



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 پلازما و تغییرات آن بر حسب توان ورودی که توسط سیستم طراحی شده بر حسب بالاست متغیر و دایمر قابل کنترل می‌باشد، امکان بررسی کارکرد این نوع آنتن در بازه فرکانسی VHF فراهم شده است. با محاسبه تابع فرکانس پلاسمایی بر حسب شدت جریان عبوری، خواص بازتاب، جذب و عبور امواج الکترومغناطیسی از پلازما 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 می‌کند و با به وجود آمدن رسانایی ویژه در حدود  $\gamma(\frac{0}{m})$ ، آنتن پلاسمایی کارکرد قابل قبولی در بازه امواج رادیویی با مدولاسون فرکانسی از خود نشان می‌دهد.

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  $\gamma(\frac{0}{m})$ , 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.

## 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 دی‌الکتریک 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 شده است

## ۱- تئوری و پارامترها

امواج الکترومغناطیسی با رسیدن به مرز محیط پلاسما دچار سه حالت قطع، عبور و جذب می‌شوند، 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]:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_p e^2}{\epsilon_0 m_e}} \quad (1)$$

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]:

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

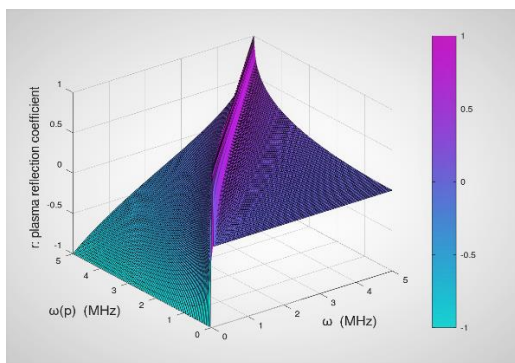
که در آن  $k$  و  $k_p$  اندازه بردار انتشار موج در محیط خارج و درون پلاسما می‌باشد ( $|\vec{k}| \equiv k$ ). با استفاده از معادله پاشندگی امواج الکترومغناطیسی در پلاسما، رابطه زیر به ضرایب به دست آمده اعمال شده است [۲]:

$$\omega^2 = \omega_p^2 + c^2 k_p^2 \Rightarrow k_p = \frac{\sqrt{\omega^2 - \omega_p^2}}{c} \quad (3)$$

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

$$\omega \ll \omega_p \Rightarrow \begin{cases} t \rightarrow 0 \\ r \rightarrow -1 \end{cases} \quad (4)$$

در این حالت مانند فلزات، موج فرودی توانایی عبور از پلاسما را نداشته و با مقداری جذب، با اختلاف فاز  $\pi$  از سطح پلاسما بازتاب می‌شود. به همین دلیل ناحیه عملکرد آنتنی پلاسما در بازه فرکانسی کمتر از  $\omega_p$  قرار دارد. با رسم نمودار ضریب بازتاب در معادله (۲) این ناحیه مشخص می‌شود:



شکل ۱: ضریب بازتاب موج الکترومغناطیسی از سطح پلاسما تابعی از فرکانس موج فرودی و فرکانس پلاسمایی محیط می‌باشد

می‌شود [۴]. با توجه به انرژی یونش اتم آرگون، تعداد ثابت الکترون‌های ثانویه در مدت زمان  $\Delta t$  درون لامپ فلورسنت  $(W) \times 20$  به دست می‌آید:

$$N_{e2} = \frac{\Delta t p_{ion[Ar]}}{U_{Ar}} = 1.673 \times 10^{+11} \quad (12)$$

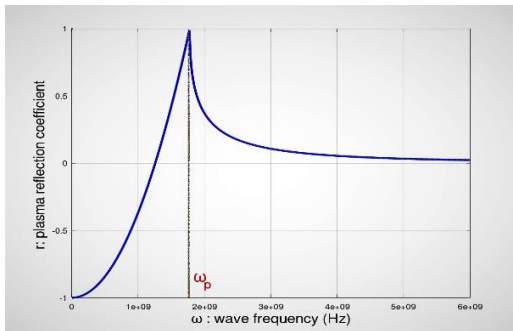
$$N_{e(total)} = N_{e1} + N_{e2} = 3.59 \times 10^{+11} \quad (13)$$

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

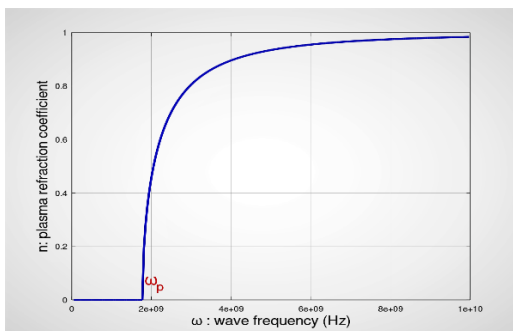
$$n_p = \frac{N_{e(total)}}{v_{lamp}} = 9.908 \times 10^{+14} \left(\frac{1}{m^3}\right) \quad (14)$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_p e^2}{\epsilon_0 m_e}} = 1.776 \times 10^{+9} \text{ (Hz)} \quad (15)$$

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



شکل ۲: رفتار ضریب بازتاب امواج الکترومغناطیسی در پلاسمای لامپ فلورسنت نسبت به فرکانس‌های فرودی مختلف



شکل ۳: رفتار ضریب شکست امواج الکترومغناطیسی در پلاسمای لامپ فلورسنت که گویای بازتاب، قطع و عبور در محیط پاشنده پلازما می‌باشد.

## ۲- محاسبه فرکانس پلاسمایی لامپ فلورسنت

ابتدا با حل معادله لاپلاس تابع پتانسیل الکتریکی بین کاتد و آند با شرط مرزی  $V = 67.4(v)$  را به دست می‌آوریم که در آن  $L$  فاصله دو الکترود و  $Z$  فاصله از آند می‌باشد:

$$v(z) = \pm 133.730 z (v) \quad (5)$$

$$w = \int_L^L - \frac{\partial}{\partial z} [q v(z)] dz \quad (6)$$

با توجه به انرژی یونشی  $15/77(ev)$  اتم آرگون، مسافتی که الکترون‌ها پس از گسیل از کاتد به این انرژی دست یافته و سبب یونش می‌شوند را از رابطه (۶) حساب می‌کنیم:

$$\Delta z' = 0.117 (m) \quad (7)$$

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

$$\overline{KE}_e = \frac{1}{\Delta z'} \int_{L-\Delta z'}^L [q v(z)] dz \quad (8)$$

$$\bar{v}_e = \sqrt{\frac{2 \overline{KE}_e}{m_e}} = 4.59 \times 10^6 \left(\frac{m}{s}\right) \quad (9)$$

می‌توان به وسیله مدت زمانی که طول می‌کشد الکترون‌های حامل جریان فاصله بین کاتد تا آند را طی کنند  $(\Delta t)$  و اندازه‌گیری شدت جریان عبوری، تعداد ثابتی از الکترون‌های حامل جریان که همواره درون لامپ قرار دارند را محاسبه کرد:

$$\begin{cases} \Delta t = \frac{L}{\bar{v}_e} = 1.097 \times 10^{-7} (s) \\ I = 0.28 (A) \end{cases} \quad (10)$$

$$N_{e1} = 1.916 \times 10^{+11} \text{ (electron)} \quad (11)$$

$N_{e1}$  تعداد ثابت الکترون‌های حامل جریان موجود درون پلازما 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 پلازما ( $N_{e2}$ ) را نیز محاسبه کرد، به صورت میانگین حدود ۲۰/۲۷ درصد از توان ورودی صرف یونش اتم‌های آرگون

شکل ۶: رشد فرکانس پلاسمایی لامپ فلورسنت با افزایش شدت جریان عبوری از پلازما 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 الکترون‌های گسیلی از کاتد، پدیده یونش بهمنی ضعیف بوده و راکتانس بالاست به راحتی می‌تواند روند افزایش جریان را بگیرد. این موضوع دلیل کاهش شیب نمودار شماره (۶) در جریان‌های نزدیک به صفر می‌باشد. اما وقتی جریان عبوری از لامپ افزایش می‌یابد، پدیده یونش بهمنی شدیدتر شده و در این حالت به دلیل افزایش رسانایی پلازما، بالاست توانایی کاهش شدید پدیده یونش بهمنی را نداشته و باعث می‌شود 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 نارسا شدن محیط آنتن (صفر شدن چگالی الکترونی)، آنتن از کار افتاده و به دلیل از بین رفتن سطح مقطع راداری پلازما، سیستم رادارگریز شده و توسط رادارها غیر قابل شناسایی می‌شود.

#### مراجع

[۱] فاطمه صادقی کیا، آنتن پلازما در مأموریت‌های فضایی، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم تحقیقات و فناوری، جلد ۱۰ شماره ۱، بهار ۱۳۹۶

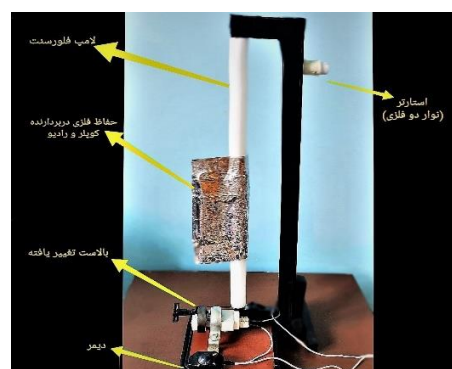
[۲] Chen, F., "Introduction to plasma physics and controlled fusion". 2nd ed. New York: Plenum press, ۱۹۸۳.

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

[۴] Kane, Raymond, Sell, Heinz., "Revolution in lamps: a chronicle of ۵۰ years of progress", ۲۰۰۱.

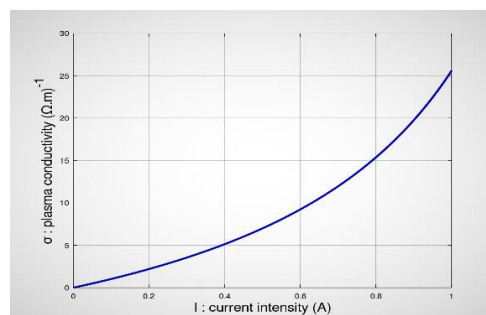
### ۳- استفاده از دیمر و بالاست متغیر برای کنترل فرکانس پلاسمایی لامپ فلورسنت

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 پلاسمایی محیط ایجاد شده است



شکل ۴: نمای کلی از آنتن پلاسمایی ساخته شده

در نتیجه تغییرات فرکانس پلاسمایی و رسانایی ویژه (که با حل معادله امپدانس در مدار لامپ و بالاست به دست می‌آید) بر حسب شدت جریان عبوری بررسی شده است که در حداکثر جریان  $0.5(A)$  رسانایی ویژه  $7(\frac{\Omega}{m})$  ایجاد می‌شود:



شکل ۵: رفتار غیرخطی رسانایی ویژه پلاسمای لامپ فلورسنت نسبت به تغییرات شدت جریان که نشان دهنده رشد یونیزاسیون در پلازما می‌باشد

