بررسی چگونگی تغییرات مد های تشدید با افزایش تعداد کاواک ها در تیوب اصلی شتابدهنده خطی الکترون

فرشاد قاسمی، فریدون عباسی دوانی*، ساسان احمدیان

دانشگاه شهید بهشتی- دانشکده مهندسی هسته‌ای- گروه کاربرد پرتوها

چکیده:

تیوب شتابدهنده خطی الکترون از مجموعه کاواک‌هایی که از کنار هم قرار گرفتن صفحه‌ها و حلقه‌ها ساخته می‌شوند، تشکیل شده است. حرکت موج در تیوب شتابدهنده در مدهای نوسانی متفاوتی امکان‌پذیر است . طراحی ابعاد کاواک‌های این مقاله به‌گونه‌ای است که فرکانس مطلوب ۲۹۹۸ MHz، منطبق بر مد $\frac{\pi}{2}$ باشد. در این پژوهش با افزایش تعداد کاواک‌ها توسط کد Superfish از مقدار اولیه ۳تایی تا تعداد ۳۶تایی چگونگی تغییرات مدهای تشدید آن‌ها که در انتخاب دقت فرکانسی مولد بکار رفته حائز اهمیت است، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که؛ باافزایش تعداد کاواک‌ها، به تعداد فرکانس‌های تشدید در محدوده باند فرکانسی اضافه می‌گردد و فرکانس‌های تشدید مدهای نزدیک به مد $\frac{\pi}{2}$ به اندازه MHz (۱-۳) با فرکانس این مد فاصله دارند.

کلید واژه: شتابدهنده خطی الکترون، کاواک، موج رونده و ایستا، مد نوسانی، کد Superfish

مقدمه:

یک شتابدهنده خطی را می‌توان بصورت ماشینی که ذرات را در یک مسیر خطی شتاب می‌دهد در نظر گرفت. شتابدهنده‌های خطی، ذرات را بوسیله میدان‌های ناشی از فرکانس رادیویی شتاب می‌دهند. امروزه شتابدهنده‌های خطی الکترون کاربرد فراوانی در مقاصد صنعتی، پزشکی و تحقیقاتی دارند، که در این میان می‌توان به رادیوگرافی صنعتی، درمان سرطان، تولید رادیو داروها، سترون‌سازی تجهیزات پزشکی، فیزیک کاربردی وغیره اشاره کرد[۱].

تاکنون پیشرفت‌های زیادی در ساخت قطعات مختلف مورد استفاده در شتابدهنده‌های خطی، حاصل شده است. در ایران نیز (تا این تاریخ) تلاش‌هایی برای رسیدن به ساخت سیستم کامل شتابدهنده خطی آغاز گردیده است. پژوهش صورت گرفته بر روی کاواک‌های[۲] شتابدهنده خطی الکترون که در این مقاله ارائه شده است نیز در این راستا می باشد.

اساساً دو نوع شتابدهنده‌های خطی الکترون موج‌رونده و موج‌ایستا وجود دارند. هرکدام از این دو نوع دارای مزایا و معایبی هستند. در شتابدهنده موج رونده، موج الکترومغناطیسی تنها در یک جهت حرکت می‌کند. در حالی که در نوع موج ایستا، موج الکترومغناطیسی در جهت‌های رفت و برگشت حرکت می‌کند[۲]. یکی از قسمت‌های اصلی در هر دو نوع شتابدهنده، مجموعه‌ای از کاواک‌های به هم پیوسته است که به آن تیوب اصلی شتابدهنده گویند. انرژی الکترومغناطیسی در هر کاواک منفرد به طور سینوسی در فرکانسی برابر

---

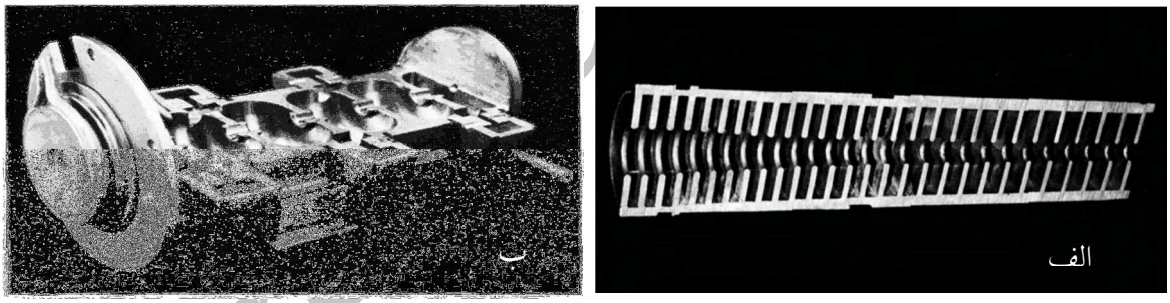
[۲] cavity

Archive of SID
www.SID.ir

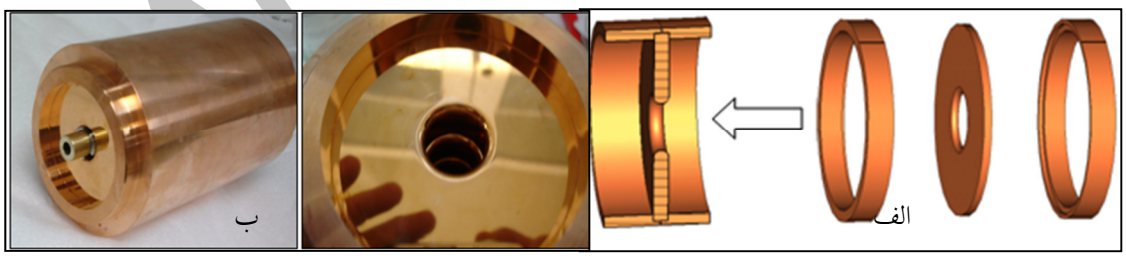
فرکانس تشدید شتابدهنده نوسان می‌کند. بازدهی انتقال توان RF ورودی به انرژی الکترون عبوری از گپ‌ها در شتابدهنده‌های نوع موج ایستا دو برابر شتابدهنده‌های نوع موج رونده است[۲]. شکل۱ تیوب اصلی این دو ساختار را نشان می‌دهد. از انواع شتابدهنده خطی، شتابدهنده الکترون از نوع موج رونده (شکل۱-الف)، نوع مورد نظر در این مقاله است.

مجموعه کاواک‌ها از کنار هم قرار گرفتن صفحه‌ها و حلقه‌ها تشکیل می‌شوند. روش‌های مختلفی برای پیاده سازی مجموعه کاواک‌ها بکار برده می‌شود. تجربه ما (دانشگاه شهید بهشتی) در ساخت کاواک‌ها به دو صورت "حلقه و صفحه مجزا" و به صورت "یکپارچه" است. این در حالی است که در هر روش سطح صفحه‌ها و سطح داخلی حلقه‌ها از صافی سطح مناسب و صیقلی بودن برخوردارند. شکل۲-الف مدل سه بعدی یک کاواک را نشان می‌دهد. به مجموعه دو نیم حلقه و یک صفحه که در وسط آن‌ها قرار می‌گیرد یک کاواک اتلاق می‌گردد. شکل۲-ب نیز تیوب متشکل از ۸ کاواک را که در دانشگاه شهید بهشتی ساخته شده است، نشان می‌دهد.

حرکت موج در تیوب شتابدهنده که دارای ساختاری تکرار شونده است، در مدهای نوسانی متفاوتی امکان-پذیر است. اصطلاح مد نوسانی برای توصیف الگوی میدان در کاواک‌های مجزای یک ساختار چند کاواکی بکار می‌رود. در اینجا برای توصیف مد نوسانی از اختلاف فاز یک کاواک نسبت به کاواک مجاور استفاده می‌کنیم. برای نمونه، مد صفر، به مد یک ساختار چند کاواکی اشاره می‌کند که در آن هر کاواک نسبت به کاواک مجاور خود صفر درجه اختلاف فاز دارد. یک مد مهم برای ساختار شتابدهنده خطی، مد $\frac{\pi}{2}$ می‌باشد که از هر سلول به سلول مجاور ۹۰ درجه اختلاف فاز وجود دارد. این مد از نقطه نظر پایداری خیلی خوب آن در مقایسه با سایر مدها برتری دارد[۳].



شکل۱: تیوب اصلی شتابدهنده خطی: الف-موج رونده، ب-موج ایستا[۱]



شکل۲: الف- ساختمان یک کاواک به صورت حلقه و صفحه مجزا و ب- تیوب ساخته شده با ۸ کاواک در دانشگاه شهید بهشتی[۲]

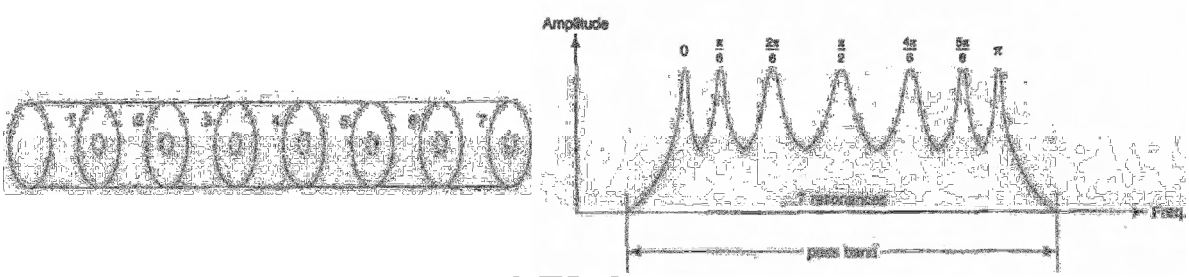
در واقع، دراندازه‌گیری پاسخ فرکانسی تیوب شتابدهنده موج‌رونده، به تعداد کاواک‌ها، شاهد قله‌های تشدید هستیم[۱]. رابطه۱، ارتباط تشدیدها با تعداد کاواک‌ها را نشان می‌دهد و در آن N نشاندهنده تعداد کاواک‌ها است و $n = 0,1,2,...,N$ شکل۳ این موضوع را نشان می دهد.

www.SID.ir

$$\text{تشدیدها} = \frac{n}{N-1}\pi \qquad (۱)$$

یکی از راه‌های درک چنین رفتاری، مدل کردن کاواک‌ها با مدارهای الکتریکی و استفاده از سلف،خازن و مقاومت است. با این مدل‌سازی و داشتن رابطه تغییرات میزان سلف، خازن و مقاومت با ابعاد کاواک‌ها براحتی می‌توان به میزان وابستگی فرکانس به این ابعاد و تعداد تشدیدها، پی‌برد. (به مرجع[۱] مراجعه کنید).

فرکانس مطلوب ما که کلیه طراحی‌ها برای آن صورت گرفته است حدود ۲۹۹۸ مگا هرتز می‌باشد. نکته مهم آن است که، با افزایش تعداد کاواک‌ها شاهد افزایش تعداد فرکانس‌های تشدید خواهیم بود. یک مسئله مهم در این رابطه، درک چگونگی تغییرات مدهای تشدید با افزایش تعداد کاواک‌هاست که در این مقاله به بررسی این موضوع پرداخته‌ایم.



شکل۳: قله‌های تشدید سری کاواک های هفت‌تایی در باند عبور آن‌ها [۱]

روش کار:

طراحی ابعاد کاواک‌ها به‌گونه‌ای است که فرکانس مطلوب ۲۹۹۸، منطبق بر مد$\frac{\pi}{2}$ باشد. با افزایش تعداد کاواک‌ها شاهد نزدیکی مدهای تشدید خواهیم بود. باید بدانیم که فاصله میان این مدها با افزایش تعداد کاواک‌ها چگونه تغییر می‌کند. برای این منظور از کد Superfish استفاده می‌کنیم و با افزایش تعداد کاواک ها از مقدار اولیه ۳ تایی تا تعداد ۳۶تایی به شبیه‌سازی مجموعه کاواک‌ها و چگونگی تغییرات مدهای تشدید آن‌ها می‌پردازیم.

Superfish مجموعه‌ای از کدها برای محاسبه میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی ساکن و میدان‌های الکترومغناطیس بسامد رادیویی در مختصات دو بعدی کارتزین یا مختصات سه بعدی استوانه‌ای با تقارن محوری می‌باشد[۴]. در اینجا پژوهش از کد Poisson Superfish نسخه LA-UR-96-1834 استفاده گردیده است. بیشترین کاربرد Superfish برای یافتن مدهای شتابدهندگی یک کاواک شتاب دهنده متقارن استوانه‌ای است. کدهای حل کننده مسایل الکترومغناطیس در Superfish برای محاسبه فرکانس و میدان تا زمانی که یک مد تشدید پیدا کنند، تکرار می‌شوند.

Archive of SID
www.SID.ir

قدم اول نوشتن برنامه یا همان ورودی کد برای کاواک‌های ۳ تایی و ۳۶ تایی است. هدف از انتخاب این دو عدد تصمیمی است که برای ساخت تیوبی با این تعداد کاواک گرفته شده است. تابعی که در کد Superfish برای مدها تعریف شده، به صورت رابطه۲ است[۵] :

$$D(K^2) = KC\frac{\int H.Kdv}{\int \varepsilon H^2 dv} \equiv R(K^2) - K^2C^2 \qquad K = \frac{\omega}{C} = \frac{2\pi f}{C} \qquad (۲)$$

تشدید هنگامی اتفاق می افتد که $D(K^2)=0$ باشد در این صورت $R(K^2)=K^2C^2=\omega^2$ است. این تساوی بر یکسان بودن انرژی ذخیره شده در میدان های الکتریکی و مغناطیسی در فرکانس تشدید دلالت دارد.

$D(K^2)=0$ شرط لازم برای تشدید درون کاواک‌ها است اما کافی نیست و باید برای پیدا کردن فرکانس تشدید و مد مورد نظر رابطه زیر را نیز داشته باشیم[۵].

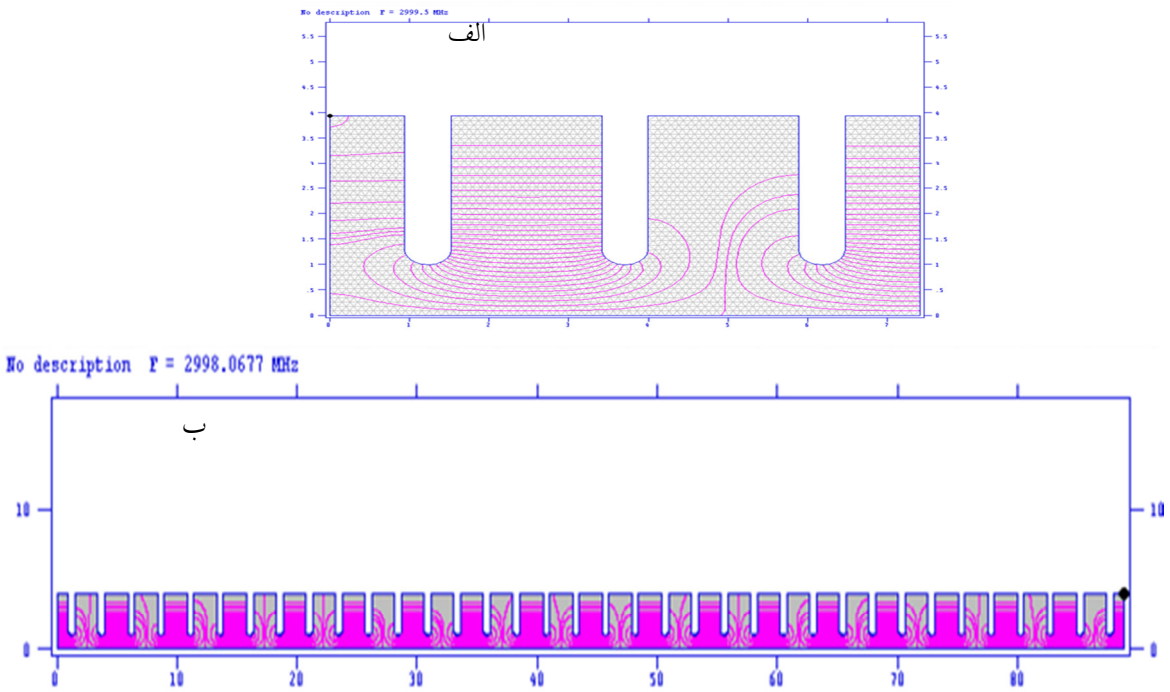
$$dD(K^2)/d(K^2) = -1 \qquad (۳)$$

از دو رابطه۲و۳ نتیجه می‌شود که، که برای منحنی $D(K^2)$ جایی که این منحنی با خط صفر قطع شده ($D(K^2)=0$) و شیب خط منفی است ($dD(K^2)/d(K^2)=-1$)، پدیده تشدید را داریم. با توجه به آرایش خطوط میدان در درون کاواک‌ها که توسط کد تعریف می‌شود باید مد $\frac{\pi}{2}$ استخراج گردد. برنامه برای تعداد مختلف کاواک‌ها و با دستورهای nstep,delfr ، که میزان تقسیم‌بندی فرکانس از ابتدا تا انتها را با گام-های اختیاری تعیین می‌کند، اجرا شد و نمودار $D(K^2)$ بر حسب فرکانس برای تعداد مختلف کاواک تهیه گردید. شکل۴ نمودار میدان الکتریکی بدست آمده برای کاواک‌های ۳تایی و ۳۶تایی را در مد $\frac{\pi}{2}$ نشان می-دهد. شکل۵ و ۶ نیز به ترتیب نمودار $D(K^2)$بدست آمده از نرم افزار Superfish و شدت میدان در راستای محور z ، برای کاواک‌های ۳تایی و ۳۶تایی را نشان می‌دهد.

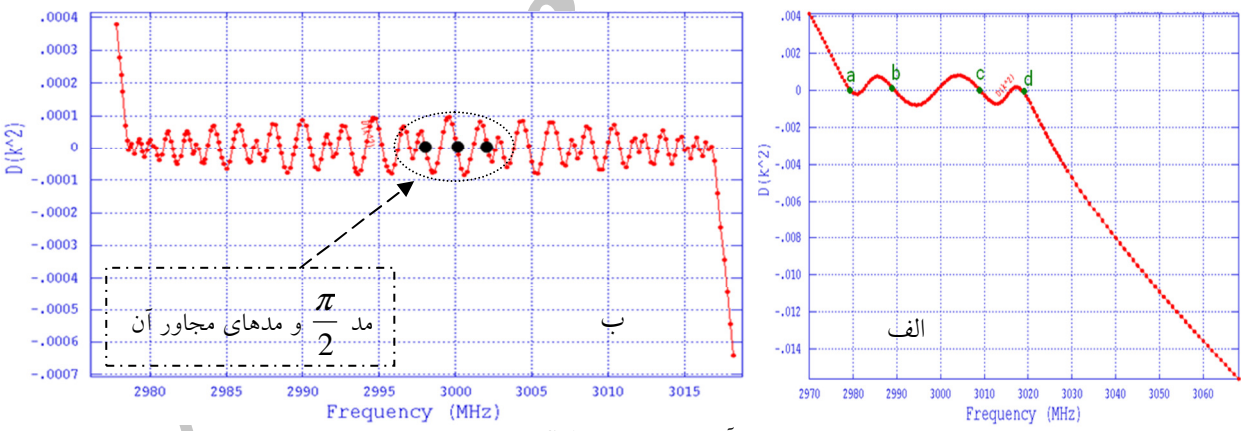
نتایج:

در هر دو نتیجه بدست آمده برای کاواک‌های ۳ تایی و ۳۶ تایی، به ترتیب در فرکانس‌های ۲۹۷۹و ۳۰۱۸ مگا هرتز مدهای ۰ و π مشاهد شده‌است و در فرکانس حدود ۲۹۹۹ MHz مد $\frac{\pi}{2}$ حاصل شده‌است. البته لازم به ذکر است که با بالا رفتن تعداد کاواک‌ها فرکانس‌های مذکور کمی تغییر می‌کنند. ابتدا و انتهای باند فرکانسی عبور تیوب تشکیل شده از مجموعه کاواک‌ها تقریباً ثابت است و اضافه کردن تعداد کاواک‌ها، مد-های تشدید را در همین محدوده فرکانسی افزایش می‌دهد.

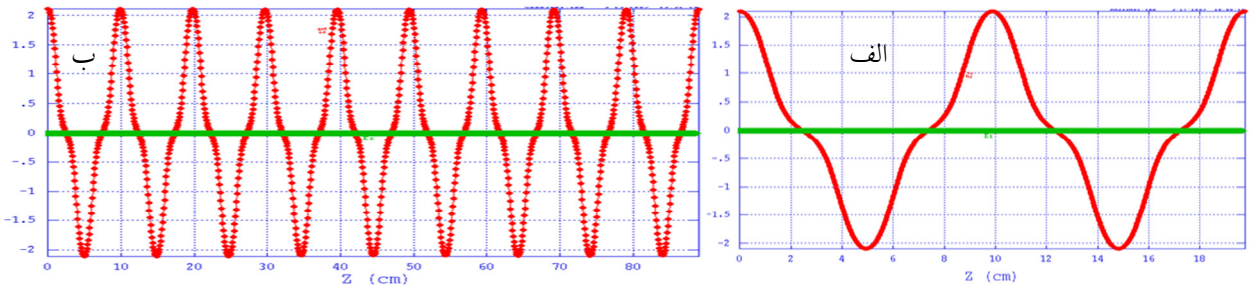
Archive of SID
www.SID.ir



شکل۴: نمودار میدان الکتریکی بدست آمده در مد ۹۰برای کاواک‌های الف-۳تایی و ب-۳۶تایی



شکل۵: نمودار $D(k^2)$ بدست آمده از نرم افزار Superfish برای کاواک های الف- ۳تایی و ب- ۳۶تایی



شکل۶: شدت میدان در راستای محور z ، برای کاواک‌های الف- ۳تایی و ب- ۳۶تایی

www.SID.ir

نزدیکی این مدها مهم است. بخصوص اینکه باید نزدیکی فرکانس مدهای کناری مد $\frac{\pi}{2}$ را بدانیم تا در انتخاب منبع رادیو فرکانسی مناسب که محدوده فرکانسی مشخصی دارد، دقت کنیم. این امر به این خاطر حائز اهمیت است که تغییر کافی در فرکانس ورودی باعث خارج شدن از مد $\frac{\pi}{2}$ می‌شود. این تغییر به اندازه‌ی نزدیکی فرکانس مدهای کناری مد $\frac{\pi}{2}$ بستگی دارد. در شبیه‌سازی مجموعه مشاهده می‌شود که، مد ۰ و π در ابتدا و انتها قرار دارند و با توجه به تعداد کاواک‌ها بقیه مدها در این فاصله تقسیم شده‌اند. مد $\frac{\pi}{2}$ و مدهای کناری آن در شکل۵-ب مشخص شده‌اند. مشاهده می‌شود که اختلاف فرکانسی آن‌ها حدود (۱-۳) مگا هرتز است.

بحث و نتیجه‌گیری:

با توجه به شبیه‌سازی کاواک‌های با تعداد مختلف و یافتن تعداد مدهای تشدید به نتایج زیر می‌رسیم:

۱- تعداد کاواک‌ها و تعداد مدها از رابطه اصلاح شده $\Phi = \frac{n\pi}{N} + 1$ تبعیت می‌کند. منظور از رابطه اصلاح شده این است که با توجه به ورودی هندسه کاواک‌ها در نرم‌افزار که دو نیم کاواک در ابتدا و انتهای مجموعه قرار می‌گیرند، شرایط مرزی به گونه‌ای می‌گردد که به تعداد فرکانس‌های تشدید یکی اضافه می شود. ۲- همانطور که مورد انتظار بود، مجموعه کاواک‌ها همچون یک فیلتر میان‌گذر عمل کرده که باند عبور آن در محدوده مشخصی قرار دارد. فرکانس تشدید مد صفر در ابتدای این باند و فرکانس مد π در انتهای آن واقع شده‌است. ۳- با افزایش تعداد کاواک‌ها، محدوده فرکانسی باند عبور چندان تغییر نمی‌کند و تنها فرکانس‌های تشدید در همین محدوده اضافه می‌گردند. ۴- با توجه به نتیجه ۳ افزایش تعداد کاواک‌ها باعث نزدیک شدن فرکانس مدهای تشدید می‌شود که این موضوع برای فرکانس‌های نزدیک $\frac{\pi}{2}$ حائز اهمیت است. ۵- شبیه‌سازی موجبر بارگذاری شده با صفحه که طول ۸۰ سانتی‌متر و تعداد ۳۶ کاواک دارد، نزدیکی فرکانس‌های تشدید مدهای نزدیک به مد $\frac{\pi}{2}$ را به اندازه (۱-۳) مگا هرتز نتیجه می‌دهد. از اینرو لازم است تا در تیون فرکانسی مجموعه و انتخاب فرکانس ورودی نهایت دقت را داشت.

مراجع:

[۱]- C.J.KARZMARK/Medical Electron Accelerators/ Department of Radiation Oncology Stanford University School of Medicine/ McGRAW hill- New York / Page 80-100/ 1993

[۲]- قاسمی فرشاد، عباسی‌دوانی فریدون / طراحی و ساخت کاواک شتابگر خطی الکترون/ شانزدهمین کنفرانس هسته‌ای ایران/ قشم/ ۱۳۸۸

[۳]-pierre m. Lapostolle & albert l. Septier/ Linear accelerators/ NORTH- HOLLAND PUBLISHING COMPANY/ AMSTERDAM/ Page 123-504/ 1970

[۴]- ناظمی سیامک ، عباسی دوانی فریدون/ محاسبه ابعاد کاواک یک شتابگر خطی الکترون پزشکی/ پذیرفته شده در مجله علمی پژوهشی علوم و فنون هسته‌ای/ سازمان انرژی اتمی ایران/ نوبت چاپ زمستان ۱۳۸۹

[۵] - M. T. Menzel/ User's for the Superfish/ Accelerator groups of LosAlamos National Lab/ Laacg1.lanl.gov/ October 2010

Archive of SID
www.SID.ir