

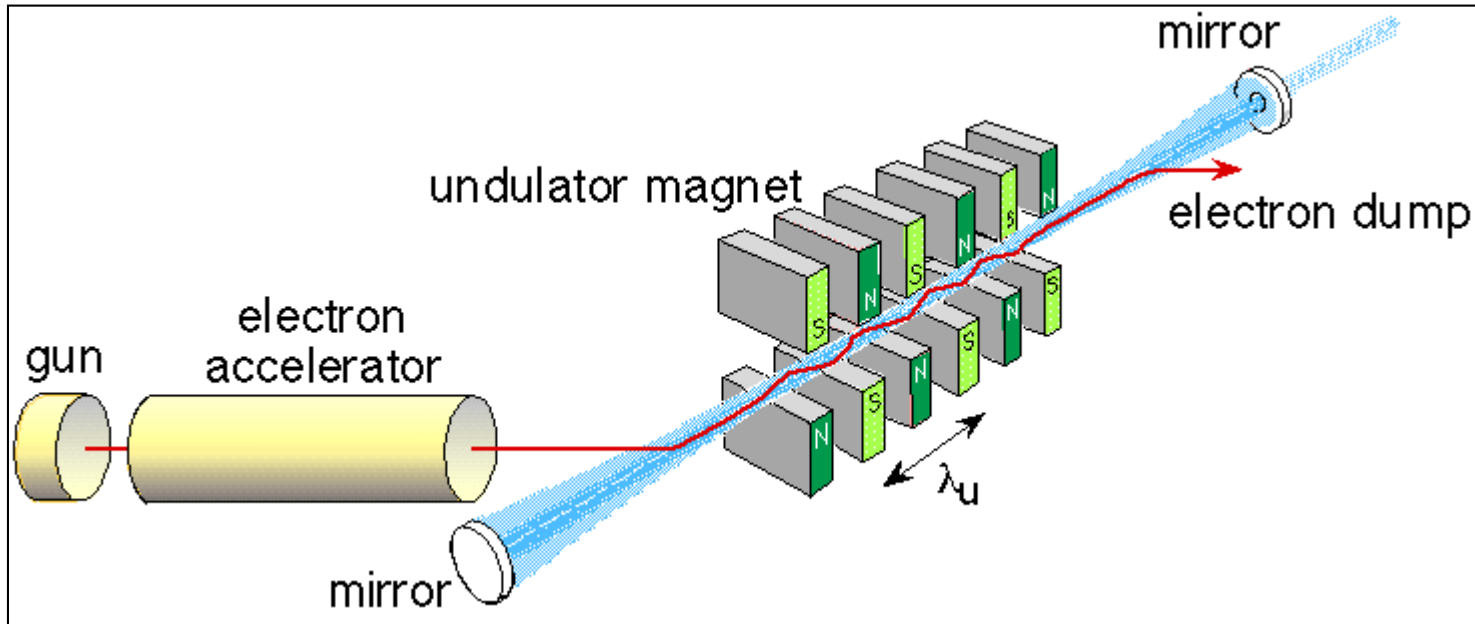


لیزرهای الکترون آزاد

لیزرهای الکترون آزاد (Free Electron Lasers)

- FELها از یک پرتو الکترونی همدوس که آزادانه در یک میدان مغناطیسی متناوب حرکت می کنند مانند یک لیزینگ متوسط استفاده می کنند از این رو به این لیزرها الکترون آزاد گفته می شود.
- چون عمل لیزینگ را از طریق ارسال الکترون ها به درون مجموعه ای از مغناطیس ها و در محیط خلا انجام می دهد، محدودیت لیزرهای معمولی در طول موج و توان تولیدی را ندارند.
- تولید توان بالا و قابلیت تنظیم در فرکانس های مختلف دو ویژگی مهم این لیزرها می باشد.
- لیزر الکترون آزاد برای کشف نواحی نا شناخته طیف ایده آل است چون در رنج وسیعی از طیف قابل تنظیم است.
- در لیزرهای الکترون آزاد ، علت تشعشع انرژی الکترومغناطیسی ، شتاب الکترون ها در میدان متناوب است. نمونه مشابه برای چنین تشعشعی ، تشعشع سیکروترون الکترون هایی است که در یک میدان مغناطیسی حرکت دایره ای انجام می دهند. در لیزر الکترون آزاد ، الکترون ها مجبورند در جهت عرضی X یا Y حرکت موجی انجام دهند، در حالیکه با سرعت های نسبی در جهت محور اصلی Z حرکت می کنند.

ساختار لیزر الکترون آزاد

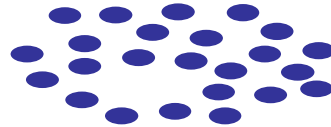


الکترون‌ها از منبع در سمت چپ تصویر رها می‌شوند و توسط یک شتابدهنده‌ی خطی شتاب می‌گیرند. بعد از خروج از شتابدهنده‌ی خطی الکترون‌ها به درون کاواکی که در مرکز آن یک نوسانساز دارد فرستاده می‌شوند. نوسانساز سبب نوسان الکترون‌ها و انتشار نور می‌شود. همین نور سبب تحریک بیشتر الکترون‌ها می‌شود.

عناصر اصلی FEL

(۱) پرتو الکترونی

برای ساخت یک FEL به پرتو الکترونی پرشتاب برای رسیدن به سرعت‌های نسبیتهی نیاز است. این الکترون‌ها با عبور از یک میدان مغناطیسی متناوب مجبور به حرکت سینوسی می‌شوند و شتاب آن‌ها سبب تولید فوتون می‌شود. ناپایداری به وجود آمده در پرتو الکترونی ناشی از واکنش‌های میان نوسانات الکترون‌ها در نوسانساز و تابش آن‌ها، سبب خوشه‌ای شدن الکترون‌ها می‌شود و این امر ادامه می‌یابد تا تابش همفاز به وجود آید.

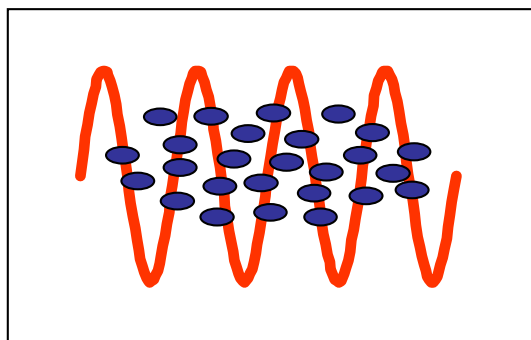
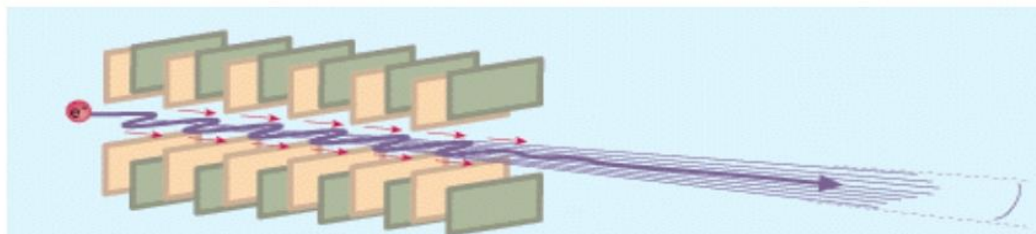


(۲) شتاب دهنده‌ها

امروزه یک لیزر الکترون آزاد به یک شتابدهنده‌ی الکترونی به همراه پوشش مخصوص آن نیاز دارد. این شتابدهنده‌ها به وسیله‌ی کلایسترون‌ها (Klystrons) تغذیه می‌شوند، که خود به ولتاژ تغذیه‌ی زیادی نیاز دارند.

۳) نوسانساز

یک نوسانساز FEL یا میدان مغناطیسی با قرار دادن مغناطیس های باقطب متغیر پدید آمده است. این آرایه از مغناطیس ها گاهی Wiggler یا Undulator نامیده می شود. به محض اینکه دسته ای از الکترون ها از این میدان مغناطیسی متناوب عبور کنند، به روش خاصی به سمت جلو و عقب حرکت موجی انجام می دهند که سبب می شود فوتون های تک رنگ منتشر کنند.

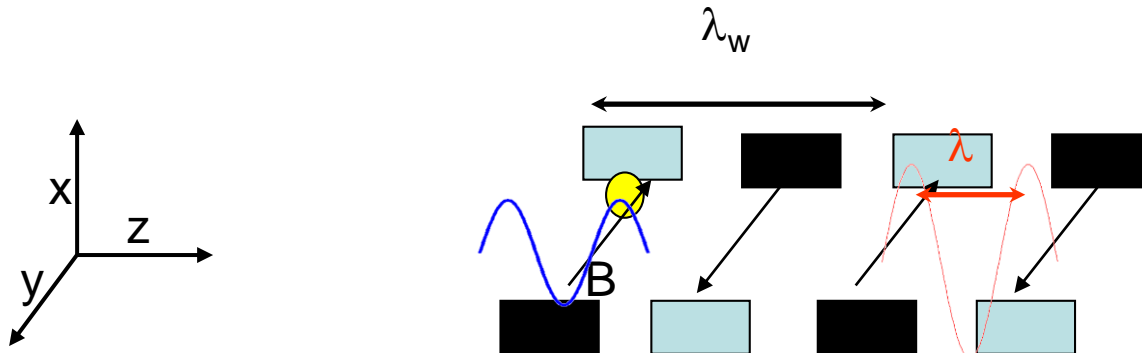


۴) میدان الکترومغناطیسی

همراه پرتو الکترونی منتشر می شود و تقویت می شود.

تقویت نور در شرایط رزونانس

وقتی الکترون های پر شتاب از میدان نوسانساز عبور می کنند، تابش سیکروترونی منتشر می کنند. در میدان متناوب الکترون ها آهسته تر از موج الکترومغناطیسی حرکت می کنند. اختلاف بین موج الکترومغناطیسی و الکترون داده شده درحالیکه در یک تناوب نوسانساز پیش می رود باید با طول موج میدان برابر باشد. هرگاه این شرط برقرار شد اختلاف فاز نسبی تابش سیکروترون گسیلی توسط الکترون و میدان ثابت می ماند.



این شرط را با نوشتن روابط ریاضی زیر به دست می آوریم

$$\frac{\lambda_w}{\beta_{\parallel}} (1 - \beta_{\parallel}) = \lambda$$

$$\frac{1}{\gamma^2} = 1 - \beta_{\parallel}^2 - \beta_{\perp}^2$$

$$|\beta_{\perp}| \approx \frac{K}{\gamma}$$



$$\lambda = \frac{\lambda_w}{2\gamma^2} (1 + K^2)$$

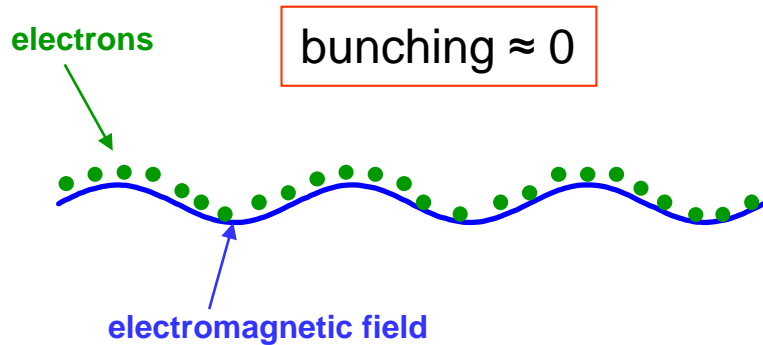
γ : انرژی الکترون

β_{\perp} : سرعت عرضی نرمالیزه ی الکترون نسبت به C

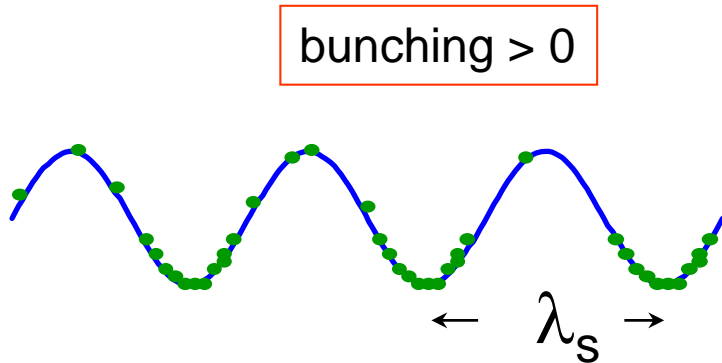
β_{\parallel} : سرعت نرمالیزه ی الکترون در طول نوسانساز نسبت به C

K: پارامتر نوسانساز $K \propto \lambda_w B_{und}$

پارامتر خوشه‌ای شدن



از پارامتر خوشه‌ای شدن می‌توان به عنوان پارامتر منبع یاد کرد. در ابتدا میدان الکترومغناطیسی ضعیف است و الکترون‌ها به صورت تصادفی با یکدیگر اختلاف فاز دارند.



اما سرانجام الکترون‌ها عمل خوشه‌ای شدن را در فواصل آغاز می‌کنند و موج تقویت می‌شود.

اساس انتشار موج در FEL

برای شروع فرایند تقویت موج یک تحریک اولیه نیاز است، این تحریک را می توان به روش های زیر فراهم کرد:

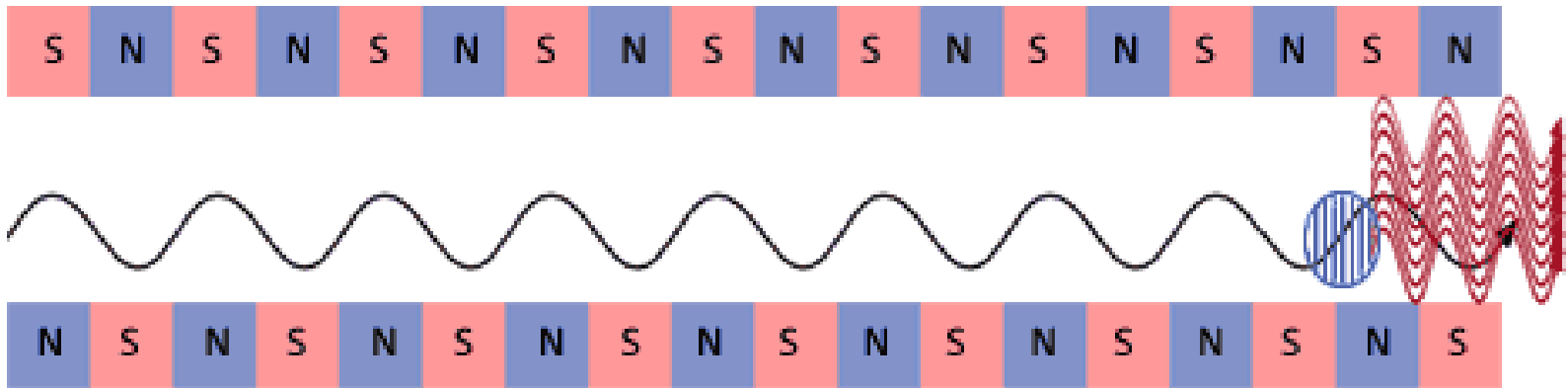
۱. توسط گسیل خودبخودی اولیه ی پرتو الکترونی

گسیل خودبخودی می تواند در یک کاواک نوری نگهداری شود و توسط واکنشهای متوالی و مختلف پرتو الکترونی نوسان کننده تقویت شود. ←

گسیل خودبخودی در طول یک واکنش پرتو الکترونی تقویت شود (گسیل خودبخودی با تقویت خودی SASE) ←

SASE FEL

در این روش پرتو الکترونی و میدان الکترو مغناطیسی با هم در طول یک نوسانساز منتشر می شوند. در پی یک سری واکنش های متوالی، پرتو الکترونی در طول موج رزونانس، خوشه ای می شود. در پی خوشه ای شدن های متوالی گسیل قوی به وجود می آید. در واقع در این روش نویز به عنوان یک سیگنال ورودی عمل می کند که ویژگی های طیفی و گذرای



۲. سیگنال تولید شده توسط لیزر خارجی

سیگنال منسجم خارجی توسط FEL تقویت می شود (تحریک مستقیم)



در این روش FEL فرایند خود را با استفاده از یک سیگنال منسجم خارجی شروع می کند. در این روش

• سیگنال خروجی از ویژگی های سیگنال ورودی نظیر انسجام و طول موج تبعیت می کند.

• محدوده ی قابل تنظیم سیگنال خروجی توسط منابع منسجم در دسترس محدود می شود

سیگنال منسجم خارجی برای تولید خوشه های هارمونیک استفاده شود و تابش منسجمی برای یک هارمونیک طول موج سیگنال تحریک تولید کند



(تولید هارمونیک منسجم CHG)

نکاتی در مورد FEL

← شرط همزمانی در FEL

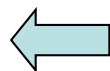
برای اینکه یک تبادل انرژی بین الکترون و یک میدان E صورت می‌گیرد، لازم است که سرعت الکترون (V) در امتداد E ، مؤلفه غیر صفر داشته باشد. در مورد موج الکترومغناطیسی تخت که در جهت z منتشر می‌شود $E_z = 0$ بوده و $E_x \neq 0$ است.

بنابراین الکترون بایستی یک مؤلفه عرضی V_x داشته باشیم، این کار با به کار بردن یک میدان مغناطیسی عرضی پریودیکی فضایی با پریود λ در حضور یک موج الکترومغناطیسی تخت با طول موج λ بیان می‌شود. بردار سرعت الکترون در $z = 0$ با میدان روبرو شده و دارای یک سرعت عرضی موازی جهت میدان $(V_x || E_x)$ می‌باشد. بطوری که $V_x E_x > 0$ است.

← کنترل طول موج لیزر

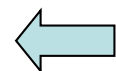
در FEL ها طول موج لیزر بوسیله پارامترهای باریکه الکترونی و ساختار الکترودینامیکی آنها مشخص می‌شود (دیوارهای موجی، آینه‌های مشدد و ...) نیز با مشخصه‌های میدانهای الکتریکی و مغناطیسی در ناحیه اندرکنش.

لیزرهای الکترون آزاد اشعه X



نبود آینه های مناسب در محدوده ی فرابنفش و پرتو X از عملکرد صحیح نوسانساز FEL جلوگیری می کند. بنابراین باید تقویت مناسب برای عبور الکترون از نوسانساز وجود داشته باشد. لیزرهای الکترون آزاد پرتو X نوسانساز های بزرگ را تحریک می کنند.

لیزر الکترون آزاد با هندسه دورانی



اگر پرتو الکترونی به جای اینکه در راستای محور معینی تابیده شود حول محور دوران کند و میدان **Wiggler** به صورت سمتی حول محور متناوب باشد یک لیزر الکترون آزاد با هندسه دورانی خواهیم داشت. مزایای این نوع لیزر در مقایسه با نوع خطی آن عبارتند از طولانی بودن مسیر برهم کنش الکترون ها، جمع و جور بودن لیزر، و فیدبک داخلی آن که از چرخش مجدد امواج الکترومغناطیسی حاصل می شود.