau_i^{-1} = \frac{\Delta \varepsilon E v_m}{\phi_i} \quad (۴)$$

از طرف دیگر با استفاده از معادله پیوستگی و همچنین رابطه چگالی جریان با ضریب پخش به صورت

$$J = -D \nabla n_e \quad \text{از} \quad D = \frac{k_B T}{m v_m} \quad \text{می‌توانیم یونیزاسیون ناشی از}$$

پدیده پخش را به صورت زیر بنویسیم:

$$v_d = \frac{D_e \nabla^2 n_e}{n_e} = \frac{D_e}{\Lambda^2} = \frac{V_{th} l}{3 \Lambda^2} = \frac{v_m l^2}{3 \Lambda^2} = \frac{v_m}{3 n_e^2 \sigma_m \Lambda^2}$$

در این رابطه، Λ طول مقیاس پخش (مقیاسی از مینیمم سایز موجبر)، l فاصله آزاد میانگین، V_{th} سرعت حرارتی الکترون‌ها، n_e چگالی الکترون‌ها و σ_m سطح مقطع برخورد آن‌هاست. حال با برابر قرار دادن روابط (۱) و (۵)، میدان الکتریکی آستانه برای شکست الکتریکی گاز کم فشار با فرض فشار اولیه $P = n_e k_B T_e$ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$E_t = \sqrt{\frac{2 m_e \phi_i}{3} \frac{k_B T_e}{e \sigma_m \Lambda} \frac{\sqrt{\omega^2 + v_m^2}}{P}} \quad (۶)$$

بایستی توجه داشته باشیم در پلاسماهای پر فشار علاوه بر آن که الکترون‌ها از میدان الکتریکی انرژی می‌گیرند، تحت برخوردهای الاستیک انرژی خود را به ذرات سنگین‌تر منتقل می‌کنند به گونه‌ای که هر الکترون

حین برخورد کسری از انرژی خود را به صورت $\delta \varepsilon$ از دست می‌دهد که در آن $\delta = \frac{2 m_e}{M_i}$ می‌باشد.

در شرایط تعادلی و ایستا انرژی که الکترون‌ها به دست می‌آورند عبارتست از:

$$\varepsilon = \frac{\Delta \varepsilon E}{\delta} = \frac{e^2 E_0^2}{m_e \delta (\omega^2 + v_m^2)} \quad (۷)$$

در محدوده فشارهای بالا یعنی ($v_m \gg \omega$)، اگر این انرژی با انرژی لازم برای یونیزاسیون برابر باشد، آستانه

میدان الکتریکی لازم جهت شکست گاز به صورت زیر به دست می‌آید:

$$E_t = \sqrt{\frac{2\phi_i}{M_i}} \frac{m_e v_m}{e} \propto \sqrt{\phi_i} P \quad (8)$$

حال در یک پلاسمای کم‌فشار ($v_m \ll \omega$) زمان لازم جهت شکست گاز و زمان رسیدن پلاسما به خاصیت فلزی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$t = \Delta\tau_{\min} \ln\left(\frac{n_e}{n_0}\right) = \frac{m_e \omega^2 \phi_i}{e^2 E_0^2 v_m} \ln\left(\frac{n_e}{n_0}\right) \quad (9)$$

همچنین در یک پلاسمای پرفشار ($v_m \gg \omega$) نیز زمان لازم جهت شکست گاز و زمان کامل زمان رسیدن پلاسما به خاصیت فلزی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$t = \Delta\tau_{\min} \ln\left(\frac{n_e}{n_0}\right) = \frac{m_e v_m \phi_i}{e^2 E_0^2 \left(\frac{M_i}{2m_e}\right)} \ln\left(\frac{n_e}{n_0}\right) \quad (10)$$

شبیه‌سازی و بیان نتایج:

ابتدا لازم است اشاره کنیم کلیه نتایج برای دو گاز مختلف

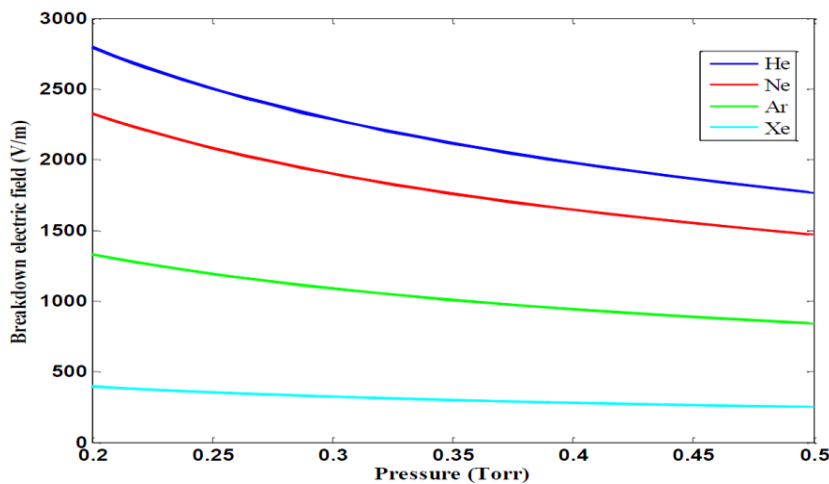
زنون (Xe) با پتانسیل یونیزاسیون بسیار پایین و هلیم (He) با پتانسیل یونیزاسیون بسیار بالا ارائه می‌شوند. دیگر خصوصیات مهم دیگر این دو گاز در جدول (۱) ارائه شده‌اند.

محافظ پلاسمایی را در یک گاز کم‌فشار (0.01 Torr-1 Torr)، به فرم یک موجبر مستطیلی با ابعاد $(a = 72\text{mm}, b = 34\text{mm}, d = 50\text{mm})$ در نظر می‌گیریم و از آن جایی که طول مقیاس پخشی در چنین موجبری به صورت $\frac{1}{\Lambda^2} = \pi^2 \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} + \frac{1}{d^2} \right)$ محاسبه می‌شود، با ابعاد داده شده Λ عبارتست از 0.83cm.

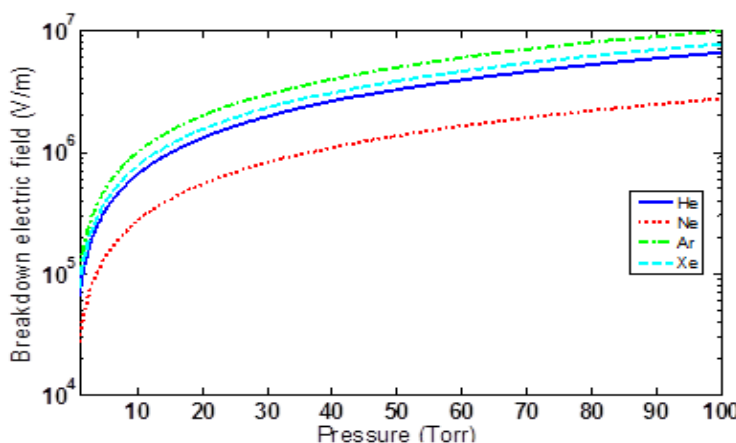
جدول (۱): پارامترهای مربوط به گازهای زنون، هلیم، نئون و آرگون

| نوع گاز | پتانسیل یونیزاسیون (ev) | میانگین ضریب $(\alpha \approx 1/Torr.Sec)$ | سطح مقطع برخورد (m^2) |
|------------|-------------------------|--------------------------------------------|-------------------------|
| Xe (زنون) | 12.1 | 24×10^9 | 2.5×10^{-19} |
| He (هلیم) | 24.5 | 2.5×10^9 | 5×10^{-20} |
| Ne (نئون) | 21.5 | 2.5×10^9 | 5.7×10^{-20} |
| Ar (آرگون) | 15.7 | 15×10^9 | 8.5×10^{-20} |

حال با استفاده از رابطه (۶) و اطلاعات مربوط به جدول (۱) و همچنین فرض $(v_m^2 \ll \omega^2)$ برای پلاسما کم فشار و در نظر گرفتن دمای گاز $T=300^{\text{ok}}$ ، نمودار آستانه میدان الکتریکی لازم برای شکست بر حسب فشار گاز در شکل (۱) رسم شده است. نشان داده می‌شود گاز زنون برای شکسته شدن در فشار 0.5 Torr تنها به میدان الکتریکی در حدود 388 volt/m نیاز دارد.



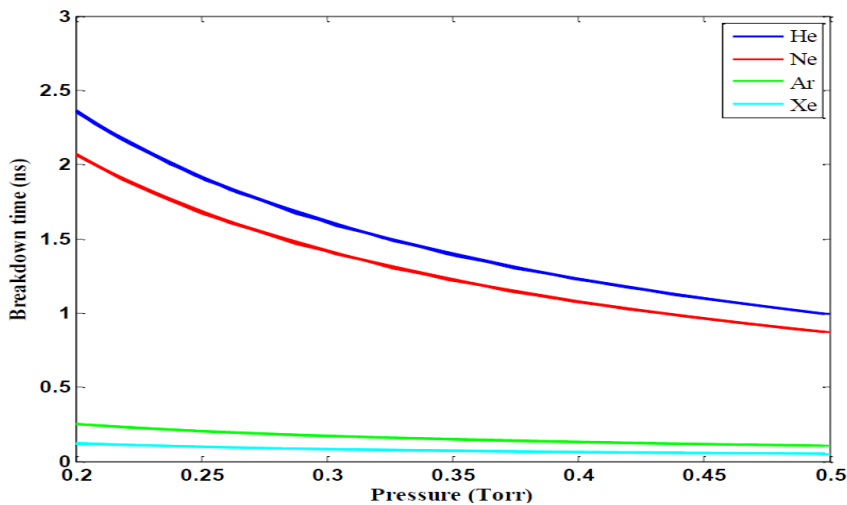
شکل شماره (۱): نمودار آستانه میدان الکتریکی لازم (v/m) بر حسب فشار گاز (Torr) در یک پلاسما کم فشار با پارامترهای $\omega = 1\text{GHz}$, $\Lambda = 0.83\text{cm}$ برای گازهای زنون، هلیم، نئون و آرگون. در شکل (۲) نیز میدان الکتریکی لازم برای شکست بر حسب فشار در یک گاز پر فشار (تا حدود ۱۰۰ تور) ارائه می‌شود. لازم به ذکر است برای گازهای نجیب پر فشار، فرکانس برخورد از رابطه $v_m = \alpha P$ به دست می‌آید که در آن P فشار گاز بر حسب Torr و α میانگین ضریب بر حسب $1/\text{Torr}\cdot\text{Sec}$ (مطابق با جدول (۱)) می‌باشد. در این شکل نیز مشاهده می‌شود برای گازهای زنون و هلیم در فشار 10 تور به ترتیب به میدان الکتریکی در حدود $3.7 \times 10^6 \text{ volt/m}$ و $5.2 \times 10^5 \text{ volt/m}$ جهت شکسته شدن گاز نیاز داریم.





شکل شماره (۲): نمودار آستانه میدان الکتریکی لازم (v/m) بر حسب فشار گاز (Torr) در یک پلاسمای پرفشار با پارامتر $\omega = 1GHz$ برای دو گاز زنون و هلیم.

در شکل (۳) نیز نمودار زمان شکست بر حسب فشار گاز، برای گازهای کم‌فشار رسم شده‌اند. با افزایش فشار، زمان لازم جهت شکست گاز کاهش می‌یابد و دیده می‌شود برای گاز زنون در فشار ۰٫۵ تور به زمان شکست حدود چند صد نانوثانیه (۰٫۲۷ نانوثانیه) نیاز داریم که این زمان جلوگیری از ورود امواج میکرو در محدوده عملکردی بسیار کمتر از نانوثانیه بسیار مناسب است.



شکل شماره (۳): نمودار زمان شکست گاز (ns) بر حسب فشار گاز (Torr) در یک پلاسمای کم‌فشار با

پارامترهای $\omega = 1GHz, T = 300^{0k}, \gamma = 0.0001, n_{0e} = 10^{19} m^{-3}, E_0 = 10^4 v/m$

نتیجه گیری :



محدود کننده‌های موجبر پلاسمایی مستطیل شکل در فشار ۰.۵ تور میتواند در زمان کمتر از 30 صدم نانوثانیه شارژ شود و پلاسمای آن تشکیل شود. فرکانس پلاسمای در این حالت به چند ده گیگاهرتز می‌رسد و این بسیار مناسب برای جلوگیری از ورود امواج میکروویو توان بالا، در محدوده فرکانسی 500 مگاهرتز تا 10 گیگاهرتز به داخل سامانه مورد نظر می‌باشد.

مراجع :

- [۱] Walling, E.M., *High power microwaves: Strategic and operational implications for warfare*. ۲۰۰۰, DTIC Document.
- [۲] LeVine, S., *The Active Denial System. A Revolutionary, Non-lethal Weapon for Today's Battlefield*. ۲۰۰۹, DTIC Document.
- [۳] Karlsson, M., et al. *Bofors HPM blackout-a versatile and mobile L-band high power microwave system*. in *Pulsed Power Conference, ۲۰۰۹. PPC'۰۹. IEEE*. ۲۰۰۹. IEEE.
- [۴] Ismayilov, E., *Israel and Azerbaijan: The Evolution of a Strategic Partnership*. *Israel Journal of Foreign Affairs*, ۲۰۱۳. ۷(۱): p. ۷۶-۶۹
- [۵] company(cpi), c.a.p.i., *Receiver Protector Technology*.
- [۶] Andreev, A.A., *An introduction to hot laser plasma physics*. Vol. ۲۳۳. ۲۰۰۰: Nova Science Pub Inc.