بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۲-۱۴ بهمن ۱۴۰۰

بررسی اثر میدان مغناطیسی خودالقایی در شتابدهی الکترون در مکانیسم IFEL

آمنه کارگریان[۱]، سمیه زارع[۲]

[۱]پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای،پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، ۱۴۳۹۵-۸۳۶، تهران- ایران، akargarian@aeoi.org.ir

[۲]پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، ۱۴۳۹۵-۸۳۶، تهران- ایران،sozare@aeoi.org.ir

چکیده – در این مقاله، اثر میدان مغناطیسی خودالقایی بر روی شتابدهی الکترون توسط موج پلاسمایی در مکانیسم عکس الکترون آزاد (IFEL) با یک ویگلر افقی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مکانیسم، الکترون ضمن حرکت نوسانی در میدان ویگلر از موج پلاسمای تولید شده توسط لیزر انرژی می‌گیرد. با افزایش دامنه میدان ویگلر، انرژی الکترون افزایش می‌دهد. علاوه‌براین، نتایج نشان می‌دهد میدان مغناطیسی خودالقایی ایجادشده توسط جریان حاصل از الکترون‌های پرانرژی موجب افزایش دامنه نوسانات الکترون و همچنین افزایش شتاب الکترون می‌شود.

کلید واژه- عکس لیزر الکترون آزاد، موج پلاسمایی، میدان مغناطیسی خودالقایی، ویگلر افقی

Investigation of self-magnetic field effect on electron acceleration in IFEL mechanism

[1]Ameneh Kargarian, [2]Somaye Zare
[1]Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, 14395-836, Tehran, Iran, akargarian@aeoi.org.ir
[2]Photonics and Quantum Technology Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, 14395-836, Tehran, Iran, sozare@aeoi.org.ir

Abstract- In this paper, the effect of a self- magnetic field on the electron acceleration by a plasma wave is investigated in the free electron laser mechanism (IFEL) with a horizontal wiggler. In this mechanism, the electron moving in the wiggler field receives energy from the plasma wave generated by the laser. By increasing the amplitude of the wiggler field the energy of the electron increases. In addition, the results show that the self-magnetic field created by the current generated by the energetic electrons increases the amplitude of the electron oscillations as well as the electron acceleration.

Keywords: Inverse free electron laser, plasma wave, self-magnetic field, horizontal wiggler

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-24]

مقدمه

مکانیسم معکوس لیزر الکترون آزاد (IFEL)، به‌عنوان یک مکانیسم شتاب ذرات شناخته شده است که در آن پرتو الکترونی و بیم لیزری هر دو از طریق یک ساختار مغناطیسی به نام ویگلر با هم منتشر می‌شوند. در این مکانیسم، برعکس لیزر الکترون آزاد، انرژی از پرتو لیزر به الکترون‌ها منتقل می‌شود. تولید پرتوهای الکترونی همدوس و با کیفیت بالا از طریق این مکانیسم، آن را برای منابع نوری پیشرفته و کاربردهای مختلف زیست-پزشکی و صنعتی مناسب می‌سازد. اما یکی از اشکالات عمده این مکانیسم شتاب‌دهی،کاهش هم‌فازی الکترون و موج الکترومغناطیسی است که ممکن است در همان مراحل اولیه شتاب اتفاق بیفتد. علاوه‌براین، با افزایش انرژی الکترون، شرایط رزونانس از بین می‌رود. یکی از راه‌های جلوگیری از این مشکلات، استفاده از موج پلاسمایی تولید شده توسط لیزر و یا بیم ذرات، برای شتاب الکترون در این مکانیسم می‌باشد [۱].

موج پلاسمای می‌تواند ذرات را تا انرژی‌های بسیار بالا شتاب دهد[۲]. در واقع میدان الکتریکی قوی 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 پلاسما، میدان‌های قوی برای شتاب دهی الکترون را ایجاد می‌کند که چندین مرتبه بیشتر از بیشینه میدان شتاب‌دهنده‌های رادیو فرکانسی معمولی است. این میدان‌ها توانایی شتاب الکترون‌ها تا انرژی‌های بسیار بالا و در مسافت های کوتاه را دارند و می‌توانند چشم اندازهای قابل توجهی را در راستای شتاب‌دهنده‌های نسل جدید فراهم سازند[۳]. در سالهای اخیر مطالعات زیادی بر روی بررسی شتاب الکترون توسط موج پلاسمایی انجام شده است [۴-۷].

در این مقاله، اثرات میدان مغناطیسی خود القای ایجاد شده در اثر جریان الکترون‌های پرانرژی بر روی شتاب موج پلاسمایی الکترون در مکانیسم IFEL مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بخوبی تأثیر افزایش دامنه میدان مغناطیسی خودالقا بر روی دینامیک الکترون را نشان می‌دهد. در بخش دوم این مقاله به بررسی آنالیز نسبیتی شتاب الکترون در مکانیسم IFEL پرداخته‌ایم. بخش سوم به بیان نتایج عددی اختصاص داده شده است و در بخش آخر نیز خلاصه و نتیجه‌گیری بیان شده است.

آنالیز نسبیتی

معادلات حاکم بر حرکت الکترون نسبیتی در کانال یونی ایجاد شده به‌صورت زیر می‌باشند:

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = -e\mathbf{E} + e\nabla\varphi + \frac{\mathbf{V}\times\mathbf{B}}{C} \qquad (۱)$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{-e}{m_0 C^2}(\mathbf{E} - \nabla\varphi).\mathbf{V} \qquad (۲)$$

در این روابط، $\mathbf{B} = \mathbf{B}_\omega + \mathbf{B}_S$ مجموع میدان مغناطیسی ویگلری و میدان خودالقا می‌باشد. شکل میدان ویگلر افقی به‌صورت $\mathbf{B}_\omega = \beta_\omega \cos(2\pi z/\lambda_l)\hat{z}$ و میدان مغناطیسی خودالقایی بصورت $\mathbf{B}_s = (\beta_s / r_0)e^{-x^2/2r_0^2}(-x\hat{y})$ می‌باشد که در آن β_ω و β_s به‌ترتیب دامنه ویگلر و میدان خودالقایی تولید شده هستند. میدان الکتریکی موج پلاسما را به صورت زیر در نظر می‌گیریم [۸]:

$$\mathbf{E} = \hat{x}A\exp(-(x^2)/r_p^2)\frac{2x}{kr_p^2}\sin(\omega t - kz + \theta$$
$$+\hat{Z}A\exp(-(x^2)/r_p^2)\cos(\omega t - kz + \theta) \qquad (۳)$$

که در این رابطه A دامنه موج پلاسمایی و θ فاز اولیه می‌باشد.

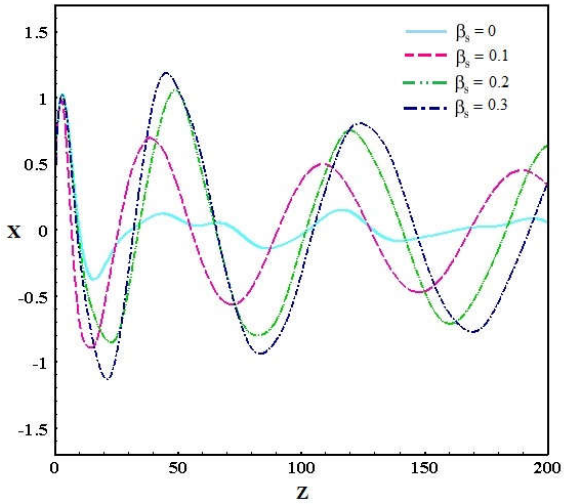
با جایگذاری میدان ویگلر، میدان مغناطیسی خودالقایی، میدان بار فضایی یون و میدان الکتریکی موج پلاسمایی در روابط (۱) و (۲) معادلات حاکم بر حرکت الکترون در این مکانیسم به‌دست خواهند آمد. معادلات حاصل، روابط کوپل شده غیرخطی خواهند بود که با استفاده از روش‌های عددی قابل تحلیل خواهند بود. در این مقاله، از روش

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-24]

عددی رانگ-گوتای مرتبه چهارم به همراه یک کد شبیه-سازی نسبیتی تک-ذره‌ای، استفاده شده است.

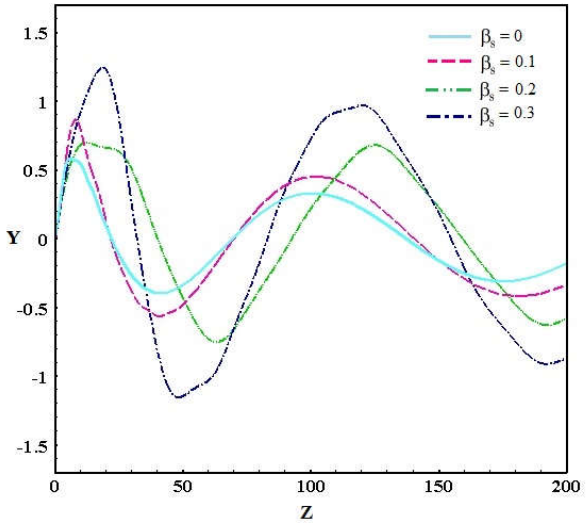
نتایج عددی

در این بخش، با استفاده از روابط به‌دست آمده در بخش قبل و پارامترهای اولیه به‌صورت $a_p = 5$ ، $\varphi_0 = 0.5$ ، $r_2 = 4$ ، $r_1 = 2$ ، $\theta = \pi$ ، $k = 1.6$ مسیر حرکت الکترون تحت تأثیر موج پلاسمایی در مکانیسم IFEL مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۱ مسیر حرکت الکترون در صفحه x-z را برای مقادیر متفاوت دامنه میدان مغناطیسی خودالقایی نشان می‌دهند. حرکت نوسانی الکترون در حضور میدان ویگلری افقی حول مسیر انتشار لیزر بخوبی قابل مشاهده می‌باشد. میدان ویگلر باعث باقی ماندن و حفظ الکترون در ناحیه شتاب می‌شود. همانگونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود با افزایش دامنه میدان مغناطیسی خودالقایی، دامنه نوسانات الکترون افزایش می‌یابد. با افزایش دامنه نوسانات عرضی، الکترون برای زمان‌های طولانی‌تری در فاز شتاب موج پلاسمایی باقی مانده و از موج انرژی می‌گیرد.



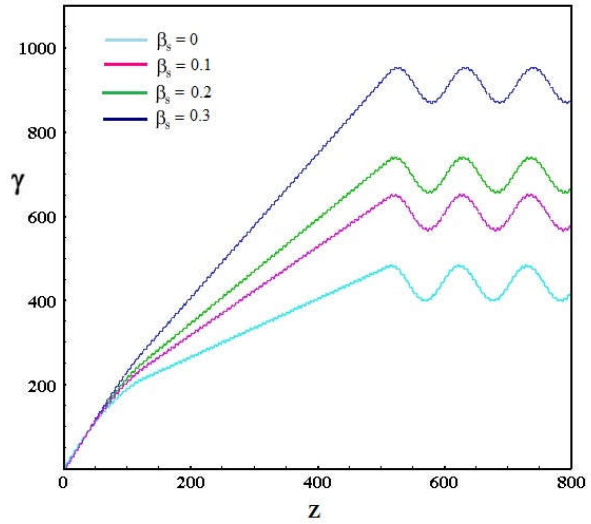
شکل۱: مسیر حرکت الکترون در صفحه x-z برای مقادیر متفاوت دامنه میدان مغناطیسی خودالقایی

شکل ۲ مسیر حرکت الکترون در صفحه y-z را برای مقادیر متفاوت دامنه میدان مغناطیسی خودالقایی نشان می‌دهند. در این شکل نیز حرکت نوسانی الکترون در حضور میدان ویگلری افقی حول مسیر انتشار لیزر بخوبی قابل مشاهده می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود با افزایش دامنه میدان مغناطیسی خودالقایی، دامنه نوسانات الکترون افزایش می‌یابد.



شکل۲: مسیر حرکت الکترون در صفحه y-z برای مقادیر متفاوت دامنه میدان مغناطیسی خودالقایی

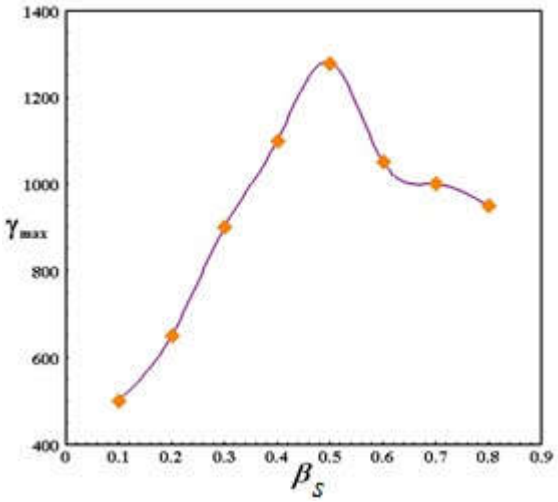
شکل ۳ انرژی الکترون در حضور میدان ویگلر و با در نظر گرفتن اثرات میدان مغناطیسی خودالقا را نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش دامنه میدان خودالقا، انرژی کسب‌شده توسط الکترون در راستای انتشار افزایش می‌یابد.



شکل۳: انرژی الکترون برحسب z برای مقادیر متفاوت دامنه میدان مغناطیسی خودالقایی

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-24]

بررسی‌های بیش‌تر نشان می‌دهد، با افزایش دامنه میدان خودالقا تا یک مقدار بهینه، انرژی الکترون افزایش و بعد از آن انرژی الکترون شروع به کاهش می‌نماید. این مقدار بهینه برای شرایط مختلف، متفاوت می‌باشد. شکل ۴ بیشینه انرژی الکترون بر حسب β_s را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود انرژی با افزایش دامنه میدان خودالقا تا $\beta_s = 0.5$ افزایش و سپس کاهش می‌یابد.



شکل۴: بیشینه انرژی الکترون برحسب دامنه میدان مغناطیسی خودالقایی

نتیجه‌گیری

در این مقاله، اثرات میدان مغناطیسی خود القای ایجاد شده در اثر جریان الکترون‌های پرانرژی بر روی شتاب موج پلاسمایی الکترون در مکانیسم IFEL با یک ویگلر افقی بررسی شده است. حرکت نوسانی الکترون در حضور میدان ویگلری افقی حول مسیر انتشار لیزر بخوبی قابل مشاهده می‌باشد. میدان ویگلر باعث باقی ماندن و حفظ الکترون در ناحیه شتاب می‌شود. با افزایش دامنه میدان مغناطیسی خودالقایی، دامنه نوسانات الکترون افزایش می‌یابد. با افزایش دامنه نوسانات عرضی، الکترون برای زمان‌های طولانی‌تری در فاز شتاب موج پلاسمایی باقی مانده و از موج انرژی می‌گیرد. بنابراین، با افزایش دامنه میدان مغناطیسی خودالقایی انرژی الکترون افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش دامنه میدان خودالقا تا یک مقدار بهینه، انرژی الکترون افزایش و بعد از آن انرژی الکترون شروع به کاهش می‌نماید.

مرجع‌ها

[1] A. V. Steenbergen and J. C. Gallardo, “Inverse free electron laser accelerator development,” in Proc. PAC, Vancouver, BC, Canada, 616–620, 1997.

[2] S. P. Mangles, et al., Monoenergetic beams of relativistic electrons from intense laser–plasma interactions. Nature 431, 535-538, 2004.

[3] W. P. Leemans, GeV electron beams from a centimetre-scale accelerator. Nature physics 2, no. 10, 696-699, 2006.

[4] S. Kumar and M. Yoon, Electron acceleration by a chirped circularly polarized laser pulse in vacuum in the presence of a planar magnetic wiggler, Phys. Scripta, 77, 2, 025404, 2008.

[5] A. Kargarian, and K. Hajisharifi, Self-magnetic field effects on laser-driven wakefield electron acceleration in axially magnetized ion channel. Laser and Particle Beams 38, 4, 222-228, (2020).

[6] K. P. Singh and V. K. Tripathi, Laser induced electron acceleration in a tapered magnetic wiggler, Phys. Plasmas, 11, 2, 743–746, 2004.

[7] A. Kargarian Plasma Wave Acceleration of Electron in Bubble Regime in Presence of a Planar Wiggler. Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran, 31(3), 277-285, (2020).

[8] S. Kumar, and M. Yoon, Electron acceleration in a warm magnetized plasma-filled cylindrical waveguide, Journal of Applied Physics 104, 073303 2008.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-24]