همایش نانوفوتونیک ایران ۱۳۹۹- ۱ و ۲ آبان
Iranian Nano-Photonic Conference 2020
October 23 and 24

افزایش دامنه موج ردپایی پلاسما در برهمکنش با پالس لیزر

سمیه زارع *

پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران

چکیده: در این مقاله تاثیر شکل پالس لیزر بر دامنه موج‌ردپایی در پلاسما بررسی می‌شود. با کمک معادلات ماکسول، معادله‌ای برای دامنه میدان الکتریکی موج ردپایی حاصل از تک پالس بدست می‌آید. این معادله با روش رانجکوتای مرتبه۴، برای سه شکل متفاوت پالس حل می‌شود. مشاهده می‌شود که دامنه موج ردپایی حاصل از پالس مربعی از پالس سینوسی و گاوسی بزرگتر است. درادامه معادله‌ای برای میدان الکتریکی موج ردپایی با فرض جفت پالس از معادلات ماکسول حاصل می‌شود. نتایج حل این معادله نشان می‌دهد که اگر فاصله دو پالس ۸۵٪ طول موج پلاسما باشد، دامنه موج ردپایی بیشینه است. دامنه موج ردپایی با انتخاب این فاصله مشخص برای جفت پالس با تک پالس مقایسه می‌شود. دیده می‌شود که دامنه موج ردپایی جفت پالس حدود پنج برابر تک پالس است و همچنین دامنه موج در راستای انتشار ثابت نیست و افزایش می‌یابد.

کلید واژگان: موج ردپایی؛ شکل پالس لیزر؛ پلاسما؛

Enhancement of plasma wakefield amplitude in interaction with laser pulse

Somaye Zare

Photonics and Quantum Technology Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

Abstract-In this study, the effect of wake-field amplification due to various shapes of laser pulses in the plasma is investigated. Considering Maxwell's equations, an equation for the amplitude of the wakefield electric field is obtained. This equation is solved for three different laser pulse shapes. It is found that the square wave produces a higher amplitude wakefield than the sinusoidal and Gaussian pulses. Moreover, an equation for two laser pulse shapes is achieved. In this manner, the generated wakefield amplitude depends on the interpulse separation. When the separation is %85 of the plasma wavelength, the wakefield will be the maximum value. Furthermore, the solution of the equation by two sinusoidal pulses is noticed that the produced wakefield amplitude in the first peak is approximately five times greater than the one related to the single pulse. Besides, the amplitude of the wakefield produced by two pulses is not constant and it is periodically increasing.

Keywords: Wakefield, Laser pulse shape, Plasma

* sozare@aeoi.org.ir

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-29]

۱- مقدمه

برهمکنش امواج الکترومغناطیس با پلاسما بعلت کاربردهای گسترده‌شان همچون تولید موج ردپایی، همجوشی القایی، تولید هارمونیک‌ها، خودکانونی پالس لیزر، فیزیک هسته‌ای از اهمیت زیادی برخوردار شده‌اند. آزمایش‌های زیادی نیز برای شتاب‌دهی ذرات در پلاسما توسط برهمکنش لیزرهای پرشدت با پلاسما انجام گرفته است[۱]. موج ردپایی، یکی از روش‌های تولید الکترون‌های پرشتاب است. با انتشار پالس لیزر در پلاسما، الکترون‌ها رفتار نوسانی خواهند داشت و این نوسان‌ها، موجی موسوم به موج ردپایی را در پلاسما ایجاد می‌کنند. اگر الکترون‌های پلاسما در این موج به دام بیافتند، تحت تاثیر موج، شتاب زیادی بدست می‌آورند و هر چه دامنه موج ردپایی بزرگتر باشد، شتاب الکترون‌ها بیشتر خواهد شد. در مقالات زیادی عوامل موثر بر دامنه موج ردپایی بررسی شده است[۲]. این مکانیزم شتاب‌دهی به صورت آزمایشگاهی در مقالات بسیاری گزارش شده است[۳]. در این مقاله ابتدا معادلات مربوط به دامنه میدان الکتریکی موج ردپایی حاصل از تک پالس در پلاسما به دست می‌آید و این معادله برای سه شکل مختلف پالس لیزر حل می‌شود. سپس با توجه به معادله اول، معادله‌ای برای جفت پالس لیزر نتیجه خواهد شد. با حل این معادله برای جفت پالس مشخص می‌شود که در فاصله‌ای مشخص برای دو پالس دامنه موج ردپایی بیشینه خواهد شد. سپس با فرض این فاصله معین برای جفت پالس سینوسی، دامنه موج حاصل از جفت پالس و تک پالس مقایسه خواهند شد.

۲- تئوری

در برهمکنش پالس لیزر با پلاسما، ناشی از نیروی پاندرماتیو و نیروی الکتروستاتیکی، الکترون‌ها رفتاری نوسانی خواهند داشت. زمانی که طول پالس لیزر نزدیک به طول موج الکترون‌های پلاسما باشد، پالس بدون اعوجاج تا چندین طول ریلی در پلاسما منتشر خواهد شد. با شروع از معادلات ماکسول و با توجه به میدان الکتریکی پالس لیزر، معادله‌ای برای مولفه طولی میدان الکتریکی موج ردپایی حاصل می‌شود، معادله(۱). سپس با توجه به معادله(۱)، معادله‌ای برای میدان موج ردپایی حاصل از دو پالس با قطبش، فرکانس و شدت یکسان به دست خواهد آمد[۴].

$$(\frac{\delta^2}{\delta\xi^2}+k_p^2)E_{wz}=-\frac{mc^2k_p^2}{4e}\frac{\delta a^2}{\delta\xi} \qquad (۱)$$

$$(\frac{\delta^2}{\delta\xi'^2}+k_p^2)E_{twz}=k_p^2E_{wz}-\frac{mc^2k_p^2}{4e}\frac{\delta a_t^{\,2}}{\delta\xi'} \qquad (۲)$$

k_p، ν_p، a، a_t، E_{wz}، m، c، e، ξ و ξ' به ترتیب عدد موج پلاسما، سرعت فاز موج، دامنه نرمالیزشده پالس لیزر اول و دامنه نرمالیزشده پالس دوم، دامنه میدان الکتریکی موج ردپایی و پارامتر بی بعد راستای انتشار هستند.

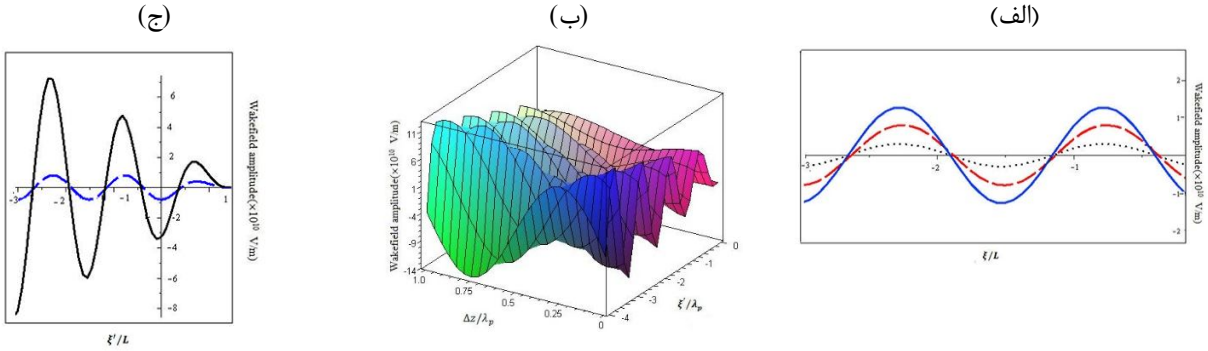
۳- محاسبات

با توجه به معادلات فوق، دامنه میدان الکتریکی موج ردپایی حاصل از سه شکل پالس سینوسی، $a^2=a_0^2\exp(-2r^2/r_0^2)\sin^2(\pi\xi/L)$، گاوسی، $a^2=a_1^2\exp(-k^2a_2(\xi-L/2)^2)$ و مربعی با مقدار ثابت دامنه، $\sqrt{b}$ و گوشه‌های $\sqrt{b(1-\cos(2\pi\xi/L))}$ از $0<\xi<L/4$ و $\sqrt{b/2(1+\cos(3\pi\xi/L))}$ از $2L/3<\xi<L$ بررسی می‌شود. مقادیر ثابت شکل پالس‌ها چنان

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-29]

انتخاب می‌شوند تا سه پالس شدت یکسان داشته باشند. فرض می‌شود، پالس لیزری با شدت $۱/۴\times۱۰^{۱۷} Wcm^{-2}$، طول موج ۱/μ۰m و طول پالس، L، μ۱۵m در پلاسمایی با چگالی $۵\times۱۰^{۱۸} cm^{-3}$ منتشر می‌شود. همچنین پارامترهای پالس لیزر r_0= μ۴m ،r= μ۲۵m ،a_1 = ۰/۸ ،a_2 = ۰/۱ و b = ۰/۰۷ در نظر گرفته می‌شوند. با استفاده از روش رانجکوتای مرتبه ۴ معادله (۱) حل می‌شوند. شکل ۱الف دامنه موج ردپایی سه پالس را نشان می‌دهد. در شکل دیده می‌شود که دامنه موج ردپایی در سه پالس مربعی، سینوسی و گاوسی به ترتیب برابر با m ،$۱/۲۷\times۱۰^{۱۰} V/m$ ،$V/$ $۰/۸\times۱۰^{۱۰} V/m$ و $۰/۳\times۱۰^{۱۰} V/m$ خواهند بود که دامنه حاصل از موج مربعی بیشینه خواهد شد. سپس معادله(۲) به صورت تابعی از فاصله دو پالس در راستای انتشار رسم می‌شود. طبق شکل۱ب، زمانی که فاصله دو پالس، $\Delta z = 0.85\lambda_p$ باشد، دامنه موج ردپایی بیشینه خواهد بود، λ_p، طول موج نوسان پلاسماست. در ادامه در شکل۱ج، با فرض این فاصله مشخص برای جفت پالس، دامنه موج حاصل از یک جفت پالس سینوسی و تک پالس مقایسه می‌شود. با ورود پالس دوم به پلاسما، الکترون‌هایی که تحت تاثیر پالس اول در حال نوسان هستند، از پالس دوم انرژی دریافت می‌کنند و در نتیجه دامنه موج ردپایی آن‌ها در راستای انتشار افزایش می‌یابد.



شکل ۱-(الف) دامنه موج ردپایی حاصل از موج مربعی(خط‌ممتد)، سینوسی(خط‌چین) و گاوسی(نقطه‌چین)، (ب) تاثیر فاصله دو موج سینوسی در دامنه موج ردپایی، (ج) مقایسه دامنه موج ردپایی حاصل از یک پالس (خط‌چین) و جفت پالس سینوسی (خط‌ممتد).

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله با توجه به معادلات ماکسول معادله‌ای برای دامنه موج ردپایی در پلاسما به دست آمد و این معادله برای سه پروفایل پالس سینوسی، گاوسی و مربعی، دامنه موج ردپایی حل شد. مشاهده گردید که دامنه موج حاصل از پالس مربعی در مقایسه با دو پالس دیگر بیشترین مقدار را دارد. در ادامه معادله دامنه موج جفت پالس ورودی به پلاسما حاصل شد و با حل آن دیده شد که در فاصله‌ای که کسری از طول موج پلاسماست، دامنه موج ردپایی جفت پالس بیشینه می‌شود. سپس با فرض این فاصله، دامنه موج ردپایی حاصل از تک پاس و جفت پالس سینوسی مقایسه شدند و نتیجه شد که زمانی که یک جفت پالس با فاصله مشخص وارد پلاسما می‌شوند، دامنه موج حدود پنج برابر حالت تک پالس خواهد شد و از طرفی دامنه در راستای انتشار مقدار ثابتی نیست و افزایش می‌یابد.

مراجع

[۱] E.G. Bessonov *et al.*, *Laser Part. Beams* 26, 489 (2008).
[۲] P. Sprangle *et al.*, *Phys. Rev. E* 63, 056405 (2001).
[۳] V. Malka et al., Proceedings of EPAC, 10, (2006).
[۴] R. Gaurav *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams 11, 071301 (2008).

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-29]