



بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه ۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز



بررسی انتشار پالس تراهرتز، با توزیع زمانی گاوسی در یک تیغه پلاسمای گرم و مغناطیده

حدیث گل‌بخشی^۱، مهدی سویزی^۲ و مهدی شریفیان^۱

^۱ گروه اتمی مولکولی، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

^۲ گروه فیزیک، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران

چکیده - در این مقاله، انتشار پالس تراهرتز با توزیع زمانی گاوسی در یک تیغه پلاسمای گرم و مغناطیده، مورد مطالعه قرار گرفته است. با استفاده از ثابت دی‌الکتریک پلاسمای گرم و مغناطیده و جواب‌های معادلات ماکسول در مرزهای تیغه پلاسمای، دامنه زمانی پالس انعکاسی از تیغه پلاسمای که دارای دیواره‌هایی از جنس صفحات شفاف و رسانای کامل است - به دست می‌آید. تاثیر میدان مغناطیسی خارجی و چگالی الکترونی لایه پلاسمای روی دامنه زمانی پالس انعکاسی تراهرتز به صورت تحلیلی بررسی می‌شود. نتیجه این بررسی نشان می‌دهد که این پارامترها به شدت باعث تغییر در مقدار دامنه زمانی پالس انعکاسی می‌شوند.

کلیدواژه - پالس تراهرتز با توسعه زمانی گاوس، پلاسمای گرم و مغناطیده، دامنه زمانی پالس انعکاسی، دامنه زمانی پالس فرودی، میدان مغناطیسی یکنواخت.

The analysis of propagation of temporal-Gaussian Terahertz's pulse in magnetized thermal plasma

Hadis Golbakhshi¹, Mahdi Sovizi², and Mahdi Sharifian¹

¹ Atomic Molecular group, Department of physics, Yazd university, Yazd, Iran

² Department of physics, Vali-e-Asr university of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran

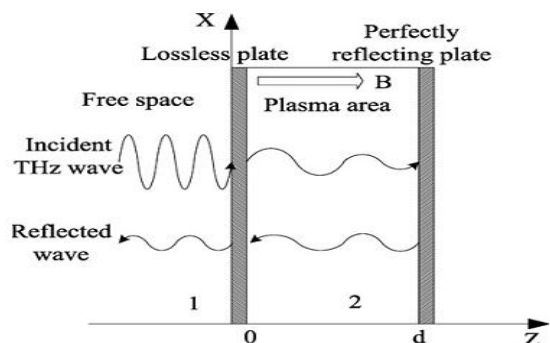
An Analysis of temporal-Gaussian THz's pulse propagation in thermal, magnetized and bounded plasma is presented. By using dielectric constant of a warm magneto plasma and the solutions of Maxwell's equations at boundaries of plasma column, temporal amplitude of reflected pulse is driven for a bounded plasma model by a lossless plate and a conductor plate. The effect of external magnetic field, temperature and electron density of the plasma slab on temporal amplitude of pulse is analyzed numerically. It is found that these parameters significant change in the value of temporal amplitude of reflected pulse.

Keywords: temporal-Gaussian Terahertz's pulse, temporal Amplitude of reflected pulse, temporal Amplitude of incident pulse, uniform magnetic field, warm magnetized plasma.

۱- مقدمه

تحقیقات زیادی روی انتشار امواج الکترومغناطیسی (EM) در محیط پلاسما انجام گرفته است. دلیل توجه به این موضوع، کاربردهای وسیع آن در فیزیک پلاسما، انتشار امواج رادیویی، تشخیص پلاسما با میکروویو و غیره می باشد [۱ و ۲]. به دلیل عدم امکان تولید پالس‌های تراهرتز تقریباً تمام بررسی‌ها روی برهم‌کنش امواج EM با پلاسما، به ناحیه فرکانسی میکروویو محدود بوده است [۳]. خوشبختانه اخیراً با پیشرفت‌های قابل توجه در توسعه منابع پر قدرت تراهرتز [۴]، زمینه مناسبی برای بررسی برهم‌کنش پلاسما با پالس‌های تراهرتز فراهم شده است. از کاربردهای پالس‌های تراهرتز در فیزیک پلاسما می‌توان به شناسایی و کنترل پلاسماهای صنعتی، شتاب‌دهنده‌های ویک‌فیلد^۱ و غیره اشاره کرد [۵ و ۶].

شفاف و بدون اتلاف است. صفحه سمت راست (صفحه $z=d$) نیز، یک رسانای کامل است. اعداد ۱ و ۲ به ترتیب فضای آزاد (هوا) و لایه‌ی پلاسما را نشان می‌دهد. پالس تراهرتز در جهت محور Z و عمود بر تیغه پلاسما منتشر می‌شود. میدان مغناطیسی هم موازی با جهت انتشار پالس است.



شکل ۱: طرح یک ستون پلاسما در یک میدان مغناطیسی [۱۰].

۲-۲- محاسبه دامنه زمانی پالس بازتابی [۱]

زمانی که پالس تراهرتز به دیواره تیغه پلاسما در صفحه $z=0$ برخورد می‌کند، قسمتی از موج به داخل پلاسما نفوذ می‌کند و بخش دیگر آن از سطح دیواره منعکس می‌شود. به دلیل وجود دو دیواره در $z=0$ و $z=d$ موج بین دو دیواره به جلو و عقب حرکت می‌کند. در نهایت بخشی از موج جذب پلاسما می‌شود و بخش دیگر آن به محیط ۱ منعکس می‌شود. معادلات ماکسول به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$(\mu_r / c) \partial H_y(z, \omega) / \partial t + \partial E_x(z, \omega) / \partial z = 0 \quad (1)$$

$$\partial H_y(z, \omega) / \partial z = (\epsilon_r / c) \partial E_x(z, \omega) / \partial t + (4\pi / c) J_x(z, \omega) \quad (2)$$

$$J_x(z, \omega) = \bar{\sigma}_x(\omega) E_x(z, \omega) \quad (3)$$

که در آن $E_x(z, \omega)$ و $H_y(z, \omega)$ مولفه‌های میدان‌های الکتریکی و شدت میدان مغناطیسی هستند که عمود بر جهت انتشار پالس می‌باشند. ϵ_r و μ_r به ترتیب ثابت دی الکتریک پلاسما و تراوایی مغناطیسی نسبی می‌باشند. $J_x(z, \omega)$ نیز چگالی جریان پلاسما است. از حل معادلات ماکسول در محیط زام (۱ و ۲)، روابط زیر بدست می‌آید:

$$E_{jx} = E_j^+(\omega) \exp(-i \beta_j z) + E_j^-(\omega) \exp(i \beta_j z) \quad (4)$$

اخیراً در چندین آزمایش، برهم‌کنش امواج تراهرتز با پلاسما بررسی شده است. به عنوان مثال، جیمیسون^۲ و همکارانش ویژگی‌های یک پلاسما تخلیه هلیوم را بر اساس تحلیل تئوری ساده‌ای با بکار بردن تکنیک‌های طیفی در محدوده زمانی تراهرتز، مطالعه کردند [۷]. کلنر^۳ و همکارانش تحول زمانی چگالی الکترونی و آهنگ برخورد پلاسما آرگون را توسط پالس‌های تراهرتز مشخص کردند [۸-۹].

در این مقاله، یک بررسی تحلیلی روی انتشار پالس تراهرتز در یک تیغه پلاسما گرم و مغناطیده انجام شده است. ویژگی الکترومغناطیسی پلاسما در نوار تراهرتز توسط معادله بولتزمن بیان می‌شود [۲]. تاثیر پارامترهای چگالی پلاسما، دمای الکترونی و اندازه میدان مغناطیسی یکنواخت خارجی، روی دامنه زمانی پالس منعکس شده از تیغه پلاسما با قطبش راستگرد، بررسی می‌شود.

۲- تئوری مساله

۲-۱- توصیف مدل پلاسما

شکل ۱ طرح انتشار پالس تراهرتز را در یک تیغه پلاسما نشان می‌دهد. صفحه سمت چپ (صفحه $z=0$)، صفحه‌ای

¹ Wakefield accelerators

² Jamison

³ Kolner

با جایگذاری رابطه (۱۴) در رابطه (۱۲)، دامنه فرکانسی پالس تراهرتز بازتابی به دست می‌آید. حال با گرفتن عکس فوریه از رابطه (۱۲)، دامنه زمانی پالس منعکس شده از تیغه پلاسما به دست می‌آید:

$$E^-(t) = (1/2\pi) \int_{-\infty}^{\infty} E^+(\omega) r(\omega) \exp(-i\omega t) d\omega \quad (15)$$

حل انتگرال بالا به روش تحلیلی امکان‌پذیر نیست، به همین دلیل برای حل آن از روش انتگرال‌گیری عددی سیمپسون 3/8 و برنامه فرترن ۹۰ استفاده شده است.

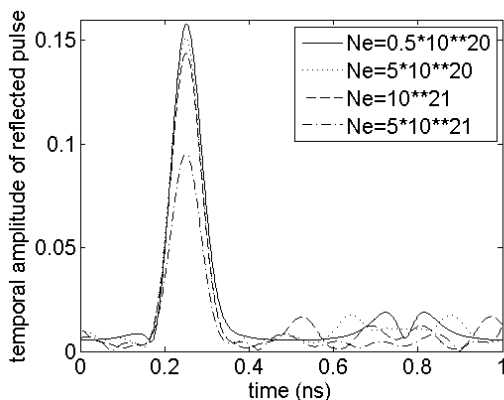
۲-۳- توصیف نتایج

در این بخش با استفاده از روابط (۱۱)، (۱۴) و (۱۵) تاثیر چگالی پلاسما و میدان مغناطیسی، روی دامنه زمانی پالس بازتابی با قطبش دایروی راستگرد بررسی می‌شود.

۲-۳-۱- اثر چگالی الکترونی روی دامنه زمانی

پالس بازتابی

چگالی‌های الکترونی با مقادیر 0.5×10^{20} ، 5×10^{20} ، 10^{21} و 5×10^{21} در نظر گرفته شده است. مقادیر پارامترهای دیگر عبارت است از: دمای الکترونی $T = 10 \text{ KeV}$ ، میدان مغناطیسی $B_0 = 1 \text{ T}$ ، فرکانس برخورد $\nu = 0.01 \text{ THz}$ ، ضخامت تیغه پلاسما $d = 0.1 \text{ m}$ ، طول زمانی پالس فرودی $\tau = 50 \text{ ps}$ ، زمان مربوط به قله پالس فرودی $t_0 = 5\tau$ و فرکانس مرکزی پالس فرودی $\omega_0 = 2\pi \times 0.5 \times 10^{12} \text{ rad/s}$.



شکل ۲: دامنه زمانی پالس بازتابی بر حسب زمان در دماهای مختلف

از شکل ۲ مشاهده می‌شود که با افزایش چگالی، دامنه زمانی پالس بازتابی کاهش می‌یابد.

$$H_{jy} = (1/\eta_j)[E_j^+(\omega)\exp(-i\beta_j z) - E_j^-(\omega)\exp(i\beta_j z)] \quad (5)$$

های میدان‌های الکتریکی (شدت میدان مغناطیسی) در جهت محور z و در خلاف جهت محور z در محیط لازم می‌باشند. $\tilde{\beta}_j$ عدد موج و η_j امپدانس محیط هستند.

چون در صفحه $z=d$ ، دیواره تیغه پلاسما از جنس رسانای کامل است، میدان الکتریکی پالس در این دیواره صفر می‌شود. بنابراین شرط پیوستگی در $z=d$ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$E_2^+(\omega)\exp(-i\tilde{\beta}_2 d) = -E_2^-(\omega)\exp(i\tilde{\beta}_2 d) \quad (6)$$

شرط پیوستگی در صفحه $z=0$ نیز به صورت زیر خواهد بود:

$$E_1(0) = E_2(0), H_1(0) = H_2(0) \quad (7)$$

با استفاده از روابط (۶) و (۷)، ضریب بازتاب فرنل $(r(\omega) = E_1^-(\omega)/E_1^+(\omega))$ به دست می‌آید:

$$r(\omega) = (\eta_2 \tanh(\tilde{\beta}_2 d) - \eta_1) / (\eta_2 \tanh(\tilde{\beta}_2 d) + \eta_1) \quad (8)$$

$$\tilde{\beta}_2 = (2i\pi f/c)\sqrt{\epsilon_2 \mu_2} \quad (9)$$

$$\eta_2 = \eta_0 \sqrt{\mu_2/\epsilon_2} \quad (10)$$

که $\epsilon_2 = \bar{\epsilon}$ ثابت دی‌الکتریک پلاسمای گرم مغناطیسه است [۲] که مقدار آن از توسط رابطه زیر داده شده است:

$$\bar{\epsilon} = (1 - \omega_p^2 / (\omega(\omega - i\nu \pm \omega_c))) \times (1 - (\omega\omega_p^2 / (\omega - i\nu \pm \omega_c)^3)(k_B T / m_e c^2))^{-1} \quad (11)$$

با استفاده از روابط (۸)، (۹)، (۱۰) و (۱۱) و با در نظر گرفتن شرط $\mu_2 \approx 1$ ، دامنه فرکانسی پالس منعکس شده از تیغه پلاسما به دست می‌آید:

$$E_1^-(\omega) = E_1^+(\omega) \left(\frac{\tanh(2i\pi f d \sqrt{\bar{\epsilon}}/c) - \sqrt{\bar{\epsilon}}}{\tanh(2i\pi f d \sqrt{\bar{\epsilon}}/c) + \sqrt{\bar{\epsilon}}} \right) \quad (12)$$

پالس فرودی تراهرتز به صورت زیر فرض شده است:

$$E_1^+(t) = E_0 \exp[-(t - t_0)^2 / \tau^2] \exp(i\omega_0 t) \quad (13)$$

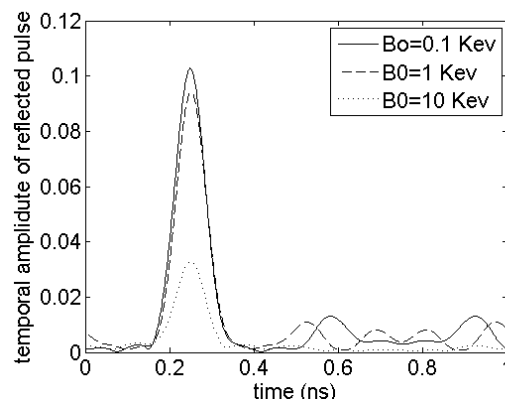
تبدیل فوریه این پالس برابر است با:

$$E^+(\omega) = E_0 \frac{\tau}{\sqrt{2}} \exp[-i(\omega - \omega_0)t_0] \times \exp[-(\frac{\omega - \omega_0}{2} \tau)^2] \quad (14)$$

۲-۳-۲- اثر میدان مغناطیسی روی دامنه زمانی

پالس انعکاسی

مطابق با شکل ۳ اندازه میدان‌ها در دمای $T = 10\text{Kev}$ و فرکانس برخورد $\nu = 0.05\text{THz}$ ، با مقادیر 0.1، 1 و $10T$ ، در نظر گرفته شده است. دیگر پارامترها، همان مقادیر بیان شده در شکل ۲ هستند. همان‌طور که از شکل ۳ پیداست افزایش میدان مغناطیسی به شدت دامنه پالس بازتابی را در بازه زمانی داده شده کاهش می‌دهد.

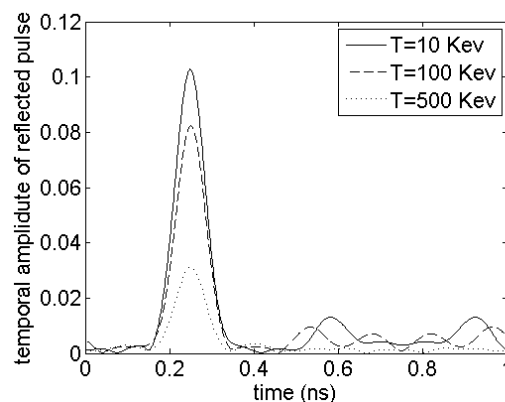


شکل ۳: دامنه زمانی پالس بازتابی بر حسب زمان در میدان مختلف

۲-۳-۳- اثر دمای الکترونی روی دامنه زمانی

پالس انعکاسی

در شکل ۴ دامنه زمانی پالس انعکاسی در میدان مغناطیسی $B_0 = 1T$ و دماهای 10، 100 و 500Kev رسم شده است. مقادیر دیگر پارامترها، همان پارامترهای بیان شده در شکل ۳ هستند. از شکل ۴ مشاهده می‌شود که با افزایش دما، دامنه زمانی پالس بازتابی کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۴: دامنه زمانی پالس بازتابی بر حسب زمان در دماهای مختلف

نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهد که دامنه زمانی پالس منعکس شده شدیداً به میدان مغناطیسی و چگالی پلاسما و دمای الکترونی وابسته است. به عبارت دیگر با افزایش چگالی، دمای الکترونی و میدان مغناطیسی، جذب انرژی از پالس توسط پلاسما افزایش می‌یابد. به علت تاثیر شدیدی که چگالی و دمای الکترونی روی دامنه پالس بازتابی دارد، می‌توان از پالس‌های بازتابی برای اندازه‌گیری چگالی و دمای الکترونی پلاسما گرم استفاده کرد. همچنین علاوه بر بررسی‌های انجام شده در این مقاله، با بررسی اثر دیگر پارامترهای پلاسما همچون فرکانس برخورد و ضخامت تیغه پلاسما روی دامنه پالس بازتابی ترانزیت، پالس‌های ترانزیت می‌توانند برای شناسایی ویژگی‌های پلاسماهایی نظیر پلاسما همجوشی هسته‌ای در میدان‌های مغناطیسی قوی، مورد استفاده قرار گیرند.

مراجع

- [1] Budden K. G., *The Propagation of Radio Waves Cambridge University Press, Cambridge, England, 1985.*
- [2] Heald M. A and Schumacher R. W., *Plasma Diagnostics with Microwaves*, P. 23, **Krieger, New York, 1978.**
- [3] Liu J. L., Zhang X. C., *Terahertz-radiation – enhanced emission of fluorescence from gas plasma, Rev. Lett. 103 2009.*
- [4] Kölner R., Tredicucci A., Beltram F., Beere H. E., Linfield E. H., Davies A. G., Ritchie D. A., Iotti R. C., Rossi F., *Terahertz Semiconductor-heterostructure laser*, pp.156-159, **Nature (London) 417 2002.**
- [5] Simon A., Anghel S. D., Papiu M., Dinu O., *Diagnostics and active species formation in an atmospheric pressure helium sterilization plasma source*, pp. 438-441, **Nucl. Instrum. Methods B 267 2009.**
- [6] Jiang Z. H., Hu X. W., Lui M. H., Lan C., Zhang S., He Y., Pan Y., *Attenuation and propagation of a scattered electromagnetic wave in two-dimensional atmospheric pressure plasma*, pp. 97-103, **Plasma Sources Sci Technol. 16 2007.**
- [7] Jamison S. P., Shen J. L., Jones D. R., *Plasma Characterization with Terahertz Time-Domain Measurements*, pp. 4334-4336, **J. Apply. Phys. 93 2003.**
- [8] Kölner B. H., Conklin P. M., Buckles R. A., *Time-resolved pulsed-plasma characterization using broadband terahertz pulses correlated with fluorescence imaging*, **Appl. Phys. Lett. 87 2005.**
- [9] Kölner B. H., Buckles R. A., Scott R. P., *Plasma characterization with terahertz pulses*, pp. 505-512 **IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron. 14 2008.**
- [10] Yuan C., Zhou Z., Xiang X., Sun H., Wang H., Xing M. Luo Z., *Propagation properties of broadband terahertz pulses through a bounded magnetized thermal plasma*, pp.23-29, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 269 2011.**