



اثر گونه‌های یونی با بارهای مختلف بر تولید تابش تراهرتز در پلاسما

علی‌اکبر ابراهیمی^۱، رضا شکوری صمد^۱، محمدرضا جعفری میلانی^{۲*}

^۱دانشکده علوم پایه، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین

^۲پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران

چکیده:

در این مقاله تولید تابش تراهرتز THz توسط برهمکنش دو باریکه لیزری (ω_1, ω_2) با پلاسمای شامل گونه‌های یونی با بارهای مختلف بطور تحلیلی و عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. ابتدا، توزیع چگالی الکترونی به دست آمده و سپس معادلات تحول اندازه لکه باریکه‌های لیزری در پلاسما با استفاده از تقریب پیرامحوری به دست آمد. با محاسبه چگالی جریان غیرخطی در اثر نیروی پاندرموتیو، به عنوان منبع و منشاء تابش تراهرتز در پلاسما، اثرات چگالی و بارهای گونه‌های یونی بر تابش تراهرتز بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد وجود گونه یونی با بار بیشتر، خودکانونی و در نتیجه تولید تابش تراهرتز THz را تقویت می‌کند. **کلمات کلیدی:** برهمکنش لیزر-پلاسما، تولید امواج تراهرتز، خودکانونی.

۱- مقدمه :

امواج تراهرتز^۱ (THz)، امواج الکترومغناطیسی هستند که در محدوده فرکانسی ۰/۱ تا ۱۰ THz برابر با طول‌موج‌های ۰/۱ mm تا ۳ mm قرار دارند. در سه دهه گذشته توجه ویژه‌ای به تولید و آشکار سازی امواج تراهرتز صورت گرفته است. امروزه فناوری تراهرتز بعلاوه غیریونساز بودن و قدرت نفوذ آن نسبت به امواج میکروویو فرصت‌های تحقیق بسیاری را در زمینه‌های مختلفی چون زیست‌شناسی، شیمی، علم مواد، پزشکی و فیزیک پدید آورده است که می‌توان به تصویربرداری سطح سلولی، سنجش بیولوژیکی و شیمیایی، تصویربرداری توموگرافیک، ارتباطات، تشخیص مواد منفجره، طیف‌سنجی و آزمایش‌های غیرمخرب اشاره کرد [۱-۳]. امواج تراهرتز فوتون‌های کم انرژی دارند بنابراین برخلاف پرتوهای پرنانرژی ایکس، باعث یونیدگی بافت‌های زیستی نمی‌شوند. در نتیجه هم برای نمونه و هم برای

^۱ 1T=10¹²



کاربر ایمن می باشد. میزان جذب امواج تراهرتز توسط بافت به شدت چگالی مولکولهای قطبی موجود در آن، مثل مولکولهای آب بستگی دارد. بنابراین بافت های سرطانی که دارای میزان متفاوتی از آب نسبت به بافت های سالم هستند طیف جذبی در باند تراهرتز را از خود نشان می دهند. طول موج امواج تراهرتز نسبت به امواج مرئی و فرو سرخ بلندتر است لذا تحت پراکندگی می اثرپذیری کمتری دارند [۴]. بیشترین گذر این امواج از مواد نارسانای خشک مانند لباس، چوب، کاغذ و پلاستیک است. این توانایی این امکان را فراهم می سازد که در کاربردهای امنیتی از امواج تراهرتز در آشکارسازی مواد منجره استفاده شود. طیف نگاری تراهرتز در حوزه زمان و فرکانس کاربردهای زیادی در علوم مختلف دارد، طوری که بسیاری از مواد شامل مولکول های زیستی، داروها، بافت های زیستی، پروتئین ها توسط این روش طیف سنجی شده اند. تابش تراهرتز ناحیه ای را به ما نشان می دهد که در آن امکان تولید و یا مدولاسیون سیگنال های الکترومغناطیسی هم دوس توسط ابزارهای رایج برای تولید امواج رادیویی و ریزموج هم دوس، وجود ندارد، بنابراین ابزارها و روش های جدیدی مورد نیاز است. لذا به این ناحیه فرکانسی، در طیف الکترومغناطیسی شکاف تراهرتز می گویند. یک روش مطمئن برای تولید امواج THz چالش بزرگی برای جامعه علمی و صنعتی است. یکی از چالش عمده که مانع از بهره برداری کامل از THz می شود، فقدان منابع تراهرتز ارزان قیمت، جمع و جور و قدرتمند است. روش های مختلفی برای تولید تراهرتز وجود دارد منابع در دسترس مبتنی بر شتابدهنده بزرگ و یا منابع مبتنی بر لیزر بر اساس فرآیندهای غیرخطی نوری است. به جهت حجم بزرگ شتابدهنده ها، این منابع برای توسعه منبع THz کوچک و قابل حمل عملی و مناسب نیست. توان منابع تراهرتز راه اندازی شده توسط لیزر نیز، به علت آستانه تخریب مواد مورد استفاده محدود می شوند. زیرا در طول فرآیند تولید تراهرتز این مواد تحت تاثیر پالسهای لیزر پر شدت آسیب می بینند. برای غلبه بر مشکل آستانه تخریب مواد، محیط پلاسما به عنوان محیط جایگزین مورد بررسی قرار گرفته است. محیط پلاسما به علت وضعیت یونیزه، می تواند میدان های الکتریکی بسیار بالایی را تحمل کند و همچنین اثرات غیرخطی قوی را نشان می دهد. در این راستا تحقیقات زیادی در مطالعه انتشار باریکه لیزری شدت بالا در پلاسما برای تولید THz انجام شده است [۵-۶]. اکثر پلاسماهای تجربی، شامل انواع یون ها با درجه یونش متفاوت بوده لذا در این مقاله تولید تابش تراهرتز توسط دو باریکه لیزری گاوسی با فرکانس های ω_1 و ω_2 در یک پلاسما در با چگالی مدوله شده پیرویدیک با گونه های یونی و با بارهای مختلف در حضور اثرات غیرخطی نیروی پاندرموتیو^۲ و میدان بار-فضا^۳ مطالعه قرار گرفته است. شکل ۱ طرح واره تولید امواج تراهرتز ناشی از برهمکنش دو باریکه لیزری با فرکانس های (ω_1, ω_2) را نشان می دهد.

^۲ Ponderomotive force

^۳ Space-charge



شکل ۱: طرح‌واره تولید امواج تراهرتز ناشی از برهمکنش دو باریکه لیزری با فرکانس‌های (ω_1, ω_2)

در اثر برهمکنش دو باریکه لیزری (پمپ) با پلاسما، یک چگالی جریان غیرخطی در داخل پلاسما ایجاد می‌شود که به عنوان منبع موج تراهرتز شناخته می‌شود. جزئیات بیشتر در بخش (۲-۲) ارائه شده است.

۲- محاسبات نظری

۲-۱ تحول دو باریکه لیزری حین انتشار در پلاسما

دو باریکه لیزر گاو سی، $\vec{E}_q = \hat{x}A_q \exp(-i(k_q z - \omega_q t))$ (پمپ) با بسامدها و بردارهای موج $(q=1,2)\omega_q, k_q$ را در نظر بگیرید که در راستای محور Z در یک پلاسما با چگالی مدوله شده پرپودیک $\mathbf{n} = \mathbf{n}_{e0} + \mathbf{n}_r$ منتشر می‌شود. n_{e0} چگالی یکنواخت اولیه و $n_r = n' e^{iKz}$ چگالی دوره‌ایی با دامنه n' . چگالی الکترونی و بدنبال آن تابع دی‌الکتریک (ضریب شکست) پلاسما در نتیجه اعمال نیروی پاندرموتیو از سوی دو باریکه لیزری تغییر کرده که بر مشخصه‌های باریکه در حین انتشار در پلاسما اثر می‌گذارد. از معادله تکانه برای الکترون‌ها و یون‌ها شامل ترم‌های گرادیان فشار، بار-فضا و نیروی پاندرموتیو در حالت مانا، توزیع چگالی الکترون‌ها با معادله زیر داده می‌شود [۶]:

$$n_e = \sum_j Z_j n_{j0} \left(\frac{n_e}{n_{e0}} \right)^{-\eta_j} \exp(-\eta_j \alpha_1 E_1 E_1^*) \exp(-\eta_j \alpha_2 E_2 E_2^*) \quad (1)$$

که در آن $\eta = T_{e0}/T_{i0}$ ، $\alpha_1 = e^2/4m_e T_{e0} \omega_1^2$ ، $\alpha_2 = e^2/4m_e T_{e0} \omega_2^2$ ، T_{i0}, T_{e0} دمای اولیه الکترون و یون، n_{j0} چگالی اولیه یون j ام و Z گونه یون را نشان می‌دهد. برای باریکه لیزر گاوسی دامنه مختلط A_q را به صورت $\bar{A}_q = \bar{A}_{0q}(r, z) \exp[-ik_q S_q(r, z)]$ در نظر می‌گیریم که در آن $\bar{A}_{0q} = \frac{A_{00q}^2}{f_q(z)} \exp\left(\frac{-r_q^2}{f_q(z)^2 r_{0q}^2}\right)$ و S_q تابع آیکونال نام دارد [۸]. A_{00} دامنه اولیه میدان الکتریکی لیزر، r_0 اندازه لکه اولیه و f پارامتر بی‌بعد پرتو (بیانگر اندازه لکه لیزر) است. می‌توان تابع دی‌الکتریک را در تقریب پیرامحوری، حول r تا مرتبه دوم بسط (تیلور) داد: $\varepsilon(r, z) = \varepsilon_0(z) + r^2 \varepsilon_r$ که در آن $\varepsilon_0(z) = [\varepsilon(r, z)]_{r=0}$ و $\varepsilon_r(z) = \partial \varepsilon(r, z) / \partial r^2 |_{r=0}$. با روش مشابه آنچه که در مرجع [۹] بکار رفته، معادلات (بی‌بعد شده) انتشار کوپل شده باریکه‌های لیزری گاوسی در یک پلاسمای چند یونی حاصل می‌شود:



$$\epsilon_{0q} \frac{\partial^2 f_q}{\partial \xi_q^2} = \frac{1}{f_q^3} - \rho_q^2 \epsilon_{rq} f_q, \quad (2)$$

اندازه لکه باریکه‌ها f_q بدست آمد در ادامه به تولید میدان تراهرتز در پلاسما می‌پردازیم. $\xi_q = zc/r_0^2 \omega_q$ (طول انتشار بهنجار) و $\rho_{0q} = r_0 \omega_q / c$ متغیرهای بدون بعد هستند. حال که رابطه مربوط به تحول

۲-۲ تولید امواج تراهرتز

در این قسمت به نحوه تولید موج تراهرتز در اثر انتشار و تحول باریکه‌های لیزری (پمپ) در پلاسمایی که دارای چگالی دوره‌ای است می‌پردازیم. توزیع فضایی (گاوسی شکل) باریکه‌های لیزری منجر به نیروی غیرخطی پاندرموتیو $\mathbf{F}_p^{NL} = -(m_e/2)\nabla(\mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{v}_2^*)$ در فرکانس زنش $\omega_T = \omega_1 - \omega_2$ خواهد شد که در آن $\mathbf{v}_j = -eE_j / im_e \omega_j$ سرعت نوسانی الکترون‌ها تحت تابش لیزر است [۹]. در اثر این نیروی غیرخطی افت و خیز چگالی الکترون‌ها نیز غیرخطی خواهد بود بنابراین با حل همزمان معادلات تکانه و پیوستگی چگالی به روش اختلالی [۱۰]، سرعت غیرخطی الکترون‌ها بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\mathbf{v}^{NL} = \frac{i\omega \mathbf{F}_p^{NL}}{m_e[-\omega^2 + k^2 v_{th}^2 + \omega_p^2]}. \quad (3)$$

در اثر کوپلاژ سرعت \mathbf{v}^{NL} با چگالی پریودیک n_r یک چگالی جریان الکترونی $\mathbf{J}^{NL} = -\frac{1}{2} n_r e \mathbf{v}^{NL}$ حاصل می‌شود که بیانگر یک جریان قوی در فرکانس تراهرتز ω_T است. معادله موج حاکم بر میدان تابشی تراهرتز E_T در پلازما با رابطه زیر داده می‌شود:

$$-\nabla^2 \mathbf{E}_{THz} + \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}_{THz}) = \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon \mathbf{E}_{THz} - \frac{4\pi i \omega}{c^2} \mathbf{J}^{NL}. \quad (4)$$

با استفاده از چگالی جریان \mathbf{J}^{NL} در معادله (۴) و انجام عملیات ریاضی، دامنه میدان تابش تراهرتز بصورت زیر خواهد بود:

$$E_T = \frac{1}{\epsilon} \frac{\omega_p^2 n_r |v_2^*|}{4n_0(i\omega_1 + \nu_1)} \frac{A_{01}}{f_1 f_2} \left[\left(\frac{1}{f_1^2} + \frac{1}{f_2^2} \right) \frac{r}{r_0^2} + i(k_1 \frac{\partial s_{1r}}{\partial r} - k_2 \frac{\partial s_{2r}}{\partial r}) \right] \times \frac{1}{[-\omega^2 + k^2 v_{th}^2 + \omega_p^2]} \times \exp\left(\frac{-r^2}{2r_0^2} \left(\frac{1}{f_1^2} + \frac{1}{f_2^2} \right)\right) \exp(-i(k_1 s_{1r} - k_2 s_{2r})) \times \exp(i(\omega t - kz)). \quad (5)$$

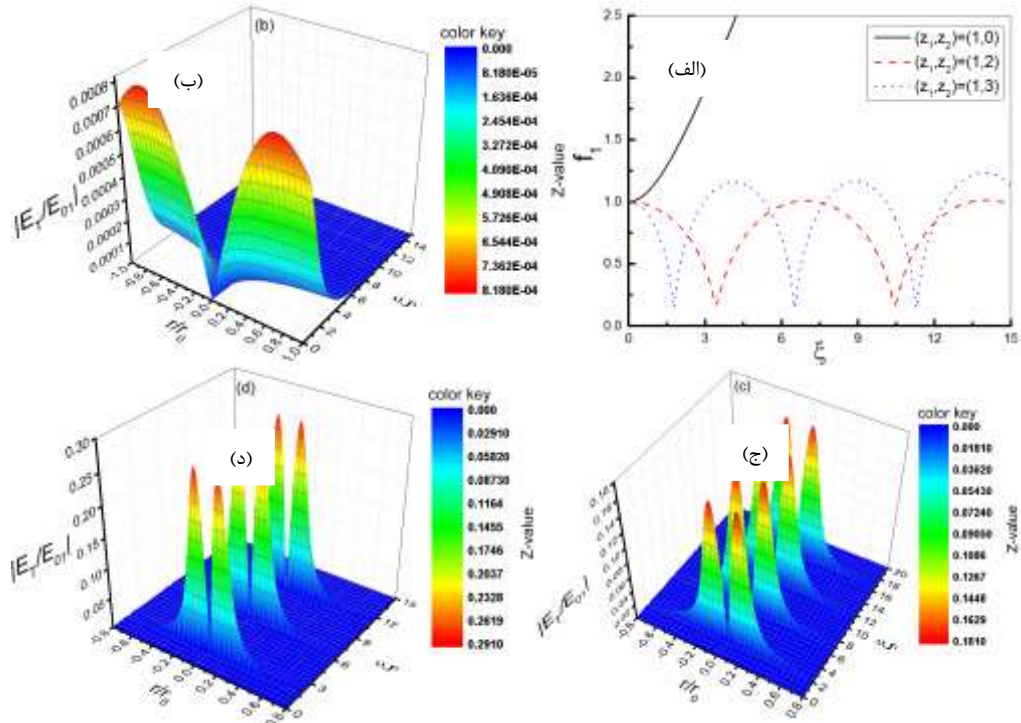
همان طوریکه از معادله بالا دیده می‌شود میدان تراهرتز وابسته به چگالی اولیه پلاسما (ω_p) و اندازه لکه باریکه‌های پمپ (f_q) است. بنابراین تغییرات و تحولات هریک از آنها در تولید تابش تراهرتز نقش اساسی دارد.



۳- بحث و نتایج

در بخش قبل معادلات (۲) مربوط به تحول اندازه لکه باریکه لیزرها حین انتشار در پلاسما بدست آمد، لذا با در نظر گرفتن این معادلات، همراه با معادله (۵) تولید تابش تراهرتز در یک پلاسمای چند یونی توسط دو باریکه لیزری (پمپ) را مورد بررسی قرار می‌دهیم. پارامترهای اولیه دو باریکه لیزر و پلاسما عبارتند از $\omega_1 = 1.77 \times 10^{15} \text{ rad/s}$ (متناظر با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر لیزر Nd:YAG)، $\omega_2 = 1.6 \times 10^{15}$ ، $r_{10} = r_{20} = 20 \mu\text{m}$ (اندازه لکه باریکه‌های لیزری)، $T_{e0} = 1 \text{ keV}$ (دمای پلاسمای نوعی)، $n_{e0} = 8.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (چگالی اولیه پلاسمای نوعی) و $n' = 0.2 n_{e0}$ معادلات کوپل شده به روش عددی و با شرایط اولیه $f'_q = 0$ ، $f_q = 1$ در $\xi = 0$ حل شدند.

اثر یون‌های چند بار یونیزه در یک پلاسمای چند یونی بر روی انتشار و خودکانونی باریکه‌ها و نیز تابش تراهرتز برای شرایط مختلف لیزری و پلاسمایی بررسی شد. در شکل ۲ (الف) تغییرات اندازه لکه باریکه (تغییرات پارامتر پرتو) f_1 ، بر حسب مسافت انتشار ξ در داخل پلاسما، برای $I_{01} (= I_{02}) \approx 8 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ و $n_{10} = 0.5 n_{e0}$ مختلف (Z_1, Z_2) رسم شده است. مقدار $f_q < 1$ ، $f_q > 1$ به ترتیب بیانگر واکانونی یا خودکانونی باریکه لیزر است. حضور گونه‌های متفاوت یونی با بارهای بیشتر تاثیر قابل توجهی در نوع رژیم انتشار و تولید تراهرتز دارد. دیده می‌شود اولاً رژیم انتشار باریکه‌ها برای یک شدت ثابت I_{01} ، با افزایش مقدار Z_2 از صفر تا ۳، از واگرایی ($f_1 > 1$) به خودکانونی نوسانی ($0 < f_1 < 1$) تغییر یافته است. همچنین اندازه پهنای باریکه f برای $Z_2 = 3$ از دو مقدار Z_2 دیگر کمتر است به عبارتی به قدرت خودکانونی افزوده شده است. دلیل این امر را می‌توان چنین توضیح داد: در اثر وجود گونه‌های مختلف یونی، نیروی میدان بار-فضا بیشتر ظاهر شده و جمعیت الکترونی بیشتری را تحت تاثیر قرار داده و در نتیجه اثرات غیرخطی در این حالت بیشتر نمود پیدا می‌کند که موجب همگرایی بیشتر باریکه‌ها و نیز تولید تابش تراهرتز بیشتری می‌شود.



شکل ۲: (الف) تغییرات پارامتر پهنای باریکه f_1 بر حسب مسافت انتشار z (ب-د) دامنه تابش تراهرتز بر حسب مسافت انتشار و شعاع باریکه. (ب $Z_2 = 0$ ج $Z_2 = 2$ د $Z_2 = 3$)

شکل ۲ (ب-د) میدان موج تراهرتز بهنجار شده، متناظر با آن Z_2 ها را بر حسب مسافت انتشار و شعاع باریکه r/r_0 نشان می‌دهد. رفتار میدان موج تراهرتز مشابه رفتار پارامتر باریکه f است. یعنی جایی که f نوسانی است میدان THz نیز نوسانی است. در شکل ۲ (ب) با توجه به رفتار f (برای $Z_2 = 0$) که باریکه‌های پمپ در حین انتشار در پلاسما واگرا می‌شود تابش تراهرتز هنگام ورود لیزرهای پمپ به پلاسما تولید می‌شود و با واگرا شدن باریکه‌ها به سرعت از بین می‌رود. شکل ۲ (د) نشان می‌دهد برای $Z_2 = 3$ تولید تابش تراهرتز بیشینه بوده و همچنین متناظر با رفتار f ، رفتار میدان THz نیز در طول انتشار در پلاسما نوسانی است. مقدار تابش تراهرتز برای رژیم واکانونی (شکل ۱-ب)، بسیار کمتر از رژیم خودکانونی (شکل ۱-د) است. به عبارتی در اثر خودکانونی لیزر، شدت موضعی بالا رفته و تولید تراهرتز هم با توجه به رابطه (۵) زیاد می‌شود. بنابراین وجود یون‌ها با بارهای بیشتر موجب تقویت تولید امواج THz می‌شود. علت رفتارهای مذکور از روی تابع دی‌الکتریک ϵ_r که مسئول خودکانونی باریکه است قابل توضیح است. در واقع



اثرات غیرخطی با حضور یون‌های مختلف تقویت شده و این باعث ازدیاد تابع ϵ_r می‌شود و این نیز به نوبه خود باعث افزایش میدان THz می‌شود.

۴- نتیجه گیری:

در این کار تولید میدان تراهرتز ناشی از خودکانونی دو باریکه لیزری گاوسی منتشر شده در یک پلاسما با گونه‌های متفاوت یونی و با بارهای مختلف مطالعه شد. نتایج نشان داد وجود یون‌های با بار بیشتر در یک پلاسما رژیم انتشار لیزر در آن را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد. به نحوی که اگر باریکه لیزر در ابتدا در رژیم واگرایی باشد با افزایش بار یون‌ها رژیم انتشار به خودکانونی تغییر می‌یابد. این تغییر رژیم از واگرایی به خودکانونی به علت افزایش شدت موضعی لیزرهای پمپ، باعث افزایش تولید تراهرتز در پلاسما می‌شود. حضور یون‌های مختلف با بارهای بیشتر در پلاسما موجب افزایش میدان بار-فضا و قوی‌تر شدن اثرات غیرخطی شده که در نتیجه آن خودکانونی باریکه‌ها و نیز دامنه تابش تراهرتز افزایش می‌یابد.

مراجع :

- [1] E. Pickwell, V. Wallace, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **2006**, *39*, R301.
- [2] M. C. Beard, G. M. Turner, C. A. Schmuttenmaer, *J. Phys. Chem. B* **2002**, *106*, 7146.
- [3] H. Zhong, A. Redo-Sanchez, X. C. Zhang, *Opt. Express* **2006**, *14*, 9130.
- [4] M.C. Hoffmann, J.A. Fulop, *J. Phys. D Appl. Phys.* **44** (2011) 083001.
- [5] D. Tripathi, L. Bhasin, R. Uma, and V. Tripathi, *Phys. Plasmas* **17**, 113113 (2010).
- [6] A. Borisov, A. Borovskiy, V. Korobkin, A. Prokhorov, O. Shiryaev, X. Shi, T. Luk, A. McPherson, J. Solem, K. Boyer et al., *Phys. Rev. Lett.* **68**, 2309 (1992).
- [7] M. R. J. Milani, S. Rezaei and M. J. Jafari, *Contrib. Plasma Phys.* **59**, (2019)
- [8] Sodha, M., R. Khanna, and V. Tripathi, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1974. **7**(16): p. 2188
- [9] M. J. Milani, A. Niknam, A. Farahbod, *Phys. Plasmas* **2014**, *21*, 063107.
- [10] A. Niknam, M. Banjafar, F. Jahangiri, S. Barzegar, R. Massudi, *Phys. Plasmas* **2016**, *23*, 053110.



بیست و ششمین کنفرانس هم‌تای ایران

۸۷۷ اسفندماه ۱۳۹۸ - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران

