

طرح لیزر الکترون آزاد کلاسترون نوری برای ایجاد هماهنگ‌های همدوس در ناحیه پرتوی X در حلقه انبارش چشمه نور ایران

افضل رقوی، حمید شفقت و محمدرضا بنام

دانشگاه پیام نور، تهران

پست الکترونیکی: a_raghavi@pnu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۰۸؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۸/۰۲/۲۲)

چکیده

در این مقاله امکان الحاق لیزر الکترون آزاد از نوع کلاسترون نوری به حلقه انبارش چشمه نور ایران به منظور تولید تابش لیزری در ناحیه پرتوی ایکس نرم از طریق فرایند ایجاد هماهنگ‌های همدوس مورد بررسی قرار گرفته است. این مطالعه از طریق شبیه‌سازی با استفاده از کد شبیه‌ساز لیزر الکترون آزاد GENESIS ۱.۳ به ازای مشخصات چشمه نور ایران انجام گرفته است. طرح‌های مختلف ممکن به همراه خروجی‌های حاصل از آنها ارائه شده و مورد بحث قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: لیزر الکترون آزاد، چشمه نور ایران، کلاسترون نوری، تولید هماهنگ همدوس

۱. مقدمه

قطبی‌ها و یا میدان‌های تناوبی ویگلر و نوسان‌ساز مغناطیسی ایجاد می‌شود، یک تابش غیرهمدوس است که به جای خود دارای دامنه کاربرد وسیعی در تحقیقات علمی و پژوهشی است. با وجود این با انتخاب شرایط خاص در ساختار میدان‌های تناوبی ساختارهای نوسان‌ساز امکان تبدیل این تابش به یک تابش همدوس لیزری تحت عنوان لیزرهای الکترون آزاد^۳ ایجاد می‌شود [۵].

لیزرهای الکترون آزاد دارای طرح‌های مختلفی هستند که در مراکز تحقیقاتی متناسب با امکانات موجود و خروجی مورد نظر

چشمه نور ایران^۱ (ILSF) به عنوان یک چشمه پرقدرت از تابش سینکروترونی با دامنه کاربردهای گسترده در زمینه‌های مختلف علمی و پژوهشی در شهر قزوین ایران در حال توسعه است [۴-۱]. این شتاب‌دهنده که از نوع حلقه انبارش^۲ است به عنوان چشمه‌ای از تابش‌های موسوم به نسل سوم با مشخصه درخشایی بسیار بالا و طول پالس کوتاه عمل خواهد کرد. تابش حاصل از این دستگاه که از طریق خمش باریکه الکترونی در دو

۱. Iranian Light Source Facility

۲. Storage ring

۳. Free electron laser

کاربردهای بسیاری در طیف‌سنجی گسیل فوتونی داشته باشند. علاوه بر این شیمی و بیوشیمی نیز از رشته‌هایی هستند که می‌توانند در تحقیقات خود از این ابزار نفع ببرند [۱۰ و ۱۱]. در این مقاله امکان‌سنجی استفاده از سازوکار تولید هماهنگ همدوس در حلقه انبارش چشمه نور ایران انجام گرفته است. برای این منظور، در بخش بعدی اصول کلی لیزر الکترون آزاد کلاسترون نوری ارائه شده است. سپس با استفاده از کد محاسباتی GENESIS ۱.۳ به شبیه‌سازی و تحلیل ساختارهای ممکن پرداخته خواهد شد. در انتها جمع‌بندی و نتیجه‌گیری از مباحث ارائه شده است.

۲. کلاسترون نوری

با توجه به محدودیت فضایی در ساختار حلقه‌های انبارش برای وارد کردن ساختارهای الحاقی، مناسبترین گزینه برای الحاق لیزر الکترون آزاد به آن استفاده از ساختار موسوم به کلاسترون نوری خواهد بود. این نوع از لیزر الکترون آزاد، مطابق آنچه در شکل ۱ نشان داده شده است، از سه بخش مجزا به نام‌های مدوله‌ساز^۵، بخش پاشنده^۶ و تابش‌گر^۷ تشکیل شده است.

باریکه الکترونی با توزیع اولیه یکنواخت و تک‌انرژی ابتدا وارد بخش مدوله‌ساز می‌شود. این بخش یک ساختار نوسان‌ساز مغناطیسی از نوع لرزاننده^۸ یا نوسان‌ساز^۹ است که ضرایب آن در حالت تشدید برای طول موج لیزری که به عنوان هسته اولیه استفاده می‌شود، تنظیم شده است. در این ناحیه در اثر برهم‌کنش باریکه الکترونی با پرتوی لیزری تزریق شده از خارج، سرعت الکترون‌ها از حالت یکنواخت اولیه خارج شده و دچار یک اختلال تناوبی در مؤلفه طولی می‌شود. این باریکه تعدیل سرعت یافته سپس وارد بخش پراکننده^{۱۰} می‌شود. این بخش که معمولاً یک ساختار غیرتناوبی از مغناطیس‌ها تحت

گزینه مناسب از بین آنها انتخاب می‌شود. نویسندگان این مقاله قبلاً امکان الحاق ساختار لیزر الکترون آزاد به بخش شتاب‌دهنده خطی چشمه نور ایران را در مقاله‌ای جدا مورد تحلیل قرار داده‌اند [۶]. در ساختار مذکور از بخش شتاب‌دهنده خطی حلقه انبارش به عنوان خوراک دهنده لیزر استفاده می‌شود که به علت انرژی نسبتاً پایین الکترون‌ها در این ناحیه خروجی آن در ناحیه تابش مادون قرمز واقع می‌شود. طرح لیزر الکترون آزادی که در بخش حلقه انبارش یک چشمه نور سینکروترونی تعبیه می‌شود تحت عنوان طرح تابش سینکروترونی لیزر الکترون آزاد^۱ شناخته می‌شود. این ساختار نیز به نوبه خود دارای تنوع زیادی بوده که از بین طرح‌های مختلف آن، طرح تولید هماهنگ همدوس^۲ از طریق کلاسترون نوری^۳ به علت نیاز به فضای کمتر، با ساختار حلقه‌های انبارش سازگارتر بوده و بیشتر مورد توجه قرار گرفته است [۷-۹]. از مزایای طرح تولید هماهنگ همدوس، امکان دسترسی به لیزرهایی با طول موج‌های کوتاه و تنظیم‌پذیر در محدوده طیف پرتوی ایکس و ماورای بنفش است که به روش‌های متداول امکان دسترسی به آنها نیست. علت این محدودیت یکی نبود آینه مناسب برای ساخت تشدید کننده برای این ناحیه طیفی است و دیگری عدم وجود لیزر اولیه با این طول موج برای استفاده از آن به عنوان هسته^۴ اولیه آن است. در طرح تولید هماهنگ همدوس مشکل نبود هسته اولیه با استفاده از هماهنگ‌های مرتبه بالاتر لیزرهای متداول موجود حل می‌شود. همچنین عملکرد در ناحیه بهره بالای لیزر نیز نیاز به استفاده از آینه بازتاباننده برای ساخت کاواک تشدیدکننده را بر طرف می‌کند، زیرا در این ناحیه کاری، پرتوی لیزر تنها با یک بار عبور از محیط فعال لیزری به اشباع و یا توان خروجی مطلوب رسیده و لذا نیازی به تکرار عبور آن از محیط فعال با استفاده از کاواک تشدید نیست. از آنجایی که تابع کار اکثر فلزات و شبه فلزات متناظر با طول موج‌های زیر ۲۵۰ nm است، لیزرهایی در این ناحیه طیفی می‌توانند

۵. Modulator

۶. Dispersive section

۷. Radiator

۸. Wiggler

۹. Undulator

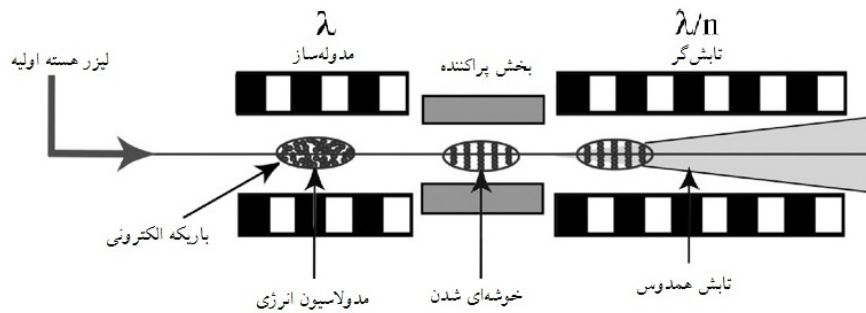
۱۰. Dispersion section

۱. Storage ring free electron laser

۲. Coherent harmonic generation

۳. Optical Klystron

۴. Seed



شکل ۱. ساختار کلی کلاسیک لیزر نوری.

مناسب‌ترین و متداول‌ترین روش مورد استفاده در تحلیل عددی فرایندهای غیر خطی لیزر الکترون آزاد فرمول‌بندی است که بر اساس حل معادلات ماکسول به همراه معادلات دینامیک ذره در تقریب موج کند تغییر^۲ و سپس بازنویسی آن بر حسب کمیت‌های توصیف کننده لیزر به دست می‌آید [۵ و ۱۶]. این فرمول‌بندی دینامیک لیزر توسط مجموعه معادلات خودسازگار زیر توصیف می‌شود

$$\frac{d\zeta_j}{d\tau} = v_j, \quad (2)$$

$$\frac{dv_j}{d\tau} = a_n |\cos(\zeta_j + \phi_n)|, \quad (3)$$

$$\frac{da_n}{d\tau} = -2\pi g_{e,n} b, \quad (4)$$

که در آن ζ_j فاز ذره λ_m در میدان موج گرانو (ترکیب میدان نوسان‌ساز با موج الکترومغناطیسی)، $v_j = (\gamma - \gamma_0) / \gamma_0$ ضریب تنظیم لیزر، معادل اختلاف نسبی انرژی نسبی ذره λ_m با انرژی تشدید لیزر، τ مسافت طی شده در امتداد محور نوسان‌ساز (که با طول کل نوسان‌ساز بهنجار شده است)، a_n و ϕ_n به ترتیب، دامنه و فاز هماهنگ n ام موج الکترومغناطیسی، $g_{e,n}$ بهره سیگنال کوچک لیزر و

$$b = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \exp(-in\zeta_j), \quad (5)$$

بیانگر ضریب خوشه‌ای شدن باریکه الکترونی متناظر با هماهنگ n ام است. برای رسیدن به بیشینه بهره باید این ضریب، با تنظیم مناسب بخش پاشنده و انرژی باریکه، بهینه شود. حل همزمان مجموعه معادلات (۲) تا (۴)، تغییرات دامنه و شدت موج را در

عنوان مختل کننده^۱ است باعث می‌شود که با عبور باریکه الکترونی از آن، تعدیل سرعت ایجاد شده در بخش قبل به تعدیل در چگالی باریکه و خوشه‌ای شدن باریکه منجر شود. در انتها باریکه خوشه‌ای شده وارد بخش تابش‌گر شده تا در آنجا از طریق سازوکار مشهور لیزر الکترون آزاد انرژی الکترون‌ها به انرژی تابشی یک پرتوی لیزری منتقل شود. در بخش تابش‌گر، که دوباره یک ساختار نوسان‌ساز تناوبی است، بسته به این که میدان نوسان‌ساز برای کدام یک از هماهنگ‌های تابش هسته اولیه تنظیم شده باشد، تابش لیزر خواهد داد.

طول موج تابش خروجی برای هماهنگ مرتبه n از تابش اولیه را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد

$$\lambda_n = \frac{\lambda_u}{2n\gamma_0^2} \left(1 + \frac{K^2}{s} \right), \quad (1)$$

که در آن λ_u دوره تناوب نوسان‌ساز، n شماره هماهنگ مورد نظر، γ_0 ضریب نسبی الکترون‌ها متناسب با انرژی حالت تشدید لیزر و K ضریب میدان نوسان‌ساز است. ضریب s برای نوسان‌ساز ماریچی برابر ۱ و برای نوع مسطح برابر ۲ قرار داده می‌شود.

برای توصیف فرایند برهم‌کنش موج-ذره در ساختار لیزرهای الکترون آزاد رهیافت‌های متنوعی مورد استفاده قرار گرفته است که از آن جمله می‌توان از رهیافت کوانتومی [۱۲] و رهیافت پلاسمایی با استفاده از مدل سیالی [۱۴] و مدل نظریه جنبشی مبتنی بر حل معادلات ولاسو-ماکسول [۱۵] نام برد. در حالتی که ساختار لیزر الکترون آزاد تنها منحصر به میدان نوسان‌ساز و موج الکترومغناطیسی تقویت شونده باشد

۲. Slowly-varying wave

۱. Chicane

جدول ۱. مشخصات باریکه الکترونی در حلقه انبارش چشمه نور ایران.

واحد	مقدار	کمیت
GeV	۳٫۰	انرژی
mm.mrad	۲٫۸	مؤلفه x گسیلش طبیعی ^۱
mm.mrad	۲٫۸	مؤلفه y گسیلش طبیعی
mm	۰٫۱	شعاع میانگین
A	۰٫۴	جریان متوسط
A	۳۸٫۰	بیشینه جریان

استخراج شده و مشخصات مورد نیاز در جدول ۱ داده شده است.

در طرح تولید هماهنگ همدوس از یک لیزر پرتوان از نوع لیزرهای متداول به عنوان هسته اولیه تابش استفاده شده و سپس یکی از هماهنگ‌های مرتبه بالاتر آن به عنوان خروجی لیزر تقویت می‌شود. در اینجا ما به تبعیت از کار مشابه گزارش شده در [۶] هماهنگ سوم لیزر Titanium-sapphire با طول موج ۲۶۰ nm و توان خروجی ۲٫۵ GW را به عنوان هسته اولیه تابش انتخاب کرده و سپس خروجی لیزر برای هماهنگ‌های مرتبه سه و پنج به ترتیب با طول‌موج‌های ۸۶٫۶ nm و ۵۲ nm را مورد مطالعه قرار خواهیم داد.

بخش‌های مدوله‌ساز و تابش‌گر شامل میدان‌های ویگری هستند که شدت و دوره تناوب آنها باید متناسب با بسامد تشدید مربوط به هر بخش انتخاب شود. مشخصات این بخش‌ها در جدول ۲ داده شده است.

البته این نکته شایان ذکر است که طول کل دستگاه محدود به حداکثر طول بخش‌های مستقیم در نظر گرفته شده برای حلقه انبارش خواهد بود. در حالی که طول‌های انتخاب شده در اینجا متناسب با حداکثر بازده آن است. در عمل ممکن است امکان استفاده از این حد اکثر توان مقدور نباشد. به عنوان مثال در طرح اولیه چشمه نور ایران، بلندترین بخش‌های مستقیم در نظر گرفته شده تنها ۸ متر طول دارند. بنابراین با کم کردن سهم طول بخش‌های مدوله‌ساز و پراکننده، تنها حدود ۴٫۵ متر برای بخش تابش‌گر قابل استفاده خواهد بود.

اکنون با استفاده از داده‌های ارائه شده در جداول ۱ و ۲ به

هنگام عبور از میدان نوسان‌ساز به دست می‌دهد.

مجموعه معادلات (۲-۴) یک مدل ساده توصیف کننده لیزر الکترون آزاد بوده که با حل عددی آنها می‌توان رفتار خروجی لیزر را در تقریب یک بعدی تحلیل کرد. با وجود این، تحلیل کامل‌تر دستگاه مستلزم تحلیل سه‌بعدی و لحاظ کردن آثار حجمی مثل پراکندگی انرژی^۱ و لغزش باریکه^۲ است که فرمول‌بندی آن در مراجع مربوطه به صورت مفصل داده شده است [۵، ۱۶ و ۱۷]. کد GENESIS ۱.۳ یک کد شبیه‌سازی سه‌بعدی لیزر الکترون آزاد است که بر اساس حل عددی مجموعه معادلاتی از این نوع توسعه یافته است [۱۷ و ۱۸]. این کد قادر به شبیه‌سازی لیزر الکترون آزاد در هر دو حالت مستقل از زمان و وابسته به زمان بوده و مجموعه کاملی از ضرایب‌های مفید لیزر را به عنوان خروجی در اختیار می‌گذارد که توافق بسیار خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده تجربی در لیزرهای الکترون آزاد دارد و به همین دلیل امروزه در طراحی اکثر این لیزرها از آن استفاده می‌شود. در این مقاله ما با استفاده از این کد در حالت مستقل از زمان به تحلیل طرح کلاسترورن نوری برای چشمه نور ایران خواهیم پرداخت.

۳. تولید هماهنگ همدوس در حلقه انبارش چشمه

نور ایران

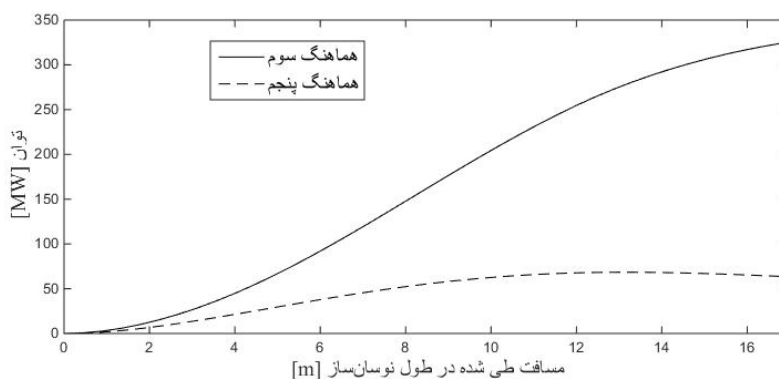
مشخصات چشمه نور ایران از گزارش طراحی مفهومی پروژه [۱] و همچنین مقالات منتشر شده در رابطه با آن [۲-۴ و ۱۹]

۱. Energy spread

۲. Beam slippage

جدول ۲. مشخصات میدان‌های نوسان‌ساز.

طول (m)	K	دوره تناوب (cm)	میدان مغناطیسی (T)	
۳٫۲۲	۱۰٫۵۰	۱۶٫۱	۰٫۷	بخش مدوله‌ساز
۰٫۳۱	-	-	۳٫۰	بخش پراکننده
۱۷٫۰۰	۷٫۲۴	۱۱٫۱	۰٫۷	بخش تابش‌گر برای هماهنگ سوم
۱۷٫۰۰	۶٫۱۱	۹٫۴	۰٫۷	بخش تابش‌گر برای هماهنگ پنجم



شکل ۲. تغییرات توان خروجی از بخش تابش‌گر بر حسب طول نوسان‌ساز برای هماهنگ‌های سوم و پنجم.

در این صورت حداکثر طول بخش تابش‌گر ۴٫۵ متر خواهد بود که معادل توان‌های ۵۴ MW و ۲۵ MW به ترتیب برای هماهنگ‌های سوم و پنجم است.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله قابلیت الحاق طرح تابش سینکروترونی لیزر الکترون آزاد به مجموعه حلقه انبساط چشمه نور ایران برای تولید هماهنگ‌های همدوس مورد بررسی قرار گرفت. در مورد هسته تابشی انتخاب شده در این تحقیق، که لیزری با توان ۲٫۵ GW در طول موج ۲۶۰ nm است، نشان داده شد که ساختار کلاسترون نوری می‌تواند تابش‌های لیزری خودتقویت شونده‌ای در هماهنگ‌های سوم و پنجم هسته اولیه و به ترتیب با حداکثر توان‌های ۳۲۰ MW و ۶۰ MW در طول‌های ۱۷ و ۱۰ متر تولید کند. با توجه به کاهش توان خروجی با افزایش هماهنگ مورد استفاده انتظار می‌رود هماهنگ‌های مرتبه بالاتر دارای توان‌های پایین‌تری باشند که در این تحقیق مورد مطالعه قرار نگرفت ولی ممکن است در زمینه‌های کاربردی مشخصی

محاسبه توان خروجی لیزر می‌پردازیم. با وارد کردن این مقادیر به عنوان ورودی، نمودار توان خروجی بر حسب طول ناحیه تابش‌گر مطابق شکل ۲ به دست می‌آید.

همان گونه که از این شکل مشاهده می‌شود، برای هماهنگ سوم (طول موج ۸۷ nm) توان خروجی می‌تواند به مقدار بیش از ۳۰۰ MW برسد. این توان اگرچه در مقایسه با توان لیزر اولیه کمتر است (تقریباً ۱۲٪ توان لیزر هسته) ولی باید دقت داشت که این توان در طول موجی بسیار پایین‌تر و مربوط به ناحیه پرتوی ایکس نرم به دست آمده است.

تکرار محاسبات برای هماهنگ پنجم (طول موج ۵۲ nm) نشان می‌دهد که حداکثر توان حاصل در این حالت حدود ۶۰ MW خواهد بود که در طول حدود ۱۰ متری از طول نوسان‌ساز به اشباع می‌رسد. در این حالت هم ملاحظه می‌شود که توان خروجی به بهای کاهش بیشتر طول موج، کاهش یافته است.

همان گونه که قبل از این یادآوری شد، در عمل امکان استفاده از این حداکثر توان‌های خروجی پیش‌بینی شده میسر نیست. به عنوان مثال، اگر طول کل مجموعه ۸ متر فرض شود

مورد توجه باشند.

پوشش دهد. در گزارش‌های اخیر که ناظر بر بازطراحی دستگاه است، با وجود این که به علت افزایش شعاع حلقه امکان افزایش طول ناحیه‌های مستقیم فراهم بوده است ولی متأسفانه این طول‌ها به حدود ۵ متر کاهش یافته است که عملاً امکان الحاق یک دستگاه تابش سینکروترونی لیزر الکترون آزاد مؤثر و مفید را از بین می‌برد. از این رو پیشنهاد می‌شود که در این تصمیم‌بازنگری شود تا این قابلیت ویژه که مستقیماً در ارتباط با هدف اصلی مجموعه، یعنی دسترسی به تابش سینکروترونی نسل سوم است نیز لحاظ گردیده باشد. در این رابطه این نکته شایان ذکر است که تابش همدوس سینکروترونی در ناحیه طیفی پرتوی ایکس نرم، از نوعی که در این پژوهش به دست آمده است، در متهی‌الیه نسل سوم و آغاز نسل چهارم تابش سینکروترونی قرار دارد که کاربردهای بسیار مفید و پراهمیتی را می‌توان برای آن متصور شد.

از آنجایی که توان خروجی لیزر قبل از اشباع به صورت نمایی با طول ناحیه برهم‌کنش افزایش می‌یابد، استفاده بهینه از این ساختار مستلزم وجود فضای کافی برای پوشش دادن طول مورد نیاز است. با وجود این، محدودیت ذاتی حلقه‌های انبارش برای در اختیار گذاشتن مسیر مستقیم این استفاده بهینه را محدود می‌سازد. در عین حال از آنجایی که چشمه نور ایران هنوز در مرحله طراحی اولیه قرار دارد انتظار می‌رود در طراحی‌های پیشنهادی ساختار حلقه انبارش این نیاز هم مورد توجه ویژه قرار داشته باشد. در طرح اولیه مجموعه، چنان که در گزارش طراحی مفهومی سال ۱۳۹۱ آن آمده است [۱]، بخش‌های مستقیمی به طول ۸ متر در نظر گرفته شده بود که می‌توانست به ترتیب حدود ۱۷٪ و ۴۱٪ حداکثر توان خروجی هماهنگ‌های سوم و پنجم را

مراجع

۱. «گزارش طراحی مفهومی چشمه نور ایران»، پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، خرداد (۱۳۹۷).
۲. ج رحیقی و همکاران، مجله پژوهش فیزیک ایران ۱۵، ۲ (۱۳۹۴) ۱۵۹.
۲. J Rahighi et al., *Iranian J. Phys. Res*, **15**, 2 (2015) 159.
۳. ا غلام‌پور آذیر و همکاران، مجله پژوهش فیزیک ایران ۱۵، ۲ (۱۳۹۴) ۱۹۷.
۳. A Gholampour Azhir et al., *Iranian J. Phys. Res.* **15**, 2 (2015) 197.
۴. H Ghasem, F Saeidi, and E Ahmadi, *Journal of Instrumentation* **8** (2013) P02023.
۵. E L Saldin, E A Schneidmiller, and M V Yurkov, *The Physics of Free Electron Lasers*, Springer, New York (2000).
۶. G De Ninno et al., *Phys. Rev. Lett.* **101**, 5 (2008) 053902.
۷. A Raghavi, H Shafeghat, and M R Benam, *Optik-International Journal for Light and Electron Optics* **174** (2018) 542.
8. C Spezzani et al., *Nucl. Instr. and Meth. A* **596**, 3 (2008) 451.
9. M Labat et al., "Coherent Harmonic Generation Experiment on Uvsor-ii Storage Ring", Proceedings of FEL 2006, BESSY, Berlin, Germany (2006).
10. M Marsi et al., *Surf. Rev. Lett.* **9** (2002) 599.
11. G S Edwards et al., *Photochem. and Photobio* **81**, 4 (2005) 711.
12. J M J Madey, *J. Appl. Phys.* **42**, 5 (1971) 1906.
13. W Becker and J K Mc Iver, *Journal De Physique*, **44** (1983) 289.
14. L Friedland and I B Bernstein, *Phys. Rev. A* **26**, 5 (1982) 2778.
15. H P Freund, *Phys. Rev. A* **27**, 4 (1983) 1977.
16. R Bonifacio et al., *Riv. Nuovo Cimento* **13**, 9 (1990) 1.
17. S Reiche, "Numerical Studies for a Single Pass High Gain Free-Electron Laser", PhD Thesis, Hamburg University (1999).
18. S Reiche, *Nucl. Instrum. and Meth.* **429**, 1-3 (1999) 243.
19. H Ghasem, E Ahmadi, and F Saeidi, "Lattice Design History of the Iranian Light Source Facility Storage Ring", International Particle Accelerator Conference (2014).