



بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران  
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران  
۸ تا ۱۰ بهمن ماه ۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز



## شبیه‌سازی شتاب الکترون برپایه پلاسمون‌های سطحی ناشی از پالس‌های نوری فوق کوتاه 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 فوق کوتاه 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 excited by ultrashort 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 excited 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 useful for time-resolved experiment used for optical-pump electron-probe systems.

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

## ۱- مقدمه

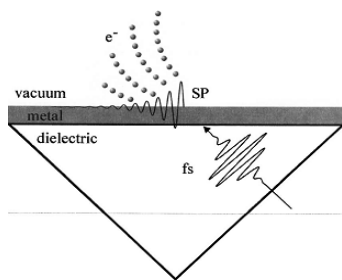
بسیاری از وقایع فیزیکی در مقیاس زمانی بسیار کوتاه (فمتوثانیه) و فضایی بسیار کوچک (نانومتر) اتفاق می-افتند. برای آشکارسازی دینامیک اینگونه فرآیندها، می-بایست از کاوشگرهایی با دقت فضایی و زمانی بالا استفاده کرد. امروزه گروه‌های تحقیقاتی زیادی درصدد تولید چنین کاوشگرهایی می‌باشند. با توجه به آن‌که دقت فضایی کاوشگرهای نوری به  $400\text{nm}$  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، به طوری که 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 این که 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 جایگزینی میدان الکترومغناطیسی در ناحیه‌ای کوچکتر از طول موج  $(\lambda_l <)$ ، افزایش چگالی میدان الکتریکی و در نتیجه 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، به دست آمده و زمینه‌ی برای انجام این آزمایش به صورت کارآمدتر فراهم گردد.

## ۲- تئوری

برای ایجاد امواج SP آرایش نسبتاً ساده کرشمن را در نظر گرفته‌ایم (شکل ۱). 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 بدین ترتیب امواج پلاسمونی را در سطح تحریک نمود. تحت این شرایط، انرژی از امواج الکترومغناطیسی به مد SP انتقال می‌یابد. هنگامی که 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  $\eta$  ( $10^2-10^3$ ) افزایش یافته و همچنین با توجه به کاهش نمایی میدان در طول مشخصه  $\alpha^{-1} (\lambda_l <)$ ، دارای گرادیان فضایی بالایی می‌باشد. قرارگیری الکترون‌ها در این میدان افزایش یافته 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 به طور 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).

### 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

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

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \nabla \times \mathbf{H} \quad (2)$$

برای انتشار امواج الکترومغناطیسی حل شوند، که  $\mathbf{H}$  شدت مغناطیسی،  $\mathbf{E}$  میدان الکتریکی،  $\varepsilon$  گذردهی و  $\mu_0$  نفوذپذیری خلأ است. پدیده دیگری که به صورت جفت‌شده با معادلات ماکسول باید در نظر 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:

$$v_d \frac{d\mathbf{D}}{dt} + \frac{d^2 \mathbf{D}}{dt^2} = \omega_p^2 \varepsilon_0 \mathbf{E} + v_d \varepsilon_0 \frac{d\mathbf{E}}{dt} + \varepsilon_0 \frac{d^2 \mathbf{E}}{dt^2} \quad (3)$$

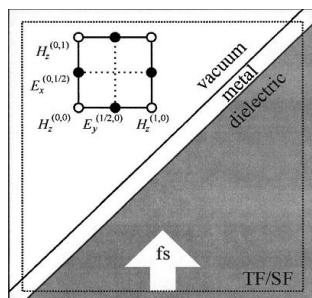
که  $\omega_p$  فرکانس پلاسما،  $v_d$  نرخ میرایی و  $\varepsilon_0$  گذردهی خلأ است.

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 به دست 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. از آن‌جاکه، 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. از آنجاکه اندازه‌گیری‌های تجربی گزارش شده، فرآیند فوتوگسیل سه فوتونی از لایه‌ی Ag را نشان داده‌اند، مقدار  $n$ ، ۳ انتخاب می‌شود [۵]. هنگامی که 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:

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{q}{m} (\mathbf{E} + \mu_0 \mathbf{v} \times \mathbf{H}) \quad (4)$$

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.

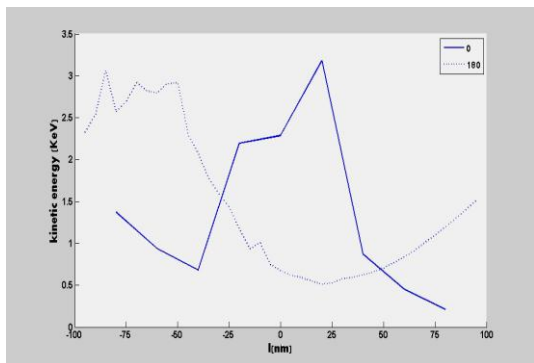


شکل ۲. فضای محاسباتی مورد استفاده برای بخش FDTD مدل.

### ۴- بحث و نتایج

شکل (۳) توزیع میدان الکتریکی کل SP، که توسط پالس گوسی با پهنای زمانی  $\tau_l = 100$  fs، طول موج مرکزی  $800$  nm روی سطح منشور با پوشش نقره به ضخامت

پالس کنده شده‌اند، را در دوفاز اولیه ( $\varphi_0$ ) پالس نشان می‌دهد. همان‌طور که می‌بینید، تغییرات انرژی برای دو فاز مخالف، معکوس یکدیگر هستند و این ناشی از تغییر جهت بردار میدان و در نتیجه 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.

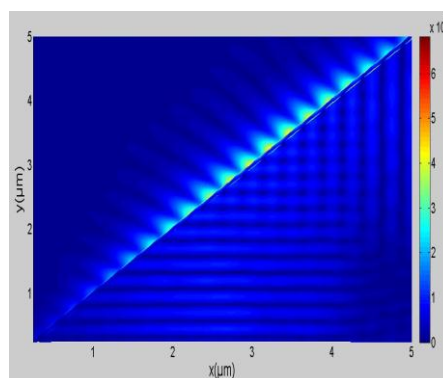
### ۵- نتیجه‌گیری

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

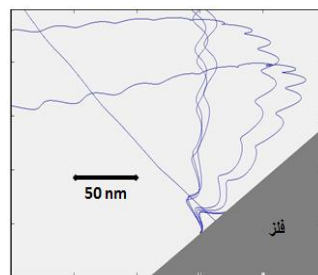
- [1] M.Y. Schelev et al., "500-fs photoelectron gun for time-resolved electron diffraction experiments", **Opt.Eng.**37, 1998.
- [2] T. Tajima and J.M. Dawson, "Laser electron accelerator", **Phys. Rev. Lett.** 43, 1979.
- [3] S. E. Irvine, "Surface-plasmon-based electron acceleration", **Phys. Rev. A.** 73, 2006.
- [4] TaAove, Allen, "Computational electrodynamic: the finite-difference time-domain method", **ARTECH HOUSE**, 2005.
- [5] S. E. Irvine, A. Dechant, and A.Y. Elezabi, "Generation of 0.4-keV Femtosecond Electron Pulses using Impulsively Excited Surface Plasmons", **Phys. Rev. Lett.** 43 (1979).

۵۰nm ایجاد شده، را نشان می‌دهد. برای لایه‌ی نقره کاملاً صاف، فاکتور افزایش میدان الکتریکی،  $\eta$ ، ۶/۱۶ مشاهده می‌شود، که با ضریب  $\alpha^{-1} \approx 240 \text{ nm}$  عمود بر لایه فلزی کاهش می‌یابد. مقدار  $\alpha^{-1}$  به دست 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 ( $10^3 - 10^2$ ) [۳] به این دلیل است که، در تجربه ناهمواری‌های سطح فلز باعث جایگزیدگی بیشتر میدان الکترومغناطیسی و در نتیجه افزایش بیشتر میدان می‌شود. در نظر گرفتن ناهمواری‌های سطح نیازمند حل عددی پیچیده میدان الکترومغناطیسی در سه بعد به روش FDTD است.



شکل ۳. توزیع میدان الکتریکی کل ( $\text{V}/\text{cm}^2$ ).

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