

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

سید سعید هاشمی ابرندآبادی ؛ 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. عدهای 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

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:

$$2Lk^2c + \frac{2}{p}\omega = \frac{2}{L}\omega \quad (1)$$

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 کاملاً بازتاب می‌شود که به این پلاسما، پلاسما فوق چگال می‌گویند. چگالی بحرانی از رابطه زیر به دست می‌آید [2]:

$$\frac{0.8\epsilon m_L^2 \omega}{2e} = cn \quad (2)$$

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 می‌شود:

$$\frac{0.8Ee}{L\omega cm} = La \quad (3)$$

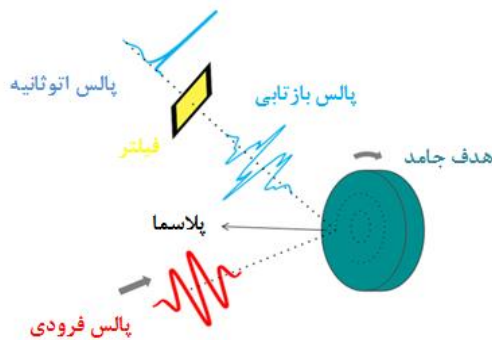
از طرفی داریم:

$$)m\mu.^2-mc.w(La^{81}01 \times 73.1 = \frac{2}{L}\lambda I \quad (4)$$

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

هارمونیکهای بالا ناشی از برهمکنش لیزر با پلاسما در سال ۱۹۸۰ دیده شد. با استفاده از لیزر CO_2 که طول موج آن $10\mu m$ می‌باشد هارمونیک ۴۶ ام به دست آمد [3-4]. در سال ۱۹۹۵ هارمونیک ۱۵ 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 ۱۹۹۶ هارمونیک ۷۵ 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 ۲۰۰۶ با استفاده از لیزر با طول موج $1054nm$ هارمونیک ۸۵۰ 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

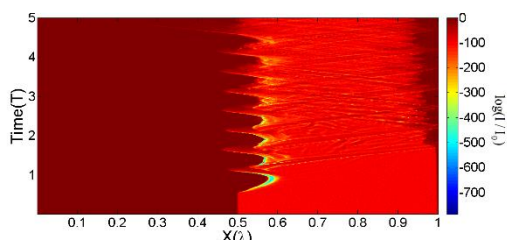
سطح پلاسما در اثر برخورد لیزر پرشدت شروع به نوسان کرده و یونها در زمانهای کوتاه تقریباً به صورت ساکن باقی می‌مانند. ابتدا میدان الکتریکی و سپس میدان مغناطیسی لیزر الکترون‌ها را در جهت عمود بر سطح شتاب می‌دهد. فشار تابشی ناشی از لیزر و نیروی بازگرداننده کولنی ناشی از یونهای ساکن موجب نوسان سطح پلاسما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

در ادامه به بررسی عوامل موثر در تولید طیف هارمونیکهای بالا با استفاده از شبیه سازی ذره در جعبه (PIC) پرداخته می‌شود [8]. با استفاده از چگالی بار و جریان و معادلات ماکسول، میدانهای الکتریکی و مغناطیسی محاسبه شده و از روی میدانها، دینامیک ذرات بدست می‌آید. 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 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 شبیه سازی می‌شود.

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 پلاسمای 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)

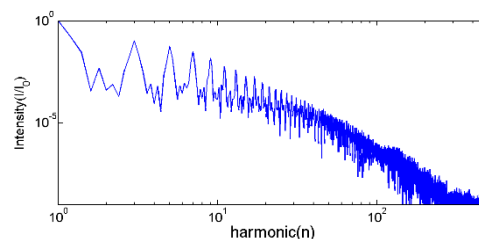
به صورت نظری نیز می توان دامنه نوسانات سطح را محاسبه و اظهارات فوق ذکر را ثابت نمود. دامنه نوسانات سطح برای پلاسما با چگالی نمایی به دست آمده است [9]. در این اینجا شبیه سازی برای پلاسما با چگالی ثابت انجام شده است. با انجام محاسبات برای پلاسما با چگالی ثابت، می توان رابطه دامنه نوسانات سطح را به صورت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

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

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

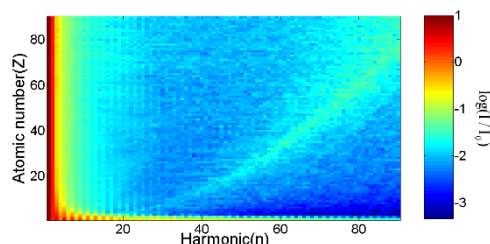
در شکل شماره ۵ دامنه نوسانات به دست آمده از طریق شبیه سازی را با تئوری فوق مقایسه نموده و انچنان که مشاهده می شود انطباق خوبی با یکدیگر دارند.

پالس فرودی از لیزر تیتانیوم-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 می کند. طیف پالس بازتابی از سطح پلاسمای هیدروژن در شکل ۲ نشان داده شده است.



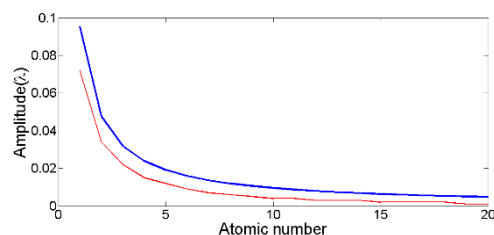
شکل ۲ شدت هارمونیک های تولید شده (دامنه بدون بعد) در اثر برهمکنش لیزر در تابش عمود با پلاسمای فوق چگال

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 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 ۳۰ام تقریباً برابر با 27nm است).



شکل ۳ شدت هارمونیک های تولید شده به ازای عددهای اتمی مختلف. توجه کنید که لگاریتم شدت با رنگ های مختلف نشان داده شده است.

این بدان معناست که پلاسمای با عدد اتمی کوچکتر، بهترین نتیجه در تولید هارمونیک های بالا را دارا می باشد. در شکل شماره ۴ وضعیت نوسانات سطح برای پلاسمای هیدروژن رسم شده است. در مدل آینه نوسانی، که تولید هارمونیک های 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 شبیه سازی می باشد)

۳- نتیجه گیری

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. Moustazis, A. P. Fewes, 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. Vakis, 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