



تاریخ گزارش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۲

ساخت آندولاتور

صنایع ماشین آلات

صنعتی

مشخصات فناوری

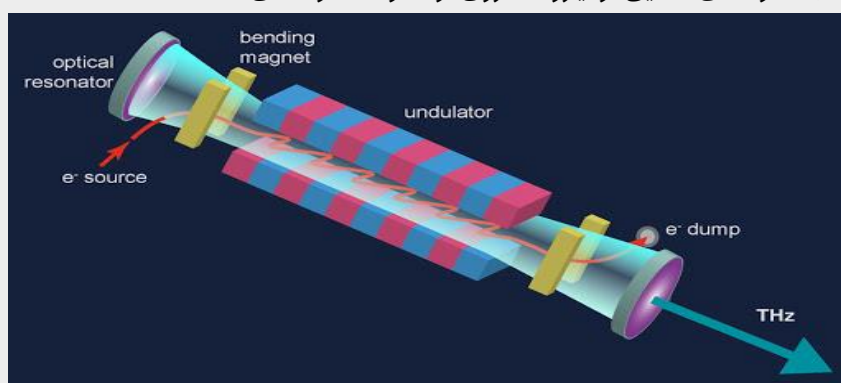
دسته فناوری	سخت افزارهای برق و الکترونیک، لیزر و فتونیک
زیر دسته فناوری	تجهیزات پیشرفته هسته‌ای
توضیحات	آندولاتور مناسب برای لیزرهای الکترون آزاد و چشمه‌های نور نسل سوم

اطلاعات مسئله

نوع مسئله	شخصی سازی فناوری موجود در بازار خارجی
دلایل ایجاد مسئله	مشکل تأمین کالا (وجود تحریم و...)
شیوه همکاری	عقد قرارداد تحقیق و توسعه

• محصول (محصولات) تولیدی متقاضی

یکی از جدیدترین انواع لیزر که از نظر ساختار با لیزرهای مرسوم تفاوت‌های قابل توجه دارد لیزر الکترون آزاد است. از مهم‌ترین ویژگی‌های آن شدت، کیفیت بالای نور لیزر و تنظیم پذیری آن در یک طیف بسیار گسترده نسبت به سایر لیزرها است. امروزه کشورهای پیشرفته توان زیادی را در تحقیق روی این لیزر صرف می‌کنند. در این روش، محیط فعالی که لیزر را تولید می‌نماید، در طی برهمکنش خوشه‌ی الکترونی با تابش الکترومغناطیسی که در آندولاتور ساطع شده، می‌باشد. لیزر الکترون آزاد بر اساس نوع تقویت به سه روش تقسیم می‌گردد که عبارتند از ۱- لیزر الکترون آزاد نوسانگر^۱ بر پایه مشدده ای اپتیکی^۲ - لیزر الکترون آزاد بر اساس تقویت کننده چشمه خارجی^۳ - لیزر الکترون آزاد بر اساس تقویت کننده خود به خودی (SASE)^۴. در شکل نمایی از لیزر الکترون آزاد نوسانگر نشان داده شده است.



شکل ۶: نمایی از لیزر الکترون آزاد نوسانگر

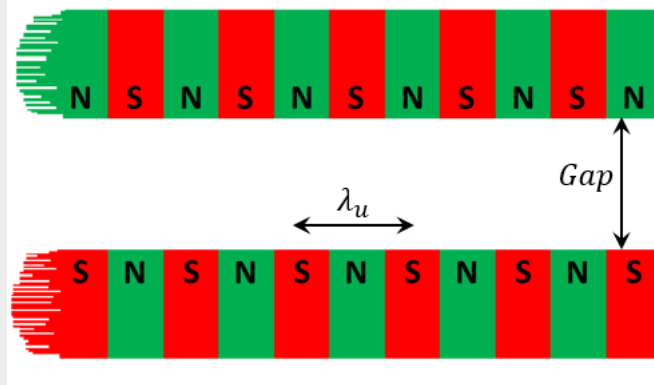
نکته‌ای که در این روش حائز اهمیت است، این است که دیگر نیازی به خوشه‌سازی در ابعاد زیر طول موج تابشی جهت گسیل همدوس، نمی‌باشد و فرآیند ریزخوشه‌سازی (در زیر ابعاد طول موج)، در داخل آندولاتور طی برهمکنش رخ می‌دهد. همچنین در این روش توان‌های پیک بالا قابل دستیابی است و به عنوان مثال در ناحیه‌های مختلف تراهرتز در مرتبه ۱۰ کیلووات، ۳۰۰ کیلووات و چند مگاوات گزارش شده‌اند. از جمله بخش‌های مهم در یک FEL، بخش آندولاتور است که از آرایه متناوب مغناطیس‌ها تشکیل شده است که از جمله مشخصه‌های اصلی این آرایه λ_u ، Gap و اندازه میدان مغناطیسی است. طول موج تابشی یک لیزر الکترون آزاد مطابق روابط ذیل به این پارامترها وابسته است.

^۱ FEL Oscillator

^۲ Optical resonator

^۳ Seeded FEL

^۴ Self Amplified Stimulated Emission



Undulator radiation characteristics

- Radiation **wavelength** or frequency ($\lambda = c/f$)
 - ✓ Length contraction $\Rightarrow \lambda_u \rightarrow \lambda_u/\gamma$
 - ✓ Doppler Shift $\Rightarrow \lambda_u/\gamma \rightarrow \lambda_u/\gamma^2$
 - ✓ $\lambda \cong \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2}\right)$ ($K = \frac{e\lambda_u B}{2\pi mc} \cong \lambda_u[cm]B[T]$)

• روش تولید محصول

فاز طراحی: تحقیق و توسعه داخلی
 فاز تأمین تجهیزات: خرید خارجی و داخلی
 فاز ساخت، راه اندازی و تست: تحقیق و توسعه داخلی

• مواد اولیه مصرفی

از جمله تجهیزات مهم مورد نیاز در این پروژه بخش مگنت های دائمی است که از طریق خرید خارجی تأمین خواهد شد. تأمین سایر مواد و تجهیزات مورد نیاز در این پروژه چالش خاصی نداشته و از داخل کشور قابل تأمین است.

• هدف و محدوده طرح

هدف این پروژه طراحی و ساخت آندولاتور مناسب برای لیزرهای الکترون آزاد و چشمه های نور نسل سوم با مشخصات ذیل می باشد:

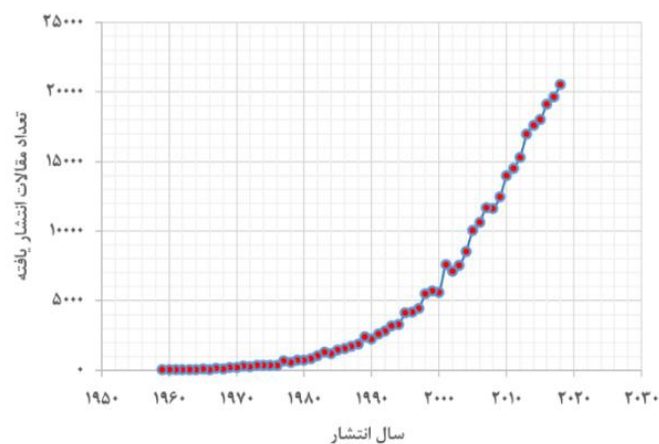
$$\begin{aligned}\lambda_u &= 50 \text{ mm} \\ \text{Gap} &= 15 - 30 \text{ mm} \\ B &= 1 \text{ T} \\ \text{Length} &= 100 \text{ cm}\end{aligned}$$

• جایگاه، اهمیت و وضعیت صنعت مسئله و محصولات آن

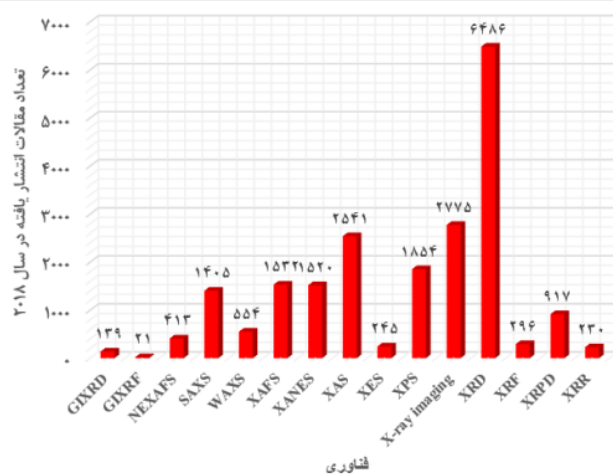
آندولاتورها بخش انتهایی در چشمه‌های نور نسل سوم و لیزرهای الکترون آزاد هستند و باریکه الکترون شتاب گرفته در شتاب‌دهنده‌های سینکروترون یا شتاب‌دهنده خطی، با ورود به این بخش انرژی خود را به صورت تابش‌های همدوس الکترومغناطیس ساطع می‌کند. از این رو برای بررسی جایگاه و اهمیت این تجهیز لازم است کاربردهای چشمه‌های نور و لیزرهای الکترون آزاد مورد بررسی قرار گیرند. تابش سنکروترون یک امکان توانمند برای مطالعه ساختمان مولکولی و تغییرات شکل و ترکیبات سلولی در هنگام واکنش‌های شیمیایی است که در زمینه‌های مختلف تحقیقاتی و کاربردی در فیزیک، پزشکی، صنعت، زیست‌شناسی، باستان‌شناسی و... کاربرد دارد. استفاده از تابش سینکروترون برای علوم بنیادی و فناوری‌های کاربردی، رشد فزاینده‌ای را در چند دهه اخیر تجربه کرده است. سینکروترون‌ها اصولاً از جمله شتابدهنده‌های دایره‌ای هستند که از سه دهه پیش تاکنون کاربرد صنعتی داشته‌اند. کاربرد نور سینکروترون در نانو تکنولوژی، زیست فناوری، بیوفیزیک، محیط زیست، صنایع پتروشیمی و مواد، پزشکی و عکس برداری، ژنتیک و شناخت و تولید داروهای جدید و نیز در علوم باستان‌شناسی و در مواردی در صنایع نظامی و صنایع فضایی کاربرد دارد.

همان طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، از دهه پنجم قرن بیستم میلادی تاکنون، مقالات پژوهشی منتشر شده در ارتباط با تابش سینکروترون، با سرعت زیادی افزایش داشته است و از ۳۴۹ مقاله در سال ۱۹۷۵، به ۲۰۵۶۵ مقاله در سال ۲۰۱۸ رسیده است. دلیل این روند افزایشی سریع، تأسیس منابع تابش سینکروترون در شهرها و کشورهای مختلف جهان در سال‌های اخیر، نیاز روزافزون محققان به استفاده از این فناوری و توانایی بالای آن در حل بسیاری از مسائل و موضوعات تحقیقاتی و صنعتی است. از آنجا که سینکروترون یک ابزار تحقیقاتی بسیار پرکاربرد است، پیش‌بینی می‌شود این روند افزایشی حفظ شده و یا با افزوده شدن تعداد مراکز دارای منابع سینکروترون، سرعت رشد آن افزایش بیشتری یابد.

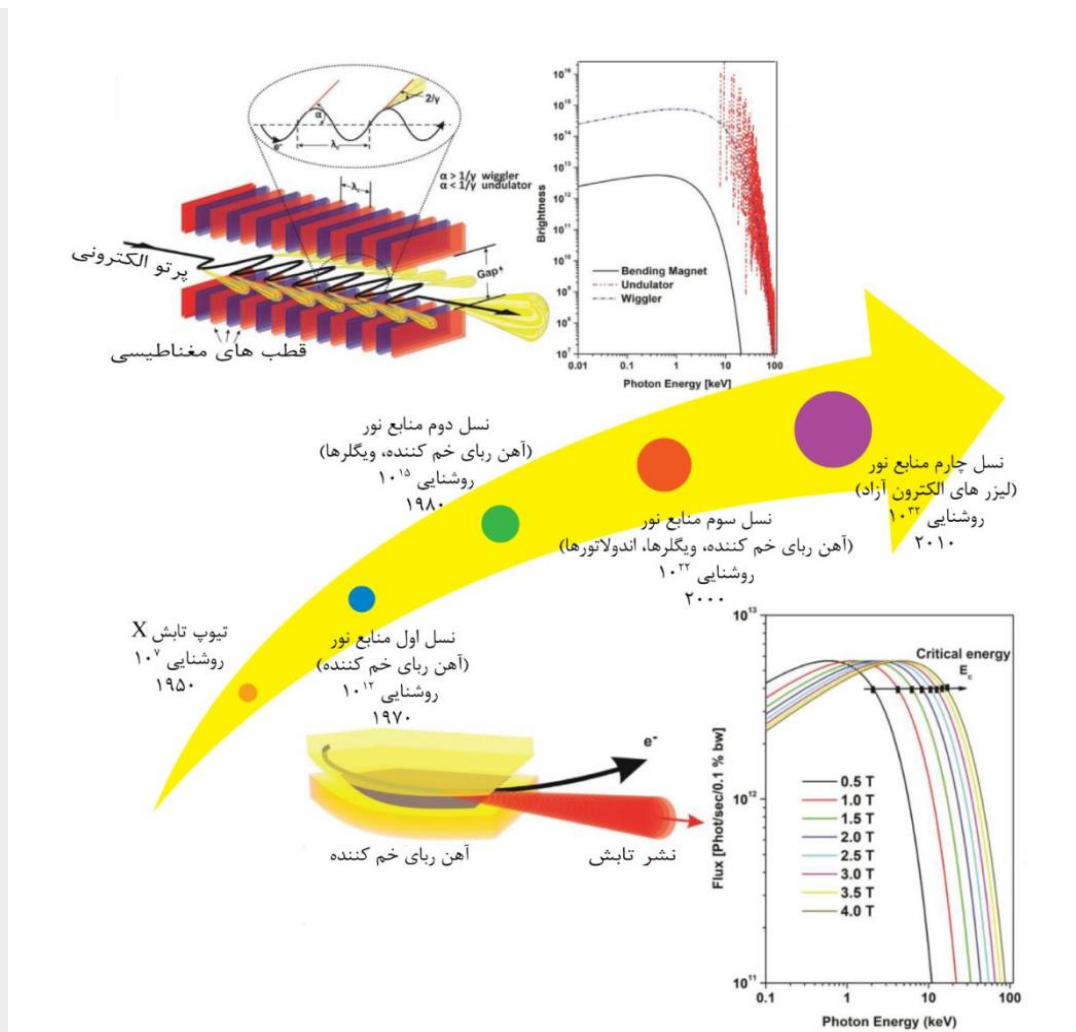
در شکل ۲، مقالات پژوهشی چاپ شده در سال ۲۰۱۸ که از فناوری‌های مختلف تابش X سینکروترون بهره می‌گیرند، آمده است. مقاله‌ها و پژوهش‌های بیشتر در برخی از فناوری‌ها (مانند XRD)، نشان دهنده پرکاربرد بودن آن فناوری در زمینه‌های مختلف پژوهشی است.



شکل ۱. مقالات انتشار یافته از سال ۱۹۵۰ تا انتهای سال ۲۰۱۸ در ارتباط با تابش سینکروترون (این اطلاعات از سایت اسکوپوس با استفاده از کلمه کلیدی "synchrotron" و با جست‌وجو در کل متن مقاله به دست آمده است).



شکل ۲. مقالات انتشار یافته در سال ۲۰۱۸ با استفاده از تابش سینکروترون به تفکیک فناوری (این اطلاعات از اسکوپوس با استفاده از کلمات کلیدی نام فناوری به علاوه "synchrotron" و با جست‌وجو در بخش‌های عنوان، چکیده و کلمات کلیدی مقالات به دست آمده است).



شکل ۴. نسل‌های مختلف منابع تابش نور

در شکل ۴ مقایسه‌ای از روشنایی منابع نور نسل‌های مختلف آمده است. همان طور که مشاهده می‌شود شدت تابش این منابع در نسل‌های جدید نسبت به نسل‌های قدیمی‌تر به صورت نمایی افزایش یافته است.

• جایگاه و اهمیت فناوری مسئله در صنعت

همان طور که در بخش‌های قبل تشریح شد، از مزیت‌های اصلی لیزرهای الکترون آزاد، قابلیت تولید طیف بزرگی از تابش‌های الکترومغناطیس از اشعه ایکس تا امواج تراهرتز می‌باشد که باعث شده جایگاه ویژه‌ای در انجام آنالیزها و تصویربرداری‌های پیشرفته در حوزه‌های مختلف علوم و فناوری پیدا کند. در ادامه در خصوص فناوری لیزرهای الکترون آزاد در محدوده طیف تراهرتز و برخی کاربردهای آن صحبت خواهد شد.

تابش تراهرتز به ناحیه‌ای از طیف الکترومغناطیسی اطلاق می‌شود که در محدوده فرکانسی بین میکروموج^۵ و فرسرخ^۶ قرار دارد (شکل ۱-۱). باند تراهرتز تعریف دقیقی ندارد اما معمولاً بازه‌ی فرکانسی^۱ ۰ تا ۱۰ تراهرتز را به آن نسبت می‌دهند. یک تراهرتز معادل طول موجی ۳۰۰ میکرومتری و انرژی فوتون ۴.۲ میلی‌الکترون‌ولت می‌باشد. به دلیل اینکه برای سال‌های متمادی فناوری مناسبی برای تولید و آشکارسازی تابش تراهرتز وجود نداشت، این محدوده‌ی فرکانسی به شکاف تراهرتز^۷ نیز معروف شده است.



شکل. **Error! No text of specified style in document.** بازه‌ی طیفی امواج الکترومغناطیس- امواج تراهرتز در ناحیه قرمز رنگ

گذارهای دورانی مولکول‌ها، حرکات ارتعاشی دامنه بزرگ ترکیبات آلی، ارتعاشات شبکه در جامدات، گذارهای درون باندی در نیمه‌رساناها، گاف انرژی ابررساناها و... در ناحیه‌ی تراهرتز قرار دارد. با توجه به این ویژگی‌ها، امواج تراهرتز اصطلاحاً دارای اثر انگشت^۸ برای بسیاری از مواد بوده و مواد قطبی مانند آب دارای جذب خوبی در بعضی فرکانس‌ها در ناحیه تراهرتز می‌باشند. از طرفی مواد غیر قطبی و غیرفلزی مانند کاغذ، لباس، پلاستیک، چوب، سرامیک و... که معمولاً در طول موج‌های مرئی کدر هستند، در ناحیه‌ی تراهرتز شفاف هستند. امواج تراهرتز در کاربردهای مشابه با پرتوی ایکس که پرتوهای یونیزان هستند، غیرتهاجمی^۹ می‌باشند.

با توجه به ویژگی‌های امواج تراهرتز که در بخش قبل ذکر شد، کاربردهای متنوعی در این ناحیه همانند طیف سنجی و تصویربرداری در حوزه‌های صنعت، پزشکی، امنیت و مطالعه‌ی مواد وجود دارد که این بازه‌ی فرکانسی را تبدیل به یک حوزه‌ی مستقل دانش و فناوری با کاربرد بالا کرده است. به عنوان مثال در حوزه‌ی امنیت از امواج تراهرتز برای اکتشاف مواد منفجره و مخدر و همچنین تصویربرداری در گیت‌های بازرسی استفاده می‌شود. در حوزه‌ی پزشکی می‌توان به تشخیص سرطان و توالی‌یابی ژن اشاره کرد. برای تولید امواج تراهرتز تاکنون روش‌های زیادی مورد بررسی قرار گرفته که یکی از آنها استفاده از شتاب‌دهنده ذرات^{۱۰} است که از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد.

به عنوان تقسیم‌بندی می‌توان به دو بخش مطالعه علمی^{۱۱} و مطالعه کاربرد در حوزه‌ی صنعتی-تجاری^{۱۲} اشاره نمود. در بخش مطالعه علمی، مباحث گسترده‌ی نیمه‌رساناها و بیولوژی بیشتر مورد تحقیق و

^۱ Microwave

^۲ Infrared

^۳ THz gap

^۴ Finger print

^۵ Non-invasive

^۶ Particle accelerator

^۷ Scientific study

^۸ Industrial and commercial application

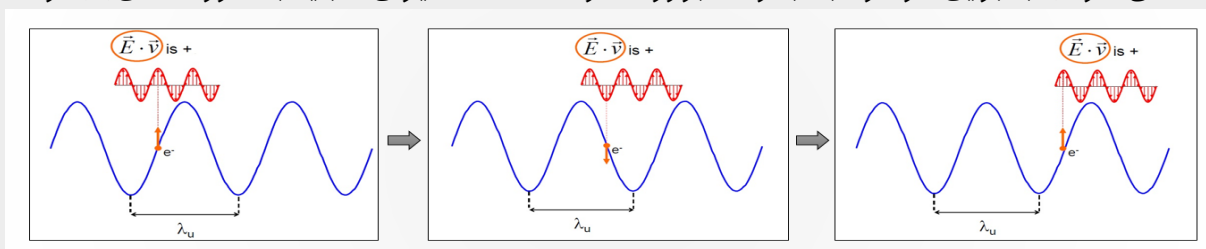
پژوهش قرار گرفته‌اند اما در حوزه‌های دیگر مانند تخلیه الکتریکی در گاز و... در NOVO-FEL روسیه کارهایی شده‌است. در بخش صنعتی به موضوعاتی همچون پردازش مواد^۳، هولوگرافی و توموگرافی و طراحی مفهومی برای تصویربرداری امنیتی می‌توان اشاره کرد.

• کارکرد (وظیفه) و نحوه عملکرد فناوری مسئله

برای اینکه موج الکترومغناطیس تابشی تقویت شود، باید انتقال انرژی از الکترون به موج الکترومغناطیس صورت گیرد. به بیان ریاضی، کار انجام شده بر روی الکترون باید منفی باشد:

$$\frac{dW}{dt} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v} = -e\mathbf{E} \cdot \mathbf{v} < 0 \quad (1)$$

به عبارتی دیگر کمیت $\mathbf{E} \cdot \mathbf{v}$ همواره باید مثبت شود. با توجه به اینکه معمولاً سرعت موج الکترومغناطیس بیشتر از سرعت الکترون‌ها می‌باشد، به اصطلاح الکترون‌ها روی میدان الکتریکی موج، شُر می‌خورند (یا می‌لغزند). بنابراین اگر شرط بالا بخواهد برآورده شود، اختلاف مسیر آن‌ها باید به صورت شکل (۷) گردد.



شکل ۷: شرط رزونانس (انتقال مستمر انرژی از الکترون به موج) با اختلاف مسیر مشاهده شده در بالا صورت می‌گیرد

یعنی اگر الکترون به مقدار یک پریود آندولاتور (λ_u) جلو رود، موج الکترومغناطیس باید به تعداد مضرب صحیحی از طول موجش، از الکترون‌ها جلوتر بیفتد. با بیان فازی می‌توان آن را به صورت زیر نوشت:

$$kz_0 - \omega t_0 = -2\pi \quad (2)$$

که $z_0 = \lambda_u$ و $t_0 = \frac{\lambda_u}{c\beta_z}$ مقدار مسافت و زمانی می‌باشد که الکترون در یک پریود آندولاتور در راستای z طی نموده و موج الکترومغناطیس از لحاظ فازی به مقدار 2π ، از آن جلوتر افتاده‌است. پر واضح است که $c\beta_z$ بیانگر میانگین سرعت الکترون در راستای z می‌باشد. با جای گذاری t_0 و z_0 در رابطه (۲) شرط رزونانس به صورت زیر در می‌آید:

$$\frac{\omega}{c\beta_z} - k_u - k = 0 \quad (3)$$

که در آن $k_u = \frac{2\pi}{\lambda_u}$ می‌باشد. با توجه به اینکه موج الکترومغناطیسی داخل موجبر می‌باشد، k با رابطه‌ی زیر داده می‌شود:

$$k = \sqrt{\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - \Gamma_\lambda^2} \quad (4)$$

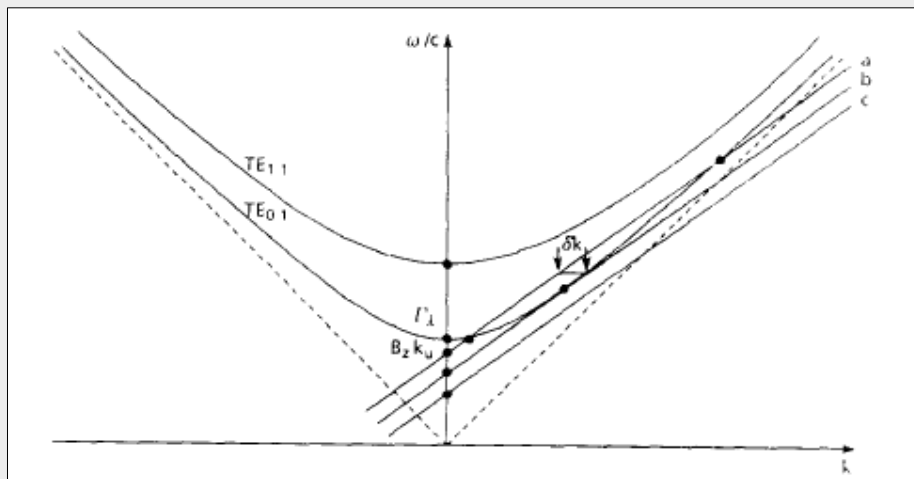
که Γ_λ عدد موج برای طول موج قطع^۴ (λ_{mn}) می‌باشد. چنانچه رابطه‌ی (۴) را درون رابطه (۳) قرار داده شود، با حل یک معادله درجه دو برای ω جواب زیر به دست می‌آید:

$$\omega_{\pm} = c\beta_z \gamma_z^2 k_u \left[1 \pm \beta_z \sqrt{1 - \left(\frac{\Gamma_\lambda}{\beta_z \gamma_z k_u}\right)^2} \right] \quad (5)$$

^۴ Material processing

^۵ Cutoff wavelength

- که در آن $\gamma_z = \frac{1}{\sqrt{1-\beta_z^2}}$ می باشد. طبق شکل (۸) جواب های بالا در اصل نقاط تقاطع نمودار پاشندگی موج الکترومغناطیس در موجبر با نمودار خطی بیم الکترونی در آندولاتور می باشد. به عبارتی دیگر در یک فرکانس خاص، بردار k ها با هم برابر می شوند که این مطلب معنای شرط تطبیق فازی^{۱۵} می باشد. چنانچه ترم رادیکال در رابطه (۵) به صورت $\Delta = \sqrt{1 - \left(\frac{\Gamma_\lambda}{\beta_z \gamma_z k_u}\right)^2}$ تعریف شود، با توجه به ترم زیر رادیکال سه حالت را می توان بررسی نمود. اگر ترم زیر رادیکال مثبت باشد، آنگاه $\Delta > 0$ شده و طبق شکل (۸) نمودارها در دو نقطه یکدیگر را قطع می نمایند (دو جواب برای فرکانس به دست می آید). اگر ترم زیر رادیکال منفی شود، در این صورت $\Delta < 0$ و نمودارها یکدیگر را قطع نمی کنند (بدون جواب). اگر $\Delta = 0$ گردد، جواب تبهگن بوده و دو نمودار در یک نقطه مماس بر یکدیگر می شوند. چنانچه Δ به سمت -1 میل نماید، از مد موجبر به سمت مد فضای آزاد رفته و همان رابطه ی معروف برای طول موج تابشی در فضای آزاد ضمن انجام تقریبی، به دست می آید. به عنوان مثال اگر Γ_λ به سمت صفر میل کند (یعنی ابعاد موجبر در مقایسه با طول موج تابشی بسیار بزرگ باشد)، طبیعی است که در تقریب مد فضای آزاد عمل شود.



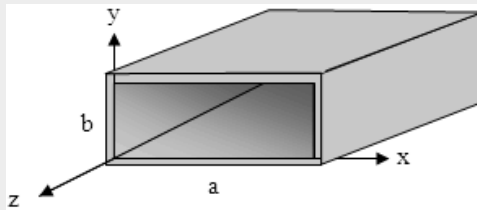
شکل ۸: تقاطع نمودار پاشندگی موج الکترومغناطیس در موجبر با نمودار خطی بیم الکترونی در آندولاتور (محور افقی بر حسب k)

با توجه به اینکه فرکانس تابش الکترون در آندولاتور (در محور طولی) با فرکانس رزونانس (شرط انتقال انرژی از الکترون ها به موج)، برابر می باشد بنابراین آندولاتور می تواند شرایطی را فراهم نماید که موج الکترومغناطیسی تقویت شده و به عبارتی لیزینگ رخ دهد. فرآیند به زبان ساده به این گونه است که در ابتدا ریزخوشه بندی در ابعاد طول موج تابشی صورت گرفته و سپس شرایط برای تقویت موج، ایجاد می گردد.

حالت $\Delta = 0$ (جایی که نقطه ی مماس در شکل (۸) پدید می آید) را در نظر بگیرید. این حالت به معنای آن است که سرعت گروه موج الکترومغناطیسی داخل موجبر (β_g) با میانگین سرعت الکترون ها در راستای z (β_z) برابر می شوند. به عبارتی دیگر، الکترون ها بر روی موج الکترومغناطیسی نلغزیده و با هم حرکت می کنند و بهترین حالت برای برهمکنش با یکدیگر را دارا هستند. از طرفی این حالت زمانی به وجود می آید

^{۱۵} Phase matching condition

که $k_u = \frac{\Gamma_\lambda}{\gamma_z \beta_z}$ و معادل این رابطه برای مد $b = \frac{\lambda_u}{\gamma_z \beta_z} TE_o$ حاصل می شود که b عرض عمودی موجبر طبق شکل (۹) می باشد.



شکل ۹: شماتیک موجبر مستطیلی که در بین آندولاتور قرار می گیرد

بررسی ویژگی های عملکردی خروجی موردنظر

ردیف	ویژگی عملکردی	واحد	مقدار کنونی	مقدار مطلوب	توضیحات
۱	حداکثر میدان مغناطیسی	تسلا	۰/۷۵	۱	-
۲	طول آندولاتور	متر	۰/۴	۱	-
۳	دوره تناوب میدان مغناطیسی	میلی متر	-	۵۰	-
	طول گپ	میلی متر	-	۱۵-۳۰	-

الزامات و ملاحظات حل مسئله

الزامات کارکردی	استفاده از مگنت دائمی
الزامات عملکردی	طول گپ قابل تغییر از ۱۵ تا ۳۰ میلی متر و دقت ۰/۵ میلی متر با مکانیسم تمام اتوماتیک
الزامات محیطی	بکارگیری تجهیز در دمای آزمایشگاه (۲۰-۳۰ درجه سانتی گراد)
الزامات پشتیبانی	ارائه خدمات پس از فروش به مدت حداقل ۵ سال
الزامات فیزیکی	طول آندولاتور: ۱ متر (دقت چیدمان مگنت ها ۰/۱ میلی متر)
الزامات طول عمر عملیاتی	حداکثر افت قدرت مگنت های دائمی در ۵ سال زیر ۲ درصد باشد
الزامات تضمین محصول	محصول دارای ۲ سال گارانتی باشد
الزامات پیکربندی	میز و سازه ضد لرزه با قابلیت تنظیم ارتفاع به اندازه ۲۰ سانتی متر به صورت اتوماتیک
الزامات طراحی	$\lambda_u = 50 \text{ mm}$ $Gap = 15 - 30 \text{ mm}$ $B = 1 \text{ T}$ $Length = 100 \text{ cm}$

الزامات ساخت	دقت ساخت مگنت و سازه ۰/۰ میلی متر
سایر ملاحظات	ارائه شناسنامه مگنت ها

حداقل سفارش (مواد / دستگاه) مورد نیاز متقاضی (با فرض ملاحظات مالی)					
ردیف	عنوان	تعداد / مقدار	واحد	مقیاس زمانی	توضیحات
۱	آندولاتور مناسب برای لیزر الکترون آزاد تراهرتز	۱	-	۲ سال	با برآورد هزینه ۱۵۰,۰۰۰ دلار
۲	آندولاتور مناسب برای چشمه های نور سینکروترون	۱	-	۲ سال	با برآورد هزینه ۱۵۰,۰۰۰ دلار

نمونه مشابه محصول / فناوری یا راه حل های طی شده				شماره ۱
نام محصول	آندولاتور مناسب برای چشمه های نور سینکروترون	نام شرکت	پژوهشگاه دانش های بنیادی	
کشور سازنده	ایران	آدرس سایت	https://ipm.ac.ir	

اولین نمونه از آندولاتور در کشور در سال ۱۳۹۵ در پژوهشگاه دانش های بنیادی و توسط متخصصان طرح چشمه نور ایران صورت گرفته که در شکل زیر نمایش داده شده است. نتایج این پروژه در سال ۱۳۹۸ چاپ شده است.^{۱۶} در نمونه جدید، علاوه بر افزایش طول، لازم است میدان مغناطیسی نیز افزایش یابد.

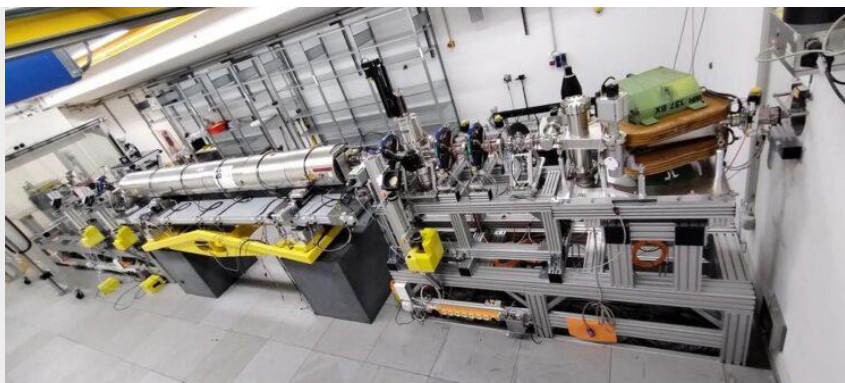


^{۱۶} رضانی مقدم، رحیقی، لامعی، محمد، خدادوست، پیام، & رادخرمی. (۲۰۱۹). طراحی و ساخت نمونه آزمایشگاهی آندولاتور تخت. مجله پژوهش فیزیک / ایران، ۱۹(۱)، ۱-۱۷.

صنایع پتروشیمی و مواد
صنایع نظامی
صنایع فضایی
صنایع داروسازی

تصاویر

View into the PITZ extension with the THz laser. The undulator for generating the laser radiation is mounted on the yellow frame, the electron beam comes into the beamline from the right



تصویر ۱

The FLASH undulators a ۲۷ m long undulator made of permanent NdFeB magnets with a fixed gap of ۱۲ mm, a period length of ۲۷.۳ mm and peak magnetic field of ۰.۴۷ Tesla ($K=۱.۲۳$).



تصویر ۲

The Undulator tunnel Shanghai Soft X-ray Free-Electron Laser (SXFEL)



تصویر ۳