

تولید تابش تراهرتز در اندرکنش موج زنش دو لیزر گاوسی با پلاسمای گرم، برخوردی و مغناطیده

با چگالی نایکنواخت متناوب

علیرضا نیکنام^۱، محسن جودکی^۱، علی عبدالملکی^۱، مهسا صداقت^۱، حسین صابری^{۱*}، فاضل جهانگیری^۱^۱ پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۹۸۳۹۶۹۴۱۱ تهران، ایران^{*}آدرس رایانامه نویسنده مسئول: ho_saberi@sbu.ac.ir

کلید واژه: نیروی پاندروموتیو، تابش تراهرتز، پلاسمای گرم برخوردی و مغناطیده

چکیده

مکانیزمی برای تولید تابش تراهرتز رزونانسی در محیط پلاسمایی ارائه شده و مورد بررسی قرار می‌گیرد. فرض می‌شود که دو لیزر گاوسی با فرکانس‌های متفاوت و نزدیک به هم با پلاسمای گرم، برخوردی، و مغناطیده و با چگالی نایکنواخت متناوب برخورد می‌کنند. میدان مغناطیسی عمود بر تغییرات چگالی پلاسما در نظر گرفته می‌شود، ولی لیزرها همراستا با هم و در جهت نایکنواختی پلاسما انتشار می‌یابند. نیروی پاندروموتیو لیزرها در حضور میدان مغناطیسی خارجی، اثرات برخوردی و اثرات گرمایی باعث القای نوسانات عرضی الکترون‌های پلاسما می‌شود. این نوسانات عرضی در کنار چگالی متناوب پلاسما یک جریان غیرخطی عرضی تولید می‌کند که تابش الکترومغناطیسی در ناحیه تراهرتز ساطع خواهد کرد. با استفاده از معادلات ماکسول مؤلفه‌های میدان الکتریکی تابش تراهرتز به دست خواهند آمد و سپس به صورت عددی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. نشان داده می‌شود که اندازه و شدت تابش تراهرتز با افزایش دمای الکترون‌ها و نیز میدان مغناطیسی خارجی افزایش می‌یابد.

Terahertz radiation generation using beat wave of two Gaussian lasers interacting with warm, collisional and magnetized plasma with periodic density inhomogeneity

Ali Reza Niknam¹, Mohsen Joodaki¹, Ali Abdolmaleki¹, Mahsa Sedaghat¹, Hossein Saberi^{1*}, Fazel Jahangiri¹¹ Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, 1983969411, Tehran, Iran*corresponding e-mail: ho_saberi@sbu.ac.ir

Abstract

A resonant terahertz (THz) radiation generation mechanism in plasma is explored. It is assumed that a magnetized, warm and collisional plasma with one-dimensional inhomogeneity is irradiated by two Gaussian laser beams with slightly different frequencies. The magnetic field is considered to be perpendicular to the plasma density ripples, while the laser beams co-propagate along the plasma inhomogeneity. The ponderomotive force due to the lasers beat wave in the presence of the external magnetic field along with the collisional effects and electrons thermal motion induces transverse oscillations of the plasma electrons. The electrons oscillations coupled with plasma density ripples produces transverse nonlinear current density, which then emits electromagnetic radiation at THz frequency. Using Maxwell's equations the components of the emitted light are obtained, that will then be solved numerically to get an estimation of the THz radiation. It is indicated that the amplitude of the THz radiation increases by increasing the electron temperature, as well as the external magnetic field strength.

Keywords: Ponderomotive force, Terahertz radiation, Warm collisional and magnetized plasma

مقدمه

برخوردی بین الکترون‌ها و اتم‌های خنثی صرفنظر کرد. به عبارت دیگر، فرکانس برخوردی پلاسما همان فرکانس برخوردی الکترون-یون و به صورت زیر است [۷]:

$$\nu_e \approx 2.9 \times 10^{-6} \frac{Z^2 n_0 [\text{cm}^{-3}]}{(W_e [\text{eV}])^{3/2}} \ln \Lambda, \quad (1)$$

که n_0 چگالی پلاسما، $Z (=1)$ عدد اتمی، $\ln \Lambda \approx 10$ لگاریتم کولنی و $W_e \approx \sqrt{W_{\text{osc}}^2 + T_e^2}$ انرژی گرمایی، T_e و انرژی نوسانی، W_{osc} در میدان لیزر است. فرض می‌شود که پلاسما با دو لیزر با فرکانس‌های متفاوت و نزدیک به هم مورد تابش قرار می‌گیرد. لیزرها دارای قطبش خطی در راستای y هستند و فرکانس ω_z و عدد موج k_z دارند. میدان الکتریکی لیزرها به صورت گاوسی در نظر گرفته می‌شود:

$$\mathbf{E}_j = \hat{y} E_0 e^{-y^2/w_0^2} e^{-i(\omega_j t - k_j z)}, \quad (2)$$

که E_0 دامنه و w_0 اندازه لکه لیزرها است که یکسان می‌باشند. لیزرها با همدیگر تداخل کرده و با پلاسما اندرکنش می‌کنند. موج زنش تداخلی از یک بخش با نوسانات تند و یک بخش با نوسانات کند تشکیل شده است. در تقریب پاندروموتیو از نوسانات تند تغییر روی زمان میانگین گرفته شده و حذف می‌شوند. موج زنش کند تغییر با فرکانس $\omega = \omega_1 - \omega_2$ و عدد موج $k = k_1 - k_2$ ، یک نیروی پاندروموتیو غیرخطی به فرم زیر به الکترون‌های پلاسما وارد می‌کند:

$$\mathbf{F}_p^{\text{NL}} = \frac{e^2 E_0^2}{2m_e (-i\omega_1 + \nu_e)(i\omega_2 + \nu_e)} \times e^{-2y^2/w_0^2} e^{-i(\omega t - kx)} \left[ik\hat{x} - \frac{4y}{w_0^2} \hat{y} \right]. \quad (3)$$

در اثر نیروی پاندروموتیو پتانسیل بار-فضای ϕ در پلاسما القا می‌شود که در نتیجه سرعت و چگالی الکترون‌ها به صورت $\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \mathbf{v}_1$ و $n = n_0 + n_1$ اختلال پیدا می‌کنند. پلاسما در مدل سیالی با معادله تکانه، پیوستگی و معادله لاپلاس توصیف می‌شود.

امواج تراهرتز که ناحیه بین میکروویو و مادون قرمز را در بر دارد به صورت غیرهمدوس در تابش جسم سیاه مربوط به اجسام گرم اطراف ما وجود دارد. با این حال تولید امواج تراهرتز همدوس در آزمایشگاه همواره با چالش‌هایی روبرو بوده است. نیمه‌رساناها و نیز کریستال‌های غیرخطی همواره برای تولید تابش تراهرتز مورد توجه بوده است [۱]. همچنین محیط پلاسمایی در اندرکنش با لیزر نیز برای تولید تراهرتز استفاده می‌شود به خصوص هنگامی که با موج زنش دو لیزر با فرکانس‌های نزدیک به هم برخورد کند [۲،۳]. اثرات گرمایی و برخوردی پلاسما [۴]، نایکنواختی چگالی پلاسما [۵] و نیز اثر میدان مغناطیسی خارجی [۶] در پژوهش‌هایی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این پژوهش تولید تابش تراهرتز رزونانسی در اندرکنش موج زنش دو لیزر پرشدت با پلاسمای گرم برخوردی و مغناطیده که چگالی آن به صورت متناوب نایکنواخت است مورد بررسی قرار می‌گیرد. نشان داده خواهد شد که دو فرکانس تشدید (۱) مربوط به چگالی جریان غیرخطی و (۲) مربوط به تانسور گذردهی پلاسما وجود دارد. اندازه میدان و شدت تابش تراهرتز با افزایش دمای الکترون‌های پلاسما و نیز میدان مغناطیسی خارجی افزایش خواهد یافت.

اندرکنش موج زنش با پلاسما و تولید جریان غیرخطی

پلاسمای مغناطیده در میدان مغناطیسی خارجی $\mathbf{B} = B_0 \hat{z}$ در نظر گرفته می‌شود که B_0 اندازه میدان مغناطیسی و ثابت است. فرض می‌شود که چگالی پلاسما به صورت تناوبی در راستای محور x مدوله شده است به گونه‌ای که $n = n_0 + n_k$ و $n_k = n_{0k} e^{ikx}$ چگالی تناوبی پلاسما با عدد موج k و دامنه n_{0k} است. به علاوه، محیط پلاسما، گرم و برخوردی در نظر گرفته می‌شود.

فرض می‌شود که در اثر اندرکنش لیزرهای پرتوان، پلاسمای شبه‌خنثی و تک یون ایجاد می‌شود. در این صورت می‌توان از اثرات

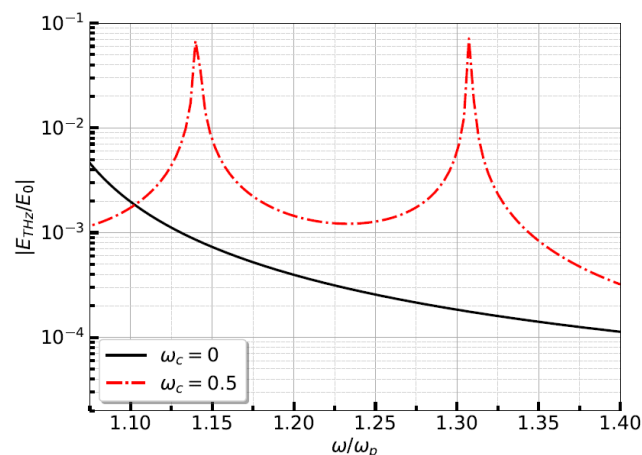
باشد. معادله موج تابش از معادلات ماکسول به دست می‌آید. به عبارت دیگر می‌توان نشان داد در صورتی که دامنه میدان ترازتر تابشی کند تغییر باشد، میدان الکتریکی آن از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\mathbf{E}_T = \frac{4\pi i}{\omega} \mathbf{J}^{NL}, \quad (11)$$

که $\mathbf{E}$ تانسور گذردهی پلاسمای مغناطیسه، و گرم و برخوردی است [۸].

برای آنکه تخمینی از میدان ترازتر تابشی به دست آوریم، دامنه میدان به صورت عددی محاسبه می‌شود. پارامترهای عددی به صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند: $\omega_1 = 2.4 \times 10^{15} \text{ rad/s}$ ، $T_e = 20 \text{ keV}$ ، $n_{0K} = 0.1 n_0$ ، $\omega_p = 2 \times 10^{13} \text{ rad/s}$ ، $I = 10^{14} \text{ W/cm}^2$ ، $w_0 = 0.8 \text{ mm}$ ، $W_{osc} = 5 \text{ eV}$ ترازتر در نقطه $x = 100c/\omega_p$ و $y = 0.9 w_0$ محاسبه خواهد شد.

در شکل ۱ تغییرات دامنه بهنجار شده میدان ترازتر با فرکانس در حضور میدان مغناطیسی و بدون میدان مغناطیسی خارجی رسم شده است. دو فرکانس تشدید در حضور میدان مغناطیسی قابل مشاهده است. این فرکانس‌های تشدید مربوط به چگالی جریان غیرخطی و نیز تانسور گذردهی پلاسما هستند که از معادله (۱۱) نیز قابل پیش‌بینی هستند.



شکل ۱. تغییرات تابش ترازتر بر حسب فرکانس در حضور میدان مغناطیسی (نقطه‌خط) و بدون میدان مغناطیسی خارجی (خط پر).

با انجام پاره‌ای محاسبات، معادلات سیالی خطی شده به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$m_e \frac{\partial \mathbf{v}_1}{\partial t} = \mathbf{F}^L + \mathbf{F}^{NL}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial n_1}{\partial t} + \nabla \cdot (n_1 \mathbf{v}_1) = 0, \quad (5)$$

$$\nabla^2 \varphi = en_1 / \epsilon_0. \quad (6)$$

نیروهای خطی و غیرخطی به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\mathbf{F}^L = e \nabla \varphi, \quad (7)$$

$$\mathbf{F}^{NL} = \mathbf{F}_p^{NL} - e \mathbf{v}^{NL} \times \mathbf{B} - v_e \mathbf{v}^{NL} - \frac{T_e}{n_0} \nabla n^{NL} \quad (8)$$

در اثر نیروهای خطی و غیرخطی، کمیت‌های اختلالی نیز به صورت ترکیبی از تغییرات خطی و غیرخطی خواهند بود. به عبارت دیگر $n_1 = n^L + n^{NL}$ و $\mathbf{v}_1 = \mathbf{v}^L + \mathbf{v}^{NL}$ با حل معادلات (۴)–(۶) و جداسازی بخش‌های خطی و غیرخطی می‌توان سرعت غیرخطی الکترون‌های پلاسما را به صورت زیر به دست آورد:

$$\mathbf{v}^{NL} = - \frac{1}{m_e \omega_k^2 \left[i \omega \omega_k^2 + (i \omega - v_e) (\omega_p^2 + k^2 v_{th}^2) \right]} \times \left\{ \left[i \omega \omega_k^2 + (i \omega - v_e) (\omega_p^2 + v_{th}^2 (k^2 + \nabla^2)) \right] (\mathbf{F}_p^{NL} \times \Omega_c) + \left[(i \omega - v_e) (i \omega \omega_k^2 + (i \omega - v_e) v_{th}^2 (k^2 + \nabla^2)) - \omega_p^2 \omega_c^2 \right] \mathbf{F}_p^{NL} \right\}, \quad (9)$$

که در آن $\Omega_c \equiv \omega_c \hat{z}$ و $\omega_k^2 \equiv (i \omega - v_e)^2 + \omega_c^2$.

در اثر جفت‌شدگی سرعت غیرخطی الکترون‌ها و تغییرات تناوبی چگالی پلاسما، چگالی جریان غیرخطی الکترون‌ها به صورت زیر به دست می‌آید:

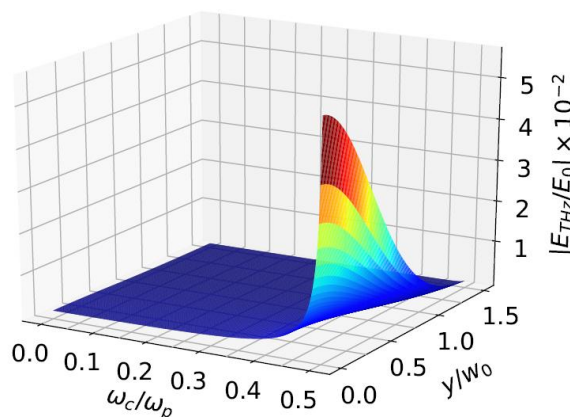
$$\mathbf{J}^{NL} = - \frac{1}{2} e n_K \mathbf{v}^{NL}. \quad (10)$$

محاسبات عددی تابش ترازتر

چگالی جریان غیرخطی الکترون‌ها، یک تابش الکترومغناطیسی با فرکانس $\omega_T = \omega$ و عدد موج $k_T = k + K$ ساطع می‌کند. با انتخاب لیزرهای مناسب، این فرکانس می‌تواند در ناحیه ترازتر

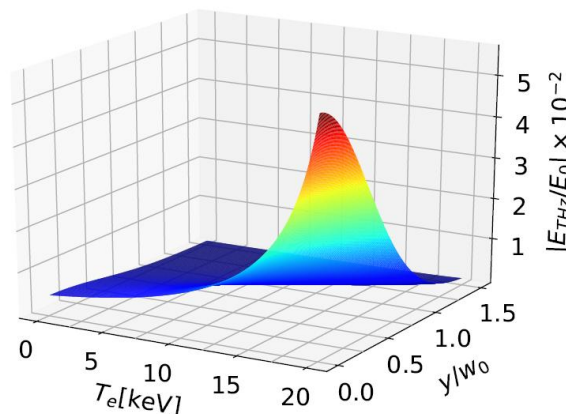
نتیجه گیری

تولید تابش تراهرتز رزونانسی در اندرکنش موج زنش دو لیزر پرشدت با پلاسمای گرم، برخوردی و مغناطیده که چگالی آن به صورت نایکونواخت است، مورد بررسی قرار گرفت. دو فرکانس تشدیدی مربوط به چگالی جریان غیرخطی و تانسور گذردهی پلاسما وجود دارد. اندازه میدان تراهرتز تابشی با افزایش دمای الکترون‌های پلاسما (کاهش فرکانس برخورد) و افزایش قدرت میدان مغناطیسی خارجی تقویت می‌شود.



شکل ۳. نمودار کانتور تغییرات دامنه بهنجار شده تابش تراهرتز بر حسب فرکانس سیکلوترونی (میدان مغناطیسی) و محور y .

اندازه و شدت میدان تراهرتز تابشی با اندازه میدان مغناطیسی خارجی و دمای پلاسما ارتباط دارد. برای تحقیق این موضوع اندازه میدان تراهرتز به هنجار شده بر حسب دما و محور y در شکل ۲ و بر حسب میدان مغناطیسی و محور y در شکل ۳ رسم شده است. شکل ۲ نشان می‌دهد که با افزایش دما دامنه میدان زیاد می‌شود. در واقع با توجه به اینکه $v_e \propto T_e^{-3/2}$ ، با افزایش دما فرکانس برخوردی کاهش یافته و در نتیجه دامنه تراهرتز تابشی افزایش می‌یابد. همینطور مشاهده می‌شود موج تابشی نزدیک محور $y=0$ بزرگ‌تر است و با افزایش y کاهش می‌یابد. این موضوع با توجه به پروفایل گاوسی لیزرها قابل توضیح است.



شکل ۲. نمودار کانتور تغییرات دامنه بهنجار شده تابش تراهرتز بر حسب دمای پلاسما و محور y .

مرجع ها

- [1] Gallerano G, Biedron S. (2004) in Proceeding of the 2004 FEL conference. pp. 216–221.
- [2] Hematizadeh A, Bakhtiari F, Jazayeri S, Ghafary B. (2016). *Laser and Particle Beams* 34:527.
- [3] Safari S, Niknam A. R, Jahangiri F, Jazi B. (2018). *Journal of Applied Physics*. 123:153101.
- [4] Niknam A. R, Banjafar M, Jahangiri F, Barzegar S, Massudi R. (2016). *Physics of Plasmas* 23:053110.
- [5] Mann K. L, Sajal V, Varshney P, Sharma N. K. (2017). *Physics of Plasmas* 24:123117.
- [6] Punia S, Malik H. K. (2019). *Physics Letters A* 383:1772.
- [7] Shalom E. (2002). *The Interaction of High-Power Lasers with Plasmas*. Boca Raton (FL): CRC Press.
- [8] Drummond J. (1958). *Physical Review*. 110:293.

در شکل ۳ تغییرات میدان تراهرتز با فرکانس سیکلوترونی (میدان مغناطیسی خارجی) و y رسم شده که نشان می‌دهد با افزایش میدان مغناطیسی دامنه تراهرتز زیاد می‌شود. با اعمال میدان مغناطیسی خارجی می‌توان حرکت الکترون‌ها و در نتیجه چگالی جریان غیرخطی را کنترل کرد که در نتیجه باعث رشد تابش تراهرتز خواهد شد. همینطور با توجه به پروفایل گاوسی لیزرها و مانند شکل ۲ اندازه میدان تابشی با افزایش y کاهش می‌یابد.