

شبیه‌سازی بار فضایی در پدیده‌ی مالتی‌پکتینگ تک‌سطحی با استفاده از نرم‌افزار CST PIC STUDIO

مستأجران، مریم^۱؛ کاظمی، فیروزه^۱
^۱دانشگاه یزد، دانشکده فیزیک

دریافت: ۱۴۰۰/۹/۱۳ پذیرش: ۱۴۰۲/۷/۲۲

چکیده

پدیده‌ی مالتی‌پکتینگ که به علت تکثیر الکترون‌های ثانویه اتفاق می‌افتد، در ساختارهای رادیوفرکانسی بسیار شایع است. نیروی کولنی بین الکترون‌های ثانویه باعث اثر بار فضایی شده و در نتیجه اشباع مالتی پکتینگ اتفاق می‌افتد. مطالعه‌ی واقع‌بینانه‌ی مالتی‌پکتینگ، نیازمند در نظر گرفتن اثر بار فضایی است. شبیه‌سازی این اثر در نرم‌افزار CST PIC STUDIO به سادگی امکان پذیر نیست و چالش‌هایی برای کاربر ایجاد می‌کند. در این مقاله، چگونگی در نظر گرفتن بار فضایی در شبیه‌سازی مالتی‌پکتینگ تک‌سطحی برای مدلی ساده شرح داده شده است. اثر بار فضایی بر نتایج حاصل از شبیه‌سازی، بررسی شده و آستانه‌ی دامنه‌ی میدان رادیو فرکانسی برای وقوع مالتی‌پکتینگ به دست آمده است.

کلمات کلیدی: مالتی‌پکتینگ، شبیه‌سازی، نرم‌افزار CST، بار فضایی

مقدمه

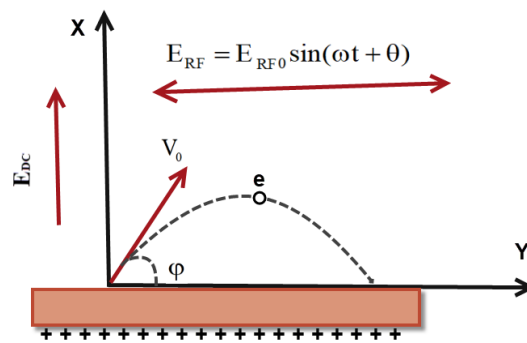
تخلیه مالتی‌پکتینگ، اثر نامطلوبی است که در ساختارهای رادیوفرکانسی^۱ (RF) تحت‌خلاء، اتفاق می‌افتد. این پدیده زمانی رخ می‌دهد که الکترونی که در میدان RF گرفتار شده است، با داشتن انرژی کافی و تحت شرایط مناسب، به سطح برخورد کند [۱]. در ساختار پنجره‌های رادیوفرکانسی^۲ که توان میکروموجی را از خلاء به هوا انتقال می‌دهند، پدیده مالتی‌پکتینگ اتفاق می‌افتد. جنس این پنجره‌ها از سرامیک (دی‌الکتریک) است که ضریب نشر الکترون ثانویه‌ی بالایی دارند. اگر زمان برخورد الکترون‌های ثانویه به سطح دی‌الکتریک، مضرب مفردی از نصف دوره‌ی تناوب RF باشد (شرط تشدید) و ضریب الکترون ثانویه^۳ (SEY) یعنی نسبت الکترون‌های ثانویه به الکترون‌های برخوردی اولیه، بزرگتر

¹ Radio Frequency

² RF window

³ Secondary Emission Yield

از یک باشد ($SEY \geq 1$) و الکترون‌های ثانویه در سیستم باقی بمانند (شرط پایداری)، در مدت زمان کوتاهی بهمنی از الکترون‌های ثانویه (الکترون‌هایی با رشد نمایی) ایجاد می‌شود که به آن پدیده‌ی مالتی‌پکتینگ می‌گویند [۲]. در سطح دی‌الکتریک، پس از انتشار الکترون ثانویه، حفره ایجاد می‌شود که باعث باردار شدن دی‌الکتریک (بار مثبت) می‌شود. به دلیل باردار شدن سطح دی‌الکتریک، میدان الکتروستاتیکی عمود بر صفحه به وجود می‌آید که به عنوان نیروی بازگرداننده عمل می‌کند و الکترون‌ها را مجدداً به سطح برمی‌گرداند. لذا در بررسی مالتی‌پکتینگ در پنجره‌های RF، علاوه بر میدان E_{RF} ، میدان DC (E_{DC}) ناشی از بار سطحی هم در نظر گرفته می‌شود. این نوع مالتی‌پکتینگ در دی‌الکتریک‌ها را مالتی‌پکتینگ تک سطحی^۴ می‌نامند. شکل (۱) این نوع مالتی‌پکتینگ را نشان می‌دهد.



شکل ۱: مدل مالتی‌پکتینگ تک سطحی در دی‌الکتریک‌ها.

E_{DC} از جمله کمیت‌های مهم در بررسی مالتی‌پکتینگ تک سطحی است، زیرا زمان برخورد الکترون به سطح (flight) را تعیین می‌کند. قابل ذکر است که سطح فلز به دلیل وجود الکترون‌های آزاد، با وجود از دست دادن الکترون، خنثی می‌ماند، در نتیجه نیروی بازگرداننده، وجود نخواهد داشت، الکترون پس از انتشار از یک سطح می‌تواند به سطح مقابل برخورد کند و مالتی‌پکتینگ غالباً از نوع مالتی‌پکتینگ دوسطحی^۵ خواهد بود.

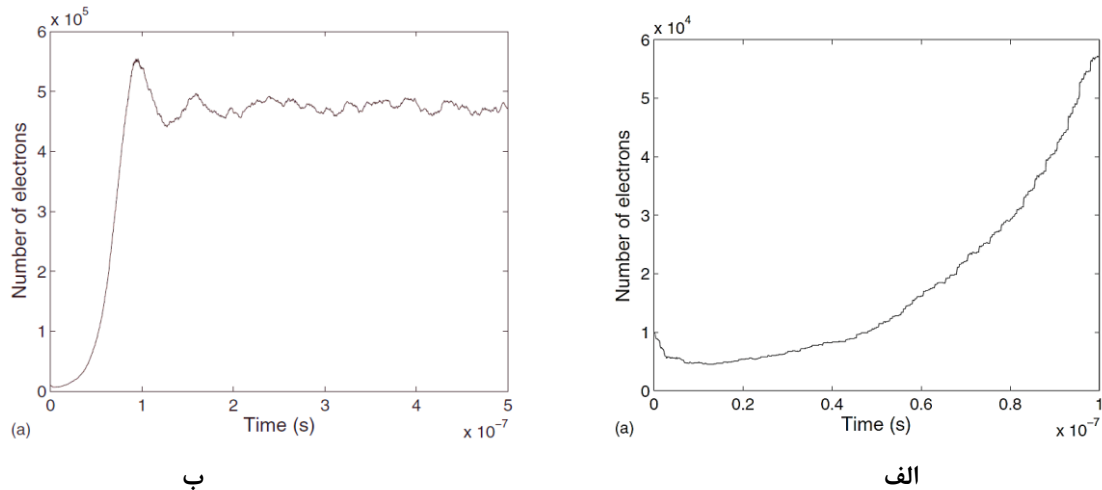
در بسیاری از مطالعات نظری و شبیه‌سازی‌های انجام شده در پدیده مالتی‌پکتینگ، بار فضایی^۶ نادیده گرفته شده است. شکل‌های (۲-الف) و (۲-ب) به ترتیب، تغییرات تعداد ذرات بر حسب زمان را، با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن بار فضایی نشان می‌دهند. در شکل (۲-ب) ابتدا تعداد الکترون‌های ثانویه^۷ تولید شده در سیستم، رشد می‌کند و سپس ثابت می‌شود که به اصطلاح، اشباع^۷ مالتی‌پکتینگ اتفاق افتاده است.

⁴ Single-sided multipacting

⁵ Two-sided multipacting

⁶ Space Charge

⁷ Saturation



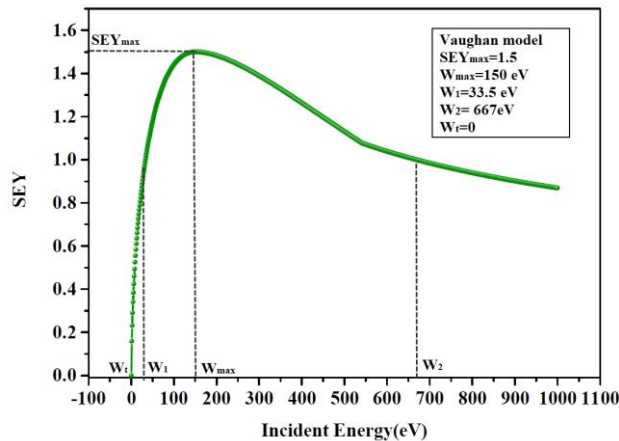
شکل ۲: رشد ذرات بر حسب زمان الف- بدون اثرات بار فضایی ب- با اثرات بار فضایی [۱]

همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است، در یک زمان معین، بار فضایی باعث کاهش شدت مالتی پکتینگ (تعداد الکترون‌ها) شده است. تعداد الکترون‌ها در طی فرآیند مالتی پکتینگ، به انرژی برخوردی^۸ (W_{coll}) و جریان برخوردی آن‌ها به سطح (I_{coll}) بستگی دارد. بدون در نظر گرفتن بار فضایی، پیش‌بینی این کمیت‌ها با نتایج تجربی، مطابقت خوبی ندارد. به طور مثال W_{coll} اندازه‌گیری شده با مقدار پیش‌بینی شده در تئوری بدون بار فضایی، بسیار کمتر است [۳]. بنابراین مطالعه‌ی دقیق مالتی پکتینگ، مستلزم در نظر گرفتن اثرات بار فضایی در شبیه‌سازی است. در [۳]، شبیه‌سازی بار فضایی در مالتی پکتینگ دوسطحی، بدون بیان چالش‌های موجود برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار، انجام شده و نشان داده شده است که اثرات بار فضایی، ناحیه‌ی وقوع مالتی پکتینگ که بدون این اثرات، بدست آمده بود را تغییر نمی‌دهد. در این مقاله هدف ما این است که علاوه بر نشان دادن چگونگی شبیه‌سازی بار فضایی در CST، اثر بار فضایی را بر پارامترهای مورد مطالعه در مالتی پکتینگ از جمله W_{coll} و I_{coll} بررسی کنیم.

مالتی پکتینگ به شدت به SEY سطوح بستگی دارد [۴]. رفتار SEY بر حسب انرژی برخوردی در شکل (۳) نشان داده شده است. که با پارامترهای W_t ، W_1 ، W_2 ، W_{max} و SEY_{max} مشخص می‌شود. با توجه به شکل (۳)، SEY در محدوده‌ی انرژی W_1 تا W_2 بزرگتر از یک است. در انرژی‌های برخوردی خارج از این محدوده، چون الکترون انرژی کافی ندارد، نمی‌تواند الکترون ثانویه از ماده جدا کند در نتیجه مالتی پکتینگ اتفاق نمی‌افتد. W_t ، انرژی برخوردی آستانه است که در مدل واگان، در نرم‌افزار CST تعیین می‌شود. حداکثر ضریب نشر الکترون ثانویه را با SEY_{max} و انرژی برخوردی متناسب با آن را W_{max} می‌نامند. در [۵، ۴، ۱] تأثیر SEY_{max} و W_{max} بر فرآیند مالتی پکتینگ بررسی شده است در اینجا مطالعه‌ی اثر تغییرات W_1 و W_2 در اشباع مالتی پکتینگ انجام خواهد شد.

⁸ Collision emission

⁹ Collision Energy



شکل ۳: رفتار SEY بر حسب انرژی برخوردی در مدل واگان.

در این مقاله، در بخش اول، آستانه‌ی دامنه‌ی میدان E_{RF0} (آستانه‌ی E_{RF0}) را برای وقوع مالتی‌پکتینگ در مدلی ساده، به صورت نظری بدست می‌آوریم. در بخش دوم، بدون در نظر گرفتن بار فضایی مالتی‌پکتینگ تک سطحی را برای مدلی ساده، شبیه‌سازی می‌کنیم. در بخش سوم چالش‌هایی را که در شبیه‌سازی بار فضایی، در نرم‌افزار CST PIC و STUDIO وجود دارد، بیان کرده و سپس شبیه‌سازی را انجام می‌دهیم. ویژگی‌های مالتی‌پکتینگ از جمله: W_{coll} ، I_{coll} و بار سطحی ایجاد شده در سطح دی الکتریک را در اشباع بررسی می‌کنیم. در بخش چهارم اثر تغییرات W_1 و W_2 را با در نظر گرفتن بار فضایی بر پارامترهای مالتی‌پکتینگ، نشان می‌دهیم.

۱- محاسبه آستانه‌ی E_{RF0} به روش نظری

با در نظر گرفتن دو میدان E_{RF} و E_{DC} (شکل ۱) و با استفاده از قانون دوم نیوتن، می‌توان معادلات حرکت الکترون در

مالتی‌پکتینگ تک سطحی را بدست آورد [۶]. با استفاده از این معادلات، روابط ۱ و ۲ برای سرعت بدست می‌آید

$$\dot{x} = -\frac{e}{m} E_{DC} t + v_{0x}, \quad v_{0x} = v_0 \sin \varphi \quad (1)$$

$$\dot{y} = -\frac{e}{m} E_{RF0} [\cos(\omega t + \theta) - \cos \theta] + v_{0y}, \quad v_{0y} = v_0 \cos \varphi \quad (2)$$

در اینجا e و m ، به ترتیب بار و جرم الکترون، v_{0x} و v_{0y} به ترتیب مؤلفه‌های سرعت اولیه‌ی الکترون‌ها در راستای x

و y ، سرعت زاویه‌ای، φ زاویه انتشار الکترون نسبت به محور افقی (در اینجا $\varphi = 90^\circ$ در نظر گرفته شده است) و

$\theta = 0$ فاز اولیه است. زمان پرواز الکترون (از انتشار تا برخورد) با استفاده از رابطه‌ی $t_{flight} = \frac{2m v_0 \sin \varphi}{e E_{DC}}$ بدست

می‌آید. شرط تشدید در مالتی‌پکتینگ تک سطحی، زمانی اتفاق می‌افتد که زمان پرواز، مضرب فردی از نصف دوره

تناوب باشد، (رابطه‌ی ۳).

$$t_{flight} = \frac{T(2n-1)}{2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

در این رابطه n مرتبه‌ی مالتی‌پکتینگ و T دوره تناوب فرکانس مورد نظر، بر حسب هرتز (در این مقاله ۳۲۵ MHz)، است. با استفاده از شرط تشدید، E_{DC} تشدید در مرتبه‌ی اول مالتی‌پکتینگ ($n=1$) به صورت رابطه‌ی (۴)، بدست می‌آید.

$$E_{DC} = \frac{f m v_{\cdot x}}{e T} \quad (4)$$

E_{DC} تشدید در مدل تک سطحی در این مقاله، برابر با ۱۲ KV/m بدست می‌آید.

برای محاسبه‌ی نظری آستانه‌ی E_{RF0} ، ابتدا W_{coll} در هر برخورد را از رابطه‌ی (۵) بدست می‌آوریم

$$W_{coll} = \frac{1}{2} m (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) \quad (5)$$

سرعت الکترون در لحظه‌ی برخورد به سطح، دارای مؤلفه‌ی موازی برابر با $\dot{x} = -\frac{2e}{m} E_{RF} \cos \theta$ و مؤلفه‌ی عمودی برابر با $\dot{y} = \dot{x}$ است. می‌دانیم که حداقل انرژی برخورد برای جدا کردن الکترون ثانویه از سطح باید برابر با W_1 باشد، لذا با در نظر گرفتن $W_{coll} = W_1$ و با استفاده از مؤلفه‌های سرعت در لحظه‌ی برخورد، آستانه‌ی E_{RF0} با در نظر گرفتن فقط شرط تشدید، از رابطه‌ی (۶) به دست می‌آید

$$E_{RF} = \frac{m}{2e} \sqrt{\frac{2W_1}{m} - \dot{x}^2} \quad (6)$$

همانطور که در رابطه (۶) مشخص است، E_{RF0} به انرژی W_1 وابسته است. بنابراین با پارامترهای SEY انتخاب شده در شکل (۳) ($W_1 = 33/5$) $E_{RF} = 17.5$ KV/m بدست می‌آید.

۲- شبیه‌سازی مالتی‌پکتینگ بدون اثرات بار فضایی

۲-۱- مراحل شبیه‌سازی

مراحل شبیه‌سازی مالتی‌پکتینگ در نرم‌افزار CST به صورت زیر است:

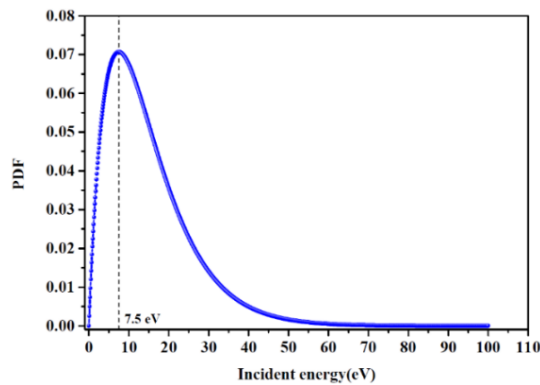
- ایجاد مدل در محیط PIC: مدل مورد نظر صفحه‌ای از جنس دی‌اکتیک (تفلون) با ضخامت ناچیز است.
- ایجاد ویژگی الکترون ثانویه: ویژگی انتشار ثانویه برای سطح با انتخاب یک مدل انتشار ثانویه، تعیین می‌شود. در این شبیه‌سازی مدل واگان^{۱۰} را انتخاب می‌کنیم. پارامترهای SEY (که در نرم‌افزار قابل تغییر هستند) را مطابق جدول (۱) در نظر می‌گیریم.

جدول ۱: پارامترهای SEY انتخاب شده در مدل واگان

| SEY _{max} | E _{max} (eV) | W _t (eV) | W ₁ (eV) | W ₂ (eV) |
|--------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| ۱/۵ | ۱۵۰ | صفر | ۳۳/۵ | ۶۶۷ |

¹⁰ Vaughan model

- **ایجاد چشمه الکترونی:** چشمه‌ای نقطه‌ای در مرکز صفحه ایجاد کردیم و تنظیمات انتشار گوسی در این چشمه را طوری قرار دادیم که در آغاز شبیه‌سازی، ذرات را در طول یک دوره RF منتشر کند (طول پالس به اندازه‌ی یک دوره باشد). الکترون‌های اولیه بدون پراکندگی زاویه‌ای به صورت عمود بر سطح ساطع می‌شوند. در نرم‌افزار CST، می‌توان بیشترین انرژی محتمل برای انتشار الکترون ثانویه را تعیین کرد که در اینجا طبق [۳] 7.5 eV در نظر می‌گیریم. متناسب با مدل انتشار ثانویه، توزیع انرژی الکترون‌های ثانویه در نرم‌افزار CST تعیین می‌شود که برای مدل واگان مطابق شکل (۴) است.

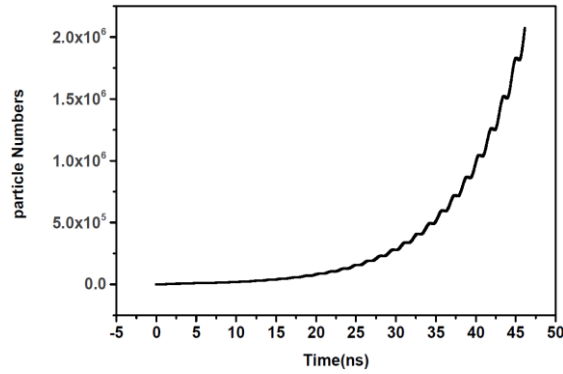


شکل ۴: تابع چگالی احتمال برای توزیع انرژی الکترون‌های ثانویه در مدل واگان.

- **شبیه‌سازی سازی E_{DC} و E_{RF} :** E_{DC} و E_{RF} به ترتیب میدان‌های موازی و عمود بر سطح هستند. E_{RF} انرژی لازم برای شتاب دادن به ذرات را فراهم می‌کند. طریقه‌ی متناوب کردن E_{RF} و جزئیات شبیه‌سازی این دو میدان را در [۷] آورده‌ایم. پس از شبیه‌سازی این دو میدان، آن‌ها را به محیط PIC وارد می‌کنیم.

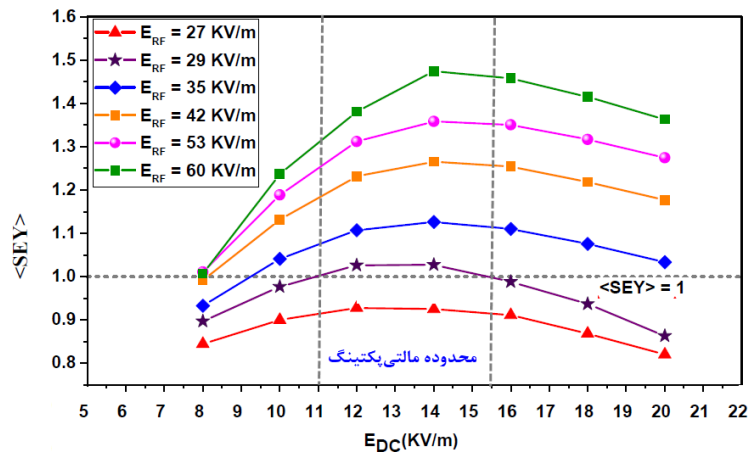
۲-۲- نتایج حاصل از شبیه‌سازی مالتی‌پکتینگ بدون اثرات بار فضایی

پس از اتمام شبیه‌سازی، نمودار تعداد ذرات بر حسب زمان را به ازای $E_{RF} = 30 \text{ KV/m}$ در شکل (۵) آورده‌ایم. همانطور که مشاهده می‌شود، تعداد ذرات به صورت نمایی افزایش یافته است که نشان‌دهنده‌ی وقوع مالتی‌پکتینگ است.



شکل ۵: تغییرات تعداد ذرات بر حسب زمان بدون در نظر گرفتن بار فضایی.

برای E_{DC} های مختلف، پارامتر SEY میانگین ($\langle SEY \rangle$) را در مقادیر مختلف E_{RF} به دست می‌آوریم. $\langle SEY \rangle$ که به صورت نسبت میانگین I_{coll} به I_{emis}^{11} تعریف می‌شود، اگر بزرگتر یا برابر با یک باشد، شاخص دیگری برای نشان دادن وقوع مالتی پکتینگ است [۸]. شکل (۶) محدوده E_{DC} و E_{RF} برای وقوع مالتی پکتینگ را نشان می‌دهد.



شکل ۶: $\langle SEY \rangle$ بر حسب E_{DC} برای مقادیر مختلف E_{RF0} .

شکل (۶) نشان می‌دهد که در محدوده‌ی مشخص شده ($E_{DC} = (11-15.5)KV/m$) $\langle SEY \rangle$ بزرگتر از یک است و مالتی پکتینگ اتفاق افتاده است. این در حالی است که در قسمت قبل با در نظر گرفتن شرط تشدید و انرژی الکترون‌های ثانویه برابر با $E_{DC} = 7.5 eV$ تشدید برابر با $12 KV/m$ بدست آمد. علت این اختلاف این است که در شبیه‌سازی، علاوه بر انرژی اولیه $7.5 eV$ ، وجود انرژی‌های نزدیک به $7.5 eV$ (شکل ۴) نیز برای ذرات، محتمل خواهد بود که باعث می‌شود در E_{DC} های دیگری هم مالتی پکتینگ اتفاق بیفتد.

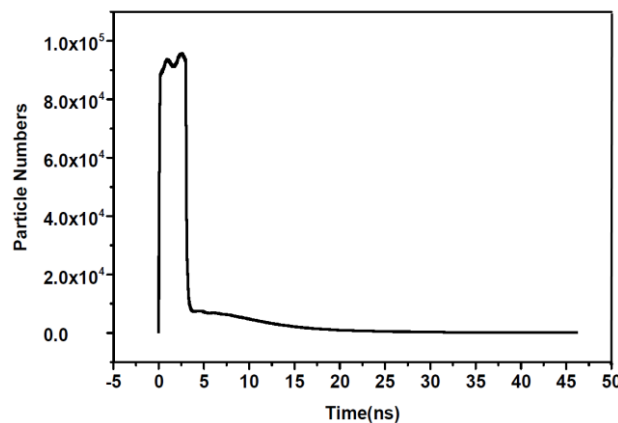
همچنین با توجه به شکل (۶)، آستانه‌ی E_{RF0} برابر با $29 kV/m$ است که از مقدار نظری محاسبه شده در بخش اول ($17/5 KV/m$) بزرگتر است. علت اختلاف این دو مقدار این است که در محاسبه‌ی نظری فقط شرط تشدید در نظر

^{۱۱} جریان انتشاری از سطح پس از هر برخورد

گرفته شده است. بنابراین در شبیه سازی و در محدوده ی $E_{RF} < 29 \text{ KV/m}$ ، تعداد ذرات تشدید ی به اندازه کافی زیاد نبوده است که شتاب گرفته و با کسب انرژی بالای W_1 ، موجب ایجاد مالتی پکتینگ شوند.

۳- شبیه سازی مالتی پکتینگ با اثرات بار فضایی

به منظور در نظر گرفتن بار فضایی، گزینه ی " حذف بار فضایی"^{۱۲} را در تنظیمات حل کننده PIC، غیرفعال و E_{DC} وارد شده را حذف می کنیم (E_{RF} همچنان فعال است)، زیرا با در نظر گرفتن بار فضایی، E_{DC} در نرم افزار ایجاد می شود و به همین دلیل نمی توان دقیقاً آن را تعیین کنیم و کنترلی روی مقادیر آن داشته باشیم. شبیه سازی را با در نظر گرفتن بار فضایی و با پارامترهای SEY در جدول (۱) و همان شرایط قبل ($E_{RF} = 30 \text{ KV/m}$)، با انتخاب مدل واگان، انجام می دهیم. شکل (۷) نمودار تعداد ذرات بر حسب زمان را نشان می دهد.



شکل ۷: تغییرات تعداد ذرات بر حسب زمان با در نظر گرفتن بار فضایی.

رشد کاهشی تعداد ذرات نشان دهنده ی عدم وقوع مالتی پکتینگ است در صورتیکه که با همین شرایط، در شبیه سازی بدون اثر بار فضایی، مالتی پکتینگ اتفاق افتاده است (شکل ۵) از طرفی می دانیم که بار فضایی محدوده ی وقوع مالتی پکتینگ را تغییر نمی دهد. علت عدم وقوع مالتی پکتینگ در اینجا، تفاوت شدت E_{DC} ایجاد شده در این دو حالت است. در شبیه سازی بدون اثر بار فضایی، E_{DC} با شدت مورد نیاز، توسط کاربر وارد می شود در حالی که با در نظر گرفتن بار فضایی شدت E_{DC} متناسب با تعداد الکترون های ثانویه انتشاری از سطح است، لذا E_{DC} از صفر ایجاد شده و به تدریج افزایش می یابد در نتیجه در ابتدای شبیه سازی مقدار آن برای وقوع مالتی پکتینگ کافی نیست، بنابراین با افزایش مقدار SEY، افزایش بار اولیه در چشمه و افزایش طول پالس انتشاری می توان E_{DC} مناسب برای وقوع مالتی پکتینگ را ایجاد کرد.

¹² Neglect space charge effect

۳-۱- ایجاد شرایط اولیه‌ی مناسب برای در نظر گرفتن بار فضایی

- ابتدا مقدار SEY_{max} و E_{max} را افزایش می‌دهیم (جدول ۲). برای جلوگیری از محاسبات طولانی و کاهش زمان شبیه سازی، حداکثر مجاز $SEY_{max} = 3$ در نظر گرفته شده است.

جدول ۲: پارامترهای SEY انتخاب شده در مدل واگان

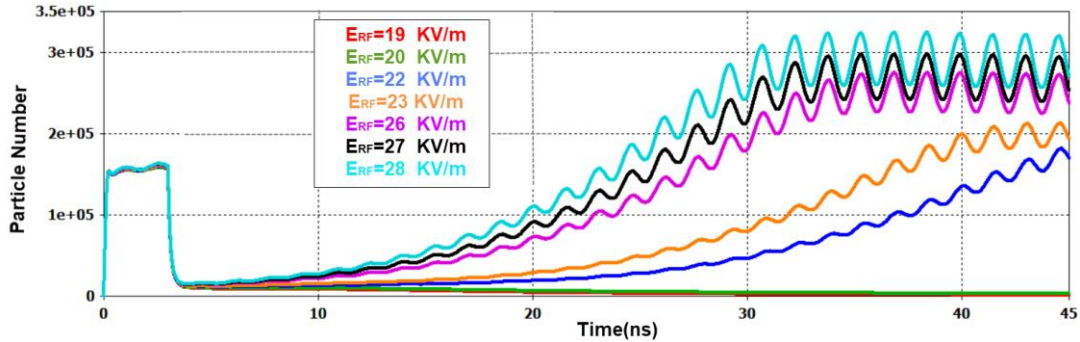
| SEY_{max} | E_{max} (eV) | W_t (eV) | W_1 (eV) | W_2 (eV) |
|-------------|----------------|------------|------------|------------|
| ۳ | ۲۰۰ | صفر | ۱۱ | ۶۶۰۰ |

- به علت عدم وقوع مالتی‌پکتینگ با افزایش SEY، ابتدا چشمه‌ی نقطه‌ای را با چشمه‌ای شعاعی جایگزین می‌کنیم تا بار اولیه‌ی صفحه، یکنواخت‌تر شود و سپس با روش سعی و خطا مقدار بار اولیه را تا حد مجاز افزایش می‌دهیم.
 - پس از تعیین مقدار مناسب بار اولیه، در صورت عدم وقوع مالتی‌پکتینگ می‌توانیم با افزایش طول پالس انتشاری، تعداد ذرات را افزایش دهیم.
- پس از انجام این مراحل، برای بررسی دینامیک باردار شدن سطح یا تغییرات شدت E_{DC} در طی فرآیند مالتی‌پکتینگ، مانیتور ولتاژی در زیر صفحه ایجاد می‌کنیم.^{۱۳} نتایج مانیتور شده در ادامه آورده شده است (شکل (۱۰)).

۳-۲- نتایج حاصل از شبیه‌سازی مالتی‌پکتینگ با اثر بار فضایی

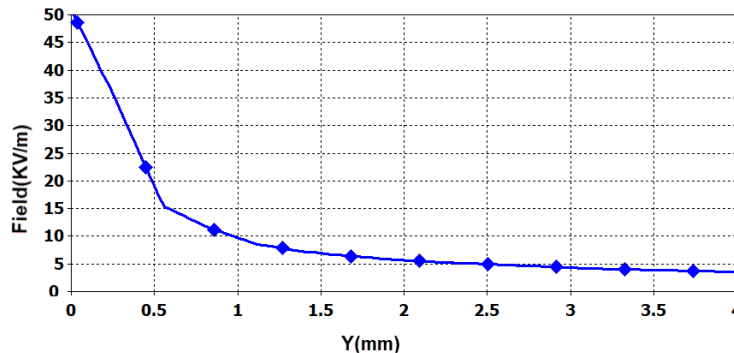
با در نظر گرفتن شرایط بخش (۳-۱) نمودار تعداد ذرات در طی زمان برای مقادیر مختلف E_{RF0} در شکل (۸) بدست می‌آید و مشاهده می‌شود که بار فضایی موجب اشباع مالتی‌پکتینگ (ثابت شدن تعداد ذرات) شده است. مطالعه‌ی پارامترهای مالتی‌پکتینگ از جمله: آستانه‌ی E_{RF0} ، اثر بار فضایی، بار ایجاد شده در سطح، W_{coll} و اهمیت I_{coll} دارند. در این بخش، این پارامترها را بررسی می‌کنیم.

^{۱۳} به این دلیل مانیتور را در زیر صفحه قرار داده‌ایم تا وجود مانیتور، باعث تغییر رفتار میدان‌ها در بالای صفحه نشود.



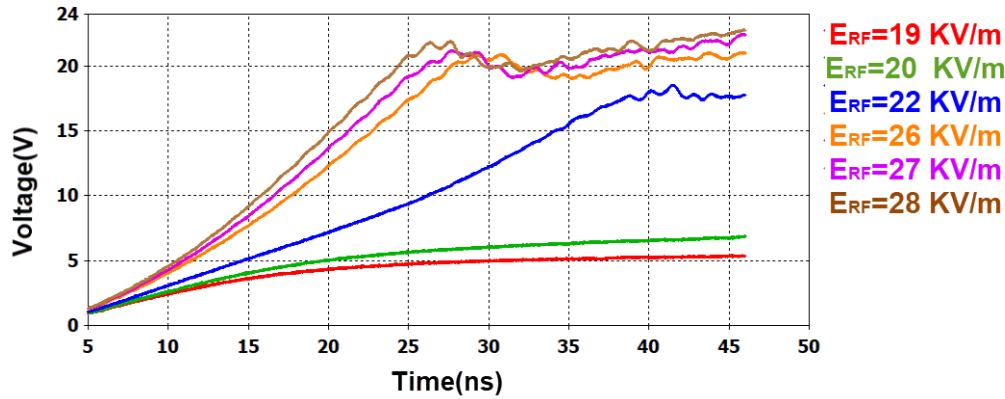
شکل ۸: تغییرات تعداد ذرات بر حسب زمان به ازای مقادیر مختلف E_{RF} .

- آستانه E_{RF0} : با توجه به شکل (۸)، تعداد ذرات، به ازای $E_{RF} \geq 22 \text{ KV/m}$ ، ابتدا افزایش یافته و سپس ثابت شده‌اند و در کمتر از این مقادیر رشد نمایی ذرات دیده نمی‌شود، بنابراین آستانه‌ی $E_{RF0} = 22 \text{ KV/m}$ است. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش E_{RF0} ، نرخ رشد تعداد ذرات زیاد می‌شود اما تعداد آن‌ها در اشباع در مقادیر مختلف E_{RF0} تقریباً یکسان است.
- اثر بار فضایی: بدون بار فضایی و در راستای عمود بر صفحه (جهت y)، مانیتور میدان، E_{DC} ثابتی را نشان می‌دهد اما با در نظر گرفتن بار فضایی، مانیتور شکل (۹) را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، شدت میدان با دور شدن از مرکز سطح (در راستای عمود) کاهش می‌یابد. این کاهش میدان به علت اثر بار فضایی است.



شکل ۹: میدان در راستای عمود بر صفحه.

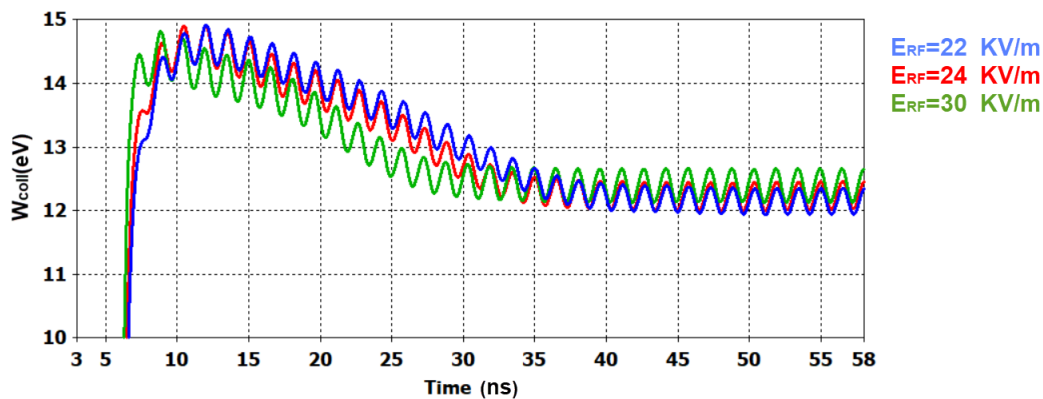
- بار ایجاد شده در سطح: شکل (۱۰) تغییرات ولتاژ ایجاد شده‌ی حاصل از بار سطحی بر حسب زمان را برای مقادیر مختلف E_{RF0} نشان می‌دهد. این ولتاژ توسط مانیتور ولتاژ و در امتداد خط ۲ میلی‌متری عمود بر زیر صفحه، محاسبه شده است. شدت ولتاژ در بالا و زیر صفحه متفاوت است، اما می‌توان با مشاهده‌ی تغییرات ولتاژ (یا به طور متناسب E_{DC}) در زیر صفحه، دینامیک بار دار شدن صفحه و اشباع بار را بررسی کرد.



شکل ۱۰: ولتاژ ایجاد شده (یا به طور متناسب E_{DC}) در صفحه به ازای مقادیر مختلف E_{RF} .

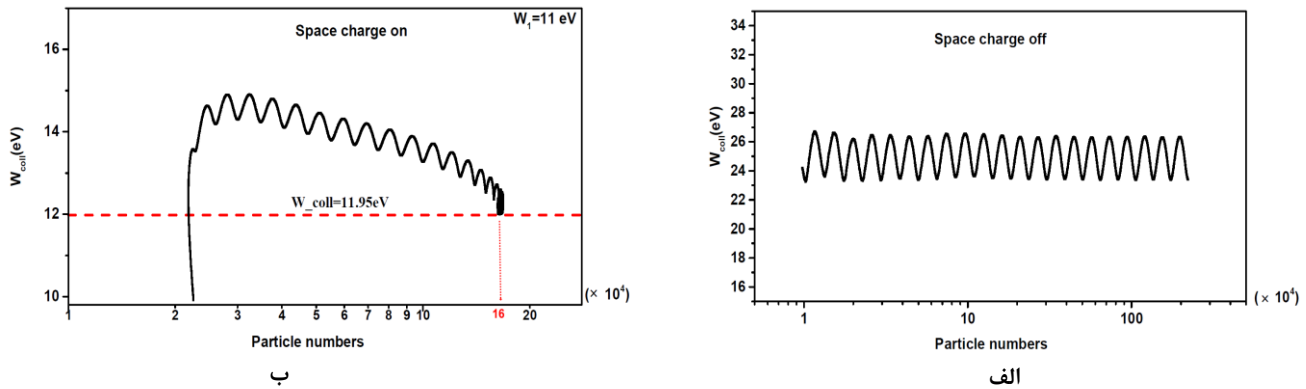
اشباع ولتاژ به ازای مقادیر مختلف E_{RF0} مشاهده می‌شود. با افزایش شدت E_{RF0} ، مقدار E_{DC} به ازای مقادیر مختلف E_{RF0} تقریباً ثابت است. هنگامی که E_{RF0} کمتر از مقدار آستانه است مالتی پکتینگ اتفاق نمی‌افتد و در نتیجه E_{DC} فقط، حاصل از بار اولیه‌ی سطح خواهد بود که نسبت به زمان تغییر نمی‌کند. در E_{RF0} بزرگتر از آستانه، پس از گذشت زمان به علت ثابت شدن بار صفحه (یا همان تعداد الکترون‌های ثانویه) ولتاژ، ثابت می‌شود. ولتاژ نهایی به ازای مقادیر مختلف E_{RF0} تقریباً یکسان خواهد بود. تغییرات مقادیر میانگین ولتاژ در زمان اشباع نسبت به تغییرات E_{RF0} برای SEY های مختلف در ادامه آورده شده است (شکل ۱۵).

انرژی برخوردی (W_{coll}): مقادیر انرژی برخوردی نیز مانند سایر پارامترهای مالتی پکتینگ پس از گذشت زمان کاهش یافته و در حالت اشباع، ثابت می‌شود (شکل ۱۱).



شکل ۱۱: تغییرات انرژی برخوردی (W_{coll}) در طی فرآیند اشباع مالتی پکتینگ.

برای مشاهده‌ی اثر بار فضایی بر W_{coll} و شدت مالتی پکتینگ، نمودار تغییرات تعداد ذرات بر حسب W_{coll} را با اثرات بار فضایی و بدون در نظر گرفتن این اثرات، به ترتیب در شکل‌های (۱۲-الف) و (۱۲-ب) نشان می‌دهیم.



شکل ۱۲: تعداد ذرات بر حسب انرژی برخوردی آن‌ها الف- بدون در نظر گرفتن بار فضایی ب- با در نظر گرفتن بار فضایی.

همانطور که در شکل (۱۲- الف) مشاهده می‌شود، بدون اثر بار فضایی، با افزایش تعداد ذرات، مقدار W_{coll} ثابت است ولی با در نظر گرفتن بار فضایی، W_{coll} ابتدا کاهش و سپس به یک مقدار ثابت میل می‌کند که این مقدار ثابت، تقریباً برابر با W_1 است. علاوه بر این تعداد ذرات و شدت W_{coll} در شبیه‌سازی بدون بار فضایی بیشتر از شبیه‌سازی با بار فضایی است.

۴- تأثیر پارامترهای SEY با در نظر گرفتن بار فضایی

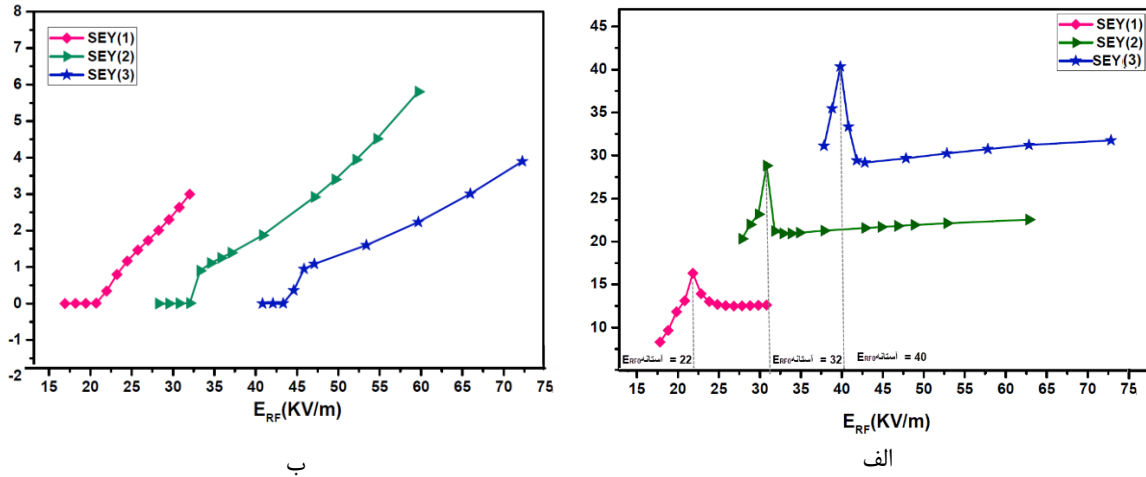
هدف این بخش، بررسی تأثیر انرژی‌های W_1 و W_2 بر ویژگی‌های مالتی‌پکتینگ در اشباع است. در مدل واگان مقادیر W_1 و W_2 با تعیین مقادیر سه پارامتر دیگر SEY (E_{max} و W_t و W_{max}) تعیین می‌شوند. در اینجا برای بررسی اثر تغییرات W_1 و W_2 ، با ثابت نگه داشتن E_{max} و W_{max} ، W_t را تغییر می‌دهیم (جدول ۳).

جدول ۳: پارامترهای SEY انتخاب شده در مدل واگان

| SEY | SEY_{max} | E_{max} (eV) | W_t (eV) | W_1 (eV) | W_2 (eV) |
|-----|-------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|
| (۱) | ۳ | ۲۰۰ | ۰ | ۱۱ | ۶۶۰۰ |
| (۲) | ۳ | ۲۰۰ | ۶ | ۱۶ | ۶۵۰۰ |
| (۳) | ۳ | ۲۰۰ | ۷ | ۲۲ | ۳۷۱۱ |

با انتخاب هر یک از SEYهای جدول (۳)، شبیه‌سازی را به ازای مقادیر مختلف E_{RF0} انجام داده و آستانه‌ی E_{RF0} را مانند شکل (۸) برای هر SEY، تعیین می‌کنیم (در شکل ۱۳ آستانه‌ها مشخص شده‌اند). در هر اجراء مقادیر میانگین I_{coll} و W_{coll} را در زمان اشباع، محاسبه می‌کنیم و بر حسب تغییرات E_{RF0} نشان می‌دهیم (شکل (۱۳)).

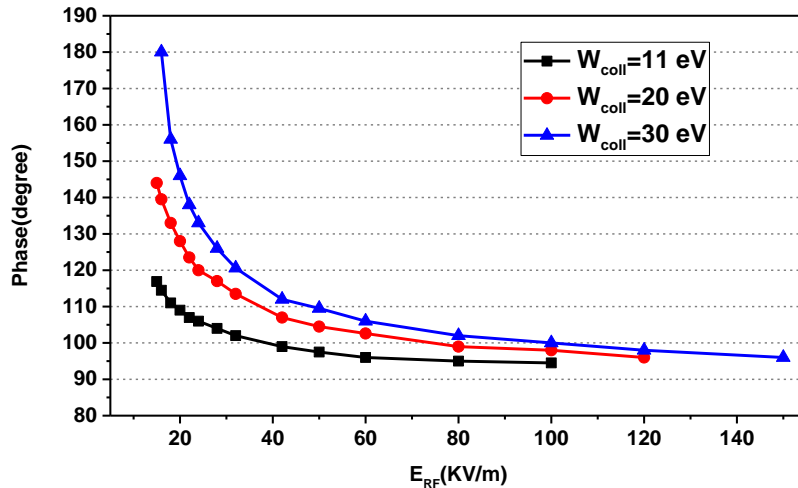
در شکل (۱۳-الف)، مشاهده می‌شود که در هر سه SEY، به ازای مقادیر آستانه‌ی E_{RF0} ، الکترون‌های ثانویه، بیش‌ترین W_{coll} را کسب می‌کنند. نکته قابل توجه این است که برای هر SEY با افزایش E_{RF0} ، از یک مقدار به بعد، W_{coll} تغییر نمی‌کند و نزدیک به W_1 ثابت می‌ماند.



شکل ۱۳: الف- تغییرات انرژی برخوردی (W_{coll}) میانگین ب- تغییرات جریان برخوردی میانگین (I_{coll})، در طول فرآیند اشباع مالتی پکتینگ.

شکل (۱۳-ب)، نشان می‌دهد که، سرعت افزایش جریان‌های برخوردی با W_1 ارتباط دارد، هر چه W_1 بزرگتر باشد، نرخ رشد جریان برخوردی نسبت به مقادیر مختلف E_{RF0} ، کمتر است. با توجه به این دو شکل، تغییرات جریان و انرژی‌های برخوردی با W_2 ، رابطه‌ی مشابهی ندارند.

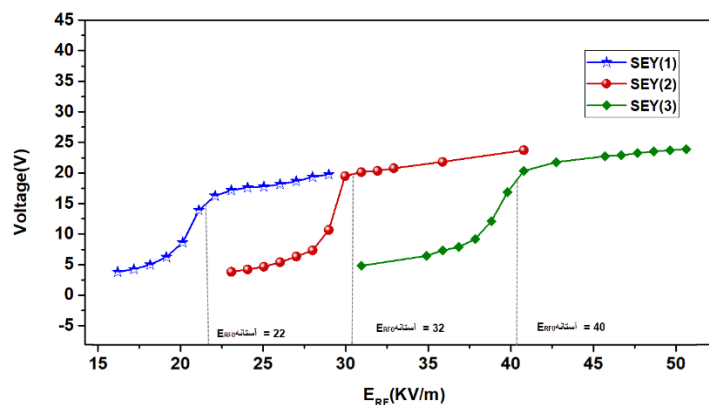
این واقعیت که W_{coll} در اشباع تقریباً به مقادیر مختلف E_{RF0} بستگی ندارد را می‌توان با تغییر فاز اولیه ذرات تشدیدی توضیح داد. شکل (۱۴) تغییر فاز ذرات اولیه نسبت به مقادیر مختلف E_{RF0} را برای سه مقدار مختلف W_{coll} در اشباع، نشان می‌دهد.



شکل ۱۴: تغییر فازهای اولیه نسبت به تغییر مقادیر مختلف E_{RF0} .

همانطور که در شکل مشاهده می شود، در زمان اشباع مالتی پکتینگ، فاز اولیه ذرات با تغییر مقادیر E_{RF0} به مقداری ثابت می رسد و می توان نتیجه گرفت که مکانسیم توسعه ی مالتی پکتینگ و اشباع آن به این صورت است که فاز ذرات در زمان اشباع به ازای مقادیر مختلف E_{RF0} تقریباً ثابت می شود و در نتیجه انرژی برخوردی آن ها به ازای این مقادیر میدان، تغییر نمی کند.

در شکل (۱۵) تغییرات ولتاژ برای مقادیر مختلف E_{RF0} برای SEY های جدول (۳) نشان داده شده است.



شکل ۱۵: تغییر ولتاژ ایجاد شده بر اثر باردار شدن صفحه بر حسب شده E_{RF} .

همانطور که در شکل (۱۵) مشاهده می شود، ولتاژ در آستانه ی E_{RF0} به مقدار بسیار زیادی افزایش می یابد. این بدان معنی است که الکترون هایی که انرژی آن ها بیشتر از W_1 است به سرعت تشدید شده اند و مالتی پکتینگ توسعه یافته است و در زمان اشباع، مقادیر ولتاژ با افزایش E_{RF0} تقریباً ثابت می ماند.

۵- نتیجه گیری

در شبیه‌سازی بدون اثر بار فضایی، E_{DC} با شدت مورد نیاز، توسط کاربر وارد می‌شود در حالی که با در نظر گرفتن بار فضایی، E_{DC} متناسب با تعداد الکترون‌های ثانویه انتشاری از سطح است، لذا E_{DC} از صفر ایجاد شده و به تدریج افزایش می‌یابد در نتیجه در ابتدای شبیه‌سازی مقدار آن برای وقوع مالتی‌پکتینگ کافی نیست. ناکافی بودن شدت E_{DC} در ابتدای شبیه‌سازی با افزایش تعداد ذرات در شروع مالتی‌پکتینگ، جبران می‌شود. افزایش تعداد ذرات نیز با افزایش مقدار SEY، افزایش بار اولیه در چشمه و افزایش طول پالس انتشاری از چشمه، انجام می‌شود. در زمان اشباع، مقادیر انرژی برخوردی ذرات (W_{coll}) و ولتاژ اندازه‌گیری شده‌ی سطح (که متناسب با E_{DC} و بار سطح است) با افزایش E_{RF} تقریباً ثابت می‌مانند.

علت ثابت ماندن مقدار W_{coll} را می‌توان با مشاهده‌ی تغییر فاز اولیه‌ی ذرات بر حسب تغییر E_{RF0} توضیح داد و چنین نتیجه گرفت که مکانسیم توسعه‌ی مالتی‌پکتینگ و اشباع آن به این صورت است که فاز ذرات در زمان اشباع به ازای مقادیر مختلف E_{RF0} تقریباً ثابت می‌شود و در نتیجه انرژی برخوردی آن‌ها به ازای این مقادیر میدان، تغییر نمی‌کند. بدون اثر بار فضایی و در یک مقدار ثابت E_{RF0} ، با توسعه‌ی مالتی‌پکتینگ و افزایش نمایی تعداد ذرات، مقدار W_{coll} ثابت است ولی با در نظر گرفتن بار فضایی، W_{coll} ابتدا کاهش و سپس به یک مقدار ثابت میل می‌کند که این مقدار ثابت تقریباً برابر با W_1 است. علاوه بر این در نظر گرفتن بار فضایی باعث کاهش شدت مالتی‌پکتینگ (کاهش تعداد ذرات) و کاهش مقدار W_{coll} می‌شود.

بررسی انرژی‌های W_1 و W_2 در اشباع مالتی‌پکتینگ نیز نشان می‌دهد که W_1 نقش مهمی در تغییرات پارامترهای مالتی‌پکتینگ از جمله W_{coll} و I_{coll} دارد به طوریکه با افزایش E_{RF0} در اشباع، W_{coll} تغییر نمی‌کند و مقدار آن تقریباً به W_1 میل می‌کند. همچنین نرخ رشد جریان‌های برخوردی نیز با W_1 ارتباط دارد، هر چه مقدار W_1 در SEY های مختلف بیشتر باشد، شیب افزایش جریان‌های برخوردی نسبت به افزایش مقادیر E_{RF0} ، کمتر است.

۶- مراجع

- [1] Buyanova, M., et al. "Influence of secondary emission yield on the saturation properties of multipactor discharges between two parallel metal plates." *Physics of Plasmas* ۱۷.۴(۲۰۱۰): ۰۴۳۵-۰۴۴.
- [2] Semenov, V, et al. "Multipactor suppression in amplitude modulated radio frequency fields." *Physics of Plasmas* ۸.۱۱ (۲۰۰۱): ۵۰۳۴-۵۰۳۹.

- [3] Romanov, G. "Simulation of Multipacting with Space Charge Effect." American Journal of Physics and Applications °.FERMILAB-PUB-۱۷-۳۹۹-TD (۲۰۱۷).
- [4] Mostajeran, M, Nikdoust, A M, "The secondary electron yield in multipactor phenomenon and Python programming." Journal of Research on Many-body Systems ۱۰/۳(۲۰۲۰): ۱۲۲-۱۱۱
- [5] Mostajeran, M, Eden T. T, Ursula v. R. "Uncertainty in the isosceles multipactor threshold of triangularly grooved surfaces based on polynomial chaos." Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment ۹۹۳(۲۰۲۱): ۱۶۵۰۰۱.
- [۶] ۲۰۲۱] مستأجران، م. کاظمی، ف، "شبيه سازى مالتى پکتور تک سطحى در دى الکتريکها با استفاده از کد تک الکترونى"، کنفرانس فيزيک ايران، دانشگاه رازى کرمانشاه، (۱۳۹۹)
- [۷] مستأجران، م. کاظمی، ف، نیکدوست، ع، "شبيه سازى مالتى پکتينگ دى الکتريکها"، کنفرانس فيزيک ايران، دانشگاه تبريز، (۱۳۹۸)
- [۸] مستأجران، م. کاظمی، ف، "بررسى عوامل مؤثر بر مالتى پکتينگ در دى الکتريکها"، کنفرانس فيزيک ايران، دانشگاه صنعتى اصفهان، (۱۴۰۰)

Simulation of Space charge effect in single-sided multipacting phenomenon using CST PIC STUDIO software

¹Mostajeran, Maryam; ¹Kazemi, Firozeh

¹Yazd University, faculty of physics

Abstract

Multipacting which occurs due to high amplification in secondary electrons, is a typical phenomenon in the radiofrequency structures. The Coulomb force between the secondary electrons induces space charge and consequently saturates the multipacting phenomenon. A realistic study of this phenomenon requires considering the effect of space charge. Simulation of the space charge effect by CST PIC STUDIO software is not simply possible and pose some challenges for users. In this paper, it is described how to consider space charge in a single-side multipacting simulation for a simple model. The effect of space charge on the simulation results has been investigated and the threshold of the the radio frequency field amplitude for multipacting occurrence has been obtained.

Key words: Multipacting, Simulation, CST software, Space charge