



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



بررسی اثر میدان مغناطیسی خودالقایی در شتابدهی الکترون در مکانیسم IFEL

آمنه کارگریان^۱، سمیه زارع^۲

^۱پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، ۸۳۶-۱۴۳۹۵، تهران -

ایران، akargarian@aeoi.org.ir

^۲پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، ۸۳۶-۱۴۳۹۵، 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. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد میدان مغناطیسی خودالقایی ایجاد شده توسط جریان حاصل از الکترون‌های پرنرژی 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

¹Ameneh Kargarian, ²Somaye Zare

¹Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, 14395-836, Tehran, Iran, akargarian@aeoi.org.ir

²Photonics 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

مقدمه

مکانیسم معکوس لیزر الکترون آزاد (IFEL)، به عنوان 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 می شوند. در این مکانیسم، برعکس لیزر الکترون آزاد، انرژی از پرتو لیزر به الکترون ها منتقل می شود. 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 می سازد. اما یکی از اشکالات عمده این مکانیسم شتاب دهی، کاهش هم فازی الکترون و موج الکترومغناطیسی است که ممکن است در همان مراحل اولیه شتاب اتفاق بیفتد. علاوه بر این، با افزایش انرژی الکترون، شرایط رزونانس از بین می رود. یکی از راه های جلوگیری از این مشکلات، استفاده از موج پلاسمایی تولید شده توسط لیزر و یا بیم ذرات، برای شتاب الکترون در این مکانیسم می باشد [۱].

موج پلاسمایی می تواند ذرات را تا انرژی های بسیار بالا شتاب دهد [۲]. در واقع میدان الکتریکی قوی متناظر با موج پلاسمایی عامل اصلی شتاب ذرات است. چنین موجی را می توان با برهم کنش یک پالس لیزری و یا بیم ذرات پرنرژی با پلازما ایجاد کرد. یک پالس لیزری با توان بالا و از مرتبه فمتوثانیه در اثر برهم کنش با محیط پلازما، میدان های قوی برای شتاب دهی الکترون را ایجاد می کند که چندین مرتبه بیشتر از بیشینه میدان شتاب دهنده های رادیو فرکانسی معمولی است. این میدان ها توانایی شتاب الکترون ها تا انرژی های بسیار بالا و در مسافت های کوتاه را دارند و می توانند چشم اندازهای قابل توجهی را در راستای شتاب دهنده های نسل جدید فراهم سازند [۳]. در سال های 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 الکترون های پرنرژی بر روی شتاب موج پلاسمایی الکترون در مکانیسم IFEL مورد بررسی قرار

گرفته است. نتایج بخوبی تأثیر افزایش دامنه میدان مغناطیسی خود القا بر روی دینامیک الکترون را نشان می دهد. در بخش دوم این مقاله به بررسی آنالیز نسبیتی شتاب الکترون در مکانیسم IFEL پرداخته ایم. بخش سوم به بیان نتایج عددی اختصاص داده شده است و در بخش آخر نیز خلاصه و نتیجه گیری بیان شده است.

آنالیز نسبیتی

معادلات حاکم بر حرکت الکترون نسبیتی در کانال یونی ایجاد شده به صورت زیر می باشند:

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = -e\mathbf{E} + e\nabla\varphi + \frac{\mathbf{V} \times \mathbf{B}}{C} \quad (1)$$

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

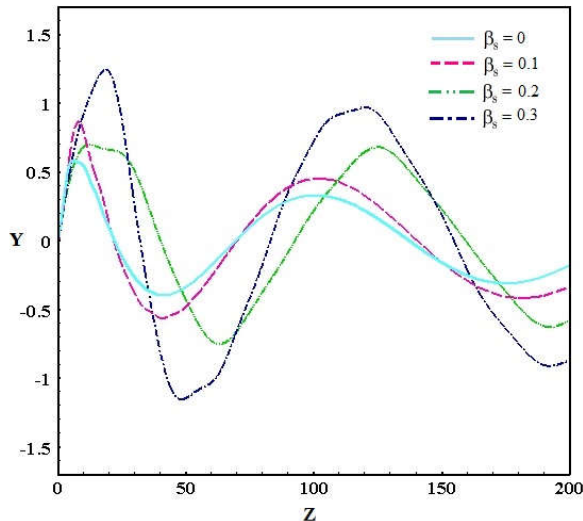
در این روابط، $\mathbf{B} = \mathbf{B}_\omega + \mathbf{B}_s$ مجموع میدان مغناطیسی ویگلری و میدان خود القا می باشد. شکل میدان ویگلر افقی به صورت $\mathbf{B}_\omega = \beta_\omega \cos(2\pi z / \lambda_l) \hat{z}$ و میدان مغناطیسی خودالقایی بصورت $\mathbf{B}_s = (\beta_s / r_0) e^{-x^2 / 2r_0^2} (-x\hat{y})$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

$$\begin{aligned} \mathbf{E} = & \hat{x} A \exp(-(x^2)/r_p^2) \frac{2x}{kr_p^2} \sin(\omega t - kz + \theta) \\ & + \hat{z} A \exp(-(x^2)/r_p^2) \cos(\omega t - kz + \theta) \end{aligned} \quad (3)$$

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

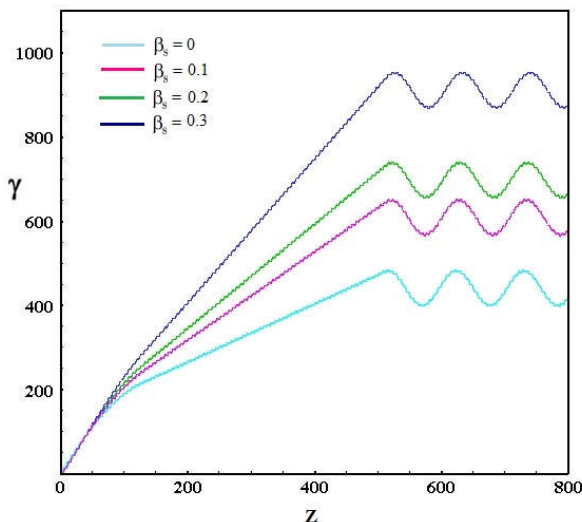
با جایگذاری میدان ویگلر، میدان مغناطیسی خودالقایی، میدان بار فضایی یون و میدان الکتریکی موج پلاسمایی در روابط (۱) و (۲) معادلات حاکم بر حرکت الکترون در این مکانیسم به دست خواهند آمد. معادلات حاصل، روابط کوپل شده غیرخطی خواهند بود که با استفاده از روش های عددی قابل تحلیل خواهند بود. در این مقاله، از روش

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.



شکل ۲: مسیر حرکت الکترون در صفحه X-Z برای مقادیر متفاوت دامنه میدان مغناطیسی خودالقایی

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

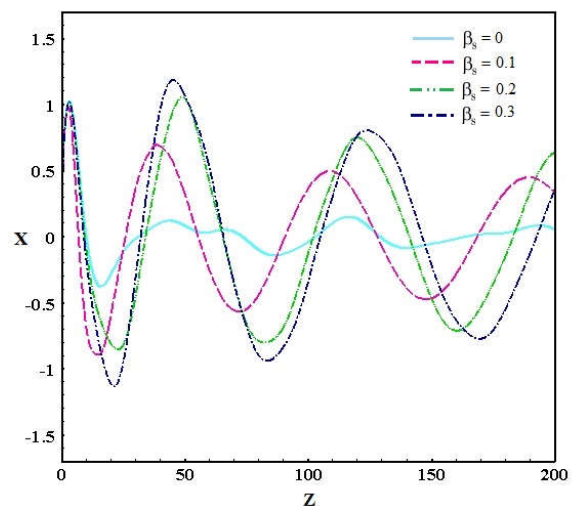


شکل ۳: انرژی الکترون بر حسب Z برای مقادیر متفاوت دامنه میدان مغناطیسی خودالقایی

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 $\phi_0 = 0.5$, $a_p = 5$, $k = 1.6$, $\theta = \pi$, $r_1 = 2$, $r_2 = 4$ 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.



شکل ۱: مسیر حرکت الکترون در صفحه X-Z برای مقادیر متفاوت دامنه میدان مغناطیسی خودالقایی

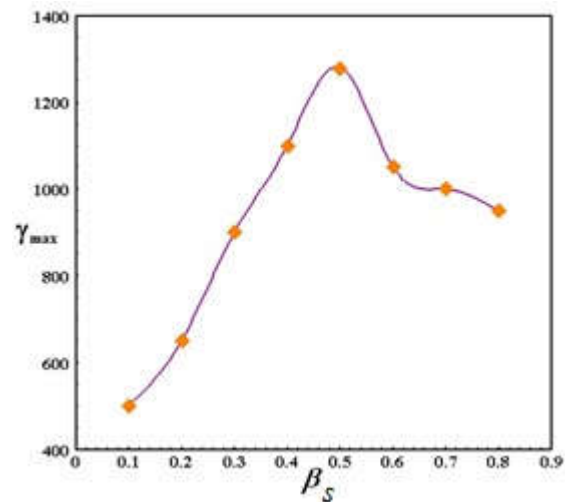
شکل ۲ مسیر حرکت الکترون در صفحه Y-Z را برای مقادیر متفاوت دامنه میدان مغناطیسی خودالقایی نشان می‌دهند. در این شکل نیز حرکت نوسانی الکترون در

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.

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.

مرجع‌ها

- [1] A. V. Steenberg 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.



شکل ۴: بیشینه انرژی الکترون بر حسب دامنه میدان مغناطیسی خودالقایی

نتیجه‌گیری

در این مقاله، اثرات میدان مغناطیسی خود القای ایجاد شده در اثر جریان الکترون‌های پراورزی 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