هشتمین کنفرانس مهندسی و فیزیک پلاسما (PEP2021)

دانشگاه مازندران ۲۳ و ۲۴ تیرماه ۱۴۰۰

انجمن علوم و مهندسی پلاسمای ایران

تعیین نیمه تحلیلی توزیع چگالی الکترونی پلاسما در توکامک‌هایی با تداخل‌سنج میکروموج وتر مرکزی

احسان اله نوری*

پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران

enoori@aeo.org.ir *

کلید واژه: چگالی الکترونی، تداخل‌سنج میکروموج، اختلاف فاز، توکامک

چکیده

در پژوهش‌های مرتبط با گداخت محصورسازی مغناطیسی به ویژه توکامک، تعیین محدودهٔ چگالی الکترونی پلاسما نقش بسیار مهمی در تحلیل و توصیف عملکرد توکامک دارد. نوع ساده‌تر نداخل‌سنج‌های میکروموج، تداخل‌سنج وتر مرکزی نام دارد که با استفاده از آن می‌توان متوسط چگالی الکترونی را در طول یکی از وترهای سطح مقطع پلاسمای توکامک اندازه‌گیری نمود. با توجه اینکه در تداخل‌سنج‌های وتر مرکزی، فقط قابلیت اندازه‌گیری متوسط چگالی الکترونی وجود دارد و تشخیص توزیع فضایی چگالی امکان‌پذیر نیست، در این مقاله روشی نیمه تحلیلی جهت تعیین توزیع فضایی چگالی الکترونی در تداخل‌سنج‌های وتر مرکزی ارائه شده است. از مقایسهٔ اختلاف فاز مدل‌های ارائه شده با مقدار خطی حاصل از اندازه‌گیری‌های تجربی متوسط چگالی در توکامک دماوند، مشخص شدکه از مدل‌های تحلیلی ارائه شده می‌توان جهت تخمین توزیع چگالی توکامک استفاده نمود.

Semi-analytic determination of electron density distribution of tokamak with central chord microwave interferometer

Ehsanollah Noori*

Plasma physics and nuclear research school, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Atomic Energy Organization of Iran

*corresponding e-mail: enoor@aeo.org.ir

Abstract

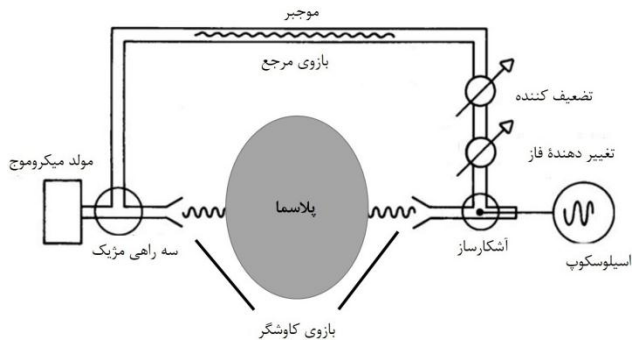
In magnetic confinement, especially tokamak studies, determination of electron density range plays a very important role in the analysis of machine operation. Meanwhile, electromagnetic waves in the range of millimeter-wavelength which are known as microwave are very applicable in determination of plasma parameters of tokamak. Microwave interferometry is considered as one of the most reliable techniques for electron density measurement of tokamak which is being used in various tokamaks. Similar to optical interferometers, the basic principle of microwave interferometers is measurement of phase difference of measurement and reference waves. One of the simplest types of microwave interferometers is named as central-chord interferometer which measures line integrated electron density along with the longest chord of the plasma cross section. Since central chord interferometers are not able to measure spatial distribution of density, in this paper a semi-analytic approach is introduced to determine distribution of electron density of tokamaks with uses central chord interferometers.

Keywords: Electron density, Microwave interferometer, Phase difference, Tokamak

مقدمه

آگاهی از ویژگی‌های چگالی الکترونی پلاسمای توکامک از جمله، انتگرال مکانی (چگالی متوسط خطی) و طیف آشفتگی زمانی (افت

و خیز چگالی) نقش بسیار مهمی در درک و توسعهٔ فیزیک توکامک و کنترل پلاسما دارد [۱]. یکی از کارآمدترین ومعتبرترین ابزارهای اندازه‌گیری چگالی الکترونی توکامک، استفاده از روش تداخل‌سنجی است. در روش تداخل سنجی، از مشاهده تداخل بین دو یا چند پرتو موج با نام‌های پرتو کاوشگر (پرتوی که با پلاسما برهمکنش دارد) و پرتو مرجع (پرتویی که هیچ برهکنشی با پلاسما ندارد)، پارامتر های مهم پلاسما حاصل می گردد. در این میان، استفاده از تداخل‌سنج‌های میکروموج کاربرد بسیار زیادی در اندازه‌گیری چگالی الکترونی پلاسما دارد [۲-٤]. اساس عملکرد یک تداخل سنج میکروموج، اندازه‌گیری تغییرات فاز ایجاد شده در یک موج الکترومغناطیس در محدوده طول موج میلیمتر است که در هنگام انتشار در داخل پلاسمای توکامک، میدان الکتریکی آن موازی با میدان مغناطیسی چنبره‌ای توکامک می‌باشد. نمایی ساده و کلی از یک تداخل‌سنج میکروموج در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. نمای ساده‌ای از یک تداخل‌سنج میکروموج

نوع ساده‌تر تداخل‌سنج‌های میکروموج (شکل ۱)، تداخل‌سنج‌های تک-کاناله نام دارند که با استفاده از اینگونه تداخل‌سنج‌ها می‌توان انتگرال مکانی چگالی الکترونی (چگالی متوسط خطی) را در راستای وتر اصلی (مرکزی) سطح مقطع پلاسمای توکامک، اندازه-گیری نمود. از این رو، به تداخل‌سنج‌های تک-کاناله، تداخل‌سنج میکروموج وتر مرکزی نیز گفته می‌شود. با توجه به اینکه انتگرال-گیری خطی چگالی، در راستای وتر مرکزی انجام می‌گیرد، در تداخل‌سنج‌های تک-کاناله امکان تعیین توزیع فضایی چگالی الکترونی، به طور مستقیم از اندازه‌گیری اختلاف فاز، وجود ندارد. در این مقاله، روشی جهت تعیین توزیع فضایی چگالی الکترونی پلاسما در توکامک‌هایی که در آن‌ها از تداخل‌سنج میکروموج وتر مرکزی استفاده می‌شود معرفی شده است.

معادلات حاکم

فیزیک عملکرد یک تداخل‌سنج میکروموج بر پایهٔ اندازه‌گیری تغییرات فاز در نتیجهٔ تغییرات ایجاد شده در ضریب شکست پلاسما می‌باشد. در صورتی که جهت انتشار و میدان الکتریکی موجی که به داخل توکامک فرستاده می‌شود به ترتیب، عمود و موازی با میدان مغناطیسی محوری (چنبره‌ای) توکامک باشند. **در این حالت، فرکانس پلاسما را می‌توان بر حسب چگالی الکترونی و به صورت زیر بیان نمود**

$$\omega_p \approx 56.42\sqrt{n_e} \qquad (۱)$$

در حالت کلی، به دلیل غیر یکنواخت بودن چگالی در داخل توکامک، چگالی الکترونی توکامک را می‌توان به صورت تابعی از مکان پلاسما تعریف کرد. با توجه به اینکه چگالی در مرکز پلاسمای توکامک بیشتر از سایر نواحی است، به ازای مقادیر چگالی بیشتر از چگالی بحرانی ($n_e > n_c$)، موج در داخل پلاسما منتشر نخواهد شد. در این حالت اصطلاحاً گفته می‌شود پدیدهٔ قطع در پلاسما رخ داده است. چگالی بحرانی را می‌توان بر حسب فرکانس موج منتشر شده در داخل پلاسما، به صورت زیر تعریف نمود

$$n_c\left[\mathrm{m}^{-3}\right] \approx \frac{f^2\left[\mathrm{Hz}\right]}{80.6} \qquad (۲)$$

به طور کلی، در یک تداخل‌سنج میکروموج دو بازوی اصلی با نام-های کاوشگرو مرجع وجود دارد. در مسیر بازوی کاوشگر تداخل-سنج، پلاسمایی با طول مشخص وجود دارد. افت و خیز چگالی الکترونی باعث ایجاد تغییرات در ضریب شکست پلاسما و در نتیجه آن، به وجود آمدن اختلاف فاز میان دو موج مرجع و کاوشگر می‌شود. معمولاً فرکانس موج به گونه‌ای انتخاب می‌شود که فرکانس قطع مربوط به آن به صورت $n_c \gg n_e$ باشد. با توجه به غیر یکنواخت بودن مقدار چگالی، آنچه که از نظر فیزیکی در اندازه‌گیری‌های تداخل‌سنج‌های میکروموج مورد توجه است، متوسط مکانی چگالی الکترونی در راستای یکی از وترهای سطح مقطع پلاسمای توکامک است. معادلهٔ اختلاف فاز میان موج‌های کاوشگر و مرجع را می‌توان به صورت زیر نوشت

$$\frac{\Delta\varphi[\mathrm{rad}]}{2\pi} = \frac{0.845\times10^{-6}}{f\,[\mathrm{GHz}]}\langle n_e\rangle[\mathrm{cm}^{-3}]L[\mathrm{cm}] \qquad (۳)$$

که در آن کمیت $\langle n_e\rangle$ به عنوان متوسط خطی چگالی الکترونی تعریف شده است و L مقدار مسافتی است که موج در داخل پلاسما منتشر می‌شود. جهت تخمین توزیع فضایی چگالی الکترونی پلاسما، تغییرات مکانی چگالی الکترونی مطابق با چند الگوی ریاضی پیشنهاد می‌شود. با به دست آوردن اختلاف فاز بر اساس الگوهای پیشنهادی چگالی در مرکز پلاسما و مقایسه آن با اختلاف فاز خطی حاصل از مقادیر تجربی چگالی متوسط به دست آمده از تداخل‌سنج (معادلهٔ ۳)، مناسب‌ترین توزیع مکانی چگالی الکترونی به دست می‌آید. بدین منظور، سه پروفایل کسینوسی، مربع کسینوسی و ذوزنقه‌ای جهت تعریف توزیع چگالی الکترونی به صورت زیر پیشنهاد شده‌اند.

$$n_e(x) = n_0\cos\left[\frac{\pi}{2}\left(\frac{2x-L}{L}\right)\right]$$

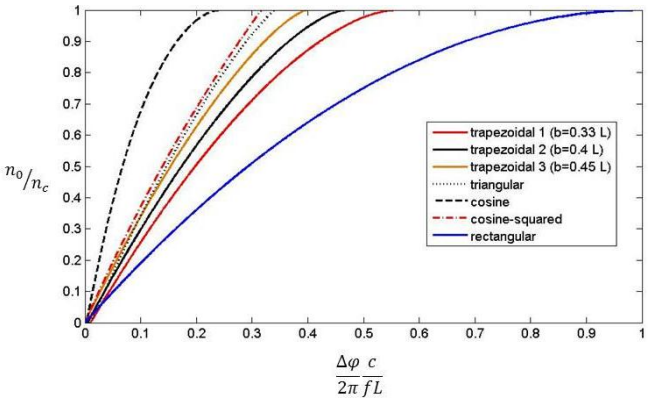
$$n_e(x) = n_0\cos^2\left[\frac{\pi}{2}\left(\frac{2x-L}{L}\right)\right] \qquad (٤)$$

$$n_e(x) = \begin{cases} n_0\dfrac{x}{b} & 0\le x\le b \\ n_0 & b\le x\le c \\ \dfrac{n_0}{(c-L)}(x-L) & c\le x\le L \end{cases}$$

پارامتر n_0 در معادلهٔ ٤ به عنوان بیشینهٔ چگالی الکترونی هر پروفایل تعریف شده است.

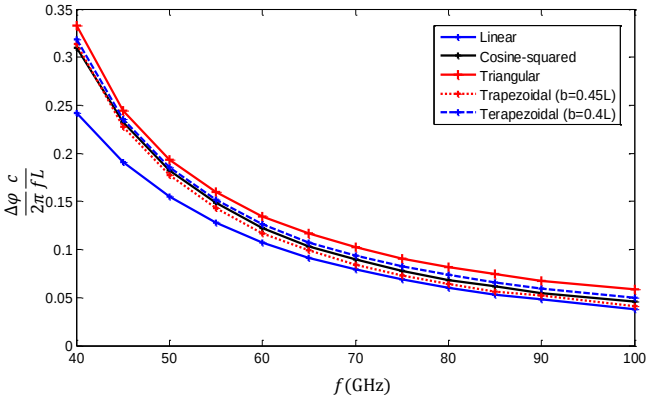
بحث

در شکل ۲، نحوهٔ تغیرات بیشینهٔ چگالی بر حسب تغییرات فاز، به ازای توزیع‌های مختلفی از چگالی نشان داده شده است. همان گونه که از شکل مشخص است، مرز حاشیهٔ تغییرات بیشینهٔ چگالی، در محدودهٔ توزیع مسطیلی (چگالی یکتواخت) ($b\to 0$ و $c\to L$) قرار می‌گیرد. در واقع، توزیع یکنواخت چگالی، مشخص کننده بیشینهٔ اسمی چگالی الکترونی قابل اندازه‌گیری توسط تداخل‌سنج نیز می‌باشد.



شکل ۲. نحوه تغییرات بیشینهٔ چگالی بر حسب اختلاف فاز در توزیع-های مختلف

تغییرات اختلاف فاز پروفایل‌های توزیع چگالی بر حسب فرکانس در شکل ۳ نشان داده شده است. برای اعتبارسنجی بیشتر نتایج، توزیع‌های چگالی با مقدار خطی اختلاف فاز (معادلهٔ ۳) مقایسه شده‌اند. مقدار متوسط چگالی اختلاف فاز خطی در معادلهٔ ۳ نیز از نتایج تجربی توکامک دماوند استخراج شده است. توکامک دماوند، توکامکی با اندازهٔ کوچک است که از یک سامانهٔ تداخل‌سنج میکروموج وتر مرکزی بهره می‌برد. تداخل‌سنج میکروموج توکامک دماوند دارای فرکانس $140\,\mathrm{GHz}$ و توانی در حدود $15\ \mathrm{mW}$ می‌باشد [۵]. جهت به کار بردن متوسط چگالی، از نتایج تجربی گزارش‌های فنی مرتبط با تست‌های اولیهٔ تداخل‌سنج میکروموج استفاده شده است. در طی یک شات نمونه‌ای اولیهٔ توکامک، مقدار متوسط چگالی بر مبنای اندازه‌گیری تداخل‌سنج $\langle n_e\rangle \approx 0.96\times10^{13}\ \mathrm{cm}^{-3}$ گزارش شده است [۵].



شکل ۳. مقایسهٔ تغییرات اختلاف فاز توزیع‌های مختلف بر حسب فرکانس

در این مقاله فرض بر این است که معادلهٔ خطی ۳، با اندازه‌گیری یک مقدار از چگالی متوسط، به صورت کلی برای همهٔ فرکانس‌ها نیز برقرار باشد. به بیان دیگر، معادلهٔ خطی ۳ را می‌توان با استفاده از مقدار متوسط چگالی تجربی اندازه‌گیری شده در توکامک دماوند، (به شرط برقرار بودن شرط قطع موج منتشر شده) برای هر فرکانس دیگری نیز مورد استفاده قرار داد. همان گونه که از شکل ٤ مشخص است، در فرکانس‌های کمتر از 70 GHz، هیچ یک از پروفایل‌های چگالی، توصیف دقیقی از توزیع فضایی چگالی ندارند. برای فرکانس‌های بالاتر از 70 GHz، توزیع ذوزنقه‌ای (b=0.45L) بهترین تطابق را با نمودار خطی اختلاف فاز دارد که نشان می‌دهد از توزیع ذورنقه‌ای با پهنای b=0.45L می‌توان جهت تخمین توزیع فضایی چگالی الکترونی در فرکانس‌های بالای توکامک استفاده نمود. البته باید توجه داشت که در روش پیشنهادی این مقاله، توزیع فضایی چگالی الکترونی در شرایطی که موج منتشر شده در داخل پلاسما دارای فرکانس‌های بالا (در این مورد خاص بیشتر از 70 GHz) باشد، به دست می‌آید و اطلاعات معتبری در رابطه با موج‌های منتشر شده در فرکانس‌های پایین‌تر (با فرض برقراری شرایط قطع پلاسمای توکامک) به دست نمی‌دهد. جهت تعیین دقیق‌تر توزیع چگالی لازم است تا از روش‌های تشخیصی تکمیلی مانند بازتاب نگاری میکروموج، در کنار روش تداخل‌سنجی استفاده شود که این موضوع در ارتباط با توکامک دماوند در حال بررسی و پیشنهاد می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی نیمه تحلیلی جهت تعیین توزیع فضایی چگالی الکترونی در توکامک‌هایی که در آن‌ها از تداخل‌سنج میکروموج تک-کاناله با وتر مرکزی استفاده می‌شود، ارائه شده است. به این منظور، سه پروفایل کسینوسی، شبه-کسینوسی و ذورنقه‌ای (با پهنای مختلف) جهت تخمین توزیع چگالی الکترونی پیشنهاد شد. با مقایسهٔ اختلاف فاز محاسبه شده از پروفایل‌های معرفی شده در فرکانس‌های مختلف، با اختلاف فاز خطی حاصل از متوسط چگالی اندازه‌گیری شده در توکامک دماوند، مشخص شد که توزیع چگالی ذوزنقه‌ای با پهنای b=0.45L، مناسب‌ترین انتخاب جهت توصیف توزیع فضایی چگالی الکترونی پلاسمای توکامک دماوند در فرکانس‌های بالا می‌باشد. بنابراین، در حالتی که موج منتشر شده در پلاسما در فرکانس‌های نسبتاً بالا (بیشتر از 70 GHz) باشد، می‌توان توزیع چگالی الکترونی را به صورت ذوزنقه‌ای در نظر گرفت.

مرجع ها

[1] H. Hutchinson, "*Principles of plasma diagnostics*", Cambridge university press (1987).

[2] H. J. Hartfuss and T. Geist, "*Fusion Plasma Diagnostics with mm-Waves*", Wiley-VCH (2013).

[3] P. C. Efthimion, *et. al.*, "*1-millimeter wave interferometer for the measurement of line integral electron density on TFTR* ", *Rev. Sci. Instrum.* **56**, 908 (1985).

[4] J .A. Fessey, *et. al*., "Plasma electron density measurements from the JET 2 mm wave interferometer", *J. Phys. E*, **20**,169 (1987).

[5] The facility MI-1 for the determining average plasma density of Damavand tokamak, Vol. I: "Common description", RCC Kurchatov Institute, Moscow 1995.