

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

صَلَّى مُحَمَّدًا أَوْلِيًّا

دانشکده‌ی علوم پایه  
گروه فیزیک  
(گرایش اتمی و مولکولی)

اثرات محیط پلاسمایی در رابطه‌ی پاشندگی و نرخ رشد  
یک لیزر الکترون آزاد

از:

هاجر زیرک فلاح دوست

استاد راهنما:

آقای دکتر ساعد جعفری

شهریور ۱۳۹۳

تقدیم به

پدر و مادر مهربان و صبورم

## تشکر و قدردانی

سپاس خدائی را که اول همه‌ی آثار هستی اوست و قبل از او اولی نبوده، و آخر است بی‌آنکه پس از او آخری باشد، خدایی که دیده‌ی بینندگان از دیدنش قاصر، و اندیشه و فهم وصف کنندگان از وصفش عاجز است. او را شاکرم که در تمام لحظات زندگی‌ام بی منت یار و یاورم بوده است.

برای رسیدن به اهدافی در زندگی، افراد و عوامل زیادی علاوه بر تلاش و کوشش خود فرد نیاز است، مطمئناً به انجام رساندن این رساله نیز مستثنی از این مقوله نمی‌باشد؛ و در این مسیر همراهی و مساعدت عزیزانی شامل حال اینجانب بوده است و شایسته است که در ابتدای این رساله با کلماتی چند نه درخور زحمات این عزیزان، مراتب تشکر و قدردانی را به جا آورم.

نیک به جاست در ابتدا از جناب آقای دکتر ساعد جعفری، استاد راهنمای مهربان و صبورم که با نادید انگاشتن کاستی‌های من دانشجوی، همواره تشویق‌ها و راهنمایی‌های بی‌دریغ ایشان در تمامی مراحل این پروژه باعث دلگرمی و روشن کننده راهم بوده است، به خاطر حمایت‌های بی‌دریغشان سپاسگزاری و قدردانی نمایم. توفیقات روز افزون ایشان را در تمام مراحل زندگی از خداوند مهربان مسئلت دارم.

از آقای دکتر سعید باطبی و دکتر سعید مهدوی فر به خاطر قبول زحمت داوری پایان نامه‌ام و نیز راهنمایی‌های ایشان در جهت رفع نواقص تشکر ویژه دارم؛ و نیز اساتید گرامی‌ای که در دوره کارشناسی و کارشناسی ارشد از دانش و تجربیات ایشان بهره برده‌ام سپاس و قدردانی می‌نمایم.

بر خود لازم و واجب می‌دانم که از زحمات و حمایت‌های بی‌دریغ پدر و مادر مهربانم صمیمانه تشکر نمایم که در سایه محبت‌های مادی و معنوی ایشان توانستم طی طریق نمایم.

از برادر و خواهر عزیزم کمال تشکر را دارم که در طی این دو سال جور بسیاری از وظایفی که به عهده‌ی بنده بوده است را تقبل نمودند و محیطی را برایم فراهم نمودند تا بتوانم به امور درسی‌ام بیشتر بپردازم.

و در پایان از دوستان عزیزم به خصوص خانم اکبری و خانم کاظمی که همیشه راهنمایی‌ها و تشویق‌های ایشان باعث پیشبرد کارهایم بوده است تشکر می‌نمایم.

از خداوند مهربان برای همه‌ی این عزیزان سعادت دنیوی و اخروی را خواستارم.

هاجر زیرک فلاح دوست

شهریور ۱۳۹۳

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
ر	چکیده فارسی .....
ز	چکیده انگلیسی .....
۱	مقدمه .....
<b>فصل اول: فیزیک لیزر الکترون آزاد</b>	
۶	۱-۱ مقدمه .....
۷	۲-۱ تاریخچه لیزر الکترون آزاد .....
۸	۳-۱ فیزیک لیزرهای کوانتومی و لیزر الکترون آزاد .....
۱۰	۱-۳-۱ گسیل القایی و خودبخودی در لیزرهای معمولی رایج .....
۱۳	۲-۳-۱ منشأ گسیل خودبخودی .....
۱۶	۴-۱ آیا FEL واقعا یک لیزر است؟ .....
۱۸	۵-۱ نقش آهنرباهای نوساننده در شتابدهی ذرات در لیزر الکترون آزاد .....
۲۲	۶-۱ معرفی چند ویگنر یا آندولاتور .....
۲۳	۷-۱ ویگنر مسطح .....
۲۳	۱-۷-۱ میدان مغناطیسی ویگنر مسطح .....
۲۵	۲-۷-۱ حرکت الکترون در یک ویگنر (آندولاتور) مسطح .....
۲۷	۸-۱ ویگنر (آندولاتور) ماریچی .....
۲۷	۱-۸-۱ حرکت الکترون در یک ویگنر ماریچی .....
۳۰	۹-۱ آندولاتورهای باریک شونده .....
۳۱	۱۰-۱ آندولاتور پلاسمایی .....
۳۲	۱۱-۱ خلاصه فصل .....

## فصل دوم: پلاسما و برخی ویژگی‌های آن

۳۴	.....	۱-۲ مقدمه‌ای بر فیزیک پلاسما
۳۷	.....	۲-۲ حفاظ دبابی
۳۹	.....	۳-۲ پارامتر پلاسما
۳۹	.....	۴-۲ فرکانس (بسامد) پلاسما
۴۱	.....	۵-۲ حرکت تک ذره در محیط پلاسمایی
۴۱	.....	۱-۵-۲ معادلات میدان
۴۳	.....	۲-۵-۲ مدارهای ذره و حرکت رانشی (سوقی) در پلاسما
۴۳	.....	۳-۵-۲ میدان مغناطیسی یکنواخت $E = 0$
۴۵	.....	۴-۵-۲ میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی یکنواخت $E \perp B$
۴۶	.....	۵-۵-۲ میدان مغناطیسی نسبت به زمان ثابت، ولی تابع فضا $E = 0$
۴۸	.....	۶-۲ معادلات هیدرومغناطیسی
۴۹	.....	۷-۲ نوسان‌های پلاسما و حرکت موجی
۵۰	.....	۱-۷-۲ امواج هیدرومغناطیسی یا امواج آلفن
۵۴	.....	۲-۷-۲ نوسان‌ها و امواج الکتروستاتیکی الکترون پلاسما
۵۹	.....	۸-۲ ناپایداری‌های پلاسمایی
۶۲	.....	۹-۲ رابطه‌ی پاشندگی و ناپایداری‌ها
۶۳	.....	۱۰-۲ کاربرد امواج پلاسمایی
۶۳	.....	۱-۱۰-۲ کاربرد میدان‌های جمعی پلاسما در تکنولوژی

## فصل سوم: لیزر الکترون آزاد با ویگلر پلاسمایی

۶۷	.....	۱-۳ مقدمه‌ای بر لیزر الکترون آزاد با ویگلر پلاسمایی
۶۸	.....	۲-۳ تحریک امواج پلاسمایی
۶۹	.....	۳-۳ انواع ویگلرهای پلاسمایی و تولید تابش
۷۱	.....	۴-۳ لیزر الکترون آزاد با ویگلر الکتریکی پلاسمایی

۷۳	..... مکانیسم لیزر الکترون آزاد با یک ویگنر پلاسمایی
۷۷	..... برانگیختگی ویگنر پلاسمایی
۷۷	..... برانگیختگی موج-ضربه
۷۹	..... برانگیختگی ویگنر فیلد
۷۹	..... پارامترهای لیزر الکترون آزاد برای بهره
۸۲	..... اثرات پلاسمای روی باریکه‌ی الکترونی تابشی
۸۶	..... ویگنر پلاسمایی و مقایسه‌ی آن با ویگنر یونی
۹۰	..... خلاصه و نتیجه‌گیری

#### فصل چهارم: بررسی رابطه‌ی پاشندگی محیط پلاسمایی برای باریکه‌های عبوری از ویگنر پلاسمایی

۹۲	..... ۱-۴ مقدمه
۹۳	..... ۲-۴ معادلات مسیر الکترون
۹۷	..... ۳-۴ فرمولبندی موج
۱۰۱	..... ۴-۴ حل معادله‌ی موج
۱۰۲	..... ۵-۴ رابطه‌ی پاشندگی

#### فصل پنجم: نتایج عددی و محاسبات کامپیوتری نرخ رشد بر حسب عدد موج در شرایط پارامتری متفاوت

۱۰۶	..... ۱-۵ مقدمه
۱۰۶	..... ۲-۵ محاسبه‌ی ریشه‌های رابطه‌ی پاشندگی
۱۰۸	..... ۳-۵ اثرات تغییر چگالی باریکه‌ی الکترونی بر نرخ رشد
۱۰۹	..... ۴-۵ اثرات تغییر میدان مغناطیسی محوری بر نرخ رشد
۱۱۱	..... ۵-۵ اثر تغییر پارامتر انرژی باریکه‌ی الکترونی بر نرخ رشد آن در محیط پلاسمایی
۱۱۶	..... ۷-۵ نتیجه‌گیری کلی
۱۱۶	..... ۸-۵ پیشنهادات برای ادامه‌ی کار
۱۱۷	..... مراجع
۱۲۲	..... فهرست مقاله‌های پذیرفته شده در کنفرانس‌های داخلی

## فهرست جداول

صفحه	عنوان
۴۰	جدول ۱-۲ مقادیر تقریبی پارامترهای پلاسمای موجود در جهان
۷۸	جدول ۱-۳ پارامترهای برانگیختگی ویگلر پلاسمایی در طول موج‌های مختلف
۸۱	جدول ۲-۳ پارامترهای بدست آمده برای بهره
۸۹	جدول ۳-۳ ویژگی‌های دو ویگلر کانال یونی و موج پلاسمایی



## فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۷	شکل ۱-۱ نمایش از لیزر الکترون آزاد .....
	شکل ۲-۱ ارائه‌ی نمودار طرح کلی از سیستم لیناک بازیافت انرژی در لیزر الکترون آزاد که برای هر دو نوع عمده‌ی
۱۰	FEL (تقویت کننده‌ها و نوسانگرها) نشان داده شده است .....
۱۱	شکل ۳-۱ مبانی لیزر کوانتومی که الکترون‌ها مقید به اتم یا مولکول و یا ترازهای انرژی می‌باشند .....
۱۴	شکل ۴-۱ شرط انتقال انرژی پایدار از الکترون به موج نوری .....
	شکل ۵-۱ فاز موج ضربه‌ی (پوندرموتیو) $\psi_0 = -\pi/2$ مربوط به حالتی است که هیچ تبادل انرژی ما بین
۱۵	الکترون و موج نوری وجود ندارد .....
	شکل ۶-۱ سمت چپ: فاز پوندرموتیو $\psi = 0$ برای بیشینه انتقال انرژی از الکترون به موج نوری (عملکرد FEL)
۱۶	سمت راست: فاز $\psi = -\pi$ برای انتقال انرژی بیشینه از موج نوری به الکترون (IFEL) .....
۱۷	شکل ۷-۱ مکانیسم لیزر الکترون آزاد .....
۱۸	شکل ۸-۱ پیکربندی از FEL - SASE .....
۱۹	شکل ۹-۱ طرحواره‌ای از یک آندولاتور در یک لیزر الکترون آزاد نوسانگر کم- بهره‌ی مجهز به تشدیدگر اپتیکی ..
۲۰	شکل ۱۰-۱ مبانی لیزر الکترون آزاد .....
۲۲	شکل ۱۱-۱ گستره‌ی انرژی فوتون‌های حاصله از انواع مختلف شتابدهنده‌های الکترونی .....
۲۳	شکل ۱۲-۱ نمایشی از یک ویگلر مسطح .....
۲۳	شکل ۱۳-۱ نمایشی از یک آندولاتور مسطح .....
۲۴	شکل ۱۴-۱ منظری از آهنربای ویگلر مسطح با قطبش متناوب میدان مغناطیسی و مسیر الکترونی سینوسی گون .....
۲۷	شکل ۱۵-۱ طرحی از یک ویگلر ماریپچی .....
۳۰	شکل ۱۶-۱ تصویری از دو آندولاتور باریک شونده که در کنار هم قرار گرفته‌اند .....
۳۱	شکل ۱۷-۱ طرحواره‌ای از یک لیزر با میکرو آندولاتور پلاسمایی .....
۳۸	شکل ۱-۲ مقایسه‌ی پتانسیل دبابی و کولنی .....
۴۴	شکل ۲-۲ حرکت ذره‌ی باردار مثبت در یک میدان مغناطیسی یکنواخت .....

- شکل ۳-۲ سوق ذرات در میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی یکنواخت متعامد ..... ۴۶
- شکل ۴-۲ ذره در مسیری مارپیچی که به طور مرتب تنگتر و فشرده‌تر می‌شود می‌چرخد و سرانجام منعکس می‌گردد... ۴۸
- شکل ۵-۲ قسمت ABCD ی پلاسما در جهت مثبت محور  $y$  حرکت می‌کند. جریان‌هایی که بوجود می‌آیند به صورت طرحواره رسم شده‌اند..... ۵۱
- شکل ۶-۲ این تصویر در برگرفته‌ی مکانیسم نوسانات پلاسمایی است که خنثایی الکتریکی پلاسمای آن حفظ می‌شود. .... ۵۵
- شکل ۷-۲ پیکربندی‌های متفاوتی از حالت نامتعادل که منجر به ناپایداری در پلاسما می‌شود. .... ۵۹
- شکل ۸-۲ طرحواره‌ای از ناپایداری ریلی تیلور را به نمایش گذاشته است ..... ۶۱
- شکل ۹-۲ ناپایداری پیچی هنگامی اتفاق می‌افتد که میدان مغناطیسی تعادلی هلیکال باشد ..... ۶۱
- شکل ۱۰-۲ ناپایداری سوسیسی جریانی است محوری، که میدان مغناطیسی آن کمی سمتی باشد ..... ۶۱
- شکل ۱۱-۲ طرح واره‌ای از ۴ روش دستکاری و کنترل باریکه با استفاده از پلاسما ..... ۶۴
- شکل ۱-۳ طرحواره‌ای از برانگیختگی موج پلاسمایی توسط یک پالس باریکه‌ی الکترونی پر قدرت. .... ۶۹
- شکل ۲-۳ طرحواره‌ای از ویگلر پلاسمایی در یک لیزر الکترون آزاد ..... ۷۲
- شکل ۳-۳ مقایسه‌ی بین ویگلرهای مغناطیسی، الکترومغناطیسی و ویگلر پلاسمایی کاملاً الکتریکی ..... ۷۴
- شکل ۴-۳ مکانیسم نوسانی ویگلر پلاسمایی. .... ۷۶
- شکل ۵-۳ طرحواره‌ای از برانگیختگی موج ضربه توسط دو باریکه‌ی لیزر ..... ۷۷
- شکل ۶-۳ الف) شماتیکی یک بعدی از چگونگی برانگیختگی ویکفیلدی توسط یک لیزر کوتاه موج (بالا) و باریکه ذره‌ای (پایین) به عنوان محرک. ب) شبیه‌سازی کامپیوتری از برانگیختگی ویکفیلد توسط باریکه‌ی الکترونی ..... ۸۰
- شکل ۳-۷ عبور باریکه‌ی الکترونی از میان یک کانال یونی و نمودار پتانسیل ایجاد شده بواسطه‌ی کانال یونی ..... ۸۸
- شکل ۴-۱ مسیر حرکت تک ذره‌ی الکترونی در ویگلر موج پلاسمایی الکترواستاتیکی (لانگمیر) برای پارامترهای  $\Omega_c = 0.1$  و  $v = 0.04$  ..... ۹۵
- شکل ۴-۲ مسیر حرکت الکترون در ویگلر لانگمیر برای فرکانس‌های زاویه‌ای میدان مغناطیسی بی‌بعد متفاوت ..... ۹۵
- شکل ۴-۳ نمودار سه بعدی مسیر الکترون در ویگلر لانگمیر برای پارامترهای  $\Omega_c = 0.1$ ،  $v = 0.04$  ..... ۹۶
- شکل ۴-۴ منظری از سطح مقطع سرعت‌های عرضی بی‌بعد باریکه‌ی الکترونی در ویگلر لانگمیر با پارامترهای  $\Omega_c = 0.1$ ،  $v = 0.04$  ..... ۹۶

شکل ۱-۵ نمودار آهنگ رشد باریکه‌ی الکترونی ( $Im \omega/\omega_w$ ) بر حسب عدد موج ( $k/k_w$ ) با متغیرهای

۱۰۸ .....  $\Omega_b = ۱.۲۷, \Omega_c = ۰.۴۶, \gamma_0 = ۴۰$

شکل ۲-۵ نمودار نرخ رشد بی‌بعد  $Im \omega/\omega_w$  بر حسب عدد موج بی‌بعد  $k/k_w$ .

۱۰۹ ..... به طوریکه  $\Omega_c = ۰.۴۶, \gamma_0 = ۴۰$  می‌باشد

۱۱۰ ..... شکل ۳-۵ نمودار  $Im \omega/\omega_w$  بر حسب  $k/k_w$  با پارامترهای  $\Omega_b = ۰.۳۶, \gamma_0 = ۲۵$

۱۱۱ ..... شکل ۴-۵ نمودار تغییر آهنگ رشد باریکه بر حسب عدد موج با  $\Omega_c = ۰.۵۶, \Omega_b = ۰.۲۶, \gamma_0 = ۶۴$

شکل ۵-۵ نمودار  $Im \omega/\omega_w$  بر حسب  $k/k_w$  با پارامترهای  $\Omega_c = ۰.۶۶$  و  $\Omega_b = ۰.۳۶$  رسم شده است

۱۱۲ ..... این نمودار حاکی از آنست که با افزایش انرژی باریکه پیک نمودار نرخ رشد نیز افزایش می‌یابد.

شکل ۶-۵ سمت چپ نرخ رشد را بر حسب پارامترهای میدان مغناطیسی و عدد موج در سه بعد و نمودار سمت راست

۱۱۳ ..... نمایی از سطح نمودار سه بعدی را نمایش می‌دهد. این نمودارها برای  $\Omega_b = ۰.۳۶$  و  $\gamma_0 = ۲۵$  رسم شده است

۱۱۴ ..... شکل ۷-۵ نمودار نرخ رشد بر حسب تغییر در عدد موج و چگالی باریکه‌ای برای  $\Omega_c = ۰.۴۶, \gamma_0 = ۴۰$

شکل ۸-۵ نمودار سه بعدی  $K, \Omega_b, \Omega_c$  بر حسب پارامترهای  $\Omega_c = ۰.۹$  و  $\gamma_0 = ۴۰$  (سمت چپ). نمایی از سطح،

۱۱۵ ..... سمت راست شکل به نمایش گذاشته شده است.

## چکیده

### اثرات محیط پلاسمایی در رابطه‌ی پاشندگی و نرخ رشد یک لیزر الکترون آزاد

هاجر زیرک

زمینه‌ی کاری این پایان نامه، لیزر الکترون آزاد با ویگلر موج الکترواستاتیک پلاسمایی معروف به ویگلر لانگمیر می‌باشد. هدف آن است که اثر این ویگلر به عنوان یک محیط پلاسمایی بر آهنگ رشد باریکه‌های الکترونی نسبتی عبوری از آن در حضور میدان مغناطیسی محوری راهنما با تحلیل ریاضیاتی و عددی مورد بررسی قرار گیرد. تحلیل حرکت الکترون‌ها با استفاده از دینامیک یک تک ذره و قید چرخش پایا صورت می‌گیرد؛ با کمک معادله حرکت لورنتس، معادله‌ی مسیر الکترون در حالت پایا با روش رانگ کوتای مرتبه‌ی چهارم بدست آورده می‌شود و سپس با ایجاد اختلالی در محیط فعال لیزر (محیط پلاسمایی) و در مسیر عبور باریکه از ویگلر، اختلالی در متغیرهایی مانند چگالی باریکه‌ی الکترونی، چگالی جریان باریکه و مؤلفه‌های سرعت بوجود می‌آید. با در نظر گرفتن ترم‌های اختلالی، حل همزمان معادله‌های لورنتس، پیوستگی و موج را صورت می‌گیرد و رابطه‌ی پاشندگی  $F(\omega, k) = 0$  برای باریکه‌ی الکترونی نسبتی عبوری از ویگلر پلاسمایی حاصل می‌شود.

آهنگ رشد باریکه  $Im(\omega)$  بر حسب فرکانس موج ترکیبی  $k$  بر روی نمودار با تغییر در برخی پارامترها مانند چگالی و انرژی باریکه‌ی الکترونی و میدان مغناطیسی راهنما بررسی و مورد تحلیل قرار می‌گیرد. بررسی نموداری نشان می‌دهد که با ثابت بودن انرژی باریکه و میدان مغناطیسی راهنما با افزایش (کاهش) چگالی باریکه الکترونی پیک نرخ رشد آن نیز افزایش (کاهش) می‌یابد. و همچنین با ثابت بودن چگالی و انرژی باریکه، کاهش (افزایش) در نرخ رشد به موجب افزایش (کاهش) در میدان مغناطیسی راهنما صورت می‌گیرد. و بالاخره با افزایش (کاهش) انرژی باریکه‌ی الکترونی نسبتی در شرایط ثابت بودن چگالی باریکه و میدان مغناطیسی راهنما، پیک نرخ رشد بر حسب عدد موج افزایش (کاهش) می‌یابد.

کلیدواژه: لیزر الکترون آزاد، ویگلر موج پلاسمایی، رابطه‌ی پاشندگی، نرخ رشد.

## Abstract

### Plasma effects on dispersion relation and growth rate an free electron laser

Hajar zirak

Field this thesis is free electron laser with plasma electrostatic wave wiggler (Langmuir wiggler). The purpose of present thesis is to investigate the interaction of a relativistic electron beam with a plasma Langmuir wave in the presence of an axial guide magnetic field. Electron motion has been analyzed using single particle dynamics and regimes of orbit stability have been discussed. Electron trajectories have been obtained by solving the Lorentz force equation for a single electron. In addition, a fourth-order Runge-Kutta method has been used to simulate the electron trajectories. Employing perturbation analysis, the dispersion relation  $F(\omega, k) = 0$  for an electromagnetic and space-charge waves has been derived by solving the momentum transfer, continuity, and wave equations.

Numerical calculations and diagram growth rate of e-beam  $Im(\omega)$  according to combined wave frequency  $k$  are shown growth rate increases with increasing the e-beam energy and e-beam density, besides it decreases with increasing the strength of axial guide magnetic field.

**Key Words:** free-electron laser, plasma wave wiggler, dispersion relation, growth rate

کوشش‌های فراوان و چشمگیری به منظور تولید تابش همدوس با طول موج کوتاه و توان بالا در قلمرو طول موج‌های کوتاه با کمک باریکه‌های الکترونی نسبتی که در میدان‌های ویگلری نوسان می‌کنند، صورت گرفته است. در یک لیزر الکترون آزاد<sup>۱</sup> تابش الکترومغناطیسی با فرکانس بالا هنگامی تولید می‌شود که باریکه‌ی الکترونی نسبتی از میان یک میدان مغناطیسی نوساننده به نام ویگلر<sup>۲</sup> یا آندولاتور<sup>۳</sup> انتشار یابد. به خوبی می‌دانیم که طول موج تابشی  $\lambda_r$  با کاهش طول موج ویگلری  $\lambda_w$  یا با افزایش انرژی الکترون  $\gamma$  طبق رابطه‌ی  $\lambda_r \propto \lambda_w / 2\gamma^2$  کاهش می‌یابد. در طرح‌های اخیر منابع تابش سینکروترونی، ویگلرهای میدان الکترومغناطیسی استفاده می‌شود، به دلیل جابجایی دوپلری<sup>۴</sup> برای چنین موج پمپاژی، طول موج تابشی آن  $\lambda_r \propto \lambda_w / 4\gamma^2$ ، در مقایسه با ویگلرهای رایج مگنتواستاتیک کوتاه‌تر می‌باشد. تلاش‌های شایانی برای عملکرد FEL در طول موج‌های کوتاه و توان‌های بالا انجام گرفته است [۶-۱]. به دلیل محدودیت‌های تکنیکی در طول موج و شدت میدان مغناطیسی، یک FEL مرسوم نیازمند باریکه‌ی الکترونی با  $\gamma$  خیلی بالایی برای تولید یک طول موج کوتاه می‌باشد، و آن مستلزم هزینه‌ی گزاف در ساخت شتابدهنده می‌باشد. امکان دستیابی به این هدف با هزینه‌ای کمتر، حجمی فشرده‌تر و باریکه‌ی الکترونی نسبتی با انرژی ( $\gamma$ ) کمتر در نتیجه‌ی کاهش  $\lambda_w$ ، وجود دارد، که از اهداف اصلی این پایان نامه می‌باشد.

یکی از راه‌های جالب در صدد رسیدن به این مهم، بکارگیری پلاسما در لیزرهای الکترون آزاد می‌باشد [۱۶-۷]. در یک FEL مملو از پلاسما، پلاسما محدودیت بار-فضای جریانی را که انتشار می‌یابد در یک مجرای سوقی افزایش می‌دهد و از این رو در قطعات میکروموجی جریان بیشتری در مقایسه با خلا با محدودیت بار-فضای آن وجود دارد. از طرفی، به طور معنی‌داری مد تابش کندتر می‌شود و به موجب آن کاهش قابل توجهی در انرژی باریکه ایجاد می‌شود. طول موج کوچک موج پلاسمایی اجازه‌ی دستیابی به تابشی با فرکانس بالاتر را در لیزرهای الکترون آزاد متداول را می‌دهد. هنگامی که باریکه‌ی الکترونی نسبتی از میان پلاسما انتشار می‌یابد، الکترون‌های پلاسما را به طور شعاعی هل می‌دهند و سبب از دست دادن ختثایی بار آن می‌شود. فرو افت چگالی ایجاد شده مانند یک حفره<sup>۵</sup> یا موجبر اپتیکی<sup>۶</sup> برای تابش FEL عمل می‌کند. وارد

<sup>1</sup> Free electron laser (FEL)

<sup>2</sup> wiggler

<sup>3</sup> undulator

<sup>4</sup> Doppler upshift

<sup>5</sup> duct

<sup>6</sup> Optical waveguide

کردن پلاسما به داخل محیط برهمکنش، باریکه‌ی الکترونی را محدود نموده و موج دمیده شده (پمپاژی) را متمرکز و همگرا نگه می‌دارد.

بینگ و شن<sup>۷</sup> لیزر الکترون آزاد مملو از پلاسما سرد را پیشنهاد و امتحان نمودند. آنها مشاهده کردند که بهره‌ی لیزر الکترون آزاد در حضور پلاسما پر چگال افزایش زیادی می‌یابد [۸]. پنت و تریپاتی<sup>۸</sup> روی عملکرد مد موج ویستلری برانگیخته شده پلاسما در حضور میدان مغناطیسی راهنما تحقیق و بررسی نمودند [۱۰]. سربتو و آلوز<sup>۹</sup> باریکه‌ای را به مانند برهمکنش یک تک ذره با پلاسما در یک FEL در نظر گرفتند؛ آنها دریافتند که برای رفتار یک بعدی برهمکنش FEL، جفت شدن بار-فضای باریکه‌ی الکترونی موجود در پلاسما با ناپایداری FEL، تغییر زیادی در آهنگ رشد تابش در لیزر الکترون آزاد بوجود می‌آید [۱۲]. شی<sup>۱۰</sup> موجبر استوانه‌ای با FEL مملو از پلاسما سرد را مورد کنکاش قرار داد. او دریافت که آهنگ رشد در فرکانس پایین افزایش می‌یابد، و در فرکانس بالا کاهش می‌یابد [۱۳].

یکی از روش‌هایی که برای کاهش  $\lambda_w$  پیشنهاد می‌شود، جایگزینی ویگلر مغناطیسی با یک ویگلر موج الکترواستاتیک پلاسمایی می‌باشد [۱۷]. بکارگیری موج پلاسمای الکترواستاتیک به عنوان ویگلر برای لیزر الکترون آزاد، آینده‌ای نوید بخش و جذاب را برای قدرت ویگلری بالا با طول موج کوتاه رقم می‌زند. اساس این پیکربندی کم حجم و ارزان قیمت بر طول موج کوتاه، موج پلاسمایی نسبی بزرگ دامنه به عنوان ویگلر استوار می‌باشد، که باریکه‌ی الکترونی نسبی با یک انرژی متوسط (نه چندان بالا و در حد کمتر از  $100\text{ MeV}$ ) به داخل آن تزریق می‌شود. در این طرح، الکترون‌ها به طور موازی یا عمود بر جبهه‌ی موج پلاسمایی انتشار می‌یابد، و تابشی را بواسطه‌ی نوسان میدان الکترواستاتیک متناوب موج، گسیل می‌دارد. لازم به ذکر است که به منظور داشتن یک میدان الکتریکی چشمگیر و قابل توجه، موج پلاسمایی باید سرعت فازی نزدیک به سرعت نور داشته باشد. در چنین موج پلاسمایی، مسیرهای ذرات تا حدی متفاوت از مورد نوسانی خالص (ac) خواهد بود. چنین موج پلاسمایی نسبی بزرگ دامنه‌ای به سهولت توسط پالس‌های لیزری یا دسته‌های<sup>۱۱</sup> الکترونی پرشدت برانگیخته می‌شوند، و توسط پژوهشگران بسیاری در سراسر جهان به طور نظری، محاسباتی و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است. از نظر

<sup>7</sup> Bing & Shen

<sup>8</sup> pant & Tripathi

<sup>9</sup> Sebto & Alves

<sup>10</sup> Shi

<sup>11</sup> Bunches

فیزیکی، وجود یک میدان مغناطیسی محوری راهنما در این نوع از لیزر الکترون آزاد نه تنها پلاسما را محصور می‌کند بلکه باریکه‌ی الکترونی را نیز همگرا و متمرکز می‌نماید، که نتیجه‌اش افزایش بازده FEL می‌باشد.

پیرو مقدمه‌ای که بیان شد تا حدی موضوع پایان نامه نمایان شده است؛ در واقع در این پایان نامه اثرات محیط پلاسمایی در رابطه‌ی پاشندگی و نرخ رشد یک لیزر الکترون آزاد مورد بررسی قرار می‌گیرد. هدف آنست که با عبور باریکه‌ای الکترونی نسبتی از یک لیزر الکترون آزاد با ویگلری پلاسمایی، در حضور میدان مغناطیسی راهنما، رابطه‌ی پاشندگی و در پی آن نرخ رشد باریکه در این محیط پلاسمایی مورد چالش قرار گیرد و با تغییر برخی از پارامترها مانند میدان مغناطیسی راهنما، چگالی و انرژی باریکه اثرات مورد نظر را به صورت تحلیلی و نیز عددی بررسی گردد.

این پایان نامه در پنج فصل تنظیم شده است:

۱- فیزیک لیزر الکترون آزاد

۲- پلاسما و برخی ویژگی‌های آن

۳- لیزر الکترون آزاد با ویگلر پلاسمایی

۴- بررسی رابطه‌ی پاشندگی باریکه‌ی الکترونی نسبتی عبوری از لیزر الکترون آزاد با ویگلر الکترواستاتیک پلاسمایی

۵- نتایج عددی و محاسبات کامپیوتری نرخ رشد بر حسب عدد موج در شرایط پارامتری متفاوت

با توجه به موضوع پایان نامه، برای درک بیشتر مطلب سعی شده است به معرفی تک تک گزینه‌های موجود در عنوان «اثرات محیط پلاسمایی در رابطه‌ی پاشندگی و نرخ رشد یک لیزر الکترون آزاد» در حد آشنایی و در حد توان پرداخته شود؛ به همین خاطر در فصل اول به معرفی لیزر الکترون آزاد و نحوه عملکرد آن به طور اجمالی پرداخته شده است. همچنین مزیت‌ها و برخی ویژگی‌های منحصر به فرد آن در مقایسه با لیزرهای متداول بیان شده است. سپس راهکارهایی برای بالابردن شدت و گستره‌ی تابش خروجی آن با بکارگیری ویگلرهای متفاوت بیان شده است.

در فصل دوم به معرفی محیط پلاسمایی و برخی ویژگی‌ها و پارامترهای مخصوص آن پرداخته شده است. همچنین موضوع انتشار امواج در پلاسما و ناپایداری‌های ایجاد شده در این محیط نیز مختصراً مطرح شده است. در این فصل به



ویگلر(به عنوان یک از اجزاء اصلی لیزر الکترون آزاد) پلاسمایی به صورت کاربرد امواج پلاسمایی در تکنولوژی نیز اشاره می‌شود.

در فصل سوم به لیزرهای الکترون آزاد با ویگلر پلاسمایی و برخی مزیت‌ها و محدودیت های ناشی از این نوع ویگلر پرداخته شده است.

در فصل چهارم و پنجم روش کار به طور تحلیلی و محاسباتی آورده شده است؛ با رابطه‌ی پاشندگی تحلیلی بدست آمده از معادلات برهمکنش باریکه‌ی الکترونی- موج، نرخ رشد باریکه‌ی الکترونی نسبتی عبوری از ویگلر موج پلاسمایی را با استفاده از محاسبات عددی بر حسب عدد موج رسم نموده و با اعمال تغییر در برخی متغیرها، نرخ رشد مورد بررسی قرار می‌گیرد.

# فصل اول

## فیزیک لیزر الکترون آزاد

یکی از جدیدترین انواع لیزرها که از نظر ساختار با لیزرهای مرسوم تفاوت‌های قابل توجهی دارد لیزر الکترون آزاد<sup>۱۲</sup> است. در واقع، لیزرهای متداول بر اساس مفهوم وارون سازی جمعیت بین ترازهای انرژی حالت مقید جدا از هم مواد بنا شده‌اند، یعنی الکترون‌ها یا به اتم و مولکول متصل‌اند و یا در طول چندین اتم در حرکت می‌باشند و یا الکترون قادر است که در تمام بلور آزادانه حرکت کند. نمونه‌های از این لیزرها عبارتند از لیزر یاقوت، لیزر یونی آرگون، لیزر  $\text{CO}_2$ ، لیزر بخار مس و غیره.

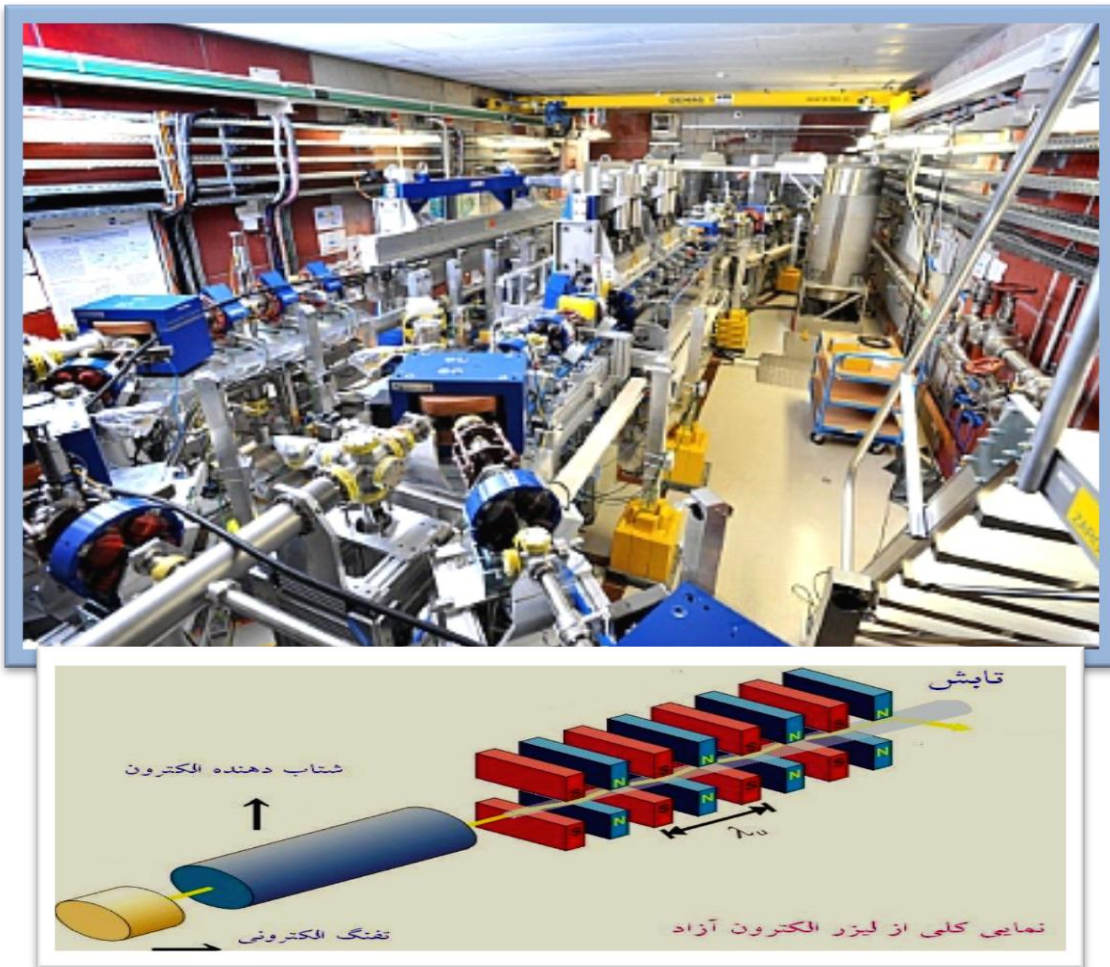
از مهمترین ویژگی‌های لیزر الکترون آزاد، شدت زیاد، کیفیت بالای نور لیزر و تنظیم‌پذیری آن در یک طیف بسیار گسترده‌ای از طول موج‌ها (از امواج میلیمتری تا اشعه‌ی ایکس) نسبت به سایر لیزرهای رایج است. امروزه کشورهای پیشرفته توان زیادی را در تحقیق روی این لیزر صرف می‌کنند به دلیل اینکه لیزر الکترون آزاد منبع نور با قابلیت تنظیم و همچنین توان بالا در راندمان و بازده است کاربردهای زیادی در شاخه‌های مختلف علوم دارد. در ناحیه‌ی طیفی  $100\mu\text{m}$  از لیزر الکترون آزاد برای بررسی حالت‌های واندروالسی سطحی استفاده می‌شود. جداسازی و گسترش ایزوتوپ‌ها از دیگر کاربردهای لیزر الکترون آزاد است. در حوزه‌ی حالت جامد و فیزیک نیمه هادی‌ها برای کوچکتر کردن مقیاس عناصر نیمه هادی، باید توزیع الکترون‌های غیر حرارتی را گسترش داد، بدین منظور برای دستیابی به گاف انرژی ثابت از مرتبه‌ی  $1\text{eV}$  باید از میدان‌های الکتریکی با شدت زیاد استفاده گردد. در فیزیک پلاسما برای گرم کردن پلاسماهای واقع در یک میدان مغناطیسی قوی، و یا گرم کردن پلاسماهایی که پارامتر  $\beta$  برای آنها زیاد است، از توان بالای لیزر الکترون آزاد بویژه در طول موج میلی متری استفاده می‌شود. در فیزیک هسته‌ای نیز برای همجوشی و شکافت هسته‌ها به تابشی با توان بالا و تپ‌های کوتاه در طول موج میکرومتری که راندمان آن چندین درصد باشد نیاز است که این امر به سادگی در لیزرهای تنظیم پذیر الکترون آزاد قابل حصول است. در جراحی با لیزر الکترون آزاد، قطر کوچک و قابلیت تنظیم‌پذیری برای طول موج‌های مختلف می‌تواند مفید باشد. در واقع در هر بافت از سلول‌های بدن از یک طول موج ویژه که مختص همان بافت است تأثیر می‌پذیرد. در نتیجه با تنظیم طول موج تابش حاصل از لیزر الکترون آزاد می‌توان بافت مورد نظر را بدون اینکه به بافت‌های مجاور آسیب وارد شود جراحی کرد [۱۸، ۱۹].

<sup>12</sup> Free electron laser

## ۲-۱ تاریخچه‌ی لیزر الکترون آزاد

قاعده‌ی کلی لیزر الکترون آزاد (شکل ۱-۱) توسط جان مادی<sup>۱۳</sup> در سال ۱۹۷۱ بنا و طرح ریزی شده است. اگرچه دیگرانی پیشتر قطعاتی مشابه را ساخته بودند، ولی تاریخ لیزر الکترون آزاد برای کاربردهای ناوی در سال ۱۹۷۱، با مفهوم و

نام لیزر



شکل ۱-۱ نمایی از لیزر الکترون آزاد، شکل اول تصویری از تأسیسات لیزر الکترون آزاد در فرانسه، شکل ضمیمه‌ی آن طرحواره‌ای از لیزر الکترون آزاد می‌باشد [۲۰، ۱۹].

<sup>13</sup> John Madey