اندازه‌گیری سامانه پیش‌خوشه‌ساز و کاواک نمونه‌بردار شتابگر خطی پژوهشگاه دانشهای بنیادی

مصباح، نفیسه* [۱]– عباسی دوانی، فریدون[۱] – شاکر، سید حامد [۲]– احمدیان نمین، ساسان [۳] – صنایع حجری، شاهین [٤]- شیرشکن، مهیار [٥]

[۱] شهید بهشتی، مهندسی هسته‌ای ، کاربرد پرتو

[۲] مرکز تحقیقات دزی آلمان

[۳] پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، طرح جشمه نور ایران

[٤] پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، ذرات

[٥] پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، پروژه شتابدهنده خطی

چکیده:

شتابگرهای ذرات کاربردهای بسیار متنوعی در بسیاری از حوزه‌های علمی دارند. پروژه شتابگر خطی پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، در فاز دوم راه اندازی با هدف شتاب دادن به الکترون‌ها تا انرژی ٤/٥ مگا الکترون ولت در مرحله اجراست. یکی از مهمترین اجزای مورد نیاز برای کارکرد پایدار و افزایش راندمان عملکرد این شتابگر، سامانه پایش مکان عرضی باریکه نسبت به محور شتابگر است. در این مقاله، مبانی اندازه‌گیری‌های عملی کاواک نمونه‌گیر و آزمایش گرم آن با استفاده از کاواک موجود در پژوهشگاه انجام و نتایج خروجی بررسی شده است.

کلمات کلیدی: *شتابگر خطی، پایشگر مکان، کاواک رزونانسی بسامد رادیویی*

Measurement of pre-bunching and cavity pick-up system for the Linear accelerator of the Institute for Research in Fundamental Sciences

Messbah, Nafise[1]; Abassi Davani, Fereiduon[2]; Shaker, Hamed[3]; Ahmadian namin, Sasan[4]; SanayeHajari, Shahin[5]; Shirshekan, Mahyar[6]

[1] Shahid Beheshti University, radiation application

[2] Shahid Beheshti University, radiation application

[3] Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY

[4] Institute for Research in Fundamental Sciences, ILSF

[5] Institute for Research in Fundamental Sciences, Particles and Accelerators school

[5] Institute for Research in Fundamental Sciences, LINAC

Abstract:

Particle accelerators have a wide variety of applications in a wide range of scientific fields. The linear accelerator project of the Institute for Basic Sciences, in the second phase of the launch, aims to accelerate electrons up to 4.5 Mega-Electron Volts. One of the most important components for stable operation and increasing the efficiency of this accelerator is the tracking system of the transverse beam location relative to the accelerator axis. In this paper, the basics of practical measurements of cavity pick-up and its hot test have been carried out using the cavity present at the research institute and the results of the study have been investigated.

Key words: Linear accelerator, beam position monitor, radio frequency resonance cavity

مقدمه:

شتابگرهای ذرات از ابزارهای بسیار مهم و تاثیر گذار در بیشتر حوزه‌های علمی و فناوری هستند. یکی از اجزای مهم شتابگرهای ذرات، سامانه‌های تشخیص مکان باریکه برای کنترل و بهبود عملکرد آنهاست. سامانه‌های تشخیص مکان باریکه در سه نوع دکمه‌ای، نواری و کاواک‌های بسامد رادیویی بسته به نوع و دقت مورد نیاز طراحی و ساخته می‌شوند. امروزه تحقیقات گسترده‌ای بر روی سامانه‌های متکی بر کاواک‌های بسامد رادیویی در مقایسه با انواع دیگر آن، بدلیل دقت‌های بالاتر آنها در جریان‌های پایین‌تر در حال انجام است. این سامانه‌ها از بخش‌های مختلفی تشکیل می‌شوند که می‌توان آن را در دو گروه کاواک نمونه‌بردار و سیستم انتقال، پردازش و محاسبات نهایی سیگنال الکترونیکی حاصل از کاواک بسامد رادیویی تقسیم بندی کرد. در سامانه‌های متکی بر کاواک‌های بسامد رادیویی، مطابق رابطه ۱ برای ضریب کیفیت خارجی کاواک، توان خروجی برای هر مد تشدیدی می‌تواند توسط فاکتوری از امپدانس شانت نرمالیزه آن مد به‌دست آید. در نزدیکی مرکز کاواک میدان الکتریکی تک قطبی مقدار ثابتی است. از طرف دیگر تخمین میدان الکتریکی برای دوقطبی، نزدیک مرکز کاواک به میزان جابه‌جایی از مرکز $\boldsymbol{x}$ بستگی دارد. بنابراین ولتاژ به $\boldsymbol{x}$ وابسته بوده و $\boldsymbol{R/Q}$ با $\boldsymbol{x^2}$ نسبت خواهد داشت. برای مدهای دو قطبی در ناحیه $\boldsymbol{\pm 0.0268R}$ و برای مدهای تک قطبی در ناحیه $\boldsymbol{\pm 0.0233R}$ مقدار خطای این تخمین کمتر از ۱۰ ٪ است. باریکه عبوری با توجه به فاصله از محور، طول و جریان باریکه الکترونی، سیگنال‌های مختلفی در پراب‌های تعبیه شده در پایشگرهای مکان باریکه[1] که در مد دو قطبی رزنانس[2] می‌کنند، ایجاد می‌کنند. برای نرمالیزه کردن این سیگنال نسبت به بار از کاواک دیگری به نام کاواک مرجع استفاده می‌شود[1].

$$\boldsymbol{P_{out} = \frac{\omega^2}{4Q_{ext}}\left(\frac{R}{Q}\right)q^2} \qquad (۱)$$

هدف از انجام این آزمایش عملی بررسی رفتار توان خروجی کاواک نمونه‌بردار بر حسب جریان باریکه الکترونی عبوری و کالیبراسیون آن بر حسب این جریان است. می‌توان معادل کاواک مرجع در فرکانس تک قطبی دانست که نهایتا به منظور سیستم اندازه‌گیری جریان مورد استفاده دائمی مجموعه قرار خواهد گرفت.

روش کار:

[1] Beam Position Monitor

[2] resonance

با استفاده از سامانه پیش‌خوشه‌ساز و کاواک نمونه‌بردار آلومینیومی ساخته شده برای پروژه شتابگر خطی پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، اندازه‌گیری‌های عملی در راستای اندازه‌گیری توان خروجی کاواک مرجع مجموعه پایشگر مکان باریکه انجام شد. ابتدا مراحل تیون کردن کاواک‌ها به کمک آنالیزکننده شبکه‌ای برداری[۳] در محیط آزمایشگاه و با بکارگیری پلانژر تعبیه شده در داخل کاواک انجام شد. تصویر پلانژر و کاواک همراه آن در شکل ۱ نشان داده شده است. چیدمان اندازه‌گیری هر دو کاواک بر روی تحلیلگر شبکه در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

(ج) (ب) (الف)

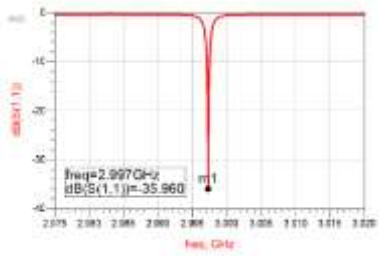
شکل (۱) الف)چیدمان اندازه‌گیری ب) پلانژر جهت تیون پ)دو کاواک نمونه‌بردار و پیش خوشه‌ساز

در شکل ۲ تصویر ساختار داخلی کاواک به‌همراه آنتن های مورد استفاده در پیش‌خوشه‌ساز و کاواک نمونه‌بردار نشان داده شده است. مطابق شکل۳، به منظور دستیابی به بهترین ضریب کوپلاژ برای کاواک نمونه‌بردار، چند آنتن با شکل‌های مختلف ساخته و مورد بررسی قرار گرفت و بهترین آنها استفاده شد. خروجی اندازه‌گیری شده برای کاواک پیش‌خوشه‌ساز در شکل٤ نشان داده شده است.

شکل (۲) ساختار داخلی کاواک به همراه آنتن

شکل (۳) ساختار آنتن‌های مورد استفاده

[۳] Network analyzer



شکل (٤) خروجی پارامتر پراکندگی برای پیش‌خوشه‌ساز

پس از انجام مراحل فوق، دستیابی به خلاء بالا در حدود $۱۰^{-۷}$ میلی‌بار در داخل این دو کاواک مورد نظر قرار گرفت. تمام سیلینگ های خلا برای این دو کاواک توسط اورینگ‌های وایتونی بوده است. یکی از مهمترین گلوگاه‌ها در راه‌اندازی این کاواک‌ها دستیابی همزمان به خلا و مشخصات بسامد رادیویی مورد نظر بود. در شکل۵ نحوه اتصال این کاواک به پمپ خلا و میزان خلا حاصل شده پس از اتصال به لوله شتابگر خطی نشان داده شده است.

(ج) (ب) (الف)

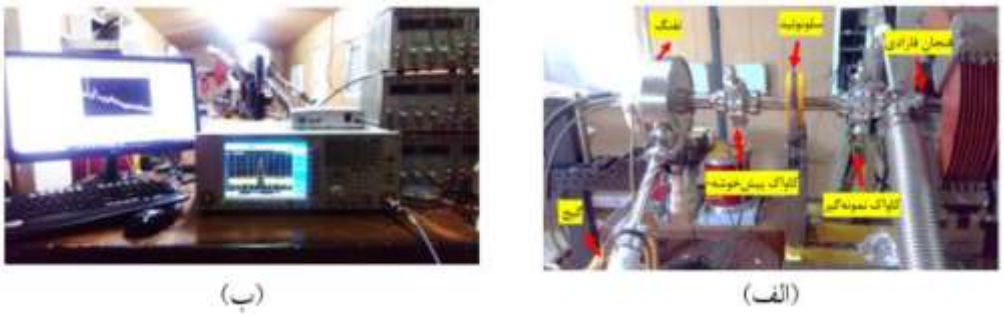
شکل(۵) الف) چیدمان اندازه‌گیری خلا در آزمایشگاه ب) مقدار خلا خوانده شده از گیج[۴] پ) مقدار خلاء خوانده شده توسط نرم‌افزار LabView

جهت بهبود پارامترهای باریکه در تست صورت گرفته بین دو کاواک سلونویید قرار گرفت و پس از کاواک نمونه‌بردار، از فنجان فارادی جهت اندازه‌گیری جریان استفاده شد. چیدمان مجموعه سر همبندی شده برای انجام اندازه‌گیری مورد نظر در شکل ٦الف نشان داده شده است. با استفاده از سیگنال ژنراتور و تقویت‌کننده ترانزیستوری تهیه شده، پیش‌خوشه‌ساز توسط توان ۱ کیلو وات در فرکانس ۲۹۹۸/۵ مگاهرتز تغذیه شده و خروجی حاصل از تحریک با خوشه های الکترونی ایجاد شده از طریق آنتن کاواک نمونه‌گیر در اسپکتروم[۵]قرائت گردید. شکل ٦ ب خروجی

[۴] guage

[۵] spectrum

اسپکتروم کاواک نمونه‌گیر را نشان می‌دهد.



شکل(٦) الف) چیدمان کلی آزمایش پس از تفنگ ب) خواندن خروجی در اسپکتروم

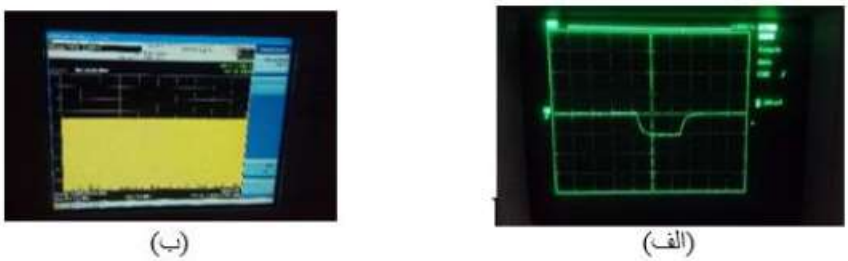
شکل ۷-الف کوپلاژ بین کاواک پیش‌خوشه‌ساز و کاواک نمونه‌بردار را نشان می‌دهد. زمانیکه توان در داخل پیش‌خوش‌ساز تزریق شده ولی هنوز تفنگ الکترونی روشن نشده است. شکل ۷-ب نشان دهنده طیف توان تحریکی در داخل کاواک نمونه‌بردار است که بواسطه تحریک پیش‌خوشه‌ساز بوجود آمده و نشان دهنده انجام فرآیند خوشه‌سازی بر روی باریکه الکترونی است.

شکل(۷) الف) طیف اسپکتروم بدون باریکه ب)طیف اسپکتروم در حضور باریکه

با توجه به رابطه (۱) توان خروجی به مربع بار و در نتیجه مربع جریان خروجی وابسته است و برای کاواک مرجع رابطه خطی اســـت. خروجی توان کاواک نمونه‌گیر و جریان باریکه برای دو مقدار انرژی ۱۰ و ۲۰ کیلو الکترون ولت تفنگ الکترون (شـــکل ۸الف) قرائت گردید. بدون حضـــور باریکه توان دریافتی از کاواک نمونه بردار در حدود ۱۵- دی‌بی‌ام[٦] به دست آمد که بیانگر مقدار کوپلاژ الکترومغناطیسی بین کاواک پیش‌خوشه‌ساز و کاواک نمونه‌گیر است. سپس با تغییر میزان جریان کاتد، جریان باریکه و مقدار توان خروجی کاواک نمونه‌گیر مورد بررســـی قرارگرفت. همانطور که انتظار می‌رفت مشاهده می‌شود با افزایش جریان توان خروجی افزایش می‌یابد. با استفاده از نرم‌افزار متلب خط مناسب برازش

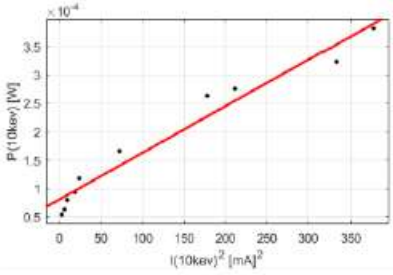
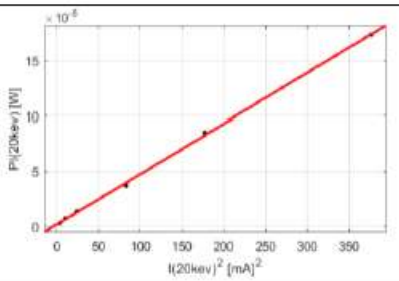
٦dbm

شد. مقدارآر-اسکوئر[۷]نزدیک به ۱ و مقدار قابل قبولی است. نتایج در جدول جدول ۱ قابل مشاهده است. با استفاده از ضرایب به دست آمده، خروجی دو نمودار در نرم‌افزار متلب رسم شد.



شکل (۸) الف) خروجی فنجان فارادی از اسیلوسکوپ جهت به دست آوردن جریان باریکه ب) توان خروجی کاواک نمونه‌گیر از اسپکتروم

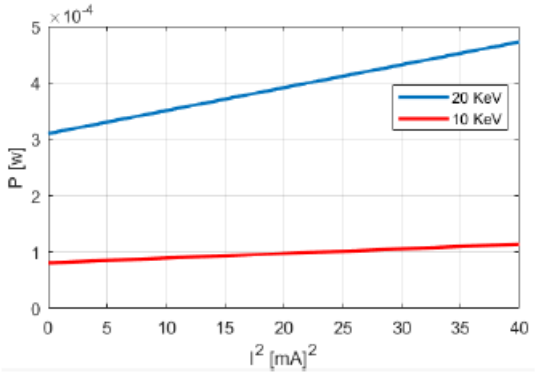
جدول (۱) مقادیر حاصل از اندازه‌گیری و نمودار فیت شده

	$P = aI^{۲} + b$	$I(mA)$	$P(dbm)$	$P_{beam}(dbm)$
۱۰ KeV		۱۹/۴۱	-۴/۱۸	۱۰/۸۲
		۱۸/۲۲	-۴/۹	۱۰/۱۰
		۱۴/۰۴	-۰/۶	۹/۴
		۱۳/۳۳	-۰/۸	۹/۲
		۴/۸۴	-۷/۸	۷/۲
		۸/۴۸	-۹/۳	۰/۷
		۴/۲۴	-۱۰/۳	۴/۷
		۳/۰۰	-۱۱/۰	۴
		۲/۴۰	-۱۲/۰	۳
		۱/۰۳	-۱۲/۷	۲/۳
۲۰ KeV		۳۸/۸	۸/۸۶	۲۳/۸۶
		۳۶/۴	۶/۰	۲۱
		۱۹/۴	۴/۴	۱۹/۴
		۱۳/۳	۱/۳	۱۶/۳
		۹/۱	-۲/۳	۱۲/۷
		۴/۹	-۶/۷	۸/۳
		۳/۲	-۹/۰	۰/۰
		۱/۹	-۱۳/۳	۱/۷

نتیجه‌گیری:

[۷] $R - square$

شکل ۹ نمودار جریان بر حسب توان برای این دو انرژی را همزمان نمایش می‌دهد.مشاهده می‌شود زمانیکه که جریان باریکه بزرگتری از کاواک عبور می‌کند، توان خروجی کوپل شده بیشتر است. با توجه به [2] قدار $\left(\frac{R}{Q}\right)$ متناسب با مربع فاکتور زمان عبور[۸]است. باریکه‌ها با انرژی متفاوت، سرعت‌های متفاوت خواهند داشت و در نتیجه فاکتور زمان عبور آنها متفاوت خواهد بود. با توجه به انرژی پایین و متفات باریکه در این آزمایش‌ها (۱۰ و ۲۰ کیلو الکترون ولت) مقدار $\left(\frac{R}{Q}\right)$ و در نتیجه با توجه به معادله ۱ توان خروجی بیشتر خواهد بود. نکته مهم دیگر که از نمودار قابل درک است، تاثیر افزایش انرژی بر روی حساسیت توان خروجی از کاواک است. هر قدر انرژی باریکه به سمت نسبیتی شدن پیش برود، قرائت جریان باریکه متناسب با حساسیت و دقت بیشتری انجام پذیر است. همچنین، سطح توان خروجی بیشتر باعث کاهش پیچیدگی‌های طراحی مدار انتقال و پردازش خروجی می‌شود. از طرفی در کاواک پیش‌خوشه‌ساز هر چه طول کاواک کوتاه‌تر و یا انرژی باریکه بیشتر باشد، ذره زمان کمتری داخل کاواک خواهد بود، تغییرات فازی کمتری را دیده، فاکتور زمان عبور و در نتیجه مقدار بانچ شدگی متفاوتی خواهد داشت. بدیهی است بانچ ضعیف‌ترتوان کمتری در کاواک کوپل خواهد کرد و گذشت باریکه الکترونی جریان مستقیم هیچگونه تحریکی در کاواک نمونه‌بردار ایجاد نمی‌کند. کاواک نمونه بردار زمانی تحریک می‌شود که یک خوشه االکترونی از داخل آن عبور کند.



شکل(۹) نمودار خروجی جریان بر حسب توان برای دو انرژی باریکه ۱۰ و ۲۰ الکترون ولت

[۸]Transient time factor

مراجع

[1] Y. Sojeong Lee n, "PAL-XFELcavitybeampositionmonitorpick-updesignandbeamtest," *NuclearInstrumentsandMethodsinPhysicsResearch*, pp. 107-117, 2016.

[2] R. Lorenz, *Cavity Beam Position Monitors*, DESY Zeuthen, Platanenallee: DESY Zeuthen, Platanenallee.