





دانشکده علوم پایه

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد در رشته فیزیک اتمی و مولکولی

موضوع:

بررسی بازتاب پالس لیزری از روی آینه‌های نسبیتی چندلایه

استاد راهنما:

دکتر سعید میرزائزاد

استاد مشاور:

دکتر فرشاد صحبت زاده

نام دانشجو:

زهرا محمدزاده

تابستان ۱۳۹۰

سپاسگزاری

رسول خدا فرمودند:

« مَنْ عَلَّمَنِي حَرْفًا فَقَدْ سَيَّرَنِي عَبْدًا »

## چکیده:

پالس‌های لیزری پر شدت امکان ایجاد آینه‌های پلاسمایی را توسط الکترون‌های نوسانگر فوق‌نسبیتی فراهم کرده‌اند. اخیراً دو نوع از این آینه‌های نسبیتی با ضرایب نسبیتی بزرگ،  $\gamma > 100$  برای ایجاد جابجایی بسامدی بزرگ،  $4\gamma^2$  در پالس بازتابی به همراه فشرده‌سازی و تمرکز چنین پالس‌هایی مورد توجه قرار گرفته‌اند. تجمیع این اثرات تقویت فوق‌العاده‌ی شدت نور را تا مقادیری موسوم به شکست خلاء (حد شوینگر) نتیجه می‌دهد.

[S. V. Bulanov et al., Phys. Rev. Lett. 91, 085001 (2003) and G. Gordienko et al., Phys. Rev. Lett. 94, 103903 (2005)].

یکی از محدودیت‌های رسیدن به چنین شدت‌های فوق‌العاده‌ی بازتابش کم از روی آینه‌های پلاسمایی است. محاسبات حاکم بر این پایان‌نامه بر پایه‌ی اثرات تداخلی، برای محاسبه‌ی ضریب بازتاب از روی چنین آینه‌های پلاسمایی استوار می‌باشد. ما شرایطی را برای بیشینه‌کردن ضریب بازتاب از روی یک لایه یا سیستم چند لایه‌ای از الکترون‌های چگال (قله‌های چگالی الکترونی) بر پایه‌ی شرایط تداخل سازنده معرفی می‌کنیم. نشان داده می‌شود که شرایط مناسب پلاسمای و پالس لیزری محرک می‌تواند ضریب بازتاب از روی آینه‌ی نسبیتی پلاسمایی را تا چند مرتبه‌ی بزرگی افزایش دهد. این پیشنهاد می‌تواند توسط یک ساختار آزمایشگاهی و یا با یک برنامه‌ی شبیه‌سازی عددی مورد آزمایش قرار گیرد.

## واژه‌های کلیدی:

آینه‌های نسیتی، میدان عقبه لیزری، پالس لیزری محرک، پالس لیزری منبع، برهمکنش لیزر با ورقه‌ی نازک، ضریب بازتاب.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۲	فصل اول - آینه های نسیتی: تاریخچه و کاربرد.....
۲	(۱-۱) مقدمه .....
۴	(۲-۱) دور نمای پایان نامه .....
۵	(۳-۱) تاریخچه ای از تولید و افزایش توان پالس های لیزری .....
۷	(۴-۱) مفاهیم مقدماتی از لیزر و پلاسما.....
۷	(۱-۴-۱) انتشار لیزر در پلاسما .....
۹	(۲-۴-۱) نیروی پیشران .....
۱۱	(۵-۱) برهم کنش لیزر با پلاسمای کم چگال .....
۱۴	(۱-۵-۱) پدیده شکست موج در میدان عقبه .....
۱۶	(۶-۱) برهم کنش لیزر با پلاسمای پرچگال .....
۱۷	(۷-۱) چرا آینه های متحرک را برای ما جالب توجه هستند؟ .....
۲۰	فصل دوم- تغییر مشخصات پالس لیزری در بازتاب از روی آینه های نسیتی.....
۲۰	(۱-۲) مقدمه .....
۲۳	(۲-۲) اثر دوپلر .....
۲۳	(۱-۲-۲) اثر دوپلر در امواج الکترومغناطیسی و نور .....
۲۵	(۳-۲) نسیت خاص در برهم کنش نور با آینه های نسیتی .....
۲۹	(۴-۲) تغییر مشخصه های پالس لیزر در بازتاب از روی آینه ی متحرک نسیتی .....
۲۹	(۱-۴-۲) محاسبه ی تحلیلی جابجایی دوپلری در زاویه ی تابش دلخواه .....
۳۴	(۲-۴-۲) افزایش شدت در بازتاب از آینه ی نسیتی .....
۳۵	(۱-۲-۴-۲) فشردگی زمانی (طولی) پالس بازتابی .....

۳۸ ..... ۲-۴-۲) فشردگی مکانی (عرضی) پالس بازتابی

۴۱ ..... ۵-۲) برآورد بیشینه شدت قابل دستیابی با آینه‌ی نسبی

۴۵ ..... فصل سوم- محاسبه‌ی ضریب بازتاب از روی آینه‌های نسبی پلاسمایی

۴۵ ..... ۱-۳) مقدمه

۴۶ ..... ۲-۳) پلاسمای چگال به عنوان آینه‌ی نسبی

۴۷ ..... ۱-۲-۳) محاسبه‌ی ضریب بازتاب از روی لایه‌ی بسیار نازک الکترونی

۵۳ ..... ۳-۳) موج عقبه در پلاسمای رقیق به عنوان آینه‌ی نسبی

۵۴ ..... ۱-۳-۳) بررسی پارامترهای اساسی توصیف‌کننده‌ی میدان عقبه در حالت شکست

۵۸ ..... ۳-۳-۲) محاسبه‌ی ضریب بازتاب از قله‌های چگالی در میدان عقبه‌ی لیزری

۶۷ ..... فصل چهارم- استفاده از دیدگاه تداخلی در بازتاب از روی آینه‌های نسبی چند لایه

۶۷ ..... ۱-۴) مقدمه

۶۸ ..... ۲-۴) ضریب بازتاب از لایه‌ی الکترونی فوق نازک نسبی

۷۵ ..... ۳-۴) تداخل از قله‌های الکترونی چند لایه

۸۲ ..... ۴-۴) نتیجه‌گیری

۸۴ ..... ۵-۴) پیشنهادات

۸۵ ..... منابع و ماخذ

۸۶ ..... چکیده انگلیسی

## فهرست شکل‌ها

صفحه

شماره شکل

### فصل اول

- شکل (۱-۱): نمودار تغییرات شدت نور لیزر از ابتدا تا کنون. . . . . ۶
- شکل (۲-۱): سرعت فاز بی‌بعد  $v_{ph}/c$  و سرعت گروه بی‌بعد  $v_g/c$  بر حسب تابعی از  $n_e/n_c$ . . . . . ۹
- شکل (۳-۱): نمایه‌ای از نیروی پیشران یک پالس لیزری با مشخصه گاوسی. . . . . ۱۰
- شکل (۴-۱): نمایه ورود پالس لیزر به داخل پلاسما و تولید میدان‌های الکتریکی طولی. . . . . ۱۱
- شکل (۵-۱): نمایشی از امواج عقبه‌ی ناشی از حرکت کشتی روی سطح آب دریا. سرعت حرکت امواج برابر با سرعت حرکت کشتی. . . . . ۱۲
- شکل (۶-۱): نمایشی از شبیه‌سازی از میدان عقبه. . . . . ۱۳
- شکل (۷-۱): تصویری از پدیده‌ی تیزشدگی در امواج دریا. . . . . ۱۵
- شکل (۸-۱): پدیده‌ی تیزشدگی و شکست موج در امواج دریا. . . . . ۱۶
- شکل (۹-۱): نیروی پالس لیزر فرودی، الکترون‌ها در پلاسمای پرچگال را با سرعتی نسبی به جلو پرتاب می‌کند. . . . . ۱۷

### فصل دوم

- شکل (۱-۲): عکسی از چیدمان آزمایشگاهی تولید آینه‌های نسبی و بازتاب از روی آن، ابعاد کوچک این فرآیند از مزیت‌های بارز آن است. . . . . ۲۲
- شکل (۲-۲): نمایش بازتاب موج الکترومغناطیسی از روی آینه‌ی نسبی. در این شکل، افزایش و فشردگی بسامد پالس بازتابی، برای حالت فرود عمود ( $\theta_0 = 0$ ) به نمایش درآمده است. . . . . ۲۵
- شکل (۳-۲):  $\omega_r/\omega_0$  بر حسب زاویه‌ی فرود در بازه  $0 < \theta_0 < \pi/2$  ترسیم شده است،  $\beta_m = 0.98$ . . . . . ۲۶



شکل (۲-۴): در فرود عمود بر آینه‌ی نسبی ضریب افزایش بسامد  $4\gamma_m^2$  است..... ۲۷

شکل (۲-۵). نمودار بسامد پالس بازتاب نسبت به پالس فرود در  $\theta_{\square} = 0$  برای  $\gamma = 5$ ..... ۲۸

شکل (۲-۶). نمودار تغییرات زاویه‌ی تابش برحسب زاویه‌ی فرود برای  $\gamma = 5$ ..... ۲۹

شکل (۲-۷): نمایش هندسی پالس تابش و بازتاب در آینه‌ی نسبی در سه چارچوب متفاوت. (a) چارچوب ساکن، (b)

چارچوب متحرک با آینه و (c) چارچوبی است که با سرعت  $c \sin \psi_i'$  در راستای محور  $y$  حرکت می‌کند..... ۳۰

شکل (۲-۸): زاویه‌ی بازتاب در مختصات آزمایشگاه برحسب  $\gamma_x$  برای دو زاویه‌ی  $\psi_i = 30$  و  $\psi_i = 60$  رسم شده است. با

افزایش  $\gamma_x$ ، زاویه‌ی نور بازتابی شدیداً کوچک می‌شود و به راستای عمود بر آینه میل می‌کند..... ۳۴

شکل (۲-۹-الف): نمایشی از فرود و بازتاب پالس در آینه‌ی نسبی مقعر در چارچوب ساکن..... ۳۵

شکل (۲-۹-ب): در چارچوب متحرک، آینه پالس فرود را منقبض می‌بیند، این همان فشردگی زمانی یا طولی است..... ۳۶

شکل (۲-۹-ج): جابجایی دوپلر دوم در بازگشت از چارچوب متحرک با آینه به چارچوب آزمایشگاه..... ۳۷

شکل (۲-۱۰): الف- شکل سهمی وار آینه موجب تمرکز پالس بازتاب می‌شود. ب- واگرایی پالس بازتاب در زاویه‌ی کوچک

۱/γ است..... ۳۹

شکل (۲-۱۰-ج): نمایشی از تمرکز امواج بازتابی از آینه‌ی نسبی مقعر به همراه تغییر خصوصیات پالس لیزر در

بازتاب..... ۴۰

## فصل سوم

شکل (۳-۱): نمایش پالس فرود و جا به جایی بسامد آن در بازتاب از آینه‌ی نسبی شکل گرفته از تحریک لایه‌ی فوق نازک

فلزی..... ۴۷

شکل (۳-۲): نمایش هندسی پالس تابش و بازتاب در آینه‌ی نسبی در سه چارچوب متفاوت. (a) چارچوب ساکن، (b)

چارچوب متحرک با آینه و (c) چارچوبی است که با سرعت  $c \sin \psi_i'$  در راستای محور  $y$  حرکت می‌کند..... ۴۷

شکل (۳-۳): برای فرود عمود و  $\gamma = 5$ ، بازتاب پذیری برحسب ضخامت آینه (a) و بازتاب پذیری برحسب زاویه‌ی

فرود (b)، در چارچوب آزمایشگاه ترسیم شده است..... ۵۲

- شکل (۳-۴): تصویری از امواج عقبه. این امواج با سرعت گروه پالس لیزر محرک و در جهت آن حرکت می کنند. ۵۴.....
- شکل (۳-۵-الف): میدان، پتانسیل و چگالی الکترونی میدان عقبه ناشی از عبور پالس لیزر محرک در حالت خطی..... ۵۸.....
- شکل (۳-۵-ب): قله های تیز چگالی در میدان عقبه در محدوده شدیداً غیر خطی ( $a = 5$ )..... ۵۸.....
- شکل (۳-۶): نمایشی از پالس های محرک و منبع و ایجاد میدان های الکتریکی در جهات مختلف. . ۵۹.....
- شکل (۳-۷): از یک نازل گاز هلیوم می توان برای ایجاد پلاسمای رقیق و امواج عقبه بهره برد. ۵۹.....
- شکل (۳-۸): نمایشی از پالس محرک و تشکیل آینه ی نسبی، پالس منبع و بازتاب آن از آینه. ۶۰.....
- شکل (۳-۹): نمایشی از موج فرودی، بازتابی و عبوری در آینه های نسبی. ۶۳.....
- شکل (۳-۱۰) نمودار ضریب بازتاب بر حسب ضریب لورنتس آینه ی نسبی..... ۶۵.....

## فصل چهارم

- شکل (۴-۱): نمایش هندسی پالس تابش و بازتاب در آینه ی نسبی در سه چارچوب متفاوت. الف) چارچوب ساکن، ب) چارچوب متحرک با آینه و ج) چارچوبی است که با سرعت  $c \sin \psi_1'$  در راستای محور  $y$  حرکت می کند..... ۶۹.....
- شکل (۴-۲). منحنی تغییرات  $\rho$  بر حسب  $kd$  ضخامت نرمالیزه ی لایه. ۷۴.....
- شکل (۴-۳) منحنی تغییرات  $\rho^2$  بر حسب  $\theta$  زاویه ی تابش. ۷۵.....
- شکل ۴-۴ نمودار قله های تیز چگالی الکترونی در میدان عقبه (آبی) و میدان الکتریکی (قرمز)..... ۷۶.....
- شکل ۴-۵) نمودار ضریب بازتاب بر حسب فاصله ی قله ها. تیزی قله ها تداخل سازنده و ارتفاع زیاد قله ها امکان دستیابی به شرایط بازتاب بیشینه را نشان می دهد..... ۸۱.....

## جدول

- جدول شکل (۱-۱): مقایسه ای بین منابع تولید تابش اشعه ی  $X$ . همدوسی مکانی و زمانی و نیز طول زمانی بسیار کوتاه و در نتیجه شدت بالا در پالس نهایی از ویژگی های عالی روش آینه های نسبی است. . ۱۸.....

فصل اول

آینه‌های نسیتی: تاریخچه و کاربرد

## فصل اول : آینه‌های نسبی<sup>۱</sup>: تاریخچه و کاربرد

### ۱-۱) مقدمه

رویای دستیابی به نور با شدت‌های بالا قدمتی طولانی دارد. اولین سیستم متمرکز کننده نور که یک آینه‌ی سهمی‌وار بود، ۲۰۰ سال قبل از میلاد مسیح توسط دیوکلز<sup>۲</sup> دانشمند یونانی اختراع شد [۱]. از آن زمان تا کنون تلاش‌های بشر برای دستیابی به منابع پر شدت نور ادامه دارد. اختراع لیزر در سال ۱۹۶۰ گام بلندی برای دستیابی به این هدف بوده است. اکنون دانشمندان می‌توانند پالس‌های لیزری پر شدت را با روش‌های مختلفی تولید کنند. دیدگاه اصلی بیشتر این روش‌ها تنها بر افزایش انرژی حمل شده توسط هر پالس استوار نیست، بلکه نقش کلیدی در این روش‌ها تمرکز انرژی الکترومغناطیسی در سه بعد است. در واقع تمرکز عرضی (فضایی<sup>۳</sup>) و تمرکز طولی (زمانی<sup>۴</sup>) پالس با روش‌های متنوعی صورت می‌گیرد. استفاده از آینه‌های نسبی یکی از آخرین ایده‌های محققین برای رسیدن به کوچکترین ابعاد ممکن در فشردگی پالس‌های لیزری، یعنی حجم<sup>۳</sup>، می‌باشد [۷-۲]. پالس‌های بازتابی از روی این آینه‌ها مرزهای نوینی از

---

<sup>1</sup> Relativistic Mirror

<sup>2</sup> Diocles

<sup>3</sup> Spatial Compression

<sup>4</sup> Temporal Compression

فیزیک را برای ما خواهد گشود، جایی که به حد شوینگر<sup>۱</sup> (حد شکست خلاء) خواهیم رسید و الکترودینامیک کوانتومی بر انتشار امواج الکترومغناطیسی حاکم خواهد بود [۸-۱۰].

از آنجایی که محیط پلاسما نقش اساسی در ایجاد آینه‌های نسبیتهی دارد، لذا در اینجا به شرح مختصری از پلاسما خواهیم پرداخت. ما در تجربیات روزمره خود با سه حالت ماده آشنایم: جامد، مایع و گاز اما ماده حالت چهارمی نیز به خود می‌گیرد که پلاسما<sup>۲</sup> خوانده می‌شود. پلاسما مجموعه‌ای از ذرات باردار است که رفتار گروهی از خود نشان می‌دهند. محیط پلاسما با ذرات باردار (الکترون‌ها و یون‌ها) بیش از ۹۹ درصد ماده جهان اطراف ما را تشکیل می‌دهند و به همان میزانی که در ستاره‌ها وجود دارند در فضای بین ستاره‌ای نیز یافت می‌شوند. پلاسما می‌تواند به اندازه‌ی کافی داغ و چگال باشد که بتواند انرژی مورد نیاز بسیاری از کاربردها همانند همجوشی هسته‌ای را فراهم آورد. این امر خود دلیلی برای پیشرفت‌های چشمگیر در فیزیک پلاسما و به همان میزان در فیزیک لیزر در دهه‌های اخیر بوده است.

در این پایان نامه تولید پالسهای لیزری پر شدت با بسامد بالا و همدوس را در برهم‌کنش غیرخطی پالس-های لیزری با پلاسما مورد بررسی قرار می‌دهیم و دیدگاه جدیدی از منابع تابشی پر شدت را با استفاده از مفهوم آینه‌های نسبیتهی توسعه خواهیم بخشید. این روش راهی برای تولید پالس‌های همدوس فوق کوتاه در گستره‌های طیفی ماوراءبنفش<sup>۳</sup> و اشعه‌ی ایکس<sup>۴</sup> باز می‌کند [۱-۱۳]. در واقع روش‌های متنوعی برای ایجاد آینه‌های نسبیتهی پیشنهاد و مورد آزمایش قرار گرفتند. این روش‌ها را می‌توان به دو گروه عمده دسته بندی کرد، ۱- استفاده از پلاسما کم چگال<sup>۵</sup> و ۲- استفاده از پلاسما پرچگال<sup>۶</sup> به عنوان آینه‌ی نسبیتهی [۲-۵]. تمرکز اصلی ما در این پایان نامه بر استفاده از پلاسما کم چگال در تولید آینه‌های نسبیتهی می‌باشد و

---

<sup>1</sup>Schwinger

<sup>2</sup>Plasma

<sup>3</sup>Ultraviolet (UV)

<sup>4</sup>X-ray

<sup>5</sup>Underdense Plasma

<sup>6</sup>Overdense Plasma

علاقه‌مندان به مطالعه‌ی بیشتر در خصوص روش‌های تولید آینه‌های نسبیتی را به مطالعه‌ی مراجع مربوط توصیه می‌نماییم [۸-۱۶].

## ۲-۱) دور نمای پایان‌نامه

در دنباله‌ی این فصل، ابتدا تاریخچه‌ای از تولید و افزایش توان پالس لیزری ارائه می‌شود. سپس برهم‌کنش پالس لیزر پرشدت را با هر دو پلاسمای کم چگال و پرچگال بررسی می‌کنیم. در آخر دلایل اهمیت آینه‌های نسبیتی را بیان می‌کنیم. فصل دوم به تغییر مشخصات پالس لیزری در بازتاب از روی آینه‌های نسبیتی اختصاص دارد. در فصل سوم پارامترهای اساسی توصیف‌کننده‌ی میدان عقبه<sup>۱</sup> در حالت شکست و معادلات حاکم بر دینامیک این فرآیند معرفی می‌گردند. در ادامه ضریب بازتاب از روی آینه‌های نسبیتی پلاسمایی در بازتاب مایل پالس لیزری مورد بررسی قرار می‌گیرد. استفاده از تبدیلات لورنتس<sup>۲</sup> برای رسیدن به چارچوب سکون مناسبی که بازتاب در آن به صورت تابش عمودی رخ دهد از مشخصات مهم این فصل می‌باشد. بالاخره در فصل چهارم با معرفی دیدگاه تداخلی بار دیگر بازتاب از روی آینه‌های نسبیتی پلاسمایی بازیابی شده و طرح جدیدی از بازتاب از روی آینه‌های نسبیتی چند لایه‌ای با این روش معرفی می‌گردد. در این روش جدید ما سعی می‌کنیم علاوه بر بازیابی ضریب بازتاب از روی تک لایه‌های نسبیتی بر پایه‌ی دیدگاه تداخل امواج، امکان استفاده از شرایط تداخل سازنده از هر تک لایه (آینه‌ی نسبیتی) و یا از روی سیستم‌های چند لایه (آینه‌های نسبیتی متوالی) را برای افزایش ضریب بازتاب بررسی کنیم. پیش‌بینی می‌شود که با استفاده از این روش ضریب بازتاب از روی این آینه‌ها تحت شرایط تداخل سازنده تا چند مرتبه بزرگی رشد نماید.

---

<sup>۱</sup> Wake Field

<sup>۲</sup> Lorentz Transformation

## ۱-۳) تاریخچه‌ای از تولید و افزایش توان پالس‌های لیزری

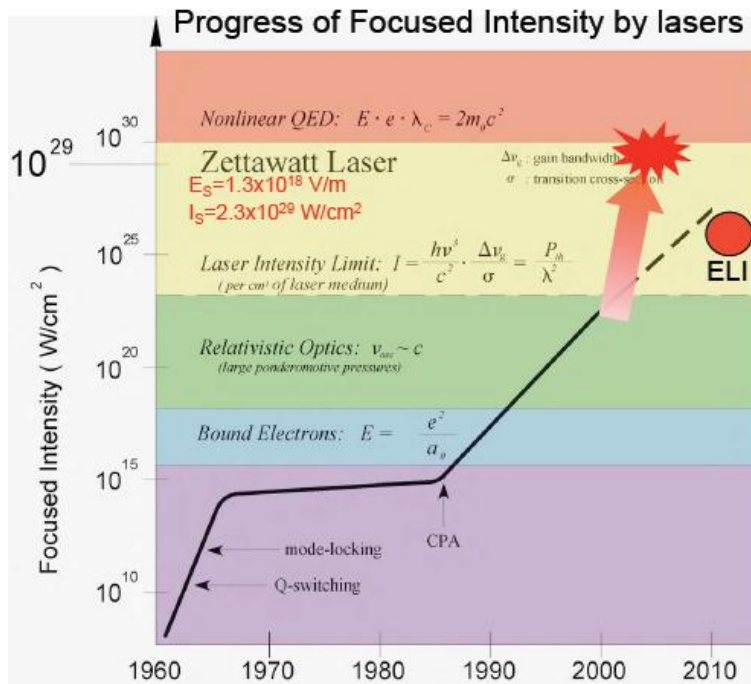
تا پیش از سال ۱۹۶۰ میلادی علم نور شناخت شاخه‌های چون ابزار نوری، دوربین‌ها، میکروسکوپ-ها، تداخل سنج‌ها و کاربردهای علمی را دربرمی‌گرفت. با ساخت اولین لیزر و پیشرفت این صنعت امروزه نورشناسی اساس فعالیت‌ها، تولیدات و خدمات بسیار زیادی همانند برش فولاد با لیزر، کاربرد لیزر در حوزه‌ی ارتباطات، در پردازش، ذخیره و بازیابی داده‌ها، در انواع جراحی‌ها و بسیاری کاربردهای دیگر است. واژه‌ی لیزر از حروف اول عبارتی به معنای تقویت میکروموج به وسیله‌ی گسیل القایی تابش گرفته شده است. تابش لیزر با درجه‌ی بسیار بالایی از تکفامی، همدوسی، جهت‌مندی و درخشایی شناخته می‌شود. در پالس لیزری شدت زیادی در محدوده‌ی بسیار کوچک متمرکز شده است. در این شاخه همواره سعی بر این بوده است که به پالس‌هایی با شدت و توان بالاتر دست یابیم. در دو دهه گذشته ما شاهد انقلابی در رشد شدت لیزرها بوده‌ایم [۱۷]. این افزایش شدت از ترکیب روش تقویت پالس بسامد متغیر<sup>۱</sup> به همراه پیشرفت‌هایی در زمینه تولید پالس‌های کوتاه و استفاده از محیط‌های فعال لیزری مانند بلور تیتانیم-سفاير<sup>۲</sup>، نئودیم-شیشه<sup>۳</sup>، ایریدیم-شیشه<sup>۴</sup> می‌باشد. در جدیدترین روش، با استفاده از آینه‌ی نسبیتی به توان و شدت‌هایی دست خواهیم یافت که تاکنون قابل دستیابی نبوده اند و این امر باعث ایجاد زمینه‌های تحقیقاتی نوینی در فیزیک خواهد شد [۱۸].

<sup>1</sup> Chirp Pulse Amplification (CPA)

<sup>2</sup> Ti:Sapphire

<sup>3</sup> Nd:glass

<sup>4</sup> Yb:glass



شکل (۱-۱): نمودار تغییرات شدت نور لیزر از ابتدا تا کنون [۱۹،۲۰].

در شکل (۱-۱) تغییرات شدت لیزر در سال‌های مختلف ترسیم شده است. پس از اختراع لیزر در سال ۱۹۶۰ میلادی، با استفاده از روش‌های Q سوئیچ<sup>۱</sup> و قفل‌شدگی مد<sup>۲</sup> شاهد افزایش در شدت لیزرها بوده‌ایم. از سال ۱۹۷۰ این روند دچار یک رکود شد که علت آن پدیده‌های غیرخطی ناخواسته در اثر تقویت پالس‌های کوتاه بود، زیرا آستانه تابندگی برای خرابی اغلب مواد در حدود  $1 \text{ GW/cm}^2$  می‌باشد و افزایش شدت لیزرها بیشتر از آستانه تابندگی، بدلیل آسیب دیدن بلورهای تقویت‌کننده امکان پذیر نمی‌باشد. با معرفی روش CPA در دهه‌ی ۱۹۹۰ میلادی این مشکل برطرف شد و جهشی سریع در توان لیزرها و گذر از محدوده‌ی از گیگاوات<sup>۳</sup> اتفاق افتاد، بطوری که شاهد تولید پالس‌های فمتوثانیه<sup>۴</sup> لیزری با توان‌هایی از مرتبه تراوات<sup>۵</sup> و حتی پتاوات<sup>۱</sup> برای کاربردهای خاص در همجوشی هسته‌ای [۱۶،۱۹] نیز بوده‌ایم. با

<sup>۱</sup> Q-switch  
<sup>۲</sup> Mod-lock  
<sup>۳</sup> Giga Watt  
<sup>۴</sup> Femto Second  
<sup>۵</sup> Tera Watt



متمرکز کردن این پالس‌های اپتیکی پرتوان، شدت تا مرتبه‌ی بسیار بالای  $10^{22} \text{ w/cm}^2$  رشد خواهد کرد. در این پژوهش سعی بر آن شده تا از روشی بهره جست تا به شدت‌هایی در حدود  $10^{29} \text{ w/cm}^2$  دست یابیم. روش بازتاب پالس لیزری از آینه‌ی نسبیته‌ی که نخستین بار توسط بولانو و همکارانش [۸] در سال ۲۰۰۳ پیشنهاد و چند سال بعد به طور تجربی مورد آزمایش قرار گرفت [۱۴]، مرزهای جدیدی از شدت را خواهد گشود، جائیکه پدیده‌ی شکست خلاء آفرینش زوج الکترون-پوزیترون را ایجاد خواهد کرد [۸-۱۰]. علاوه بر این، روش آینه‌ی نسبیته‌ی راه نوینی را برای منابع پرشدت کوک پذیر از پالس‌های همدوس فوق کوتاه در محدوده‌ی مافوق بنفش و تابش اشعه‌ی ایکس باز می‌کند، که تحولی در تصویربرداری فوق سریع از فرایندهای اتمی ایجاد خواهد کرد.

## ۴-۱) مفاهیم برهمکنش لیزر- پلاسما

### ۱-۴-۱) انتشار لیزر در پلاسما

همانطور که در مقدمه بیان شد پلاسما دریایی از الکترون‌ها و یونهاست، که رفتار گروهی از خود نشان می‌دهند. یکی از خواص جالب پلاسما توانایی آن در حفظ نوسانات و انتشار امواج است. به علت وجود ذرات باردار در محیط پلاسما نوسانات الکتروستاتیکی در این محیط وجود دارند. این نوسانات اولین بار توسط تانکس<sup>۲</sup> و لانگمویر<sup>۳</sup> بررسی شدند [۲۱].

وقتی در پلاسما اختلالی ایجاد می‌شود، برای مثال اگر ذرات با بار مثبت را از ذرات با بار منفی جدا کنیم، با حل معادلات مربوط به پلاسما درمی‌یابیم که این محیط به حالت تعادل برمی‌گردد، اما به خاطر داشتن اینرسی دوباره از حالت تعادل دور می‌شوند، در نتیجه یک نوسان حول حالت تعادل با بسامد

---

<sup>1</sup> Peta Watt

<sup>2</sup> Tonks

<sup>3</sup> Longmuir

مشخصی اتفاق می افتد که به آن بسامد پلاسما  $\omega_p$  می گوئیم. شایان ذکر است که امواج در محیط پلاسما همواره به دلیل افت و خیزها در محیط وجود دارند. انتشار موج الکترومغناطیس در پلاسما بوسیله رابطه پاشندگی پلاسما توصیف می شود [۲۲]،

$$\omega^2 = \omega_p^2 + c^2 k^2 \quad (1-1)$$

$\omega_p$  بسامد غیر نسبیتی پلاسماست که با رابطه زیر تعریف می شود،

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}} \quad (2-1)$$

که  $n_e$  چگالی الکترون های پلاسما و  $m_e$  جرم الکترون است. با توجه به رابطه ی اخیر درمی یابیم که بسامد پلاسما به چگالی الکترون ها وابسته است، یعنی امکان یا عدم امکان انتشار موج عرضی در پلاسما به  $n$  وابسته است که نکته ی حائز اهمیتی است. از برابر قرار دادن  $\omega_0 = \omega_p$  می توانیم چگالی بحرانی که مرز عبور و عدم عبور موج است را بدست آوریم،

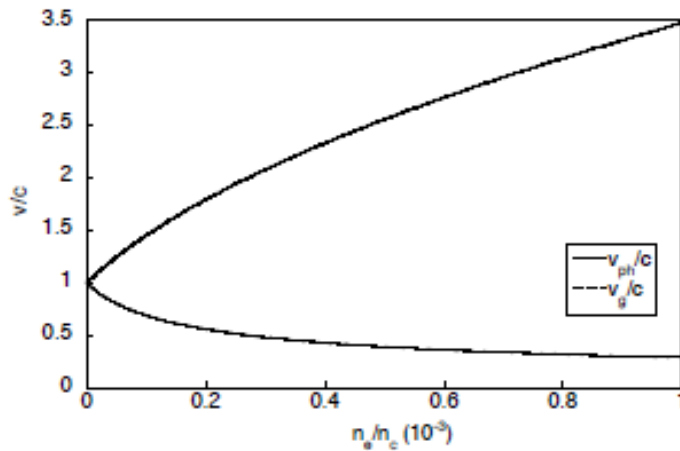
$$n_c = \frac{m_e \omega_0^2}{4\pi e^2} = \frac{1.22 \times 10^{21}}{\lambda^2 (\mu m)} \quad (cm^{-3}) \quad (3-1)$$

اگر  $n_e < n_c$  پلاسما کم چگال است و اگر  $n_e > n_c$  پلاسما را پُرچگال گویند. در واقع، موج الکترومغناطیسی با بسامد  $\omega_0 = 2\pi c / \lambda$  در صورتی می تواند وارد پلاسما شود که  $\omega_0 > \omega_p$  باشد. یعنی بسامد پالس تابشی از بسامد پلاسما بیش تر باشد. در غیر این صورت، اگر  $\omega_0 < \omega_p$  باشد، پلاسما در برابر نور لیزر همانند یک آینه رفتار می کند و آن را بازتاب می دهد، بنابراین پلاسما نمی تواند این امواج را از خود عبور دهد [۲۲].

در شکل (۲-۱) سرعت فاز پالس لیزری در پلاسما  $v_{ph}/c = \omega/k = (1 - n_e/n_c)^{-1/2}$  و سرعت

گروه پالس  $v_g/c = \partial\omega/\partial k = (1 - n_e/n_c)^{1/2}$ ، برحسب تابعی از  $n_e/n_c$  ترسیم شده است. دیده می شود با

افزایش چگالی الکترون، سرعت گروه کاهش پیدا می کند، درحالی که سرعت فاز افزایش می یابد.



شکل (۲-۱): سرعت فاز بی‌بُعد  $v_{ph}/c$  و سرعت گروه بی‌بُعد  $v_g/c$  برحسب تابعی از  $n_e/n_e$ .

### ۲-۴-۱) نیروی پیشران<sup>۱</sup>

نیروی پیشران نیروی متوسطی است که توسط پالس لیزری به یک ذره باردار اعمال می‌شود که آن را

می‌توان بصورت زیر نوشت [۱۷]،

$$F_p = -\frac{m_e c^2}{2} \nabla \langle a^2 \rangle \quad (۴-۱)$$

که علامت  $\langle \rangle$ ، نشان‌دهنده متوسط زمانی روی یک دوره تناوب لیزر است. همچنین  $a$  پتانسیل بُرداری

بی‌بُعد شده پالس لیزری است که بصورت  $a = eA / m_0 c^2$  تعریف می‌شود که برای  $a < 1$  سرعت نوسانات

الکترون‌ها در میدان الکتریکی پالس لیزری غیرنسبیتی است و لذا حرکت الکترون عمدتاً ناشی از میدان

الکتریکی لیزر است و بصورت نوسانات خطی در راستای میدان الکتریکی با بسامد لیزر اتفاق می‌افتد. اما

اگر  $a > 1$  شود حرکت الکترون نسبیتی شده و نیروی ناشی از میدان مغناطیسی  $1/c(v \times B)$  قابل توجه

<sup>۱</sup> Ponderomotive force

شده و در نتیجه الکترون حرکتی در راستای طولی نیز پیدا می‌کند. برطبق رابطه‌ی (۴-۱) پتانسیل پیشران به شکل زیر قابل تعریف می‌باشد،

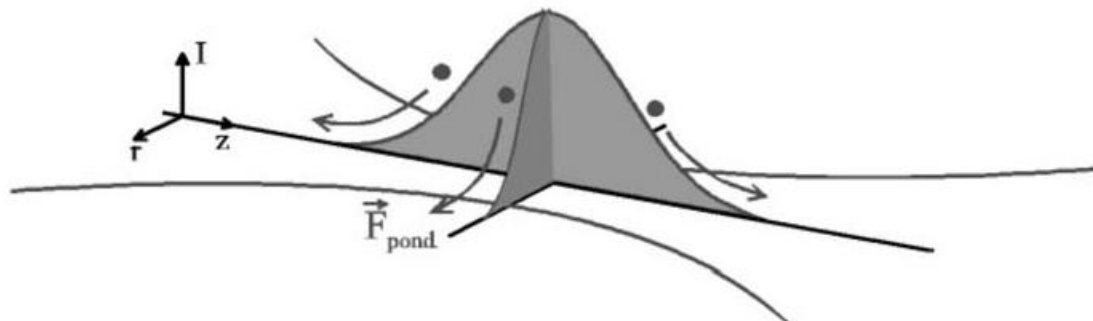
$$U_p = \frac{m_e c^2}{2} \langle a^2 \rangle \quad (۵-۱)$$

نیروی پیشران در حالت نسبیتهی نیز با رابطه زیر قابل بیان است [۲۳، ۲۴]،

$$\vec{F}_p = -\frac{m_e c^2}{2 \langle \gamma \rangle} \nabla \langle a^2 \rangle \quad (۶-۱)$$

که در آن  $\langle \gamma \rangle = \langle (1 + p_{\parallel}^2 + p_{\perp}^2)^{1/2} \rangle$  متوسط ضریب نسبیتهی در یک دوره تناوب لیزر است.

شکل (۳-۱) طرحی از نیروی محرکه حاصل از یک پالس لیزری با مشخصه گاوسی را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۱) : نمایه‌ای از نیروی پیشران یک پالس لیزری با مشخصه گاوسی.

## ۵-۱) برهمکنش لیزر با پلاسمای کم چگال

در ادامه عبور نور لیزر از پلاسمای کم چگال و نحوه‌ی شکل‌گیری امواج عقبه در محیط پلاسما را

بررسی می‌کنیم. همانطور که بیان شد اگر یک پالس لیزری به پلاسمای کم چگال تابانده شود، از این محیط