

اندازه‌گیری پارامترهای پلاسما با روش پروب

محمود قرآن‌نویس و سیدمحمد الهی
گروه فیزیک پلاسما، مرکز تحقیقات هسته‌ای
گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه رازی
سازمان انرژی اتمی ایران

چکیده

در این مقاله روشهای تعیین پارامترهای فیزیکی پلاسما مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده است که می‌توان با روش اندازه‌گیری مستقیم، دما و چگالی الکترون را در پلاسما تعیین نمود. پلاسما در داخل محفظه‌ای استوانه‌ای شکل به قطر ۲۵ سانتیمتر و طول ۶۰ سانتیمتر، حاوی گاز آرگون ایجاد شده و برای تولید پلاسما از تفنگ الکترونی استفاده گردید. پلاسمای حاصل شده بسیار پایدار بوده و برای اندازه‌گیری دمای الکترون و چگالی آن از سه روش لانگمورپروب زوج، فرکانس رادیویی و امواج در پلاسما استفاده گردید. نتایج حاصل از سه روش با یکدیگر مقایسه و نشان داده شده است که در توافق بسیار خوبی با یکدیگر می‌باشند.

مقدمه

شناخت و تعیین پارامترهای فیزیکی پلاسما، با توجه به کاربردهای صنعتی و نقش آن در حل مشکل کمبود انرژی در جهان، شایان اهمیت است. روشهایی که برای تعیین پارامترهای پلاسما به کار می‌روند به دو گروه اندازه‌گیری به روش مستقیم و اندازه‌گیری به روش غیرمستقیم تقسیم می‌شوند. در روش اول وسیله اندازه‌گیری مستقیماً "به داخل پلاسما رانده می‌شود و در نتیجه امکان اندازه‌گیری در هر ناحیه از پلاسما وجود دارد و اصطلاحاً "به آن اندازه‌گیری "محلی" گویند. در روش دوم وسایل اندازه‌گیری در خارج از پلاسما قرار می‌گیرند. روشهایی که برای اندازه‌گیری پارامترهای پلاسما نظیر دمای الکترون و چگالی الکترون به کار برده شده‌اند، عبارتند از: الف- لانگمورپروب زوج

(۵-۱)، ب- امواج فرکانس رادیویی (۶،۷) و ج- امواج در پلاسما (۸-۱۱). کلیه این آزمایشها در گروه فیزیک پلاسما، مرکز تحقیقات هسته‌ای سازمان انرژی اتمی ایران صورت گرفته است.

الف- روش لانگمورپروب زوج

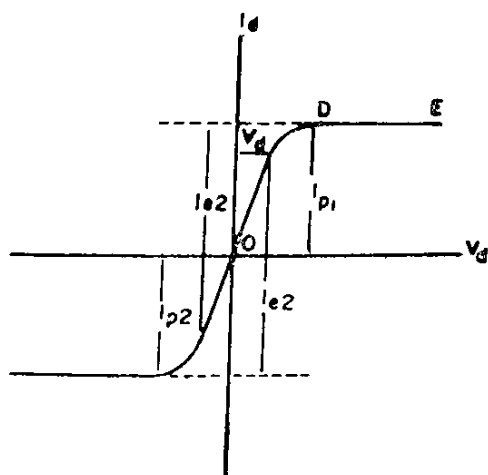
در این روش از قراردادن دو الکتروود در داخل پلاسما استفاده می‌شود. پلاسما نظیر الکتروودلیت عمل نموده و از رسم نمودار تغییرات جریان (I_d)، برحسب ولتاژ اعمال شده بین دو پروب (V_d)، دما (T_e)، و دانسیته الکترون (n_e) در پلاسما تعیین می‌شود. شکل ۱ مدار دو پروبی را نشان می‌دهد.

فرض کنیم در دو پروب مشابه که سطح هر دو با هم برابر باشند ولتاژ را آنچنان اعمال کنیم که

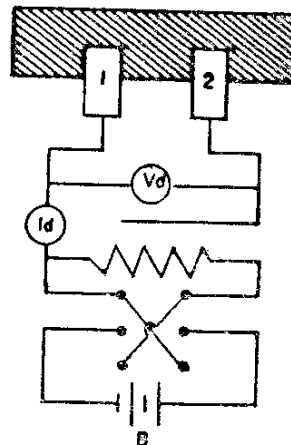
استفاده از تابع حاصل قابلیت هدایت الکترونی پلاسما را تعیین نمود .
با قراردادن یک پروب فرکانس رادیویی در داخل پلاسما ، می توان پارامترهای پلاسما و از آن جمله دما و دانسیته الکترون را در شرایط مختلف اندازه گرفت .

ج - روش امواج در پلاسما

به علت فاصله زیاد ذرات در پلاسما ، بررسی انتشار امواج در پلاسما بسیار مشکل است . امواجی که در پلاسما انتشار می یابند به دو گروه خطی و غیر خطی تقسیم می شوند . در امواج خطی تغییرات دامنه موج زیاد نیست و فرکانس موج مستقل از دامنه موج است . در صورتیکه برای امواج غیرخطی تغییرات دامنه بسیار زیاد است و برای آنها تغییرات فرکانس به تغییرات دامنه بستگی دارد . در این مقاله فقط امواج خطی خودبرانگیخته مورد بررسی قرار گرفته است . انتشار یک چنین موجی در پلاسما ، شبیه به انتشار موج صوتی در گازهاست .



شکل ۲- نمودار تغییرات ولتاژ با جریان در پروب دوتایی .



شکل ۱- مدار پروب استوانه ای زوج .

پروب ۲ نسبت به پروب ۱ بسیار منفی باشد .
پروب ۲ یونهای مثبت و پروب ۱ مسدوداری از الکترونها را جمع آوری می کند . با کاهش پتانسیل پروب ۲ ، به تدریج پروب شماره ۲ علاوه بر یون مثبت شروع به جذب الکترون نموده و بنابراین اندازه مطلق جریان خالص پلاسما (I_d) کاهش می یابد . برای $V_d = 0$ مجموع جریانهائی که از هر پروب عبور می کند صفر است و نقطه را در روی نمودار شکل ۱ مشخص می سازد . با اعمال ولتاژ معکوس ، پروب ۲ نسبت به پروب شماره ۱ مثبت شده و شاخه سمت راست نمودار شکل ۱ حاصل می شود (قسمت ODE) .

ب - روش فرکانس رادیویی

فرض کنیم که توزیع ذرات در پلاسما در غیاب میدان خارجی از توزیع ماکسول - بولتزمن پیروی کند ، در این صورت اثر میدان خارجی ضعیف را می توان به صورت یک آشفتگی نا همگن که در محیط به وجود می آید در تابع مذکور اعمال کرده با

شرح دستگاه

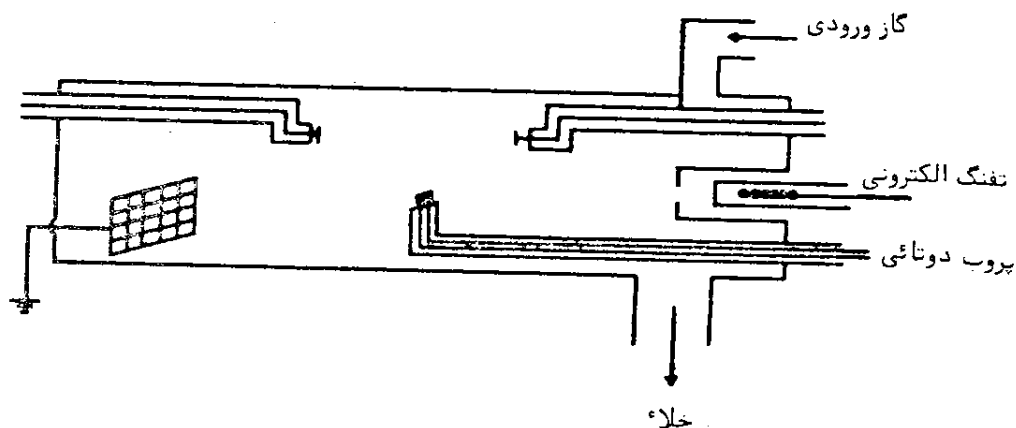
دستگاه مورد استفاده از یک استوانه آلومینیومی به قطر ۲۵ سانتیمتر و طول ۶۰ سانتی متر تشکیل شده است. دو طرف استوانه به وسیله دو دیسک فلزی مسدود گردیده است. با ایجاد روزهائی در دیسکهای مذکور، محلتهائی برای تعبیه پروبها، تفنگ الکترونی و الکترودهای مورد نیاز بوجود آمده است. برای ایجاد پلاسما از تفنگ الکترونی استفاده می شود. برای ایجاد خلاء از دو پمپ یکی روتوری تا فشار 10^{-3} torr و دیگری دیفیوژن تا فشار 10^{-6} torr استفاده شده است.

روش کار

الف - لانگمور پروب زوج

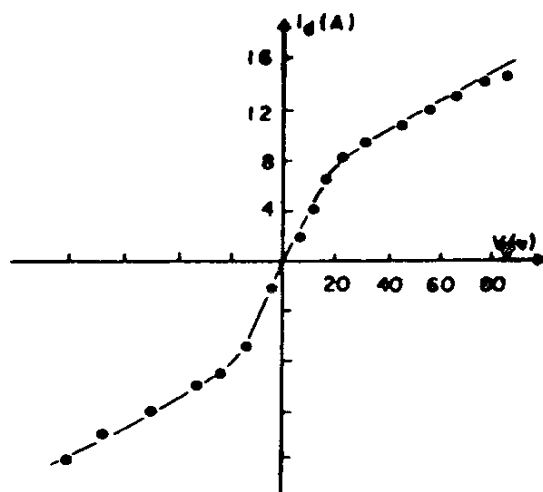
نخست داخل محفظه، تفنگ الکترونی و پروبها را به دقت با محلول شیمیائی تمیزکننده شستشو داده و سپس دستگاه را سوار کرده و آن را به قسمت تولید خلاء مرتبط می سازیم. فشار داخل محفظه را

به 10^{-6} torr کاهش داده با داخل کردن گاز آرگون فشار را به ۳۰ torr افزایش می دهیم. با ایجاد میدان قوی بین آندوکاتور تفنگ الکترونی، ذرات گاز در اطراف تفنگ یوتیزه شده و با اتصال طرف دیگر محفظه به زمین (شکل ۳) تمامی یونهای موجود در محفظه به انتهای دیگر کشیده می شود. با افزایش میدان اعمال شده، پلاسما یکنواختی در داخل محفظه به وجود می آید (دیسواره محفظه پوشیده از یون مثبت است). در آزمایش می باید دقت کرد که هیچگونه ناپایداری در پلاسما به وجود نیاید. چه در ولتاژ و فشارهای بالا ناپایداریهای در پلاسما حاصل می شود که باعث تغییر فشار در داخل محفظه می گردد. در نتیجه نمی توان پارامترهای پلاسما را به طور دقیق اندازه گرفت. در ساخت تفنگ الکترونی نیز باید دقت کافی نمود زیرا به علت جریان زیاد تفنگ الکترونی نمی تواند به صورت پیوسته عمل کند و این خود باعث ایجاد ناپایداری و از بین رفتن تفنگ الکترونی خواهد شد.



شکل ۳- محفظه آلومینیومی، شامل تفنگ الکترونی و پروبها.

محمود قرآن‌نویس و سید محمد الهی . اندازه‌گیری پارامترهای پلاسما با روش پروب .



شکل ۴- نمودار جریان ولتاژ
اندازه‌گیری شده برای پروب زوج .

ناپایداری در شمارش فرکانس، نمی‌توان پروب را مستقیماً در داخل پلاسما قرار داد. مطابق شکل ۵، ابتدا در یک انتهای محفظه اصلی دستگاه، لوله‌ای شیشه‌هایی که یک طرف آن بسته است قرار داده می‌شود و سپس پروب فرکانس رادیویی در داخل آن قرار می‌گیرد.

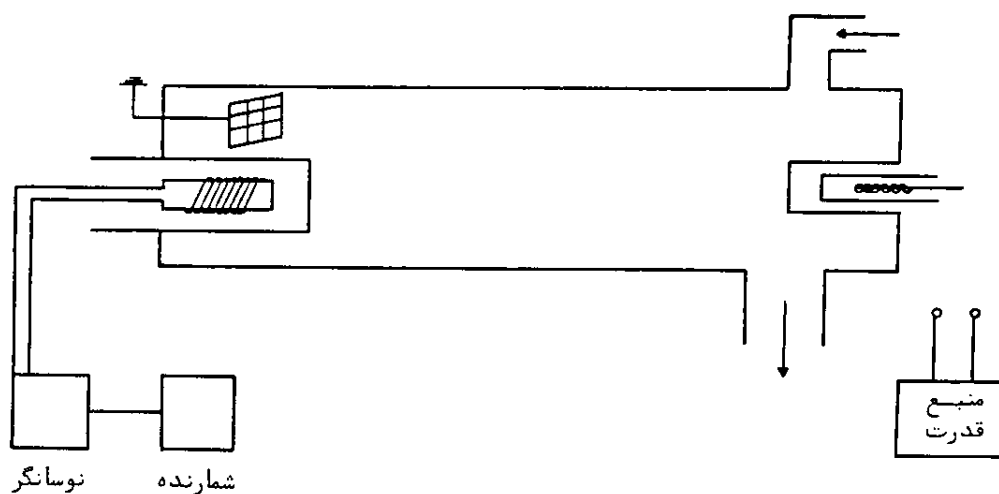
۲- مدرج کردن پروب فرکانس رادیویی: برای مدرج کردن پروب از مدار شکل ۶ استفاده شده است (این مدار برای فرکانس ۲۰ - ۱۰ MHz تنظیم شده است). پروب را در مدار قرار داده و فرکانس آن به وسیله یک شمارنده تعیین می‌شود. سپس پروب را در داخل محلول کلوروسدیم NaCl یا کلرور- پتاسیم KCl که هدایت الکتریکی آنها برای غلظت‌های مختلف معلوم است، قرار داده می‌شود. فرکانس پروب، به علت تغییر میدان الکتریکی تغییر یافته و اختلاف آن با حالت قبل تعیین می‌شود. با استفاده از مقادیر حاصل نموداری ترسیم می‌شود که مشخصه تغییرات اختلاف بسامد بر حسب هدایت

برای اندازه‌گیری V و I از مدار شکل ۱ استفاده می‌شود و با تغییر ولتاژ، جریان بین پروبها اندازه‌گیری می‌شود. با ترسیم نمودار $I-V$ و استفاده از شیب آن می‌توان دما و چگالی الکترون را تعیین کرد (۵، ۱۲، ۱۳ و ۱۴). نمونه نمودار $I-V$ به دست آمده در این آزمایش در شکل ۴ نشان داده شده است. مقادیر حاصل در این آزمایش برای دمای الکترون و چگالی الکترون به ترتیب $T_e = 2/95 \times 10^4 \text{ K}$ و $n_e = 6/02 \times 10^9 \text{ electron/cm}^3$ است.

ب- روش فرکانس رادیویی

در این روش از پروب فرکانس رادیویی استفاده می‌شود. نحوه ساخت و مدرج کردن این پروب در زیر شرح داده شده است:

۱- ساخت پروب فرکانس رادیویی: انتهای یک لوله شیشه‌ای به قطر ۶ میلی‌متر و به طول ۵۰ سانتی‌متر را مسدود ساخته و سپس بر روی آن ۲۶ دور از یک سیم مسی به قطر ۰/۲۳ میلی‌متر پیچیده می‌شود. به علت برخورد ذرات پلاسما با پروب و ایجاد



شکل ۵- طرز قرارگیری پروب رادیویی در محفظه.

جدول ۱- تغییرات فرکانس با تغییر ولتاژ اعمال شده

ولتاژ (ولت)	فرکانس
۵	۱۸/۹۵۲
۰/۵	۱۸/۹۳۴
۱	۱۸/۹۱۷
۱/۵	۱۸/۹۰۷

$$\Delta F = 18/952 - 18/907$$

$$45 \text{ KHz} = 45 \text{ MHz} \%$$

روش لانگمور پروب زوج شده استفاده شده است که مقدار آن در این آزمایش $T_e = 2/95 \times 10^4 \text{ } ^\circ\text{K}$ است. هدایت الکتریکی در همان نقطه و در همان فشار با استفاده از نمودار شکل ۷ برابر $\Sigma = 2/2 \frac{\text{mho}}{\text{m}}$ محاسبه شده و $\Sigma_s = 2/5 \times 10^{-10} \text{ cm}^{-2}$ است (۱۴ و ۱۵). در این آزمایش چگالی الکترون

الکتریکی محلول است. نمودار به دست آمده در این آزمایش در شکل ۷ نشان داده شده است.

با قراردادن پروب فرکانس رادیویی در پلاسما و استفاده از نمودار به دست آمده در (شکل ۷)، هدایت الکتریکی پلاسما تعیین می شود. در این آزمایش پروب مذکور در مرکز محفظه استوانه ای قرار داده شده و در فشار ۳۰ torr، با تغییر ولتاژ، مقادیر فرکانس متناظر در جدول ۱ ثبت گردیده است.

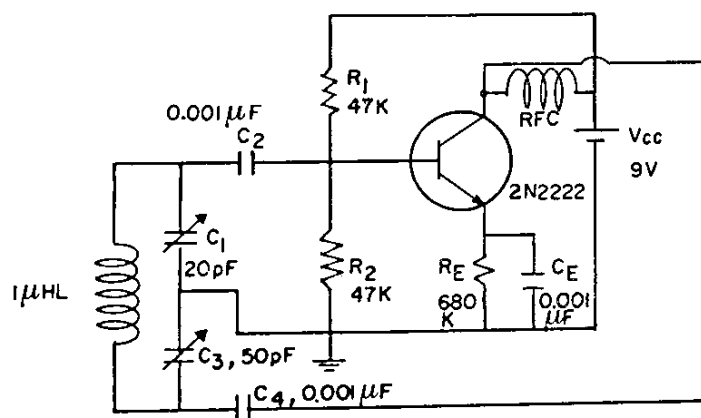
با استفاده از رابطه زیر می توان چگالی الکترون را محاسبه کرد (۶ و ۷):

$$n_e = \frac{(m_e K T_e)^{1/2} N \Sigma_s}{e} \quad (1)$$

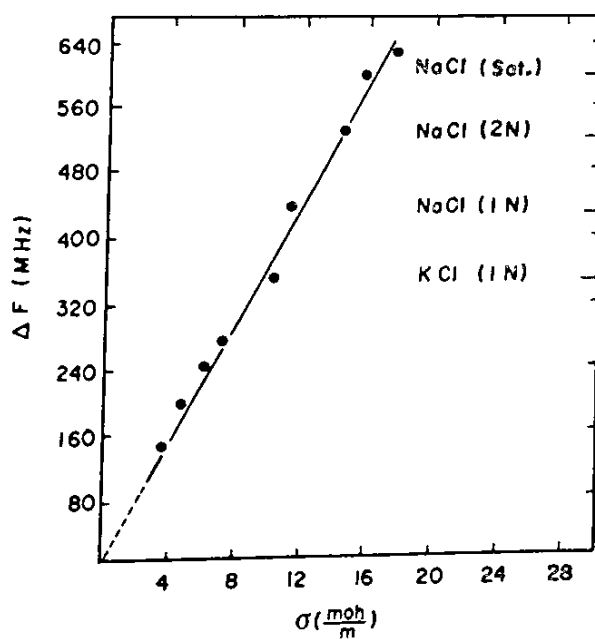
که در آن m_e جرم الکترون، K ثابت بولتزمن، T_e دمای الکترون، N تعداد اتمهای خنثی، Σ_s سطح مقطع پراکندگی، Σ قابلیت هدایت الکتریکی و e بار الکترون است.

برای تعیین دمای الکترون در فشار ۳۰ torr از

محمود قرآن‌نویس و سید محمد الهی . اندازه‌گیری پارامترهای پلاسما با روش پروب



شکل ۶- مدار نوسانات .



شکل ۷- نمودار اختلاف فرکانس بر حسب قابلیت هدایت الکتریکی.

گرددیده است. ضمناً نحوه عمل پروب فرکانس رادیویی در داخل پلاسما در شکل ۸ مشخص شده است.

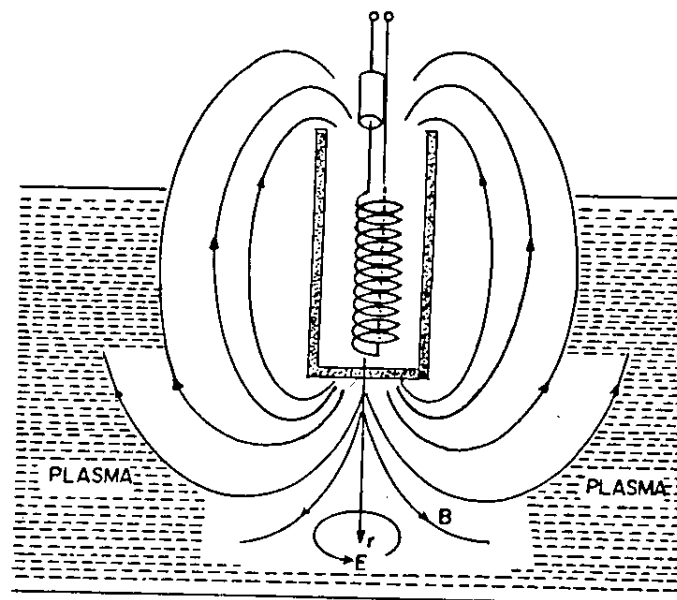
ج- روش امواج در پلاسما

برای دریافت موج در پلاسما از پروبهای مخصوصی استفاده می‌شود. در این آزمایش از یک پروب به شکل دیسک و از جنس تنگستن و به قطر ۴/۵ میلی‌متر و ضخامت ۵ میلی‌متر استفاده شده است. پروب را در داخل پلاسما حرکت داده و آنرا در نقاط مختلف قرار می‌دهیم تا بتوان انرژی نوسانات را اندازه گرفت. قبل از قرار دادن پروب در داخل پلاسما، از محلول هیدروکسید پتاسیم (KOH) برای اکسیدزدائی سطح پروب استفاده می‌شود. امواجی که در اینجا مورد مطالعه قرار گرفته‌اند از نوع امواج

خود برانگیخته است (به این معنی که هیچ موجی از خارج وارد پلاسما نمی‌شود). از بررسی این نوع امواج می‌توان بعضی از پارامترهای پلاسما نظیر دمای الکترون را محاسبه کرد. دو نمونه از امواج یونی مشاهده شده در شکل ۹-الف و ۹-ب نشان داده شده است. با توجه به آنکه معادله نوسانات یونها در پلاسما طبق رابطه زیر است (۸).

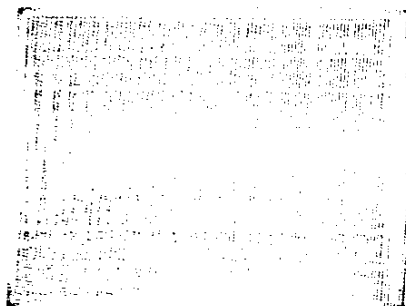
$$V = v\lambda = \left(\frac{\gamma_e K T_e}{m_i} \right)^{1/2} \quad (2)$$

در این رابطه V سرعت یون، v فرکانس امواج، λ طول موج، K ثابت بولتزمن، m_i جرم آرگون و T_e دمای الکترون و $\gamma_e = 5/3$ است. با استفاده از شکل ۹ و رابطه (۲) دمای الکترون برابر $T_e = 2/88 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{K}$ تعیین گردیده است.

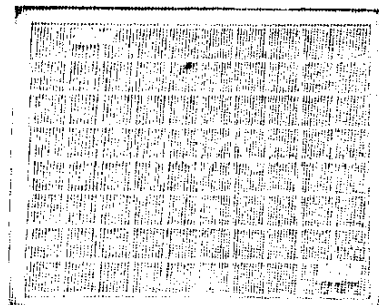


شکل ۸- طرز کار پروب فرکانس رادیویی در داخل پلاسما.

محمود قرآن‌نویس و سید محمد الهی . اندازه‌گیری پارامترهای پلاسما با روش پروب .



شکل ۹ (ب) - امواج یونی
با فرکانس $\nu = 6/66 \text{ MHz}$



شکل ۹ (الف) - امواج یونی
با فرکانس $\nu = 5 \text{ MHz}$

ناچیز بوده و با توجه به خطاهای آزمایش، این اختلاف‌ها قابل قبول می‌باشند .

نتایج حاصل از سه روش فوق‌الذکر در جدول ۲ ذکر گردیده است . با در نظر گرفتن این جدول ، بدیهی است که اختلاف نتایج حاصل از روشهای مختلف

جدول شماره ۲- مقایسه نتایج حاصل از روشهای مختلف

n_e electron/cm ³	T_e (°K)	نوع روش
$6/02 \times 10^9$	$2/95 \times 10^4$	پروب زوج
$10/8 \times 10^9$	—	فرکانس رادیویی
	$2/88 \times 10^4$	امواج

References

1. Y. Hatta and N. Sato, Proceedings of the Fifth Inter. Conf. on Ionization Phenomena in Gases, H. Macker, Ed., North Holland Publishing Company, Amsterdam, Vol.1, 978 (1962).
2. L. Tonks and I. Langmuir, Phys.33, 195 (1929).
3. M. Ghoranneviss, Proc. Int. Conf. on Phenomena in Ionized Cases, Swansea, England (1987).
4. K. Yamaoto, J. Phys. Soc. Japan, 11.57 (1966).
5. I. Dote. Rep; I.P.C.R: I,44 (1977).

6. Smirnov Introduction to Plasma Physics, Mir Publishers., Moscow.101 (1977).
7. R.A. Olson and E.C. Tary, Measurement of Plasma Conductivity Employing Less Technique, UAC Research Laboratories, Report. M. 1282-1 (1961).
8. I. Alexeff and W.D. Jones, The Physics of Fluids vol.11. No.1 167 (1968).
9. I. Alexeff and W.D. Jones, Bull. Am. Phys. Soc.12, 516 (1963).
10. W.D. Jones and I. Alexeff, Bull. Am. Phys. Soc.12, 770 (1967).
11. M. Ghoranneviss. Proc. Second. Int. Conf. on Relation Bet. Laboratory and Space Plasma. Tokyo, Japan. (1986).
12. G. Ghoranneviss, Bull. American Physical Society, U.S.A (1986).
13. B.D. Fried and R.W. Gould, Phys. Fluids 4, 139 (1961).
14. A.Y. Wong and R.W. Motley, Phys. Rev. 133, 4436 (1969).
15. H. Fujita, Japaness Journal of Apl. Phys, Vol.15, No.1 (1976)

THE MEASUREMENT OF PLASMA PARAMETERS USING PROBE TECHNIQUES

M. Ghorannevis and M. Elahi^{*}
Plasma Group, Nuclear Research Center
Atomic Energy Organization of Iran
Department of Physics, Razi University

Abstract

The possibility of finding the plasma parameters, like electron temperature and density, by direct measurement is shown in this article. Plasma is produced in a cylindrical chamber with 25 cm diameter and 60 cm length, by electronic gun in Argon gas. The plasma produced is very stable. Three processes, namely, Langmuir double probe, radio frequency and plasma wave, can be used to find the plasma parameters. It is shown that the results obtained are in a good agreement with each other.