


Can the space charge effect change multipactor zones?

M. Mostajeran*

Associate Professor, Yazd University, Yazd, Iran

(Received: 31/05/2024 revised: 25/08/2024 Accepted:07/10/2024 published: 29/10/2024)

Abstract

The steady state of multipactor phenomenon is defined by the saturation mechanism. The saturation is identified by the interaction of the secondary electrons by each other, i.e. the space charge effect. The power level of the radiation generated due to the multipactor can be predicted by the calculation of the number of the electrons using the simulation of multipactor. In many previous studies on the multipactor phenomenon, the space charge effect is not considered. In this paper the electron cloud which is generated during the discharge within a parallel-plate waveguide is modeled by a thin electron sheet. The electric field which is produced by the electron sheet is calculated, the equations of motion are then obtained taking into account both electrostatic and radio frequency fields. Here, it will be shown that how the inclusion of space charge effects in multipactor within a parallel-plate waveguide changes the results of multipactor in comparison to that of without space charge.

Keywords: Saturation, Space charge, Multipactor, Waveguide, Parallel plates

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.


Publisher: Imam Hussein University

 Authors



علمی - پژوهشی

آیا اثر بار فضائی، نواحی وقوع مالتی پکتور را تغییر می‌دهد؟

مریم مستاجران* 

دانشیار، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۱، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۰۴، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۱۶، انتشار: ۱۴۰۳/۰۸/۰۸



* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

چکیده

حالت پایا در پدیده مالتی پکتور، با استفاده از مکانیزم اشباع توصیف می‌شود. اشباع، از برهم‌کنش الکترون‌های ثانویه با یکدیگر، اثر بار فضائی، ایجاد می‌شود. با شبیه‌سازی مالتی پکتور و محاسبه تعداد الکترون‌های ایجاد شده در حالت پایا، می‌توان توان تابشی ایجاد شده توسط مالتی پکتور در آزمایشگاه را پیش‌بینی کرد. در بسیاری از مطالعات قبلی، اثر بار فضائی در نظر گرفته نشده است. در این مقاله ابر الکترونی که در اثر مالتی پکتور در ساختار موجبر با صفحات موازی، ایجاد می‌شود با صفحه تخت نازک مدل می‌شود. میدان الکتریکی حاصل از الکترون‌های صفحه مدل شده، محاسبه می‌شود و سپس معادلات حرکت صفحه الکترونی در حضور این میدان و میدان رادیو فرکانسی داخل موجبر به دست می‌آید. در اینجا نشان خواهیم داد، در نظر گرفتن بار فضائی در مالتی پکتور برای ساختار موجبر با صفحات موازی چگونه نتایج این پدیده بدون اثر بار فضائی را، تغییر می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: اشباع، بار فضائی، مالتی پکتور، موجبر، صفحات موازی.

۱- مقدمه

شده، توان کاواک‌ها را بارگیری می‌کند و باعث افزایش دما به صورت موضعی و در نتیجه ضررهای زیادی از جمله از بین رفتن سیستم می‌شود [۷، ۸].

مدل موجبر دو صفحه موازی، برای مطالعه ساختارهای زیادی مانند شکاف کوچک^۴ که در آن میدان الکتریکی یکنواخت است، مناسب است [۹-۱۳]. مکانیزم توصیف پدیده مالتی پکتور، در مقالات زیادی مطالعه شده است. در این مطالعات، معادلات حرکت برای موجبر صفحات موازی، بدون در نظر گرفتن اثر بار فضائی^۵ به دست آمده است. در تعداد کمی از مقالات، پدیده مالتی پکتور با در نظر گرفتن اثر بار فضائی بررسی شده‌اند (به طور مثال [۱۴-۱۸]). رومانو و همکارانش با استفاده از کد شبیه‌سازی اثر بار فضائی در مالتی پکتور را برای کاواکی بیضوی شکل، بررسی کرده‌اند [۱۴]. در [۱۵، ۱۶]. حالت پایا در مالتی پکتور برای ساختار دو صفحه موازی و موجبری که قسمتی از فضای بین آنها از دی‌الکتریک پر شده است، مطالعه شده است. مالتی پکتور و اثر بار فضائی در ساختار دو صفحه موازی با حضور میدان مغناطیسی خارجی در [۱۷] بررسی شده است. ایدن و

مالتی پکتور تخلیه الکتریکی است که در ساختارهای میکرو موجی ماهواره‌های فضائی و شتاب‌دهنده‌ها، اتفاق می‌افتد و باعث از بین رفتن سیستم می‌شود [۱]. در این پدیده، الکترون‌های آزاد [۲]، توسط میدان الکتریکی RF^۲ سیستم، شتاب می‌گیرند و به دیواره‌های ساختار برخورد می‌کنند، اگر انرژی برخوردی به قدر کافی زیاد باشد الکترون‌های دیگری تولید می‌شوند که الکترون‌های ثانویه نامیده می‌شوند [۳-۵]. اگر زمان پرواز الکترون‌های منتشر شده از صفحه اولیه به صفحه مخالف، ضرب فردی از دوره تناوب سیگنال RF باشد، الکترون‌های ثانوی تولید شده شرایط یکسانی در برگشت خواهند داشت (شرط تشدید) [۶]. اگر شرط تشدید بین حرکت الکترون‌ها و سیگنال RF برقرار باشد و ضریب الکترون ثانویه (SEY^۳) هنگام برخورد به صفحات، بزرگ‌تر از یک باشد، تعداد زیادی الکترون به وجود می‌آید که تعداد آنها به صورت نمایی بر حسب زمان افزایش می‌یابد و شکست مالتی پکتور ایجاد می‌شود. ابر الکترونی ایجاد

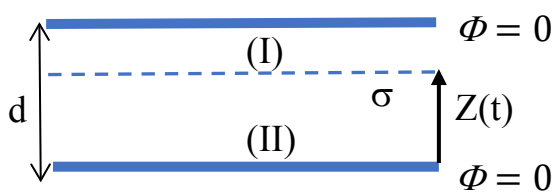
⁴ Small gaps

⁵ Space charge

* رایانامه نویسنده مسئول: mostajeran@yazd.ac.ir

² Radio Frequency

³ Secondary Electron Yield



شکل (۲). ابر الکترونی با چگالی σ ، با شرایط مرزی مشخص.

باتوجه به شکل ۲ و با استفاده از معادله لاپلاس داریم

$$\nabla^2 \phi = 0 \rightarrow \phi = Ax + B \quad (1)$$

رفتار پتانسیل در دو ناحیه (I) و (II) را می توان نوشت

$$\phi_I = Ax + B, \quad \phi_{II} = Cx + D \quad (2)$$

با استفاده از شرایط مرزی $\phi_I(z=0) = 0$ و $\phi_{II}(z=d) = 0$ و $D_I(Z) - D_{II}(Z) = -\sigma(Z)$ چهار ضریب A, B, C, D محاسبه می شوند. با استفاده از رابطه ۲ و شرایط مرزی داریم

$$\vec{E}_I = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \left(1 - \frac{Z}{d}\right) \hat{K}, \quad \vec{E}_{II} = -\frac{\sigma Z}{\epsilon_0 d} \hat{K}. \quad (3)$$

میدان الکتریکی در هر مکانی در صفحه با چگالی σ ، با استفاده از رابطه ۳ عبارت است از

$$\vec{E}(Z) = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \left(\frac{1}{2} - \frac{Z}{d}\right) \hat{K} \quad (4)$$

نیروی وارد بر الکترون در صفحه با چگالی σ با در نظر گرفتن اثر بارفضایی (رابطه ۴) و میدان RF عبارت است از

$$\vec{F} = \frac{-e\sigma}{\epsilon_0} \left(\frac{1}{2} - \frac{Z}{d}\right) \hat{K} - \frac{eV_{rf}}{d} \cos \omega t \hat{K} \quad (5)$$

با استفاده از رابطه ۵، معادله حرکت را می توان با استفاده از دو معادله، در رابطه ۶ نوشت

$$\begin{aligned} \dot{Z} &= v; \\ \dot{v} &= -\frac{e\sigma}{\epsilon_0 m} \left(\frac{1}{2} - \frac{Z}{d}\right) - \frac{eV_{rf}}{md} \cos \omega t \end{aligned} \quad (6)$$

معادلات حرکت را می توان به صورت یک سیستم معادلات دیفرانسیل، رابطه ۷، نوشت.

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} z \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ a_1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z \\ v \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -a_1 d - \frac{eV_{rf}}{md} \cos \omega t \end{pmatrix} \quad (7)$$

در اینجا $a_1 = \frac{e\sigma}{m\epsilon_0 d}$ است. جواب معادله ۷ را می توان

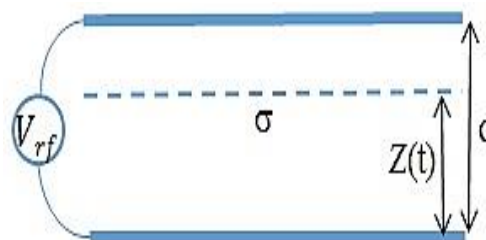
همکارش، حالت پایا در مالتی پکتور را برای موجبر دو صفحه موازی بررسی کرده اند [۱۸] ولی در این مقاله چگونگی تغییرات نواحی مالتی پکتور با در نظر گرفتن اثر بار فضایی، بررسی نشده است.

در این مقاله به بررسی تغییراتی که اثر بار فضایی بر نتایج بدون بار فضایی در مالتی پکتور ایجاد می کند، می پردازیم، به عبارتی افزایش یا کاهش ناحیه مالتی پکتور را برای ساختار موجبر دو صفحه موازی با در نظر گرفتن اثر بار فضایی را، بررسی خواهیم کرد.

در اینجا، ابر الکترونی را به صفحه ای نازک مدل می کنیم و معادلات حرکت آن را، با در نظر گرفتن اثر بار فضایی از روش تحلیلی به دست می آوریم (بخش ۲). در بخش ۳، نتایج شبیه سازی معادلات حرکت بررسی می شوند. نهایتاً در بخش ۴ نتایج و اثر بارفضایی در نتایج قبلی بیان می شود.

۲- معادلات حرکت

مجموعه ای از الکترون ها را در ناحیه بین دو صفحه موازی که تحت میدان RF است را در نظر بگیرید (شکل ۱). این مجموعه، ابر الکترونی، مالتی پکتور ایجاد شده در موجبر صفحات موازی را توصیف می کند. σ چگالی سطحی صفحه ای الکترونی است. در ابتدا فرض می شود چگالی سطحی صفحه، بسیار کم است و به علت خلا نامناسب وجود دارد. همچنین فرض می کنیم صفحه مدل شده، در یک بعد در راستای z بین صفحات موجبر بتواند حرکت کند، از آنجایی که صفحات موجبر ابعاد نامتناهی دارد اثرات لبه ای در نظر گرفته نمی شود. در ادامه، ابتدا میدان الکتریکی حاصل از ابر الکترونی به صورت نظری محاسبه می شود و با استفاده از اصل برهم نهی میدان کل حاصل از این میدان و میدان RF در مکان ابر الکترونی محاسبه می شود. فرض می کنیم که همه ای الکترون های ثانوی در زمان یکسان و با سرعت اولیه ای یکسان منتشر شوند. در صفحه ای الکترونی، حرکت تک الکترون در نظر گرفته می شود و فرض می شود بقیه ای الکترون های سطح، همراه تک الکترون حرکت می کنند.



شکل (۱). ابر الکترونی با چگالی σ ، داخل موجبر دو صفحه موازی تحت تأثیر میدان RF.

برای به دست آوردن میدان حاصل از ابر الکترونی، شرایط مرزی مشخص شده در شکل ۲ را در نظر می گیریم.

به صورت رابطه ۸ نوشت.

$$\vec{z}_T(t) = \vec{z}_h(t) + \vec{z}_{Nh}(t) \quad (8)$$

در اینجا $\vec{z}_h(t)$ و $\vec{z}_{Nh}(t)$ به ترتیب جواب همگن و ناهمگن هستند. از رابطه ۹ بدست می‌آید.

$$\vec{z}_h(t) = e^{A(t-t_0)} \vec{z}_h(t_0) \quad (9)$$

در اینجا $\vec{z}_h(t_0) = \begin{pmatrix} z \\ v \end{pmatrix}_{t_0}$ و $A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ a_1 & 0 \end{pmatrix}$ است. در

ادامه $\vec{z}_h(t)$ بدست می‌آید.

از رابطه ۱۰ بدست می‌آید.

$$\vec{z}_{Nh}(t) = \int_{t_0}^t e^{A(t-s)} \vec{f}(s) ds \quad (10)$$

در اینجا $\vec{f}(s) = \begin{pmatrix} 0 \\ -a_1 \frac{d}{2} - \frac{eV_{rf}}{md} \cos(\omega s) \end{pmatrix}$ است. برای بدست

آوردن $\vec{z}_h(t)$ ابتدا $e^{A(t-t_0)}$ را بدست می‌آوریم.

برای محاسبه‌ی این کمیت، مقدار مقادیر ویژه‌ی $A(t-t_0)$ را بدست می‌آوریم، $\lambda_{1,2}$.

$$|A(t-t_0) - \lambda I| = 0 \rightarrow \lambda_{1,2} = \pm \sqrt{a_1}(t-t_0) \quad (11)$$

از طرفی $e^{A(t-t_0)}$ را می‌توان به صورت زیر نوشت

$$e^{A(t-t_0)} = \alpha_1 A(t-t_0) + \alpha_0 I \quad (12)$$

برای بدست آوردن ضرایب α_0 و α_1 به روش زیر عمل می‌کنیم

$$r(\lambda) = \alpha_1 \lambda + \alpha_0 \rightarrow r(\lambda_{1,2}) = \alpha_1 \lambda_{1,2} + \alpha_0 \quad (13)$$

در اینجا $r(\lambda)$ معادله مشخصه است. لذا می‌توان نوشت

$$e^{\lambda_1} = \alpha_1 \lambda_1 + \alpha_0 I; \quad (14)$$

$$e^{\lambda_2} = \alpha_1 \lambda_2 + \alpha_0 I$$

با استفاده از رابطه ۱۱ و ۱۴ ضرایب را می‌توان بدست آورد

$$\alpha_1 = \frac{\sinh[\sqrt{a_1}(t-t_0)]}{\sqrt{a_1}(t-t_0)}; \quad (15)$$

$$\alpha_0 = \cosh[\sqrt{a_1}(t-t_0)].$$

با جای گذاری رابطه ۱۵ در رابطه ۱۲ داریم

$$e^{A(t-t_0)} = \begin{pmatrix} \cosh[\sqrt{a_1}(t-t_0)] & \frac{\sinh[\sqrt{a_1}(t-t_0)]}{\sqrt{a_1}} \\ a_1 \frac{\sinh[\sqrt{a_1}(t-t_0)]}{\sqrt{a_1}} & \cosh[\sqrt{a_1}(t-t_0)] \end{pmatrix} \quad (16)$$

بنابراین، با استفاده از رابطه ۹ داریم

$$z_h(t) = \cosh[\sqrt{a_1}(t-t_0)] Z_0 + \frac{\sinh[\sqrt{a_1}(t-t_0)]}{\sqrt{a_1}} v_0; \quad (17)$$

$$v_h(t) = \sqrt{a_1} \sinh[\sqrt{a_1}(t-t_0)] Z_0 + \cosh[\sqrt{a_1}(t-t_0)] v_0.$$

بدست آمده است، برای بدست آوردن $\vec{z}_h(t)$ تا این مرحله

را بدست می‌آوریم. $\vec{V} = e^{A(t-s)} \vec{f}(s)$ ابتدا

$$V_1(s) = \frac{\sinh[\sqrt{a_1}(t-s)]}{\sqrt{a_1}} \left[-a_1 \frac{d}{2} - \frac{eV_{rf}}{md} \cos(\omega s) \right]; \quad (18)$$

$$V_2(s) = \cosh[\sqrt{a_1}(t-t_0)] \left[-a_1 \frac{d}{2} - \frac{eV_{rf}}{md} \cos(\omega s) \right].$$

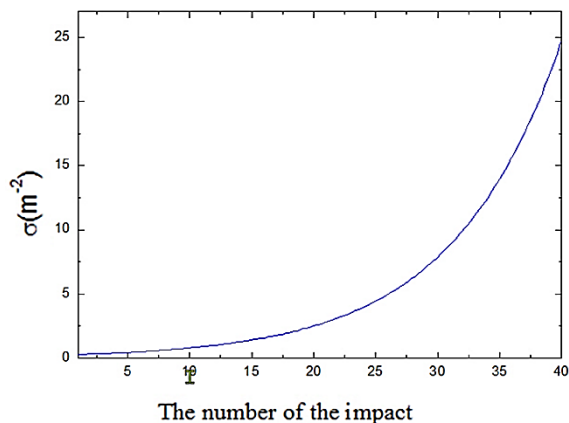
جواب ناهمگن معادله ۷ به صورت زیر بدست می‌آید

$$z_{Nh} = \int_{t_0}^t V_1 ds = -\frac{d}{2} [\cosh[\sqrt{a_1}(t-t_0)] - 1] - \frac{eV_{rf}}{md\sqrt{a_1}} \left[\frac{-\sqrt{a_1} \cos(\omega t)}{a_1 + \omega^2} + \frac{\sqrt{a_1} \cos(\omega t_0) \cosh[\sqrt{a_1}(t-t_0)]}{a_1 + \omega^2} - \frac{\omega \sin(\omega t_0) \sinh[\sqrt{a_1}(t-t_0)]}{a_1 + \omega^2} \right];$$

$$v_{Nh} = \int_{t_0}^t V_2 ds = -\frac{\sqrt{a_1} d}{2} \sinh[\sqrt{a_1}(t-t_0)] + \frac{eV_{rf}}{md} \left[\frac{\omega \sin(\omega t_0) \cosh[\sqrt{a_1}(t-t_0)]}{a_1 + \omega^2} - \frac{\omega \cos(\omega t)}{a_1 + \omega^2} - \frac{\sqrt{a_1} \cos(\omega t_0) \sinh[\sqrt{a_1}(t-t_0)]}{a_1 + \omega^2} \right].$$

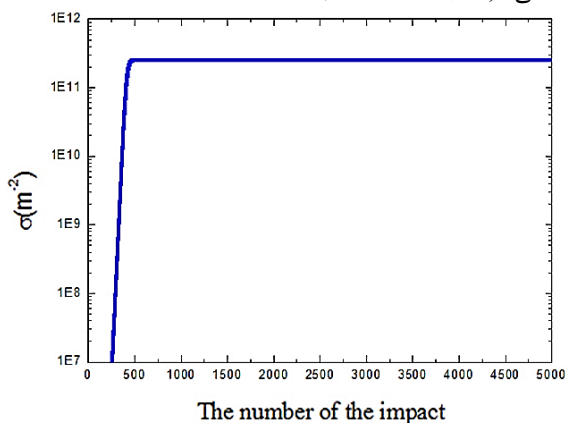
(۱۹)

فضائی هم چگالی سطحی صفحه، رشد نمایی دارد. در شکل ۳ رشد نمایی در برخوردهای کم صفحه الکترونی با الکترودها مشاهده می‌شود.



شکل (۳). افزایش چگالی سطحی صفحه، σ ، با افزایش تعداد برخورد با الکترودها برای $f = 1GHz$, $d=1mm$, $E_0 = 3.68 eV$, $V_{rf} = 30 V$, $\phi_0 = 1.06 rad$, $w_1 = 20 eV$, $\sigma_0 = 1(m^{-2})$.

افزایش چگالی سطحی پس از مدتی متوقف می‌شود و مقدار آن ثابت می‌شود به عبارتی اشباع اتفاق می‌افتد، شکل ۴. شکل ۳ و ۴ با در نظر گرفتن انرژی اولیه $E_0 = 3.68 eV$ و چگالی اولیه سطحی $\sigma_0 = 1(m^{-2})$ محاسبه شده‌اند.



شکل (۴). ثابت شدن رشد σ در برخوردهای زیاد با الکترودها، برای $f = 1GHz$, $d=1mm$, $E_0 = 3.68 eV$, $V_{rf} = 30 V$, $\phi_0 = 1.06 rad$, $w_1 = 20 eV$, $\sigma_0 = 1(m^{-2})$.

باتوجه به شکل ۳ و ۴ می‌توان بیان کرد، از اثر بار فضائی در برخوردهای کم (برخورد صفحه الکترونی با الکترودها) می‌توان صرف‌نظر کرد. لذا در وهله اول به نظر می‌رسد، نتایج مقالاتی که از اثر بار فضائی صرف‌نظر شده است، تغییری نخواهند کرد (نتایج مربوط به نواحی وقوع و عدم وقوع مالتی پکتور)، زیرا مالتی پکتور در این مقالات در برخوردهای کم صفحه الکترونی با الکترودها بررسی شده‌اند. برای نتیجه گیری کلی در مورد اثر بار فضائی، فازهای مجاز برای رخ دادن مالتی پکتور هم باید

با استفاده از رابطه‌های ۱۷ و ۱۹ می‌توان مکان و سرعت صفحه الکترونی را وابسته به زمان بدست آورد، رابطه ۵ در [۱۸].

$$z(t) = \frac{d}{2} + \bar{z}_\sigma \cos(\phi_0 + \delta\phi) + \sqrt{K_\sigma} \left(\frac{v_0}{\omega} + \bar{z}_\sigma \sin \phi_0 \right) \sinh\left(\frac{\delta\phi}{\sqrt{K_\sigma}}\right) + \left(z_0 - \frac{d}{2} - \bar{z}_\sigma \cos \phi_0 \right) \cosh\left(\frac{\delta\phi}{\sqrt{K_\sigma}}\right);$$

$$v(t) = \left(v_0 + \bar{z}_\sigma \omega \sin \phi_0 \right) \cosh\left(\frac{\delta\phi}{\sqrt{K_\sigma}}\right) - \frac{\omega}{\sqrt{K_\sigma}} \left(\frac{d}{2} + \bar{z}_\sigma \cos \phi_0 - z_0 \right) \sinh\left(\frac{\delta\phi}{\sqrt{K_\sigma}}\right) - \bar{z}_\sigma \omega \sin(\phi_0 + \delta\phi).$$

(۲۰)

در اینجا $\delta\phi = \omega(t - t_0)$ ، $\phi_0 = \omega t_0$ و $\bar{z}_\sigma = \frac{\varepsilon_0 V_{rf}}{e\sigma(1 + K_\sigma)}$ و $K_\sigma = \frac{\varepsilon_0 m \omega^2 d}{\sigma e^2}$ است. در حالتی که اثر بار فضائی در نظر گرفته نشود، σ صفر، \bar{z}_σ برابر $eV_{rf} / m\omega^2 d$ می‌شود و معادلات ۲۰ به معادلات حرکت در [۱۹، ۱۳] تبدیل می‌شوند.

۳- بررسی اثر بار فضائی بر نواحی وقوع مالتی پکتور

از معادلات به دست آمده در قسمت ۱، در شبیه سازی حرکت صفحه الکترونی استفاده می‌کنیم. در هر برخورد صفحه الکترونی با الکترودها، تعدادی الکترون ثانویه تولید می‌شود که باعث تغییر چگالی سطحی صفحه الکترونی می‌شود. در این مقاله مدل واگان برای محاسبه SEY، استفاده شده است [۲۰]. یکی از پارامترهای مربوط به مدل SEY، انرژی الکترون فرودی، $W1$ ، است که به ازای این انرژی، تعداد متوسط الکترون ثانوی مساوی یک است. $W1$ مربوط به جنس ساختار است که در اینجا $20 eV$ انتخاب شده است.

یکی از نتایجی که برای وقوع مالتی پکتور بررسی می‌شود (بدون در نظر گرفتن بار فضائی)، رشد نمایی چگالی سطحی صفحه الکترونی پس از هر برخورد با ساختار است. همان طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، با در نظر گرفتن بار

^۱ در این مرجع، معادله مکان، کامل بدست نیامد است.

$$\tan \phi_0 = -\sqrt{K_\sigma} \tanh \left(\frac{(2n-1)\pi}{2\sqrt{K_\sigma}} \right). \quad (23)$$

این محدودیت $\phi_0 \leq \phi_b$ است. فاکتور پایداری، $a = \frac{\partial z}{\partial \phi_1}$ یکی دیگر از کمیت‌هایی است که در پدیده‌ی مالتی پکتور بررسی می‌شود. با استفاده از رابطه‌ی (۲۱) داریم

$$\begin{aligned} \frac{\partial z}{\partial \phi_0} &= \sqrt{K_\sigma} \bar{z}_\sigma \cos \phi_0 \sinh \left(\frac{\phi_1 - \phi_0}{\sqrt{K_\sigma}} \right) \\ &\quad - \frac{v_0}{\omega} \cosh \left(\frac{\phi_1 - \phi_0}{\sqrt{K_\sigma}} \right) \\ &\quad - \frac{1}{\sqrt{K_\sigma}} \left(\frac{d}{2} + \bar{z}_\sigma \cos \phi_0 \right) \sinh \left(\frac{\phi_1 - \phi_0}{\sqrt{K_\sigma}} \right), \\ \frac{\partial z}{\partial \phi_1} &= -\bar{z}_\sigma \sin \phi_1 \\ &\quad + \left(\frac{v_0}{\omega} + \bar{z}_\sigma \sin \phi_0 \right) \cosh \left(\frac{\phi_1 - \phi_0}{\sqrt{K_\sigma}} \right) \\ &\quad - \frac{1}{\sqrt{K_\sigma}} \left(\frac{d}{2} + \bar{z}_\sigma \cos \phi_0 \right) \sinh \left(\frac{\phi_1 - \phi_0}{\sqrt{K_\sigma}} \right). \end{aligned} \quad (24)$$

با استفاده از رابطه (۲۴)، می‌توان فاکتور پایداری را بدست آورد. با استفاده از شرط تشدید و شرط ساده‌ی پایداری فاز، $a = -1$ داریم

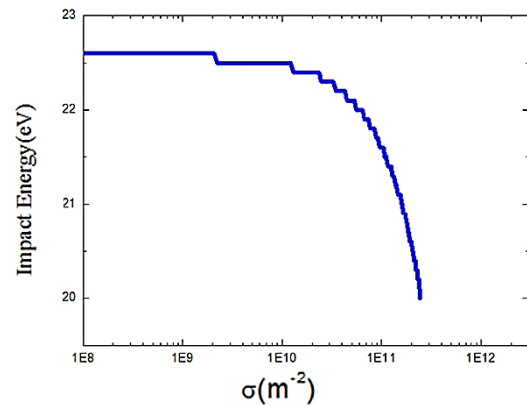
$$\phi_{up} = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{K_\sigma} \sinh \left(\frac{(2n-1)\pi}{\sqrt{K_\sigma}} \right)}{1 - \cosh \left(\frac{(2n-1)\pi}{\sqrt{K_\sigma}} \right)} \right). \quad (25)$$

مقادیر فاز اولیه و ولتاژ مربوط به آن، برای سه مرتبه متفاوت مالتی پکتور در جدول ۱ آمده است. با مقایسه جدول ۱ با جدول ۲ در [۱۳] می‌توان نتیجه گرفت، با در نظر گرفتن اثر بار فضائی، فازهایی که در آن مالتی پکتور اتفاق می‌افتد، بیشتر است به عبارتی نواحی مربوط به وقوع مالتی پکتور وسیع تر است.

جدول (۱). مقادیر فاز اولیه (برحسب درجه) و ولتاژهای مربوط به آن (برحسب ولت)، برای سه مرتبه متفاوت مالتی پکتور.

بررسی شوند که در ادامه به آن می‌پردازیم.

ثابت می‌شود 2.49×10^{11} پس از 450 برخورد در σ مقدار (شکل ۳)، به عبارتی اشباع زمانی اتفاق می‌افتد که انرژی برسد، شکل ۵. با $W1$ برخوردی صفحه‌ی الکترونی به مقدار استفاده از رابطه‌ی (۲۰)، می‌توان نوشت

$$d = \frac{d}{2} + \bar{z}_\sigma \cos \phi_1 + \sqrt{K_\sigma} \left(\frac{v_0}{\omega} + \bar{z}_\sigma \sin \phi_0 \right) \sinh \left(\frac{\delta \phi}{\sqrt{K_\sigma}} \right) - \left(\frac{d}{2} + \bar{z}_\sigma \cos \phi_0 \right) \cosh \left(\frac{\delta \phi}{\sqrt{K_\sigma}} \right). \quad (21)$$


شکل (۵). انرژی برخوردی برحسب σ برای $f = 1\text{GHz}$, $d = 1\text{mm}$, $E_0 = 3.68\text{ eV}$, $V_{rf} = 30\text{ V}$, $\phi_0 = 1.06\text{ rad}$, $w_1 = 20\text{ eV}$, $\sigma_0 = 1(\text{m}^{-2})$.

در اینجا ϕ_1 فازی است که صفحه‌ی الکترونی با الکترون دیگر در $Z = d$ برخورد می‌کند و $\delta \phi = \omega(t_1 - t_0)$ است. با در نظر گرفتن شرط تشدید $\phi_1 - \phi_0 = (2n-1)\pi$ ، مرتبه‌ی مالتی پکتور است، با استفاده از رابطه‌ی (۲۱) داریم

$$\bar{z}_\sigma = \frac{\frac{d}{2} - \sqrt{K_\sigma} \frac{v_0}{\omega} \tanh \left(\frac{(2n-1)\pi}{2\sqrt{K_\sigma}} \right)}{\sqrt{K_\sigma} \sin \phi_1 \tanh \left(\frac{(2n-1)\pi}{2\sqrt{K_\sigma}} \right) - \cos \phi_1}. \quad (22)$$

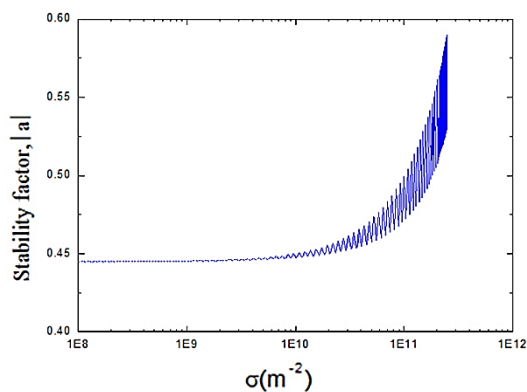
با استفاده از رابطه‌ی (۲۲) و \bar{z}_σ می‌توان V_{rf} را بدست آورد. کمترین V_{rf} که در آن مالتی پکتور می‌تواند اتفاق افتد، فاز اولیه‌ی الکترون، ϕ_0 ، را محدود می‌کند. با ماکزیمم قرار دادن کسر رابطه‌ی (۲۲) فاز متناسب با کمترین V_{rf} بدست می‌آید، ϕ_b .

۶- مراجع

- [1] B. Gimeno et al. Transmission-line model to analyze a multistage polarizer rotator, *Microwave and Optical Technology Letters* 4 (3), 113-117 (1991). <https://doi.org/10.1002/mop.4650040308>
- [2] J. R. M. Vaughan, *IEEE Trans, Multipactor*, *Electron Devices* 35, 1172(1988). <https://ieeexplore.ieee.org/document/3387>
- [3] N. F. Kvalev et al. Scenario for output pulse shortening in microwave generators driven by relativistic electron beams, *IEEE transactions on plasma science* 26 (3), 246-251 (1991). https://escholarship.org/content/qt7h9427f2/qt7h9427f2_noSplash_b36c20ee2d6bdac0ff3eb2e0e483d370.pdf
- [4] R. A. Kishek and Y. Y. Lau, Multipactor discharge on a dielectric, *Physical review letters* 80 (1), 193 (1998). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.80.193>
- [5] A. G. Sazontov and V. E. Nechaev, Effects of rf magnetic field and wave reflection on multipactor discharge on a dielectric, *Physics of Plasmas* 17 (3), 033509 (2010). <https://doi.org/10.1063/1.3356082>
- [6] H. Wang et al. Effects of rf magnetic field on upstream dielectric multipactor, *Plasma Sources Science and Technology* 27 (12), 125006 (1991). <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6595/aaef0e>
- [7] R. Udiljak et al. New method for detection of multipaction, *IEEE transactions on plasma science* 31 (3), 396-404 (2003). <https://ieeexplore.ieee.org/document/1206745?signout=success>
- [8] V. D. Shemelin, Existence zones for multipactor discharges, *Journal of Technical Physics* 56 (9), 1730-1736 (1986). <https://ieeexplore.ieee.org/document/1206745?signout=success>
- [9] M. Siddiqi and R. Kishek, Map-based multipactor theory for cross-field devices, *IEEE Transactions on Electron Devices* 66 (7), 3162-3167 (2019). <https://ieeexplore.ieee.org/document/8715665>
- [10] M. Mostajeran, Crossed fields and two-sided multipactor, *Physics of Plasmas* 25 (10), 103115 (2018). <https://doi.org/10.1063/1.5049587>
- [11] V. Semenov et al. Multipactor suppression in amplitude modulated radio frequency fields, *Physics of Plasmas* 8 (11), 5034-5039 (2001). <https://doi.org/10.1063/1.1410980>
- [12] M. Mostajeran and A. M. Nikdoust, The effect of variations of dimensions of a coaxial to WG1800 waveguide coupler its frequency, *Journal of Research on Many-body Systems* 10 (1), 113-129 (2020) (In Persian) https://jrmb.scu.ac.ir/article_15562.htm
- [13] M. Mostajeran and Lamchi Rachti, On the phase stability in two-sided multipactor, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 615 (1), 1-5 (2010). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900209024267>
- [14] G. Romanov, simulation of multipacting with space charge effect, *American Journal of Physics and Applications* 5(6), 99-105(2017). <https://doi.org/10.11648/j.ajpa.20170506.15>
- [15] A. Berenguer et al. *Experimental study of the multipactor effect in a partially dielectric-loaded rectangular waveguide*, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters* 29 (9), 595-597 (2019). <https://doi.org/10.1109/LMWC.2019.2929488>
- [16] A. Coves et al. Multipactor discharges in parallel-plate dielectric-loaded waveguides including space-charge effects, *IEEE transactions on electron devices* 55 (9), 2505-2511 (2008). <https://doi.org/10.1109/TED.2008.927945>
- [17] R. Spektor et al. *Space charge saturation in multipactor discharges with parallel magnetic field*, *Physics of Plasmas* 25 (12), 122109 (2018). <https://doi.org/10.1063/1.5052647>
- [18] E. Sorolla and M. Matts, *Multipactor in parallel-plate waveguides*, *Phys. Plasmas* 19,072304 (2012). <https://doi.org/10.1063/1.4736852>
- [19] S. Riyopoulos, D. Chernin and D. Dialetis, *Theory of electron multipactor in crossed fields*, *Physics of Plasmas* 2 (8), 3194-3213 (1995). <https://doi.org/10.1063/1.871151>

n	ϕ_{up} (deg)	$V_{RF}(\phi_{up})$ (V)	(deg) ϕ_b	$V_{RF}(\phi_b)$ (V)
7	-90	35.14927	87.1964	35.1072
8	-90	35.88207	87.5698	35.8498
9	-90	36.44245	87.8854	36.41693

برای بررسی پایداری مالتی پکتور با در نظر گرفتن اثر بار فضائی، می‌توان فاکتور پایداری را در هر برخورد محاسبه کرد. در شکل ۶ رفتار فاکتور پایداری بر حسب چگالی سطحی نشان داده شده است. فاکتور پایداری با افزایش چگالی سطحی به آرامی افزایش می‌یابد ولی تا زمانی که به حالت اشباع برسد، همچنان کوچک‌تر از یک است که نشانه پایداری بودن پدیده مالتی پکتور است.



شکل (۶). فاکتور پایداری بر حسب σ برای

$$f = 1\text{GHz}, d = 1\text{mm}, E_0 = 3.68\text{ eV}, V_{rf} = 30\text{ V}, \phi_0 = 1.06\text{ rad}, w_1 = 20\text{ eV}, \sigma_0 = 1(\text{m}^{-2}).$$

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله ابر الکترونی که در اثر تخلیه الکتریکی در ساختار موجبر با صفحات موازی، ایجاد می‌شود با صفحه تخت نازک مدل شد. میدان حاصل از صفحه الکتریکی (اثر بار فضائی) در محاسبه معادلات حرکت در نظر گرفته شد. معادلات به دست آمده، برای شبیه‌سازی حرکت استفاده شدند.

با بررسی رفتار چگالی سطحی بر حسب تعداد برخورد صفحه الکترونی با الکترونها و فازهای مجاز برای وقوع مالتی پکتور، نشان دادیم با در نظر گرفتن اثر بار فضائی، فازهایی که در آن مالتی پکتور اتفاق می‌افتد، بیشتر است به عبارتی نواحی مربوط به وقوع مالتی پکتور وسیع‌تر است.

آنالیز اشباع مالتی پکتور در موجبر با صفحات موازی، به مطالعه حرکت سه یا پنج صفحه الکتریکی (که نشان‌دهنده مرتبه‌های بالاتر مالتی پکتور است) قابل افزایش است.