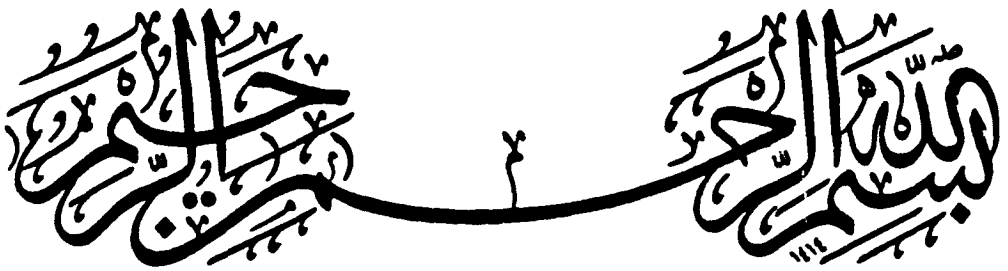
٨١/١٠/١٤



٤٢١٨١

دانشگاه تربیت معلم تهران

دانشکدهٔ علوم-گروه فیزیک

۱۳۸۱ /۷/ ۳۰

پایان نامه

برای دریافت درجهٔ کارشناسی ارشد فیزیک

موضوع:

بررسی چگونگی تولید تابش همدوس در نوسانگر لیزر الکترون آزاد

٤٢١٨١

استاد راهنما :

دکتر حسن مهدیان

استاد مشاور :

دکتر محمد حسین مجلس آرا

نگارش :

ابراهیم حیدری سمیرمی

شهریور ۱۳۸۱

٤٢١٨١

تقدیم به

کسانی که دانش را برای دانستن فرا می‌گیرند

تشکر و قدردانی

سپاس خدای را که توفیق گام نهادن در راه مقدس علم و دانش نصیبم فرمود، و دلم را با نور علم جلا بخشید. در سایهٔ الطاف الهی توانستم از گلستان مطالعات دانش‌پژوهان توشه‌ای گرفته، و از خرمن معلوماتشان خوشه‌ای برچینم. در این راستا از رهنمودهای عالمانهٔ استاد عالی‌قدر و فرزانه جناب آقای دکتر حسن مهدیان بهره‌مند شده‌ام. لازم می‌دانم که نهایت تشکر و امتنان خویش را از محضر ایشان ابراز نمایم.

از استاد گرانقدر جناب آقای دکتر محمدحسین مجلس‌آرا، که مشاوری رساله‌ام را پذیرفته وبا دقت‌نظر استادانه آنرا مطالعه نموده و از نظرات ارزشمندشان مرا بهره‌مند ساخته‌اند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایم.

از اساتید محترم، آقایان دکتر محمود ملاباشی، عضو هیئت علمی دانشگاه علم و صنعت، و دکتر محمد اسماعیل عظیم عراقی که داوری رساله‌ام را به‌عهده گرفتند نهایت تشکر و سپاس را دارم.

تلاشهای اعضای محترم هیئت علمی را که در طول تحصیل در دورهٔ کارشناسی ارشد از محضر ایشان بسیار کسب فیض نمودم ارج نهاده، و از ایشان صمیمانه تشکر و قدردانی می‌کنم.

در پایان از کلیهٔ اساتید محترم و دانشجویان عزیز که در جلسهٔ دفاعیه‌ام حضور یافته و مرا مفتخر گردانیدند، صمیمانه تشکر می‌نمایم.

ابراهیم حیدری سمیرمی

«خلاصه پایان نامه کارشناسی ارشد، رساله دکتری»

دانشکده: علوم ... گروه: فیزیک ... گرایش: ماده چگال

کارشناسی ارشد ☐
دکتری ☐

دانشجو: ابراهیم حیدری ... سال ورود: ۱۳۷۸ ... سال فارغ‌التحصیلی: ۱۳۸۱

استاد راهنما: دکتر حسن مهریان ... استاد مشاور: دکتر محمدحسین مجلس آرا

استاد راهنما: ... استاد مشاور: ...

عنوان: بررسی چگونگی تولید تابش همدوس در نوسانگر لیزر الکترون آزاد

خلاصه:

رسالهٔ حاضر در چهار فصل تنظیم شده است. در فصل اول به معرفی لیزر الکترون آزاد (FEL) پرداخته و شرح مختصری از تکنولوژی، کاربردها، اجزا، تاریخچه و رژیمهای عملکرد FEL ارائه می‌دهیم. در فصل دوم مکانیزم انتقال توان از باریکهٔ الکترونهای نسبیتی به موج الکترومغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی ویگلر را شرح داده، و یک فرمول‌بندی وابسته به زمان برای توصیف اندرکنشهای موجود در یک نوسانگر FEL، که در رژیم بهرهٔ پایین عمل می‌کند، به‌دست می‌آوریم. این فرمول‌بندی شامل معادلات کلاسیکی حرکت برای الکترونهای باریکه و معادلهٔ تحول میدان تابشی در درون ویگلر می‌باشد. در فصل سوم جوابهای معادلات به‌دست آمده در فصل دوم را برای عملکرد نوسانگر FEL در حالتهای تک‌فرکانس به‌دست آورده، و چگونگی تحول مدهای نوسانگر با گذشت زمان را بررسی می‌کنیم.

در فصل چهارم پایداری حالتهای تک‌فرکانس بررسی شده، و رژیمهای پارامتری که در آنها عملکرد تک‌فرکانس پایدار امکان‌پذیر است مشخص خواهند شد. در این فصل مرز بین نواحی پایدار و ناپایدار در صفحهٔ پارامتر را به‌صورت عددی به‌دست می‌آوریم.

مراجع علمی:

[1]- B. Levush and T. M. Jr Antonsen, Nucl. Instr. Meth., A272, 375 (1988).

[2]- B. Levush and T. M. Jr Antonsen, Nucl. Instr. Meth., A285, 136 (1989).

[3]- T. M. Jr Antonsen and B. Levush, Phys. Fluids B, 1, 1097 (1989).

چکیده

رسالهٔ حاضر در چهار فصل تنظیم شده است. در فصل اول به معرفی لیزر الکترون آزاد (FEL) پرداخته و شرح مختصری از تکنولوژی، کاربردها، اجزا، تاریخچه و رژیمهای عملکرد FEL ارائه می‌دهیم. در فصل دوم مکانیزم انتقال توان از باریکهٔ الکترونهای نسبیتی به موج الکترومغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی ویگلر را شرح داده، و یک فرمول‌بندی وابسته به زمان برای توصیف اندرکنشهای موجود در یک نوسانگر FEL، که در رژیم بهرهٔ پایین عمل می‌کند، به‌دست می‌آوریم. این فرمول‌بندی شامل معادلات کلاسیکی حرکت برای الکترونهای باریکه و معادلهٔ تحول میدان تابشی در درون ویگلر می‌باشد. در فصل سوم جوابهای معادلات به‌دست آمده در فصل دوم را برای عملکرد نوسانگر FEL در حالتهای تک‌فرکانس به‌دست آورده، و چگونگی تحول مدهای نوسانگر با گذشت زمان را بررسی می‌کنیم.

در فصل چهارم پایداری حالتهای تک‌فرکانس بررسی شده، و رژیمهای پارامتری که در آنها عملکرد تک‌فرکانس پایدار امکان‌پذیر است مشخص خواهند شد. در این فصل مرز بین نواحی پایدار و ناپایدار در صفحهٔ پارامتر را به‌صورت عددی به‌دست می‌آوریم.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

مقدمه ۱

فصل اول معرفی لیزرهای الکترون آزاد ۵

۱-۱) تعاریف و مقایسه‌ها ٦

۱-۲) تکنولوژی ۱۳

۱-۳) اجزای FEL ۱۵

۱-٤) کاربردها ۱۸

۱-۵) رژیمهای عملکرد FEL ۲۰

۱-۵-۱) رژیم بهرهٔ بالا ۲۰

۱-۵-۲) رژیم رامان ۲۰

۱-۵-۳) رژیم پمپینگ قوی ۲۱

۱-۵-٤) رژیم کامپتون با باریکهٔ گرم ۲۱

۱-۵-۵) رژیم کامپتون با بهرهٔ پایین ۲۲

۱-٦) تاریخچهٔ FEL ۲۳

فصل دوم نوسانگر لیزر الکترون آزاد ۲٦

۲-۱) مکانیزم انتقال توان در ناحیهٔ اندرکنش ۲۷

۲-۱-۱) دینامیک الکترون در میدان ویگلر ۲۸

۲-۱-۲) اندرکنش الکترون با موج الکترومغناطیسی در حضور میدان ویگلر ۲۹

۲-۱-۳) پتانسیل گرانرو ۳۱

۲-۱-٤) شرط تشدید FEL ۳۳

۲-۱-۵) فرآیند تقویت موج ۳۳

۲-۱-٦) فرآیند دسته‌بندی و معادلهٔ پاندول ۳٦

۲-۲) تشدیدکنندهٔ فابری-پرو ٤۳

۲-۳) به‌دست‌آوردن معادلات نوسانگرFEL در رژیم بهرهٔ پایین ٤۸

عنوان **صفحه**

۲-۳-۱) فرمول‌بندی کلی ٤٨

۲-۳-۲) لغزش صفحه، مشخصه‌ها ٥٣

فصل سوم بررسی طیف تابشی حاصل از نوسانگر FEL ٥٩

۳-۱) باریکه‌های تپی و پیوسته ٦٠

۳-۲) بهنجارش معادلات اساسی ٦١

۳-۳) مدهای کاواک ٦٤

۳-٤) معادلهٔ ولاسو برای توصیف مدار الکترونها ٦٩

۳-٥) رژیم خطی ٧١

۳-٦) رژیم غیرخطی و فرآیند اشباع ٧٦

فصل چهارم پایداری حالتهای تک‌فرکانس ٨٤

٤-۱) فرمول‌بندی کلی ٨٥

٤-۲) رژیم بهرهٔ پایین ٩٥

٤-۳) پایداری نسبت به پارامترها ١٠٣

٤-٤) مشاهدهٔ عملکرد تک‌مد پایدار ١٠٦

چکیدهٔ پایان‌نامه ١٠٨

فهرست منابع ١٠٩

مقدمه

لیزر الکترون آزاد[۱] (FEL) یک چشمهٔ نور با قدرت تنظیم بالا است، که می‌تواند یک تابش همدوس با توان زیاد در هر ناحیه از طیف الکترومغناطیسی تولید کند.

در عمل. سه نوع آرایش تجربی برای FEL وجود دارد که عبارتند از:

۱) تقویت کننده

۲) نوسانگر

۳) تقویت کنندهٔ اَبَرتابنده[۲]

تقویت کننده همان طور که از نامش پیداست، یک نور همدوس را که توسط یک چشمهٔ خارجی مناسب مانند لیزر معمولی[۳] یا تیوب ماکروویو[۴] تولید می شود گرفته، و آن را طی یکبار عبور از خود

۱- Free-electron laser

۲- Superradiant amplifier

۳- Conventional laser

۴- Macrowave tube

تقویت می کند. فرآیند تقویت در داخل FEL و در ناحیه ای به نام ناحیهٔ اندرکنش [۱] رخ می دهد. این ناحیه شامل یک دستگاه مغناطیسی به نام ویگلر[۲] است، که در آن یک میدان مغناطیسی به طور فضایی متناوب ایجاد می شود . هنگامی که یک باریکهٔ الکترون پرانرژی حاصل از یک شتابدهنده از درون میدان مغناطیسی ویگلر عبور می‌کند. این باریکه با پرتو نوری که قرار است تقویت شود اندرکنش ایجاد می‌کند، به گونه ای که همواره توان از الکترونهای باریکه وارد پرتو نور شده، و در نتیجه منجر به تقویت نور می‌شود.

در نوسانگرها دو آینه به ترتیب در دو انتهای ناحیهٔ اندرکنش قرار دارند، و باعث انعکاس پی در پی نور می شوند به گونه ای که نور چندین مرتبه از درون ناحیهٔ اندرکنش عبور می کند، و طی هر بار عبور که به طور هم جهت با حرکت الکترونها صورت گیرد تقویت خواهدشد. حتی در صورتی که طی هر بار عبور میزان تقویت نور ناچیز باشد، تقویتها طی تمام عبورها با یکدیگر جمع شده و سرانجام تقویت بزرگی حاصل می شود.

در تقویت کننده های آبَرتابنده، نویز [۳] درون باریکهٔ الکترون، آن هم تنها طی یکبار عبور از ناحیهٔ اندرکنش ، تقویت می شود. نویز، ناشی از بستگی زمانی جریان باریکه و تابع توزیع الکترونهای آن است،

۱- Interaction region

۲- Wiggler

۳- Noise

و در واقع از آثار مربوط به گسستگی بار الکترونهای باریکه می باشد.

بهترین آرایش و نوع شتابدهنده که در یک دستگاه FEL مورد استفاده قرار می گیرد، بستگی به کاربرد ویژهٔ آن دارد . در این رساله ما به توصیف نوسانگر لیزر الکترون آزاد می پردازیم.

این رساله در چهار فصل تنظیم شده است . در فصل اول به معرفی لیزرهای الکترون آزاد پرداخته، و شرح مختصری از تکنولوژی ، کاربردها، اجزا، تاریخچه، و رژیم های عملکرد FEL ارائه می دهیم. در فصل دوم ابتدا مفاهیم اساسی را شرح داده، و سپس با ارائهٔ یک فرمول‌بندی وابسته به زمان برای اندرکنش باریکهٔ الکترون با میدان الکترومغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی ویگلر ، معادلات اساسی حاکم بر نوسانگر FEL را به دست می آوریم.

در فصل سوم جوابهای معادلات حاکم برای عملکرد نوسانگر FEL در حالتهای تک فرکانس بررسی شده، و در آنجا از اثرات نویز چشم پوشی خواهیم کرد. توضیح اینکه در بحث نوسانگرهای با پالس طولانی ، باریکهٔ الکترون با یک جریان و یک تابع توزیع مشخص می شود، که در تحلیل حالتهای تک‌فرکانس هر دوی این پارامترها مستقل از زمان و ثابت فرض می‌شوند. در واقع حالتهای تک فرکانس، جوابهایی از معادلات حاکم هستند که در آنها هیچ یک از کمیتها وابسته به زمان نیست. حال اگر پارامترهای توصیف کنندهٔ باریکه به صورت کاتوره ای [۱] وابسته به زمان باشند، آنگاه نویز خواهیم داشت.

---

[۱]- Random

نویز باعث می شود که تحلیل حالتهای تک فرکانس ، و کلاً آنچه بر پایهٔ پارامترهای مستقل از زمان باریکه به دست می آید کم ارزش شود.

در فصل چهارم پایداری حالتهای تک فرکانس بررسی شده، و رژیمهای پارامتری که در آنها عملکرد تک فرکانس پایدار امکان پذیر است مشخص خواهد شد.

فصل اول

معرفی لیزرهای الکترون آزاد

۱-۱) تعاریف و مقایسه‌ها

۱-۲) تکنولوژی

۱-۳) اجزای FEL

۱-٤) کاربردها

۱-٥) رژیمهای عملکرد FEL

۱-٦) تاریخچهٔ FEL

در سالهای اخیر تحقیقات زیادی در مورد تولید تابش همدوس در نواحی مختلف طیف الکترومغناطیسی، به کمک باریکه های الکترون نسبیتی صورت گرفته است. این موضوع با ساختن مگنترون[1] آغاز شد و با اختراعاتی از قبیل کلیسترون[2] و تیوب موج عبوری[3] ادامه یافت، تا اینکه بین سالهای ۱۹٦۰ تا ۱۹۷۰ کشف لیزرهای مختلف باعث شد که این موضوع کنار گذاشته شود ، اما درحال‌حاضر این موضوع دوباره از سر گرفته شده است. در دهۀ گذشته میزر الکترون- سیکلو ترون[4] (λ از ۱ mm تا ۱ cm) و اخیراً لیزر الکترون آزاد (λ از ۱ mm تا کمتر از $\frac{1}{2}\ \mu$m) به سرعت توسعه پیدا کرده است.

۱-۱) تعاریف و مقایسه ها

در این بخش لیزر الکترون آزاد (FEL) را تعریف کرده ، و آنرا از برخی جنبه ها با لیزرهای معمولی

---

[1]- Magnetron

[2]- Klystron

[3]- Traveling-wave tube

[4]- Electron-cyclotron maser

مورد مقایسه قرار می دهیم.

FEL یک چشمهٔ نور با قدرت تنظیم بالا است، که تابش الکترومغناطیسی را به کمک یک باریکه از الکترونهای نسبیتی از طریق فرآیند گسیل القایی تقویت می کند ، و قادر است تابش همدوس با توان بالایی را در هر ناحیه از طیف الکترومغناطیسی تولید کند.

اگر بخواهیم دقیق تر صحبت کنیم، در FEL الکترونها 'آزاد' نیستند، بلکه تحت اثر نیروهای مغناطیسی که باعث تابش آنها می شوند قرار دارند. با این وجود ، الکترونها را از این لحاظ آزاد می نامیم که برخلاف لیزرهای معمولی، الکترونها درون یک اتم یا مولکول مقید نیستند.

در FEL تابش معمولا توسط عبور الکترون از میان یک دستگاه مغناطیسی تولید می شود. این دستگاه مغناطیسی، که ویگنر یا آندولاتور[۱] نام دارد، شامل یک میدان مغناطیسی است که به‌لحاظ فضایی به طور تناوبی تغییر می کند. در واقع ویگلر یکی از اجزای FEL است که حرکت یکنواخت و بدون تابش الکترونها را به گونه ای تغییر می دهد که بتوانندسرعت عرضی پیدا کنند، و با میدان عرضی موج الکترومغناطیسی تبادل انرژی صورت دهند. میدان مغناطیسی ویگلر ممکن است توسط سیم پیچهای حامل جریان الکتریکی به صورت مارپیچی ایجاد شود، که قادر است الکترونها را در امتداد یک مسیر مارپیچی هدایت کند (شکل ۱-۱).

---

[۱]-Undulator