



بیست و دومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هشتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۶ تا ۸ بهمن ماه ۱۳۹۴، دانشگاه یزد



اثر چرپ مربعی پالس لیزر بر شتاب لیزری الکترون در خلاء

حسین آکو، محمود فولادی

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

چکیده - در این مقاله، ابتدا تعریفی از پالس چرپ و غیرچرپ ارائه داده و سپس برهم کنش پالس چرپ شده مربعی لیزر را با الکترون در محیط خلاء مورد بررسی قرار می دهیم و تغییرات انرژی الکترون ناشی از برهم کنش با پالس چرپ شده مربعی، در راستا حرکت الکترون، برای دو حالت چرپ مثبت و منفی بدست آورده و با حالتی که الکترون با پالس چرپ شده خطی برهم کنش داشته، مقایسه می کنیم. که می توان موثر بودن پالس چرپ شده مربعی نوع مثبت بر شتاب بیشتر الکترون را نسبت به نوع منفی آن نتیجه گرفت که علت آن را می توان به نوسانات کمتر میدان الکتریکی پالس چرپ مربعی مثبت از دید ناظر واقع در الکترون، در مقایسه با نوع منفی، نسبت داد.

کلیدواژه-شتاب الکترون، پالس لیزر چرپ، چرپ مربعی

The effect of laser pulse quadratically chirp on vacuum laser electron acceleration

Hossein Akou, Mahmoud Fouladi

Department of Physics, Faculty of Basic Science, Babol University of Technology, Babol, Iran

Abstract- In this paper, first, a definition of chirped and un-chirped pulse is introduced. After that, the interaction of quadratically chirped laser pulse with electron is investigated in vacuum. The variation of electron gained energy as a function of electron motion direction is examined for two cases positive and negative chirp and the results is compared with linear chirp one. It is concluded that a positive quadratically chirped is more effective in electron laser acceleration. It can then be concluded that the slow variation of positive quadratically chirped laser electric field in comparison to negative one, is responsible for the higher energy gain.

Keywords: Electron acceleration, Chirped laser pulse, Quadratically chirp

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

۱-مقدمه

پراکندگی‌ترین توابع چرپ‌شدگی، چرپ خطی در فرکانس است که در آن فرکانس به صورت خطی در طول پالس تغییر می‌کند. بسته به اینکه این تغییرات فرکانس، با حرکت در خلاف جهت انتشار پالس، افزایشی یا کاهش‌ی باشد، به ترتیب پالس مربوطه دچار چرپ خطی مثبت و منفی شده است [۵]. ما در این مقاله، قصد داریم تا تابع تغییرات زمانی فرکانس لیزر را از خطی به غیرخطی تغییر داده و در فرایند شتاب‌دهی الکترون از یک پالس لیزری گوسی فمتوثانیه و چرپ‌شده با نوع چرپ مربعی استفاده کنیم. این کار را برای دو نوع مختلف چرپ مربعی انجام داده و نتایج را با نوع چرپ خطی مقایسه کنیم. و با حل عددی معادلات نسبیتی حرکت الکترون، تغییرات انرژی الکترون را مورد ارزیابی قرار می‌دهیم.

۲-تئوری و نتایج

در فرایند شتاب‌دهی الکترون در خلاء، یک الکترون در معرض تابش موج لیزر قرار گرفته و با میدان الکتریکی و مغناطیسی آن برهم‌کنش می‌کند. در طی این فرایند الکترون از پالس انرژی گرفته و تا سرعت‌های نسبیتی شتاب می‌گیرد که با توجه به شرایط مختلف، مقداری از این انرژی از طرف الکترون به پالس پس داده خواهد شد. معادله حاکم بر حرکت الکترون در این برهم‌کنش با رابطه نسبیتی نیوتن-لورنتس داده می‌شود.

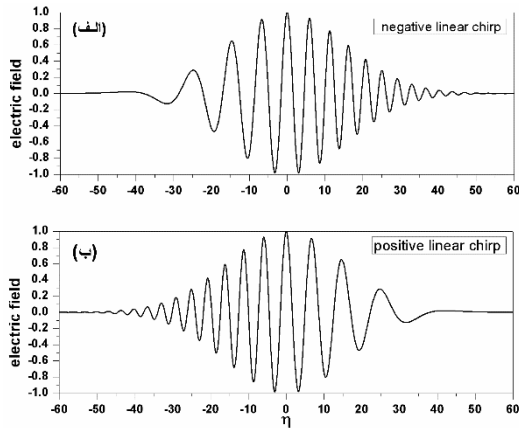
$$\frac{d\vec{p}}{dt} = -e \left(\vec{E} + \frac{\vec{v} \times \vec{B}}{c} \right) \quad (1)$$

که در این رابطه، $p = \gamma m_0 c v$ تکانه نسبیتی الکترون، E و B به ترتیب میدان الکتریکی و مغناطیسی لیزر، v سرعت الکترون، c سرعت نور در خلاء، m_0 و e نیز به ترتیب جرم سکون و بار الکترون می‌باشند. همچنین رابطه $\gamma = \sqrt{1 + p^2 / m_0^2 c^2}$ فاکتور نسبیتی است که با رابطه $\varepsilon = \gamma m_0 c^2$ مقدار انرژی الکترون را بیان می‌کند. بدین ترتیب با داشتن تابع میدان الکتریکی و مغناطیسی لیزر، می‌توان چگونگی تغییرات تکانه ذره و در نتیجه سرعت و انرژی کسب شده توسط آن را در طی برهم‌کنش بدست آورد. در این مقاله، ما یک پالس لیزر با پروفایل گوسی را در نظر می‌گیریم. مولفه عرضی میدان الکتریکی پالس گوسی لیزر که با الکترون برهم‌کنش کرده را به صورت زیر می‌توان نوشت.

نقش مهم ذرات باردار پراثری در تعیین خواص ذرات زیر اتمی و کاربردهای شتاب‌دهنده‌ها در حوزه پزشکی و صنعتی، باعث شده است که شتاب‌دهی ذرات به یک مبحث مورد علاقه تبدیل شود [۱]. یک شتاب‌دهنده ذرات، دستگاهی است که ذرات باردار را با استفاده از میدان الکتریکی و بعضاً میدان مغناطیسی و یا هر دو، تا سرعت‌های بالا شتاب می‌دهد. با گذشت زمان و با گسترش شتاب‌دهنده‌ها و همچنین ساخت لیزر، شیمودا برای اولین بار استفاده از لیزر جهت شتاب‌دهی الکترون‌ها را در سال ۱۹۶۲ مطرح کرد [۲]. از مزایای اصلی شتاب‌دهنده‌های لیزری ابعاد کوچک و کم هزینه بودن آنها می‌باشد. در شتاب‌دهنده‌های لیزری، الکترون انرژی مورد نیاز برای شتاب خود را از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی پالس‌های کوتاه و پرتوان لیزر، دریافت می‌کند. با روی کار آمدن شتاب‌دهنده‌های لیزری، توجه دانشمندان به سمت آنها جلب شد و روش‌های متنوعی برای توسعه آن مورد مطالعه و آزمایش قرار گرفت. یکی از این روشها استفاده از پالس‌های چرپ‌شده لیزر است که با گسترش تکنولوژی تقویت پالس چرپ^۱ (CPA) در سال ۱۹۸۵ تولید شده و توجه بسیاری را در کاربردهای مختلف به سمت خود جلب کرده است [۳]. بدین ترتیب با تولید پالس‌های چرپ فوق‌کوتاه و پرشدت، روش موثری در شتاب‌دهی ذرات باردار معرفی شده است. یک پالس چرپ برخلاف پالس‌های معمول (غیرچرپ) دارای فرکانسی متغیر با زمان می‌باشد. به عبارت دیگر، فرکانس پالس در نقاط مختلف پالس مقادیر متفاوتی داشته و ثابت نیست و بدین ترتیب، پالس مورد نظر تقارن فرکانسی ندارد. طبق قانون لاوسون-وودوارد^۲: ذره در برهم‌کنش با یک پالس کاملاً متقارن نمی‌تواند انرژی خالصی دریافت کند [۴]، بنابراین اگر بتوان به نحوی این تقارن در پالس لیزر را شکست، ذره می‌تواند از پالس، انرژی دریافت کند. از آنجایی که یک پالس چرپ‌شده دارای این ویژگی است پس گزینه خوبی برای شتاب‌دهی ذرات می‌باشد. نوع وابستگی زمانی فرکانس در پالس لیزر و یا به عبارت دیگر نوع چرپ‌شدگی آن، می‌تواند متفاوت باشد. یکی از

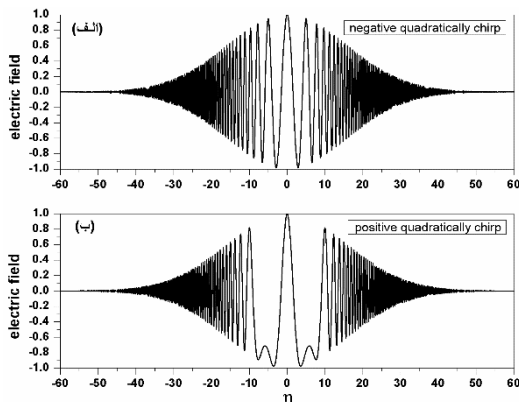
1 Chirped pulse amplification
2 Lawson-Woodward

بوده و در شکل (۲-ب) این فرایند معکوس است. با توجه به خطی بودن تابع چرپ، روند تغییرات فرکانس در طول پالس خطی است.



شکل-۲: پالس چرپ خطی (الف) منفی، (ب) مثبت.

در شکل (۳) میدان الکتریکی پالس چرپ شده مربعی، برای دو حالت b مثبت و منفی نشان داده شده است.



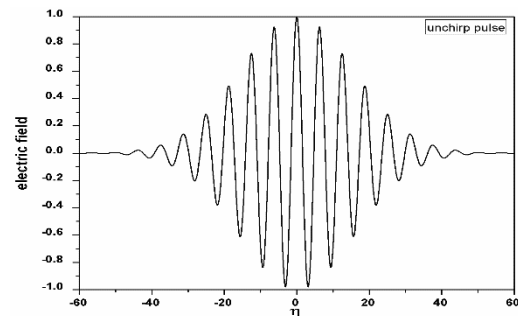
شکل-۳: (الف) پالس چرپ شده مربعی منفی، (ب) پالس مربعی مثبت

عدم تقارن ایجاد شده در پالس لیزر، از مقایسه شکل (۱) با شکل‌های (۲) و (۳) کاملاً مشخص است. در مقایسه شکل‌های (۲) و (۳) تفاوت در نوع عدم تقارن ایجاد شده، دیده می‌شود. در این بخش برای یافتن اثر نوع چرپ‌شدگی در میزان کسب انرژی الکترون، مسئله شتاب الکترون را در هر یک از این حالت‌ها بررسی کرده و نتایج آن را با یکدیگر مقایسه می‌کنیم. با حل معادلات دیفرانسیل ناشی از معادله نیوتن-لورنتس به روش عددی رانگ-کوتا و معادله کسب انرژی [۵] که بصورت زیر نوشته می‌شود، انرژی دریافتی الکترون در برهم‌کنش با پالس لیزر تعیین می‌شود.

$$\frac{d\gamma}{dt} = -(E_x\beta_x + E_y\beta_y + E_z\beta_z) \quad (3)$$

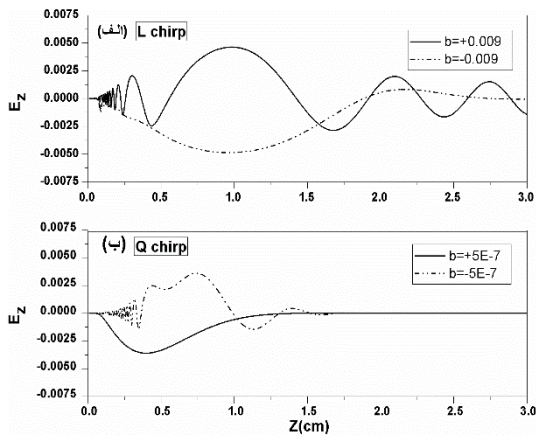
$$E_x = E_0 \frac{W_0}{W(z)} \exp\left(-\frac{r^2}{W^2(z)}\right) \times \exp\left(-\frac{t^2}{\tau_p^2}\right) \times \cos\left(\frac{kr^2}{2R(z)} - \phi(z) + \omega(t)t + \phi_0\right) \quad (2)$$

پارامترهای موجود در این رابطه مربوط به باریکه گوسی است [۶] و $\omega(t)$ فرکانس لیزر را بیان می‌کند. با تغییر متغیر $\eta = k_0z - w_0t$ فرکانس پالس لیزر چرپ را با تابع $\omega = \omega_0(1 + b\eta^n)$ تعریف می‌کنیم. که ω_0 فرکانس پالس غیرچرپ، b پارامتر چرپ، که مشخص‌کننده آهنگ تغییرات فرکانسی پالس است که با $b=0$ پالس لیزر از $n=1$ چرپ خطی و به ازای $n=2$ چرپ مربعی خواهد بود. یک پالس لیزر غیرچرپ، دارای تقارن فرکانسی در تمام طول پالس می‌باشد. شکل (۱)، میدان الکتریکی پالس لیزر غیرچرپ را نشان می‌دهد. نوسانات موجود در میدان الکتریکی، بیان‌کننده تغییرات فرکانسی لیزر می‌باشد.



شکل-۱: پالس غیرچرپ.

با توجه به این شکل، تقارن در این نوسانات مشخص است. اگر ذره در برهم‌کنش مستقیم با چنین پالسی قرار گیرد، طبق نظریه لاوسون-وودوارد انرژی خالص دریافتی آن ناچیز است و در واقع ذره در این برهم‌کنش از ابتدای پالس انرژی دریافت و از انتهای آن پس می‌دهد. در [۶و۵] نشان داده شده است که الکترون در برهم‌کنش با پالس لیزر غیرچرپ حدود 30 MeV انرژی می‌تواند کسب کند. یکی از روش‌های موثر، برای کسب انرژی بیشتر الکترون، برهم‌زدن تقارن پالس است و به اصطلاح استفاده از پالس لیزر چرپ است [۵]. شکل (۲)، میدان الکتریکی یک پالس لیزر چرپ با چرپ‌شدگی خطی ($n=1$)، را برای دو حالت چرپ منفی (۲-الف) و چرپ مثبت (۲-ب)، نشان می‌دهد. از شکل (۲-الف) مشخص است که فرکانس پالس لیزر از ابتدا به انتهای پالس در حال کاهش



شکل-۵: میدان الکتریکی پالس چرپ الف (خطی، ب) مربعی.

در شبیه‌سازی انجام گرفته فرضیات زیر به عنوان پارامترهای اولیه در نظر گرفته شده است، دوام زمانی لیزر $\tau_p = 100 \text{ fs}$ ، طول موج لیزر $\lambda = 0.8 \mu\text{m}$ ، اندازه لکه باریکه گوسی لیزر $w_0 = 100 \mu\text{m}$ و شدت بدون بعد لیزر $a = 4$.

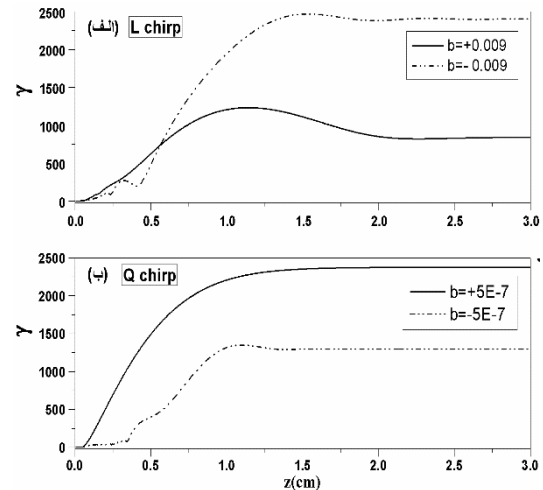
۳- نتیجه‌گیری

استفاده از پالس چرپ یکی از مباحث مورد علاقه در شتاب لیزری الکترون می‌باشد. مطالعات مختلفی در مورد اثرات پالس چرپ خطی انجام شده است. در این مقاله چرپ‌شدگی مربعی را برای پالس در نظر گرفته و نتایج را با یکدیگر مقایسه نموده‌ایم. همانطور که در بخش قبل مشاهده شد، در چرپ‌شدگی مربعی مثبت در مقایسه با چرپ مربعی منفی، انرژی بیشتری به الکترون منتقل شده است و در چرپ خطی این رفتار معکوس است. لازم به ذکر است هرچند میزان کسب انرژی، در چرپ مربعی مثبت و چرپ خطی منفی تقریباً یکسان است، ولی گرایان کسب انرژی در حالت چرپ مربعی مثبت بیشتر است. به عبارت دیگر، الکترون در طول برهم‌کنش کوچکتری به حداکثر انرژی دریافتی می‌رسد.

منابع

- [1] K. P. Singh, H. K. Malik, Phys. Lett. A 93, 044101 (2008).
- [2] K. Shimoda, App. Opt. 1, 33 (1963).
- [3] D. Strickland, G. Mourou, Opt. Commun 56, 219 (1985).
- [4] J. D. Lawson, IEEE Tran. Nucl. Sci, 26, 4217 (1979).
- [5] F. Sohbatzadeh, S. Mirzanejhad, H. Aku, Phys. Plasmas 16, 023106 (2009).
- [6] F. Sohbatzadeh, S. Mirzanejhad, H. Aku, S. Ashouri, Phys. Plasmas 17, 083108 (2010).

شکل (۴)، تغییرات انرژی الکترون را در برهم‌کنش با پالس لیزر چرپ‌شده خطی (۴-الف) و چرپ‌شده مربعی (۴-ب) را نشان می‌دهد. در هر یک از این دو شکل، منحنی نقطه-چین مربوط به پارامتر چرپ منفی و منحنی با خط ممتد مربوط به پارامتر چرپ مثبت است.



شکل-۴: تغییرات انرژی الکترون در برهم‌کنش با پالس چرپ: الف) خطی ب) مربعی.

در حالت چرپ خطی، مقدار بهینه پارامتر چرپ بدون بعد $b = \pm 0.009$ می‌باشد. با توجه به شکل، زمانی که $b = +0.009$ است حداکثر انرژی دریافتی الکترون 1.25 GeV با طول برهم‌کنش 1.2 cm می‌باشد. برای مقدار $b = -0.009$ بیشینه انرژی دریافتی الکترون 2.5 GeV در 1.5 cm بوده است. مقادیر بهینه پارامتر چرپ بدون بعد در تابع چرپ‌شدگی مربعی برابر $b = \pm 5 \times 10^{-7}$ می‌باشد. در این حالت، الکترون به انرژی بیشینه 2.5 GeV در 1.2 cm به ازای $b = +5 \times 10^{-7}$ و به انرژی 1.4 GeV در 1 cm به ازای $b = -5 \times 10^{-7}$ خواهد رسید. برای یافتن علت کسب انرژی متفاوت در هر نوع چرپ‌شدگی، مولفه محوری میدان الکتریکی لیزر که مسئول اصلی شتابدهی الکترون است را در هر حالت در شکل (۵) رسم نموده‌ایم. مطابق شکل، در بازه‌هایی که نوسانات میدان E_z کمتر است، الکترون کسب انرژی بیشتری دارد. با توجه به شکل (۵)، مشاهده می‌شود که در چرپ خطی، نوسانات به ازای b منفی کمتر از موقعی است که b مثبت می‌باشد و برای چرپ مربعی، به ازای b مثبت، نوسانات میدان کمتر بوده و در نتیجه به الکترون انرژی بیشتری منتقل می‌شود.