

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.643

ДИСПЕРСИОННЫЕ СВОЙСТВА УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ SDTL

© 2025 г. В. В. Парамонов*

Институт ядерных исследований РАН, Москва, 117312 Россия

*E-mail: paramono@inr.ru

Поступила в редакцию 14.06.2023 г.

После доработки 19.06.2023 г.

Принята к публикации 26.06.2023 г.

В коротких резонаторах структуры SDTL, работающей на колебании TM010, не предусматривается элементов для стабилизации распределения ускоряющего поля и смещения нерабочих колебания. Рассмотрены дисперсионные свойства резонаторов SDTL оптимизированных для максимального эффективного шунтового сопротивления. Дополнительными ограничениями при разработке резонаторов SDTL является нежелательная близость частот мод TM011 и TE111 к рабочей.

Ключевые слова: ускоряющая структура, резонатор, взаимодействие колебаний

DOI: 10.56304/S2079562924050373

ВВЕДЕНИЕ

Ускоряющая структура SDTL (Separated Drift Tube Linac) [1], представляет собой цилиндрический резонатор с трубками дрейфа, работающий на колебании TM010 и используется для ускорения ионов водорода. В отличие от классической структуры Альвареса, трубки дрейфа не содержат фокусирующих элементов, которые вынесены за пределы резонатора. Это позволяет более свободно оптимизировать резонаторы по ВЧ характеристикам, а также упростить их изготовление, юстировку, настройку и обслуживание. На рабочей частоте 324 МГц SDTL применен на участке энергий ионов H^- от 50 до 191.5 МэВ в линейном ускорителе комплекса J-PARC [2]. Модификация структуры, известная как SCDTL (Side Coupled Drift Tube

Linac) с рабочей частотой 352 МГц, применена на участке энергий от 50 до 104 МэВ в ускорителе Linac 4 CERN [3]. Схематично структуры SDTL и SCDTL показаны на рис. 1.

Максимум ВЧ эффективности структуры SDTL приходится на диапазон энергий протонов ~20 МэВ и в модификации SCDTL структура на рабочей частоте 3 ГГц применена на участке энергий протонов от 5 до 35 МэВ в ускорителях TOP-IMPART [4] и LIGHT [5] для протонной терапии.

Дисперсионные свойства модификации SCDTL имеют свои особенности, связанные с объединением нескольких резонаторов в единую колебательную систему. Но более общие свойства определяются основной структурой SDTL.

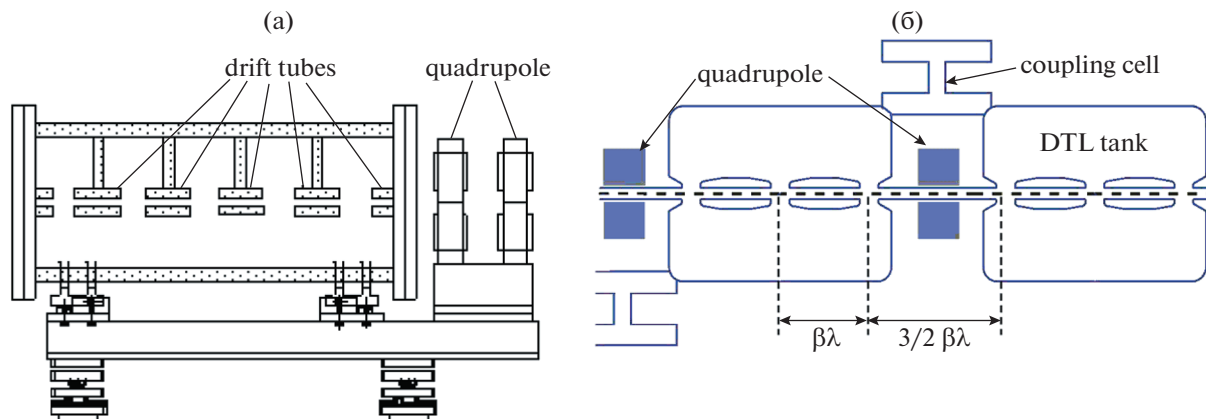


Рис. 1. Концепции структуры SDTL (a) и SCDTL (б).

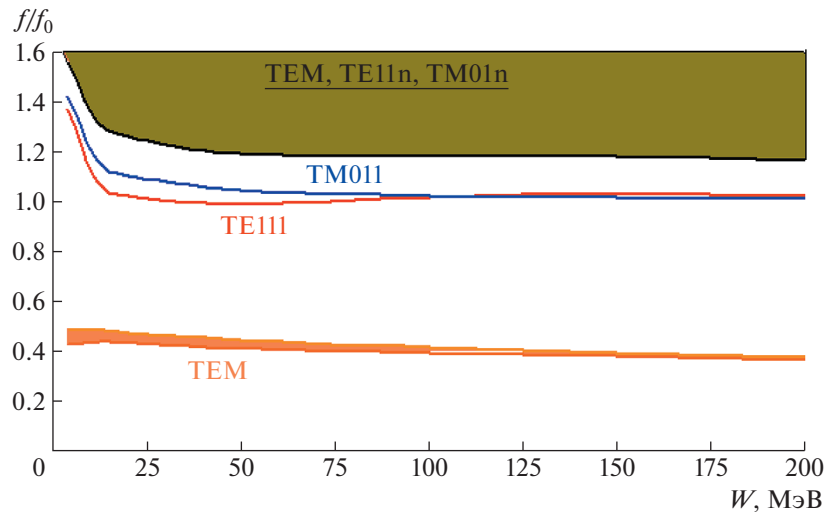


Рис. 2. Области нахождения колебаний различных типов в резонаторах SDTL.

СПЕКТРЫ КОЛЕБАНИЙ В РЕЗОНАТОРАХ SDTL

На рис. 2 в единицах рабочей частоты показаны области нахождения колебаний различных типов в резонаторах SDTL, оптимизированных в диапазоне энергий протонов до 200 МэВ для получения максимальных величин эффективного шунтового сопротивления Z_c .

Низшей является полоса колебаний типа TEM, обусловленная необходимым существованием штанг для крепления трубок дрейфа в структуре. Для колебаний в этой полосе штанги с закрепленными на них трубками дрейфа являются либо четверть волновыми вибраторами для низкочастотной реализации структуры (рис. 1), либо полуволновыми в высокочастотной [4]. Количество колебаний типа TEM в этой полосе равно $N - 1$, где N — число периодов ускорения в резонаторе. Из-за большого удаления от рабочего по частоте, практической опасности эти колебания не представляют.

Колебания типа TM_{01n} принадлежат к одному семейству с рабочим и их частоты приближенно оцениваются как

$$f_{TM_{01n}} \approx f_0 \sqrt{1 + \left(\frac{2n}{N\beta}\right)^2},$$

где β — относительная скорость ускоряемых частиц и f_0 — частота рабочего колебания. Колебания типа TM_{01n} имеют на оси резонатора продольную составляющую электрического поля E_z и в основном определяют неравномерность распределения ускоряющего поля. Можно показать [6], что дисперсия распределения ускоряющего поля σ_E связана с дисперсией отклонений частот периодов резонатора σ_f соотношением

$$\sigma_E^2 \approx \sigma_f^2 \frac{4}{N} \sum_{n=1}^N \left(1 + \left(\frac{2N\beta}{n}\right)^2\right)^2.$$

Наиболее опасным является ближайшее по частоте колебания TM_{011} . На рис. 3 показаны графики зависимостей относительного разделения по частоте этого колебания с рабочим в зависимости от энергии ускоряемых частиц и числа периодов в резонаторе.

В области энергий протонов более 150 МэВ опасное приближение по частоте колебания TM_{011} является одним из ограничения на число периодов в резонаторе SDTL.

При настройке резонатора вклад колебания TM_{011} в неравномерность распределения ускоряющего поля, являющийся наибольшим, может быть подавлен двумя элементами настройки частоты, расположенными в первом и последнем периодах резонатора.

В цилиндрическом волноводе основной является дважды вырожденная волна TE_{11} . В резонаторе частота низшего колебания TE_{111} может быть оценена как

$$f_{TE_{111}} \approx \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{v_{11}}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{N\beta\lambda}\right)^2}, \quad J_1'(v_{11}) = 0,$$

где R — радиус резонатора и $J_1(x)$ — первая функция Бесселя. Нарушая осевую симметрию резонатора, штанги снимают вырождение по частоте, и низшим становится колебание TE_{111} с пучностью, составляющей Nz в плоскости штанг. Зависимость частоты этой низшей моды TE_{111} от энергии ускоряемых частиц показана на рис. 2 красной линией при $N = 5$, и в более крупном масштабе — на рис. 4.

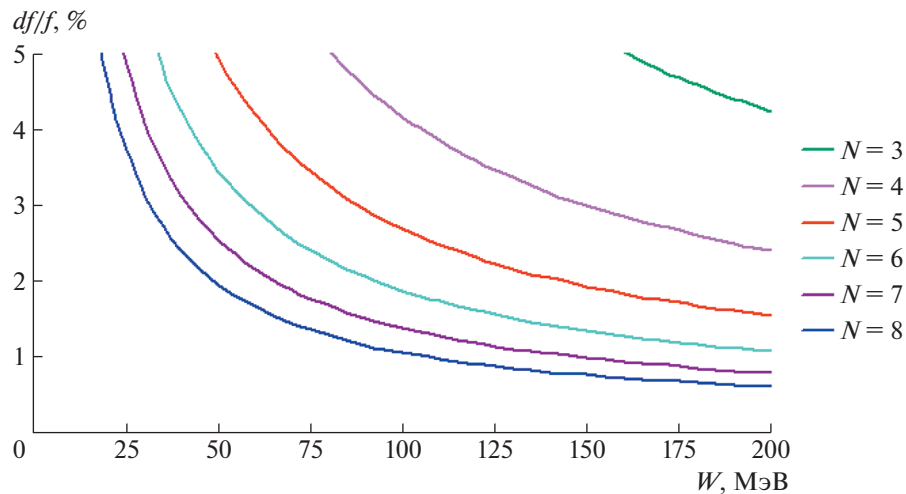
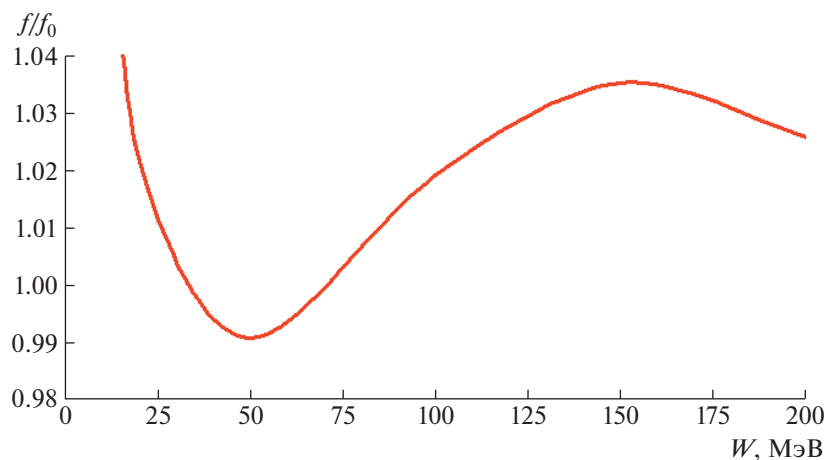


Рис. 3. Относительное разделение по частоте рабочего колебания с ближайшим ТМ011.

Рис. 4. Относительное расположение по частоте низшего колебания TE111, $N = 5$.

При низких энергиях протонов $W < 25$ МэВ понижение частоты моды TE111 обусловлено увеличением длины резонатора $L = N\beta\lambda$, связанное с ростом скорости ускоряемых частиц. С ростом β уменьшается радиус резонатора R для обеспечения максимальной величины Z_e . Эти два конкурирующих параметра и обеспечивают показанную на рис. 4 немонотонную зависимость частоты низшей моды TE111 от энергии частиц. Как видно из графика на рис. 4, в диапазоне энергий $25 < W < 80$ МэВ мода TE111 может находиться по частоте в непосредственной близости к рабочей. Опасная близость колебаний по частоте приводит к явлению взаимодействия колебаний [7]. В таком случае ожидаемые проектные характеристики резонатора на рабочем колебании не реализуются. Поэтому при разработке резонаторов SDTL, особенно при желаемом числе периодов ускорения $N > 3$, необходимо при выборе размеров эле-

ментов резонатора контролировать положение по частоте низшей моды TE111. Это является дополнительным ограничением при разработке структуры.

Колебание TE111 второй поляризации с узлом составляющей H_z плоскости штанг расположено существенно выше по частоте и попадает в область $cf > 1.15f_0$, затененную на рис. 2. В этой области, и выше по частоте, находятся все взаимодействующие между собой колебания, которые только могут быть реализованы в резонаторе. Из-за их удаленности по частоте их классификация и рассмотрение при умеренной величине тока ускоряемого пучка практического значения не имеют.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ускоряющая структура SDTL может применяться для ускорения протонов и ионов H^- до энергий ~ 200 МэВ. В диапазоне энергий возможного при-

менения структуры проведены оценки расположения на шкале частот колебаний различных типов.

Для семейства колебаний рабочего типа TM01n даны оценки как их частот, так и их влияния на неравномерность распределения ускоряющего поля.

Показано, что возможно нахождение низшей моды TE111 с пучностью Hz в плоскости штанг по частоте в непосредственной близости от рабочей. Это чревато возникновением выраженного эффекта взаимодействия колебаний и ухудшением ожидаемых рабочих характеристик резонаторов.

Контроль за положением этой моды по частоте должен быть дополнительным ограничением в разработке структуры при выборе размеров элементов резонатора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Kato T.* // KEK Report No. 92-10. 1992.
2. *Ito T. et al.* // Proc. Conf. LINAC-2006. Knoxville, USA. 2006. P. 740.
3. *Tribendis A. et al.* // Proc. Conf. LINAC-2014. Geneva, Switzerland. 2014. P. 746.
4. *Picardi L. et al.* // Phys. Rev. Accel. Beams. 2020. V. 20. P. 020102.
5. *Degiovanni A. et al.* // Proc. Conf. NAPAC2016. Chicago, USA. 2016. P. 1282.
6. *Paramonov V., Kato T., Yamazaki Y., et al.* // Proc. Conf. LINAC-1998. 1998. P. 582.
7. *Штейншлегер В.Б.* Явления взаимодействия волн в электромагнитных резонаторах. 1955. Москва: Государственное издательство оборонной промышленности.

Dispersion Properties of the SDTL Accelerating Structure

V. V. Paramonov*

Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia

**e-mail: paramono@inr.ru*

Received June 14, 2023; revised June 19, 2023; accepted July 26, 2023

Abstract—In short SDTL cavities, operating in TM010 mode, there are no elements for accelerating field distribution stabilization and parasitic modes removal. Dispersion properties of cavities, optimized for maximal shunt impedance, are considered. An additional limitation in cavities development is undesirable proximity of TM011 and TE111 modes to the operating one.

Keywords: accelerating structure, cavity, mode interaction