

شبیه‌سازی پلاسمای چشمه یونی رادیوفرکانسی القایی و طراحی مدار تطبیق امپدانس

INC29-1253

حمیدرضا میرزایی^{*}، حمید رحیم‌پور^۱، بهزاد یداله زاده^۱

۱. پژوهشکده فیزیک و شتابگرهای ذرات، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای صندوق پستی: ۵۱۱۱۳-۱۴۳۹۹، تهران - ایران

چکیده:

در این مقاله، مشخصات پلاسمایی چشمه یونی القایی (ICP) به صورت دوبعدی متقارن، شبیه‌سازی شده است. این چشمه یونی القایی در شتابدهنده الکترواستاتیک ES-200 موجود در آزمایشگاه پژوهشکده فیزیک و شتابگرهای ذرات، مورد استفاده بهره‌برداری می‌گیرد. چگالی الکترونی، دمای الکترون و توان جذب شده با استفاده از نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی شد. بیشینه چگالی الکترونی و دمای الکترونی در فشار ۱ پاسکال و توان ۲۰۰ وات و فرکانس ۱۳/۵۶ مگاهرتز به ترتیب برابر با 5×10^{17} بر مترمکعب و $4/5$ الکترون ولت محاسبه گردید. این پارامترها در تعیین مشخصات باریکه بسیار تاثیرگذار می‌باشد و دمای الکترونی پایین ادمیتانس مناسبی ایجاد می‌کند. همچنین امپدانس پیچه‌ها در حضور پلاسمای با استفاده از این نرم‌افزار محاسبه شد و مقداری برابر با $z=0/4+17/09j$ بدست آمد. از امپدانس بدست آمده مدار تطبیق امپدانس که بین منبع موج و انتن قرار می‌گیرد طراحی گردید. این مدار تطبیق شامل دو خازن با ظرفیت‌های ۴۰ و ۱۲ پیکوفاراد می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: چشمه یونی، چشمه پلاسمایی، شتابدهنده الکترواستاتیک، رادیوفرکانسی، تطبیق امپدانس

Simulation of inductive radiofrequency ion source plasma and design of impedance matching circuitHamidReza Mirzaei^{1*}, Hamid Rahimpour¹, Behzad Yadollahzadeh¹

1. Physics and Accelerators Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O.BOX:14399-51113, Tehran, Iran

Abstract:

In this paper, plasma properties of inductive ion source (ICP) are simulated in symmetric two-dimensional (code). This inductive ion source is used in the ES-200 electrostatic accelerator in the laboratory of the Physics and Accelerators Research school. Electron density, electron temperature and absorbed power were simulated by (using) Comsol software. The maximum electron density and electron temperature at 1 Pa, 200W input power and frequency of 13.56 MHz were $5 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ and 4.5 eV, respectively.

These parameters are very effective in determining beam characteristics. low electron temperature creates a suitable admittance. Also, the impedance of load in the presence of plasma was calculated by using this software. Impedance were obtained equal to $z=0.4+17.09j$. From the obtained impedance, the impedance matching circuit which is placed between the source and the antenna was designed. This circuit consists of two capacitors with capacitors (capacities) of 40 and 12 pF.

Keywords: Ion Source, Plasma Source, Electrostatic Accelerator, Radio Frequency, Impedance Matching.

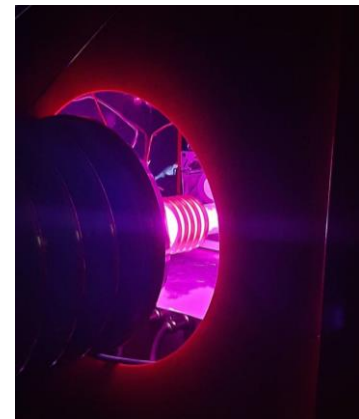
۱. مقدمه

یکی از مهمترین اجزای شتابدهنده الکترواستاتیک، چشمه یونی آن می‌باشد. از میان انواع چشمه‌های یون، در شتابدهنده الکترواستاتیک ES-200، چشمه یونی بسامد رادیویی به دلیل پیچیدگی کم‌تر، زیاد بودن نرخ تولید یون‌های اتمی نسبت به مولکولی، سهولت بکارگیری، مصرف گاز کم و جریان باریکه نسبتاً بالا انتخاب شده است. در شتابدهنده‌های الکترواستاتیک اکثراً از چشمه یونی نوع خازنی استفاده می‌شد و اخیراً به دلیل چگالی بالای چشمه پلاسمای القایی، این نوع چشمه‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند. در سال‌های اخیر، پلاسمای القایی مورد شبیه‌سازی‌هایی قرار گرفته است و پارامترهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است [1][2][3][4][5][6].

چشمه یونی از نوع القایی با فرکانس ۱۳/۵۶ مگاهرتز با توان ۲۰۰ وات در این شتابدهنده استفاده شده است. چشمه پلاسمای القایی از یک آنتن و شبکه تطبیق تشکیل می‌گردد.

۲. شتاب‌دهنده الکترواستاتیک ES-200

شتاب‌دهنده الکترواستاتیک ES-200 یک شتاب‌دهنده کم حجم، قابل حمل با دامنه کاربرد وسیع می‌باشد که نه تنها برای تحقیقات هسته‌ای پایه و آنالیز عنصری و ایزوتوپی مورد استفاده قرار می‌گیرد، بلکه برای بازرسی و ردیابی محموله‌های غیرمجاز مواد مخدر و یا قابل انفجار و دیگر کاربردهای تشخیصی در حوزه‌های مختلف صنعت، پزشکی و آموزشی به کار گرفته می‌شود. تصویر شتاب‌دهنده الکترواستاتیک ساخته شده در شکل ۱ نمایش داده شده است. مشخصات فنی دستگاه در جدول ۱ ارائه شده است [7].



شکل ۱. شتاب‌دهنده الکترواستاتیک ساخته شده در پژوهشکده فیزیک و شتابگرها (سمت چپ)، چشمه یونی رادیوفرکانسی القایی (سمت راست).

جدول ۱. مشخصات شتابگر الکترواستاتیک مدل ES-200

High Voltage Generator	Voltage	kV	200
	Current	mA	10
	Stability	%	1-5
Ion Beam Parameters	Current	μA	3000
	Diameter	mm	~30
Ion Source	Type		RF
	% Monatomic Ions		90
Pulsed Operation	Pulse Length	μsec	10-50000

(Optional)	Pulse Rate	Hz	1-1000
	Duty Cycle	%	10-90
Rotation Target Assembly (Optional)	Speed	RPM	-----
	Area	Cm sq	-----
	Half Life	hours	-----
	Flounce	n/s	-----
Cooling	Water	liter/min	0.5
	Volts	V	220 ~
Mains Supply	Frequency	Hz	50
	Power	KVA	4
	Layout	Type	Horizontal
Insulation	Type	Open air	
Vacuum System	Type	Turbo molecular with Rotary backing pump	
Physical Data	Accelerator Weight	Kg	~ 800
	Control cabinet weight	Kg	~ 50

۳. شبیه‌سازی

۱.۳ توصیف مدل

شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار کامسول انجام شده است [8]. چشمه یونی از نوع تونمن^۱ القایی با فرکانس ۱۳/۵۶ مگاهرتز و بیشینه توان ۲۰۰ وات می‌باشد. یک محفظه به قطر ۲۵ میلی‌متر و طول ۲۲۲ میلی‌متر به عنوان چشمه پلاسمایی می‌باشد که ۵ دورحلقه سیم دور آن قرار دارد. از یک آهنربایی دائمی برای محصورسازی پلازما در نزدیکی استخراج‌گر استفاده شده است. چشمه یونی در شکل ۱ (تصویر سمت چپ) ارائه شده است. هندسه دارای تقارن محوری می‌باشد. چگالی الکترون با حل معادلات سوق - پخش محاسبه می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_e) + \nabla \cdot [-n_e(\mu_e \cdot E) - D_e \cdot \nabla n_e] = R_e$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_e) + \nabla \cdot [-n_e(\mu_e \cdot E) - D_e \cdot \nabla n_e] + E \cdot \Gamma_e = R_e$$

به طوری که n_e تعداد الکترون، μ_e تحرک‌پذیری الکترون، E میدان الکتریکی، D_e ثابت پخش، Γ_e شار چگالی الکترونی می‌باشد. برای شبیه‌سازی طبق جدول ۱ از واکنش‌های شیمیایی حجمی زیر برای گاز آرگون استفاده شده است.

جدول ۲. واکنش‌های شیمیایی برای گاز آرگون.

$\Delta\epsilon(eV)$	فرمول	ردیف	$\Delta\epsilon(eV)$	فرمول	ردیف
-	$Ar^* + Ar^* \Rightarrow e + Ar + Ar^+$	۵	۰	$e + Ar \Rightarrow e + Ar$	۱
-۱۱/۵	$e + Ar^* \Rightarrow e + Ar$	۶	۱۱/۵	$e + Ar \Rightarrow e + Ar^*$	۲
-	$Ar^* + Ar \Rightarrow Ar + Ar$	۷	۱۵/۸	$e + Ar \Rightarrow 2e + Ar^+$	۳
			۴/۲۴	$e + Ar^* \Rightarrow 2e + Ar^+$	۴

دو واکنش زیر نیز برای سطوح استفاده می‌شود:



¹ Thonemann

که e الکترون، Ar ذره آرگون، Ar^* آرگون برانگیخته، Ar^+ یون آرگون می‌باشد. زمانی که اتم آرگون برانگیخته یا یونیزه به دیواره برخورد می‌کند، به حالت پایه خود بر می‌گردد که شرایط مرزی زیر را برای شار الکترون ایجاد می‌کند:

$$n_e \Gamma_e = \left(\frac{1}{2} v_{e,th} n_e \right)$$

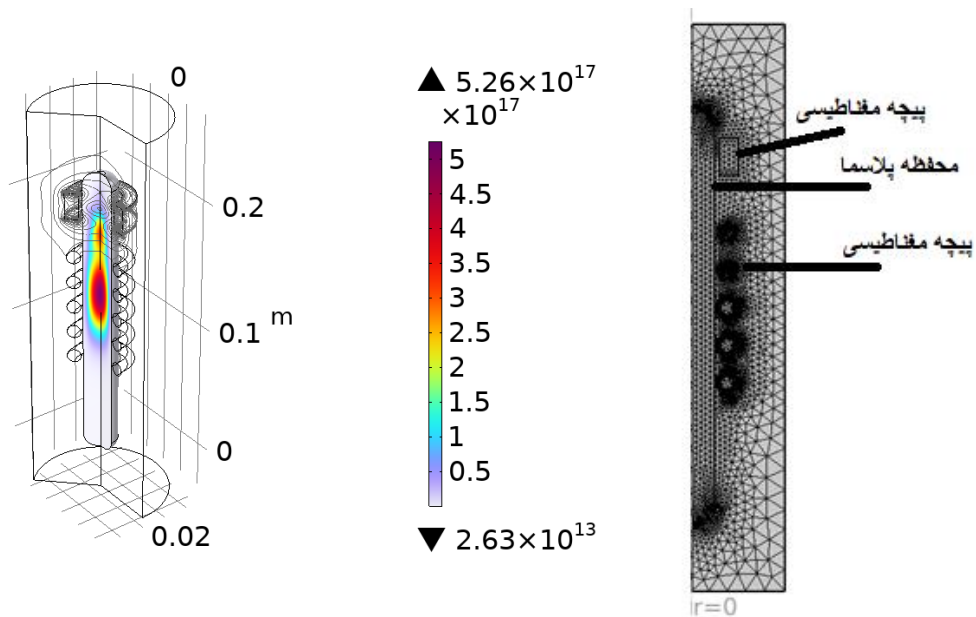
و برای شار انرژی الکترون داریم:

$$n_e \Gamma_e = \left(\frac{5}{6} v_{e,th} n_e \right)$$

و شرایط اولیه: چگالی اولیه: $1/m^3 \times 10^{15}$ ، انرژی متوسط اولیه الکترون: 5 eV برای شبیه‌سازی اعمال گردید.

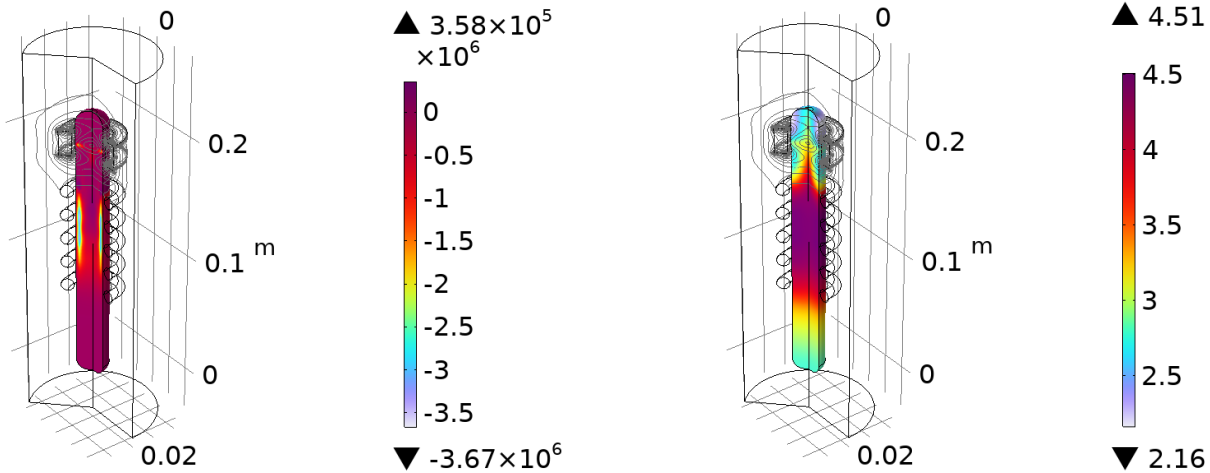
۲.۳ نتایج شبیه‌سازی

در نرم‌افزار شبیه‌سازی ابعاد مش ریز (*finer*) به ترتیب با حداقل و بیشینه اندازه ۱ و $0.3/0$ میلی‌متر انتخاب شد. مش ایجاد شده در شکل ۲ (تصویر سمت راست) ارائه شده است. شبیه‌سازی‌ها برای تعداد ۵ پیچه، فرکانس $13/56$ مگاهرتز و در فشار ۱ پاسکال انجام شده است. در شکل ۲ (تصویر سمت چپ) توزیع چگالی پلاسما در محفظه نمایش داده شده است که بیشینه چگالی (5×10^{17}) بر متمرکب در بخش انتهایی محفظه و نزدیک به روزنه استخراج‌گر اتفاق می‌افتد و به سمت انتهای محفظه روند کاهشی دارد.



شکل ۲. مش ایجاد شده در هندسه چشمه پلاسما (تصویر سمت راست)، چگالی الکترونی - بر متمرکب (تصویر سمت چپ).

توزیع دمای الکترون نیز در شکل ۳ (تصویر سمت راست) نمایش داده شده است و بیشینه دمای الکترون $4/5$ الکترون-ولت می‌باشد. میزان توان جذب شده، در شکل ۳ نمایش داده شده است؛ که بیشترین جذب توان، در نزدیکی و زیر پیچه‌ها اتفاق می‌افتد.

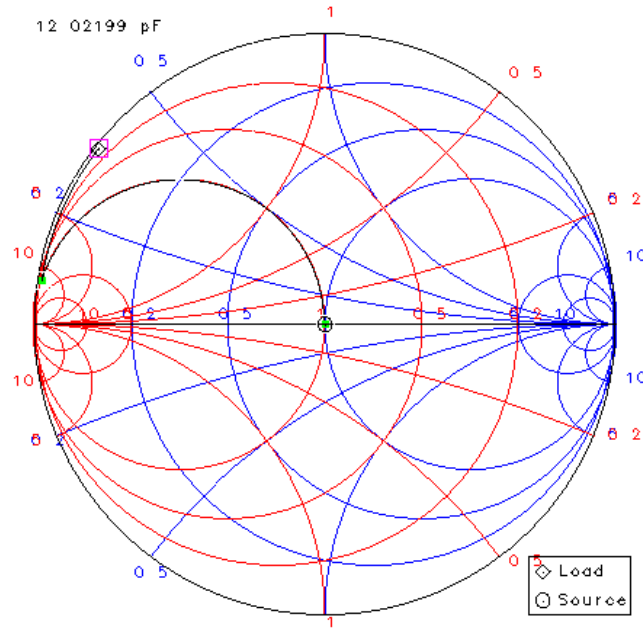


شکل ۳. دمای الکترونی - الکترون ولت (تصویر سمت راست)، چگالی توان جذب شده (تصویر سمت چپ).

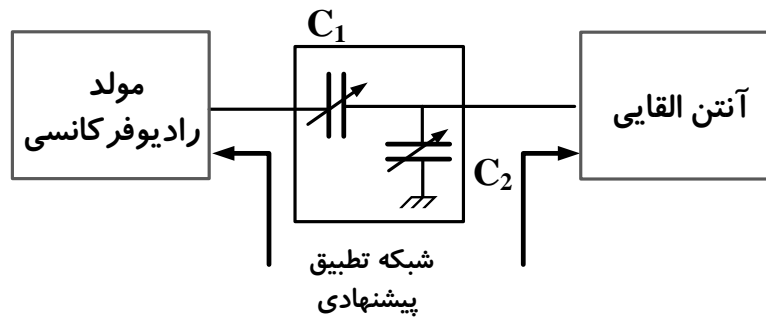
امپدانس بار، با حضور پلاسما محاسبه گردید ($z=0/4+17/09 j$) که در بخش ۴ در محاسبات بخش تطبیق توان مورد استفاده قرار گرفته است.

۴. تطبیق امپدانس

مولد رادیوفرکانسی حالت جامد طبق استاندارد، دارای امپدانس اهمی خروجی معادل ۵۰ اهم می‌باشد و با توجه به اینکه نوع القای توان رادیوفرکانسی به صورت سلفی می‌باشد و دارای امپدانس موهومی می‌باشد، طبق قضیه انتقال توان بیشینه، باید امپدانس آنتن را برابر با مقدار ۵۰ اهم کرد. امپدانس القایی آنتن، در فرکانس کاری مولد رادیوفرکانسی، برابر با مقدار موهومی $z=0/4+17/09 j$ می‌باشد. این امپدانس، باید توسط شبکه تطبیق به مرکز نمودار اسمیت، که معادل امپدانس ۵۰ اهم می‌باشد، نگاشته شود. شکل زیر، نمودار اسمیت امپدانس آنتن و امپدانس خروجی مولد رادیوفرکانسی را نشان می‌دهد. در این مقاله از یک شبکه تطبیق خازنی، برای انتقال توان بیشینه استفاده شده است؛ که مسیر آن در نمودار اسمیت زیر، نشان داده شده است. شکل ۵ شبکه خازنی طراحی شده برای تطبیق بین آنتن و مولد را نشان می‌دهد. با توجه به تغییر امپدانس پلاسما دو خازن C_1 و C_2 را متغیر و با مقادیر پایه ۴۰ و ۱۲ پیکوفاراد انتخاب می‌کنیم تا قابلیت تطبیق هر بار دیگری در این حدود را، به ۵۰ اهم داشته باشد.



شکل 4. تطبیق امپدانس خازنی بین مولد حالت جامد رادیوفرکانسی و آنتن.



شکل 5. مدار تطبیق خازنی پیشنهادی برای انتقال توان بیشینه.

۵. خلاصه و بحث

برای یک چشمه یونی، جریان باریکه قابل استخراج به صورت تقریبی برابر است با:

$$J_i \approx \sum_j 0.4 n_j e \sqrt{\frac{2z_j k T_e}{M_j}}$$

که J_i چگالی جریان، n_j چگالی، M_j جرم، z_j مرتبه بار، z مرتبه یونیزاسیون، T_e دمای الکترون می‌باشد. با این رابطه مشخص می‌باشد که با افزایش چگالی، بیشینه جریان قابل استخراج افزایش پیدا می‌کند.

در شتابدهنده الکترواستاتیک ES-۲۰۰، ابتدا چشمه یونی رادیوفرکانسی از نوع خازنی استفاده شده بود، که جریان یونی در حدود ۱ میلی‌آمپر تولید می‌کرد و سپس این چشمه پلاسمایی با نوع القایی جایگزین شد و جریانی در حدود ۳ میلی‌آمپر ایجاد کرد. برای درک این موضوع ابتدا چشمه پلاسمایی شبیه‌سازی شد و پارامترهای پلازما تعیین شد.

۶. نتیجه‌گیری

با استفاده از نرم افزار کامسول، پلاسما یونیه چشمه یونیه القایی، شبیه‌سازی شد و چگالی، دما، میدان الکتریکی و امپدانس آن محاسبه گردید. بیشینه چگالی پلاسما، در بخش انتهایی و نزدیک به استخراج‌گر اتفاق می‌افتد که در چشمه یونیه اهمیت زیادی دارد. دمای الکترونی نزدیک پیچه‌ها، دارای مقادیر بیشتر و در مرکز محفظه، روند کاهشی دارد که این مسئله، میزان ادمیتانس باریکه پایین‌تری و مشخصات باریکه بهتری ایجاد می‌کند. چشمه پلاسمایی دارای ۵ پیچه، توان ۲۰۰ وات و فرکانس تحریک ۱۳/۵۶ مگاهرتز در فشار کاری ۱ پاسکال دارای بیشینه چگالی 5×10^{17} بر متر مکعب و بیشینه دما ۴/۵ الکترون ولت می‌باشد. پارامترهای بدست آمده، در مطالعات بعدی برای محاسبات مشخصات باریکه یونیه استفاده خواهد شد. امپدانس آنتن با حضور پلاسما ($z=0/4+17/09j$) بدست آمد که با این مقادیر، مدار تطبیق خازنی انتخاب گردید.

۷. مراجع

- [1] Lettry., "Kinetic modeling of E-to-H mode transition in inductively coupled hydrogen plasmas," *J. Appl. Phys.*, vol. 119, p. 233302, 2016.
- [2] Nam., "Two-dimensional simulation of a miniaturized inductively coupled plasma reactor," *J. Appl. Phys.*, vol. 95, 2004.
- [3] Liu., "Spatial distributions of plasma parameters in inductively coupled hydrogen discharges with an expansion region," *Physics of Plasmas*, vol. 24, 2017.
- [4] Smith., "Multifluid simulation models for inductively coupled plasma sources," in *AIP Conference Proceedings*, 2017.
- [5] Y. Yu., "Simulation of a large size inductively coupled plasma generator and comparison with experimental data," *AIP Advances*, vol. 8, 2018.
- [6] Koukounis., "Numerical modeling of the effect of the level of nitrogen impurities in a helium parallel plate dielectric barrier discharge," *Plasma Source Sci. Technol.*, vol. 24, 2015.
- [7] Rahighi., "Construction of Electrostatic Accelerator with a Maximum Energy of 200keV," *Journal of Nuclear Science and Technology (JonSat)*, pp. 81-87, 2013.