بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰

طراحی و ساخت آنتن پلاسمایی با قابلیت تغییر فرکانس پلاسمایی

مهدی مختاری پر، رحیم نادرعلی

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ایران

r.naderali@urmia.ac.ir , mahdi.mokhtarypar@gmail.com

چکیده – در این مقاله به طراحی و ساخت آنتن پلاسمایی بر پایه لامپ فلورسنت پرداخته شده و با محاسبه فرکانس پلاسمایی محیط کار آنتن، رفتار آن برحسب سایر متغیرهای فیزیکی بررسی می‌شود. با محاسبه رسانایی ویژه پلاسما و تغییرات آن بر حسب توان ورودی که توسط سیستم طراحی شده بر حسب بالاست متغیر و دیمر قابل کنترل می‌باشد، امکان بررسی کارکرد این نوع آنتن در بازه فرکانسی VHF فراهم شده است. با محاسبه تابع فرکانس پلاسمایی برحسب شدت جریان عبوری، خواص بازتاب، جذب و عبور امواج الکترومغناطیسی از پلاسما بررسی شده و مشخص شد که ناحیه عملکرد پلاسمای مد نظر به عنوان آنتن، در بازه زیر ۱/۷۷ GHz قرار دارد. سیستم طراحی شده نهایتاً جریان عبوری در حدود ۰/۵(A) را پشتیبانی می کند و با به وجود آمدن رسانایی ویژه در حدود ۷($\frac{\mho}{m}$) ، آنتن پلاسمایی کارکرد قابل قبولی در بازه امواج رادیویی با مدولاسون فرکانسی از خود نشان می دهد.

کلید واژه- آنتن پلاسمایی، امواج الکترومغناطیسی، فرکانس پلاسمایی، لامپ فلورسنت، یونش ضربه ای

Design and fabrication of plasma antenna with the ability to change the plasma frequency

Mahdi Mokhtari par , Rahim Naderali

Department of Physics, Faculty of Science, Urmia University, Iran

mahdi.mokhtarypar@gmail.com , r.naderali@urmia.ac.ir

Abstract: In this paper, the design and fabrication of plasma antenna based on fluorescent lamps are discussed. Calculation of ambient plasma frequency and study of its behavior in terms of other physical variables is on the agenda and by calculating the specific conductivity of the plasma and its changes according to the input power designed by the system in terms of variable ballast and controllable dimmer it is possible to check the function of this type antenna in the VHF frequency range. By calculating the plasma frequency function in terms of current intensity, the properties of reflection, absorption and transmission of electromagnetic waves from the plasma were investigated and it was found that the operating range of the plasma considered as an antenna is in the range below ۱,۷۷ GHz. The designed system ultimately supports a transient current in the range of ۰,۵(A), and with the emergence of specific conductivity of about ۷($\frac{\mho}{m}$), the plasma antenna exhibits acceptable in the range of radio waves with the frequency Modulation.

Keyword: Electromagnetic waves, Fluorescent lamp, Impact ionization, Plasma antenna, Plasma frequency.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30]

مقدمه

آنتن پلاسمایی نسل جدیدی از آنتن‌ها می‌باشد که برخلاف آنتن‌های رایج که از محیط رسانای فلزی برای شتاب دادن الکترون‌ها و در نتیجه دریافت و انتقال اطلاعات در قالب امواج الکترومغناطیسی استفاده می‌کنند، از یک محیط یونیده که در شرایط خاصی پلاسما نامیده می‌شود بهره می‌برد. یونیزاسیون محیط دی الکتریک که آزاد شدن الکترون‌های ثانویه را در پی دارد سبب به وجود آمدن رسانش الکتریکی و بروز رفتارهای فلز مانند در محیط می‌شود، به همین دلیل چنین محیط‌هایی از لحاظ فیزیکی در بازه‌های فرکانسی مشخص توانایی عملکرد به عنوان آنتن را داشته و می‌توانند جایگزین مناسبی برای آنتن‌های رایج فلزی باشند. این نوع آنتن‌ها عموماً از یک ستون پلاسمای پایدار که در آن توان الکتریکی اعمالی به محیط سبب یونیزاسیون گاز نجیب درون محفظه دی‌الکتریک در فشار کم و جبران اتلاف حاصل از پخش و بازترکیب می‌شود، تشکیل شده است. تفاوت اصلی ساختار آنتن پلاسمایی با آنتن‌های معمولی در ضرورت وجود سیگنال تحریک می‌باشد[۱]. به عبارت دیگر محیط مد نظر برای رسانا شدن نیازمند اعمال توان است. روش تخلیه الکتریکی به دلیل دسترسی آسان و مصرف انرژی کمتر به عنوان روشی مناسب برای دستیابی به محیط پلاسمایی انتخاب شده‌است

۱- تئوری و پارامترها

امواج الکترومغناطیسی با رسیدن به مرز محیط پلاسما دچار سه حالت قطع، عبور و جذب می شوند، که این سه حالت به ارتباط بین فرکانس موج فرودی و فرکانس پلاسمایی محیط بستگی دارند. فرکانس پلاسمایی که گویای نوسانات ذرات باردار در میدان‌های الکتریکی موضعی درون پلاسما می‌باشد از رابطه زیر به دست می‌آید[۲]:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_p\, e^2}{\epsilon_\circ\, m_e}} \qquad (۱)$$

که در آن n_p چگالی الکترونی مختل نشده پلاسما می‌باشد. با توجه به رفتار موج الکترومغناطیسی فرودی بر پلاسما، ضرایب بازتاب و عبور از روابط زیر به دست می‌آیند[۳]:

$$\begin{cases} r = \frac{k-k_p}{k+k_p} \\ t = \frac{2k}{k+k_p} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} r = \frac{\omega-\sqrt{\omega^2-\omega_p^2}}{\omega+\sqrt{\omega^2-\omega_p^2}} \\ t = \frac{2k}{\omega+\sqrt{\omega^2-\omega_p^2}} \end{cases} \qquad (۲)$$

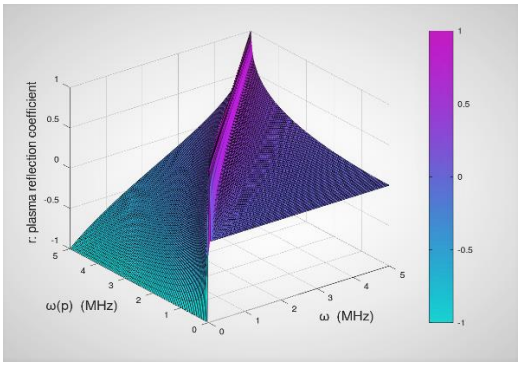
که در آن k و k_p اندازه بردار انتشار موج در محیط خارج و درون پلاسما می باشد ($|\vec{k}| \equiv k$). با استفاده از معادله پاشندگی امواج الکترومغناطیسی در پلاسما، رابطه زیر به ضرایب به دست آمده اعمال شده است[۲]:

$$\omega^2 = \omega_p^2 + c^2 k_p^{\,2} \Rightarrow k_p = \frac{\sqrt{\omega^2-\omega_p^2}}{c} \qquad (۳)$$

که در آن ω فرکانس موج فرودی می باشد. با توجه به روابط (۲)، در بازه $\omega \ll \omega_p$ پلاسما برای موج فرودی مانند فلز ایده‌آل عمل می‌کند:

$$\omega \ll \omega_p \Rightarrow \begin{cases} t \to \circ \\ r \to -1 \end{cases} \qquad (۴)$$

در این حالت مانند فلزات، موج‌فرودی توانایی عبور از پلاسما را نداشته و با مقداری جذب، با اختلاف فاز π از سطح پلاسما بازتاب می‌شود. به همین دلیل ناحیه عملکرد آنتنی پلاسما در بازه‌فرکانسی کمتر از ω_p قرار دارد. با رسم نمودار ضریب‌بازتاب در معادله(۲) این ناحیه مشخص می‌شود:



شکل۱: ضریب بازتاب موج الکترومغناطیسی از سطح پلاسما تابعی از فرکانس موج فرودی و فرکانس پلاسمایی محیط می‌باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30]

۲- محاسبه فرکانس پلاسمایی لامپ فلورسنت

ابتدا با حل معادله لاپلاس تابع پتانسیل الکتریکی بین کاتد و آند با شرط مرزی $\Delta V = ۶۷.۴(v)$ را به دست می‌آوریم که در آن L فاصله دو الکترود و z فاصله از آند می‌باشد:

$$v(z) = \pm ۱۳۳.۷۳۰\ z\ \ (v) \qquad (۵)$$

$$w = \int_{.}^{L} -\frac{\partial}{\partial z}[q\ v(z)]\ dz \qquad (۶)$$

با توجه به انرژی یونشی $۱۵/۷۷(ev)$ اتم آرگون، مسافتی که اکترون‌ها پس از گسیل از کاتد به این انرژی دست یافته و سبب یونش می‌شوند را از رابطه (۶) حساب می‌کنیم:

$$\Delta z' = ۰.۱۱۷\ (m) \qquad (۷)$$

به این ترتیب میانگین سرعت الکترون‌های حامل جریان در پلاسما مشخص می‌شود:

$$\overline{KE_e} = \frac{۱}{\Delta z'}\int_{L-\Delta z'}^{L}[q\ v(z)]\ dz \qquad (۸)$$

$$\bar{v}_e = \sqrt{\frac{۲\ \overline{KE_e}}{m_e}} = ٤.۵۹ \times ۱۰^{٦}\ (\frac{m}{s}) \qquad (۹)$$

می‌توان به وسیله مدت زمانی که طول می‌کشد الکترون‌های حامل جریان فاصله بین کاتد تا آند را طی کنند(Δt) و اندازگیری شدت جریان عبوری، تعداد ثابتی از الکترون‌های حامل‌جریان که همواره درون لامپ قراردارند را محاسبه‌کرد:

$$\begin{cases}\Delta t = \frac{L}{\bar{v}_e} = ۱.۰۹۷ \times ۱۰^{-۷}\ (s) \\ I = ۰.۲۸\ (A)\end{cases} \qquad (۱۰)$$

$$N_{e1} = ۱.۹۱٦ \times ۱۰^{+۱۱}\ \ (electron) \qquad (۱۱)$$

N_{e1} تعداد ثابت الکترون‌های حامل جریان موجود درون پلاسما می‌باشد. به همین ترتیب با توجه به نقش کنترل کنندگی بالاست در رشد پدیده یونش بهمنی، می‌توان به کمک تفکیک انرژی مصرفی در مراحل توان مصرفی لامپ فلورسنت، تعداد ثابت الکترون‌های ثانویه یونشی پلاسما(N_{e2}) را نیز محاسبه کرد، به صورت میانگین حدود ۲۰/۲۷ درصد از توان ورودی صرف یونش اتم های آرگون می‌شود[۴]. با توجه به انرژی یونش اتم آرگون، تعداد ثابت الکترون‌های ثانویه در مدت زمان Δt درون لامپ فلورسنت $۲۰(w)$ به دست می‌آید:

$$N_{e2} = \frac{\Delta t\ p_{ion_{[Ar]}}}{U_{Ar}} = ۱.٦۷۳ \times ۱۰^{+۱۱} \qquad (۱۲)$$

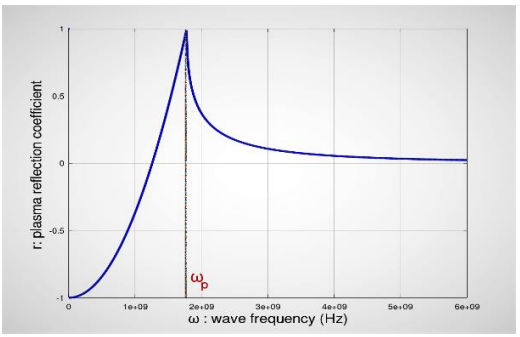
$$N_{e_{(total)}} = N_{e1} + N_{e2} = ۳.۵۹ \times ۱۰^{+۱۱} (۱۳)$$

به این ترتیب چگالی الکترونی و در نتیجه فرکانس پلاسمایی محیط به دست می آید که در آن v_{lamp} حجم داخلی محفظه دی‌الکتریک لامپ فلورسنت می‌باشد:

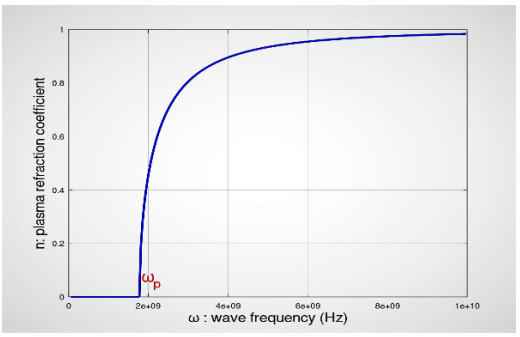
$$n_p = \frac{N_{e(total)}}{v_{lamp}} = ۹.۹۰۸ \times ۱۰^{+۱٤}\ (\frac{۱}{m^{۳}}) \qquad (۱۴)$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_p\ e^{۲}}{\epsilon_{.}\ m_e}} = ۱.۷۷٦ \times ۱۰^{+۹}\ (Hz) \qquad (۱۵)$$

با به دست آمدن فرکانس پلاسمایی، رفتار پاشندگی محیط مشخص می‌شود، ضریب بازتاب را از معادله(۲) و ضریب شکست پلاسما که از معادله(۳) به دست می‌آید در فرکانس پلاسمایی به دست آمده رسم شده‌اند:



شکل۲: رفتار ضریب بازتاب امواج الکترومغناطیسی در پلاسمای لامپ فلورسنت نسبت به فرکانس‌های فرودی مختلف

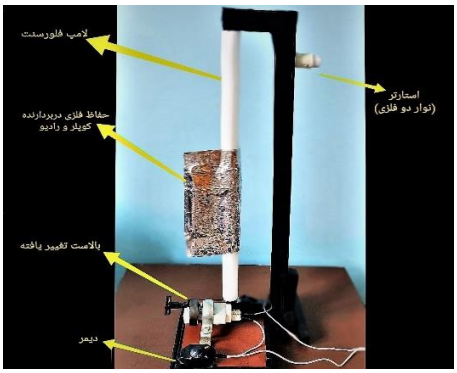


شکل۳: رفتار ضریب شکست امواج الکترومغناطیسی در پلاسمای لامپ فلورسنت که گویای بازتاب، قطع و عبور در محیط پاشنده پلاسما می‌باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30]

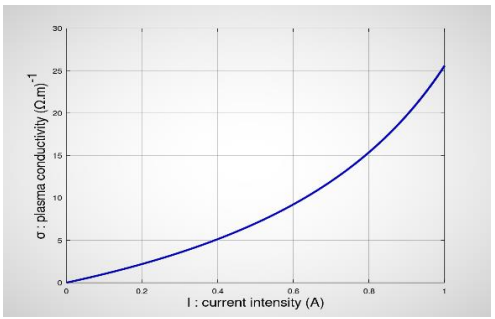
۳- استفاده از دیمر و بالاست متغییر برای کنترل فرکانس پلاسمایی لامپ فلورسنت

با استفاده از متغیر کردن القاوری بالاست و استفاده از یک دیمر به صورت سری در مدار، توان ورودی و شدت جریان عبوری از لامپ را کنترل و در نتیجه قابلیت تغییر در چگالی، رسانش و فرکانس پلاسمایی‌محیط ایجاد شده است

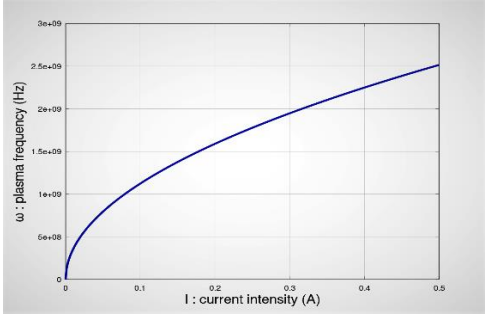


شکل ۴: نمای کلی از آنتن پلاسمایی ساخته شده

در نتیجه تغییرات فرکانس‌پلاسمایی و رسانایی ویژه (که با حل معادله امپدانس در مدار لامپ و بالاست به دست می‌آید) بر حسب شدت‌جریان عبوری بررسی شده است که در حداکثر جریان(A)۰/۵ رسانایی‌ویژه($\frac{\mho}{m}$)۷ ایجاد می شود:



شکل۵: رفتار غیرخطی رسانایی ویژه پلاسمای لامپ فلورسنت نسبت به تغییرات شدت جریان که نشان دهنده رشد یونیزاسیون در پلاسما می‌باشد



شکل۶: رشد فرکانس پلاسمایی لامپ فلورسنت با افزایش شدت جریان عبوری از پلاسما که نشان دهنده تغییر بازه فرکانسی آنتن می‌باشد

۴- نتیجه گیری

آنتن پلاسمایی ساخته شده با قابلیت تغییر فرکانس کاری و رسانایی ویژه، کارکرد قابل قبولی در بازه فرکانسی امواج FM داشته و رادیوی متصل به کوپلر که داخل حفاظ فلزی قرار دارد، هنگام روشن بودن لامپ به خوبی کار کرده و با کنترل درجه دیمر که سبب تغییر جریان عبوری از لامپ می‌شود، رسانایی ویژه و فرکانس پلاسمایی محیط تغییر کرده و سبب کنترل کیفیت کارکرد رادیو می‌شود. در جریان‌های پایین به دلیل تعداد کمتر الکترون های گسیلی از کاتد، پدیده یونش بهمنی ضعیف بوده و راکتانس بالاست به راحتی می تواند روند افزایش جریان را بگیرد. این موضوع دلیل کاهش شیب نمودار شماره(۶) در جریان های نزدیک به صفر می‌باشد. اما وقتی جریان عبوری از لامپ افزایش می‌یابد، پدیده یونش‌بهمنی شدیدتر شده و در این حالت به دلیل افزایش رسانایی پلاسما، بالاست توانایی کاهش شدید پدیده یونش بهمنی را نداشته و باعث می شود رابطه تقریباً خطی بین فرکانس پلاسمایی و جریان عبوری از لامپ برقرار شود، که به معنی عدم کاهش شیب نمودار در نواحی مذکور می‌باشد. با خاموش شدن لامپ با توجه به نارسانا شدن محیط آنتن (صفر شدن چگالی الکترونی)، آنتن از کار افتاده و به دلیل از بین رفتن سطح مقطع راداری پلاسما، سیستم رادارگریز شده و توسط رادارها غیر قابل شناسایی می‌شود.

مراجع

[۱] فاطمه صادقی‌کیا، آنتن‌پلاسما در مأموریت‌های فضایی، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم‌تحقیقات‌وفناوری، جلد ۱۰شماره۱، بهار ۱۳۹۶

[۲] *Chen,F.,"Introduction to plasma physics and controlled fusion".۲nd ed. New York:Plenum press,۱۹۸۳.*

[۳] *Anderson,T.,"Plasma Antennas".Artech house,۲۰۱۱.*

[٤] *Kane,Raymond,Sell,Heinz.,"Revolution in lamps:a chronicle of ٥٠ years of progress",۲۰۰۱.*

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30]