بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

مطالعه تاثیر چیرپ و پهنای زمانی پالس فوق کوتاه اولیه بر شدت تابش تراهرتز تولید شده از افروزش در هوا

سید مجتبی هاشمی پیکر، سمیه نجفی، فاضل جهانگیری و رضا مسعودی

پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، اوین، تهران

چکیده – در این مقاله تابش تراهرتز ناشی از افروزه در هوا، با تعمیم مدل تابش چرنکوف، بررسی و محاسبات مربوط به رفتار تابش تراهرتز تولید شده تحت تاثیر چیرپ و پهنای زمانی پالس اولیه انجام شده است. بدین ترتیب آنچه در آزمایش‌های انجام شده تا کنون در این زمینه، مشاهده شده است، برای اولین بار بصورت تئوری توجیه و علت بروز آن پدیده بیان می‌شود.

کلید واژه- افروزش، پالس فوق کوتاه، پهنای زمانی، تراهرتز، چیرپ.

Study of the effect of chirp and pulse duration of initial ultra-short pulse on generated THz radiation intensity from filamentation in air

Seyed Mojtaba Hashemi Peykar, Somayeh Najafi, Fazel Jahangiri and Reza Massudi

Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Evin,Tehran,

Abstract- In this paper, generated terahertz from filament in air has been considered by generalization of the Cherenkov radiation model and also numerical calculations related to THz radiation behavior which influenced by effect of chirp and pulse duration of initial ultra-short pulse have been done. Therefore, what is observed in the previous experimental works is justified and the cause of phenomenon is expressed.

Keywords: chirp, filamentation, pulse duration, terahertz, ultra-short pulse

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

۱- مقدمه

امواج تراهرتز بین امواج ماکروویو و فروسرخ قرار داشته و به دلیل ویژگی‌های منحصر بفردی که دارند، دارای کاربردهای زیادی در پزشکی، مخابرات، امور امنیتی، طیف‌سنجی، نظامی و... هستند. بسیاری از این کاربردها مستلزم انتشار تراهرتز در فواصل بلند است که جذب بالای این امواج توسط بخار آب موجود در اتمسفر، محدودیت مهمی در این زمینه می‌باشد. یکی از روش‌های غلبه بر این مشکل، تولید تابش تراهرتز با استفاده از افروزش لیزری است. اگر توزیع شدت عرضی پرتو به نحوی باشد که شدت در مرکز آن نسبت به لبه‌ها بیشتر (مثلا گاوسی) و همچنین قله توانی آن بزرگتر از توان بحرانی هوا باشد، پرتو در حین انتشار در محیط به دلیل ضریب شکست غیرخطی متناسب با شدت پرتو، خودکانونی شده و شدت آن افزایش می‌یابد. افزایش شدت، یونیزه شدن محیط را همراه خواهد داشت. با زیاد شدن چگالی الکترون‌ها، محیط پلاسما تشکیل خواهد شد که اثر آن مخالف اثر خودکانونی است. به عبارت دیگر وجود محیط پلاسما باعث واگرایی پرتو خواهد شد. با کاهش شدت پرتو، پالس در ادامه انتشار، چگالی کمتری از الکترون‌ها را خواهد دید، که به معنی کوچک شدن جمله واگرایی و غالب شدن دوباره پدیده خودکانونی در محیط است و اگر توان پرتو بعد از واگرایی (که مقداری از آن صرف یونیزه کردن محیط شده) بیشتر از توان بحرانی هوا باشد، دوباره پدیده خود کانونی شدن اتفاق می‌افتد و این چرخه تا زمانی که قله توانی پالس بیشتر از توان بحرانی هوا باشد ادامه پیدا می‌کند. در نتیجه پرتو بدون واگرایی مربوط به پراش، می‌تواند تا فاصله‌های بسیار زیاد با شدت زیاد منتشر شود. به این نوع انتشار پالس، افروزش می‌گویند. افروزش دارای ویژگی‌های جالب و منحصر به فردی است به نحوی که کاربردهای خاصی را شامل می‌شود[۱]. یکی از این ویژگی‌ها، تابش امواج تراهرتز در اثر حرکت نوسانی میرا الکترون‌های پلاسما تولید شده، تحت تاثیر نیروی پاندرماتیو است. به این ترتیب افروزه می‌تواند به عنوان آنتن تراهرتز در فواصل دور عمل کند.

مطالعات زیادی برای بهینه‌سازی تابش تراهرتز ناشی از افروزه انجام شده است. از پارامترهای تاثیرگذار بر شدت تابش تراهرتز، چیرپ و پهنای زمانی پالس ورودی است. آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهند که به ازای چیرپ یا پهنای زمانی خاصی از پالس برای افروزه دورنگی، شدت تابش بیشینه می‌شود و برای توجیه این رفتار، دلایل کیفی نیز ارایه شده‌است[۲].

در این مطالعه ابتدا معادله انتشار غیر خطی پالس فوق کوتاه در هوا که با معادله چگالی الکترون جفت شده، مطابق مرجع [۳] بطور عددی حل شده و سپس با در نظرگرفتن حرکت نوسانی الکترون‌های تولید شده بر اثر یونیزاسیون محیط، تحت تاثیر نیروی پاندرماتیو، میزان تابش تراهرتز در شرایط متفاوت چیرپ و پهنای زمانی پالس محاسبه و بررسی می‌شود. نتایج محاسبات توافق خوبی با آنچه تا کنون در آزمایش‌ها مشاهده شده، نشان می‌دهد. به این ترتیب برای اولین بار تئوری رفتار تابش افروزه تحت تاثیر چیرپ و پهنای زمانی اولیه بیان می شود. با بررسی گرادیان شدت در شرایط اولیه متفاوت، می توان علت این رفتار را به تفاوت در نیروی پاندرماتیوی که به یون‌ها وارد می‌شود، نسبت داد.

۲- تئوری

برای بدست آوردن میدان الکتریکی پالس فوق کوتاه در طول انتشار معادلات(۱و۲) باید همزمان به طور عددی حل شوند[۳].

$$\frac{\partial A}{\partial z}=\frac{ic}{2\omega_0}\nabla_T^2 A+\frac{2\omega_0 n_2 P_{in}}{c\pi r_0^2}|A|^2 A-\frac{2\pi e^2}{\omega_0 c m_e}\times\left(1-\frac{i\nu_e}{\omega_0}\right)\rho A-\frac{\pi k_0 U_I c r_0^2}{4\omega_0 P_{in}|A|^2}\frac{\partial\rho}{\partial t}A-\frac{i\beta_2}{2}\frac{\partial^2 A}{\partial t^2}+\frac{2iP_{in}n_R\left(\omega_R^2+\Gamma^2\right)\omega_0}{\pi\omega_R r_0^2 c}\times\left(\int e^{-\Gamma(t-t')}\sin\left(\omega_R(t-t')\right)|A(r,z,t')|^2 dt'\right)A \quad (۱)$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}=\frac{2\pi\omega_0}{(l-1)!}\left(\frac{2P_{in}}{\pi r_0^2 I_{mp}}\right)^l |A|^l\left(n_n-\rho\right) \quad (۲)$$

با محاسبه توزیع فضا-زمانی دامنه میدان الکتریکی و استفاده از معادلات تابش(۳و۴)، می‌توان شدت تابش تراهرتز را بدست آورد[۳].

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

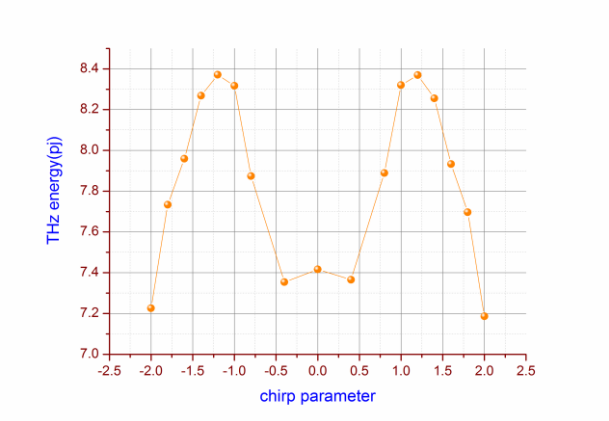
$$\left.\frac{d^2W}{d\omega d\Omega}\right]_z = \frac{1}{4\pi^3\varepsilon_0 c}\frac{\sin^2(\theta)\sin^2\left[\frac{l_d\omega}{2c}(1-\cos(\theta))\right]}{(1-\cos(\theta))^2} \quad (۳)$$
$$\times\left|\int_{-t_0/2}^{t_0/2}\int_0^r J_z(r,t)e^{-ik_0 r\sin(\theta)+i\omega t}drdt\right|^2$$

و نیز:

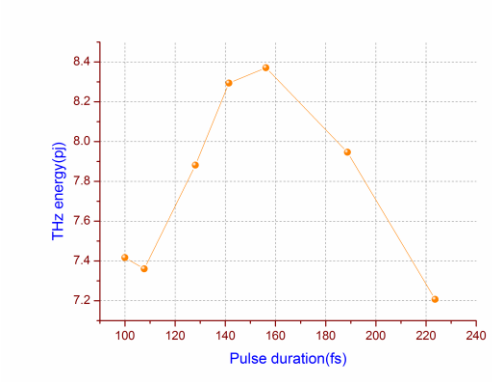
$$J_z(r,t) = -\frac{e\omega\omega_p^2(\omega+2i\nu_e)}{2mc^2\omega_0^2(\omega^2-\omega_p^2+i\nu_e\omega)}I_l(r,t) \quad (۴)$$

۳- نتایج و بحث

معادلات (۱و۲) برای پالس‌های با انرژی ۴ میلی‌ژول و پهنای طیفی ثابت تقریبا ۱۰ نانومتر(معادل ۱۰۰ فمتوثانیه بدون چیرپ) و چیرپ‌های متفاوت۲±، ۱/۸± ، ۱/۶± ، ۱/۴± ، ۱/۲± ، ۱± ، ۰/۸± ، ۰/۴± و ۰، با استفاده از روش تفاضل محدود حل شده و با استفاده از معادلات (۳و۴)، و طول افروزه ۱۰ سانتیمتری، شدت تابش تراهرتز برای آن‌ها حساب شده است(شکل۱). همانطور که در شکل دیده می‌شود به ازای چیرپ ۱/۲±، شدت تابش تراهرتز بیشینه است و برای چیرپ‌های بزرگتر یا کوچکتر شدت کمتر می‌شود. رفتاری که در این شکل دیده می‌شود مشابه رفتاری که در مرجع [۲] برای تابش تراهرتز ناشی از افروزه‌های دو رنگی به صورت تجربی گزارش شده، می‌باشد که تاییدی بر صحت رهیافت استفاده شده برای محاسبه شدت تابش تراهرتز تولید شده است. در ادامه برای دریافت این نکته، که علت چنین رفتاری به پهنای متفاوت زمانی مربوط می‌شود یا به وجود چیرپ، محاسبات برای پالس‌های بدون چیرپی که دارای انرژی ۴ میلی‌ژول و پهناهای زمانی۱۰۰، ۱۰۷/۷، ۱۲۸/۰۶، ۱۴۱/۴۲، ۱۵۶/۲، ۱۸۸/۶۸، ۲۲۳/۶ فمتوثانیه که متناظر با چیرپ‌های شکل (۱) هستند، انجام شده و مشاهده شد که رفتار شدت تابش تراهرتز مانند رفتار پالس‌های دارای چیرپ در شکل (۱) بوده (شکل۲)، و نیز بیشینه در ۱۵۶/۲ فمتوثانیه که معادل چیرپ ۱/۲± در شکل (۱) است، قرار دارد. به این ترتیب دیده می‌شود که عامل این رفتار، تفاوت در پهنای زمانی پالس فوق کوتاه اولیه بوده و چیرپ نقشی در این موضوع ندارد.



شکل ۱: شدت تابش تراهرتز برای پالسی با پهنای طیفی ثابت تقریبا ۱۰ نانومتر، پهنای زمانی ۱۰۰ فمتوثانیه برای چیرپ صفر و انرژی ۴ میلی‌ژول و پارامترهای چیرپ متفاوت۲±، ۱/۸± ، ۱/۶± ، ۱/۴± ، ۱/۲± ، ۱± ، ۰/۸± ، ۰/۴± و ۰



شکل ۲: شدت تابش تراهرتز برای پالس های با انرژی ۴ میلی‌ژول، بدون چیرپ و پهناهای زمانی۱۰۰، ۱۰۷/۷، ۱۲۸/۰۶، ۱۴۱/۴۲، ۱۵۶/۲، ۱۸۸/۶۸ و ۲۲۳/۶ فمتوثانیه

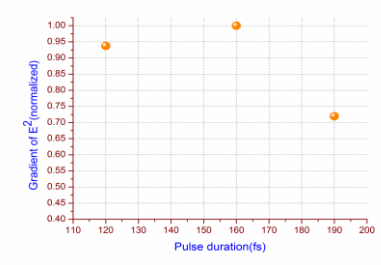
برای پیدا کردن علت این رفتار، باید فیزیک تابش تراهرتز بصورت دقیق‌تر مورد توجه قرار گیرد. همانطور که قبلا بیان شد، با وارد شدن پالس به محیط، لبه جلویی پالس، با محیط خنثی مواجه شده و آن را یونیزه می‌کند به طوریکه ادامه پالس، محیط یونیزه شده را می‌بینند. الکترون‌ها(و نه یون‌ها که سنگین‌اند) تحت تاثیر نیروی پاندرماتیو این بخش پالس، از یون‌ها جدا می‌شوند. بعد از عبور پالس تحت میدان الکتریکی توزیع باری که ایجاد کرده‌اند و نیز برخوردهای بین الکترون_یون، حرکت نوسانی میرا انجام داده و تابش می‌کنند. بنابراین هرچه میدان الکتریکی توزیع بار شدیدتر باشد، شدت تابش نیز بیشتر خواهد بود. اندازه میدان الکتریکی توزیع بار، به

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

میزان جداسازی الکترون‌ها از یون‌ها بستگی دارد و عامل اصلی جداسازی در این فرایند نیروی پاندرماتیو است. این نیرو در ارتباط مستقیم با گرادیان شدت است(رابطه ۵).

$$\vec{f}_P = -\left(\frac{\omega_p}{\omega_0}\right)^2 \left(\frac{\vec{\nabla}E^2}{16\pi}\right) \qquad (۵)$$

دامنه میدان الکتریکی پالس در حین انتشار در حوزه زمان و فضا تغییر می‌کند. واضح است که این تغییرات برای پالس‌های با شرایط اولیه متفاوت، یکسان نخواهد بود. در نتیجه نیروی پاندرماتیو و یا میزان جداسازی الکترون‌ها از یون‌ها که پالس‌های با مشخصات متفاوت در طی انتشار به الکترون‌ها وارد می‌کنند یکسان نبوده و به تبع آن شدت تابش تراهرتز نیز متفاوت خواهد بود. برای بررسی این موضوع گرادیان شدت میدان الکتریکی برای سه پالس اولیه بدون چیرپی که دارای انرژی ۴ میلی‌ژول و پهناهای زمانی ۱۲۸/۰۶، ۱۵۶/۲ و ۱۸۸/۶۸ فمتوثانیه در حین انتشار محاسبه شد(شکل۳). با توجه به اینکه چگالی الکترون تولید شده و نیز مکان تشکیل پلاسما در طول پهنای زمانی پالس، برای پالس‌های با پارامترهای اولیه مختلف، متفاوت است(جلو پالس محیط خنثی و بقیه پالس محیط پلاسما را می‌بینند). نکته‌ای که باید در محاسبه گرادیان شدت میدان الکتریکی به آن دقت شود، مکان شروع محاسبه گرادیان (جایی که محیط یونیزه شده و پلاسما تشکیل شده است) می‌باشد. برای این منظور مکان شروع محاسبه گرادیان، برای هر سه پالس، در طول انتشار، از زمانی که چگالی الکترون به cm^{-3} ۱۰[۱۵] می‌رسد، در نظر گرفته شد. سپس برای بدست آوردن برایند اندازه گرادیان شدت میدان، هم در طول زمانی پالس و هم روی پروفایل عرضی پالس در طول انتشار انتگرال عددی گرفته شده است.



شکل ۳: گرادیان شدت میدان الکتریکی برای سه پالس بدون چیرپی که دارای انرژی ۴ میلی ژول و با پهناهای زمانی ۱۲۸/۰۶، ۱۵۶/۲ و ۱۸۸/۶۸ فمتوثانیه در حین انتشار

شکل (۳) برایند گرادیان شدت میدان الکتریکی و بطور معادل نیروی پاندرماتیو کل اعمال شده به الکترون‌ها را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود گرادیان شدت میدان برای پالسی که شدت تابش تراهرتز در آن بیشینه بود(شکلهای۲و۱)، بیشترین مقدار دارد. یعنی در این حالت پالس نیروی پاندرماتیو بیشتری برای جداسازی الکترون_یون در پلاسما اعمال کرده، پس میدان الکتریکی ناشی از توزیع بار بیشتر، در نتیجه شدت تابش تراهرتز نیز نسبت به بقیه حالات بیشینه خواهد.

به این ترتیب می توان در کنار دلایلی کیفی که برای تغییر شدت تابش تراهرتز با چیرپ اولیه بیان شده است[۲]، علت اصلی را، به صورت کمی، در اندازه نیروی پاندرماتیوی که پالس با چیرپ‌های(یا پهناهای زمانی) متفاوت به الکترون‌ها وارد می کند، دانست.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر چیرپ و پهنای زمانی اولیه پالس، بر شدت تابش تراهرتز تولید شده از افروزه با تعمیم مدل تابش چرنکوف به صورت تئوری مطالعه و رفتاری مشابه آنچه در تجربه برای افروزه دو رنگی دیده شده بود، بدست آمد، و نشان داده شد که علت بروز این رفتار، به تفاوت در اندازه نیروی پاندرماتیو وارد شده به الکترون‌های پلاسما که ناشی از پهناهای زمانی مختلف است، مربوط می‌شود.

مراجع

[1]Mysyrowicz, A. Couairon and A. "Femtosecond filamentation in transparent media." *Physics Reports*, 2007: 47 – 189.

[2]Tie-Jun Wang, Yanping Chen, Claude Marceau, Francis Théberge, Marc Châteauneuf, Jacques Dubois and See Leang Chin. "High energy terahertz emission from two-color laser-induced filamentation in air with pump pulse duration control." *APPLIED PHYSICS LETTERS*, 2009: 131108(1-3).

[۳] مجتبی هاشمی پیکر، سمیه نجفی و رضا مسعودی. "تولید تابش تراهرتز از افروزش پالس های فوق کوتاه در هوا." *نوزدهمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران* . ۱۳۹۱.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]