

طراحی و ساخت پیش تزریق‌گر الکترون چشمه نور ایران

آرش صادقی پناه، خورشید سرحدی و جواد رحیقی

پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، طرح چشمه نور ایران

چکیده

هر شتابگر سنکروترون نیاز به یک پیش تزریق‌گر الکترون برای تزریق اولیه ذرات به حلقه بوستر دارد. پیش تزریق‌گر الکترون چشمه نور ایران یک شتابگر خطی باند S به همراه یک تفنگ الکترونی بسامد رادیویی با کاتد گرمایونی است. در این مقاله طراحی شبکه این پیش تزریق‌گر و محاسبات دینامیک باریکه آن به همراه طراحی تفنگ الکترونی بسامد رادیویی، مغناطیس آلفا، مغناطیس‌های چهار قطبی و ساختارهای شتابگر خطی شرح داده شده‌اند. نتایج اندازه‌گیری بر روی قطعات تفنگ الکترونی بسامد رادیویی ساخته شده در کشور، خطای ابعاد کمتر از $20 \mu\text{m}$ و صافی سطح با خطای کمتر از $0.8 \mu\text{m}$ را نشان می‌دهد که اندازه‌گیری‌های کم توان بسامد رادیویی نیز این نتایج را تایید می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: پیش تزریق‌گر، تفنگ الکترونی بسامد رادیویی، دینامیک باریکه، مغناطیس آلفا

۱. مقدمه

چشمه نور ایران (ILSF)^۱، یک شتابگر سنکروترون با درخشندگی^۲ زیاد در دست ساخت در پژوهشگاه دانش‌های بنیادی (IPM) است. این مجموعه شتاب‌دهنده شامل یک حلقه انبارش^۳ الکترون با انرژی ۳ GeV، یک تزریق‌گر بوستر و یک پیش تزریق‌گر با انرژی ۱۵۰ MeV است [۱].

مشخصات پیش تزریق‌گر الکترون، که در جدول ۱ ارائه شده‌اند، اولین عامل تضمین‌کننده تزریق بهینه الکترون‌ها به حلقه انبارش چشمه نور ایران است. پراکنندگی انرژی و

گسیلندگی^۴ دسته‌های الکترون از مهم‌ترین این مشخصات هستند که با دقت با پارامترهای ورودی حلقه بوستر تطبیق داده شده‌اند.

۲. طراحی شبکه پیش تزریق‌گر الکترون

شکل ۱ طرح کلی شبکه پیش تزریق‌گر الکترون چشمه نور ایران را نمایش می‌دهد. در این شبکه یک تفنگ الکترونی بسامد رادیویی با کاتد گرمایونی وظیفه تولید و شتاب‌دهی اولیه الکترون‌ها و نیز دسته سازی اولیه آن‌ها را بر عهده دارد. دسته‌های الکترون پس از خروج از این تفنگ، ۲/۶ MeV انرژی

۱. Iranian Light Source Facility

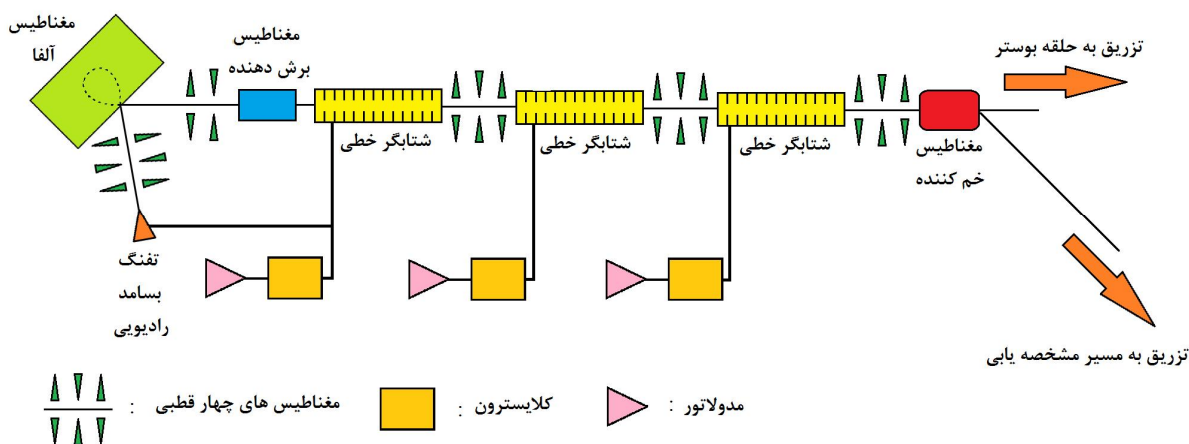
۲. Brightness

۳. Storage ring

۴. Emittance

جدول ۱. مشخصات عملکرد پیش تزریق گر الکترون چشمه نور ایران.

$> 150 \text{ MeV}$	انرژی
2856 MHz	بسامد کاری
2 Hz	آهنگ تکرار
$< 0.5\% \text{ (RMS)}$	پراکندگی انرژی
$< 25 \pi \text{ mm-mrad}$	گسیلندگی نرمالیزه
$1 \mu\text{s}$	عرض پالس چند دسته‌ای ^۱
2 nC	بار الکتریکی چند دسته‌ای
$< 1 \text{ ns}$	عرض پالس تک دسته‌ای ^۲
$> 300 \text{ pC}$	بار الکتریکی تک دسته‌ای



شکل ۱. طرح کلی شبکه پیش تزریق گر الکترون چشمه نور ایران.

می‌کنند. طراحی هر یک از اجزای این شبکه در ادامه این مقاله به طور کامل تشریح شده است و در پایان پارامترهای دینامیک باریکه الکترون پیش تزریق گر محاسبه و بررسی شده است.

۳. تفنگ الکترونی بسامد رادیویی

تفنگ الکترونی بسامد رادیویی یک چشمه مدرن الکترون تشکیل شده از یک گسیل کننده الکترون (کاتد) است که در میدان‌های بسامد رادیویی داخل یک کاواک با بدنه فلزی قرار داده شده است. الکترون‌های خارج شده از سطح کاتد تحت میدان‌های بسامد رادیویی شتاب گرفته و به صورت دسته‌ای از تفنگ خارج می‌شوند. فرایند دسته‌سازی الکترون‌ها نیز توسط

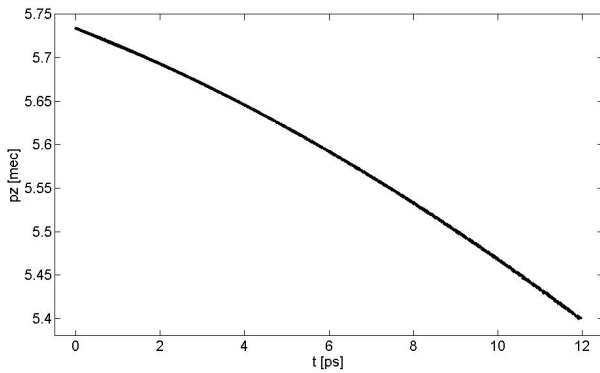
خواهند داشت. پس از آن یک مغناطیس آلفا دسته‌های الکترون خارج شده از تفنگ را در راستای طولی فشرده می‌کند تا برای تزریق به شتابگرهای خطی فشرده‌گی فاز مناسب را به دست آورند. یک مغناطیس برش دهنده پس از مغناطیس آلفا قرار داده شده است تا برای عملکرد در حالت تک دسته‌ای، برش مناسب از باریکه خروجی تفنگ الکترونی را به شتابگرهای خطی انتقال دهد. پس از آن الکترون‌ها به مجموعه‌ای از سه شتابگر خطی الکترون تزریق شده که در هر یک پس از افزایش انرژی 50 MeV به انرژی نهایی 150 MeV می‌رسند و از آنجا به حلقه بوستر و یا مسیر مشخصه‌یابی باریکه تزریق شوند. شتابگرهای خطی و نیز تفنگ الکترونی بسامد رادیویی توسط مجموعه‌ای از کلاسترون‌ها و مدولاتورها تغذیه می‌شوند. مغناطیس‌های چهار قطبی نیز در طول مسیر گسترده‌گی عرضی باریکه را کنترل

۱. Multi bunch

۲. Single bunch

جدول ۲. مشخصه‌های بسامد رادیویی تفنگ الکترونی چشمه نور ایران.

۱۳۲۰۰	ضریب کیفیت (بدون بار گذاری)
۸۶٫۲ MΩ/m	امپدانس شانت
۰٫۷۴	فاکتور زمان گذر ^۱

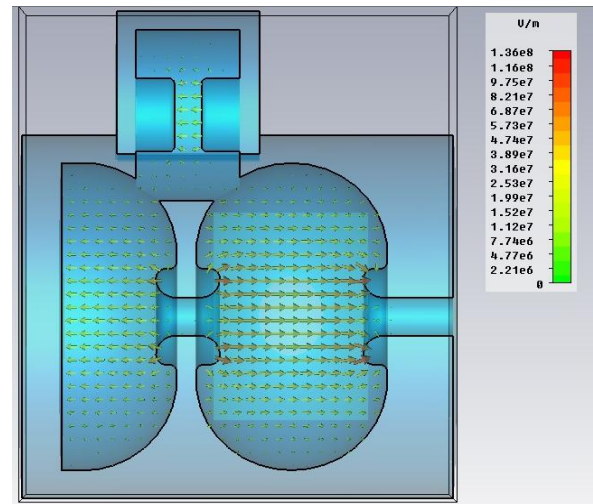


شکل ۳. اندازه حرکت نرمالیزه بر حسب زمان برای یک دسته الکترون خروجی تفنگ الکترونی بسامد رادیویی چشمه نور ایران.

الکترونی درون آن را نمایش می‌دهد. این تفنگ از یک و نیم کاواک موج ایستا تشکیل شده که در مد $\frac{\pi}{4}$ عمل می‌کند و یک کاواک کناری نیز برای تزویج موج بین کاواک‌ها قرار داده شده است. برای کاهش اثر بمباران الکترون‌های برگشتی بر روی کاتد، دامنه میدان الکترونیکی نیم کاواک اول تنها ۳۰٪ دامنه میدان الکترونیکی کاواک دوم است.

جدول ۲ مشخصه‌های بسامد رادیویی این تفنگ را نمایش می‌دهد. شکل ۳ نیز نتیجه شبیه سازی دینامیک باریکه برای یک دسته الکترون خارج شده از این تفنگ را برای توان بسامد رادیویی ورودی ۴ MW نمایش می‌دهد. در این شکل اندازه حرکت نرمالیزه به اندازه حرکت سکون یک الکترون بر حسب زمان نشان داده شده است. از آنجا که دنباله کم انرژی دسته الکترون به انتهای پیش تزریق گر نرسیده و در فیلتر انرژی مغناطیسی آلفا حذف خواهد شد، در نمودار از آن صرف نظر شده است.

پس از پایان طراحی‌های الکترومغناطیسی و دینامیک باریکه، طراحی مکانیکی یک نمونه اولیه از تفنگ بسامد



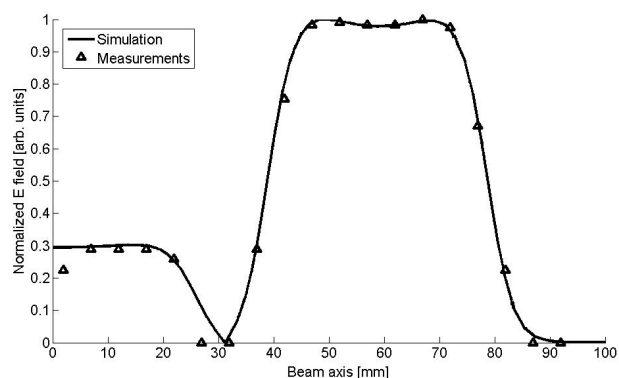
شکل ۲. میدان‌های الکترونیکی در مدل سه بعدی تفنگ الکترونی بسامد رادیویی.

تغییرات میدان الکترونیکی بسامد رادیویی انجام می‌پذیرد. مزیت عمده این نوع تفنگ به تفنگ‌های متداول الکترواستاتیک انرژی بسیار بیشتر الکترون‌های خروجی و در نتیجه آن گسیلندگی بسیار کمتر باریکه الکترون خروجی است.

به منظور دستیابی به درخشندگی زیاد در باریکه پیش تزریق گر چشمه نور ایران و برای استفاده از طراحی و تکنولوژی‌های مدرن و به روز، از تفنگ الکترونی بسامد رادیویی در پیش تزریق گر چشمه نور ایران استفاده خواهد شد. از آنجا که تفنگ الکترونی باید با آهنگ تکرار برابر با آهنگ تکرار حلقه بوستر (۲ Hz) عمل کند، سیستم لیزری که بتواند با این نرخ تکرار کاتد را راه اندازی کند بسیار پیچیده و گران قیمت خواهد بود. به علاوه کاتد گرمایونی انعطاف پذیری بهتری برای عملکرد در حالت‌های تک‌دسته‌ای و چند دسته‌ای دارد. به همین دلیل کاتد گرمایونی به عنوان گسیل گر الکترون برای تفنگ الکترونی پیش تزریق گر الکترون چشمه نور ایران انتخاب شد.

شبیه سازی‌های الکترومغناطیسی تفنگ الکترونی با کدهای SUPERFISH و CST Microwave Studio و شبیه سازی دینامیک باریکه آن با کد SPIFFE انجام گرفته است [۲-۴]. شکل ۲ مدل سه بعدی تفنگ الکترونی بسامد رادیویی طراحی شده برای پیش تزریق گر الکترون چشمه نور ایران و میدان‌های

^۱. Transit time factor



شکل ۵. مقادیر شبیه سازی شده و اندازه گیری شده برای میدان الکتریکی بر روی محور باریکه تفنگ الکترونی بسامد رادیویی.



شکل ۴. نمونه اولیه تفنگ الکترونی بسامد رادیویی ساخته شده در چشمه نور ایران.

مسیر طولانی تری نسبت به الکترون های کم انرژی انتهای دسته طی کرده و از این رو تمامی الکترون ها هم زمان به انتهای مغناطیس آلفا می رسند. شکل ۶ مغناطیس آلفای طراحی شده در چشمه نور ایران و مسیر ذرات با انرژی های مختلف در این مغناطیس را نمایش می دهد. طراحی این مغناطیس به کمک کدهای POISSON [۲] و RADIA [۶] انجام گرفته و آماده ساخت است. گرادیان این مغناطیس برابر با 300 G/cm و عمق آن 20 cm است. پس از طراحی مغناطیس آلفا، محاسبات دینامیک باریکه برای اطمینان از عملکرد بهینه آن به وسیله کد ELEGANT انجام گرفت [۷]. شکل ۷ فشرده سازی طولی دسته الکترون خارج شده از تفنگ الکترونی به وسیله مغناطیس آلفا را نمایش می دهد.

۵. مغناطیس های چهار قطبی

مغناطیس چهار قطبی طراحی و ساخته شده در طرح چشمه نور ایران برای پیش تزریق گر الکترون در شکل ۸ نشان داده شده است. این مغناطیس دارای طول مؤثر 7.845 cm و حداکثر گرادیان 6 T/m بوده و با هوا خنک می شوند. یازده عدد از این مغناطیس ها در طول شبکه پیش تزریق گر الکترون به کار گرفته شده اند (شکل ۱) و گرادیان مورد نیاز برای هر یک از آنها در محاسبات دینامیک باریکه با کد ELEGANT به دست آمده است (جدول ۳). اعداد منفی در این جدول نشان دهنده مغناطیس های واگرا هستند.

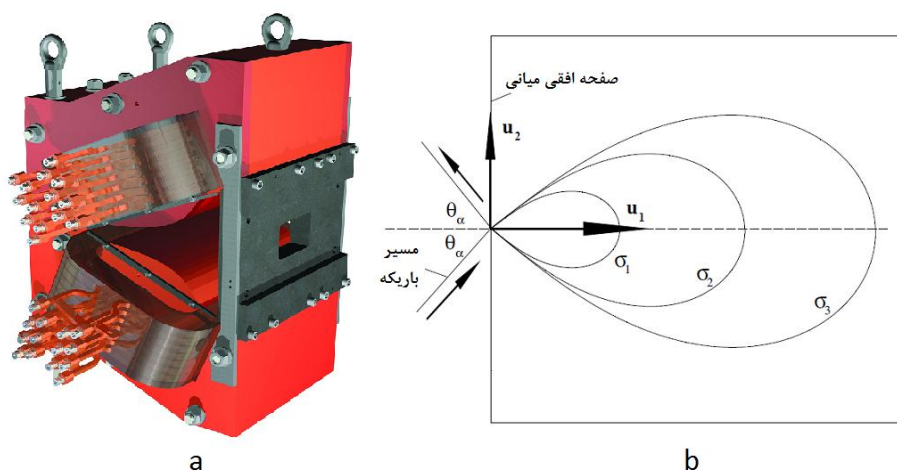
رادیویی انجام گرفته و نمونه اولیه این تفنگ در چشمه نور ایران ساخته شد (شکل ۴). بسامد تشدید این ساختار 2859 MHz (بدون بار گذاری) است که حدود 1 MHz با تغییر دما قابل تنظیم بوده و ضریب کیفیت آن نیز برابر 6150 (بدون بار گذاری) است. اندازه گیری های اپتیکی^۱ و زبری سنجی^۲ نیز بر روی قطعات انجام گرفت و اختلاف ابعاد از طراحی حداکثر برابر $20 \mu\text{m}$ و زبری سطح نیز کمتر از $0.8 \mu\text{m}$ اندازه گیری شد. شکل ۵ مقادیر شبیه سازی شده و اندازه گیری شده (به روش مبتنی بر حرکت ساچمه [۵]) برای میدان الکتریکی بر روی محور باریکه این تفنگ الکترونی را نمایش می دهد. انطباق خوب نتایج اندازه گیری های انجام شده و شبیه سازی نشان می دهد که توان ساخت این قطعات با دقت و کیفیت لازم در کشور موجود است.

۴. مغناطیس آلفا

پراکندگی طولی دسته های الکترون خارج شده از تفنگ بسامد رادیویی برای تزریق به شتابگرهای خطی بسیار زیاد است (شکل ۳). برای فشرده سازی طولی این دسته ها، از یک مغناطیس آلفا استفاده می شود. این مغناطیس الکترون های با انرژی مختلف را بر روی مسیرهای با طول مختلف حرکت می دهد. به این ترتیب که الکترون های پر انرژی ابتدای دسته

۱. Optic Measuring Machine, OMM

۲. Roughness meter



شکل ۶. مغناطیس آلفای طراحی شده برای چشمه نور ایران (a) و مسیر ذرات با انرژی‌های مختلف در این مغناطیس (b).

جدول ۳. گرادیان مغناطیس‌های چهار قطبی به ترتیب از ابتدا تا انتهای شبکه پیش تزریق گر بر حسب T/m.

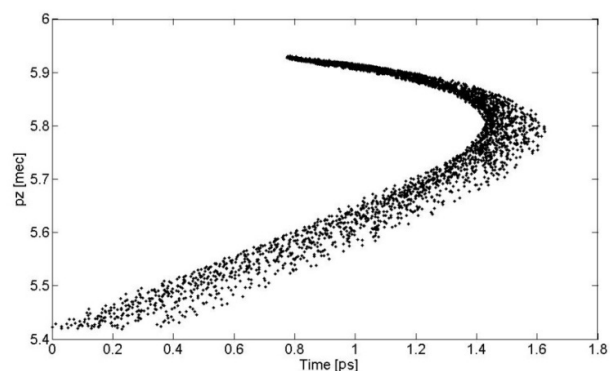
Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11
۰٫۴۳۴	-۰٫۶۳۲	۰٫۳۹۵	۰٫۵۱۳	-۰٫۳۱۶	۰٫۱۴۲	-۰٫۲۰۷	۰٫۱۰۳	۰٫۲۳۷	-۰٫۳۵۶	۰٫۳۹۵



شکل ۸. مغناطیس چهار قطبی طراحی و ساخته شده برای پیش تزریق گر الکترون چشمه نور ایران.

شده و محاسبات دینامیک باریکه برای کل شبکه پیش تزریق گر الکترون چشمه نور ایران انجام گرفته است. شکل ۹ فضای فاز عرضی و طولی دسته الکترون در انتهای پیش تزریق گر الکترون را نمایش می‌دهد. لازم به ذکر است فضای فاز عرضی در هر دو راستا یکسان است.

مشخصات خروجی نهایی به دست آمده برای پیش تزریق گر الکترون در جدول ۴ نمایش داده شده است.

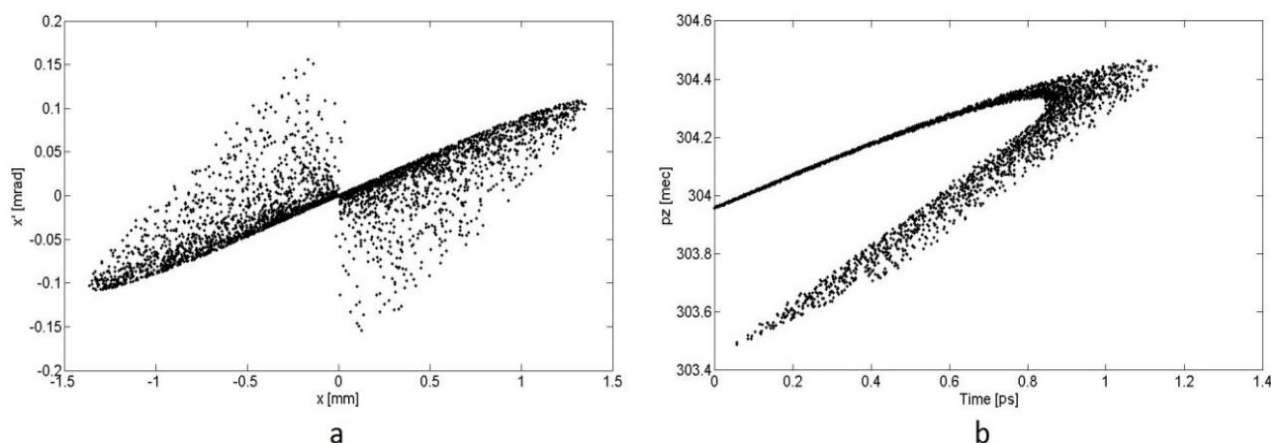


شکل ۷. فشرده سازی طولی دسته الکترون خارج شده از تفنگ الکترونی به وسیله مغناطیس آلفا.

۶. شتابگرهای خطی

شتابگرهای خطی انتخاب شده برای پیش تزریق گر الکترون چشمه نور ایران از نوع موج رونده با گرادیان ثابت هستند که در بسامد ۲۸۵۶ MHz و در مد $\frac{2\pi}{3}$ کار می‌کنند و هر یک ۳/۴ m طول و گرادییانی در حدود ۱۷ MV/m دارند. این شتابگرها به شکل تجاری از کشورهای دیگر قابل خریداری است. توان بسامد رادیویی ۲۵ MW برای شتاب‌هی ۵۰ MeV در ورودی هر یک از این سه شتابگر مورد نیاز است.

مدل مناسب از این شتابگرها نیز در کد ELEGANT ایجاد



شکل ۹. فضای فاز عرضی (a) و طولی (b) دسته الکترون در انتهای پیش تزریق گر.

جدول ۴. مشخصات دسته الکترون خارج شده از پیش تزریق گر الکترون چشمه نور ایران.

۱۰۰ pC	بار الکتریکی
۱۵۴٫۸ MeV	متوسط انرژی
٪۰٫۰۶	پراکندگی انرژی (RMS)
۰٫۵ mm	پوش عرضی دسته (rms، هر دو راستا)
6π mm-mrad	گسیلندگی عرضی نرمالیزه (هر دو راستا)
۱٫۱ ps	پراکندگی طولی

قطعات شتابگرهای بسامد رادیویی با دقت مورد نیاز است.

سپاسگزاری

چشمه نور ایران از کمک‌ها و راهنمایی‌های هلموت ویدمن^۱ و دیتر آینفلد^۲ در کلیه مراحل طراحی شبکه پیش تزریق گر الکترون صمیمانه سپاسگزار است. از اعضای گروه مکانیک طرح چشمه نور ایران نیز برای همکاری در طراحی و ساخت قطعات پیش تزریق گر الکترون کمال تشکر را داریم.

۷. خلاصه و نتیجه گیری

پیش تزریق گر الکترون چشمه نور ایران به طور کامل طراحی شده و مشخصات نهایی به دست آمده از آن در تطبیق کامل با پارامترهای ورودی حلقه بوستر است که تزریق بهینه باریکه الکترون به حلقه انبارش را نتیجه خواهد داد. ساخت و آزمایش اجزای طراحی شده برای این پیش تزریق گر در دستور کار چشمه نور ایران قرار دارد. از جمله ساخت تفنگ الکترونی بسامد رادیویی که اندازه گیری‌های انجام شده بر روی نمونه اولیه آن نشان دهنده توان کشور در ساخت

مراجع

- USA, June (1992).
5. L C Maier and J C Slater, *Journal of Applied Physics*, **23** (1952).
6. "RADIA Documentation", ESRF (2006).
7. Michael Borland, "ELEGANT: A Flexible SDDS-Compliant Code for Acceleration Simulation", Advanced Photon Source LS-287, USA, September (2000).

1. H Ghasem et al., *Journal of Instrumentation*, **8** (2013).
2. J H Billen and L M Young, "Poisson's Superfish Manual", Los Alamos National Laboratory, USA (2006).
3. "CST Microwave Studio Tutorial", CST GmbH (2006).
4. Michael Borland, "Summary of Equations and Methods Used in SPIFFE", APS/IN/LINAC/92-2,

^۱. Helmut Wiedemann, Professor Emeritus, Stanford University, Applied Physics Department.

^۲. Dieter Einfeld, MAX IV Laboratory, Lund University, Sweden