

مدولاسیون غیرخطی بسامد تپ لیزری برای شتاب بهینه الکترون در خلأ

مینا اخیانی، فاضل جهانگیری، محمد رضایی پندری، علیرضا نیکنام، رضا مسعودی

چکیده

شتاب الکترون در میدان تپ لیزری چیرپ در خلأ مورد مطالعه قرار می‌گیرد. با در نظر گرفتن تابع چیرپ به صورت چندجمله‌ای خطی، غیرخطی مرتبه دو و مرتبه سه، نشان می‌دهیم که استفاده از چیرپ چندجمله‌ای با مرتبه بالاتر منجر به افزایش انرژی نهایی الکترون می‌گردد. هم‌چنین نتایج محاسبات نشان می‌دهد که بهینه‌سازی رفتار الکترون بر حسب پارامترهای مؤثر می‌تواند منجر به کاهش چشمگیر نوسانات سریع بهره با ضرایب چیرپ شود.

کلمات کلیدی: شتاب الکترون در میدان تپ لیزری، مدولاسیون غیرخطی بسامد.

مقدمه

الگوهای مختلفی برای شتاب الکترون با کنترل سرعت فاز میدان لیزری ارائه شده است. از جمله الگوهای مطرح شده، استفاده از تپ چیرپ است که برای اولین بار در سال ۲۰۰۴ پیشنهاد شد و منجر به افزایش قابل ملاحظه انرژی الکترون گردید [۴]. به دنبال آن مطالعات زیادی روی تأثیر مقدار پارامتر چیرپ [۵]، خطی یا غیرخطی بودن تابع چیرپ [۶]، طول تپ [۷]، فاز اولیه [۷] و قطبش [۸] بر روی شتاب الکترون انجام شده است. نشان داده شده است که بهره انرژی الکترون در برهم-کنش با میدان چیرپ مرتبه دو نصف مقداری است که در چیرپ خطی به دست می‌آید [۶]. این در حالیست که گزارش دیگری استفاده از چیرپ چندجمله‌ای مرتبه دو و سه را عامل افزایش بهره انرژی الکترون، نسبت به چیرپ خطی نشان می‌دهد [۹]. علاوه بر این، صرفنظر از نوع تابع چیرپ، رفتار بهره بر حسب پارامتر چیرپ که تاکنون گزارش شده است، شامل نوسانات سریعی است

با تولید تپ‌های لیزری پراثری به کمک تکنیک تقویت تپ چیرپ، ایده شتاب لیزری ذرات باردار به عنوان جایگزینی برای شتابدهنده‌های پرهزینه و بزرگ متداول مطرح و مورد توجه فراوان قرار گرفته است [۱]. [۲]. اساس این ایده مبتنی بر به کارگیری میدان الکترومغناطیسی قوی تپ‌های لیزری، برای شتاب مستقیم ذرات باردار می‌باشد. البته قوی بودن میدان الکترومغناطیسی لیزری برای شتاب کافی نیست؛ چرا که ذره باردار به دلیل حرکت نوسانی به تبادل انرژی با میدان پرداخته و در نهایت انرژی خالصی از تپ دریافت نمی‌کند [۳]. از آنجا که این تبادل انرژی نتیجه‌ی اختلاف سرعت ذره باردار با سرعت فاز میدان و به عبارتی سُر خوردن^۱ آن بر روی سیکل‌های متوالی میدان است،

^۱پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

الکترون، g فاکتور نسبیتی لورنتس، b سرعت لحظه‌ای الکترون، z زاویه تزریق الکترون و c سرعت نور در خلأ می‌باشد.

با حل معادلات (۳) و (۴) برای میدان تعریف شده رابطه (۱)، برای سه حالت چیرپ خطی با تابع فاز $f_2(h) = (h - m)^2 - k^2$ ، چیرپ غیرخطی مرتبه دو با تابع فاز $f_3(h) = (h - m)[(h - m)^2 - a^2]$ و چیرپ غیرخطی مرتبه سه با تابع فاز $f_4(h) = (h - m)^4 - l^2(h - m)^2 + d^2$ تغییرات زمانی بهره انرژی e مطابق شکل (۱) به دست می‌آید. در این

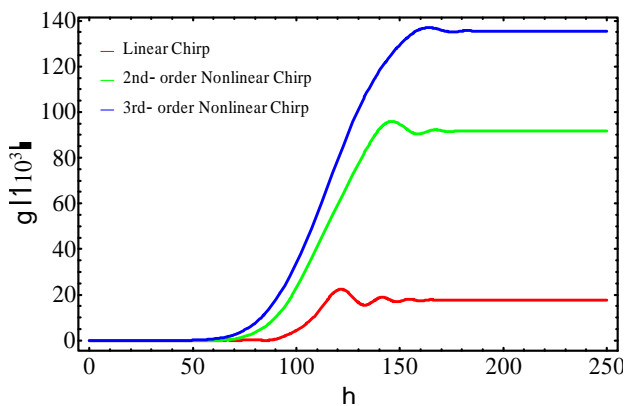
شکل $b_0 = 0.99$ ، $a = \frac{eE_0}{mcw_0} = 2$ ، $t = 50$

$k = 12.208$ ، $m = 2t$ ، $z = 0$ ، $w = 10^{15} \text{ Hz}$

$a = 33.85$ ، $l = 54.82$ و $d = 941.49$ در نظر گرفته

شده است. همچنین ضرایب بهنجارش تابع فاز به ترتیب $r_3 = -2.9 \cdot 10^{-7}$ و $r_2 = 0.000035$ ، $r_1 = -0.005$

قرار داده شده است.



شکل ۱: بهره انرژی بهنجار شده بر حسب h برای سه تابع چیرپ خطی، غیرخطی مرتبه دو و غیرخطی مرتبه ۳

مشاهده می‌کنیم که با در نظر گرفتن شرایط اولیه یکسان، بهره انرژی الکترون در برهم‌کنش با میدان چیرپ غیرخطی در مقایسه با چیرپ خطی، افزایش چشم‌گیری دارد. همچنین چیرپ غیرخطی مرتبه سه، بهره‌ی بیشتری را نسبت به چیرپ غیرخطی مرتبه دو، به

که تنظیم مقدار بهینه‌ی این پارامتر را از دید تجربی، مشکل می‌کند [۶، ۹].

در این مقاله، با در نظر گرفتن تابع چیرپ به صورت چندجمله‌ای مرتبه دو و سه با ضرایب چیرپ بهینه، نشان می‌دهیم که بهره‌ی انرژی در میدان چیرپ غیرخطی به طور چشم‌گیری بیشتر از میدان چیرپ خطی است. همچنین با افزایش مرتبه چندجمله‌ای تابع چیرپ، بهره‌ی انرژی نیز افزایش بیشتری می‌یابد. همچنین نشان می‌دهیم که با بهینه‌سازی رفتار الکترون بر حسب پارامترهای وابسته، نوسانات سریع بهره بر حسب پارامتر چیرپ از بین می‌رود.

دینامیک الکترون در میدان چیرپ

ما دینامیک الکترون را در برهم‌کنش با یک تپ لیزری قطبیده خطی با پروفایل زمانی گوسی و پروفایل فضایی تخت که میدان الکتریکی آن به صورت رابطه (۱) توصیف می‌شود، در نظر می‌گیریم:

$$\vec{E} = E_0 \cos[r_n f_n(h)] \exp[-1.385(\frac{h-m}{t})^2] \hat{x} \quad (1)$$

که در آن E_0 دامنه‌ی میدان، $h = wt - kz$ فاز، w بسامد، t طول FWHM تپ نرمالیزه شده با w و r_n می‌کند و r_n را نیز می‌توان به عنوان یک ضریب نرمال برای تابع فاز در نظر گرفت. با شیفت تپ به میزان m که می‌تواند ضریبی از طول تپ باشد، الکترونی که در $h = 0$ با میدان برهم‌کنش می‌کند، با تقریب مناسبی کل تپ را تجربه می‌کند. سرعت اولیه الکترون b_0 را به صورت:

$$\vec{b}_0 = b_0(\hat{k} \cos z + \hat{j} \sin z) \quad (2)$$

و معادلات دینامیک الکترون در میدان تپ را به صورت:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = -e[E + \vec{b}' \times B] \quad (3)$$

$$\frac{de}{dt} = -e\vec{c} \cdot \vec{b}' E \quad (4)$$

در نظر می‌گیریم که در آن $P = gmcb$ تکانه نسبیتی، $e = gmc^2$ انرژی نسبیتی، m و e به ترتیب بار و جرم

مشاهده می‌کنیم که اگرچه انتخاب مقادیر بهینه برای این ضرایب به بهره‌ی ماکزیمم منجر می‌شود، اما با انحراف کوچکی از این مقادیر، بهره به میزان قابل توجهی افت می‌کند. لذا این امر به لحاظ تجربی، امکان تنظیم مقادیر بهینه ضرایب چیرپ را مشکل می‌کند. در مقاله [۱۰] نشان داده‌ایم که در برهم‌کنش با میدان چیرپ خطی، بهینه‌سازی هم‌زمان پارامتر چیرپ و فاز اولیه بر اساس طول تپ، می‌تواند رفتار نوسانی بهره بر حسب پارامتر چیرپ را به رفتاری نرم و هموار تبدیل کند. در اینجا با تعمیم الگوی فوق، به بهینه‌سازی رفتار الکترون در میدان چیرپ غیرخطی می‌پردازیم.

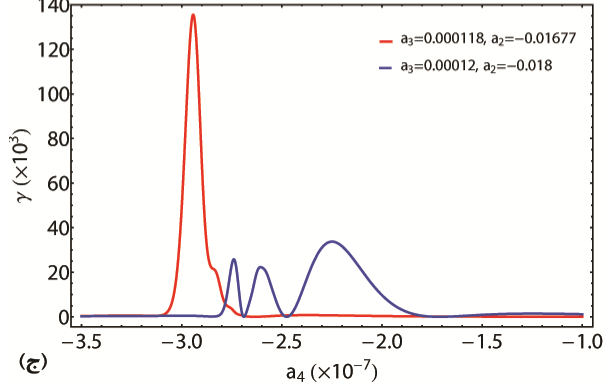
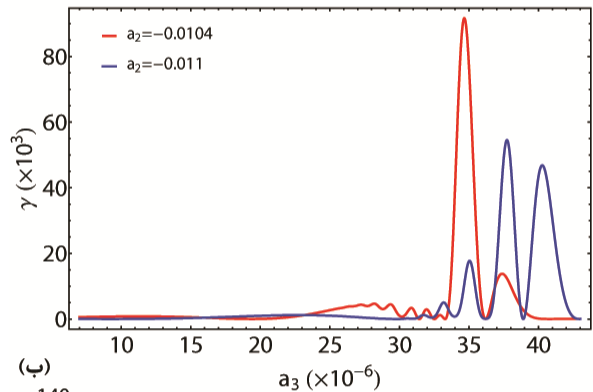
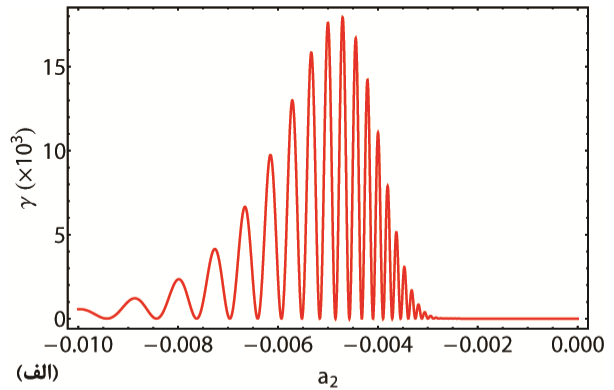
بهینه‌سازی دینامیک الکترون

می‌توان نشان داد بیشینه بهره در صورتی به دست می‌آید که محل وقوع بسامد صفر در حوالی قله تپ باشد که می‌توان با تقریب آن را منطبق بر قله فرض کرد. با انطباق محل وقوع بسامد صفر بر محل ریشه‌ها و با لحاظ کردن قید $a_1 = 1$ (که در بخش قبل توضیح داده شد)، ضرایب چند جمله‌ای بهینه بر حسب a به دست می‌آیند. با برازش منحنی این پارامتر بر حسب طول تپ به صورت رابطه (۵) به دست می‌آید

$$a(t) = \frac{0.1491t^2 + 247.8t + 5581}{t + 481.3} \quad (۵)$$

با در نظر گرفتن این رابطه و حل معادلات دینامیک الکترون، رفتار بهره بر حسب ضریب چیرپ a_3 در شکل (۳) حاصل می‌شود.

همراه دارد. رفتار بهره بر حسب ضرایب چندجمله‌ای تابع فاز و یا همان ضرایب چیرپ در شکل (۲) نشان داده شده است.



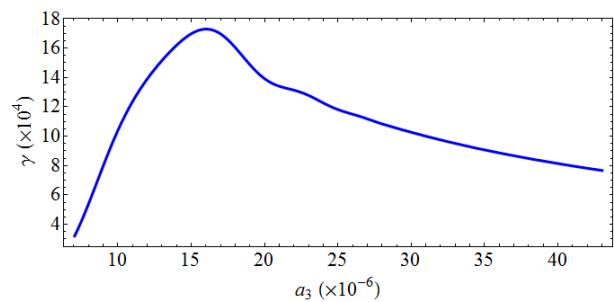
شکل ۲: رفتار بهره انرژی بهنجار شده بر حسب (الف) a_2 در میدان چیرپ خطی؛ (ب) a_3 در میدان چیرپ غیرخطی مرتبه دو؛ (ج) a_4 در میدان چیرپ غیرخطی مرتبه سه.

در این شکل فاز اولیه برای هر حالت بهینه فرض شده است. هم‌چنین ضریب a_1 در تمامی حالات برابر با یک در نظر گرفته می‌شود؛ چرا که تغییر آن تنها بیانگر شیفت بسامد مرکزی تپ است.

تقریب می‌باشند، می‌توان انتظار داشت که روش تحلیلی مورد بحث در مقاله حاضر قابل تعمیم به سایر توابع قابل تعریف چیرپ دیگر نیز باشد.

منابع

- [1] Shimoda K., "Proposal for an Electron Accelerator Using an Optical Maser", *Applied Optics*, vol. 1, 1962 و pp. 33-35.
- [2] Esarey E., Schroeder C. B., and Leemans W. P., "Physics of laser-driven plasma-based electron accelerators", *Reviews of Modern Physics*, vol. 81, 2009 pp. 1229-1285.
- [3] Esarey E., Sprangle P., and Krall J., "Laser acceleration of electrons in vacuum", *Physical Review E*, vol. 52, 1995 p. 5443.
- [4] Khachatryan A. G., Van Goor F. A., and Boller K. J., "Interaction of free charged particles with a chirped electromagnetic pulse", *Physical Review E*, vol. 70, 2004, PP. 067601.
- [5] Sohbatzadeh F., Mirzanejhad S., and Ghasemi M., "Electron acceleration by a chirped Gaussian laser pulse in vacuum", *Physics of Plasmas*, vol. 13, 2006, PP. 123108.
- [6] Salamin Y. I. and Jisrawi N. M., "Electron laser acceleration in vacuum by a quadratically chirped laser pulse", *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, vol. 47, 2014, PP. 025601.
- [7] J.X. Li, Zang W.P., and Tian J.G., "Electron acceleration in vacuum induced by a tightly focused chirped laser pulse", *Applied Physics Letters*, vol. 96, 2010, PP. 031103.



شکل ۳: تغییرات بهره انرژی الکترون بر حسب ضرایب چیرپ در میدان چیرپ غیرخطی مرتبه ۲ با در نظر گرفتن شرایط بهینه

مقایسه شکل (۳) با شکل ۲(ب) نشان می‌دهد که نوسانات سریع بر حسب این پارامتر به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است.

می‌توان نشان داد با تکرار روند فوق برای چیرپ غیرخطی مرتبه سه، ضرایب بهینه چیرپ محاسبه شده و مقادیر مجهول l و d از طریق برازش منحنی برای طول تپ-های مختلف، به ترتیب به صورت رابطه (۶) و (۷) حاصل می‌شود.

$$l(t) = \frac{0.3394t^2 + 763.5t + 1.54 \cdot 10^4}{t + 873.5} \quad (6)$$

$$d(t) = \frac{455.9t^2 + 1.3 \cdot 10^5 t - 4.4 \cdot 10^6}{t + 4078} \quad (7)$$

در این حالت نیز کاهش چشمگیر نوسانات در نتیجه‌ی بهینه‌سازی هم‌زمان ضرایب چیرپ بر حسب طول تپ مشاهده می‌گردد.

نتیجه گیری

دینامیک الکترون در میدان چیرپ با سه تابع خطی، غیرخطی مرتبه دو و غیرخطی مرتبه سه بررسی شد. در هر سه حالت، تابع فاز به صورت چندجمله‌ای فرض شده است. مشاهده شد که با افزایش مرتبه غیرخطی، در صورت انتخاب مقادیر بهینه، افزایش بهره انرژی الکترون را شاهد خواهیم بود. هم‌چنین رفتار تند بهره بر حسب ضرایب چیرپ، با بهینه‌سازی هم‌زمان این ضرایب بر حسب طول تپ، به رفتاری نرم و هموار تبدیل می‌گردد. از آن جا که تمامی توابع بر حسب چندجمله‌ای قابل

- [8] Sohbatzadeh F., Mirzanejhad S., and Aku H., "Synchronization scheme in electron vacuum acceleration by a chirped Gaussian laser pulse", *Physics of Plasmas*, vol. 16, 2009, PP. 023106.
- [9] Afhami S. and Eslami E., "Effect of nonlinear chirped Gaussian laser pulse parameters on the electron acceleration", *Optical Review*, vol. 21, 2014, pp 475-478.
- [10] Akhyani M., Jahangiri F., Niknam A. R., and R. Massudi, "Optimizing chirped laser pulse parameters for electron acceleration in vacuum", *Journal of Applied Physics*, vol. 118, 2015, PP. 18310.

