

A Study on the Physical Characteristics and Development of Plasma Reflectors

F. Sadeghikia^{*}, M. Talafi Noghani, M. R. Dorbin, J. seyedi, A. jabbari

^{*} Aerospace research institute, Iran

(Received: 04/04/2021, Accepted: 14/12/2021)

Abstract

In this paper, the physical characteristics of a plasma reflector are investigated. It is observed that the frequency and angle of the incident electromagnetic waves and also the physical parameters of the plasma affect the characteristics of the plasma reflector. The analytical analysis show that a plasma reflector behaves like a high-pass filter whose cut-off frequency is a function of the plasma frequency and the angle of the incident electromagnetic wave. The amount of loss in this filter can be controlled by the plasma pressure and also the thickness of the reflector. It is possible to turn this filter on and off by energizing/de-energizing the plasma. In the case of the de-energized filter, the electromagnetic waves pass through it with a partial loss. In this research commercial off-the-shelf dielectric tubes which are cheap and available are used to implement the concept, and various feasible arrangements, for the implementation of the reflectors with cylindrical dielectric tubes (equivalent to commercial plasma containers) are investigated. The simulation results show that using two tubular layers perpendicular to each other, is the most efficient structure for the plasma reflector.

Keywords: Plasma Reflector, Reflection Coefficient, Plasma Column, COTS Plasma Tubes

^{*} Corresponding author E-mail: sadeghi_kia@ari.ac.ir

تحلیلی بر مشخصات فیزیکی و پیاده‌سازی بازتابنده‌های پلاسمایی

فاطمه صادقی کیا^{۱*}، محمود تلافی نوغانی^۲، محمدرضا دوربین^۳، جابر سیدی^۴، عبدالرضا جباری^۵

۱-۲- استادیار پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، ۳- دانشجوی دکترا، دانشگاه تهران، ۴ و ۵- پژوهشگر، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۱۵، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۳)

چکیده

در این مقاله، ظرفیت‌ها و مشخصات فیزیکی یک بازتابنده پلاسمایی مورد بررسی قرار می‌گیرد. مشاهده می‌شود که خواص انعکاسی بازتابنده پلاسمایی، تابع مشخصات فیزیکی پلاسما، بسامد موج الکترومغناطیسی و زاویه تابش آن است. نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام شده در این پژوهش نشان می‌دهند که یک بازتابنده پلاسمایی همانند یک فیلتر بالاگذری است که بسامد قطع آن تابع مقدار بسامد پلاسما و زاویه تابش موج الکترومغناطیسی است و مقدار تلفات این فیلتر، با فشار گاز در محیط پلاسما و نیز ضخامت بازتابنده قابل کنترل است. این فیلتر، با تحریک یا عدم تحریک پلاسما، قابلیت خاموش و روشن شدن دارد و در صورت خاموش شدن، امواج الکترومغناطیسی با تلفات جزئی از آن عبور می‌کنند. از آنجا که تحقق رساناهای پلاسمایی با استفاده از لوله‌های دی‌الکتریک تجاری، بسیار رایج و مقرون به‌صرفه است، در این پژوهش، انواع چینش‌های امکان‌پذیر برای پیاده‌سازی این بازتابنده‌ها با لوله‌های دی‌الکتریک استوانه‌ای شکل (مشابه محفظه‌های تجاری پلاسما) بررسی شده و مؤثرترین چینش، که استفاده از دو لایه پلاسمای لوله‌ای شکل عمود بر یکدیگر است، برای تحقق پیشنهاد می‌شود.

کلید واژه‌ها: بازتابنده پلاسمایی، ضریب انعکاس، محفظه تجاری پلاسما

۱- مقدمه

آنها، با استفاده از عوامل تحریک، اشاره نمود [۱۶،۱۰]. در سامانه‌های مخابراتی، از رسانای پلاسمایی، می‌توان به دو صورت تشعشع‌کننده و بازتابنده استفاده نمود. پژوهش‌های متعددی در خصوص استفاده از پلاسما، به‌عنوان تشعشع‌کننده انجام شده است [۱، ۲، ۹، ۱۲ و ۱۶]. این تشعشع‌کننده‌ها دارای مزایای فوق‌العاده‌ای نظیر تنوع بسامد کاری، الگوی تشعشعی و قطبش می‌باشند و با وجود این مزایا، نقاط ضعفی هم دارند که از مهم‌ترین آنها می‌توان به افت راندمان آنها نسبت به تشعشع‌کننده‌های معادل فلزی اشاره نمود. دلیل اصلی این افت راندمان، کاهش قابل توجه مقدار قابلیت هدایت الکتریکی رسانای پلاسمایی نسبت به رسانای فلزی است [۱۷]. در مقابل، بازتابنده‌های پلاسمایی، در بسامدهای کمتر از بسامد پلاسما، می‌توانند جایگزین بسیار مطلوبی برای بازتابنده‌های فلزی محسوب شوند. عمده‌ترین ویژگی بازتابنده‌های پلاسمایی، برخورداری از قابلیت خاموش و روشن شدن و کنترل مقدار هدایت الکتریکی پلاسما هستند. ترکیب تشعشع‌کننده‌های فلزی و بازتابنده‌های پلاسمایی می‌تواند منشأ دستاوردهای شگرفی باشد؛ زیرا با این ساختار، علاوه بر آنکه بازده تشعشعی آنتن مقدار مطلوبی است، آنتن می‌تواند بین دو حالت، بدون بازتابنده و دارای بازتابنده، تغییر وضعیت دهد زیرا عناصر پلاسمایی قابلیت روشن

طی سه دهه اخیر، در سامانه‌های مخابراتی، توجه زیادی به تحقیق و توسعه در زمینه آنتن‌های دارای قابلیت شکل‌پذیری مجدد^۲، با هدف کاهش پیچیدگی سامانه‌های مخابراتی، ایجاد تنوع در الگوی تشعشعی و بسامدکاری آنتن شده است [۱۳، ۱]. با استفاده از آنتن‌های دارای قابلیت شکل‌پذیری مجدد، شرایط استفاده همزمان از یک آنتن برای چند سامانه مختلف مخابراتی فراهم می‌شود. روش‌های مختلفی برای تحقق آنتن‌های دارای قابلیت شکل‌پذیری مجدد وجود دارد. این روش‌ها، عمدتاً مبتنی بر استفاده از مکانیزم سوئیچینگ با سوئیچ‌های نوری، الکتریکی، یا مکانیکی هستند که روش‌هایی نسبتاً پرهزینه محسوب می‌شوند [۸، ۶]. پلاسما، به‌عنوان حالت چهارم ماده، درجه‌ای نوین در جهت تحقق آنتن‌های دارای قابلیت شکل‌پذیری مجدد و قابل تنظیم گشوده است. با استفاده از رساناهای پلاسمایی، هدایت و چرخش الگوی تشعشعی آنتن، با هزینه‌ای مقرون به‌صرفه‌تر و دارای قابلیت‌های بیشتر نسبت به روش‌های رایج، محقق می‌شود [۱۳، ۱۰]. از مهم‌ترین ویژگی‌های رساناهای پلاسمایی نسبت به رساناهای فلزی، می‌توان به قابلیت روشن و خاموش شدن و نیز کنترل مقدار قابلیت هدایت الکتریکی

* رایانامه نویسنده مسئول: sadeghi_kia@ari.ac.ir

^۱ reconfigurable antenna

خاموش شدن دارند. سطوح پلاسمایی دارای این ویژگی هستند که می‌توانند برخی از بسامدهای تابشی را عبور داده و برخی بسامدهای تابشی دیگر را مانند رسانای کامل، بازتاب کنند.

با وجود ظرفیت قابل توجه پلازما برای کاربرد به‌عنوان بازتابنده در سامانه‌های مخابراتی، پژوهش‌های مختصری که در این حوزه گزارش شده‌اند [۳، ۵، ۱۰ و ۱۴]. این پژوهش‌ها عمدتاً مبتنی بر استفاده از این فناوری برای یک کاربرد خاص بوده‌اند و طبق اطلاع نویسندگان، دستورالعمل مشخصی برای تحلیل مشخصات و طراحی یک بازتابنده پلاسمایی در یک بازه بسامدی معین گزارش نشده است. این مقاله، دارای دو هدف اصلی است. هدف اول، تحلیل مشخصات فیزیکی بازتابنده‌های پلاسمایی است. در راستای تحقق این هدف، میزان تأثیر عوامل فیزیکی پلازما و مشخصات موج تابشی بر ضرایب انعکاس بازتابنده در قطبش‌های موازی و عمودی به‌صورت تحلیلی تعیین می‌شوند. با استفاده از این تحلیل‌ها، می‌توان یک بازتابنده پلاسمایی در بازه بسامدی معین طراحی نمود. هدف دوم از این پژوهش، ارائه روشی مناسب و کم‌هزینه برای پیاده‌سازی یک بازتابنده پلاسمایی است.

$$\epsilon_p = \epsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - j\nu)} \right) \quad (1)$$

در این رابطه $\omega_p = 2\pi f_p$ مبین بسامد زاویه‌ای پلازما است و مقدار آن، مطابق رابطه زیر، تابع مقدار چگالی پلازما (n) است [۱۸]:

$$\omega_p = \left[\frac{ne^2}{\epsilon_0 m_e} \right]^{1/2} \quad (2)$$

در این رابطه، m_e و e به ترتیب بیانگر جرم و بار الکترون و ϵ_0 مقدار گذردهی خلأ است. چنانچه پلازما درون محفظه محصور باشد، بسامد برخورد پلازما، طبق رابطه زیر تابع فشار گاز درون محفظه (p) است [۱۸]:

$$\nu(p) = k \cdot p \times 10^9 \quad (Tor^{-1} \cdot Hz) \quad (3)$$

در رابطه بالا، k ضریب ثابتی است که مقدار آن به نوع گاز بستگی دارد. رابطه (۱) نشان می‌دهد که چنانچه بسامد موج تابشی از بسامد پلازما بسیار بزرگ‌تر باشد، مقدار گذردهی الکترونیکی پلازما به‌مقدار گذردهی خلأ نزدیک شده و بنابراین موج تابشی به راحتی از پلازما عبور می‌کند. از طرفی، در بسامدهای پایین‌تر از بسامد پلازما، مقدار گذردهی برابر مقدار منفی بزرگی شده و بنابراین موج تابشی را عبور نداده و از آن منعکس می‌شود.

قابلیت هدایت الکترونیکی پلازما (σ_p) تابع بسامد زاویه‌ای پلازما، بسامد برخورد و نیز مقدار بسامد زاویه‌ای موج تابشی است و به‌صورت زیر بیان می‌شود [۱۸]:

$$\sigma_p = \epsilon_0 \frac{\omega_p^2}{j\omega + \nu} \quad (4)$$

رابطه میان مقدار قابلیت هدایت الکترونیکی پلازما و بسامد موج تابشی از ویژگی‌های منحصر به‌فرد پلازما است که می‌تواند ظرفیت‌های زیادی در حوزه مخابرات فراهم آورد؛ درحالی‌که در رساناهای فلزی مقدار قابلیت هدایت الکترونیکی مقداری ثابت و غیرقابل تغییر است. به‌عنوان مثال، مقدار هدایت الکترونیکی مس، مقداری ثابت و برابر $5/69 \times 10^7$ S/m است.

خاموش شدن دارند. سطوح پلاسمایی دارای این ویژگی هستند که می‌توانند برخی از بسامدهای تابشی را عبور داده و برخی بسامدهای تابشی دیگر را مانند رسانای کامل، بازتاب کنند.

با وجود ظرفیت قابل توجه پلازما برای کاربرد به‌عنوان بازتابنده در سامانه‌های مخابراتی، پژوهش‌های مختصری که در این حوزه گزارش شده‌اند [۳، ۵، ۱۰ و ۱۴]. این پژوهش‌ها عمدتاً مبتنی بر استفاده از این فناوری برای یک کاربرد خاص بوده‌اند و طبق اطلاع نویسندگان، دستورالعمل مشخصی برای تحلیل مشخصات و طراحی یک بازتابنده پلاسمایی در یک بازه بسامدی معین گزارش نشده است. این مقاله، دارای دو هدف اصلی است. هدف اول، تحلیل مشخصات فیزیکی بازتابنده‌های پلاسمایی است. در راستای تحقق این هدف، میزان تأثیر عوامل فیزیکی پلازما و مشخصات موج تابشی بر ضرایب انعکاس بازتابنده در قطبش‌های موازی و عمودی به‌صورت تحلیلی تعیین می‌شوند. با استفاده از این تحلیل‌ها، می‌توان یک بازتابنده پلاسمایی در بازه بسامدی معین طراحی نمود. هدف دوم از این پژوهش، ارائه روشی مناسب و کم‌هزینه برای پیاده‌سازی یک بازتابنده پلاسمایی است.

در راستای تحقق اهداف فوق‌الذکر، به‌عنوان مقدمه ورود به موضوع بازتابنده‌های پلاسمایی، در بخش دوم از مقاله، مشخصات فیزیکی محیط پلازما، معرفی می‌شوند. سپس، در بخش سوم، ابتدا با استفاده از روابط تحلیلی، ضرایب انعکاس بازتابنده پلاسمایی برای امواج با قطبش‌های موازی و عمودی استخراج شده و سپس عوامل تأثیرگذار بر مقدار این ضرایب و میزان تأثیر آنها در فصل چهارم بررسی می‌شوند. انتخاب روشی مناسب و کم‌هزینه برای تحقق یک بازتابنده تیغه‌ای پلاسمایی در بخش پنجم از این مقاله، با استفاده از یک نرم‌افزار تمام موج، مورد بررسی قرار گرفته و بهترین روش برای پیاده‌سازی آن معرفی خواهد شد. در نهایت این مقاله در بخش ششم جمع‌بندی و نتیجه‌گیری خواهد شد.

۲- مشخصات فیزیکی پلازما

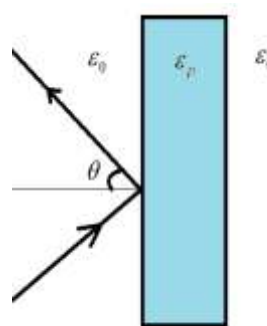
در این بخش، مشخصات فیزیکی پلازما معرفی شده و عوامل اثرگذار بر مقدار گذردهی الکترونیکی و قابلیت هدایت الکترونیکی آن معرفی می‌شوند.

پلازما حالتی از ماده است که در آن ذرات باردار به اندازه کافی انرژی دارند تا به‌جای آنکه همانند مواد معمولی به اتم مقید شوند، آزادانه حرکت کنند. لوله‌های روشنایی فلورسنت و رعد و برق نمونه‌هایی از محیط پلازما هستند. در اثر برخورد امواج الکترومغناطیسی با ذرات باردار پلازما، این ذرات تحت تأثیر نیروی لورنتز قرار می‌گیرند. به‌دلیل آنکه محیط پلازما دارای حامل‌های بار آزاد است، چنانچه تحت تأثیر تحریک حرارتی و یا

۳- ضریب انعکاس بازتابنده تیغه‌ای پلاسمایی

استخراج مشخصات مربوط به عبور یا انعکاس امواج الکترومغناطیسی با بسامدهای مختلف و زوایای تابشی مختلف از یک تیغه پلاسمایی، به صورت تحلیلی و با استفاده از روابط ماکسول، امکان پذیر است. به دلیل اهمیت تعیین رفتار پلازما در چنین شرایطی، در این بخش، تیغه پلاسمایی فاقد هرگونه محافظ و نگهدارنده در نظر گرفته شده است و تأثیر شکل و ساختار محفظه پلاسمایی بر این مشخصات انعکاسی پلازما در بخش آتی انجام خواهد شد.

در شکل (۱)، نمای کلی از یک تیغه پلاسمایی با ضخامت معین نشان داده شده است. در این شکل، امواج از محیط خلأ با مقدار گذردهی ϵ_0 ، با زاویه θ (نسبت به خط عمود بر بازتابنده) به یک صفحه پلاسمایی با ضخامت d و ضریب دی‌الکتریک ϵ_p تابیده می‌شوند و در ادامه، مشخصات مربوط به انعکاس این امواج از صفحه بررسی می‌شوند.



شکل (۱): نمایی از برخورد امواج الکترومغناطیسی به تیغه پلاسمایی.

به طور کلی، معادلات انعکاس (R) برای قطبش‌های عمودی و موازی با میدان الکتریکی، با حل معادلات ماکسول استخراج می‌شوند. با فرض آنکه موجی با زاویه تابش θ از خلأ به صفحه پلاسمایی بتابد، ضرایب بازتاب برای دو تابش عمودی و افقی، که به ترتیب با R_{\perp} و R_{\parallel} نشان داده می‌شوند، به صورت زیر می‌باشند [۱۹]:

$$R_{\perp} = \left(\frac{\frac{\eta_p}{\cos(\theta_p)} - \frac{\eta_0}{\cos(\theta)}}{\frac{\eta_p}{\cos(\theta_p)} + \frac{\eta_0}{\cos(\theta)}} \right) \times \left(\frac{1 - e^{-2j\beta_p d \cos(\theta_p)}}{\frac{\eta_p}{\cos(\theta_p)} - \frac{\eta_0}{\cos(\theta)} - \frac{\eta_p}{\cos(\theta_p)} + \frac{\eta_0}{\cos(\theta)} e^{-2j\beta_p d \cos(\theta_p)}} \right) \quad (5)$$

$$R_{\parallel} = \left(\frac{\eta_p \cos(\theta_p) - \eta_0 \cos(\theta)}{\eta_p \cos(\theta_p) + \eta_0 \cos(\theta)} \right) \times \left(\frac{1 - e^{-2j\beta_p d \cos(\theta_p)}}{1 - \frac{\eta_p \cos(\theta_p) - \eta_0 \cos(\theta)}{\eta_p \cos(\theta_p) + \eta_0 \cos(\theta)} e^{-2j\beta_p d \cos(\theta_p)}} \right) \quad (6)$$

در روابط بالا، η_p امپدانس مشخصه محیط پلازما و η_0 امپدانس ذاتی فضای آزاد است که به صورت زیر با یکدیگر مرتبط می‌شوند:

$$\begin{cases} \eta_p = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_p}} \\ \eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \end{cases} \quad (7)$$

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m مبین مقدار گذردهی مغناطیسی فضای آزاد است. θ_p نماد زاویه عبور موج نسبت به خط قائم در محیط پلازما است و رابطه آن با زاویه تابش (θ) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\sin(\theta_p) = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\epsilon_p}} \sin(\theta) \quad (8)$$

مطابق آنچه در روابط (۵) و (۶) ارائه شده است، ضریب انعکاس از بازتابنده پلاسمایی، تابع زاویه، بسامد و نوع قطبش موج تابیده شده و نیز مقدار بسامد پلازما و بسامد برخورد محیط پلازما است. بررسی میزان تأثیر هرکدام از این عوامل بر مقدار ضریب انعکاس از بازتابنده تیغه‌ای پلاسمایی در بخش بعد ارائه خواهد شد.

ثابت انتشار k در محیط پلازما به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۹]:

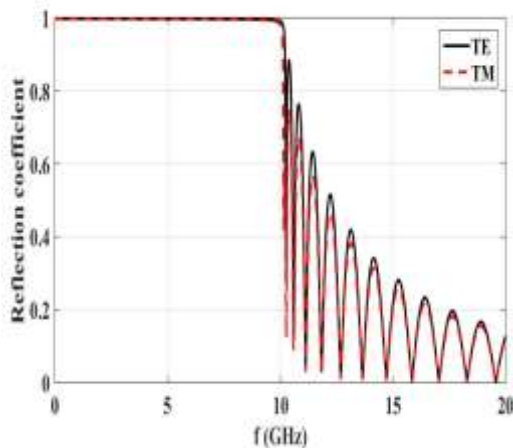
$$k = \omega \sqrt{\epsilon_p \mu} = k_0 \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - j\nu)}} \quad (9)$$

عمق پوستی لایه پلازما (δ) تابع بسامد پلازما و بسامد برخورد است و برای محاسبه آن می‌توان از مقدار ثابت انتشار به صورت زیر استفاده نمود [۱۹]:

$$\delta = \frac{-1}{\text{Im}(k)} \quad (10)$$

عمودی (TE) و زاویه تابش $\theta = 10^\circ$ رسم شده و مقدار آن در شکل (۳) نشان داده شده است.

نتایج حاصل از این تحلیل نشان می‌دهد که بازتابنده تیغه‌ای پلاسمایی، برای امواج تابشی TE و TM، به‌طور یکسان و همانند یک فیلتر بلاگذر رفتار می‌کند و با فرض آنکه معیار قطع فیلتر دامنه ۰/۹ در نظر شود، بسامد قطع این فیلتر حدود ۱۰/۱۵ GHz است. اگر بسامد موج تابشی از بسامد قطع فیلتر کوچک‌تر باشد، مقدار ضریب انعکاس تقریباً برابر با یک خواهد بود و در صورتی که بسامد موج تابشی از بسامد قطع بیشتر باشد، ضریب انعکاس کوچک‌تر شده و نوساناتی در حوزه بسامد ظاهر می‌شوند. به‌علاوه، با افزایش مقدار بسامد موج تابشی، مقدار ضریب انعکاس به‌طور کلی کاهش می‌یابد. از آنجا که وابستگی مقدار ضریب انعکاس به نوع قطبش موج تابشی ناچیز است، در ادامه این پژوهش، ضریب انعکاس قطبش TE مبنای تحلیل قرار می‌گیرد.



شکل (۳): نمودار ضرایب انعکاس بازتابنده تیغه‌ای پلاسمایی مرجع برحسب بسامد موج تابشی.

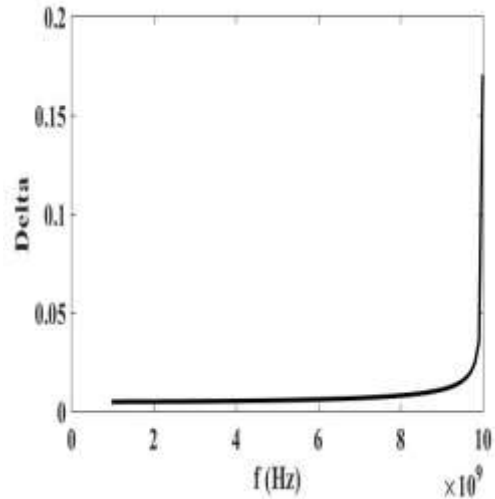
۴-۲- بررسی اثر بسامد پلازما

برای بررسی اثرات بسامد پلازما در بازتابنده تیغه‌ای پلاسمایی، کلیه مؤلفه‌ها، به‌جز مقدار بسامد پلازما، مشابه بازتابنده مرجع در نظر گرفته می‌شوند. شکل (۴) نمودار تغییرات ضریب انعکاس برحسب مقادیر مختلفی از بسامد پلازما را نمایش می‌دهد. نتایج حاصل از این تحلیل نشان می‌دهد که بسامد پلازما عامل اصلی در تعیین بسامد قطع بازتابنده است. به‌عبارت بهتر، بسامد قطع بازتابنده (f_c) متناسب با بسامد پلازما تغییر می‌کند و این تناسب در رابطه (۱۱) نشان داده است:

$$f_c = K f_p \quad (11)$$

که در آن K ضریبی مستقل از مقدار بسامد پلازما است و در بخش‌های بعدی عوامل اثرگذار بر آن معرفی می‌شوند.

چنانچه در تیغه پلاسمایی مقدار بسامد پلازما برابر ۱۰ GHz و بسامد برخورد ۱۰۰ MHz در نظر گرفته شود، مقدار عمق پوستی برحسب فرکانس موج تابشی در شکل (۲) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که عمق نفوذ امواج تابشی با بسامدهای کمتر از بسامد پلازما در محیط پلازما بسیار ناچیز است.



شکل (۲): مقدار عمق پوستی برحسب فرکانس موج تابشی در یک تیغه پلاسمایی.

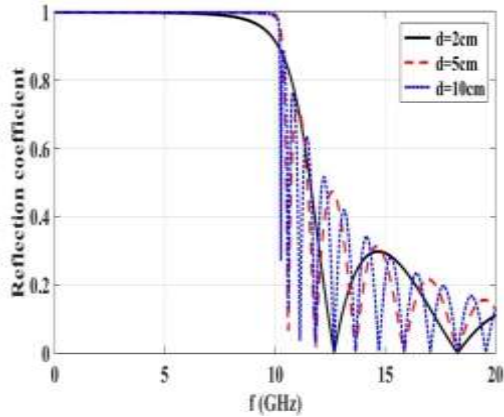
۴- عوامل مؤثر بر ضریب انعکاس بازتابنده پلاسمایی

در این بخش، تأثیر عواملی همچون نوع قطبش امواج الکترومغناطیسی و زاویه تابش آنها، مقدار بسامد پلازما، بسامد برخورد و ضخامت تیغه پلاسمایی بر مقدار ضریب انعکاس یک بازتابنده تیغه‌ای پلاسمایی، به‌صورت تحلیلی، بررسی می‌شوند. برای این منظور، ابتدا، یک بازتابنده پلاسمایی تیغه‌ای به‌عنوان بازتابنده مرجع یا نمونه در نظر گرفته شده و ضرایب انعکاس آن برای قطبش‌های عمودی و موازی استخراج می‌شوند. سپس، اثر هر کدام از عوامل مورد بررسی، به‌صورت مستقل و با فرض ثابت ماندن سایر مؤلفه‌های بازتابنده روی مشخصات انعکاسی بازتابنده ارزیابی و تحلیل می‌شوند.

۴-۱- بازتابنده تیغه‌ای پلاسمایی نمونه

یک بازتابنده پلاسمایی تیغه‌ای با ضخامت ۱۰ cm، که مقدار بسامد پلازما و بسامد برخورد آن به‌ترتیب برابر با $f_p = 10$ GHz و $\nu = 100$ MHz می‌باشند، مشابه آنچه در شکل (۱) نشان داده شده است، به‌عنوان بازتابنده تیغه‌ای پلاسمایی نمونه در نظر گرفته شده است. با استفاده از روابط (۵) و (۶)، نمودار مربوط به ضرایب انعکاس امواج تابشی با قطبش‌های موازی (TM) و

به دلیل رفت و برگشت موج درون صفحه پلازما، مقدار نوسانات در ناحیه گذر بیشتر شده و در عوض، فیلتری تیزتری حاصل خواهد شد.



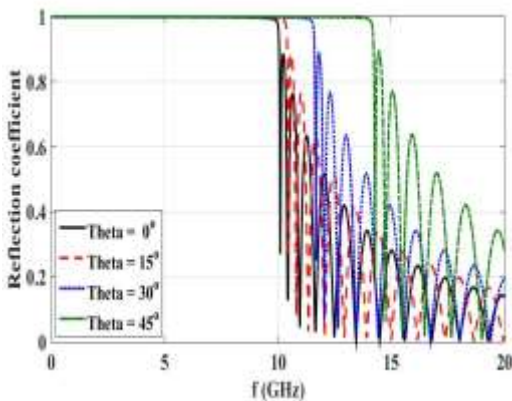
شکل (۶): نمودار ضریب انعکاس بازتابنده پلاسمایی تیغه‌ای برحسب بسامد موج تابشی برای مقادیر مختلف ضخامت بازتابنده.

۴-۵- اثر زاویه تابش امواج

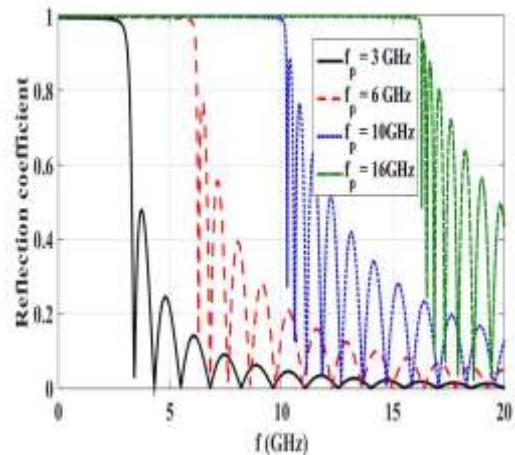
اثر تغییرات زاویه تابشی امواج الکترومغناطیسی بر مقدار ضریب انعکاس بازتابنده پلاسمایی، با فرض ثابت بودن سایر مؤلفه‌ها نسبت به بازتابنده مرجع، در شکل (۷) نشان داده شده است. نتایج حاصل از این تحلیل نشان می‌دهند که زاویه تابش بر مقدار بسامد قطع بازتابنده اثر دارد و با افزایش زاویه تابش، بسامد قطع، افزایش می‌یابد. با استفاده از روابط ضریب انعکاس، بسامد قطع، مطابق رابطه زیر، تابع بسامد پلازما و زاویه تابش خواهد بود و رابطه آن به صورت زیر می‌باشد:

$$f_c = \frac{f_p}{\cos(\theta)} \quad (12)$$

بنابراین، در رابطه (۱۱)، ضریب K تابع زاویه تابش و مقدار آن برابر با $K = 1/\cos(\theta)$ است.



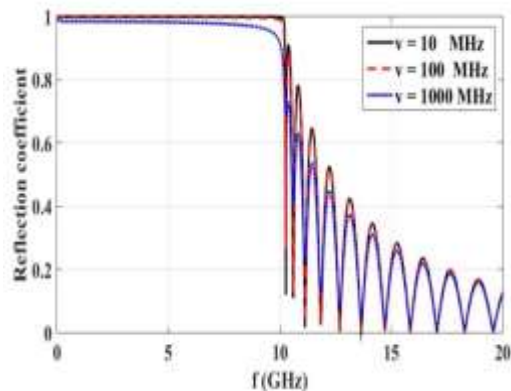
شکل (۷): نمودار ضریب انعکاس بازتابنده پلاسمایی تیغه‌ای برحسب بسامد موج تابشی برای زوایای تابشی مختلف.



شکل (۴): نمودار ضریب انعکاس بازتابنده تیغه‌ای پلاسمایی برحسب بسامد موج تابشی در مقادیر مختلف بسامد پلازما.

۴-۳- بررسی اثر بسامد برخورد

بسامد برخورد پلازما، از مقدار فشار گاز محصور در محفظه تأثیر می‌پذیرد. در شکل (۵)، نتایج حاصل از شبیه‌سازی اثر بسامد برخورد پلازما بین ۱۰ MHz تا ۱۰۰۰ MHz بر مقدار ضریب انعکاس بازتابنده پلاسمایی نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که بسامد برخورد پلازما به منزله تلفات فیلتر است. به عبارت بهتر، با افزایش مقدار بسامد برخورد، ضریب انعکاس در کل باند بسامدی دارای افتی نسبی می‌شود؛ درحالی‌که مقدار آن بر مقدار بسامد قطع فیلتر اثری ندارد.

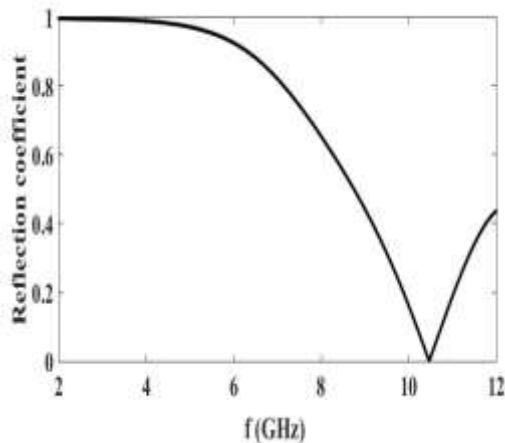


شکل (۵): نمودار ضریب انعکاس بازتابنده تیغه‌ای پلاسمایی برحسب بسامد موج تابشی برای مقادیر مختلف بسامد برخورد.

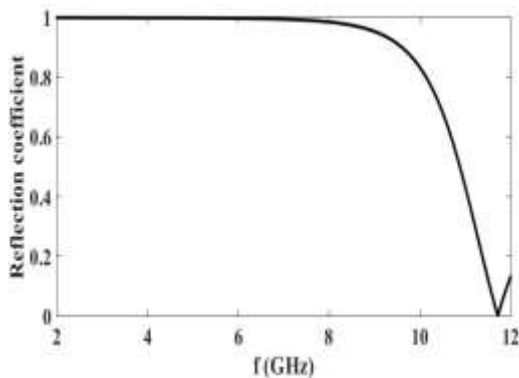
۴-۴- بررسی اثر ضخامت بازتابنده

در این تحلیل، ضخامت تیغه پلاسمایی به عنوان متغیر در نظر گرفته شده و سایر مقادیر مشابه بازتابنده مرجع می‌باشند. در شکل (۶)، نمودار ضریب انعکاس بازتابنده برحسب بسامد تابشی برای مقادیر مختلف ضخامت تیغه نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که هرچه ضخامت بازتابنده پلاسمایی بیشتر باشد،

در این ساختار، مقدار بسامد پلاسما و بسامد برخورد به ترتیب برابر با $f_p = 10 \text{ GHz}$ و $\nu = 100 \text{ MHz}$ می‌باشند. با استفاده از یک نرم‌افزار شبیه‌سازی تمام موج، بسامد قطع بازتابنده شکل (۸) حدود $6/2 \text{ GHz}$ به دست می‌آید؛ این درحالی است که بسامد قطع بازتابنده تیغه‌ای پلاسمایی برابر 10 GHz می‌شود و دلیل اصلی این اختلاف ناشی از تغییرات ثابت عایقی درون محیط بازتابنده است. شبیه‌سازی شکل (۸) و سایر ساختارهای مشابه، با استفاده از تحلیل فرکانسی در یک نرم‌افزار تمام موج و با استفاده از شرایط مرزی متناوب انجام می‌شود. در این شبیه‌سازی، از شرایط مرزی unit cell استفاده می‌شود [۲۰] و با تعریف بخش تکرار شونده برای نرم افزار، ساختار در دو جهت x , y متناوب در نظر گرفته می‌شود. به عبارت بهتر، این ساختار در نرم افزار در دو جهت x , y تا بی‌نهایت ادامه پیدا می‌کند. برای تحریک، دو مود اول $(\text{TE}(0,0))$ و $(\text{TM}(0,0))$ تعریف می‌شوند که برای حالات میدان الکتریکی موازی و عمود بر میله‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.



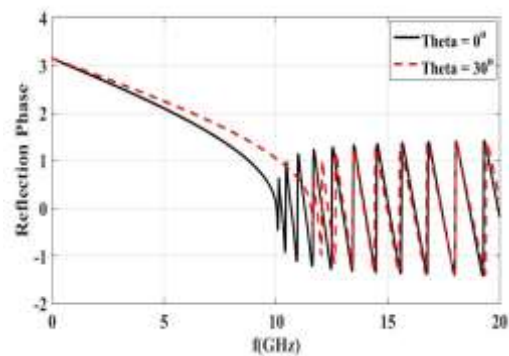
شکل (۱۰): ضریب انعکاس بازتابنده پلاسمایی با استفاده از یک ردیف محفظه پلاسمایی استوانه‌ای با بسامد پلاسمای 10 GHz .



شکل (۱۱): ضریب انعکاس بازتابنده پلاسمایی با استفاده از یک ردیف محفظه پلاسمایی استوانه‌ای با بسامد پلاسمای 15 GHz .

به منظور بررسی دقیق‌تر اثرات زاویه تابش بر مقدار فاز موج منعکس شده از بازتابنده پلاسمایی (φ_{ref})، در شکل (۸) مقدار فاز انعکاسی، بر حسب بسامد موج تابشی، برای مقادیر مختلف زوایای تابش نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که، برخلاف بازتابنده‌های فلزی که موج را با فاز 180° درجه بازتاب می‌دهند، در بازتابنده پلاسمایی، فاز موج بازتاب شده از پلاسما تابع مقدار بسامد موج تابشی است. این نکته، در طراحی یک بازتابنده پلاسمایی بسیار پراهمیت است و بنابراین، ضروری است مقدار آن تخمین زده شود. مقدار تخمینی فاز موج بازتابی با رابطه زیر بیان می‌شود.

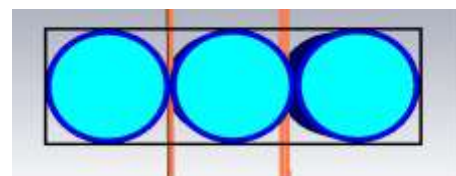
$$\varphi_{ref} = \pi - \frac{f \pi}{f_c} \quad (13)$$



شکل (۸): نمودار فاز موج منعکس شده از بازتابنده پلاسمایی تیغه‌ای برای دو زاویه تابش متفاوت.

۴-۶- اثر هندسه بازتابنده بر مشخصات انعکاسی

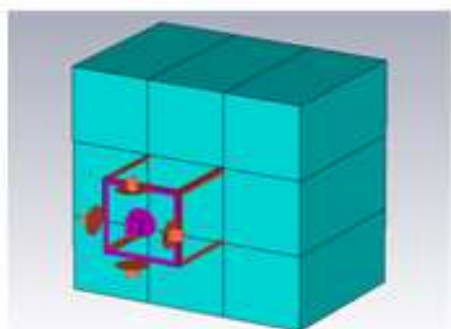
از آنجا که تحقق یک تیغه پلاسمایی بدون استفاده از یک محفظه محصورکننده پلاسما امکان‌پذیر نیست، ضروریست تأثیر هندسه بازتابنده بر مشخصات انعکاسی آن بررسی شود. در این راستا، در این بخش، با در مجاورت هم قرار دادن مجموعه‌ای از محفظه‌های استوانه‌ای شکل پلاسمایی با قطر داخلی $r = 20 \text{ mm}$ ، یک بازتابنده پلاسمایی مطابق شکل (۸)، ایجاد نموده و مشخصات انعکاسی این بازتابنده با بازتابنده پلاسمایی تیغه‌ای با ضخامت 20 mm مقایسه می‌شود. محفظه‌های استوانه‌ای شکل دارای یک لایه محافظ با مقدار ثابت عایقی $\epsilon_r = 4/2$ و ضخامت $t = 1 \text{ mm}$ هستند.



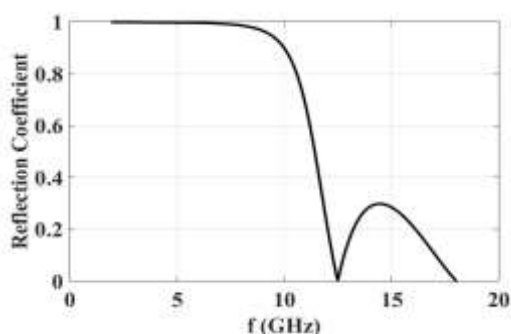
شکل (۹): ساختار بازتابنده پلاسمایی با استفاده از یک ردیف محفظه پلاسمایی استوانه‌ای با بسامد پلاسمای 10 GHz .

آن است که موج تابشی به‌صورت قائم به بازتابنده با ضخامت 20 mm می‌تابد.

همان‌طور که بیان شد، تحقق یک بازتابنده پلاسمایی تیغه‌ای، به‌صورتیکه بسامد پلازما در سرتاسر بازتابنده ثابت باشد، با سهولت و صرفه اقتصادی همراه نیست درحالی‌که تولید بسامد پلاسمای ثابت در یک لوله‌های نازک پلاسمایی تجاری بسیار ساده‌تر است. با این وجود، ملاحظات زیادی در استفاده از ترکیب این لوله‌های تجاری برای شکل‌دهی به بازتابنده وجود دارد. بنابراین، در این بخش، ساختارهای مختلف تحقق یک بازتابنده پلاسمایی تیغه‌ای، با استفاده از محفظه‌های لوله‌ای شکل تجاری، بررسی شده و مناسب‌ترین ساختار که رفتاری متناسب با یک بازتابنده تیغه‌ای دارد معرفی می‌شود. شبیه‌سازی بازتابنده‌هایی که در این فصل با محفظه‌های استوانه‌ای شکل محقق می‌شوند با استفاده از حل فرکانسی ساختار در یک نرم افزار تمام موج تجاری انجام می‌شود و نحوه شبیه‌سازی آن در بخش قبل تشریح شد.



(الف)



(ب)

شکل (۱۲) - (الف): ساختار یک بازتابنده پلاسمایی ایده‌آل برای بسامد قطع 10 GHz (ب) پاسخ انعکاسی بازتابنده.

در شکل (۱۳)، اولین و ساده‌ترین ساختار یک بازتابنده پلاسمایی تیغه‌ای، با استفاده از محفظه‌های پلاسمای تجاری نازک، نشان داده شده است. هر محفظه دارای قطر 20 mm ، ضخامت 1 mm و قابلیت گذردهی $4/2$ است. بسامد پلازما در هر

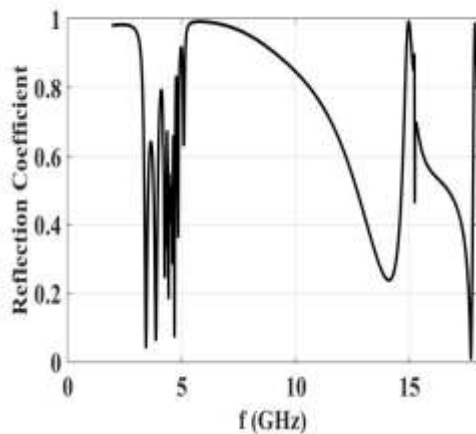
با طراحی و انتخاب مقدار مناسبی از فرکانس پلازما در محفظه‌های استوانه‌ای شکل، می‌توان تغییر بسامد قطع آنها را نسبت به یک بازتابنده تیغه‌ای پلاسمایی جبران نمود. به‌عنوان مثال، برای آن که بسامد قطع بازتابنده شکل (۸) مقدار 10 GHz باشد، می‌توان مقدار بسامد پلاسمای هر محفظه استوانه‌ای شکل را حدود 15 GHz لحاظ نمود. شکل (۱۰) نتایج حاصل از شبیه‌سازی مشخصات انعکاسی ساختار ارائه شده در شکل (۸)، زمانی که بسامد پلازما در هر محفظه 15 GHz است را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود بسامد قطع در بازتابنده حاصل حدود $9/7\text{ GHz}$ است که به مقدار مطلوب نزدیک شده است. بنابراین، تغییرات مشخصات انعکاسی بازتابنده به‌دلیل استفاده از محفظه‌های استوانه‌ای، با افزایش بسامد پلازما قابل جبران خواهد بود. به علاوه، هرچه ثابت عایقی محفظه و ضخامت آن بیشتر باشد، بسامد قطع کوچکتر می‌شود. اعتبارسنجی نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌ها با محاسبه میانگین ثابت عایقی در محیط بازتابنده و صفر در نظر گرفتن مقدار آن در بسامد قطع امکان‌پذیر است.

۵- پیاده‌سازی بازتابنده پلاسمایی

انتخاب روش تحقق بازتابنده، از مهم‌ترین گلوگاه‌های طراحی یک بازتابنده پلاسمایی است. در این بخش، ساختارهای قابل تحقق برای یک بازتابنده پلاسمایی تیغه‌ای معرفی شده و ساده‌ترین و کم‌هزینه‌ترین ساختار برای این کار پیشنهاد خواهد شد.

از آنجا که رساناهای پلاسمایی، عموماً گازی شکل هستند، استفاده از یک محفظه دی‌الکتریک برای محصور کردن گاز اجتناب‌ناپذیر است. ساخت محفظه دی‌الکتریک به شکل‌های متنوع و مطلوب معمولاً امکان‌پذیر است. با این وجود، تنظیم فشار گاز درون محفظه و نیز انتخاب روش مناسب و اقتصادی برای یونیزاسیون و تحریک پلازما، برای رسیدن به یک بسامد پلاسمای مشخص، کار نسبتاً دشواری و پیچیده‌ای است. چنانچه امکان ساخت و تحریک یک بازتابنده پلاسمایی تیغه‌ای با ضخامت کم و بسامد پلاسمای ثابت در سرتاسر تیغه فراهم باشد، پاسخ انعکاسی چنین بازتابنده‌ای یک پاسخ ایده‌آل خواهد بود. بنابراین، در این مقاله، مشخصات انعکاسی بازتابنده پلاسمایی تیغه‌ای مرجع، به‌عنوان مشخصات ایده‌آل در نظر گرفته شده و سایر ساختارهای پیشنهادی با آن مقایسه می‌شوند.

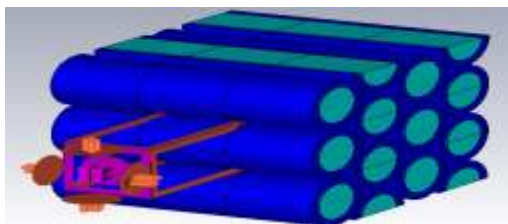
در شکل (۱۲)، ساختار بازتابنده پلاسمایی تیغه‌ای ایده‌آل با بسامد قطع 10 GHz و پاسخ انعکاسی آن، که از شبیه‌سازی در یک نرم‌افزار تجاری تمام موج حاصل می‌شود، نشان داده شده است. مشخصات فیزیکی این بازتابنده مشابه مشخصات بازتابنده مرجع در همین مقاله است و تنها تفاوت آن با بازتابنده مرجع در



(ب)

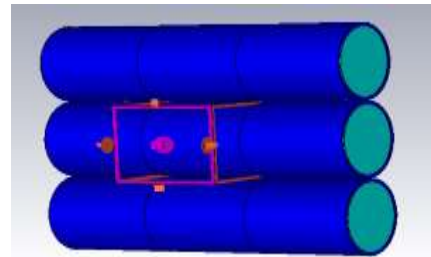
شکل (۱۴): ضرایب انعکاس اولین ساختار پیشنهادی در: (الف) قطبش موازی، (ب) قطبش عمودی.

به منظور رفع اشکالات اولین ساختار، دومین ساختار به صورتی چیدمان شد که در آن، مطابق شکل (۱۵)، از چند لایه لوله افقی استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی ضرایب انعکاس این ساختار برای قطبش‌های موازی و عمودی در شکل (۱۶) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که افزایش تعداد لایه‌ها، بهبودی در ضرایب انعکاس، نسبت به اولین ساختار، ایجاد نمی‌کند و همان مشکلات همچنان برقرار است. به نظر می‌رسد استفاده از چینش عمودی لوله‌های پلاسمایی در مجاورت لوله‌های افقی، بتواند اصلاح مناسبی بر پاسخ انعکاسی بازتابنده ایجاد نماید. بنابراین، در سومین ساختار مورد بررسی، مطابق آنچه در شکل (۱۷) نشان داده شده است، از یک لایه لوله، به صورت عمود بر لایه قبلی، استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی ضرایب انعکاس این ساختار، برای دو قطبش موازی و عمودی، در شکل (۱۸) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با این ساختار، نقاط ضعف دو ساختار قبلی برطرف شده و پاسخ انعکاسی حاصل، با پاسخ یک بازتابنده ایده‌آل، در هر دو قطبش، شباهت زیادی دارد. به نظر می‌رسد استفاده از دو لایه لوله پلاسمایی با چینش‌های افقی و عمودی، به لحاظ مشخصات ضریب انعکاس، بیشترین شباهت را به یک تیغه پلاسمایی دارد.

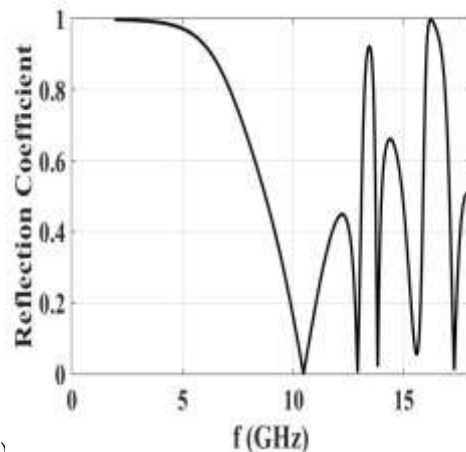


شکل (۱۵): ساختار بازتابنده پلاسمایی تیغه‌ای با افزایش تعداد لایه‌های لوله‌های افقی.

محفظه مقداری ثابت و برابر ۱۰ GHz و بسامد برخورد آن ۱۰۰ MHz است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی پاسخ انعکاسی اولین ساختار پیشنهادی، برای دو حالت TE و TM در شکل (۱۴) نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهند که بسامد قطع اولین ساختار پیشنهادی، همان‌طور که در بخش قبل نیز بیان شد، در حالت قطبش موازی به مقداری حدود ۶/۲ GHz کاهش یافته و محدوده قطع بازتابنده وسیع‌تر شده است؛ زیرا موج تابیده شده به این سطح، با قابلیت گذردهی معادل هوا و محفظه مواجه می‌شود و در نتیجه، مقدار قابلیت گذردهی کل، افزایش یافته و سبب کاهش بسامد قطع بازتابنده می‌شود. جبران این شیفت بسامدی مستلزم آن است که مقدار قابلیت گذردهی پلاسمای اصلاح (منفی‌تر) شود و این بدان معناست که مقدار بسامد پلاسمای در محفظه‌های استوانه‌ای باید افزایش یابد. با این وجود، نتیجه در قطبش عمودی، هیچ شباهتی با مقدار ضریب انعکاس ساختار ایده‌آل ندارد و نشان می‌دهد که امواج الکترومغناطیسی بسامدهای پایین که دارای قطبش عمودی هستند، به سهولت، از این ساختار عبور می‌کنند؛ زیرا در این ساختار، میدان الکتریکی بر لوله‌های پلاسمای عمود هستند و مشکل اصلی در چنین حالتی وجود محفظه دی‌الکتریک بین لوله‌هاست و تنها راه بهبود پاسخ، حذف فاصله فیزیکی بین دو ستون پلاسماست.



شکل (۱۶): اولین ساختار پیشنهادی برای بازتابنده پلاسمایی تیغه‌ای.



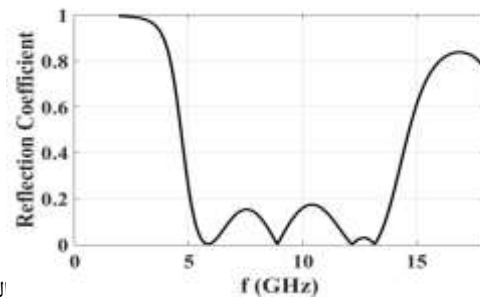
(الف)

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

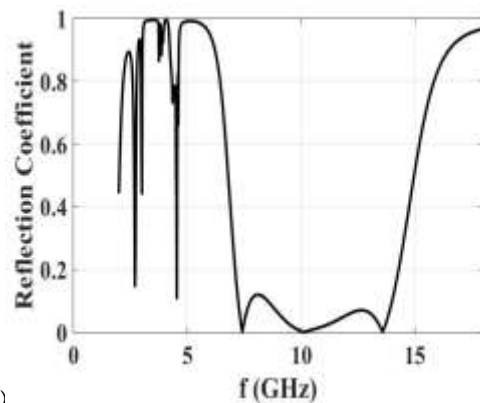
در این مقاله، مشخصات انعکاسی بازتابنده پلاسمایی تیغه‌ای و عوامل مؤثر بر مقدار ضریب انعکاس این بازتابنده تشریح شده است. نتایج حاصل از تحلیل‌ها نشان داده‌اند که بازتابنده‌های پلاسمایی دارای قابلیت بسامد‌گزینی هستند و عملکرد آنها مشابه یک فیلتر بالاگذر است. بسامد قطع بازتابنده پلاسمایی، با مقدار بسامد پلاسما و نیز معکوس مقدار کسینوس زاویه تابش موج الکترومغناطیسی نسبت به محور عمود بر بازتابنده متناسب است. هرچه مقدار بسامد پلاسما بیشتر باشد، بسامد قطع بازتابنده نیز بیشتر می‌شود. بسامد برخورد پلاسما، که تابع فشار گاز درون محفظه است، مبین مقدار تلفات بازتابنده در باند عبور است و بنابراین کاهش بسامد برخورد سبب کاهش تلفات بازتابنده می‌شود. به‌علاوه، افزایش ضخامت بازتابنده سبب تیزتر شدن پاسخ بسامدی بازتابنده و افزایش تعداد نوسانات در باند گذر می‌شود. به‌منظور کاهش هزینه‌ها و سهولت پیاده‌سازی بازتابنده‌های پلاسمایی، استفاده از لوله‌های تجاری پلاسما به‌جای یک سطح پلاسمای همگن، مورد تحلیل و شبیه‌سازی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که بهترین راه تحقق این بازتابنده‌ها، استفاده از دو ردیف عمود برهم از محفظه‌های لوله‌ای شکل پلاسما است. در این حالت، مشخصات بازتابنده حاصل با مشخصات یک بازتابنده ایده‌آل مطابقت بیشتری پیدا می‌کند.

۷- مراجع

- [1] M. Tohidlo, S. M. Hashemi, and F. Sadeghikia, "The Effect of AC Excitation Frequency and Waveform on U-Shaped Monopole Plasma Antenna," *Journal of Radar*, vol. 7, no. 2, pp. 89-95, 2019 (in persian).
- [2] F. Sadeghikia, M. R. Dorbin, A. K. Horestani, M. T. Noghani, and H. Ja'afar, "Tunable inverted F antenna using plasma technologies," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 4, pp.702-706, Apr. 2019.
- [3] H. Ja'afar, M. T. B. Ali, A. N. B. Dagang, H. M. Zali, and N. A. Halili, "A reconfigurable monopole antenna with fluorescent tubes using plasma windowing concepts for 4.9-GHz application," *IEEE Transaction on Plasma Science*, vol. 43, no. 3, pp. 815-820, March 2015.
- [4] I. Alexeff, T. Anderson, S. Parameswaran, E. P. Pradeep, J. Hulloli, and P. Hulloli, "Experimental and theoretical results with plasma antennas," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 34, no.2, pp.166-172, Apr. 2006.
- [5] M. T. Jusoh, O. Lafond, F. Colombel, and M. Himdi, "Performance and radiation patterns of a reconfigurable plasma corner-reflector antenna," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, pp. 1137-1140, Sep. 2013.
- [6] X. Yuan, Z. Li, D. Rodrigo, H. Mopidevi, O. Kaynar, L. Jofre, and B. Cetiner, "A parasitic layer-based reconfigurable antenna design by multi-objective optimization," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 6, pp. 2690-2701, June 2012.

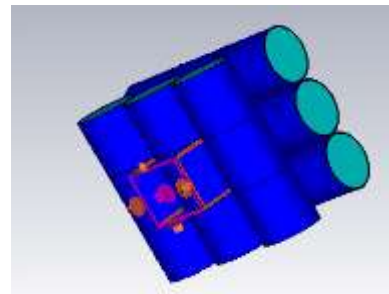


(الف)

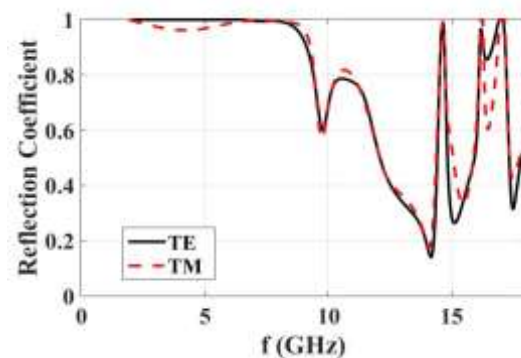


(ب)

شکل (۱۶): مقدار ضریب انعکاس شکل (۱۵) : (الف) در قطبش موازی، (ب) در قطبش عمودی.



شکل (۱۷): تحقق ساختار بازتابنده پلاسمایی تیغه‌ای با استفاده از لوله‌های افقی و عمودی.



شکل (۱۸): مقدار ضرایب انعکاس ساختار شکل (۱۷) برای دو قطبش عمودی و موازی.

- [14] F. Sadeghikia, F. Hodjat-Kashani, J. Rashed-Mohassel, A. A. Lotfi, and J. Ghayoomeh-Bozorgi, "Ayagi-uda plasma monopole array," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2012; 26: 885-894.
- [15] F. Sadeghikia, F. Hodjat-Kashani, J. Rashed-Mohassel, and J. Ghayoomeh-Bozorgi, "Characterization of a surface wave driven plasma monopole antenna," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*; vol.26: no. 2, pp. 239-250, 2012.
- [16] F. Sadeghikia, H. Mahdikia, M. R. Dorbin, M. T. N. oghani, A. K. Horestani, and H. Ja'afar, "A Study on the Effect of Gas Pressure and Excitation Frequency of a Cylindrical Plasma Antenna on its Radiation Efficiency," 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Poland, March 2019.
- [17] M. Moisan and H. Nowakowska, "Contribution of surface-wave (SW) sustained plasma columns to the modeling of RF and microwave discharges with new insight into some of their features. A survey of other types of SW discharges," *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 27, no. 7, Jul. 2018.
- [18] Anderson, Theodore. *Plasma antennas*. Artech House, 2011.
- [19] D. K. Cheng, "Field and Wave Electromagnetics," Pearson Education India, 1989.
- [20] N. Engheta, R. W. Ziolkowski, "Metamaterials: Physics and Engineering Explorations," Wiley-IEEE Press, 2006.
- [7] C. Plapous, J. Cheng, E. Taillefer, A. Hirata, and T. Ohira, "Reactance domain music algorithm for electronically steerable parasitic array radiator," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 52, no. 12, pp. 3257-3264, Dec 2004.
- [8] N. Fourikis, *Phased Array-Based Systems and Applications*. Newyork: Wiley, 1997.
- [9] F. Sadeghikia, M. T. Noghani, and M. Simard, "Experimental study on the surface wave driven plasma antenna," *AEU Int. J. Electron. Commun.*, vol. 70, pp. 652-656, May 2016.
- [10] M. T. Jusoh, O. Lafond, F. Colombel, and M. Himdi, "Performance of a reconfigurable reflector antenna with scanning capability using low-cost plasma elements," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 55, no. 12, pp. 2869-2874, Dec. 2013.
- [11] O. A. Barro, O. Lafond, and H. Himdi, "Reconfigurable antennas radiations using plasma Faraday cage," in *Proc. Int. Conf. on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, Sept. 2015.
- [12] F. Sadeghikia, M. R. Dorbin, A. K. Horestani, M. T. Noghani, and H. Ja'afar, "Multi-beam frequency tunable antenna based on plasma-nested helix," in *Proc. 13th European conference on antennas and propagation (EuCAP)*, 31 March-5 Apr. 2019.
- [13] F. Sadeghikia, M. Valipour, M. T. Noghani, H. Ja'afar, and A.K. Horestani, "3D Beam Steering End-Fire Helical Antenna with Beamwidth Control Using Plasma Reflectors," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Oct. 2020.