



امکان سنجی استفاده از مد تشدید TM_{110} در کاواک استوانه‌ای برای شتاب باریکه الکترونی

جباری، ایرج^{۱*}؛ پورصالح، علی محمد^۱؛ خلفی، حسین^۲

^۱ دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، گروه مهندسی هسته‌ای

^۲ سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، مجتمع پژوهشی ایران مرکزی (یزد)

چکیده:

مد تشدید TM_{010} به عنوان مد غالب برای شتاب باریکه الکترونی در اکثر شتاب‌دهنده‌های موج رادیویی با کاواک استوانه‌ای استفاده می‌شود. همچنین از مد TM_{110} برای انحراف و مونیتورینگ باریکه استفاده شده است. در این تحقیق ضمن بررسی معادلات حاکم و شکل میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، پارامترهای فرکانس تشدید، ضریب کیفیت، تلفات و ولتاژ ایجاد شده برای شتاب الکترون در مدهای مذکور با هم مقایسه شده است. برای انجام آزمون‌های آزمایشگاهی سه کاواک آلومینیومی کوچک با طول‌های مختلف ساخته شد. نتایج محاسباتی، شبیه‌سازی و تجربی نشان داد که استفاده از مد TM_{110} نسبت به مد TM_{010} باعث کاهش راندمان شتاب‌دهنده می‌گردد. لذا استفاده از مد TM_{110} برای شتاب باریکه الکترونی توصیه نمی‌شود.

کلمات کلیدی: مد تشدید TM_{110} ، شتاب‌دهنده موج رادیویی، کاواک استوانه‌ای.

مقدمه:

مد تشدید TM_{010} تقریباً در تمام شتاب‌دهنده‌های موج رادیویی با کاواک استوانه‌ای برای شتاب باریکه ذرات باردار استفاده می‌شود. در این مد در مرکز کاواک استوانه‌ای میدان الکتریکی حداکثر و میدان مغناطیسی صفر است. میدان الکتریکی در راستای حرکت باریکه و میدان مغناطیسی عمود بر آن است. در مد TM_{110} میدان الکتریکی در مرکز صفر و در دو طرف مرکز در دو جهت مخالف نسبت به هم قرار دارد و میدان مغناطیسی در مرکز حداکثر مقدار خود را دارد [۱]. از مد TM_{110} معمولاً برای اندازه‌گیری موقعیت باریکه در شتاب‌دهنده‌هایی که نیاز به تنظیم دقیق پارامترهای باریکه از جمله اندازه باریکه دارند، استفاده می‌شود. عبور باریکه در برخی شتاب‌دهنده‌ها باعث ایجاد مدهای تشدید مرتبه بالاتر می‌گردد. در این میان مد دو قطبی TM_{110} با موقعیت و بار باریکه تناسب بیشتری دارد و لذا از آن می‌توان برای اندازه‌گیری موقعیت باریکه استفاده نمود [۲]. همچنین از این مد در برخی شتاب‌دهنده‌ها برای انحراف باریکه و تغییر امیتانس آن استفاده می‌شود. در این روش میدان مغناطیسی ناشی از مد TM_{110} در مرکز کاواک باعث انحراف و جابجایی باریکه می‌گردد [۳ و ۴]. در این مقاله

معادلات حاکم بر این مد، و همچنین امکان استفاده از آن به منظور شتاب باریکه الکترونی و تاثیر آن بر راندمان شتاب دهنده در مقایسه با مد TM_{010} بررسی شد.

روش کار:

در این تحقیق ابتدا روابط حاکم بر میدان های الکتریکی و مغناطیسی و همچنین پارامترهای اساسی در یک کاواک استوانه ای از قبیل فرکانس تشدید، ضریب کیفیت و تلفات در دو مد TM_{010} و TM_{110} بررسی و مقایسه شد. روابط حاکم بر میدان الکتریکی در محور شتاب و همچنین میدان مغناطیسی عمود بر آن در یک تک کاواک استوانه ای در مد TM_{010} مطابق روابط (۱) و (۲) است [۵].

$$E_z = E_0 J_0(k_r r) \cos \omega t \quad (1)$$

$$B_\theta = -\frac{E_0}{c} J_1(k_r r) \sin \omega t \quad (2)$$

که در آن E_0 دامنه میدان الکتریکی، C سرعت نور در خلا و J_0 و J_1 ضرایب معادلات بسل است. روابط حاکم بر میدان الکتریکی و مغناطیسی در مد TM_{110} مطابق روابط (۳) و (۴) می باشد [۵].

$$E_z = 2cB_0 j_1(kr) \cos(\theta) \sin(\omega t) \quad (3)$$

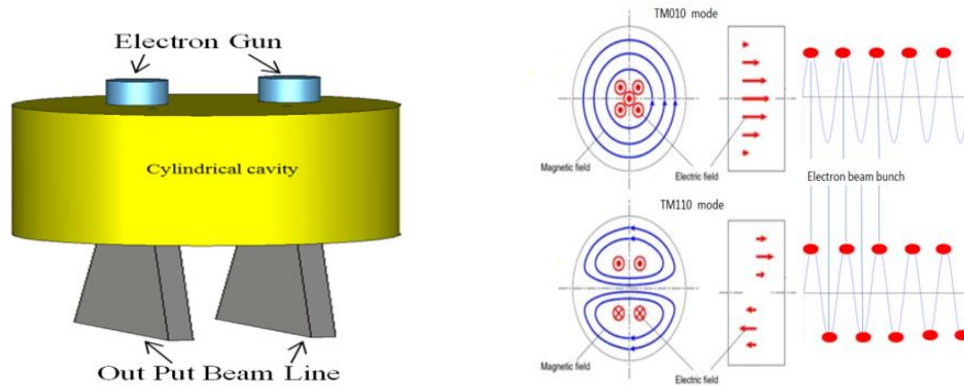
$$B_\theta = \frac{2cB_0}{\omega} j_1'(kr) \cos(\theta) \cos(\omega t) \quad (4)$$

فرکانس تشدید در یک کاواک استوانه ای ساده در مد TM_{010} و TM_{110} از روابط (۵) و (۶) محاسبه می گردد [۶].

$$F_{010} = \frac{2.405 C}{2\pi R} \quad (5)$$

$$F_{110} = \frac{3.831 C}{2\pi R} \quad (6)$$

که در آن R شعاع کاواک استوانه ای و C سرعت نور می باشد. لذا در هر دو مد فرکانسی شعاع کاواک رابطه معکوس با فرکانس تشدید دارد. در شکل ۱ مقایسه شکل میدان های الکتریکی و مغناطیسی و سیکل مورد استفاده برای شتاب باریکه الکترونی در دو مد مذکور نشان داده شده است.



شکل ۱: شکل میدان و سیکل شتاب در مدهای TM_{010} و TM_{110} شکل ۲: طرح پیشنهادی شتابدهنده با مد TM_{110}

با توجه به شکل ۱ جهت میدان الکتریکی در یک سیکل در مد TM_{110} در دو جهت می‌باشد و در سیکل بعد تغییر جهت می‌دهد. لذا ممکن است بتوان مطابق شکل ۲ دو تفنگ الکترونی و همچنین دو سیستم استخراج در محل تشکیل میدان‌های الکتریکی تعبیه کرد و از هر دو سیکل نوسان از میدان الکتریکی برای شتاب باریکه استفاده نمود. توان تلفاتی در این کاواک در مد TM_{010} و مد TM_{110} مطابق روابطه (۷) و (۸) است [۶].

$$P_{010} = \frac{\pi R E_0^2}{\mu^2 \sigma \delta c^2} \cdot J_1^2(2.405)(L + R) \quad (7)$$

$$P_{110} = \frac{2\pi R B_0^2}{\mu^2 \sigma \delta} \cdot J_0^2(3.831)(L + R) \quad (8)$$

که در آن L طول و R شعاع کاواک استوانه‌ای، σ رسانایی سطحی پوسته داخلی کاواک استوانه‌ای و δ عمق نفوذ یا اثر پوستی می‌باشد. انرژی ذخیره شده در کاواک در مدهای TM_{110} و TM_{010} از روابط (۹) و (۱۰) بدست می‌آید.

$$U_{010} = \frac{\pi R^2 E_0^2 L}{2\mu c^2} \cdot J_1^2(2.405) \quad (9)$$

$$U_{110} = \pi R^2 B_0^2 L \epsilon c^2 \cdot J_0^2(3.831) \quad (10)$$

با استفاده از رابطه کلی $Q = \frac{\omega U}{P}$ ضریب کیفیت در مدهای مذکور مطابق روابط (۱۱) و (۱۲) می‌باشد [۶].

$$Q_{010} = \frac{RL}{\delta(R+L)} \quad (11)$$

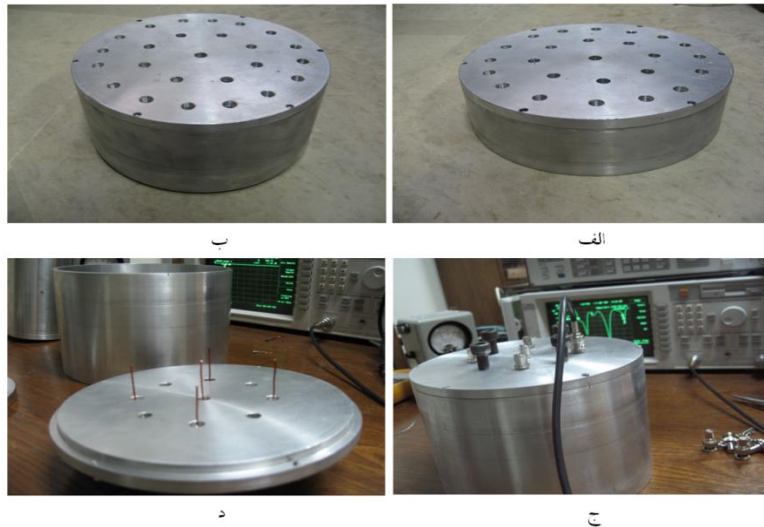
$$Q_{110} = \frac{\omega \delta \mu_0 \sigma RL}{2(R+L)} \quad (12)$$

به طور کلی برای محاسبه راندمان یک شتاب‌دهنده می‌توان از رابطه (۱۳) استفاده نمود [۷].

$$\eta = \frac{P_b}{P_t} = \frac{P_b}{P_c + P_b} \quad (13)$$

که در آن P_b توان متوسط باریکه خروجی، P_t توان متوسط انرژی الکتریکی مصرفی و P_c توان تلفاتی در کاواک است. از طرفی P_b از حاصل ضرب انرژی در جریان باریکه به دست می‌آید. جریان باریکه نیز به تعداد الکترون‌ها

و یا به عبارتی طول و تعداد بانج‌های الکترونی در واحد زمان وابسته است. در این تحقیق برای بررسی روابط، طراحی و شبیه‌سازی یک کاواک استوانه‌ای ساده و تحلیل نتایج آن در هر دو مد فرکانسی انجام شد. شبیه‌سازی این کاواک در مدهای مذکور توسط نرم افزار CST انجام شد. همچنین برای اعتبار سنجی نتایج محاسباتی و شبیه سازی یک کاواک استوانه‌ای مطابق شکل ۳ از جنس آلومینیوم به شعاع ۹۴/۴ میلی متر و طول داخلی ۱۱۰، ۶۵/۳۹ و ۴۳ میلی متر ساخته و آزمون‌های مشابه انجام شد. ابعاد این کاواک بر اساس اندازه شمس استاندارد موجود در بازار انتخاب شد. تزویج توان RF به این کاواک برای تحریک مدهای مورد نظر از طریق کوپلاژ مغناطیسی الکتریکی صورت گرفت. همچنین برای اندازه گیری سطح ولتاژ متناسب با میدان‌های الکتریکی تشکیل شده در کاواک از پراب‌های میله‌ای در محل‌های تشکیل میدان‌های الکتریکی در مدهای TM_{010} و TM_{110} استفاده شد.

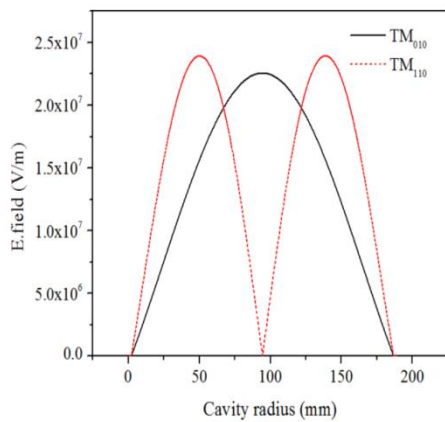


شکل ۳: الف) کاواک آلومینیومی ساخته شده با طول ۴۳ میلی متر، ب) کاواک آلومینیومی با طول ۶۵.۳۹، ج) کاواک آلومینیومی در حال تست مد فرکانسی با طول ۱۱۰ میلی متر، د) پراب‌های اندازه‌گیری ولتاژ ناشی از مدهای TM_{010} و TM_{110}

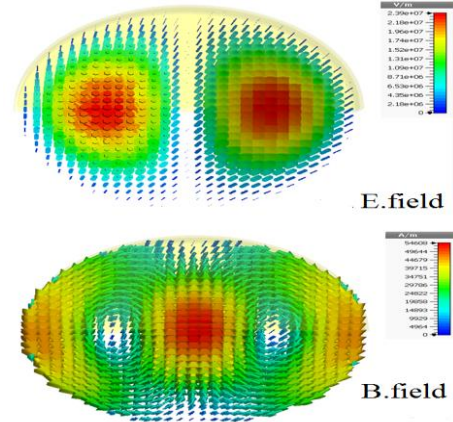
نتایج:

در شکل ۴ تصویر میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در مد TM_{110} در محیط Eigenmode نرم افزار CST نشان داده شده است. سطح و نمودار میدان الکتریکی در راستای شعاعی کاواک در مدهای TM_{010} و TM_{110} در شکل ۵ با هم مقایسه شده است. بر اساس این نمودار هرچند که نقطه حداکثر میدان الکتریکی در مد TM_{010} از TM_{110} بیشتر است ولی در یک سیکل فقط از یکی از نمودارهای تشکیل شده در مد TM_{110} برای شتاب باریکه استفاده می‌گردد. سطح زیر منحنی این میدان که در واقع باعث ایجاد ولتاژ مؤثر برای شتاب باریکه الکترونی می‌گردد، از سطح منحنی مورد استفاده برای شتاب باریکه در مد TM_{010} کمتر است. لذا باریکه در عبور از کاواک

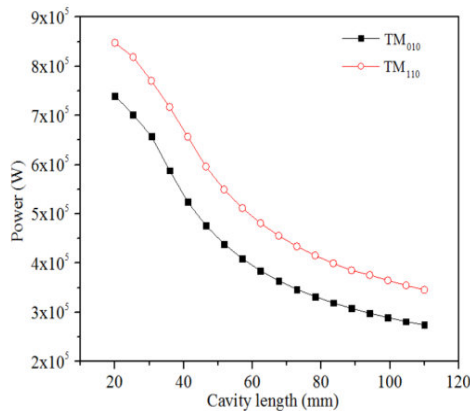
انرژی کمتری کسب می‌کند. در شکل ۶ تأثیر تغییرات طول کاواک بر ضریب کیفیت در مدهای TM_{010} و TM_{110} نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌گردد ضریب کیفیت یک کاواک با ابعاد برابر در مد TM_{010} کمتر از مد TM_{110} است. با توجه به روابط (۱۱) و (۱۲) طول کاواک از پارامترهای تأثیر گذار بر ضریب کیفیت می‌باشد. با توجه به نتایج شبیه سازی مطابق شکل ۶ با افزایش طول کاواک ضریب کیفیت نیز در هر دو مد افزایش می‌یابد. در شکل ۷ تلفات کاواک در حالتی که حداکثر دامنه میدان الکتریکی در حد $1/8MV$ می‌باشد نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که در هر دو مد با افزایش طول کاواک، به دلیل افزایش ضریب کیفیت، تلفات کاهش می‌یابد. همچنین بر اساس نتایج شبیه سازی مشاهده می‌شود که ضریب کیفیت در مد TM_{110} نسبت به مد TM_{010} بیشتر است ولی جهت رسیدن به سطح میدان الکتریکی برابر با مد TM_{010} توان RF بیشتری نیاز است. به عبارتی تلفات مد TM_{110} نسبت به مد TM_{010} بیشتر است.



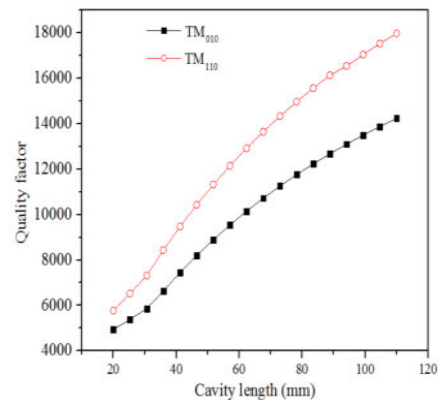
شکل ۵: مقایسه نمودار میدان الکتریکی در مد TM_{110} و TM_{010}



شکل ۴: میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی مد TM_{110}



شکل ۷: مقایسه تلفات با تغییر طول کاواک



شکل ۶: مقایسه ضریب کیفیت با تغییر طول کاواک



جدول ۱ نتایج تجربی مربوط به فرکانس تشدید، ضریب کیفیت و حداکثر دامنه شکل موج سینوسی اندازه گیری شده از پرابها در دو مد TM_{010} و TM_{110} در کاواکهای ساخته شده با طولهای مختلف را نشان می دهد. انتخاب طول کاواک ها بدلیل اندازه شفت های آلومینیومی موجود در کارگاه مکانیکی و تراشکاری می باشد.

جدول ۱: نتایج آزمایشگاهی تست سه کاواک آلومینیومی ساخته شده در مدهای TM_{010} و TM_{110}

TM_{110}			TM_{010}			مد
۱۱۰	۶۵/۳۹	۴۳	۱۱۰	۶۵/۳۹	۴۳	طول
۱۹۸۰/۱۴۴۶	۱۹۸۰/۱۴۵۳	۱۹۸۰/۱۴۶۴	۱۲۴۲/۸۵۰۶	۱۲۴۲/۸۵۱۲	۱۲۴۲/۸۵۱۸	فرکانس (مگا هرتز)
۱۷۹۸۸	۱۳۲۳۵	۹۷۴۰	۱۴۲۳۹	۱۰۴۷۷	۷۷۱۱	ضریب کیفیت
۲۶/۵۶	۲۵/۲	۲۳/۱	۴۸/۳	۴۲/۴	۴۲/۲	ولتاژ پراب (میلی ولت)

همانطور که در جدول ۱ مشهود است تغییر طول کاواک اثر محسوسی بر فرکانس تشدید ندارد. مطابق روابط (۵) و (۶) نیز در یک تک کاواک ساده استوانه ای در هر دو مد فرکانسی مهمترین پارامتر موثر در تعیین فرکانس تشدید کاواک، شعاع آن می باشد. در نتایج تجربی نیز در هر دو مد افزایش طول باعث افزایش ضریب کیفیت شد. با توجه به جدول ۱ ولتاژ اندازه گیری شده در مد TM_{110} تقریباً نصف TM_{010} است. به عبارتی میزان انرژی کسب شده توسط باریکه الکترونی تقریباً نصف می شود. ولی با طرح پیشنهادی می توان جریان باریکه را تا حدود دو برابر افزایش داد. از طرفی گرچه توان باریکه در هر دو مد به هم نزدیک است ولی بر اساس رابطه (۱۳) در توان باریکه ثابت به دلیل افزایش تلفات در مد TM_{110} راندمان شتاب دهنده حدود ۱۱٪ نسبت به مد TM_{010} کمتر است.

بحث و نتیجه گیری:

در این تحقیق روابط حاکم بر کاواک استوانه ای در دو مد TM_{010} و TM_{110} بررسی شد. نتایج حاصل از محاسبات تحلیلی، نتایج شبیه سازی و تجربی نشان داد که فرکانس تشدید در مد TM_{110} تقریباً ۱/۵ برابر مد TM_{010} است. فرکانس در هر دو مد وابسته به شعاع کاواک است و تغییر طول کاواک تاثیری بر آن ندارد. هر چند که افزایش طول کاواک باعث افزایش ضریب کیفیت و کاهش تلفات در هر دو مد می گردد، لیکن برای رسیدن به سطح میدان الکتریکی یا ولتاژ برابر جهت شتاب باریکه الکترونی در کاواک در هر دو مد، باید توان RF بیشتری در مد TM_{110} نسبت به مد TM_{010} مصرف گردد. بنابراین راندمان شتاب دهنده با استفاده از مد TM_{110} کمتر از مد TM_{010} است. لذا مد TM_{110} گزینه مناسبی برای شتاب باریکه الکترونی نمی باشد.

مراجع:

- [1] T. R. Pusch, F. Frommberger, W.C.A. Hillert, B. Neff, “Measuring the intensity and position of a pA electron beam with resonant cavities”, Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams, 15, pp:112801, 2012.
- [2] C. Jian-Hua, T.De-Chun, Z. Zhen-Tang “RF measurements of a C-band cavity beam position monitor”, Chinese Physics C, 32 (5), pp:385-388 , 2008
- [3] V. Shemelin, S. Belomestnykh, R. L. Geng, M. Liepe, H. Padamsee, “Dipole-mode-free and kick-free 2-cell cavity for the scerl injector”, Particle Accelerator Conference, 2003.
- [4] S. Belomestnykh, I. Bazarov, V. Shemelin, J. Sikora, K. Smolenski, V. Veshcherevich, “Deflecting cavity for beam diagnostics at Cornell ERL injector”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 614, pp: 179–183, 2010.
- [5] T. Wangler, “Principles of RF linear accelerators”, John Wiley & Sons, 2002.
- [6] A. Lassise, P. H. Mutsaers, O. J. Luiten, “Compact, low power radio frequency cavity for femtosecond electron microscopy”, Review of Scientific Instruments, 83, pp:043705, 2012.
- [7] R. B. Miller, “Electronic irradiation of foods an Introduction to the technology”, First edition, Springer, New Mexico, 2005.