٣٥١٨٤

دانشگاه تربیت معلم تهران

دانشکدهٔ علوم-گروه فیزیک

۱۳۸۰ /۶/ ۲۰

مرکز اطلاعات علمی ...
تهیه شده در ...

پایان‌نامه :

جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد رشتهٔ فیزیک

موضوع :

بررسی مسیر الکترون در میدان ویگلر لیزر الکترون آزاد

013213

استاد راهنما :

جناب آقای دکتر حسن مهدیان

استاد مشاور :

جناب آقای دکتر صمد سبحانیان

نگارش :

ناصر اصغری مرجانلو

سال تحصیلی : ۸۰-۱۳۷۹

۳۶۱۸۴

تقدیم به

روح پدرم

که هنوز خلاء وجودش را با تمام وجود حس می کنم

و به مادرم

که امید و نشاط زندگیم است

و به خواهرم ف- اصغری

که خوشبختی و سعادت او آرزویم است

تقدیر وسپاس

خداوند منان را شاکرم که بر این بنده حقیر و فقیرش منت نهاد و بر او توفیق عطا فرمود تا قدمی هر چند کوچک در راه اعتلاء علمی خود بردارد

قطره دانش که بخشیدی زپیش متصل گردان به دریاهای خویش

برخود وظیفه میدانم از استادان ارجمندم آقای دکتر حسن مهدیان ، استاد راهنما و آقای دکتر صمد سبحانیان ، استاد مشاور و از آقای مهدی اسماعیلی بخاطر ارائه راهنماییهای مفیدشان و از همکاری صمیمانه آقای دکتر محمد حسین مجلس آرا و از زحمات سرکار خانم حلوائیان صمیمانه سپاسگزاری کنم .

مزید توفیق این عزیزان را از درگاه ایزد متعال خواهانم .

ناصر اصغری - تیر ماه ۸۰

فـهرست

عنوان — صفحه

فصل ۱

آشنایی با اساس کارلیزر الکترون آزاد

۱-۱- مفهوم لیزر الکترون آزاد ۱

۱-۲- شرط تشدید لیزر الکترون آزاد ۴

۱-۳- اجزای اساسی یک لیزر الکترون آزاد ۸

۱-۳-۱- ویگلرها ۹

۱-۳-۲ ویگلر تخت ۹

۳۱-۳- ویگلر مارپیچی ۱۰

۱-۳-۴- ویگلر باریک شونده تخت یا مارپیچی ۱۰

۱-۳-۵- ویگلرهای واقعی و ایده‌آل ۱۱

۱-۴- نگاهی گذرا به تاریخچه‌ی لیزر الکترون آزاد ۱۲

۱-۵- چشم انداز آینده‌ی لیزر الکترون آزاد ۱۳

فصل ۲

بررسی مسیر الکترن در میدان ویگلر مارپیچی

۲-۱- رابطه میدان مغناطیسی ویگلر مارپیچی واقعی و ایده‌آل ۱۵

۲-۲- معادله حرکت الکترون ۱۷

۲-۲-۱- مسیر الکترون در میدان ویگلر مارپیچی ایده‌آل ۱۸

۲-۲-۲- مسیرهای الکترون در میدان ویگلر مارپیچی ایده‌آل با حضور میدان محوری ۲۰

۲-۳- حل معادلات دیفر انسیل حرکت برای حالت پایا و بررسی پایداری جوابها ۲۲

۲-۴- محاسبه سرعتهای محوری و عرضی الکترون در مدارهای پایا ۲۶

۲-۵- اثر جرم منفی ۳۰
۲-۶- حل کامل معادلات دیفرانسیل حرکت (در چارچوب ویگلر) ۳۲
۲-۷- حل معادلات دیفرانیسل حرکت در نزدیکی حالت پایا ۳۷
۲-۸- بررسی مسیر الکترون در یک ویگلر مارپیچی واقعی ۴۰
۲-۸-۱- معادلات مسیر الکترون در میدان ویگلر مارپیچی واقعی (در چارچوب ویگلر) ۴۰
۲-۸-۲- حل معادلات دیفرانسیل حرکت برای «حالت پایا» ۴۳
۲-۸-۳- محاسبه سرعت محوری و عرضی الکترون برای حالت پایا در ویگلر واقعی ۴۵
۲-۸-۴- بررسی پایداری مدارهای حالت پایا ۴۷
۲-۹- اثر جرم منفی ۵۲
۲-۱۰- نوسانات بتاترون و لارمو مسیرهای واقعی ۵۵

فصل ۳

بررسی مسیر الکترون در میدان ویگلر تخت ایده‌آل و واقعی

۳-۱- معادله میدان مغناطیسی ویگلر تخت ایده‌آل ۶۲
۳-۱-۱- معادلات مسیر الکترون در ویگلر تخت ایده‌آل ۶۳
۳-۱-۲- معادلات مسیر الکترون در ویگلر تخت ایده‌آل با حضور میدان محوری ۶۴
۳-۱-۳- حل معادلات مسیر برای حالت «شبه پایا» ۶۵
۳-۱-۴- محاسبه سرعت متوسط محوری برای حالت شبه پایا ۶۶
۳-۱-۵- اثر جرم منفی برای مدارهای شبیه پایا ۶۹
۳-۲- بررسی مسیر الکترون در ویگلرهای تخت واقعی (با قطبهای تخت) ۷۲
۳-۲-۱- معادلات حرکت الکترون در میدان ویگلر تخت واقعی ۷۲
۳-۲-۲- حل تقریبی معادلات دیفرانسیل حرکت ۷۳
۳-۳- ویگلرهای تخت واقعی با قطبهای با سطوح سهموی ۷۷

«خلاصه پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رساله دکتری»

دانشکده: علوم گروه: فیزیک گرایش: حالت جامد

کارشناسی ارشد ☒
دکتری ☐

دانشجو: ناصر اصغری مرجانلو سال ورود ۷۷ سال فارغ‌التحصیلی ۸۰

استاد راهنما: آقای دکتر حسن عبدیان استاد مشاور: آقای دکتر صمد بهمیان

استاد راهنما: ــــ استاد مشاور: ــــ

عنوان: بررسی مسیر الکترون در میدان ویگلر لیزر الکترون آزاد

خلاصه:

این پایان نامه شامل سه فصل میباشد . در فصل اول اساس کار لیرز الکترون آزاد را به اختصار بررسی کرده و اشاره ای گذرا به تاریخچه لیزر الکترون آزاد و چشم انداز آینده آن میشود . همچنین در این فصل ویگلر و انواع آن معرفی میشود . در فصل ۲ مسیر الکترون در میدان ویگلر مارپیچی (ایده آل و واقعی) ودر فصل ۳ مسیر الکترون درمیدان ویگلر تخت (ایده آل و واقعی) مورد بررسی قرار میگیرد . روش کار به این ترتیب است که ابتدا معادله میدان ویگلر (واقعی) را به کمک حل معادله لاپلاس بدست آورده سپس این میدان بدست آمده را برای حالت ایده آل (حالتی که باریکه الکترون خیلی نزدیک به محور تقارن ویگلر حرکت میکند) تقریب می زنیم . بعد معادلات مسیر الکترون در میدان ویگلر مارپیچی و تخت (ایده آل و واقعی) را بدست آورده و این معادلات را برای حالت پایا (ویگلر مارپیچی) و حالت شبه پایا (ویگلر تخت) حل کرده و شرط پایداری جوابهای حالت پایا را بررسی می کنیم.

در میدان ویگلر مارپیچی (واقعی و ایده آل) مسیرهای حالت پایا و در ویگلر تخت (ایده آل) مسیرهای حالت شبه پایا به دو گروه I و II تقسیم بندی میشوند مدارهای گروه II برای ویگلر مارپیچی (ایده آل) همواره پایدارند ولی مدارهای گروه I به دسته های پایدار و ناپایدار تقسیم میشوند و برای مدارهای گروه II مسیرهای "رژیم جرم منفی " معرفی میشود .

برای دو ویگلر تخت و مارپیچی (ایده آل) سرعت محوری الکترون بازای یک انرژی و دامنه ویگلر یکسان مقایسه میشود . همچنین برای ویگلر تخت واقعی با قطبهای مسطح حداکثر ضخامت مجاز باریکه الکترون محاسبه شده و در نهایت میدان ویگلر تخت واقعی با قطب سهموی شکل برای جلوگیری از واگرایی باریکه الکترون پیشنهاد شده است .

مراجع

[1] - H.P. Freund and T.M. Anstonsen, Principles of Free Electron Laser (Champan and Hall, NewYork, 1996)

[2] - Amnon Yariv, Quantum Electronics (Wilely, New York, 1989). P. 281.

[3] Paul Diament, Phys. Rev. A, 23, 2539 (1981)

چکیده پایان نامه :

این پایان نامه شامل سه فصل میباشد . در فصل اول اساس کار لیزر الکترون آزاد را به اختصار بررسی کرده و اشاره ای گذرا به تاریخچه لیزر الکترون آزاد و چشم انداز آینده آن میشود . همچنین در این فصل ویگلر و انواع آن معرفی میشود . در فصل ۲ مسیر الکترون در میدان ویگلر مارپیچی (ایده آل و واقعی) ودر فصل ۳ مسیر الکترون درمیدان ویگلر تخت (ایده آل و واقعی) مورد بررسی قرار میگیرد . روش کار به این ترتیب است که ابتدا معادله میدان ویگلر (واقعی) را به کمک حل معادله لاپلاس بدست آورده سپس این میدان بدست آمده را برای حالت ایده آل (حالتی که باریکه الکترون خیلی نزدیک به محور تقارن ویگلر حرکت میکند) تقریب می زنیم . بعد معادلات مسیر الکترون در میدان ویگلر مارپیچی و تخت (ایده آل و واقعی) را بدست آورده و این معادلات را برای حالت پایا (ویگلر مارپیچی) و حالت شبه پایا (ویگلر تخت) حل کرده و شرط پایداری جوابهای حالت پایا را بررسی می کنیم.

در میدان ویگلر مارپیچی (واقعی و ایده آل) مسیرهای حالت پایا و در ویگلر تخت (ایده آل) مسیرهای حالت شبه پایا به دو گروه I و II تقسیم بندی میشوند مدارهای گروه II برای ویگلر مارپیچی (ایده آل) همواره پایدارند ولی مدارهای گروه I به دسته های پایدار و ناپایدار تقسیم میشوند و برای مدارهای گروه II مسیرهای "رژیم جرم منفی " معرفی میشود .

برای دو ویگلر تخت و مارپیچی (ایده آل) سرعت محوری الکترون بازای یک انرژی و دامنه ویگلر یکسان مقایسه میشود . همچنین برای ویگلر تخت واقعی با قطبهای مسطح حداکثر ضخامت مجاز باریکه الکترون محاسبه شده و در نهایت میدان ویگلر تخت واقعی با قطب سهموی شکل برای جلوگیری از واگرایی باریکه الکترون پیشنهاد شده است .

فصل اول
آشنایی با اساس کار لیزر الکترون

۱-۱ ـ مفهوم «لیزر الکترون آزاد»

لیزر الکترون آزاد[1] از انتقال انرژی جنبشی یک باریکه الکترون (نسبیتی) به امواج الکترومغناطیس در یک میدان مغناطیسی دوره‌ای (از نظر فضایی) بوجود می‌آید. صفت «آزاد» به این معنی است که در تولید این نوع لیزر، الکترونها به ترازهای اتمی یا مولکولی مقید نیستند و به صورت باریکه‌ای الکترونی آزادانه حرکت می‌کنند. که وارد میدانهای مغناطیسی خارجی ویگلر و محوری شده و این میدانها باعث تابش آنها می‌گردد. بخاطر آزاد بودن الکترونها، طول موجی که تابش می‌کنند به گذارهای بین ترازهای انرژی مجزا محدود نمی‌شود به زبان مکانیک کوانتومی ، الکترونها در اثر گذار بین ترازهای انرژی پیوسته، یک گسترهٔ وسیعی از فرکانس‌ها را ، برخلاف لیزرهای معمولی ، تابش می‌کنند.

لیزر الکترون آزاد بر اساس «تابش موج الکترون مغناطیسی به وسیلهٔ ذرهٔ باردار شتاب دار» تولید می‌شود بنابراین برخلاف لیزرهای معمولی که به وسیلهٔ مکانیک کوانتومی توضیح داده می‌شوند، این لیزرها را می‌توان صرفاً به کمک «نظریه الکترومغناطیسی کلاسیک» توضیح داد؛ اگر چه تحت شرایطی در این لیزرها نیز باید محاسبات مکانیک کوانتومی بکار برده شود.

نور این نوع لیزر در اثر برهم کنش میان سه عامل زیر تولید می‌شود:

۱- باریکه الکترون همدوس؛[2] ۲- موج الکترو مغناطیس که در همان جهت حرکت الکترونها در کاواک[3] لیزر حرکت می‌کند؛ ۳- یک میدان مغناطیسی که در فضا دوره‌ای (پریودیک) است و اصطلاحاً

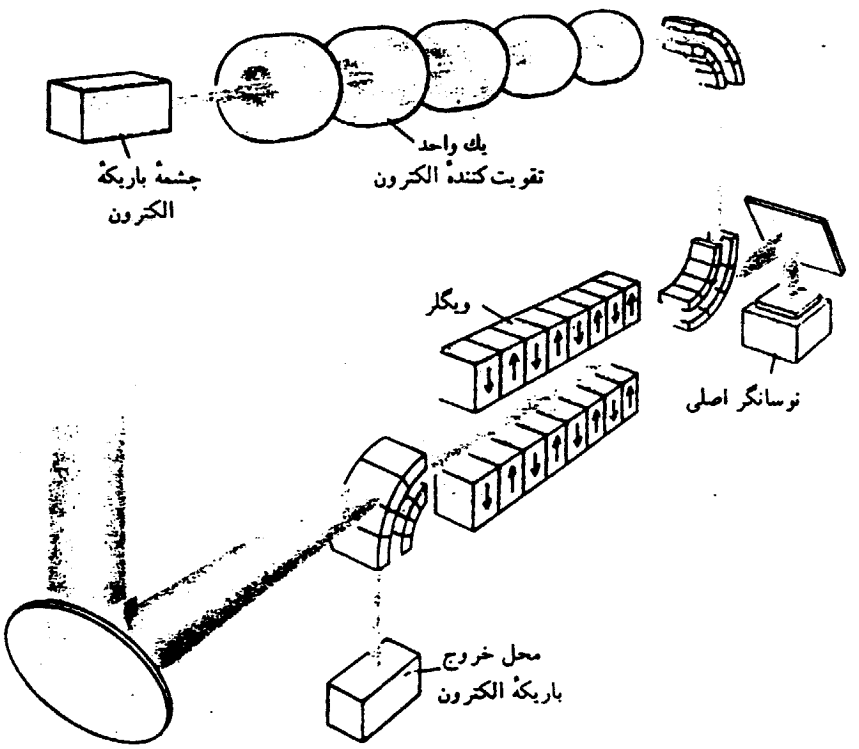
1- Free electron laser

2- Coherent

3- Cavity

«ویگلر»[1] یا «آندولاتور»[2] نامیده می‌شود.

وقتی که الکترونها وارد میدان ویگلر می‌شوند یک حرکت موجی پیدا می‌کنند و شتاب ناشی از این مسیر منحنی الخط باعث تابش الکترونها می‌شود. در این فرآیند، الکترونها به موج الکترومغناطیسی انرژی می‌دهند و این انرژی باعث تقویت موج ورودی شده و در نهایت به صورت نور لیزر گسیل می‌شود. قابل تنظیم بودن خروجی لیزر الکترون آزاد چنانچه بعداً محاسبه خواهیم کرد از آنجا ناشی می‌شود که طول موج تابش به دست آمده از برهم کنش این سه عامل، به وسیلهٔ دورهٔ میدان ویگلر (λ_w) و انرژی باریکه الکترون (γ) تعیین می‌شود. در شکل (۱-۱) طرحی از یک لیزر الکترون آزاد با میدان ویگلر تخت آمده است.



شکل (۱-۱)

1- Wiggler

2- Undulator

یک باریکه الکترونی که در یک میدان مغناطیسی آندولاتوری حرکت می‌کند تابش غیر همدوس گسیل می‌کند بنابراین برای تولید گسیل القایی همدوس در لیزر الکترون آزاد می‌بایست که باریکه الکترون از دسته‌های همدوس[۱] تشکیل شوند.

وقتی که موج نور از میان میدان مغناطیسی ویگلر می‌گذرد تغییرات فضایی میدان ویگلر و موج الکترومغناطیسی ترکیب می‌شوند و یک موج زنش بوجود می‌آید که اساساً نقش تداخل این دو موج است. برهم کنش بین الکترونها و این موج زنش است که گسیل القایی در لیزر الکترون آزاد را بوجود می‌آورد. بسامد موج زنش با بسامد موج نور یکی است ولی عدد موجش برابرمجموع عدد موج‌های میدانهای ویگلر و الکترومغناطیسی است. با بسامد یکسان ولی عدد موج بزرگتر (و بنابراین طول موج کوچکتر) موج زنش آهسته تر از موج نور حرکت می‌کند؛ به این دلیل به آن «موج گرانرو»[۲] گفته می‌شود.

از آنجائی که موج گرانرو ترکیبی از موج نور و میدان ساکن ویگلر (مغناطواستاتیک) است، بنابراین این همان میدان مؤثری[۳] است که بر الکترون، هنگام عبور از کاواک لیزر الکترون آزاد، اثر می‌کند.

بعلاوه از آنجائی که موج گرانرو با سرعتی کمتر از سرعت نور در خلاء ، انتشار می‌یابد می‌تواند با الکترونهایی که سرعت آنها به سرعت موج گرانرو محدود می‌شود در همگامی[۴] باشد.

اگر الکترونی با سرعت، $\vec{V}$، با یک موج الکترومغناطیسی رونده با میدان الکتریکی، $\vec{E}(\vec{r},t)$ و میدان مغناطیسی $\vec{B}(\vec{r},t)$ برهم کنش کند؛ در این صورت آهنگ تغییر انرژی الکترون به وسیلهٔ معادله [۲]

$$mc^{2}\frac{d\gamma}{dt} = -e\vec{v}.\vec{E}(\vec{r},t) \qquad (۱-۱)$$

1- Coherent bunches

2- Ponderomotive wave

3- Effective field

4- Synchronism

داده می‌شود که در آن، m، جرم سکون الکترون و، e ، بار الکترون و $\gamma \equiv (1-\frac{v^2}{c^2})^{-\frac{1}{2}}$.

برای اینکه بین الکترون و یک میدان ، $\vec{E}(\vec{r},t)$ ، تبادل انرژی صورت بگیرد، باید سرعت الکترون ، $\vec{V}$، یک مولفهٔ غیر صفر در امتداد ، $\vec{E}$، داشته باشد.

در مورد یک موج الکترومغناطیسی تخت که در راستای ، Z، منتشر می‌شود، $E_z = 0$ و مثلاً $E_x \neq 0$، بنابراین سرعت الکترون باید یک مولفهٔ ، v_x، داشته باشد.

۱-۲ ـ شرط تشدید لیزر الکترون آزاد

اگر محور Z، نشان دهندهٔ جهت حرکت جمعی الکترونها و نیز محور تقارن میدان ویگلر باشد و ، V_z، سرعت الکترونها در امتداد محور Z باشد؛ در این صورت از آنجایی ، $V_z < C$، بنابراین الکترون نسبت به موج عقب خواهد افتاد و علامت، $\vec{V}.\vec{E}$، تغییر خواهد کرد؛ این تغییر علامت هر $(\frac{\frac{1}{2}\lambda}{C-V_z})$ ثانیه اتفاق می‌افتد که در آن λ، طول موج تابش است. به طوریکه تبادل خالص انرژی بین الکترون و باریکه نور به طور متوسط صفر خواهد شد.

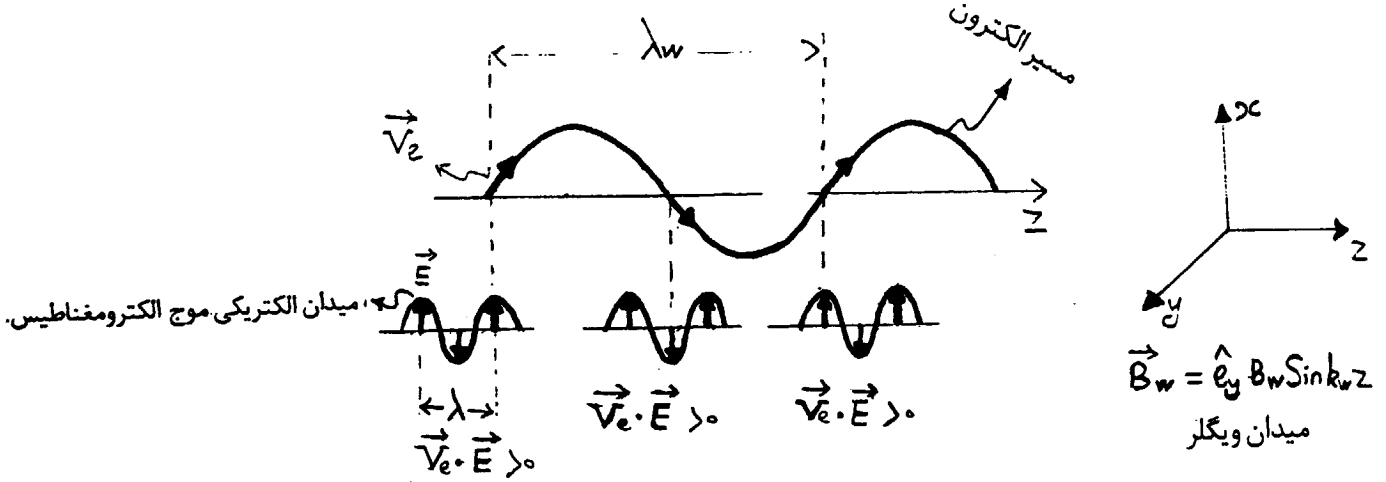
یک راه حل مسأله این است که الکترون را وادار کنیم هر، $(\frac{\frac{1}{2}\lambda}{C-V_z})$، ثانیه و یا به عبارت دیگر در هر فاصله $(\frac{\frac{1}{2}\lambda V_z}{C-V_z})$، سرعت عرضی‌اش را تغییر دهد به طوریکه الکترون همواره در جهت یکسانی نسبت به میدان تابش حرکت کند در نتیجه همواره، $\vec{V}.\vec{E} > 0$ ، خواهد بود، این عمل می‌تواند با بکار بردن یک میدان مغناطیسی عرض دوره‌ای در فضا (با دورهٔ λ_w) و ثابت نسبت به زمان، حاصل شود بشرطی که دورهٔ میدان (ویگلر) در رابطه زیر صدق کند.

$$\lambda_w = \frac{\lambda}{C-V_z} V_z \qquad (۱-۲)$$

رابطهٔ (۱-۲) شرط تشدید لیزر الکترون آزاد نامیده می‌شود که می‌تواند به صورت زیر نوشته شود.

$$\lambda = \frac{1-\frac{V_z}{C}}{\frac{V_z}{C}}\lambda_w \qquad (۱-۳)$$

شرط تشدید یک الکترون که از میدان مغناطیسی عرض دوره‌ای (ویگلر) عبور می‌کند، با حضور یک موج الکترومغناطیسی تخت با طول λ در شکل (۱-۲) نشان داده شده است.



شکل (۱-۲)

برای الکترونهای نسبیتی، $\frac{V_z}{C} \simeq 1$ و رابطه (۱-۳) به صورت زیر در می‌آید.

$$\lambda = \frac{\lambda_w}{2\gamma_z^2} \qquad (۱-۴)$$

که آنجا $\gamma_z \equiv [(1-\frac{V_z}{c^2})]^{-\frac{1}{2}}$ و λ_w دورهٔ ویگلر و، λ طول موج تابش خروجی لیزر الکترون آزاد می‌باشد.

با توجه به رابطه (۱-۴) ملاحظه می‌شود که طول موج تابش خروجی با دورهٔ ویگلر نسبت مستقیم و با مجذور انرژی الکترون نسبت عکس دارد؛ این کمیت‌های قابل تنظیم اجازه می‌دهند خروجی لیزر الکترون آزاد در سرتاسر طیف الکترو مغناطیس عمل کند.

برای بدست آوردن رابطه بین انرژی کل الکترون (γ) و انرژیی که به وسیلهٔ حرکت الکترونها در امتداد محور Z، جریان دارد (γ_z) می‌توان نوشت.

$$\frac{V_z}{c^2} + \frac{V_w^2}{c^2} = 1-\gamma^{-2} \qquad (۱-۵)$$

که در آنجا، V_w، سرعت عرضی القاء شده بوسیله ویگلر می‌باشد. در فصل (۲) نشان داده می‌شود که این سرعت برای ویگلر متقارن مارپیچی ایده‌آل به صورت زیر می‌باشد.

$$\frac{v_w}{c} = \frac{e}{2\pi mc^2}\,\frac{B_w\lambda_w}{\gamma} \cong 0/934\,\frac{B_w\lambda_w}{\gamma} \qquad (۱-۶)$$

که در آنجا، λ_w، بر حسب سانتی متر و، B_w، دامنه میدان ویگلربر حسب تسلا و، $\gamma \equiv 1+\frac{K}{mc^2}$، و، K، انرژی جنبشی الکترون می‌باشد.

از رابطه (۱-۵) بلافاصله نتیجه می‌شود.

$$\gamma_z^2 = \frac{\gamma^2}{\left(1+\gamma^2\frac{V_w^2}{c^2}\right)} \qquad (۱-۷)$$

حال اگر رابطه (۱-۶) را در رابطه (۱-۷) بکار ببریم به دست آید.

$$\gamma_z = \frac{\gamma}{\left(1+0/8722\,B_w^2\lambda_w^2\right)^{\frac{1}{2}}} \qquad (۱-۸)$$

با استفاده از رابطه (۱-۸) در رابطه (۱-۴) به دست می‌آید.

$$\lambda = \left(1+0/8722\,B_w^2\lambda_w^2\right)\frac{\lambda_w}{2\gamma^2} \qquad (۱-۹)$$

که این رابطه، بستگی بین طول موج تشدید (λ) با انرژی کل الکترون (γ) و دامنه میدان ویگلر (B_w) و دوره‌ی ویگلر (λ_w) را نشان می‌دهد.

در یک پیکر بندی نوعی لیزر الکترون آزاد با λ_w=۵cm و B_w = ۰/۳ T، طول موج تابش خروجی برای سه مقدار متفاوت انرژی الکترون به صورت زیر می‌باشد.

انرژی الکترون (Mev)	۱۰	۱۰۰	۱۰۰۰
$\lambda(\mu m)$	۱۷۴	۱/۹۰۶	۰/۰۱۹۲

یک موج تشدیدی باید دارای پلاریزاسیون دایره‌ای، با بردار پلاریزاسیون عمود بر سرعت عرضی و میدان ویگلر بوده و همزمان[1] با الکترونها بچرخد. این همزمانی در شکل (۱-۳) برای یک ویگلر مارپیچی نشان داده شده است؛ که این همزمانی به وسیله شرط تشدیدی که قبلاً گفته شد حفظ می‌شود. در نزدیکی تشدید با موج گرانرو، اگر سرعت الکترونها کمی از سرعت فاز موج گرانرو، بیشتر باشد الکترونها به موج انرژی میدهند و در حالت عکس، از موج انرژی می‌گیرند؛ بنابراین تقویت موج زمانی اتفاق می‌افتد که موج گرانرو نسبت به باریکه الکترون عقب بیافتد.

1- Synchronsim