

## تولید قطاری از پالس ها از پالس منفرد چرپ و تاثیر آن بر تولید میدان عقبه لیزری

فاطمه یوسفی<sup>۱</sup>، سعید میرزانژاد<sup>۲\*</sup>

دانشگاه مازندران، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک اتمی و ملکولی

[saeed@umz.ac.ir](mailto:saeed@umz.ac.ir) \*

## چکیده

در این مقاله تبدیل تک پالس چرپ منفرد با عبور از تداخل سنج مایکلسون به قطاری از پالس بصورت تحلیلی و عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین رابطه تحلیلی برای ایجاد پالس‌هایی با فاصله زمانی مشخص در قطار پالس‌ها بدست آمده است. در ادامه میدان عقبه ایجاد شده از برهمکنش قطاری از پالس‌ها با فواصل زمانی مختلف در رژیم غیرخطی بصورت عددی بدست آمده است. در انتها نشان خواهیم داد با بهینه سازی اختلاف راه در تداخل سنج، در حالت‌هایی که فاصله بین پالس‌ها با طول موج پلاسما رابطه داشته باشد، دامنه میدان عقبه بیشینه خواهد شد. **کلید واژه:** میدان عقبه لیزری، قطار پالس، تداخل سنج مایکلسون

## Generation of pulse train from a single chirped laser pulse and its effect on the excitation of laser wake-field

Fatemeh Usefi<sup>1</sup>, Saeed Mirzanejad<sup>2\*</sup>

Department of Atomic and Molecular, Physics Faculty of Science, University of Mazandaran

[saeed@umz.ac.ir](mailto:saeed@umz.ac.ir)

## Abstract

In this paper, conversion of a single chirp pulse to a pulse train by passing through the Michelson interferometer is studied in analytical and numerical schemes. Analytical relation to create pulse train with specific time delay between pulses is obtained. Then, wake-field of the pulse trains with different rates in the nonlinear regime of the LWFA is considered. It will be shown that wake-field amplitude maximized when the pulse separation is related to the plasma wavelength.

**Keywords:** Laser Wakefield, Pulse train, Michelson Interferometer

## مقدمه

پلاسمایی و شتابدهنده خود مدولاسیون میدان عقبه لیزری اشاره کرد [۱]. همچنین میدان عقبه تولید شده توسط قطاری از پالس‌های لیزر در مقالات زیادی به صورت تحلیلی و اخیراً به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته شده است. یکی از روش‌های تولید قطار پالس‌ها استفاده از تداخل سنج مایکلسون است [۲]. از مزایای استفاده از قطار پالس به جای تک پالس کوتاه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: در این روش از یک پالس نسبتاً طولانی با طول چند صد فمتو ثانیه استفاده می‌شود که انرژی لیزر در طول قطار پالس توزیع شده و این کاهش شدت می‌تواند استفاده از یک توری

با ارتقا فناوری لیزر و ساخت لیزرهای رومیزی با شدت‌هایی از مرتبه  $10^{22} W/cm^2$  زمینه‌های پژوهش‌های تئوری و تجربی برای محققان فراهم شد. در برهمکنش لیزر با پلاسمای کم چگال تاثیر نیروی پاندرماتیو لیزر روی حرکت الکترون‌ها باعث جدایی الکترون از یون شده و گرادیان شتابی هزاران برابر بزرگ‌تر از شتابدهنده‌های کلاسیک تولید می‌کند. از میان روش‌های مختلف برای شتابدهنده‌های پلاسمایی می‌توان به شتابدهنده میدان عقبه پلاسمایی، شتابدهنده میدان عقبه لیزری، شتابدهنده موج زنش

نشان داده شده است که در صورت اعمال یک اختلاف راه مناسب، عبور یک پالس چرپ از تداخل سنج مایکلسون می تواند منجر به تولید قله های تداخلی در طول پالس خروجی شده و قطاری از پالس های کوتاه ایجاد می گردد. [۲] علت این پدیده را می توان براساس پدیده ضربان توصیف کرد، چرا که با ایجاد اختلاف زمانی بین دو پالس چرپ شده، بخش هایی از پالس با بسامدهای متفاوت به یکدیگر می رسند که به علت نزدیک بودن بسامدها پدیده ضربان رخ داده و پالس اصلی به چندین پالس پیاپی شکافته می شود. در این مقاله ضمن نوشتن روابط حاکم بر تداخل پالس چرپ در تداخل سنج مایکلسون، شرط لازم برای ایجاد  $N$  پالس دلخواه در طول پالس اولیه را بدست آورده ایم. با فرض تقسیم مساوی دامنه یک پالس با ضریب چرپ خطی  $\alpha$  در دو بازوی تداخل سنج و ایجاد اختلاف راه  $C\xi_0$ ، دامنه دو پالس در خروجی تداخل سنج به شکل زیر قابل نوشتن است،

$$E_1(\xi) = \frac{E_0(\xi)}{\sqrt{2}} \cos(\omega_0\xi + \alpha\xi^2) \quad (1)$$

$$E_2(\xi) = \frac{E_0(\xi - \xi_0)}{\sqrt{2}} \cos(\omega_0(\xi - \xi_0) + \alpha(\xi - \xi_0)^2)$$

در اینجا  $\xi = t - z/c$  متغیر سوار بر پالس و  $E_0(\xi)$  پوش پالس ورودی است. بدین ترتیب دامنه برآیند خروجی عبارتست از:

$$E = E_1 + E_2 = E_0 \cos(\omega_0\xi + \alpha\xi^2 - \frac{\Delta}{2}) \cos(\frac{\Delta}{2})$$

که در آن،  $\Delta = \omega_0\xi_0 + \alpha\xi_0^2 + 2\alpha\xi\xi_0$  عامل کسینوسی اول موجک های پالس برآیند و عامل کسینوسی دوم پوش تداخلی را نشان می دهند. از آنجایی که فاصله دو قله در پوش تداخلی  $2\pi$  است لذا فاصله زمانی بین دو پالس متوالی در قطاری از پالس ها  $\delta\xi = \frac{\pi}{|\alpha|\xi_0}$  است. بدین ترتیب تعداد پالس های ایجاد شده در طول پالس  $\tau$  بصورت زیر بدست می آید:

$$N = \left[ \frac{\tau}{\delta\xi} \right] + 1 = \left[ \frac{|\alpha|\tau\xi_0}{\pi} \right] + 1 \quad (2)$$

$\alpha$  ضریب چرپ خطی و  $C\xi_0$  اختلاف راه ایجاد شده در تداخل سنج است. البته در بخش بعدی ما نیازمند ایجاد تعداد مشخصی از پالس نیستیم بلکه فاصله بین دو پالس متوالی برای ما مهم خواهد بود و رابطه بالا فقط برای تخمین تعداد پالس ها بکار خواهد رفت.

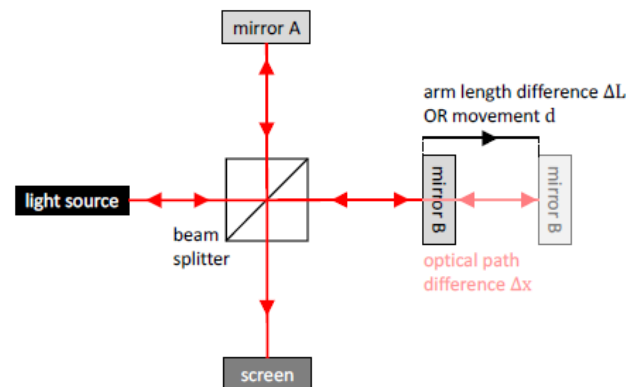
با قطر کوچک تر و فاصله کانونی کوتاه تر را برای تولید پالس فراهم کند. این کار به طور قابل توجهی قیمت و فضای مورد نیاز بین مراحل شتابدهنده پلاسما را کاهش می دهد و به طور بالقوه از نیاز به آینه پلاسما جلوگیری می کند.

همچنین میدان عقبه تک پالس با دامنه غیر خطی می تواند به طور موثرتری تحریک شود که منجر به ناپایداری پلاسما خواهد شد که با استفاده از قطار پالس به جای یک پالس کوتاه، با توزیع انرژی در طول قطار پالس ها، میدان عقبه قابل کنترل و پلاسما پایدارتر هستند [۳] و همچنین با تنظیم فاصله بین پالس ها طول و افازی را می توان کاهش داد. [۴]

### تداخل سنج مایکلسون در تولید قطاری از چندپالس

یکی از روش های تولید قطاری از پالس ها استفاده از تداخل سنج مایکلسون است. تداخل سنج مایکلسون در شکل ۱ نشان داده شده است که از دو بازو تشکیل شده که نور ورودی پس از عبور از شکافنده باریک نور، به دو دسته تقسیم می شود که پس از بازتابیده شدن و حرکت در مسیر خود دوباره در جلوی شکافنده نور و بر روی پرده، با یکدیگر ترکیب می شوند و طرح تداخلی تشکیل می دهند. با حرکت دادن یکی از آینه ها و تغییر مسافت طی شده توسط نور در یکی از بازوها، اختلاف راهی بین مسیرهای طی شده توسط دو جبهه موج ایجاد می شود که در تداخل سازنده اختلاف فاز میان دو قله به صورت زیر است.

$$\Delta\phi = \pm 2m\pi \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

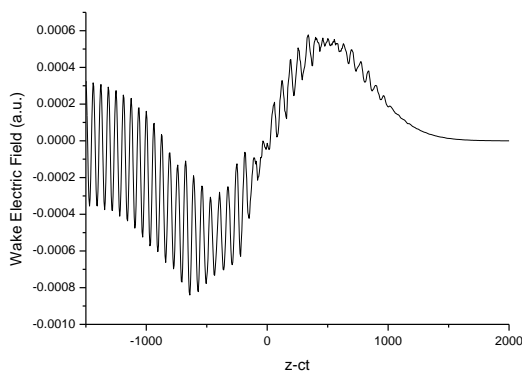


شکل ۱. تداخل سنج مایکلسون [۲]

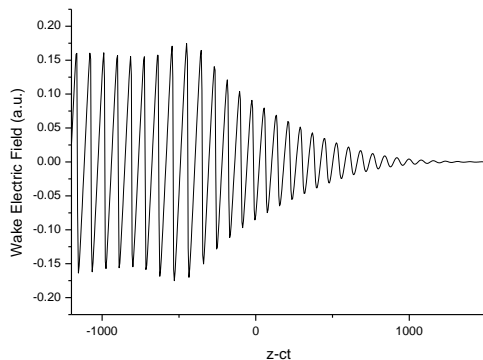


## نتایج عددی

در ادامه میدان عقبه تشکیل شده در پلاسما رقیق با چگالی  $\frac{n}{n_c} = 0.1$  رسم شده است. دامنه میدان عقبه تک پالس در شکل ۴ و دامنه میدان عقبه برای دوازده پالس در شکل ۵ رسم شد که افزایش چشمگیر دامنه (۵۰۰ برابر) مشاهده می‌شود. در این حالت فاصله بین پالس‌ها به گونه‌ای اختیار شده که مضرری از طول موج پلاسما باشد، در نتیجه دامنه میدان عقبه حدود پانصد برابر نسبت به تک پالس منفرد رشد داشته است.



شکل ۴. میدان عقبه تک پالس



شکل ۵. میدان عقبه دوازده پالس رسم شده در شکل ۳

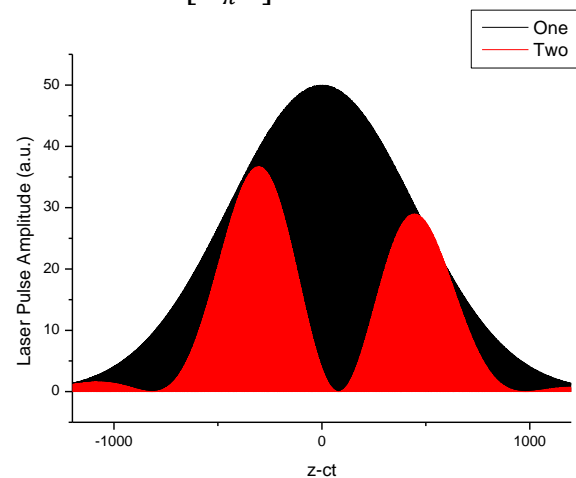
برای آنکه فاصله بین پالس‌های متوالی مضرری از طول موج میدان عقبه باشد کفایت تا اختلاف راه بین دو بازوی تداخل سنج از رابطه زیر تبعیت کند:

$$m\lambda_p = c \cdot \delta\xi \quad (3)$$

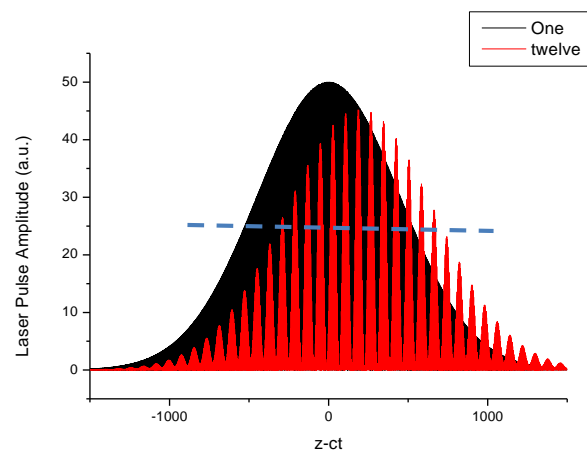
$$\xi_0 = \frac{c\pi}{m|\alpha|\lambda_p} \quad (4)$$

در حل عددی یک پالس چرپ شده با ضریب چرپ خطی بدون بعد،  $\alpha = -10^{-4}$  با دامنه غیر خطی  $a_0 = 5$ ، طول موج  $\lambda = 1 \mu m$  و با طول  $500 fs$  با ایجاد اختلاف راه  $5.6 \mu m$  در تداخل سنج، قطاری از پالس‌ها بدست آمد که در شکل ۲ مشاهده می‌کنید. تعداد پالس‌های بدست آمده مطابق رابطه (۲) دو پالس می‌باشد.

$$N = \left\lfloor \frac{|\alpha|\tau\xi_0}{\pi} \right\rfloor + 1 = 2$$



شکل ۲. دو پالس بدست آمده از یک پالس چرپ با طول  $500 fs$  در شکل ۳ آینه تداخل سنج در فاصله  $63.1 \mu m$  قرار می‌گیرد تا فاصله پالس‌ها برابر با مضرری از  $\lambda_p$  باشد. تعداد پالس‌ها از رابطه (۲)، دوازده بدست می‌آید که سازگاری خوبی با شکل دارد.



شکل ۳. دوازده پالس تشکیل شده در تداخل سنج مایکلسون

خطی مناسب می تواند تک پالس را به قطاری از پالس ها با فواصل یکسان تبدیل کند.

همانطور که در کارهای آزمایشگاهی قبلی [۵] نیز بیان شده بود استفاده از قطاری از پالس ها با فواصل مناسب می تواند میدان عقبه قوی تری را نسبت به تک پالس ایجاد نماید. ما نیز با حل عددی معادله غیرخطی برانگیختگی میدان عقبه لیزری و مقایسه نتایج مزیت استفاده از قطاری از پالس ها را نشان دادیم. ما نشان دادیم در حالت بهینه دامنه میدان عقبه برای قطاری از دوازده پالس می تواند تا ۵۰۰ برابر افزایش یابد. شرایط مربوط به رفتار غیرخطی میدان عقبه و تغییر طول موج غیرخطی با رشد دامنه میدان عقبه دست یابی به رابطه دقیقی برای شرط تشدید در ناحیه غیرخطی را دشوار می کند، بدین ترتیب شرط تشدی در رابطه (۴) تنها در رژیم خطی میدان عقبه قابل استفاده می باشد.

### مرجع ها

[1] Malka, V. (2017). "Plasma wake accelerators: introduction and historical overview." *arXiv preprint arXiv: 1705.09584*.

[2] Shaloo, R., et al. (2016). "Generation of laser pulse trains for tests of multi-pulse laser Wakefield acceleration." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 829: 383-385.

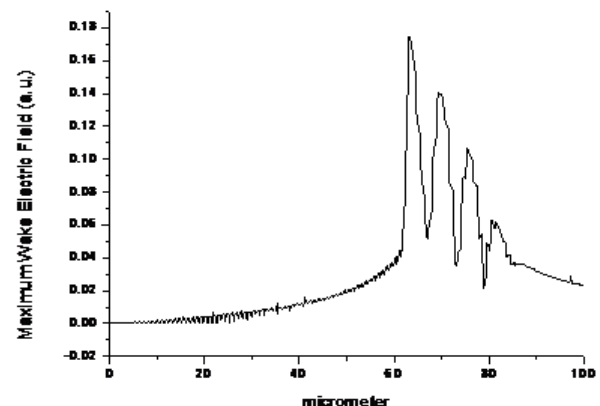
[3] Hooker, S., et al. (2014). "Multi-pulse laser wake field acceleration: a new route to efficient, high-repetition-rate plasma accelerators and high flux radiation sources." *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics* 47(23): 234003.

[4] Sadler, J. D., et al. (2020). "Overcoming the dephasing limit in multiple-pulse laser Wakefield acceleration." *Physical Review Accelerators and Beams* 23(2).

[5] Cowley, J., et al. (2017). Excitation and Control of Plasma Wakefield by Multiple Laser Pulses. *Phys Rev Lett* 119(4): 044802.

که در رابطه  $m, \epsilon$  مقدار صحیح می باشد. برای آنکه قطاری از پالس ها با فاصله یک طول موج پلاسما داشته باشیم کافایت مقدار  $m=1$  را انتخاب کنیم.

در شکل ۶ دامنه بیشینه میدان عقبه لیزری برحسب اختلاف راه در تداخل سنج ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می شود وجود قله هایی در نمودار نشان دهنده برآورده شدن شرط تشدید، یعنی تطابق فاصله بین دو پالس مجاور با طول موج پلاسما است. البته شرایط مربوط به رفتار غیرخطی میدان عقبه و تغییر طول موج غیرخطی با رشد دامنه میدان عقبه دست یابی به رابطه دقیقی برای شرط تشدید در ناحیه غیرخطی را دشوار می کند، لذا رابطه (۴) تنها در رژیم خطی قابل استفاده می باشد. افت دامنه میدان عقبه در دوطرف شکل (۶) را می توان به این رفتارهای غیرخطی ارجاع داد.



شکل ۶. میدان عقبه در پلاسما نسبت به اختلاف راه در تداخل سنج.

### بحث و نتیجه گیری

در این مقاله تاثیر استفاده از قطاری از پالس ها به جای تک پالس لیزری در برانگیختگی میدان عقبه لیزری در محیط پلاسمای رقیق مورد بررسی قرار گرفت. نخست امکان تولید قطاری از پالس ها با فواصل یکسان با استفاده از تداخل سنج مایکلسون روی پالس چرپ شده بصورت تحلیلی بررسی شد. نشان داده شد که استفاده از چرپ