بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۶-۱۵ بهمن ۱۳۹۸

اثرات غیرخطی اندرکنش پرتو لیزر گاوسی با پلاسمای ناهمگن غیرنسبیتی و محاسبه میدان مغناطیسی موج

سیما علیلو[۱]،لعیا شاه‌رسائی[۲]

گروه فیزیک اتمی و ملکولی، دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز

S.alilou9310@gmail.com[1], L-shahressaee@Tabrizu.ac.ir[2]

چکیده – اندرکنش امواج الکترومغناطیسی(لیزر) با پلا سما به دلیل کاربردهای مهم آن در شتاب‌دهنده‌های پلا سمایی ، تولید ا شعه X، همجوشـــی لیزری در تولید اثرات غیرخطی نیز مانند نیروی اثرگذار، نیز از اهمیت ویژه‌ای برخورددار می‌باشـــد که این نیروی اثرگذار با نوسان‌های الکترون‌های پلاسمامنجر به شتاب گرفتن آن‌ها در پلاسما می‌شود. در این مقاله با فرض میدان الکتریکی پرتو گاو سی لیزر توان بالا، درمحیط پلا سمای چگال و غیرنسبیتی از طریق معادلات ماکسول، میدان مغناطیسی موج محا سبه شده و نمودار فضایی و زمانی آن‌ها رسم و به‌واسطه مقایسه آن‌ها، رفتار این دو میدان و اختلاف فاز آن‌ها از نظر فیزیکی مورد بررسی قرار گرفته‌است. از طریق گرادیان مجذور شدت میدان الکتریکی، نیروی اثرگذار را محاسبه و از نظر فیزیکی مورد بررسی قرار گرفت.

کلید واژه- اندرکنش امواج الکترومغناطیسی، پرتو لیزر گاوسی، تولید میدان مغناطیسی، نیروی اثرگذار.

NL Effects of Interaction Gaussian laser Beam with Inhomogeneous and Nonrelativistic plasma and Calculation of the Waves Magnetic Field

Sima Alilou, Laya Shahrassai
Department of Atomic and Molecular Physics, Department of Physics, Tabriz University, Tabriz

Abstract- The interaction of electromagnetic waves (lasers) with plasma is important because of its important applications in plasma **accelerators, X radiation production, laser fusion**, generation of nonlinear effects such as ponderomotive force, which leads to accelerate plasma electrons, by oscillating them. **In this paper, we consider the propagation of Gaussian electric field of high power laser with overdense on nonrelativistic plasma. Then we calculated the magnetic field of the EM wave via Maxwell equation. By comparison of them, we investigate the behavior and phase difference between them. Then we drew the spatial and temporal diagrams, and investigate physically. Then we calculated the ponderomotive force by gradient of the square of electric field intensity, and investigated that physically.**

Keywords: Electromagnetic interaction, Gaussian laser beam, Magnetic field, Ponderomotive force

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]

مقدمه

مطالعه برهمکنش امواج الکترومغناطیس(پالس لیزری) با پلاسما به دلیل کاربردهای مهم آن در شتاب‌دهنده‌های پلاسمایی[۱]، تولید اشعه X [۲] و همجوشی لیزری [۳] طی چند دهه‌ی اخیر از اهمیت بسیاری برخوردار بوده و روز به روز افزایش می‌یابد. از طرفی نیروی اثرگذار نقش مهمی در اندرکنش‌های لیزر پلاسما دارد که خواص پلاسما، مانند چگالی انرژی موج، شار انرژی و... را تغییر داده و باعث گرم شدن و تغییرات ضریب شکست پلاسما می‌شود. نیروی اثرگذار جزء پدیده‌های غیر خطی محسوب می‌شود[۴]. هنگامی که پرتو الکترومغناطیسی(لیزر) گاوسی در داخل پلاسما منتشر می‌شود، غیر خطیت به صورت نیروی اثرگذار افزایش پیدا می‌کند[۵]. پرتو گاوسی دارای دامنه‌ای است که توسط سطح مقطع گوسین با عرض داده شده تعریف می‌شود[۶]. با اعمال میدان مغناطیسی خارجی و محصور شدن توده‌ی پلاسما در اثر بر همکنش با مولفه‌های میدان مغناطیسی شدت تابش پلاسمای القائیده‌ی لیزری افزایش می‌یابد و همچنین مشخصه‌های دینامیکی و سینیتیکی پلاسمای حاصل را تغییر می‌دهد، می‌توان از آن برای کنترل خواص دینامیکی پلاسمای زود گذر و پر انرژی استفاده نمود[۷]. از روش‌های تولید میدان مغناطیسی، استفاده از غیریکنواختی چگالی n و دمای T می‌باشد که در این صورت میدان مغناطیسی به شکل $\overrightarrow{\nabla n} \times \overrightarrow{\nabla T}$ بوده که میدان مغناطیسی توروئیدال نامیده می‌شود[۸]. از روش‌های دیگر تولید میدان مغناطیسی از طریق معادلات مگنتوهیدرودینامیک و تحول میدان مغناطیسی است که در این حالت پلاسما را به عنوان یک سیال فرض نموده و طی محاسباتی با استفاده از معادلات ماکسول و قانون اهم می‌توان آن را محاسبه کرد[۹-۱۰]. اثر معکوس فارادی نیز روشی دیگر برای محاسبه‌ی میدان مغناطیسی است. اثر معکوس فارادی، پدیده‌ای است که در آن یک میدان مغناطیسی در اثر چرخش میدان الکترومغناطیسی در یک محیط ایجاد می‌شود [۱۱]. باتوجه به اهمیت نیروی اثرگذار و میدان مغناطیسی برای محصور سازی پلاسما در این مقاله به محاسبه‌ی میدان مغناطیسی تولید شده توسط پرتو گاوسی و نیروی اثرگذار حاصل از این پرتو پرداخته‌ایم.

تئوری ومحاسبات

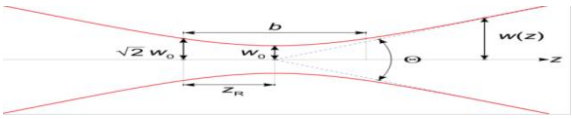
تغییرات فضایی و زمانی میدان الکتریکی پرتو گاوسی را می‌توان به شکل زیر نوشت[۱۲]:

$$\vec{E}(x,y,z,t) = \vec{E}(x,y,z)e^{i\omega t} \qquad (۱)$$

با توجه به رابطه (۱) تغییرات مکانی میدان الکتریکی بصورت زیر بیان می‌شود[۱۲]:

$$\vec{E}(x,y,z) = E_0 \frac{\omega_0}{\omega(z)} e^{-\frac{x^2+y^2}{\omega^2(z)}} e^{-i(kz-2\varphi(z)+\frac{k(x^2+y^2)}{2R(z)})} \qquad (۲)$$

در رابطه (۲)، $\omega(z) = \omega_0\left(1+\frac{z^2}{{z_R}^2}\right)^{(\frac{1}{2})}$ اندازه‌ی لکه در نقطه z ، $R(z) = z(1+\frac{{z_R}^2}{z})$ شعاع انحنای جبهه موج، ω_0 کمر پرتو در $z=0$ ، $z_R = \frac{\pi {\omega_0}^2}{\lambda}$ برد ریلی است و $\varphi(z) = Arctan(\frac{z}{z_R})$ تاخیر فاز طولی و قطبش خطی می‌باشد[۱۲].



شکل ۱: پرتو گاوسی

طبق قانون القای فارادی از معادلات ماکسول رابطه بین میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی به صورت زیر می‌باشد[۱۳]:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = \frac{\overrightarrow{\partial B}}{\partial t} \qquad (۴)$$

با استفاده از رابطه (۴) حال می‌توانیم میدان مغناطیسی حاصل پرتو گاوسی را بدست‌آوریم:

$$\vec{B}(x,y,z,t) = \frac{i\,E_0}{\omega}\frac{\omega_0}{\omega(z)}\frac{(2R(z)+ik\omega^2(z))(x-y)}{R(z)\omega^2(z)}$$

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]

$$e^{[-\frac{x^2+y^2}{\omega^2(z)}}e^{-i(kz-2\varphi(z)+\frac{k(x^2+y^2)}{2R(z)})]}e^{i\omega t} \qquad (۵)$$

میانگین نیروی اثرگذار در واحد حجم که بر روی الکترون‌ها در پلاسما اثر می‌گذارد یک نیروی لورنتس غیر خطی است که به صورت زیر تعریف می‌شود[۱۴]:

$$\vec{F_p} = -\frac{ne^2}{m_e\omega^2}\vec{\nabla}\left|\vec{E}\right|^2 \qquad (۶)$$

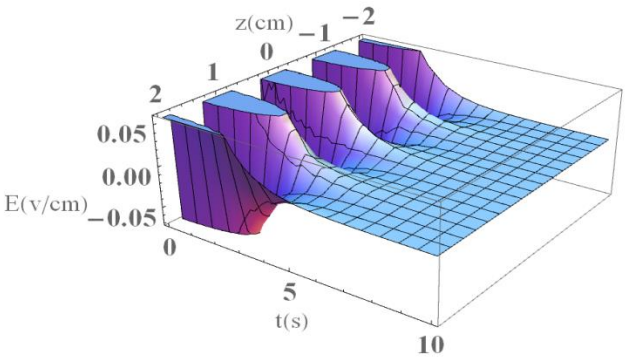
در رابطه (۸) ، m_e جرم الکترون ، ω فرکانس میدان تابشی و n چگالی الکترون‌های محیط پلاسما می‌باشند و $\left|\vec{E}\right|^2 = {E_x}^2 + {E_y}^2 + {E_z}^2$ می‌باشد. بنابراین با محاسبه نیروی اثرگذار در جهت $\hat{\imath}$ از میدان الکتریکی رابطه (۷) بدست می‌آید:

(۷)

$$F_p = -\frac{ne^2}{m_e\omega^2}E_0\frac{\omega_0}{\omega(z)}\frac{4e^{\frac{2(x^2+y^2)}{\omega(z)^2}}x\mathrm{Cos}\left[2\varphi(z)-\frac{k(x^2+y^2)}{2R(z)}-kz\right]^2}{w^2} + \frac{2e^{\frac{2(x^2+y^2)}{\omega(z)^2}}kx\mathrm{Cos}\left[2\varphi(z)-\frac{k(x^2+y^2)}{2R(z)}-kz\right]\mathrm{Sin}\left[2\varphi(z)-\frac{k(x^2+y^2)}{2R(z)}-kz\right]}{\mathrm{R}(z)}$$

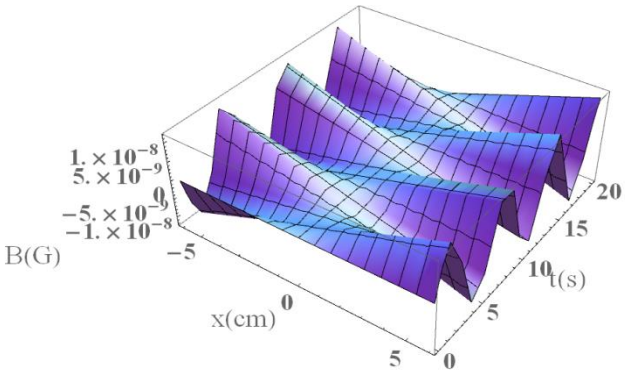
بحث و نتیجه‌گیری

شکل۲، رفتار میدان الکتریکی بر حسب زمان و مکان حین نفوذ در محیط پلاسما با پرتو گاوسی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود میدان الکتریکی پرتو گاوسی رفتاری نوسانی داشته و میرا می‌شود.



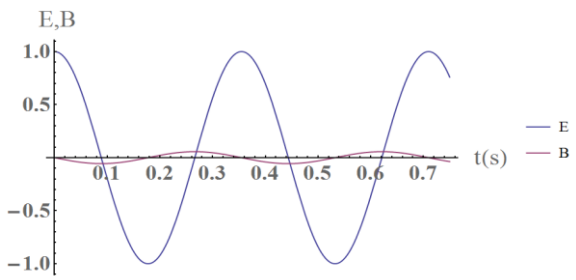
شکل۲ : تغییرات فضایی و زمانی میدان الکتریکی پرتو گاوسی.

نیروی اثرگذار ایجاد شده در پلاسما، یک میدان مغناطیسی نوسانی کندتغییر تولید می‌کند. با بررسی تغییرات فضایی و زمانی میدان مغناطیسی ناشی از میدان الکتریکی پرتو گاوسی در شکل۳، نشان داده شده‌است که میدان مغناطیسی با گذر زمان به صورت نوسانی تغییر می‌کند.



شکل۳ : تغییرات فضایی و زمانی میدان مغناطیسی.

شکل۴ ، رفتار میدان مغناطیسی و الکتریکی برحسب زمان نشان می‌دهد. از طریق بررسی رفتار میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی ملاحظه می شود که مقادیر آنها کاملا در فاز مخالف قرا دارند.

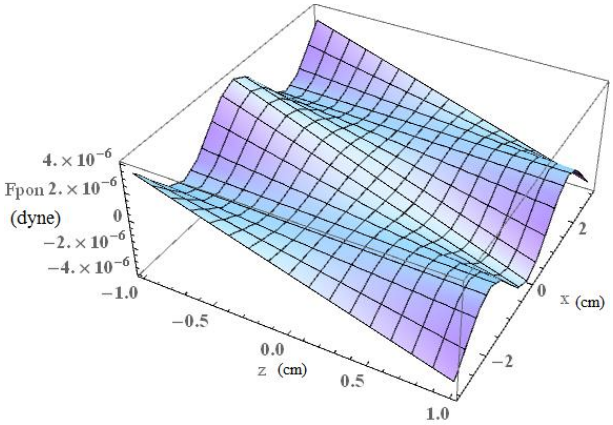


این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]

شکل۴ : نمایش رفتار میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی برحسب زمان.

نمودار نیروی اثرگذار که بیشتر به علت شدت زیاد لیزر فرودی و نوسان میدان در محیط پلاسما ایجاد می‌شود در شکل۵، رسم شده و حاکی از آن است که این نیرو در اثر تغییرات میدان الکتریکی گاوسی به صورت نوسانی رفتار می‌کند.



شکل۵: نمودار تغییرات فضایی نیروی اثرگذار.

نتیجه‌گیری

در این مقاله ، برخی از پدیده های غیرخطی مهم در تعامل پلاسما با لیزر ، از جمله نیروی اثرگذار، بررسی شده است. نیروی اثرگذار، با استفاده از باریکه‌های پرتوان میکروموج یا لیزری برای گرم کردن یا محبوس کردن پلاسما، فشار تابشی را اعمال می‌کند. در ادامه نیز با استفاده از میدان الکتریکی پرتو گاوسی توانستیم میدان مغناطیسی حاصل از آن را محاسبه نموده و با رسم نمودارهای اثرگذار، میدان مغناطیسی و الکتریکی رفتار آن‌ها را در مواجه با پرتو گاوسی مورد بررسی قراردادیم.

مراجع

[1] V. Malka, J. Faure,Y.A. Gauduel, and et al., Principles and applications of compact laser-plasma accelerators, Nat. Phy., 4, 447-453,2008.

[2] A. Pukhov, Relativistic plasmas, X-Rays in a flash, Nat. Phy., 2, 439-440, 2006.

[3] C. Labaune, Incoherent light on the road to ignition , Nat. Phy.,3, 680-682, 2007.

[4] L. Shahrassai, S. Sobhanian, And H. Khosravi, The effect of ponderomotive force of laser pulse on the frequency shift of ITS X-MODE propagation, Advances in Applied Physics & Material Science-APMAS,p. 292,2011.

[5] R. A. Caims, *Plasma Physics*, Philelphia, Chapter 6, 136, 1985.

[6] H. Hora, *Laser plasma physics: Forces and the nonlinearity principle*, SPIE press, pp.217, 2000.

[7] G. Goubau, F. Schwering, "On the guided propagation of electromagnetic wave beams". IRE Trans. 9: 248–256, 1961.

[8] J. L. Bobin, High intensity laser plasma interaction, Phys. Rep. Vol. 122, 173-274, 1985.

[9] D. Nicholson, *Introduction to plasma theory*, (New York : Wiley), 304, 1983.

[10] A. Raven, O. Willi, and T. P. Rumsby, Structures in laser-produced plasmas at high irradiances, Phys. Rev. Lett., 43, 4, 278-282, 1978.

[11] T. Lehner, Intense magnetic field generation by relativistic ponderomotive force in an underdense plasma, Physics Scripta, 49, 704-711, 1994.

[12] Miguel A. Bandres, Julio C. Gutierrez-Vega, "Ince Gaussian beams". Opt. Lett. OSA. 29 (2): 144–146, 2004.

[13] John D. Jackson, *Classical Electrodynamics (3rd ed.)*. Wiley, 1998.

[14] G. J. Morales, Y. C. Lee, "Ponderomotive-Force Effects in a Nonuniform Plasma". Phys. Rev. Lett. 33 (17): 1016–1019, 1974.

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]