دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(پلی تکنیک تهران)

دانشکده: مهندسی هسته ای و فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

رشته تحصیلی: فیزیک

عنوان

لیزر الکترون آزاد تقویت کننده تک عبوری با تابش کننده های مجزا

استاد راهنما

دکتر بهروز مراغه چی

دانشجو

لیلا تقی زاده

بسمه تعالی

دانشگاه صنعتی امیر کبیر
(پلی تکنیک تهران)
معاونت پژوهشی

فرم اطلاعات پایان نامه
کارشناسی ارشد و دکترا

تاریخ ..21../..05../..87.....
پیوست .....

نام و نام خانوادگی : لیلا تقی زاده — دانشجوی آزاد ■ بورسیه ☐ معادل ☐

شمارهٔ دانشجوئی : ۸۵۱۱۱۰۱۲ **دانشکده:** مهندسی هسته ای و فیزیک **رشتهٔ تحصیلی :**فیزیک

نام و نام خانوادگی استاد راهنما : بهروز مراغه چی

عنوان پایان نامه به فارسی : لیزر الکترون آزاد تقویت‌کننده تک‌عبوری با تابش کننده‌های مجزا

عنوان پایان نامه به انگلیسی : Single-pass Free Electron Laser with Discrete Radiator

نوع پروژه : کارشناسی ارشد ■ دکتری ☐ — کاربردی ☐ بنیادی ☐ توسعه ای ■ نظری ☐

تاریخ شروع: 86/05/01 **تاریخ خاتمه :** 87/05/20 **تعداد واحد :** 6

واژه های کلیدی به فارسی : لیزرالکترون آزاد–کانال یونی–ویگلر – اشباع

وا ژه های کلیدی به انگلیسی : Free Electron Laser-Ion Channel-Wiggler-Saturation

نظرها و پیشنهادها به منظور بهبود فعالیتهای پژوهشی دانشگاه :

استاد راهنما : بهروز مراغه چی

دانشجو : لیلا تقی‌زاده

امضاء استاد راهنما : **تاریخ :** ۸۷/۵/۲۸

نسخهٔ ۱ : معاونت پژوهشی
نسخهٔ ۲: کتابخانه و به انضمام دوجلد پایان نامه به منظور تسویه حساب با کتابخانه و مرکز اسناد و مدارک علمی

فهرست مندرجات

۱ مقدمه و تاریخچه ۳

۲ مفاهیم اولیه ۹

۲.۱ مفاهیم اولیه‌ی تئوری ۹

۳ بررسی مکانیزم لیزر الکترون آزاد در رژیم خطی ۱۷

۳.۱ تابش خودبخودی الکترون در عبور از میدان مغناطیسی ویگلر ۱۹

۳.۲ اثر میدان الکترومغناطیس تابش بر حرکت الکترون ۲۴

۳.۲.۱ حرکتهای تعادلی ۲۴

۳.۲.۲ بهره سیگنال کوچک ۲۹

۴ بررسی مکانیزم لیزر الکترون آزاد در رژیم غیرخطی ۳۵

۴.۱ لیزر الکترون آزاد با ویگلر مغناطیسی و میدان محوری $B_\circ$ ۳۶
۴.۱.۱ معادلات حاکم بر میدان‌ها ۳۷
۴.۱.۲ معادلات دینامیک ۴۸

۴.۲ لیزر الکترون آزاد با ویگلر مغناطیسی و میدان محوری $B_\circ$ همراه با کانال یونی ۵۶

۴.۳ لیزر الکترون آزاد با ویگلر الکترومغناطیسی و میدان محوری $B_\circ$ و کانال یونی ۶۶

۵ محاسبات عددی، نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۷۷

۵.۱ محاسبات عددی و نتیجه‌گیری ۷۷

۵.۲ پیشنهادات ۸۳

فصل ۱

مقدمه و تاریخچه

به منابع تولید و تقویت امواج همدوس با طول موجهای مادون قرمز، مرئی و ماوراءبنفش لیزر گفته می‌شود. لیزر الکترون آزاد[۱] یک منبع تابش الکترومغناطیسی است که با عبور بیم الکترونی از میدان ویگلر عرضی، تابش همدوس با توان بسیار بالا در ناحیه‌ی وسیعی از طیف الکترومغناطیس ایجاد می‌کند.

اساس کار این نوع لیزرها، الکترون آزاد است که با الکترون‌های مقید در اتم یا مولکول متفاوت است. الکترون در لیزر الکترون آزاد بصورت بیم الکترونی در خلاء است. الکترونهای مقید در اتمها و مولکولها فقط در فرکانسهای خاصی می‌توانند نوسان کنند، بنابراین تابش خروجی لیزرهایی که از این نوع الکترونها استفاده می‌کنند فقط در این فرکانسها ظاهر می‌شود. از طرف دیگر الکترون در لیزر الکترون آزاد، مقید به نوسان در میدان مغناطیسی است. بنابراین فرکانس نوسان توسط شدت دامنه‌ی میدان مغناطیسی و سرعت الکترون قابل تغییر است. این تغییر، سبب تنظیم فرکانس لیزر یا طول موج لیزر می‌شود. تنظیم‌پذیری لیزر الکترون آزاد در محدوده‌ی وسیعی از طول موجها خصوصیت

[۱] Free Electron Laser

برجسته‌ی این نوع از لیزرها است. مانند بسیاری از اختراعات دیگر، لیزر الکترون آزاد به دفعات متعدد، با نامهای مختلف و با پیش‌زمینه‌های مختلف کشف شده است. اولین بار حدود ٦ دهه‌ی پیش مورد توجه قرار گرفت. در سال ۱۹۵۱ هانس موتز[۲] ساختار ویگلر بکار رفته در لیزر الکترون آزاد را پیشنهاد کرد. همچنین به صورت تحلیلی نشان داد که با عبور یک الکترون از میدان مغناطیسی، موج الکترومغناطیسی تقویت می‌شود. مراحل تقویتی که او بیان کرد اساس تئوری مکانیزم لیزر الکترون آزاد بود. در آن زمان خروجی اپتیکی همدوس به خاطر مشکلات ناشی از دسته‌بندی باریکه الکترونی در طول موجهای کوتاه قابل حصول نبود. آزمایشهای انجام شده توسط موتز و همکارانش باعث تولید تابش غیرهمدوس در ناحیه‌ی طیفی آبی—سبز و همچنین تابش همدوس در ناحیه‌ی طول موجهای میلیمتری شد. در سال ۱۹٦۰ امکان وجود منابع امواج مایکروویو بر اساس این مکانیزم توسط فیلیپس نشان داده شد. فیلیپس از ساختار پیشنهادی موتز اما با چگالی بیم الکترونی بالا به نحوی که امواج بار—فضا تحریک می‌شدند استفاده کرد. دستگاه او یوبیترون[۳] نامیده شد که امروزه به آن لیزر الکترون آزاد با ولتاژ پایین گفته می‌شود.[۴] در سال ۱۹۷۱، مدی[۵] یک تحلیل کوانتوم مکانیکی ارائه داد که در آن یک باریکه‌ی الکترونی نسبیتی با جریان پایین از میدان مغناطیسی عبور می‌کرد. در ۱۹۷٦، مدی و همکارانش در استنفورد دستگاه لیزر الکترون آزادی را ساختند که در ناحیه‌ی طیفی

---

۲ Motz Hons

۳ Ubitron

۴ Low-Voltage Free Electron Laser

۵ Madey

مادون‌قرمز در طول موج تقریباμm۱۰کار می‌کرد. در سال ۱۹۷۴ اشپرنگل[۶] تحلیلی از یوبیترون ارائه داد که شامل اثرات جمعی بود و نرخ رشد لیزر الکترون آزاد را در رژیم جمعی رامان در حضور یک میدان مغناطیسی محوری بدست آورد. در ۱۹۷۷ کالسون[۷] نشان داد که رژیم کامپتون بهره پایین می‌تواند به عنوان یک مسئله دینامیکی توسط معادلات آونگ مدل‌سازی شود. معادله‌ی آونگ توسط کولومینسکی[۸] و لبدو[۹] نوشته و تحلیل شد. همچنین احتمال بازگشت دوباره‌ی الکترون به ویگلر جهت افزایش بهره توسط آنها بررسی شد. در ۱۹۷۸ کرال[۱۰] و مک‌مولین[۱۱] نرخ رشد را در رژیم کامپتون بهره‌ی بالا محاسبه کردند. در ۱۹۷۹ مدی تئوری بهره‌ی سیگنال کوچک مربوط به طیف خودبخودی در رژیم کامپتون بهره پایین را منتشر کرد. تحقیقات بعدی انجام شده بر روی لیزر الکترون آزاد عبارت‌اند از مطالعه هدایتگر اپتیکی (مکانیزم خود—همگرایی باریکی الکترونی توسط میدان تابشی)، تحقیق بر روی حضور هماهنگی بالاتر در طیف تابشی لیزر الکترون آزاد که منجر به گسترش بازه‌ی قابل تنظیم لیزر الکترون آزاد به طول موجهای کوتاهتر می‌شود، استفاده از یک میدان مغناطیسی هدایتگر محوری و کانال یونی به منظور همگرایی باریکه‌ی الکترونی و همچنین افزایش بهره سیستم. بدین ترتیب لیزر الکترون آزاد به عنوان وسیله‌ای برای تقویت تابش الکترومغناطیسی همدوس و قابل تنظیم در

---

۶ Sprangle
۷ Colson
۸ Kolomenskii
۹ Lebedev
۱۰ Kroll
۱۱ McMullin

محدوده‌ی وسیعی از طیف تابش [۱۲] معرفی شد. از سال ۱۹۷٦ تاکنون لیزرهای الکترون آزاد، در ساختارهای مختلف، در گستره‌ی امواج ماوراءبنفش مورد استفاده قرار گرفته‌اند که با باریکه‌های الکترونی گرفته شده از شتابدهنده‌های خطی و یا مدور و در پیکربندیهایی به صورت نوسانگر و یا تقویت کننده، تابشی در محدوده‌ی امواج رادیویی تا ماوراءبنفش را بدست داده‌اند و تحقیقات بر روی تابش خروجی اشعه‌ی ایکس تاکنون ادامه دارد.

در لیزر الکترون آزاد، مانند لیزرهای معمولی، الکترونهای با انرژی بالا تابش همدوس گسیل می‌کنند با این تفاوت که در اینجا الکترونها، به جای آنکه همچنان در حالتهای اتمی مقید باشند، در یک باریکه‌ی الکترونی در داخل یک محیط خلاء حرکت می‌کنند. چون الکترونها در لیزر الکترون آزاد، آزادانه جریان می‌یابند طول موج تابشی محدود به گذار میان دو حالت انرژی (و یا دو تراز انرژی) نیست. به زبان مکانیک کوانتمی، الکترونها با گذار میان سطوح پیوسته، انرژی تابش می‌کنند و بنابراین طیف تابشی روی باند وسیعی از فرکانسها قابل حصول خواهد بود. بررسی مکانیزم انجام چنین فرآیندی در داخل لیزر الکترون آزاد توسط تئوری الکترومغناطیس کلاسیک قابل توصیف است.

در این رساله ابتدا به یررسی مفاهیم اولیه‌ی تئوری لیزر الکترون آزاد می‌پردازیم (فصل ۲). سپس در بخش سوم به توصیف مکانیزم لیزر الکترون آزاد در رژیم خطی می‌پردازیم. تابش خودبخودی الکترون در عبور از میدان مغناطیسی ویگلر و اثر میدان الکترومغناطیسی تابش بر حرکت الکترونها را بررسی می‌کنیم. بخش چهار و پنج موضوع

---

۱۲ microwave-xray

اصلی این پایان نامه است که به بررسی مکانیزم لیزر الکترون آزاد در رژیم غیرخطی می‌پردازد. در بخش چهار، در زیربخش اول حل تحلیلی لیزر الکترون آزاد با ویگلر مغناطیسی و میدان محوری $B_\circ$ مورد بحث قرار می‌گیرد. در زیر بخش بعد، به این ساختار کانال یونی اضافه می‌شود و در نهایت کلی‌ترین معادلات حاکم بر لیزر الکترون آزاد با ویگلر الکترومغناطیسی، میدان محوری $B_\circ$ و کانال یونی بدست می آید. بخش پنجم به ارائه‌ی نتایج عددی و نتیجه‌گیری اختصاص یافته است.

فصل ۲

مفاهیم اولیه

۲.۱ مفاهیم اولیه‌ی تئوری

یک باریکه‌ی الکترونی که از میان میدان مغناطیسی موجی[۱] عبور می‌کند تابش غیرهمدوس ایجاد می‌کند. در واقع این مکانیزم گسیل تابش در چشمه‌های نوری سینکروترون مورد استفاده قرار می‌گیرد. به طور معمول از میدان مغناطیسی پریودیک در چشمه‌های نور سینکروترون به عنوان یک موج‌زن [۲] نام برده می‌شود در حالی که میدان مغناطیسی پریودیک در لیزر الکترون آزاد میدان ویگلر[۳] نامیده می‌شود. اگرچه تفاوت اساسی میان این دو وجود ندارد اما در ویگلر، میدان مغناطیسی قوی‌تر و دامنه کمی بزرگتر است. ساختار بیم الکترونی و میدان مغناطیسی ویگلر در لیزر الکترون آزاد در شکل ۱ نشان داده شده است که در آن آرایه‌ای از آهنرباهای دائمی در مقابل همدیگر قرار گرفته‌اند بصورتی که جهت میدان مغناطیسی در چند سانتیمتری عوض می‌شود. بطور معمول طول

---

۱ Undulator Magnetic Field

۲ Undulator

۳ Wiggler

شکل ۲.۱: ساختار بیم الکترونی و میدان مغناطیسی ویگلر

کلی ویگلر در حدود چند متر است که معمولا ۱۰۰ پریود را در بر می‌گیرد. بیم الکترون از یک طرف به ویگلر تزریق می‌شود و در طول ویگلر حرکت می‌کند.

تحت تاثیر میدان متناوب با عبور از ویگلر، الکترونهاحرکت‌های متناوب از خود نشان می‌دهند. اگر به مرجعی برویم که با سرعت میانگین الکترونها حرکت می‌کند، مشاهده می‌کنیم که الکترونها روی یک خط مستقیم عمود بر محور ویگلر به سمت جلو و عقب نوسان می‌کنند. در مرجع متحرک می‌بینیم که تابش گسیلی از الکترون در تمام جهات منتشر می‌شود. اما در مرجع ساکن آزمایشگاه، الکترون با سرعتی نزدیک به سرعت نور حرکت می‌کند و تابش گسیلی به اطراف تا زمانی که الکترون و میدان تابش به انتهای ویگلر نرسیده‌اند، نمی‌تواند از محور ویگلر دور شود.در واقع به نظر می‌رسد تابش همواره در جهت جلو و موازی بیم الکترون حرکت می‌کند. برای یک ناظر ساکن در آزمایشگاه، که به تابشی که به سمت او می آید نگاه می‌کند، فرکانس یک شیفت داپلری[۴] به فرکانس

[۴] Doppler Shift

بالاتر دارد که طول موج کوتاهتر را نتیجه می‌دهد. برای محاسبه‌ی این طول موج ما تابش گسیلی از یک تک الکترون گذرنده از ویگلر با سرعت $v = \beta c$ که c سرعت نور است را مورد بررسی قرار می‌دهیم. الکترون N_w پریود ویگلر را در زمان t طی می‌کند، بنابراین

$$t = \frac{L_w}{v} \qquad (۱)$$

$$L_w = N_w \lambda_w \qquad (۲)$$

L_w طول ویگلر و λ_w طول موج مربوط به یک ویگلر است (فاصله‌ی بین دو قطب همنام در یک جهت). وقتی الکترون به انتهای ویگلر می‌رسد، سر جلو جبهه موج که در ابتدای ویگلر از الکترون گسیل شده است فاصله‌ی ct را پیموده است اما انتهای جبهه‌ی موج دقیقاً در انتهای ویگلر قرار دارد، بنابراین طول بسته موج $(c-v)t$ است. از آنجایی که بسته موج مانند ویگلر از N_w نوسان تشکیل شده است، طول موج لیزر λ_L برابر است با

$$\lambda_L = \frac{(c-v)t}{N_w} = \frac{\lambda_w(۱-\beta)}{\beta} \qquad (۳)$$

برای بیم الکترونی نسبیتی $\beta \simeq ۱$

$$\Longrightarrow \frac{۱-\beta}{\beta} = \frac{۱-\beta^۲}{۲} \qquad (۴)$$

از طرفی $\gamma = \frac{۱}{\sqrt{۱-\beta^۲}}$ که γ انرژی الکترون در واحد انرژی سکون آن است. انرژی سکون الکترون $mc^۲$ است که m جرم سکون الکترون و e بار الکترون است. درنتیجه

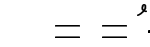
$$\lambda_L = \frac{\lambda_w}{۲\gamma^۲} \qquad (۵)$$

در واقع ما از اثرات حرکتهای پیچشی روی سرعت الکترون درون ویگلر صرفنظر کرده‌ایم. برای میدانهای مغناطیسی قوی، پیچشها می‌توانند بطور موثر مسیر حرکت الکترون درون ویگلر را و در نتیجه طول موج خروجی را افزایش دهند. اگر این اثر را در نظر بگیریم خواهیم داشت

$$\lambda_L = (\frac{\lambda_w}{۲\gamma^۲})(۱ + (\frac{eB_w\lambda_w}{۲\pi mc})^۲) \qquad (٦)$$

که در آن B_w میانگین مجذور مربع مغناطیس القایی است. به طور معمول میدان مغناطیسی به اندازه‌ی کافی بزرگ است تا حرکات پیچشی و تابش الکترون را ماکزیمم و طول موج خروجی کاهش پیدا کند. از آنجایی که بسته موج گسیل شده توسط هر الکترون از تعداد محدودی نوسان، N_w ، تشکیل شده است، فرکانس بصورت غیردقیق تعریف شده است. طیف تابشی مربوط به تبدیل فوریه بسته موج تابشی توسط الکترون است. چون الکترونها بصورت یکنواخت در طول ویگلر تابش می‌کنند، پهنای طیف تابشی از مرتبه‌ی $\frac{۱}{N_w}$ است. ویگلرهای معمول شامل ۱۰۰ پریود هستند بنابراین پهنای طیف تابشی آنها حدود یک درصد است. تابشی که ما در مورد آن صحبت کردیم در لیزرهای قدیمی تابش خودبخودی نامیده می‌شد.

از آنجایی که الکترونها بصورت رندوم در بیم الکترونی گذرنده از ویگلر قرار دارند، امواج گسیل شده از آنها نیز نسبت به یکدیگر فاز رندوم دارند.(شکل ۲) دامنه‌ی میدان مربوط به جمع این امواج با فازهای رندوم با مجذور تعداد الکترونها در بیم متناسب است. شدت اپتیکی یا توان که متناسب با مربع دامنه‌ی میدان است با تعداد الکترونهای بیم و در نتیجه با جریان بیم الکترونی متناسب است. وقتی از این تابش برای تقویت یک تابش



شکل ۲.۲: دسته دسته شدن الکترون ها در اثر برهمکنش با موج تابش سبب گسیل همدوس می‌شود.

ورودی استفاده می‌شود، تابش همدوس می‌شود و پهنای طیفی در مقایسه با لیزرهای قدیمی بسیار کمتر و شدت افزایش می‌باشد. رفتار لیزر الکترون آزاد در ایجاد باریکه‌ی همدوس را می‌توانیم بوسیله‌ی بررسی یک تک الکترون در میدان ویگلر با حضور یک بیم اپتیکی همدوس بررسی کنیم. اگر بیم اپتیکی به موازات الکترون انتشار یابد، میدان الکتریکی عمود بر حرکت الکترون است. در دستگاههای مختصاتی که با سرعت میانگین الکترون حرکت می‌کند، الکترون در راستای عمود بر محور ویگلر نوسان می‌کند، بنابراین حرکت موازی یا پادموازی میدان الکتریکی بیم اپتیکی است. در نزدیکی رزونانس (رابطه۷) فرکانس میدان تابش و الکترون در دستگاه مختصات متحرک یکسان است، بنابراین اگر الکترون و میدان الکتریکی همفاز باشند کاری که میدان روی الکترون انجام می‌دهد منفی است

$$-eE.v < 0 \qquad (۷)$$

بنابراین الکترون انرژی از دست می‌دهد. اگر فرض کنیم الکترونی به اندازه نصف طول موج جلوتر یا عقب‌تر از اولین الکترون است، چون با میدان الکتریکی همفاز نیست از میدان

انرژی می‌گیرد. پس از مدت زمان کوتاهی، الکترونها با انرژی بالاتر به الکترونهای با انرژی کمتر می‌رسند و بیم الکترونی که تا کنون الکترونها به صورت رندوم در آن حضور داشتند، از دسته‌های الکترونی تشکیل می‌شود. امواج تابش شده از الکترونهای رندوم اولیه به صورت دسته دسته در کنار هم قرار می‌گیرند و مجموع دامنه‌ی آنها با تعداد الکترونها متناسب است. شدت تابش که متناسب با مربع دامنه‌ی میدان است، با مربع تعداد الکترونها متناسب است. از آنجایی که تعداد الکترونها زیاد است، معمولا از مرتبه‌ی $۱۰^۸$، در طول بسته موج ناشی از یک تک الکترون تابش همدوس نسبت به تابش غیرهمدوس بسیار قوی‌تر است و شدت آن متناسب با مربع جریان الکترون بیم است. برای تابش غیرهمدوس:

$$I = \sum_j I_j = \sum_j E_j^۲ = NE_j^۲ \qquad (۸)$$

برای تابش همدوس:

$$E \simeq \sum_j E_j = NE_j \qquad (۹)$$

$$I = \sum_j I_j = \sum_j E_j^۲ = N^۲E_j^۲ \qquad (۱۰)$$

نه تنها الکترونها دسته دسته [۵] می‌شوند بلکه دسته‌ها با میدان فرودی همفاز می‌شود. بنابراین تابش گسیلی از الکترونهای دسته شده بصورت همدوس به میدان فرودی افزوده

[۵] Bunch

می‌شود و آنرا تقویت می‌کند. بهره در درژیم بهره‌ی پایین، با جریان بیم الکترونی متناسب است. اگر E میدان الکتریکی لیزر فرودی و e نشان دهنده‌ی تابش گسیلی از الکترونهای بانچ باشد بطوری که $\frac{e}{E} \ll ۱$، در نتیجه میدانی که در داخل ویگلر حضور دارد $E+e$ می‌باشد و شدت میدان برابر است با:

$$(E+e)^۲ = E^۲ + ۲E.e + e^۲ \simeq E^۲ + ۲E.e \qquad (۱۱)$$

و بهره برابر است با

$$g = \frac{E^۲ + ۲E.e}{E^۲} - ۱ = \frac{۲e\cos\phi}{E} \qquad (۱۲)$$

که ϕ فاز بین تابش الکترون و میدان فرودی است. از آنجایی که e متناسب با جریان بیم الکترون است، بهره نیز با جریان بیم متناسب است. برای الکترونی که ابتدا در انرژی رزونانس قرار دارد $\Phi = \frac{\pi}{۲}$ و بهره صفر می‌شود، زیرا الکترون در نصف مسیر شتاب می‌گیرد و در نیمه‌ی دیگر در برهمکنش با میدان، شتابش کاهش می‌یابد بنابراین تغییرات خالص انرژی برابر است. مهمترین مسئله در محاسبه‌ی بهره لیزر، پیدا کردن فاز الکترون است. منبع بیم اپتیکی فرودی در لیزر الکترون آزاد می‌تواند خارجی باشد یعنی از یک لیزر جدا و یا از خروجی خود لیزر الکترون آزاد باشد. اگر منبع از خارج باشد به این نوع لیزر تقویت کننده [۶] و به منبع، نوسانگر اصلی گفته می‌شود. طول موج بیم خروجی برابر با طول موج نوسانگر اصلی است و انرژی الکترون و میدان مغناطیسی باید رابطه‌ی ۷ را ارضا کند. اگر نوسانگر اصلی از لیزرهای قدیمی باشد طول موج به محدوده‌ی خاصی که توسط آن لیزر

[۶] amplifier

تولید می‌شود، محدود است. از طرفی بیم اپتیکی ورودی می‌تواند توسط برگرداندن قسمتی از بیم خروجی به لیزر الکترون آزاد بدست آید. این نوع لیزر در شکل ۱ نشان داده شده است که در آن آیینه‌هایی با بازتاب جزیی برای برگرداندن بیم خروجی به لیزر استفاده می‌شود. به این نوع لیزر، نوسانگر [۷] گفته می‌شود. در این حالت طول موج خروجی هر مقداری می‌تواند داشته باشد، بهره و تقویت ماکزیمم است.

[۷] oscillator

فصل ۳

بررسی مکانیزم لیزر الکترون آزاد در رژیم خطی

لیزر الکترون آزاد از سه قسمت عمده تشکیل شده است:

- بیم الکترونی که توسط شتاب دهنده‌ها شتاب داده می‌شود.
- یک موج الکترومغناطیسی که غالباً یک پرتو لیزر است.
- یک مکانیزم جفت‌کننده که‌معمولاً میدان مغناطیسی یا الکترومغناطیسی می‌باشد.

وقتی بیم الکترونی وارد میدان ویگلر می‌شود تحت اثر میدان، حرکتهای مارپیچ و متناسب با میدان پیدا می‌کند که در اثر این حرکت موجی عرضی پدید می آید که به آن موج ویگلر می‌گویند. از برهمکنش این موج با موج الکترومغناطیسی تابش یک نیروی طولی به سیستم اعمال می‌شود که نیروی پاندروموتیو [۱] نامیده می‌شود. این نیرو به بیم الکترونی وارد می‌شود و سبب دسته دسته شدن الکترونها می‌شود. موج حاصل از این زنش فرکانسی

۱ Ponderomotive Force

برابر با فرکانس موج الکترومغناطیسی دارد و عدد موج آن مجموع عدد موج تابش k_+ و ویگلر k_w است یعنی فاز این موج $((k_+ + k_w)v_z - \omega)t$ می‌باشد. در اثر حضور این موج، الکترونهاتابشهای همدوس با تابش اولیه از خود ساطع می‌کنند و در نتیجه تابش تقویت می‌شود. تقویت این تابش سبب تقویت نیروی پاندروموتیو و در نتیجه دسته دسته شدن دوباره‌ی بیم می‌شود. در واقع مولفه‌های مختلف سیستم بصورت خودسازگار همدیگر را تقویت می‌کنند تا زمانی که دامنه‌ی بیم خروجی به ماکزیمم مقدار خود برسد و اشباع رخ دهد. در بررسی مکانیزم لیزر الکترون آزاد در رژیم خطی به بررسی برهمکنش موج ویگلر و میدان تابش می‌پردازیم و رشد دامنه‌ی میدان تابش را ثابت فرض می‌کنیم اما اگر دامنه‌ی میدان تابش را بصورت تابعی نامعلوم از z، محور عرضی، در نظر بگیریم و برهمکنش‌ها را تا مرحله‌ی اشباع پیگیری کنیم، معادلات ما دربرگیرنده‌ی اثرات غیرخطی خواهند بود و در رژیم غیرخطی مطرح می‌شوند. در این فصل به چند طریق به مکانیزم لیزر الکترون آزاد در رژیم خطی می‌پردازیم. ابتدا نگاهی کوتاه به تابش خودبخودی تک الکترون در عبور از میدان ویگلر می‌پردازیم و رابطه‌ی تابش را بدست می‌آوریم. سپس مسیرهای پایا برای حرکت الکترونها در حضور میدان مغناطیسی پیچشی و میدان محوری را بررسی می‌کنیم و با وارد کردن یک موج الکترومغناطیسی به سیستم و در نظر گرفتن اثرات آن بصورت اختلال کوچک بر مدارهای حرکت الکترونها، در مورد تعادل و پایداری این مدارها بحث می‌کنیم و بهره را محاسبه می‌کنیم.