بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۴-۱۲ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

# تخمین بهره نهایی الکترون در میدان لیزری گاوسی با استفاده از تقریب موج تخت

دانیال اکبری، فاضل جهانگیری، مینا اخیانی، علیرضا نیکنام و رضا مسعودی

پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، اوین، تهران

**چکیده - بهره لحظه‌ای انرژی الکترون در میدان موج تخت لیزری در لحظه عبور از مرز فضایی دلخواه مورد محاسبه قرار می‌گیرد. همچنین، بهره نهایی انرژی الکترون در میدان لیزری گاوسی در شرایط اولیه مشابه به صورت عددی به دست می‌آید. سپس با تکرار نتایج حاصل در شرایط اولیه مختلف نشان می‌دهیم که بهره انرژی به دست آمده با مدل موج تخت می‌تواند جهت تخمین مقدار واقعی آن در میدان گاوسی مورد استفاده قرار گیرد.**

کلید واژه- شتاب الکترون، میدان گو سین، میدان موج تخت

# *Estimating the Final Energy Gain of Electron in a Gaussian Laser Field Using Plane Wave Approximation*

*Danial Akbary, Fazel Jahangiri, Mina Akhyani, Ali Reza Niknam and Reza Massudi*

*Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran*

*Abstract- Instantaneous energy gain of an electron in a plane laser field is calculated when passes through an arbitrary spatial boundary. Moreover, the final energy gain of electron in a Gaussian laser field is also numerically calculated. By repeating the calculations under different initial conditions, it is shown that the final energy gain in a Gaussian laser field could be estimated using that is obtained by plane wave approximation.*

*Keywords: Gaussian Field, Acceleration, Electron, Plane Wave Field*



[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31 ]

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

## مقدمه

شتاب لیزری ذرات باردار بلافاصله پس از اختراع لیزر مطرح شده و در کنار محیط پلاسما، استفاده از محیط خلا نیز همواره مورد توجه محققان قرار داشته است. تعدادی از این بررسی‌ها، با فرض پروفایل فضایی تخت برای میدان لیزری، تخمین کیفی مناسبی از دینامیک الکترون در میدان لیزری ارائه داده‌اند [۱]. به دلیل نامتناهی بودن محدوده عرضی و زمانی برهم کنش، بهره انرژی الکترون به صورت لحظه‌ای به مقدار قابل ملاحظه‌ای رسیده ولی در نهایت صفر می‌شود [۲]. مقدار واقعی‌تر انرژی نهایی الکترون در میدان لیزری با لحاظ محدودیت فضایی و زمانی به آن قابل محاسبه است. در میدان شدید لیزری گاوسی، دامنه‌ی نوسانات عرضی الکترون می‌تواند از شعاع باریکه فراتر رفته و الکترون امکان فرار با بهره‌ی غیر صفر قابل توجهی را پیدا کند. تاکنون رویکردهای متفاوتی جهت تامین شرایط بهینه شتاب الکترون در میدان لیزری گاوسی شامل الگوی نیروی پاندرماتیو و الگوی موسوم به *(CAS)* ارائه شده است. در حالی که مدل موج تخت نمی‌تواند تخمین کمی مناسبی از رفتار الکترون ارائه دهد، به کارگیری مدل موج گاوسی نیازمند محاسبات زمان‌بر و پیچیده تری است. اما این امکان وجود دارد که با اعمال تغییراتی در مدل موج تخت، تخمین کمی مناسبی از بهره انرژی واقعی الکترون به دست آید. بررسی این امکان، با فرض محدود بودن میدان لیزری تخت به ابعاد فضایی ای معادل با قطر کمر باریکه گوسی، موضوع مقاله حاضر است. این روش برگرفته از ایده محاسبه فاز فرار الکترون در میدان تخت لیزری می‌باشد [۳]. با اعمال مرز به مسیر حرکت الکترون در موج تخت و بهره لحظه عبور را محاسبه و با بهره نهایی در میدان لیزری گاوسی مقایسه می‌کنیم.

## معادلات و تئوری

دینامیک الکترون با معادلات

$$\frac{dP}{dt} = -e[E + \beta \times B] \qquad (۱)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = -ec\beta.E \qquad (۲)$$

بیان می‌شود که به ترتیب نیروی لورنتس و تغییرات زمانی انرژی الکترون در میدان لیزری در خلا می‌باشد.

$P = \gamma mc\boldsymbol{\beta}$ تکانه نسبیتی، $\boldsymbol{\beta}$ سرعت برداری الکترون نرمال شده به سرعت نور $c$ و $\boldsymbol{E}$ و $\boldsymbol{B}$ به ترتیب میدان برداری الکتریکی و مغناطیسی موج لیزری می‌باشند. همچنین $\epsilon = \gamma mc^2$ انرژی نسبیتی، $e$ بار الکترون و $\gamma = (1-\beta^2)^{-0.5}$ فاکتور نسبیتی لورنتس است. از طرفی به منظور ساده‌سازی، محاسبات با استفاده از پتانسیل برداری انجام داده می شود که با رابطه های $E_x = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$، $E_z = (i/k)\left(\frac{\partial E_x}{\partial x}\right)$ و $\vec{B} = -(\frac{i}{\omega})\vec{\nabla} \times \vec{E}$ با میدان در ارتباط است. موج لیزری قطبیده ی تخت، منتشر شده در جهت z و با پتانسیل برداری زیر در نظر گرفته می شود:

$$A(z,t) = A_0 \cos(q) \qquad (۳)$$

$A_0$ دامنه پتانسیل برداری، $\theta = \omega t - kz + \varphi_0$، $\omega$ فرکانس، $k$ عدد موج و $\varphi_0$ فاز اولیه میدان لیزری است. بهره لحظه‌ای الکترون با استفاده از روابط (۱) و (۲) به صورت زیر به دست می‌آید [۷]:

$$F = g - g_0 = \frac{Q_0^2}{2} g_0 \left\{(1+b_0)\left(\cos q - \cos j_0\right)^2\right\} \qquad (۴)$$

$Q$ دامنه نرمال شده پتانسیل برداری می باشد. مسیر حرکت الکترون در صفحه $x$-$z$ توصیف می‌شود[۷]:

$$kx = \frac{Q}{g_0(1-b_0)} \left(\sin q - \sin j_0 - \cos j_0 (q - j_0)\right) \qquad (۵)$$



این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31 ]

بنابراین می‌توان لحظه عبور الکترون از محدوده عرضی دلخواه حول محور $x$ را بدست آورد:

$$t = w^{-1}\left(q_{esc} - j_0 - kz\,q_{esc}\right) \quad (۶)$$

که آن را زمان فرار می‌نامیم. $\theta_{esc}$ بیانگر فاز لحظه فرار است که به صورت زیر به دست می‌آید:

$$q_{esc} = j_0 + \frac{2pw_0 g_0(1 - b_0)}{Ql\,\left|\cos j_0\right|} \quad (۷)$$

در نهایت، انرژی لحظه فرار الکترون ($G$) با استفاده از رابطه (۴) و (۷) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$G = \frac{Q_0^2}{2} g_0 \left\{(1 + b_0)\left(\cos q_{esc} - \cos j_0\right)^2\right\} \quad (۸)$$

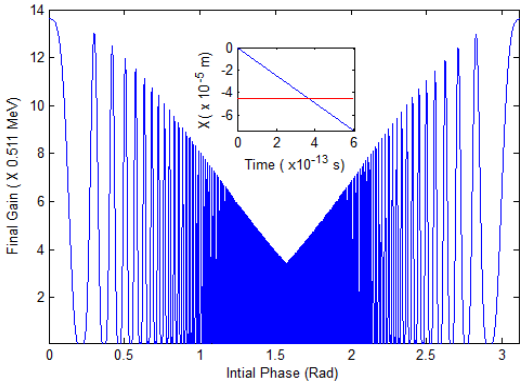
از سوی دیگر، باریکه لیزری گاوسی را با پتانسیل برداری به صورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$A = A_0 \frac{w_0}{w(z)} e^{\frac{x^2+y^2}{w(z)^2}} \sin\left(q - j(z) - \frac{k(x^2+y^2)}{2R(z)}\right) \quad (۹)$$

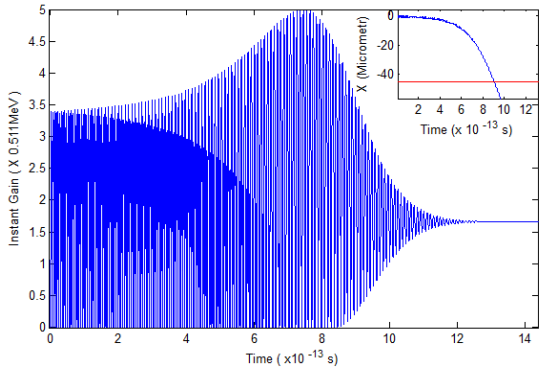
که در آن $R(z)$، $w(z)$، و $\phi(z)$ به ترتیب شعاع انحنای جبهه موج، شعاع کمره و فاز گوی می‌باشد. با حل عددی معادلات (۱) تا (۹)، انرژی نهایی الکترون مورد محاسبه قرار می‌گیرد. در این محاسبات از تقریب گاوسی مرتبه اول استفاده شده و الکترون روی محور $x$ در کمره باریکه و با سرعت اولیه صفر تحت زاویه صفر تزریق می‌شود.

## نتایج

شکل (۱) تغییرات بهره لحظه فرار الکترون از مرز ۴۵ میکرونی میدان موج تخت را بر حسب فاز اولیه لیزر نشان می‌دهد. این محاسبه به ازای $\gamma_0 = ۱/۰۰۵$ ، $Q=۲/۳۸۴$ و زاویه تزریق صفر انجام شده است. کمینه بهره صفر و بیشینه بهره فرار بسته به مقدار فاز اولیه بین ۳/۴ تا ۱۳/۶ متغیر است. در حالیکه بهره لحظه‌ای و جابجایی الکترون از محور در میدان گاوسی مطابق شکل (۲) به دست می‌آید. این محاسبه به ازای پارامترهای اولیه مشابه حالت موج تخت و با فرض کمره باریکه معادل ۴۵ میکرون انجام می‌شود. مشاهده می‌شود که بهره نهایی الکترون برابر ۱/۵۶ است که با مقدار بهره فرار از موج تخت تفاوت زیادی دارد. همچنین نوسانات بهره حتی پس از عبور الکترون از مرزهای کمره باریکه ادامه یافته و در زمانی متفاوت با لحظه ی عبور از این مرز به پایداری می‌رسد که با توجه به تغییرات میدان عرضی در باریکه گاوسی قابل توجیه است. شکل (۳) تغییرات زمانی میدان طولی و عرضی را نشان می‌دهد.




شکل ۱-بهره لحظه فرار الکترون از مرز ۴۵ میکرون بر حسب فاز اولیه در میدان موج تخت لیزری. شکل کوچک: جابجایی عرضی الکترون نسبت به محور $z$ بر حسب زمان به ازای فاز اولیه صفر.




شکل ۲- بهره لحظه‌ای الکترون در باریکه گاوسی با شعاع کمره ۴۵ میکرومتر (پارامتر ها مشابه شکل ۱). شکل کوچک: جابجایی عرضی الکترون نسبت به محور $z$ بر حسب زمان.

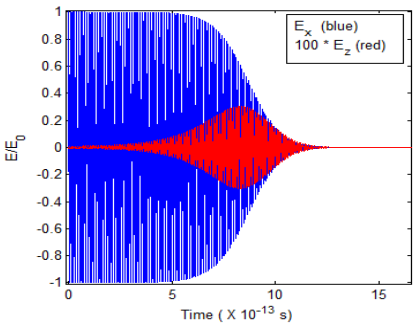
نوسانات شدید زمانی بهره را می‌توان به تغییرات سریع فاز میدان لیزری نسبت داد. تغییرات نوسانی بهره نهایی الکترون بر حسب فاز اولیه، که در شکل (۴) نشان داده شده است، موید این مطلب می‌باشد. این رفتار نوسانی مشابه چیزی



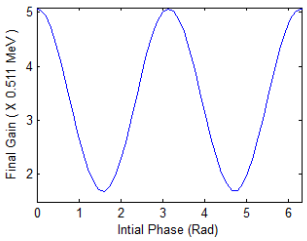
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31 ]

است که در مدل موج تخت هم مشاهده می‌شود. در ادامه به مقایسه بهره نهایی مدل گاوسی با بهره فرار مدل موج تخت محدود پرداخته می شود. تغییرات بهره نهایی مدل گاوسی و بهره فرار موج تخت محدود بر حسب شدت لیزری در شکل (۵) نشان داده شده است. واضح است که تغییرات بهره نهایی مدل گاوسی با اعمال ضریبی منطبق بر پوش تغییرات در مدل موج تخت است. رفتار نوسانی بهره فرار به دلیل وابستگی فاز فرار به شدت لیزری، مطابق روابط (۷) و (۸) می‌باشد.

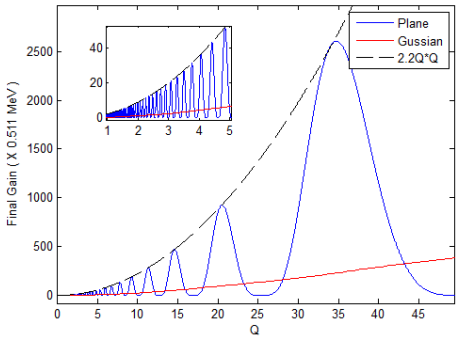



شکل۳-تحول زمانی میدان الکتریکی عرضی و محوری

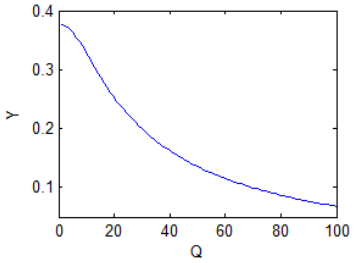



شکل ۴ - بهره نهایی بر حسب فاز اولیه (پارامتر ها مشابه شکل (۲))

این تشابه رفتار می‌تواند به منظور تخمین بهره نهایی مدل گاوسی مورد استفاده قرار گیرد (به عنوان مثال به ازای ۱/۰۵ $\gamma_0 =$ ، ۲/۳۸۴=Q ، زاویه تزریق صفر و فازاولیه صفر ضریب تصحیحی ۰/۳۷۵ است). نتایج محاسبات نشان می-دهد این ضریب مستقل از کمره باریکه و وابسته به شدت لیزری است. شکل (۶) تغییرات ضریب فوق را بر حسب شدت لیزری نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان بهره نهایی الکترون در میدان گاوسی را با محاسبات ساده‌تر در مدل موج تخت در شدت‌های مختلف لیزری تخمین زد.




شکل ۵ – بهره نهایی بر حسب شدت لیزری




شکل ۶– ضریب اصلاحی پوش مدل موج تخت بر حسب شدت

## نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی رفتار الکترون در میدان لیزری تخت محدود شده و سپس در میدان لیزری گاوسی پرداخته وبا مقایسه بهره انرژی الکترون در دوحالت، ضریبی تصحیحی به دست آمده است که با استفاده از آن می‌توان بهره نهایی الکترون در میدان گاوسی را با محاسباتی ساده‌تر توسط مدل موج تخت تخمین زد.

## مراجع

[1] E. Esarey, Reviews of Modern Physics **81,** 1229 (2009).

[2] E. Esarey, P Sprangle, J. Krall, Physical Review E **52**, 5443 (1995).

[3] L. Morgovsky, Laser Physics **25**, 126002 (2015).



این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31 ]