طراحی رادیوفرکانسی تیوب شتابدهی با گرادیان افزایشی

INC29-1340

رضا کاوسی امید[۱]، سیدظفراله کلانتری[۱]، شاهین صنایع حجری[۲]، فرشاد قاسمی[۲]

۱. دانشکده فیزیک ، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۸۴۱۵۶۸۳۱۱ ، اصفهان ـ ایران
۲. پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران ـ ایران

چکیده:

مهمترین انگیزه برای مطالعه‌ی شتابدهنده‌های خطی الکترونی پرتوان اهمیت کاربردی آن است. از جمله‌ی این کاربردها می‌توان به تولید نوترون، رادیوداروها و حوزه‌ی صنعت اشاره کرد. مشخصه‌ی اصلی شتابدهنده‌های پرتوان، جریان بالای باریکه‌ی آن است. با افزایش جریان پدیده‌هایی نظیر بارفضایی و نیز برهمکنش متقابل باریکه و کاواکهای رادیوفرکانسی شدت یافته و طراحی شتابدهنده را پیچیده‌تر می‌کند. یکی از چالش‌های مهم در شتابدهنده‌های خطی توان بالا انتقال حداکثری توان فرکانس رادیویی به باریکه می‌باشد. میزان توان فرکانس رادیویی مورد نیاز از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده هزینه‌ی ساخت در این نوع شتابدهنده‌هاست. شتابدهنده‌های خطی موج‌رونده نوین به جهت کاهش طول، افزایش بهره‌ی انرژی و افزایش بازدهی انتقال توان به باریکه به گونه‌ای طراحی می‌شوند که گرادیان شتابدهی در طول ساختار ثابت یا افزایشی باشد. در این مقاله یک تیوب شتابدهی موج‌رونده با گرادیان افزایشی در باند *S* توسط کد *SUPERFISH* و نرم‌افزار *CST* شبیه سازی رادیوفرکانسی و نتایج آن ارائه شده است.

کلیدواژه‌ها: شتابدهنده خطی، بهره انرژی، گرادیان افزایشی، باند *S*

Radiofrequency design of acceleration tube with increase gradient

Kavusiomid, Reza[1];Kalantari, S.Zafarollah[1]; Sanayehajari, Shahin[2]; Ghasemi, Farshad[2]

1. Department of Physics, Isfahan University of Technology, 841568311, Isfahan , Iran.
2. Physics and Accelerators School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, Tehran, Iran.

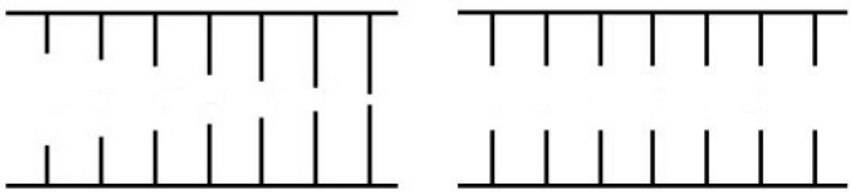
Abstract:

The most important motivation for the study of high power electron linear accelerators is its practical importance. Among these applications, we can mention the production of neutrons, radiopharmaceuticals and the field of industry. The main characteristic of high-powered accelerators is the current above its beam. With the increase in the current, phenomena such as space charge and the mutual interaction of the beam and radio frequency cavities are intensified and make the design of the accelerator more complicated. One of the most important challenges in high power linear accelerators is the maximum transmission of radio frequency power to the beam. The amount of radio frequency power required is one of the most important factors that determine the cost of construction in this type of accelerators. Modern traveling wave linear accelerators are designed to reduce the length, increase energy gain and increase the efficiency of power transfer to the beam in such a way that the acceleration gradient is constant or increasing along the length of the structure. In this article, a traveling wave accelerating tube with increasing gradient in S band by SUPERFISH code and CST radio frequency simulation software and its results are presented.

Keywords: linear accelerators, energy gain, increase gradient, S band

۱. مقدمه

شتابدهنده‌های ذرات ابزاری ضروری در فیزیک هسته‌ای و انرژی بالا، پزشکی، امنیت و صنعت هستند. در حال حاضر، شتاب‌دهنده‌ها پرتوهایی از طیف وسیعی از ذرات باردار، از الکترون‌ها تا ایزوتوپ‌های رادیواکتیو، با انرژی‌هایی از ده‌ها keV تا چند TeV ، و جریان‌هایی از nA تا kA را ارائه می‌کنند. شتابدهنده‌ی خطی الکترون پرتعدادترین و پرکاربردترین نوع شتابدهنده‌ی خطی رادیوفرکانسی در دنیا می‌باشد. بنابراین، درک فیزیک شتابدهنده‌های خطی و جنبه های طراحی عملی اجزای آنها ضروری است. شتابدهنده‌های مدرن باید از نظر اقتصادی مقرون به‌صرفه و مناسب کاربرد مورد نظر باشند. در شتابدهنده های توان بالا انتقال توان از امواج فرکانس رادیویی به باریکه از اهمیت قابل توجهی برخوردار می‌باشد. به طور کلی توان تولیدی توسط مولد در نهایت به توان باریکه، توان اتلافی در سطح کاواکها و توان اتلافی در بار فرکانس رادیویی تبدیل می‌شود. شتابدهنده های خطی الکترونی به دو دسته ی موج‌ایستاده و موج‌رونده تقسیم‌بندی می‌شوند. ساختارهای شتابدهی شناخته شده با بازده انتقال توان بالا عبارتند از؛ ساختارهای موج‌ایستا مبتنی بر تکنولوژی ابررسانایی معروف به کاواکهای تسلا و ساختارهای موج‌رونده مسی تماما بارگزاری شده[1,2]. ساختارهای موج‌رونده به طور متداول به سه دسته‌ی امپدانس ثابت، گرادیان ثابت و گرادیان افزایشی تقسیم‌بندی می‌شوند. ساختار امپدانس ثابت یا هندسه یکنواخت همان طور که در شکل ۱ قابل مشاهده است ساختاری است که تضعیف توان در راستای حرکت مقداری ثابت است[3]. این تضعیف باعث افت نمایی میدان در ساختارهای امپدانس ثابت می‌شود. برای غلبه بر این تضعیف باید با تغییر هندسه گرادیان را در طول ساختار ثابت و در صورت لزوم افزایش دهیم. اگر هندسه و روزنه‌های عبوری باریکه به نحوی تغییر داده شود که گرادیان میدان در طول ساختار ثابت باشد به چنین ساختاری(شکل ۱- سمت چپ) گرادیان ثابت گفته می‌شود و همچنین اگر سلول به سلول گرادیان افزایش یابد ساختار گرادیان افزایشی نامیده می‌شود.



شکل ۱: ساختارموج‌رونده امپدانس ثابت (سمت راست)- ساختارموج‌رونده گرادیان ثابت (سمت چپ)

ساختار امپدانس ثابت علیرغم مزیت سهولت در ساخت، دارای معایبی است. گرادیان میدان در انتهای ساختار کوچکتر از گرادیان در ابتدای آن است. به عنوان نمونه می‌توان اشاره کرد که به ازای ضریب تضعیف ۰/۶ گرادیان در انتهای ساختار ۵۵٪ گرادیان ابتدای ساختار است. همچنین، در یک ساختار امپدانس ثابت، گرادیان در ابتدای ساختار بیشتر از مقدار متوسط است. این مسئله زمانی اهمیت پیدا می‌کند که تخلیه‌ی رادیوفرکانسی مطرح باشد[4]. از طرف دیگر بهره‌ی انرژی در این ساختارها نسبت به ساختارهای هندسه غیریکنواخت (گرادیان ثابت و گرادیان افزایشی) در صورت تزریق توان رادیوفرکانسی به ازای طول یکسان کمتر می‌باشد. طبق قضیه‌ی اساسی بارگذاری باریکه ولتاژ کاواک حاصل برهم نهی ولتاژ القایی باریکه و ولتاژ منبع می‌باشد. در نتیجه بهره‌ی انرژی، w، تحت تاثیر دو جمله طبق رابطه‌ی $w = F\sqrt{Prl} - Grli$ می‌باشد که جمله‌ی اول مربوط به منبع و جمله دوم مربوط به باریکه است[5]. در این رابطه پارامترهای l ، i، r، P به ترتیب نشان‌دهنده‌ی توان ورودی رادیوفرکانسی، امپدانس شنت، جریان و طول ساختار می‌باشند. همچنین F و G ثابت هایی هستند که به طراحی شتابدهنده وابسته است. رابطه نشان می‌دهد که هر چقدر نسبت $\frac{F}{G}$ بزرگتر باشد بهره بالاتر خواهد بود. در ساختارهای گرادیان ثابت و گرادیان افزایشی این نسبت مقدار بزرگتری دارد. بنابراین، ساختاری که گرادیان در طول آن نسبتاً ثابت یا افزایشی باشد، بسیار مطلوب است. از مزایای ساختارهای گرادیان افزایشی کاهش طول ساختار و افزایش بازدهی انتقال توان به باریکه می‌باشد. کاربرد چنین ساختارهایی در

شتابدهنده‌های خطی با جریان بالا (جهت جبران اثر بارگذاری باریکه) و خوشه‌سازهای[1]ذرات می‌باشد. هدف این مقاله طراحی رادیوفرکانسی ساختار موج‌رونده گرادیان افزایشی با مد ساختاری $\frac{\pi}{2}$ می‌باشد. به این منظور ابتدا نحوه‌ی طراحی دوبعدی الکترومغناطیسی ساختار موج‌رونده با استفاده از کد سوپرفیش[2] [6] مورد بررسی قرار گرفته است. قدم بعدی بنا به ضرورت طراحی الکترومغناطیسی سه بعدی با نرم‌افزار سی‌اس‌تی[3] [7] می‌باشد.

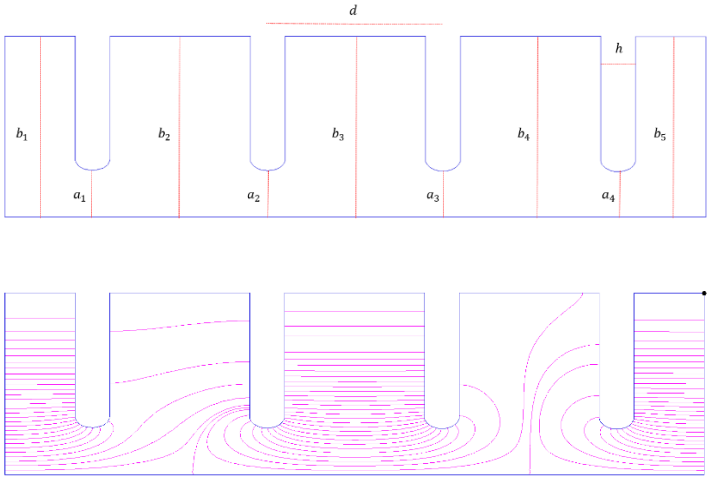
۲. طراحی رادیوفرکانسی ساختار شتابدهی با گرادیان افزایشی

دلیل اصلی استفاده از ساختارهای بارگذاری شده با دیسک کاهش سرعت فاز و ایجاد هم‌گامی بین ذره و موج می‌باشد. کاهش سرعت فاز حاصل بازتاب‌های ناشی از قرارگرفتن دیسک‌ها می‌باشد. در این قسمت تعدادی از پارامترهای مهم در طراحی و نحوه‌ی تعیین آن‌ها مورد بحث قرار گرفته است. در چنین ساختاری رابطه‌ی تخمینی فرکانس با شعاع سلول‌ها طبق رابطه‌ی $b = \frac{2/405\,\lambda}{2\pi}$ می‌باشد. در این رابطه λ طول موج می‌باشد. با تغییر فاصله‌ی بین دیسک‌ها می‌توان به سرعت فاز مورد نظر دست یافت. پیشروی فاز میدان در هر سلول که با عنوان مدهای ساختاری شناخته می‌شود، به فرکانس تشدید بستگی دارد و می‌تواند از ۰ تا π متغیر باشد. طول سلول با مشخص شدن مد ساختاری و سرعت فاز طبق رابطه‌ی $l = \frac{\psi\lambda}{2\pi}\frac{v}{c}$ قابل محاسبه است. در این رابطه ψ، v و c به ترتیب نشان‌دهنده‌ی پیشروی فاز میدان، سرعت فاز و سرعت نور هستند. پارامتر مهم دیگر انتخاب سرعت گروه v_g مناسب است که با انتخاب شعاع روزنه قابل کنترل است.

۲. ۱. طراحی رادیوفرکانسی دو بعدی با استفاده از کد سوپرفیش

فرکانس کاری متداول کلایسترون‌های تجاری موجود در باند فرکانسی s ۲۹۹۸ مگاهرتز می‌باشد. با مشخص شدن فرکانس می‌توان شعاع تقریبی سلول‌ها را محاسبه نمود. یک ساختار موج‌رونده گرادیان افزایشی با مد ساختاری $\frac{\pi}{2}$ برای طراحی انتخاب شده است. در این مد، فاز موج الکترومغناطیسی در حال حرکت 90° در هر سلول تغییر می‌کند. در این نوع ساختار با توجه به تغییر شعاع روزنه‌ها شرایط مرزی برای دو سلول مجاور روزنه تغییر پیدا می‌کند. به همین دلیل شعاع سلول‌ها نیز تغییر خواهد نمود. نتیجه‌ی این غیر همسان بودن سلول‌ها به متفاوت بودن پارامترهای رادیوفرکانسی هر سلول منجر خواهد شد. شکل۲ هندسه‌ی بررسی شده توسط کد سوپرفیش و الگوی میدان ایجاد شده را نشان می‌دهد. کد سوپرفیش فقط قادر به شبیه‌سازی کاواک‌های موج‌ایستاده می‌باشد. از ترکیب ۳سلول کامل و دو نیم سلول که اختلالی در میدان الکتریکی مربوط به ساختار موج‌رونده ایجاد نمی‌کند برای محاسبه‌ی فرکانس تشدید و سایر پارامترهای رادیوفرکانسی استفاده می‌شود. البته باید توجه نمود که برای ساختار موج‌رونده بعضی از پارامترها با ضرایب مشخص تغییر خواهد داشت. برای یافتن مقدار بهینه‌ی پارامترها از کد سوپرفیش استفاده شده است.

[1] Buncher
[2] SUPERFISH
[3] CST-MWS



شکل۲ – هندسه ۴ سلولی تیوب شتابدهی(بالا) - الگوی میدان ها در مد شتابدهی $\frac{\pi}{2}$ (پایین)

از پس پردازشگر *SFO* در سوپرفیش برای محاسبه پارامترهای ساختار مانند ضریب کیفیت، امپدانس شنت، فاکتور گذر زمان و غیره استفاده می‌شود. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازهای سوپرفیش در جدول ۱ گزارش شده‌اند.

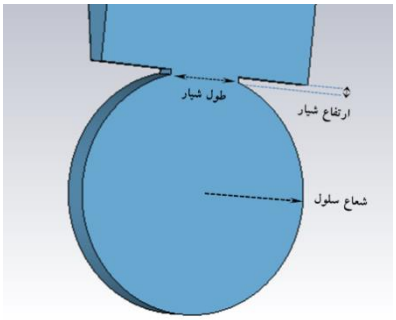
جدول ۱. نتایج بدست آمده از کد سوپرفیش

پارامترها	تیوب شتابدهی
شعاع سلول اول *(mm)*	۳۹/۲۷
شعاع سلول دوم *(mm)*	۳۹/۲۷
شعاع سلول سوم *(mm)*	۳۹/۲۵
شعاع سلول چهارم *(mm)*	۳۹/۲۳
شعاع سلول پنجم *(mm)*	۳۹/۲۱
طول سلول *(mm)*	۲۵
شعاع روزنه اول *(mm)*	۹/۸۵
شعاع روزنه دوم *(mm)*	۹/۹۵
شعاع روزنه سوم *(mm)*	۱۰/۰۵
شعاع روزنه چهارم *(mm)*	۱۰/۱۵
ضخامت دیسک *(mm)*	۵
فرکانس *(MHz)*	۲۹۹۸/۴۶
سرعت فاز $(\frac{m}{s})$	۳×۱۰^{۸}
ضریب کیفیت	۱۰۹۰۸
شانت امپدانس $(\frac{M\Omega}{m})$	۳۸/۰۰۸
فاکتور گذر زمان	۰/۸۵

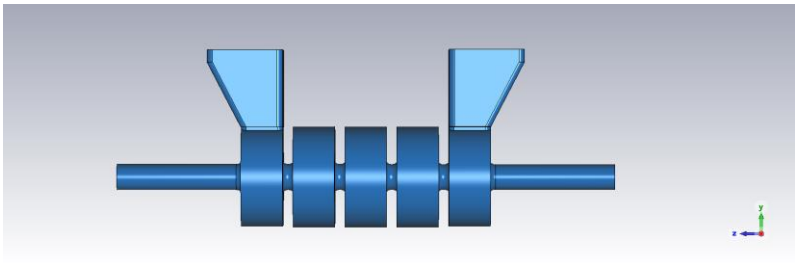
۲. ۳. ۲. طراحی ساختار در نرم افزار سی‌اس‌تی

در بخش قبل، در مورد طراحی الکترومغناطیسی دو بعدی تیوب شتابدهی بحث کردیم. برای شبیه‌سازی کامل تیوب

شتابدهی ناگزیر باید از نرم‌افزارهای سه‌بعدی طراحی رایوفرکانسی استفاده شود. سی‌اس‌تی یکی نرم‌افزارهای سه‌بعدی است که چنین قابلیتی را داراست. هندسه‌ی کلی تیوب شتابدهی شامل جفت‌کننده‌های[4] ورودی و خروجی می‌باشد. در ساختارهای موج‌رونده اولین سلول به عنوان جفت‌کننده ورودی و آخرین سلول به عنوان سلول جفت‌کننده خروجی استفاده می‌شود. جفت‌شدگی با ایجاد یک شیار در سلول ابتدایی و انتهایی انجام می‌شود. برخلاف ساختارهای امپدانس ثابت، در ساختارهایی که گرادیان متغیر است به دلیل اینکه شرایط مرزی برای دو سلول ابتدایی و انتهایی متفاوت است هندسه‌ی جفت‌کننده ورودی و خروجی یکسان نمی‌باشد. ابعاد شیار مستطیلی برای سلول ابتدایی و انتهایی به ترتیب ۲۶/۶ mm ×۲۰ mm و ۲۶/۵ mm ×۲۰ mm و همچنین شعاع سلول‌ها به ترتیب ۳۸/۶۱ و ۳۸/۵۴ می‌باشد. انتخاب چنین ابعادی به منظور به حداقل رساندن میزان توان بازگشتی است. پارامترهای تاثیرگذار در میزان جفت‌شوندگی در شکل۳ قابل مشاهده است. شکل٤ طرح‌واره کلی این ساختار به همراه جفت‌کننده‌ها را نشان می‌دهد. برای طراحی جفت‌کننده‌ها از یک موجبر مخروطی منطبق بر یک موجبر استاندارد باند فرکانسی S استفاده شده‌است.



شکل۳ – پارامترهای موثر در میزان جفت‌شوندگی

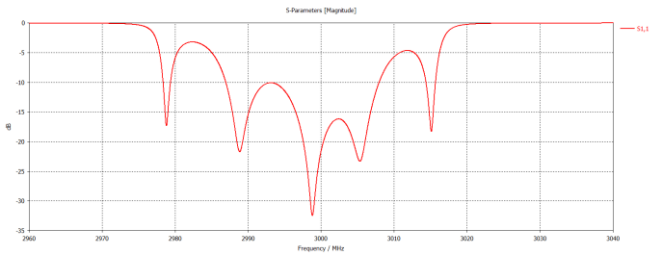


شکل٤_ هندسه‌ی طراحی شده‌ی تیوب شتابدهی گرادیان افزایشی به همراه جفت‌کننده‌ها

مدهای ساختاری $0, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{4}, \pi$ داخل ساختاری با تعداد ۵ سلول تحریک می‌شوند. اگر ابعاد موثر در جفت‌شدگی به درستی انتخاب شوند نمودار S_{11} دارای ۵ حالت رزونانس خواهد بود. جنس تیوب شتابدهی از مس با رسانندگی ۵۸ MS/m است. باند عبور نشان‌دهنده‌ی فرکانس موج‌های قابل عبور از ساختار هستند. باند عبور از طریق فرکانس مدهای ساختاری $0, \pi$ و نمودار S_{11} قابل محاسبه است. همانطور که در نمودار S_{11} قابل مشاهده است، باند عبور ۲۹۷٤–۳۰۱۸ مگاهرتز است. از حل‌کننده دامنه‌ی فرکانسی سی‌اس‌تی جهت ارزیابی توزیع، بزرگی و پیشرفت فاز میدان

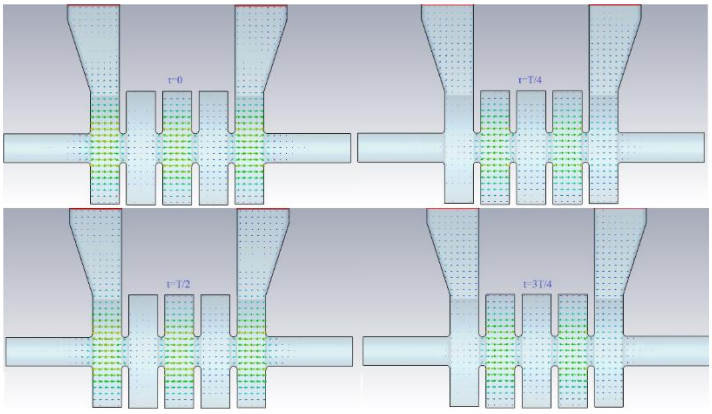
[4] Coupler

در هر سلول، استفاده شده است.

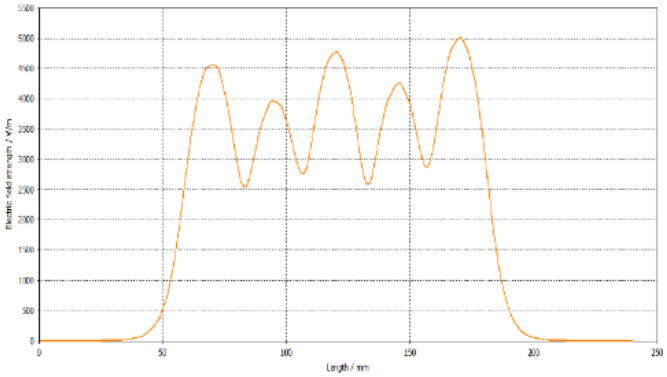


شکل۵-نمودار S_{11} (بازگشت موج بر حسب فرکانس)

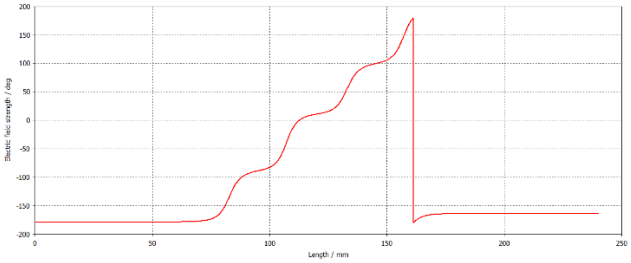
برای ثبت میدان در فرکانس‌های مختلف از نمایشگرهای میدان استفاده می‌شود شکل۶و ۷ به ترتیب توزیع میدان و بزرگی میدان را در فرکانس ۲۹۹۸/۸ مگاهرتز نشان می‌دهند. شکل۸ و۹ نشان‌دهنده‌ی تغییرات فاز میدان الکتریکی می‌باشد که از طریق آن می‌توان پیشروی فاز در هر سلول را محاسبه نمود. نمودارها به طور میانگین پیشروی فاز میدان در هر سلول را محدوده فاز° ۹۲– ° ۸۹ نشان می‌دهند.



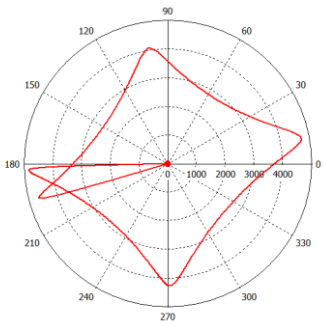
شکل۶-تغییرات توزیع میدان الکتریکی در یک دوره‌کامل



شکل۷- بزرگی میدان الکتریکی در فرکانس ۲۹۹۸/۸



شکل۸- پیشروی فاز میدان الکتریکی در فرکانس ۲۹۹۸/۸



شکل۹- نمودار قطبی میدان الکتریکی در فرکانس ۲۹۹۸/۸

۵. نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت بازدهی انتقال توان در ساختارهای های شتابدهی جریان بالا بهتر است از ساختارهای گرادیان افزایشی استفاده نمود. در این مقاله یک نمونه تیوب شتابدهی با گرادیان افزایشی به همراه جفت‌کننده‌های ورودی و خروجی در کد سوپرفیش و نرم افزار *CST* شبیه سازی رادیوفرکانسی و نتایج آن ارائه شده است. انتظار می رود که ساختار طراحی شده در صورت تزریق باریکه و توان رادیوفرکانسی بهره‌ی انرژی و بازدهی انتقال توان بالاتری نسبت به ساختار امپدانس ثابت داشته باشد.

۶. مراجع

[1] B. Aune, et al., Superconducting TESLA cavities, Phys. Rev. ST Accel. Beams 3, 092001 (2000).

[2] H. Braun, Efficient long-pulse fully-loaded CTF3 linac operation, CLIC-Note-697, CERN-OPEN-2006-070.

[3] T.P. Wangler et al., RF Linear Accelerator, 2nd edition, John Wile & Sons, 2008.

[4]Wilson, P. B. (2008). Electron linacs for high energy physics. Reviews of Accelerator Science and Technology, 1(01), 7-41.

[5]Wiedemann, H. (2015). Particle accelerator physics. Springer Nature.

[6] Poisson Superfish, http://laacg.lanl.gov/ laacg/services/download_sf.phtml.

[7] https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/