

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

سید سعید هاشمی ایرندآبادی؛ مسلم روستایی؛ رسول صدیقی بنایی

دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی شریف، خیابان آزادی، تهران

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

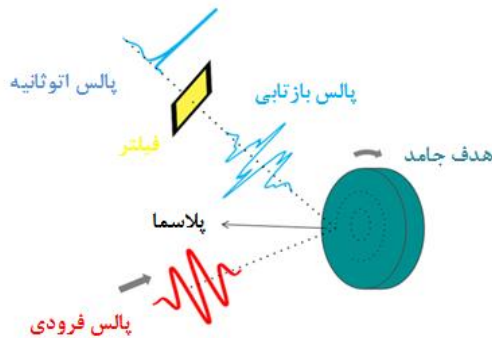
Department of Physics, Sharif University of Technology, Tehran

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

۱- مقدمه

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 اتوتائیه

سطح پلاسما در اثر برخورد لیزر پرشدت شروع به نوسان کرده و یونها در زمانهای کوتاه تقریباً به صورت ساکن باقی میمانند. ابتدا میدان الکتریکی و سپس میدان مغناطیسی لیزر الکترون ها را در جهت عمود بر سطح شتاب می دهد. 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- بهینه سازی طیف با تغییر نوع پلاسما

اولین نکته ای که در طیف هارمونیکها می تواند تاثیرگذار باشد، نوع ماده تشکیل دهنده هدف می باشد. جهت بررسی تاثیر نوع ماده، به ترتیب با تغییر عدد اتمی هسته های تشکیل دهنده پلاسما شبیه سازی می شود.

با ساخت لیزرهای توان بالای فمتوتائیه در سالهای اخیر، کاربردهای مدرن برهمکنش لیزر توان بالا با پلاسما شامل گداخت هسته ای، شتابدهنده های لیزر-پلاسمایی، تولید نانوذرات و تولید پالسهای اتوتائیه و تولید هارمونیکهای بالا مورد توجه قرار گرفته اند [1].

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

$${}^2_L k^2 c + {}^2_p \omega = {}^2_L \omega \quad (1)$$

به طوریکه ω_p فرکانس پلاسما می باشد.

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 کاملاً بازتاب می شود که به این پلاسما، پلاسما فوق چگال می گویند. چگالی بحرانی از رابطه زیر به دست می آید [2]:

$$\frac{0.5 \epsilon m_L^2 \omega}{2e} = cn \quad (2)$$

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

$$\frac{0.5 E_e}{L \omega c m} = L a \quad (3)$$

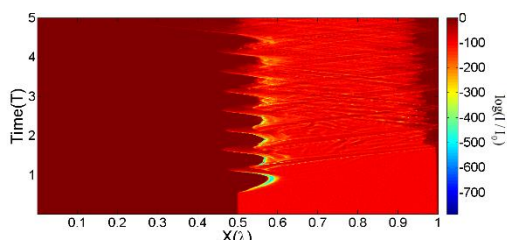
از طرفی داریم:

$$)m\mu.^2-mc.w({}^2_L a^{81}01 \times 73.1 = {}^2_L \lambda l \quad (4)$$

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 $10 \mu m$ می باشد هارمونیک 46 ام به دست آمد [3-4]. در سال 1995 هارمونیک 15 لیزر تیتانیوم سفایر که طول موج معادل 55.3nm می باشد، 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

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 افزایش 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 می یابد. پس انتظار داریم که دامنه نوسانات سطح برای پلاسما هسته هیدروژن با کمترین z ، بیشترین مقدار باشد و در نتیجه هارمونیک های بالاتری را تولید نماید. در شکل شماره ۵ دامنه نوسانات سطح را بر حسب عدد اتمی رسم شده است و همانطور که انتظار می رفت، دامنه نوسانات سطح برای عدد اتمی کوچکتر، بیشتر می باشد.



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

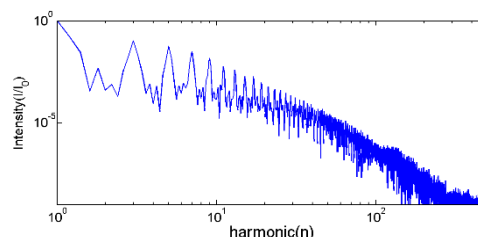
به صورت نظری نیز می توان دامنه نوسانات سطح را محاسبه و اظهارات فوق ذکر را ثابت نمود. دامنه نوسانات سطح برای پلاسما با چگالی نمایی به دست آمده است [9]. در این اینجا شبیه سازی برای پلاسما با چگالی ثابت انجام شده است. با انجام محاسبات برای پلاسما با چگالی ثابت، می توان رابطه دامنه نوسانات سطح را به صورت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

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

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

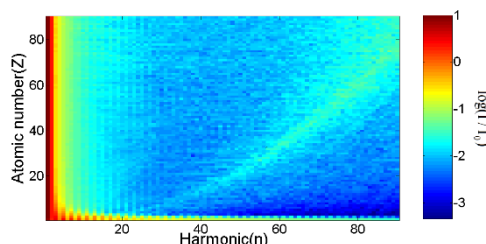
در شکل شماره ۵ دامنه نوسانات به دست آمده از طریق شبیه سازی را با تئوری فوق مقایسه نموده و انچنان که مشاهده می شود انطباق خوبی با یکدیگر دارند.

پالس فرودی از لیزر تیتانیوم-سفاير در طول موج مرکزی با $\lambda_L = 800nm$ با شدت $I \sim 1.92 \times 10^{21} w.cm^{-2}$ با پهنای زمانی 12fs و قطبش p به پلاسماي فوق چگال، با چگالی اولیه $n_e = 100n_c$ چگالی بحرانی در سطح پلاسما $n_c = 1.7 \times 10^{21} cm^{-3}$ برخورد می کند. طیف پالس بازتابی از سطح پلاسماي هیدروژن در شکل ۲ نشان داده شده است.



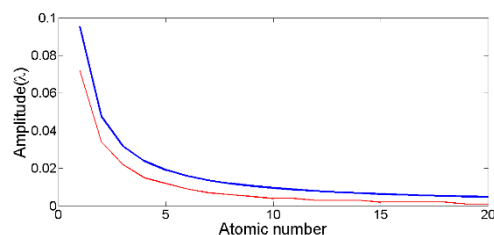
شکل ۲ شدت هارمونیکهای تولید شده (دامنه بدون بعد) در اثر برهمکنش لیزر در تابش عمود با پلاسماي فوق چگال

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 ۳ نشان داده شده است. همانطور که در شکل فوق مشاهده می شود، شدت هارمونیک های تولید شده برای عدد اتمی کوچکتر بهتر می باشد به طوری که شدت هارمونیک ۳۰ام برای پلاسما با $z=1$ ، حدود 700 برابر شدت هارمونیک ۳۰ام تولید شده برای پلاسما با $z=5$ می باشد (طول موج هارمونیک $30 \times 27nm$ تقریباً 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 پلاسماي با عدد اتمی کوچکتر، بهترین نتیجه در تولید هارمونیکهای بالا را دارا می باشد. در شکل شماره ۴ وضعیت نوسانات سطح برای پلاسماي هیدروژن رسم شده است. در مدل آینه نوسانی، که تولید هارمونیکهای بالا را توجیه می کند، سطح پلاسما با سرعت نسبیتی در حال نوسان است. این نوسان باعث ایجاد شیفت



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 هارمونیک‌های ایجاد شده در برهمکنش لیزر فمتوثانیه با پلاسما، به صورت شبیه‌سازی 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 می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده تطابق خوبی با مدل آینه نسبیتی داشته به طوری که برای هدف‌های 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. Moustazis, 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. Moustazis, 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