بررسی تاثیر جنس هدف برطیف هارمونیکهای تولید شده در برهمکنش لیزر و پلاسما

سید سعید هاشمی ابرندآبادی ؛ مسلم روستایی ؛ رسول صدیقی بنابی

دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی شریف ، خیابان آزادی ، تهران

چکیده - در اثر برهمکنش لیزرهای فمتوثانیه توان بالا با پلاسما، هارمونیکهای بالا تشکیل می‌شود. در این پژوهش با استفاده از شبیه‌سازی ذره در جعبه با تغییر جنس پلاسما، تغییر در تشکیل هارمونیکها بررسی کرده و طیف بهینه را تعیین می‌گردد. عددهای اتمی کوچکتر، طیف هارمونیکهای بالاتری را تولید می‌نمایند. با توجه به کلید توصیف تولید هارمونیکهای بالا که به شیفت دوپلری در نور بازتاب به علت نوسانات سطح پلاسما بازمی‌گردد، دامنه نوسانات سطح پلاسما به صورت تئوری محاسبه می‌گردد و نشان داده می‌شود که دامنه نوسانات سطح برای هسته‌های با عدد اتمی کوچکتر بیشینه است. در ادامه با شبیه‌سازی ذره در جعبه دامنه نوسانات سطح پلاسما به ازای پلاسماهای با جنس هسته مختلف بررسی گردیده، مشاهده می‌شود که دامنه نوسانات سطح به دست آمده از طریق تئوری با شبیه‌سازی تطابق مناسبی دارد.

کلید واژه- شبیه سازی ذره در جعبه، لیزر فمتوثانیه، نوسانات سطح پلاسما، هارمونیکهای بالا

effect of target material on harmonic generation in laser-plasma interaction

Seyed Saeed Hashemi, Moslem Roustaei, and Rasol Sadighi

Department of Physics ,Sharif University of Thechnology, Tehran

Abstract- High harmonics can be generated thanks to the interaction high power femtosecond laser and plasmas. In this research, by particle in cell (PIC) simulation of the plasma density, the variation in the generated harmonics is investigated and as a result the optimum spectrum of the harmonics is achieved. The lower atomic number can be produced the higher harmonics. Based on the primary explanation of the high harmonic generations known as Doppler shift effect in reflection of the electromagnetic wave from the surface of the plasma oscillation, the amplitude of the plasma surface is theoretically derived, and it is shown that the amplitude is maximum for lower nuclei number of atoms. Finally the PIC simulation is applied for the different atomic number of the nuclei and it shown that the surface amplitude oscillation is in good agreement with the simulations.

Keywords: Particle in cell simulation, Femtosecond laser, Surface plasma oscillations, High harmonic generation

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

۱- مقدمه

با ساخت لیزرهای توان بالای فمتوثانیه در سالهای اخیر، کاربردهای مدرن برهمکنش لیزر توان بالا با پلاسما شامل گداخت هسته‌ای، شتابدهنده‌های لیزر-پلاسمایی، تولید نانوذرات و تولید پالسهای آتوثانیه و تولید هارمونیکهای بالا مورد توجه قرار گرفته‌اند[1].

در اثر برخورد لیزر با هدف پلاسمایی، رابطه پاشندگی به صورت زیر می‌باشد:

$$\omega_L^2 = \omega_p^2 + k_L^2 c^2 \quad (1)$$

به طوریکه ω_p فرکانس پلاسما می‌باشد.

به ازای فرکانس لیزر کمتر از فرکانس پلاسما، لیزر توانایی انتشار درون پلاسما را ندارد. در صورتی که چگالی پلاسما، از چگالی بحرانی بیشتر باشد لیزر توانایی نفوذ در پلاسما را ندارد و از سطح پلاسما کاملا بازتاب می‌شود که به این پلاسما، پلاسمای فوق‌چگال می‌گویند. چگالی بحرانی از رابطه زیر به دست می‌آید[2]:

$$n_c = \frac{\varepsilon_0 m_e \omega_L^2}{e^2} \quad (2)$$

در شدتهای بیشتر از $10^{16} W/cm^2$ نور بازتابی، شامل هارمونیکهای نور تابش می‌باشد. در شدتهای بیشتر از $10^{18} W/cm^2$ اثرات نسبیتی نیز اهمیت می‌یابد. دامنه بدون بعد لیزر به صورت زیر تعریف می شود:

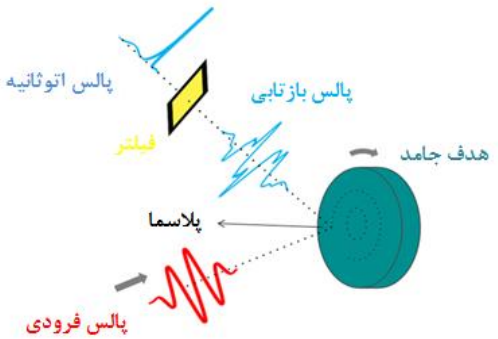
$$a_L = \frac{eE_0}{m_e \omega_L c} \quad (3)$$

از طرفی داریم:

$$I\lambda_L^2 = 1.37 \times 10^{18} a_L^2 (W/cm^2)(\mu m)^2 \quad (4)$$

به ازای $a_L > 1$ اثرات نسبیتی اهمیت دارند.

هارمونیکهای بالا ناشی از برهمکنش لیزر با پلاسما در سال 1980 دیده شد. با استفاده از لیزر CO_2 که طول موج آن $10\mu m$ می‌باشد هارمونیک 46 ام به دست آمد [3-4]. در سال 1995 هارمونیک 15 لیزر تیتانیوم سفایر که طول موج معادل $55.3nm$ می‌باشد، به دست آمد. لیزر فرودی با انرژی 30mj و پهنای پالس 130fs و شدت روی هدف برابر $10^{17} W/cm^2$ بود. بازده تبدیل به هارمونیک دهم برابر 2×10^{-8} و به هارمونیک پانزدهم برابر با 10^{-9} بود [5]. در سال 1996 هارمونیک 75 لیزر با طول موج 1053nm متناظر با طول موج 14nm با دوام پالس لیزر فرودی 2.5ps و شدت بر روی هدف برابر با $10^{19} W/cm^2$ بدست آمد [6]. در سال 2006 با استفاده از لیزر با طول موج 1054nm هارمونیک 850 متناظر با 1.2nm با ضریب تبدیل 10^{-6} به دست آمد [7]. یک طرحواره برهمکنش لیزر با پلاسما در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱ طرحواره برهمکنش لیزر با پلاسما و تولید هارمونیکهای بالا و تولید پالس آتوثانیه

سطح پلاسما در اثر برخورد لیزر پرشدت شروع به نوسان کرده و یونها در زمانهای کوتاه تقریبا به‌صورت ساکن باقی می‌مانند. ابتدا میدان الکتریکی و سپس میدان مغناطیسی لیزر الکترون ها را در جهت عمود بر سطح شتاب می‌دهد. فشار تابشی ناشی از لیزر و نیروی بازگرداننده کولنی ناشی از یونهای ساکن موجب نوسان سطح پلاسما و در نتیجه تولید هارمونیکهای بالا می شود.

در ادامه به بررسی عوامل موثر در تولید طیف هارمونیکهای بالا با استفاده از شبیه سازی ذره در جعبه (PIC) پرداخته می شود [8]. با استفاده از چگالی بار و جریان و معادلات ماکسول، میدانهای الکتریکی و مغناطیسی محاسبه شده و از روی میدانها، دینامیک ذرات بدست می آید. کد مورد استفاده در این مقاله کد یک بعدی LPIC++ بوده، به طوری که تصحیحات نسبیتی در آن منظور شده است.

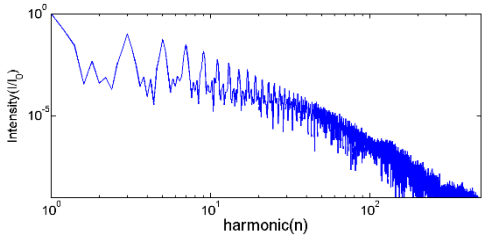
۲- بهینه‌سازی طیف با تغییر نوع پلاسما

اولین نکته‌ای که در طیف هارمونیکها می‌تواند تاثیرگذار باشد، نوع ماده تشکیل دهنده هدف می‌باشد. جهت بررسی تاثیر نوع ماده، به ترتیب با تغییر عدد اتمی هسته‌های تشکیل دهنده پلاسما شبیه‌سازی می شود.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

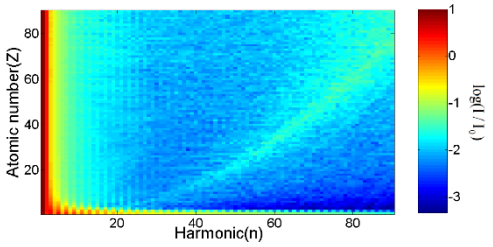
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

پالس فرودی از لیزر تیتانیوم-سفایر در طول موج مرکزی $\lambda_L = 800nm$ با شدت $I \sim 1.92 \times 10^{21} w.cm^{-2}$ با پهنای زمانی 12fs و قطبش p به پلاسمای فوق چگال، با چگالی اولیه $n_e = 100n_c$، چگالی بحرانی در سطح پلاسما $n_c = 1.7 \times 10^{21} cm^{-3}$، برخورد می‌کند. طیف پالس بازتابی از سطح پلاسمای هیدروژن در شکل2 نشان داده شده است.



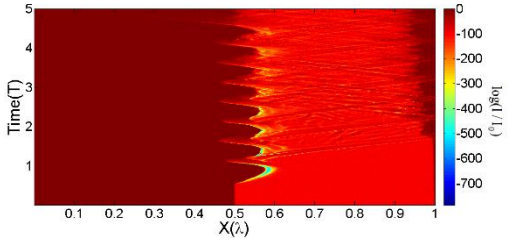
شکل ۲ شدت هارمونیکهای تولید شده (دامنه بدون بعد) در اثر برهمکنش لیزر در تابش عمود با پلاسمای فوق چگال

در اینجا با تغییر عدد اتمی هدف جامد (z) جنس پلاسما تشکیل شده را تغییر داده و نتایج شبیه سازی حاصل از آن در شکل شماره 3 نشان داده شده است. همانطور که در شکل فوق مشاهده می‌شود، شدت هارمونیک های تولید شده برای عدد اتمی کوچکتر بهتر می‌باشد به طوری که شدت هارمونیک 30ام برای پلاسما با z=1، حدود 700 برابر شدت هارمونیک 30ام تولید شده برای پلاسما با z=5 می‌باشد (طول موج هارمونیک ۳۰ام تقریبا برابر با 27nm است).



شکل ۳ شدت هارمونیکهای تولید شده به ازای عددهای اتمی مختلف. توجه کنید که لگاریتم شدت با رنگهای مختلف نشان داده شده است.

این بدان معناست که پلاسمای با عدد اتمی کوچکتر، بهترین نتیجه در تولید هارمونیکهای بالا را دارا می‌باشد. در شکل شماره 4 وضعیت نوسانات سطح برای پلاسمای هیدروژن رسم شده است. در مدل آینه نوسانی، که تولید هارمونیکهای بالا را توجیه می‌کند، سطح پلاسما با سرعت نسبیتی در حال نوسان است. این نوسان باعث ایجاد شیفت دوپلری در نور بازتابی گردیده به طوری که تولید هارمونیک های بالا در طیف بازتابی مشاهده می شود. همچنین انتظار می رود هرچقدر بار مثبت هسته بیشتر باشد، نیروی بازگرداننده کولنی افرایش یابد که این امر موجب کاهش دامنه نوسانات سطح پلاسما می گردد. کاهش دامنه نوسانات سطح باعث کاهش سرعت نوسان شده و در نتیجه اثرات دوپلری کاهش می‌یابد. پس انتظار داریم که دامنه نوسانات سطح برای پلاسمای هسته هیدروژن باکمترین z، بیشترین مقدار باشد و در نتیجه هارمونیک های بالاتری را تولید نماید. در شکل شماره 5 دامنه نوسانات سطح را بر حسب عدد اتمی رسم شده است و همانطورکه انتظار می رفت، دامنه نوسانات سطح برای عدد اتمی کوچکتر، بیشتر می‌باشد.



شکل ۴ وضعیت نوسانات سطح پلاسما در برهمکنش لیزر با پلاسما (λ طول موج و T دوره تناوب لیزر می‌باشند)

به صورت نظری نیز می‌توان دامنه نوسانات سطح را محاسبه و اظهارات فوق ذکر را ثابت نمود. دامنه نوسانات سطح برای پلاسما با چگالی نمایی به دست آمده‌است[9]. در این اینجا شبیه‌سازی برای پلاسما با چگالی ثابت انجام شده است. با انجام محاسبات برای پلاسما با چگالی ثابت، می‌توان رابطه دامنه نوسانات سطح را به صورت زیر بدست آورد:

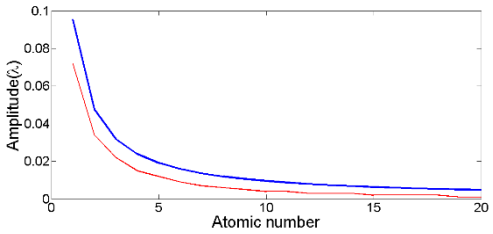
$$\frac{\lambda}{Z}\frac{cn}{en}\frac{La}{\pi} = {}_{e}x \qquad (5)$$

به طوری که x_e دامنه نوسانات سطح است و n_e چگالی الکترونهاست.

در شکل شماره 5 دامنه نوسانات به دست آمده از طریق شبیه‌سازی را با تئوری فوق مقایسه نموده و انچنان که مشاهده می‌شود انطباق خوبی با یکدیگر دارند.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]



شکل ۵ دامنه نوسانات سطح بر حسب عدد اتمی(رنگ آبی نتیجه فرمول به دست آمده و رنگ قرمز نتیجه شبیه‌سازی می‌باشد)

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی تاثیر جنس هدف جامد بر طیف هارمونیک های ایجاد شده در برهمکنش لیزر فمتوثانیه با پلاسما، به صورت شبیه سازی و تئوری انجام گرفته است. با افزایش عدد اتمی نیروی کولنی ناشی از هسته افزایش یافته به طوری که موجب کاهش دامنه نوسانات سطح پلاسما می گردد. نتایج شبیه سازی های انجام شده تطابق خوبی با مدل آینه نسبیتی داشته به طوری که برای هدف های با عدد اتمی کوچک، بیشترین بازدهی را شاهد هستیم.

مراجع

[1] Eliezer, Shalom. and Kunioki Mima, *Applications of Laser-Plasma Interactions*. CRC Press, 2008

[2] Eliezer, Shalom. *The interaction of high-power lasers with plasmas*. CRC press, ۲۰۰۲

[3] R. L. Carman, D. W. Forslund, and J. M. Kindel, *Visible harmonic emission as a way of measuring profile steepening*, Phys. Rev. Lett, 1981

[4] R. L. Carman, C. K. Rhodes, and R. F. Benjamin, *Observation of harmonics in the visible and ultraviolet created in CO2-laser-produced plasmas*, Phys. Rev. A, 1981

[5] D. von der Linde, T. Engers, G. Jenke, P. Agostini, G. Grillon, E. Nibbering, A. Mysyrowics, and A. Antonetti, *Generation of high-order harmonics from solid surfaces by intense femtosecond laser pulses*, Phys. Rev. 1995

[6] P. A. Norreys, M. Zepf, S. Moustaizis, A. P. Fews, J. Zhang, P. Lee, M. Bakarezos, C. N. Danson, A. Dyson, P. Gibbon, P. Loukakos, D. Neely, F. N. Walsh, J. S. Wark, and A. E. Dangor, *Efficient extreme UV harmonics generated from picosecond laser pulse interactions with solid targets*, Phys. Rev. Lett., 1995

[7] B. Dromey, M. Zepf, A. Gopal, K. Lancaster, M. S. Wei, K. Krushelnick, M. Tatarakis, N. Vakakis, S. Moustaizis, R. Kodama, M. Tampo, C. Stoeckl, R. Clarke, H. Habara, D. Neely, S. Karsch, and P. Norreys, *High harmonic generation in the relativistic limit*, Nat. Phys., 2006

[8] R. Lichters, J. Meyer-ter-Vehn, and A. Pukhov, *Short-pulse laser harmonics from oscillating plasma surfaces driven at relativistic intensity*, Phys. Plasmas. 1996

[9] Vincenti, H., *Optical properties of relativistic plasma mirrors*, Nature communications, 2014

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد