٣٩٩٤٢

۱۳۸۱ /۱/ ۲۲

دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده علوم پایه

پایان نامه دوره دکتری فیزیک

گرایش حالت جامد

016661

اثرات کانال - یونی راهنما در لیزر الکترون آزاد

مهدی اسماعیل زاده

۳۹۹۴۲

استاد راهنما:

دکتر حسن مهدیان

بهمن ماه ۱۳۸۰

۳۹۹۴۲

تأییدیه اعضای هیأت داوران حاضر در جلسه دفاع از رساله دکتریٰ

اعـضـای هیـئـت داوران نـسخـهٔ نـهایی رساله خـانم/ آقای مهدی اسماعیل‌زاده

تحت عنوان: **اثرات کانال راهنمای یونی در لیزر الکترون آزاد**

را از نظر فرم و محتوا بررسی نموده و آنرا برای اخذ درجه دکتریٰ مورد تایید قرار دادند.

اعضای هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبهٔ علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	آقای دکتر حسن مهدیان	استاد	
۲- استاد ناظر	آقای دکتر محمدرضا ابوالحسنی	استادیار	
۳- استاد ناظر	آقای دکتر صمد سبحانیان	استاد	
۴- استاد ناظر	آقای دکتر ناصر شاه‌طهماسبی	دانشیار	
۵- استاد ناظر	آقای دکتر محمدکاظم مروج	استاد	
۶- نماینده تحصیلات تکمیلی	آقای دکتر محمدرضا ابوالحسنی	استادیار	

بسمه‌تعالی

آیین‌نامهٔ چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرّس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان‌نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرّس، مبیّن بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش‌آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

مادّهٔ ۱ در صورت اقدام به چاپ پایان‌نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

مادّهٔ ۲ در صفحهٔ سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه)، عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد/رسالهٔ دکتری نگارنده در رشتهٔ فیزیک است که در سال ۱۳۸۰ در دانشکدهٔ علوم پایه دانشگاه تربیت مدرّس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر حسن محدثی، مشاورهٔ سرکار خانم/جناب آقای دکتر ـــــ و مشاورهٔ سرکار خانم/جناب آقای دکتر ـــــ از آن دفاع شده است.»

مادّهٔ ۳ به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهداکند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

مادّهٔ ۴ در صورت عدم رعایت مادّهٔ ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ‌شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرّس، تأدیه کند.

مادّهٔ ۵ دانشجو تعهد و قبول می‌کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در مادّهٔ ۴ را از محلّ توقیف کتابهای عرضه‌شدهٔ نگارنده برای فروش، تأمین نماید.

مادّهٔ ۶ اینجانب مهدی اسماعیل‌زاده دانشجوی رشته فیزیک مقطع دکتری تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می‌شوم.

نام و نام‌خانوادگی: مهدی اسماعیل‌زاده

تاریخ و امضا: ۱۳۸۰ بهمن

چکیده

در این پایان نامه، مسیر الکترون در لیزر الکترون - آزاد با ویگلر تخت، کانال - یونی راهنما و میدان مغناطیسی محوری در حالت شبه پایا مورد بررسی قرار گرفته است. یک معادله درجه ده برای میانگین سرعت محوری الکترون و تابع Φ که نشان دهندهٔ نرخ تغییر سرعت محوری بر حسب انرژی الکترون است، استخراج گردیده است. با استفاده از محاسبات عددی، اثرات دو ابزار راهنما، کانال - یونی و میدان مغناطیسی محوری، به صورت همزمان و جداگانه روی مسیر الکترون مورد مطالعه قرار گرفته است. وجود سه گروه مدارها، دوتکنیگی در تابع Φ و دو رژیم جرم منفی از اثرات جالب اعمال همزمان دو ابزار راهنماست. معادلهٔ آونگ که بر هم کنش بین الکترون و میدان تابشی را توصیف می‌کند و همچنین معادلهٔ بهره در حد بهرهٔ - پایین - بر - عبور محاسبه گردیده، نشان داده شده است که بهره در حضور کانال - یونی افزایش می‌یابد و مثبت است وقتیکه رژیم جرم - مثبت برقرار است و منفی است هنگامیکه رژیم جرم - منفی برقرار است.

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فصل ۱: اصول و نظریه لیزر الکترون - آزاد

۱-۱ مقدمه ۱

۱-۲ سینماتیک بر هم کنش الکترون و فوتون ۴

۱-۲-۱ شرط همگام بودن ۹

۱-۲-۲ تابش نور همدوس ۱۵

۱-۳ پایستگی تکانه و انرژی در لیزر الکترون - آزاد ۱۷

۱-۴ اثرات کوانتمی ۲۱

۱-۵ ویگلرهای باریک شونده ۲۴

۱-۶ کاربردهای لیزر الکترون - آزاد ۲۶

فصل ۲: کانال - یونی به عنوان ابزار راهنما در لیزر الکترون - آزاد

۲-۱ مقدمه..... ۲۹

۲-۲ ابزار راهنما در لیزر الکترون - آزاد..... ۳۰

۲-۳ کانال - یونی..... ۳۲

۲-۴ لیزر کانال - یونی..... ۳۴

۲-۵ لیزر الکترون-آزاد با ویگلرمارپیچی‌وکانال - یونی راهنما .. ۳۶

۲-۵-۱ مسیر الکترون..... ۳۶

۲-۵-۲ بررسی و نتایج عددی ۴۱

فصل ۳: مسیر الکترون در لیزر الکترون - آزاد با ویگلر تخت وکانال - یونی راهنما

۳-۱ مقدمه..... ۴۸

۳-۲ ویگلر تخت..... ۴۹

۳-۳ ویگلر تخت و کانال - یونی راهنما..... ۵۴

۳-۴ بررسی و نتایج عددی..... ۵۷

فصل ۴: مسیر الکترون در لیزر الکترون - آزاد با ویگلر تحت وکانال - یونی راهنما و میدان مغناطیسی محوری

۴-۱ مقدمه..... ۶۸

۴-۲ بررسی و تحلیل مدارها ۶۹

۴-۳ تابع Φ ۷۵
۴-۴ مطالعه عددی و بررسی نتایج ۷۷

فصل ۵: بهره در لیزر الکترون - آزاد با ویگلر تخت وکانال - یونی راهنما

۵-۱ مقدمه ۹۰
۵-۲ معادلات حرکت در حضور میدان الکترومغناطیس ۹۱
۵-۳ معادله آونگ ۹۵
۵-۴ معادله بهره ۹۹
۵-۵ مطالعه عددی و بررسی نتایج ۱۰۵

فصل ٦: بحث و بررسی - نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱ مقدمه ۱۱۸
۶-۲ اثر خود - میدانها ۱۱۸
۶-۳ رفتار آشوبی الکترون در *FEL* با ویگلر تخت و میدان مغناطیسی محوری ۱۱۹
۶-۴ اثر میدان وارون شده ۱۲۰
۶-۵ نتیجه گیری ۱۲۱
پیوست (پایداری مدارهای الکترون) ۱۲۲
منابع و مأخذ ۱۲۷

فصل ۱

اصول و نظریه لیزر الکترون - آزاد

۱-۱ مقدمه

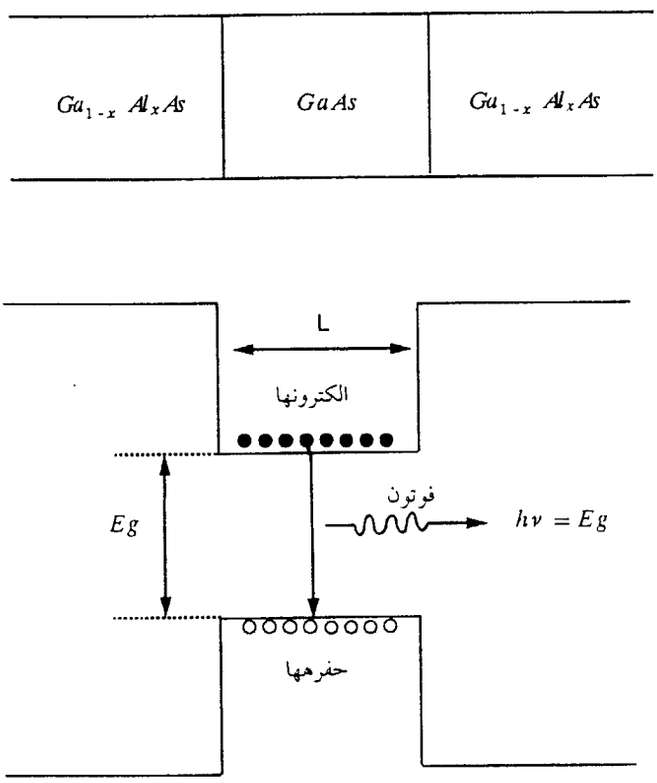
لیزر الکترون - آزاد چشمهٔ نوری است که طول موج آن قابل تنظیم است و تابش همدوس را با توان بالا، تقریباً در تمامی طیف امواج الکترو مغناطیس تولید می‌کند [۱-۳]. لیزرهای معمولی مانند لیزرهای گازی (به عنوان مثال لیزر CO_2 و یا لیزر *He-Ne*) و لیزرهای جامد (به عنوان مثال لیزر *YAG* : N_d^{+++}) دارای طول موج کاملاً معین هستند [۴] ولی لیزر الکترون - آزاد که از تبدیل انرژی الکترونهای آزاد (غیر مقید) به امواج نوری حاصل می‌شود، محدودیت طول موج معین یا فرکانس ثابت را ندارد. یک نمونه لیزر چاه کوانتمی *(Quantom Well laser)* در شکل ۱-۱ نشان داده شده است.*

---

* - در صورتیکه ضخامت ناحیه فعال *GaAs*، L از $۲۰۰A$ کوچکتر باشد اثرات کوانتمی برای الکترونها و حفرهها آشکار می‌شود و در این حالت است که لیزر را لیزر چاه کوانتمی می‌گویند.

همانگونه که این شکل نشان می‌دهد، در اثر بازترکیب یک الکترون در نوار رسانش $GaAs$ با یک حفره در نوار ظرفیت، یک فوتون با فرکانس ثابت $\nu = E_g / h$ گسیل می‌شود که E_g انرژی گاف نواری *(band gap energy)* و h ثابت پلانک است.

بنابراین فرکانس فوتون گسیل شده مقدار ثابتی است که قابل تغییر نبوده و به ساختار نواری $GaAs$ بستگی دارد.



شکل ۱۰۱ـ ساختار نواری چاه کوانتمی $Ga_{1-x}Al_xAs\ /\ GaAs\ /\ Ga_{1-x}Al_xAs$

دای لیزرها *(Dye lasers)* در ناحیه کوچکی از طیف امواج الکترو مغناطیس قابل تنظیم هستند ولی به دلیل نیاز داشتن به لیزرهای گازی برای *pumping* دارای توان بسیار پائینی هستند. بازدهی تبدیل انرژی در لیزرهای معمولی حدود چند درصد است در صورتیکه برای لیزر الکترون - آزاد، بازدهی در محاسبات نظری ۶۵ درصد و در آزمایشگاه تا ۴۰ درصد بدست آمده است [۱].

مزیت دیگر لیزر الکترون - آزاد توان بالای آن نسبت به لیزرهای معمولی است. در جدول ۱-۱ مقایسه بین لیزر الکترون - آزاد و سایر لیزرها آورده شده است.

	لیزرهای معمولی	لیزرالکترون - آزاد
فرکانس	مقدارمعین بغیر از دای لیزر	تقریباً سراسر طیف نوری
توان	پائین	بالا
بازدهی	نسبتاً پائین	بالا نظری ۶۵٪ درآزمایشگاه تا ۴۰٪

جدول ۱۰۱: مقایسه بین لیزرهای معمولی و لیزر الکترون - آزاد

از نظر تاریخی ماتز *(Matz)* در سال ۱۹۵۱ در دانشگاه استنفورد، اولین کسی بود که توانست طیف تابش ناشی از عبور باریکه الکترونی از یک میدان

مغناطیسی متناوب (از نظر مکانی) را محاسبه کند. ماتز و همکارانش علیرغم اینکه توانستند تابش غیر همدوس در ناحیه سبز - آبی تولید نمایند به دلیل مشکلات فنی نتوانستند نور همدوس تولید کنند. در سال ۱۹۷۵ میدی *(Madey)* و همکارانش باز هم در دانشگاه استنفورد با استفاده از یک ویگلر* مارپیچی *(helical wiggler)* و یک باریکه الکترونی توانستند خروجی یک لیزر CO_2 را در طول موج ۱۰/۶ میکرون تقویت کنند. میدی اولین بار اصطلاح لیزر الکترون - آزاد را بکار برد. در سال ۱۹۸۷ اولین دستگاه لیزر الکترون - آزاد که نور مرئی تولید می‌کرد در دانشگاه پاریس ساخته شد. از این تاریخ به بعد لیزر الکترون - آزاد مورد توجه هر چه بیشتر محققان قرار گرفته و تحقیقات فراوانی به صورت نظری و تجربی در این شاخه از فیزیک انجام شده و می‌شود [۵-۲۳].

۱-۲ سینماتیک بر هم کنش الکترون و فوتون

قبل از بیان سینماتیک بر هم کنش الکترون و فوتون در لیزر الکترون - آزاد لازم است اجزاء اساسی لیزر الکترون - آزاد به صورت مختصر توضیح داده شود. لیزر الکترون - آزاد از دو قسمت اساسی تشکیل شده است:

۱ـ شتابدهنده که دستگاهی است که باریکه الکترونی با انرژی بالا تولید می‌کند. شتابدهنده‌ها شامل انواع مختلفی هستند از جمله: شتابدهنده حلقه

---

*- در لیزر الکترون - آزاد میدان مغناطیسی استاتیک متناوب را ویگلر می‌نامند.

انباشت *(Storage ring)*، شتابدهنده خطی *r.f.* شتابدهنده القایی و شتابدهنده الکترو استاتیک.

توضیحات بیشتر در مورد مشخصات شتابدهندهها، محدوده انرژی و طول موج قابل استفاده برای لیزر الکترون - آزاد را میتوان در مراجع [۱۱،۲۴-۲۹] ملاحظه کرد.

۲ـ میدان مغناطیسی ویگلر که توسط آن انرژی جنبشی الکترونها به موج الکترو مغناطیس منتقل شده، سبب تقویت موج الکترومغناطیس میشود. ویگلرهای مارپیچی *(helical)* و تخت *(planar)* از مهمترین ویگلرها میباشند. ویگلر مارپیچی در اثر عبور جریان از سیم پیچ *(coil)* مارپیچی *bifilar* ایجاد میشود.

در این نوع ویگلر میدان مغناطیسی از محور تقارن به سمت خارج افزایش مییابد و این افزایش میدان عاملی است که از دور شدن الکترونها از محور تقارن در اثر نیروی دافعهٔ بین شان، جلوگیری میکند. ویگلر تخت از آرایهای از آهنرباهای دائمی ساخته میشود و ساخت آن سادهتر و کم هزینهتر از ویگلرهای مارپیچی است. در شکل ۱-۲ یک نمونه لیزر الکترون - آزاد با ویگلر تخت نشان داده شده است.

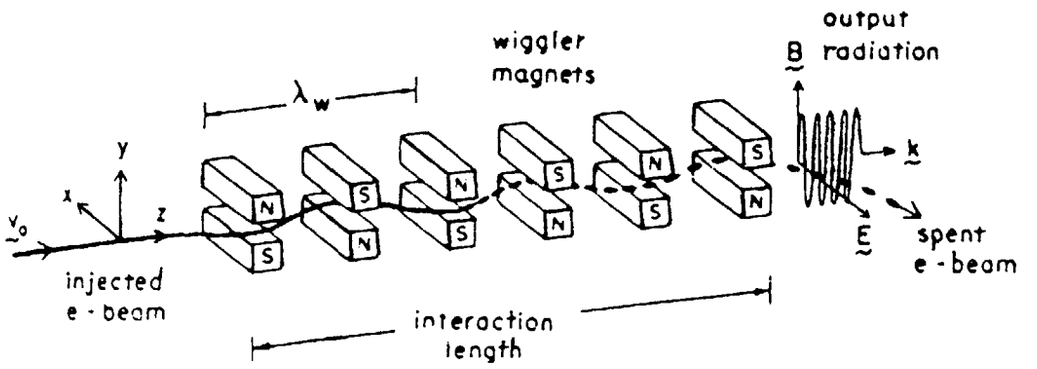
در ویگلر تخت سرعت عرضی و محوری الکترونها نوسانی است که این امر سبب میشود. بهره لیزر الکترون - آزاد با ویگلر تخت نسبت به ویگلر

مارپیچی کمتر باشد. کمتر بودن بهره در لیزر الکترون - آزاد برای ویگلر تخت یک نوع محدودیت برای این نوع ویگلر محسوب می‌شود. قابل تنظیم بودن شدت میدان مغناطیسی و طول موج ویگلر، λ_w مزیت ویگلر تخت است که سبب می‌شود از این نوع ویگلر به راحتی بتوان برای ساخت ویگلرهای باریک شونده *(trapered wiggler)* استفاده کرد. ساخت ویگلر مارپیچی باریک شونده مشکل است و یا به سادگی ویگلر تخت نمی‌باشد. در اینجا توضیح این نکته لازم است که ویگلرهای باریک شونده دارای بازدهی بالاتری نسبت به ویگلرهای معمولی هستند. در مورد ویگلرهای باریک شونده در بخش ۱-۵ توضیح بیشتری داده خواهد شد.

اکنون برهم کنش الکترون و موج الکترو مغناطیس (فوتون) را مورد بررسی قرار می‌دهیم. همانطور که در شکل ۱-۲ مشاهده می‌شود باریکه الکترونی که با سرعت نسبیتی در حال حرکت است از میدان مغناطیسی استاتیک تناوبی، ویگلر، عبور می‌کند. به دلیل حرکت منحنی شکل الکترون در اثر عبور از میدان ویگلر و در نتیجه شتابدار شدن الکترون، تابش الکترو مغناطیس توسط این حرکت شتابدار می‌تواند ایجاد و یا تقویت شود. این عمل وقتی اتفاق می‌افتد که موج نوری میدان مغناطیسی ویگلر را قطع کند. میدان ویگلر که فقط دارای تغییرات فضایی (مکانی) است با میدان الکترو مغناطیس موج نوری

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران

ترکیب می‌شود و موج زنش *(beat wave)* که اساساً یک الگوی تداخلی است را



شکل ۱-۲ یک نمونه لیزر الکترون - آزاد باویگلر تخت، منبع مرجع[۲۹]. میدان معناطیسی دوره‌ای ویگلر توسط آرایه‌ای از آهنرباهای دائمی ایجاد می‌شود. الکترون هنگام عبور از ویگلر با میدان مغناطیسی بر هم کنش می‌کند که این امر سبب تقویت باریکه نور عبوری (و یا نوفه موجود در ناحیه برهم‌کنش می‌شود. طول موج نوری که توسط الکترونها تقویت می‌شود به سرعت الکترونها و طول موج ویگلر، λ_w، بستگی دارد. مقدار حرکت عرضی که توسط ویگلر به الکترونها القا می‌شود میزان تقویت نور را تعیین می‌کند.

ایجاد می‌کند و نهایتاً بر هم کنش بین الکترونها و موج زنش است که می‌تواند سبب تقویت موج نوری شود. موج زنش دارای فرکانس مساوی