بیست و هفتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و سیزدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه سیستان و بلوچستان،
زاهدان، ایران.
۱۴-۱۶ بهمن ۱۳۹۹

کد مقاله : ۲-۱۲۴۶-۱۰-A

بررسی عددی تأثیر میدان مغناطیسی چهارقطبی بر روی دینامیک الکترون در سیستم برهم‌کنش لیزر-پلاسما

آمنه کارگریان

پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران

akagarian@aeoi.org.ir

چکیده - در این مقاله، دینامیک الکترون توسط موج پلاسمایی در سیستم برهم‌کنش لیزر-پلاسما و با در نظر گرفتن میدان ویگلری چهارقطبی را مورد بررسی قرار داده‌ایم. الکترون با کسب انرژی از موج پلاسمایی ایجاد شده توسط لیزر، با حرکت نوسانی در میدان ویگلری، حول مسیر انتشار لیزر حرکت می‌کند. میدان ویگلری موجب می‌شود الکترون بتواند در مسافت-های طولانی‌تری با موج برهم‌کنش کرده و از آن انرژی بگیرد. در واقع، ویگلر چهارقطبی باعث افزایش حضور الکترون در فاز شتاب موج پلاسمایی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد، بیشینه انرژی الکترون برای یک مقدار بهینه میدان ویگلری چهارقطبی بدست می‌آید. بنابراین، انتخاب مقادیر بهینه پارامترها برای دستیابی به بیشینه انرژی الکترون در سیستم اندرکنش لیزر-پلاسما امری ضروری است.

کلید واژه- برهم‌کنش لیزر-پلاسما، فاز شتاب الکترون، موج پلاسمایی، ویگلر چهارقطبی

Numerical investigation of quadruple magnetic field effects on the electron dynamics in the laser-plasma interaction system

Ameneh Kargarian

Plasma and Nuclear Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran akargarian@aeoi.org.ir

Abstract- In this paper, we investigate the electron acceleration by a plasma wave in a laser-plasma interaction system by considering the quadrupole wiggler field. The electron goes around the laser propagation direction by gaining energy from the laser-generated plasma wave. The wiggler field causes the electron to interact with and receive energy from the wave over longer distances. In fact, wiggler increases the presence of electrons in the plasma wave acceleration phase. The results show that the maximum electron energy is obtained for an optimal value of the quadruple wiggler field. Therefore, selecting the optimal values of the parameters is necessary to achieve the maximum electron energy in the laser-plasma interaction system.

Keywords: Electron acceleration phase, laser-plasma interaction, plasma wave, quadruple wiggler

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

مقدمه

یک موج پلاسمای نسبیتی، قادر به شتاب ذرات تا انرژی-های بسیار بالا می‌باشد [۱]. در واقع، میدان الکتریکی متناظر با موج پلاسمایی عامل اصلی شتاب ذرات است. چنین موجی را می‌توان با برهم‌کنش یک پالس لیزری و یا بیم ذرات پرانرژی با پلاسما ایجاد کرد. یک پالس لیزری با توان بالا و از مرتبه فمتوثانیه در اثر برهم‌کنش با محیط یونیزه پلاسما، میدان‌های قوی برای شتاب‌دهی الکترون را ایجاد می‌کند که می‌تواند از مرتبه گیگاولت بر متر نیز بیش‌تر باشد که بیشتر از بیشینه میدان شتاب دهنده‌های رادیو فرکانسی معمولی است. شتاب ذرات توسط موج پلاسما، یک رهیافت در حال توسعه برای شتاب الکترون است که با شتاب رادیو فرکانسی معمولی تفاوت‌های قابل توجهی دارد. از جمله اینکه این رهیافت قادر به شتاب الکترون‌ها تا انرژی‌های بسیار بالا و در مسافت‌های کوتاه می‌باشد. طی ده سال گذشته، توسعه شتابدهنده‌ها بر مبنای موج پلاسمایی، به چندین نقطه عطف مهم رسیده است. این نقاط قوت، به عنوان مثال، مشاهده اولین باریکه‌های تک انرژی ، تولید باریکه‌های قابل کنترل و با ثبات بیش‌تر می‌باشد. علاوه بر اندازه کوچک این شتابدهنده‌ها، آن‌ها می‌توانند باریکه‌هایی با طول کوتاه، اندازه کوچک عرضی و شدت بالا تولید کنند[۲].

در این مقاله، شتاب الکترون با استفاده از موج پلاسمای در حضور میدان ویگلری چهارقطبی (Quadrupole) را مورد بررسی قرار داده‌ایم. در بخش دوم این مقاله به بررسی آنالیز نسبیتی شتاب الکترون در سیستم برهم-کنش لیزر-پلاسما پرداخته‌ایم. بخش سوم به بیان نتایج عددی اختصاص داده شده است و در بخش آخر، خلاصه و نتیجه‌گیری بیان شده است.

آنالیز نسبیتی

برای وارد کردن معادله‌های ریاضی در مقاله خود همواره از در رژیم برهم‌کنش پالس لیزر با پلاسما، موج پلاسمایی با میدان قوی هنگامی ایجاد می‌شود که دوره پالس لیزری با دوره موج پلاسمایی قابل مقایسه باشد. از طرف دیگر، هنگامی که الکترون‌ها تحت تأثیر نیروی پاندرمتیو لیزری از مرکز دور می‌شوند، یک کانال یونی اطراف محور لیزر ایجاد می‌شود که میدان بار فضایی این کانال می‌تواند بر روی شتاب و مسیر حرکت الکترون مؤثر باشد. میدان الکتریکی موج پلاسما که در اثر برهم‌کنش لیزر با پلاسما ایجاد شده را به صورت زیر در نظر می‌گیریم [۳-۴]:

$$\mathbf{E} = \hat{x}A\exp(-(x^2)/r_p^2)\frac{2x}{kr_p^2}\sin(\omega t - kz + \theta + \hat{z}A\exp(-(x^2)/r_p^2)\cos(\omega t - kz + \theta) \quad (۱)$$

در اینجا A دامنه موج پلاسمایی، θ فاز اولیه، و r_p شعاع موج پلاسمایی می‌باشد. در اینجا، $\hat{z}$ راستای طولی است که در جهت انتشار لیزر می‌باشد. معادلات حاکم بر حرکت الکترون نسبیتی در کانال یونی ایجاد شده به‌صورت زیر می‌باشند.

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \frac{dm\gamma\mathbf{v}}{dt} = -e\mathbf{E} + e\nabla\varphi + \frac{\mathbf{V}\times\mathbf{B}}{C} \quad (۲)$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{-e}{m_0C^2}(\mathbf{E} - \nabla\varphi).\mathbf{V} \quad (۳)$$

در این روابط، B میدان مغناطیسی ویگلری می‌باشد که برای ویگلر چهارقطبی به‌صورت زیر می‌باشد [۵]:

$$\mathbf{B}_Q = \mathrm{B}_Q[(y\cos(k_\omega z) - x\sin((k_\omega z)))\hat{\mathrm{x}} + (x\cos(k_\omega z) + y\sin((k_\omega z)))\hat{\mathrm{y}}] \quad (۴)$$

فاکتور نسبیتی لورنتس به‌صورت $\gamma = (1 + \mathbf{p}^2/m^2c^2)$ که در آن $\mathbf{p} = m\gamma\mathbf{v}$ می‌باشد. با جایگذاری میدان ویگلر، میدان بار فضایی یون و میدان الکتریکی موج پلاسمایی در روابط (۲) و (۳) معادلات حاکم بر حرکت الکترون در این مکانیسم به‌دست خواهند آمد. معادلات حاصل، روابط کوپل شده غیرخطی خواهند بود که با استفاده از روش-

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

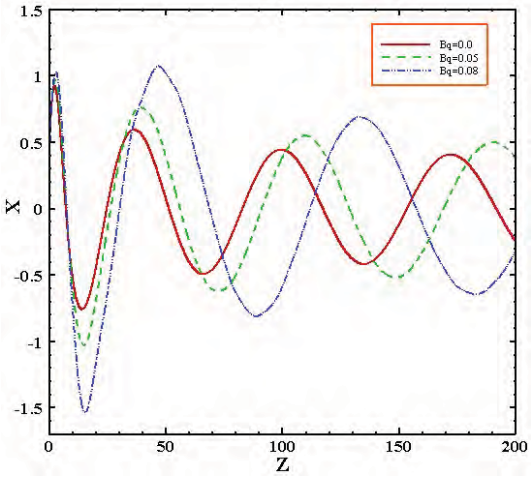
های عددی قابل تحلیل خواهند بود. در این مقاله، از روش عددی رانگ-گوتای مرتبه چهارم به همراه یک کد شبیه-سازی نسبیتی تک-ذره‌ای، استفاده شده است. پارامترهای استفاده شده در بخش نتایج به‌صورت زیر بی‌بعد شده‌اند:

$$x' = kx\,,\quad t' = \omega t\,,\quad k' = kc/\omega\,,\quad a_p = eA/m_0\omega c\,,$$
$$z' = kz\,,\quad r_1^{\,2} = k^2 r_0^{\,2}\,,\quad r_2^{\,2} = k^2 r_p^{\,2}\,,\quad \varphi'_0 = e\varphi_0/m_0c^2\,,$$
$$\delta' = \delta z\,,\quad B_q = eB_Q/m_0\omega c\,,\quad \mathbf{p}' = \mathbf{p}/mc\,.$$

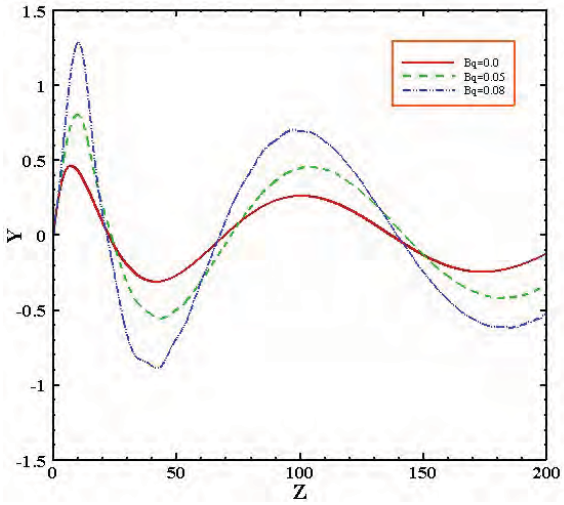
با استفاده از روابط به‌دست‌آمده در این بخش، شتاب الکترون توسط موج پلاسمایی تحت تأثیر میدان ویگلری را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

نتایج عددی

در این بخش، با استفاده از روابط به‌دست آمده و و پارامترهای اولیه $a_p = 5$، $\varphi_0 = 0.6$، $k = 1.02$، $\theta = \pi/2$، $r_1 = 2$، $r_2 = 4$، $\gamma_0 = 1.96$، مسیر حرکت الکترون در کانال یونی تحت تأثیر موج پلاسمایی و ویگلر چهارقطبی مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۱ مسیر حرکت الکترون در صفحه x-z و شکل مسیر حرکت الکترون در صفحه y-z را در حضور میدان ویگلری چهارقطبی نشان می‌دهند. حرکت نوسانی الکترون در حضور میدان ویگلری حول مسیر انتشار لیزر (محور z)، بخوبی قابل مشاهده می‌باشد. میدان ویگلر باعث باقی ماندن و حفظ الکترون در ناحیه شتاب می‌شود. افزایش دانه نوسانات الکترون با افزایش دامنه ویگلر به خوبی قابل مشاهده است.



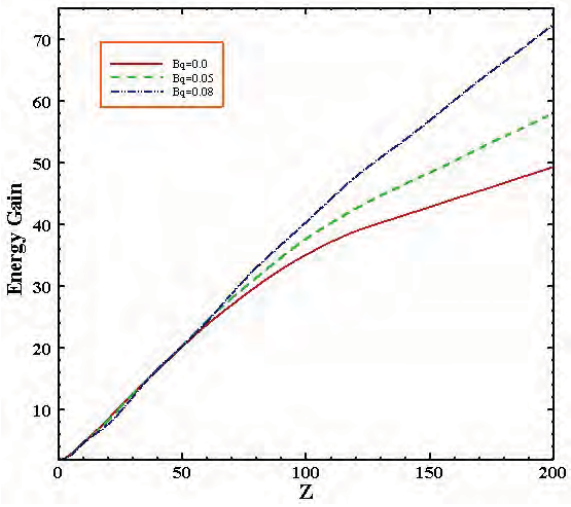
شکل ۱: مسیر حرکت الکترون در صفحه x-z برای دامنه‌های ویگلری متفاوت



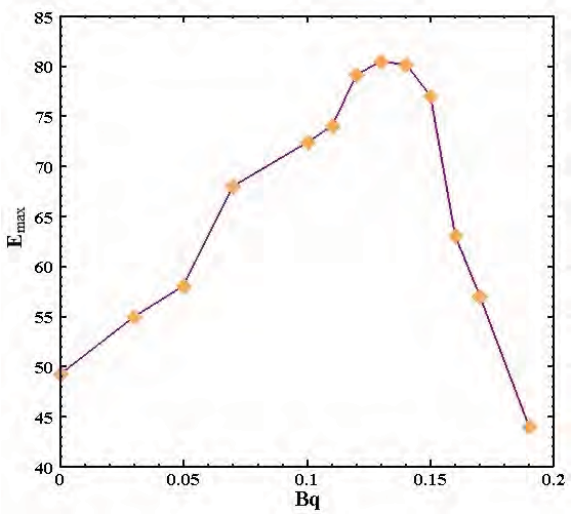
شکل ۲: مسیر حرکت الکترون در صفحه y-z برای دامنه‌های ویگلری متفاوت

شکل ۳ نیز نمودار انرژی الکترون در حضور میدان ویگلری را نشان می‌دهد. الکترون با کسب انرژی از موج پلاسمایی ایجاد شده توسط لیزر، با حرکت نوسانی در میدان ویگلری، حول مسیر انتشار لیزر حرکت می‌کند. میدان ویگلری موجب می‌شود الکترون بتواند در مسافت‌های طولانی‌تر با موج برهم‌کنش کرده و از آن انرژی کسب نماید. در واقع، ویگلر باعث افزایش حضور الکترون در فاز شتاب موج پلاسمایی می‌شود.

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



شکل ۳:نمودار بهره انرژی الکترون برای دامنه‌های ویگلری متفاوت



شکل ۴: بیشینه انرژی الکترون بر حسب دامنه میدان ویگلری

شکل شماره ۴ نیز نمودار بیشینه انرژی کسب شده توسط الکترون در حضور میدان ویگلری چهارقطبی با دامنه‌های متفاوت را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش دامنه میدان ویگلری تا یک مقدار بهینه انرژی الکترون افزایش و بعد از آن انرژی کاهش می‌یابد. دلیل این رفتار عدم تطابق رزونانس برای دامنه‌های ویگلری بالا می‌باشد. بنابراین، انتخاب مقادیر بهینه برای افزایش انرژی الکترون در سیستم اندرکنش لیزر-پلاسما امری ضروری می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، شتاب الکترون توسط موج پلاسمایی در سیستم اندرکنش لیزر-پلاسما و با در نظر گرفتن میدان ویگلری چهارقطبی مورد بررسی قرار گرفت. الکترون با کسب انرژی از موج پلاسمایی ایجاد شده توسط لیزر، با حرکت نوسانی در میدان ویگلری ، حول مسیر انتشار لیزر حرکت می‌کند. میدان ویگلری موجب می‌شود الکترون بتواند در مسافت‌های طولانی‌تر با موج برهم‌کنش کرده و از آن انرژی کسب نماید. در واقع، ویگلر باعث افزایش حضور الکترون در فاز شتاب موج پلاسمایی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد بیشینه انرژی الکترون برای یک مقدار بهینه میدان ویگلری چهارقطبی بدست می‌آید.

مرجع‌ها

[1] Mangles, S. P, et al., "Monoenergetic beams of relativistic electrons from intense laser–plasma interactions." Nature 431, 535-538, 2004.
[2] Leemans, W. P, "GeV electron beams from a centimetre-scale accelerator." Nature physics 2, no. 10 696-699, 2006.
[3] N. Kumar, and V. K. Tripathi. "Effect of betatron resonance on plasma wave acceleration of electrons in an ion channel." EPL (Europhysics Letters) 75, no. 2 260-266,2006.
[4] H. Mehdian, et al., Numerical study of electron acceleration by plasma wave in an ion channel under obliquely applied magnetic field." Optik 126, no. 21 3299-3302,2015.
[5] S.F. Chang., et al, Analysis and nonlinear simulation of a quadrupole wiggler FEL at millimeter wavelengths. IEEE journal of quantum electronics, 24(11), 2308, 1988

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