بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

شبیه‌سازی شتاب الکترون برپایه پلاسمون‌های سطحی ناشی از پالس‌های نوری فوق‌کوتاه به روش FDTD

سیده فاطمه عبدالغفوریان، سمیه نجفی و رضا مسعودی

پژوهشکده لیزر و پلاسما دانشگاه شهید بهشتی

چکیده - در این مقاله، شتاب پالس‌های الکترونی برپایه پلاسمون‌های- سطحی تحریک شده توسط پالس‌های نوری فوق‌کوتاه بررسی شده است. برای محاسبه توزیع میدان الکترومغناطیسی در فضا و زمان، معادلات ماکسول به روش عددی FDTD در دو بعد حل و دینامیک حرکت الکترون با استفاده از معادله نیروی لورنتس بررسی شده است. این پالس‌های الکترونی برای آزمایشات تفکیک‌پذیر زمانی، مورد استفاده در پمپ نوری و پروب الکترونی مناسب می‌باشند.

کلید واژه- پالس الکترونی، لیزر فمتوثانیه، موج پلاسمون سطحی، روش FDTD.

Simulation of surface-plasmons-based electron acceleration exited by ulterashort optical pulse using FDTD method

S.F.Abdolghaforian, S.Najafi and R.Massudi

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

Abstract- In this paper, surface-plasmons-based electron acceleration exited by ultrashort optical pulse is studied. To calculate the electromagnetic field distribution in space and time, Maxwell's equations is solved by numerical FDTD method in two dimensions and the electron dynamics is studied using Lorentz force equation. Such electron pulses can be usefull for time-resolved experiment used for optical-pump electron-probe systems.

Keywords: electron pulse, femtosecond laser, surface-plasmon wave, FDTD method.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

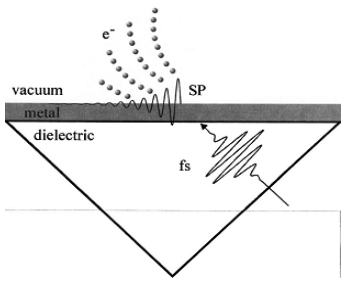
۱- مقدمه

بسیاری از وقایع فیزیکی در مقیاس زمانی بسیار کوتاه (فمتوثانیه) و فضایی بسیار کوچک (نانومتر) اتفاق می‌افتند. برای آشکارسازی دینامیک اینگونه فرآیندها، می‌بایست از کاوشگرهایی با دقت فضایی و زمانی بالا استفاده کرد. امروزه گروه‌های تحقیقاتی زیادی درصدد تولید چنین کاوشگرهایی می‌باشند. با توجه به آن‌که دقت فضایی کاوشگرهای نوری به ۴۰۰nm محدود می‌شود، استفاده از الکترون به جای فوتون در تصویربرداری مورد توجه قرار گرفته است. تصویربرداری مبتنی بر الکترون دارای مزیت اصلی تفکیک‌پذیری فضایی بسیار بالا است، به‌طوری‌که طول موج الکترون با انرژی بالا می‌تواند بسیار کوتاه‌تر از فوتون با همان انرژی باشد. بنابراین با استفاده از پالس‌های الکترونی فوق‌کوتاه، دقت زمانی و فضایی لازم برای کاوش دینامیک پدیده‌ها فراهم خواهد شد.

مهم‌ترین منابع تولید پالس‌های الکترونی فوق‌سریع، لیزرهای فوق‌کوتاه می‌باشند. با وجود این‌که لیزرهای توان بالا می‌توانند پالس‌های فوق‌کوتاه با میدان‌های الکتریکی قوی تولید کنند، ماهیت عرضی تابش الکترومغناطیسی اجازه شتاب مستقیم ذرات باردار را نمی‌دهد و می‌بایست از روش‌های پیچیده‌ای، مانند توری شتاب فوتوگسیل [۱] یا شتاب‌دهنده میدان نزدیک [۲] استفاده شود. روش جایگزین، که در این مقاله به بررسی آن پرداخته شده، استفاده از میدان امواج پلاسمون سطحی (SP) برای تولید و شتاب الکترون است. در این روش شتاب مؤثر الکترون را می‌توان با استفاده از پتانسیل پاندرماتیو گرادیان فضایی میدان الکترومغناطیسی به دست آورد. همچنین با جایگزیدگی میدان الکترومغناطیسی در ناحیه‌ای کوچکتر از طول‌موج ($\lambda_l >$)، افزایش چگالی میدان الکتریکی و درنتیجه شتاب پاندرماتیو حاصل می‌شود. در این مقاله، این پدیده به صورت تئوری بررسی شده است تا اطلاعاتی درباره عوامل مؤثر در ایجاد شرایط بهینه در تولید الکترون، به‌دست آمده و زمینه‌ی برای انجام این آزمایش به‌صورت کارآمدتر فراهم گردد.

۲- تئوری

برای ایجاد امواج SP آرایش نسبتاً ساده کرشمن را درنظر گرفته‌ایم (شکل۱). پالس لیزری فوق‌کوتاه، تحت شرایط تشدید پلاسمون، وارد منشور شده و به یک لایه فلزی نازک با ضخامت d، روی سطح منشور، برخورد می‌کند. با تنظیم ضخامت لایه فلزی و زاویه ورود پالس روی سطح فلز، می‌توان جفت‌شدگی کامل بین پالس نوری و امواج پلاسمون سطحی ایجاد کرد و بدین‌ترتیب امواج پلاسمونی را در سطح تحریک نمود. تحت این شرایط، انرژی از امواج الکترومغناطیسی به مد SP انتقال می‌یابد. هنگامی‌که میدان لیزر، $E_l(t)$، برای تحریک امواج SP در یک لایه‌ی نازک فلزی استفاده می‌شود، میدان الکترومغناطیسی روی سطح فلز به شکل موج سطحی جایگزیده خواهد شد. نوسان جمعی الکترون‌ها سبب تولید میدان SP، $E_{SP}(z,t) \approx \eta E_l(t) \times \exp(-\alpha z)$، می‌شود، که در مقایسه با میدان لیزر با فاکتور η (۱۰^{۲}-۱۰^{۳}) افزایش یافته و همچنین باتوجه به کاهش نمایی میدان در طول مشخصه α^{-1} ($< \lambda_l$)، دارای گرادیان فضایی بالایی می‌باشد. قرارگیری الکترون‌ها در این میدان افزایش‌یافته SP، سبب شتاب‌دهی مؤثر آن‌ها می‌شود. بهره مؤثر انرژی نیازمند همپوشانی دقیق فضایی و درجه بالایی از همزمانی بین E_{SP} و الکترون‌ها می‌باشد. در این فرآیند، با اعمال پالس نوری فوق‌کوتاه تحت شرایط تشدید، الکترون‌ها به طور همزمان تحریک فوتونی شده و به‌طور دسته جمعی نوسان می‌کنند؛ از طرفی تعدادی از الکترون‌ها بر اثر همان پالس از فلز جدا شده و در میدان پلاسمون سطح شتاب می‌گیرند، که رابطه فازی و همپوشانی فضایی لازم بین مکانیزم‌های تولید و شتاب برآورده می‌شود. بدین طریق امکان تولید و شتاب‌دهی تمام نوری الکترون‌ها فراهم می‌شود که برای آزمایشات تفکیک‌پذیر زمانی مورد استفاده در پمپ نوری و پروب الکترونی مناسب می‌باشد [۳].



شکل ۱. هندسه شتاب الکترون بر پایه SP (آرایش کرشمن).

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

۳- شبیه‌سازی

از آنجاکه میدان‌های الکترومغناطیسی امواج SP، نمی‌توانند به طور کامل با حل تحلیلی معادلات، توصیف شوند، با استفاده از روش تفاضل محدود حوزه‌ی زمانی، FDTD، به حل عددی معادلات ماکسول در شرایط مسأله پرداخته شد [۴]. این روش اطلاعات کاملی در مورد دینامیک امواج SP ارائه می‌کند و امکان بررسی شتاب الکترون تحت شرایط مختلف و شرایط جفت‌شدگی موج SP را فراهم می‌کند.

به منظور محاسبه توزیع میدان امواج SP برای هندسه توصیف شده در شکل (۱)، می‌بایست معادلات ماکسول

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0}\nabla \times \mathbf{E} \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon}\nabla \times \mathbf{H} \qquad (۲)$$

برای انتشار امواج الکترومغناطیسی حل شوند، که $\mathbf{H}$ شدت مغناطیسی، $\mathbf{E}$ میدان الکتریکی، ε گذردهی و μ_0 نفوذپذیری خلأ است. پدیده دیگری که به‌صورت جفت‌شده با معادلات ماکسول باید درنظر گرفت، برهم‌کنش امواج الکترومغناطیسی با ماده فلزی است. با استفاده از مدل درود برای تابع دی‌الکتریک فلز و به‌کارگیری آن در رابطه $\mathbf{E} = \varepsilon_m^{-1}(\omega)\mathbf{D}$ و سپس انتقال آن به حوزه زمانی، معادله زیر را خواهیم داشت:

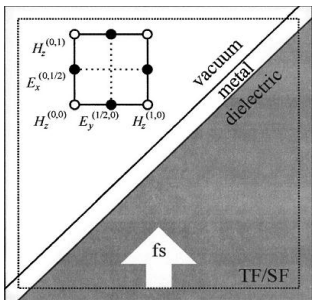
$$\nu_d \frac{d\mathbf{D}}{dt} + \frac{d^2\mathbf{D}}{dt^2} = \omega_p^2 \varepsilon_0 \mathbf{E} + \nu_d \varepsilon_0 \frac{d\mathbf{E}}{dt} + \varepsilon_0 \frac{d^2\mathbf{E}}{dt^2} \qquad (۳)$$

که ω_p فرکانس پلاسما، ν_d نرخ میرایی و ε_0 گذردهی خلأ است.

با حل سه معادله جفت‌شده (۱)، (۲) و (۳) به روش FDTD و وارد کردن میدان اولیه به روش میدان کل/ میدان پراکنده (TF/SF) و با استفاده از شرایط مرزی سخت (شکل ۲)، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی مرتبط با میدان SP نزدیک سطح فلزی به‌دست می‌آید. پس از محاسبه توزیع فضایی و زمانی میدان، شتاب‌دهی الکترون‌ها در این میدان، بررسی می‌شود. الکترون‌های نمونه به طور یکنواخت در طول لایه فلزی در زمان‌های متفاوت در مدت پالس، جهت بررسی نحوه حرکت و میزان شتاب‌گیری و انرژی الکترون‌هایی که در مکان و زمان‌های متفاوت نسبت به پالس از سطح فلز جدا می‌شوند، در نظر گرفته می‌شوند. ازآن‌جاکه، احتمال گسیل در تمام مختصات فضایی و زمانی یکسان نیست و بیشتر الکترون‌ها در قله پالس لیزری گسیل می‌شوند، بنابراین، وزن‌های نسبی به هر مسیر الکترون نمونه با توجه به توزیع $j_e \propto I_l{}^n(t)$ اختصاص داده می‌شود، که n مرتبه فرآیند گسیل چندفوتونی و j_e چگالی فوتوالکترون‌ها می‌باشد. ازآنجاکه اندازه‌گیری‌های تجربی گزارش شده، فرآیند فوتوگسیل سه فوتونی از لایه‌ی Ag را نشان داده‌اند، مقدار n، ۳ انتخاب می‌شود [۵]. هنگامی‌که الکترون‌ها از سطح فلز آزاد می‌شوند، تحت تأثیر میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی موج SP قرار می‌گیرند. ماهیت این برهم‌کنش توسط معادله کلاسیک نیروی لورنتس بررسی می‌شود:

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{q}{m}(\mathbf{E} + \mu_0 \mathbf{v} \times \mathbf{H}) \qquad (۴)$$

که q/m و $\mathbf{v}$ به ترتیب نسبت بار به جرم و سرعت الکترون می‌باشد. با قرار دادن میدان امواج SP محاسبه شده در معادله (۴)، سرعت، مکان و انرژی مربوط به الکترون‌های آزاد شده در زمان و مکان‌های متفاوت محاسبه می‌شود.



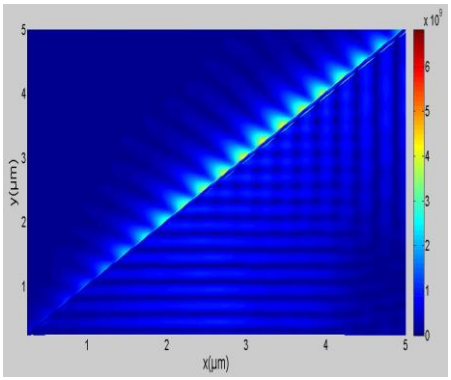
شکل ۲. فضای محاسباتی مورد استفاده برای بخش FDTD مدل.

۴- بحث و نتایج

شکل (۳) توزیع میدان الکتریکی کل SP، که توسط پالس گوسی با پهنای زمانی $\tau_l = ۱۰۰\,\text{fs}$، طول‌موج مرکزی ۸۰۰nm روی سطح منشور با پوشش نقره به ضخامت

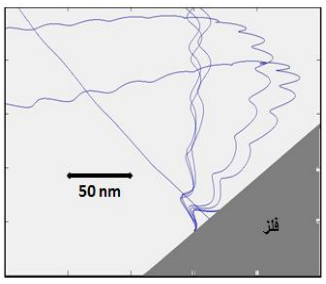
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

۵۰nm ایجاد شده، را نشان می‌دهد. برای لایه‌ی نقره کاملاًصاف، فاکتور افزایش میدان الکتریکی، η، ۶/۱۶ مشاهده می‌شود، که با ضریب $\alpha^{-1} \approx$ ۲۴۰nm عمود بر لایه فلزی کاهش می‌یابد. مقدار α^{-1} به‌دست آمده مطابقت بسیاری با مقدار ۲۴۷nm محاسبه شده از رابطه تئوری $\alpha^{-1} = \sqrt{(\omega/c)^2 - k_p^2}$ دارد. تفاوت مشاهده شده بین فاکتور افزایش در روش عددی و تجربی ($۱۰^۳$-$۱۰^۲$) [۳] به این دلیل است که، در تجربه ناهمواری‌های سطح فلز باعث جایگزیدگی بیشتر میدان الکترومغناطیسی و درنتیجه افزایش بیشتر میدان می‌شود. درنظر گرفتن ناهمواری‌های سطح نیازمند حل عددی پیچیده میدان الکترومغناطیسی در سه بعد به روش FDTD است.



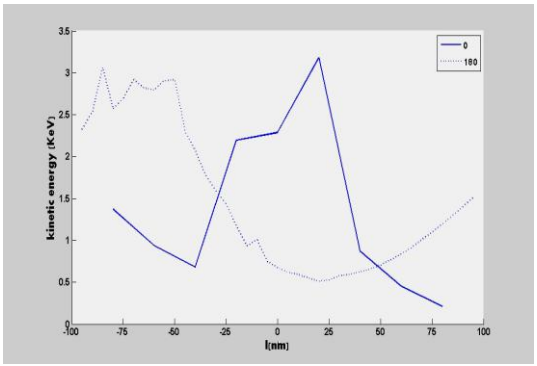
شکل ۳. توزیع میدان الکتریکی کل (V/cm^2).

شکل (۴) مسیر چند الکترون که در قله دامنه فضایی موج SP و در زمان‌های مختلف رها شده‌اند، را نشان می‌دهد. به علت گرادیان میدان الکتریکی، هر الکترون نیروهای نامتقارنی را در طول سیکل‌های متوالی موج SP تجربه می‌کند، که منجر به جابجایی تدریجی آن می‌شود. ماهیت نوسانی موج SP کاملاً از حرکت ارتعاشی مسیر الکترون مشاهده می‌شود.



شکل ۴. مسیر حرکت نوسانی الکترون‌ها.

در شکل (۵) تغییرات انرژی جنبشی تعدادی الکترون که از روی سطح فلز در FWHM فضایی پالس و در قله زمانی پالس کنده شده‌اند، را در دوفاز اولیه (φ_0) پالس نشان می‌دهد. همان‌طور که می‌بینید، تغییرات انرژی برای دو فاز مخالف، معکوس یکدیگر هستند و این ناشی از تغییر جهت بردار میدان و درنتیجه جهت نیروی وارد شده به الکترون است. همچنین دیده می‌شود که الکترون‌ها تا انرژی حدود ۳ KeV شتاب می‌گیرند.



شکل ۵. تغییرات انرژی بر حسب مکان رها شدن از سطح فلز برای دو فاز اولیه صفر و ۱۸۰ درجه.

۵-نتیجه‌گیری

در این مقاله، شتاب الکترون SP با استفاده از حل عددی معادلات ماکسول به روش FDTD بررسی شد. با انتخاب شرایط مناسب جفت‌شدگی و فاز اولیه میدان لیزری می‌توان میزان شتاب‌دهی را تنظیم نمود. مشاهده شد که می‌توان پالس‌های الکترونی با انرژی حدود ۳KeV را با استفاده از پالس‌های نوری فوق‌کوتاه تولید کرد؛ که از این پالس‌های الکترونی به عنوان کاوشگر استفاده می‌شود. همچنین پالس‌های الکترونی فوق‌کوتاه تولید شده با این روش را می‌توان تقویت کرده و انرژی آن را برای استفاده در حوزه‌های دیگر افزایش داد. بررسی تجربی این کار نیز در دست انجام است.

مراجع

[1] M.Y. Schelev et al., "*500-fs photoelectron gun for time-resolved electron diffraction experiments*", **Opt.Eng.37**, 1998.

[2] T. Tajima and J.M. Dawson, "*Laser electron accelerator*", **Phys. Rev. Lett. 43**, 1979.

[3] S. E. Irvine, "*Surface-plasmon-based electron acceleration*", **Phys. Rev. A. 73**, 2006.

[4] TaAove, Allen, "*Compurational elecrrodynamics: the finite-difference time-domain method*", **ARTECH HOUSE**, 2005.

[5] S. E. Irvine, A. Dechant, and A.Y. Elezzabi, "*Generation of 0.4-keV Femtosecond Electron Pulses using Impulsively Excited Surface Plasmons*", **Phys. Rev. Lett**. 43 (1979).

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]