

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.6

РАЗРАБОТКА УСКОРЯЮЩИХ СТРУКТУР ИН–ТИПА

© 2022 г. А. А. Горчаков^а, *, М. А. Гусарова^а, М. В. Лалаян^а, С. Е. Топорков^а

^аНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

*E-mail: aagorchakov@mephi.ru

Поступила в редакцию 19.07.2021 г.

После доработки 09.09.2021 г.

Принята к публикации 28.09.2021 г.

В работе представлены результаты разработки коротких пятизачорных ускоряющих структур ИН-типа с фиксированной длиной ускоряющих зазоров, рассчитанных на частоту 80 МГц и скорости 0.06c и 0.1c. Рассмотрены вопросы выбора оптимальной длины ускоряющих зазоров, геометрии трубок дрейфа и системы крепления трубок дрейфа с учетом ограничений на величину высокочастотных потерь в стенках резонатора и обеспечения распределения поля на оси, при котором величина поля в крайних ускоряющих зазорах составляет не менее 50% от величины поля в центральных зазорах.

Ключевые слова: ускоряющие структуры, ускоряющие зазоры, стенки резонаторов, резонаторы ИН-типа.

DOI: 10.56304/S2079562922010158

ВВЕДЕНИЕ

В линейных ускорителях ионов для ускорения частиц в диапазоне относительных скоростей β от 0.01 до 0.4 используют структуры с трубками дрейфа Е- и Н-типа [1]. Структуры Е-типа с трубками дрейфа типа Альвареса имеют рабочий вид колебаний E_{010} и используются в ускорителях в диапазонах β от 0.04 до 0.43. Однако следует отметить, что максимальная эффективность таких структур приходится на более узкий диапазон β от 0.1 до 0.4. При β от 0.1 до 0.4 наряду со структурами типа Альвареса используют структуры СН-типа (Crossbar Н-type) с рабочим видом колебаний H_{210} . Структуры СН-типа по сравнению со структурами типа Альвареса имеют большее значение шунтового сопротивления, а, следовательно, меньшие потери высокочастотной (ВЧ) мощности в стенках резонатора. При β от 0.01 до 0.1 предпочтительнее использование резонаторов ИН-типа (Intedigital Н-type) с рабочим видом колебаний H_{110} . Резонаторы этого типа имеют высокие значения шунтовых сопротивлений и отличаются высокой емкостной нагрузкой, что позволяет получить более компактные структуры, с аналогичными ускорителю Альвареса электродинамическими характеристиками [2]. В классическом исполнении структуры с трубками дрейфа – это длинные многозачорные резонаторы. Такие структуры используются, например, в UNILAC GSI, CPHS (Compact Pulse Hadron Source at Tsinghua University), XiPAF (Xi'an Proton Application Facility) [3, 4]. Так же следует отметить, что изменение скорости частиц при пролете длинной ускоряющей структу-

ры требует изменения длины ускоряющих зазоров и трубок дрейфа по длине резонатора.

В настоящее время при проектировании линейных ускорителей отдается предпочтение модульному подходу компоновки, который заключается в использовании нескольких групп коротких резонаторов с фиксированной длиной ускоряющих зазоров для каждой группы [5]. Данный подход позволяет обеспечить унификацию блоков, взаимозаменяемость идентичных модулей, а также обеспечивает возможность поэтапного ввода модулей ускорителя в эксплуатацию.

В работе представлены результаты разработки коротких пятизачорных ускоряющих структур ИН-типа с фиксированной длиной зазора на частоту 80 МГц и скорости 0.06c и 0.1c. Геометрия вакуумной области резонаторов и габаритные размеры настроенных структур приведены на рис. 1.

Использование системы крепления трубок дрейфа с общим основанием и пилоном (рис. 1), по сравнению с конструкцией, в которой каждая трубка крепится к внешней поверхности резонатора отдельно, позволяет снизить значение напряженности магнитного поля на поверхности структуры, а следовательно уменьшить высокочастотные (ВЧ) потери в стенках [6]. Кроме этого конструкция с попарно установленными трубками дрейфа на одном основании значительно упрощает процесс юстировки при изготовлении.

Ниже рассмотрены вопросы выбора оптимальной длины ускоряющих зазоров геометрии трубок дрейфа с учетом минимизации высокочастотных потерь в стенках резонатора (не более 50 кВт для

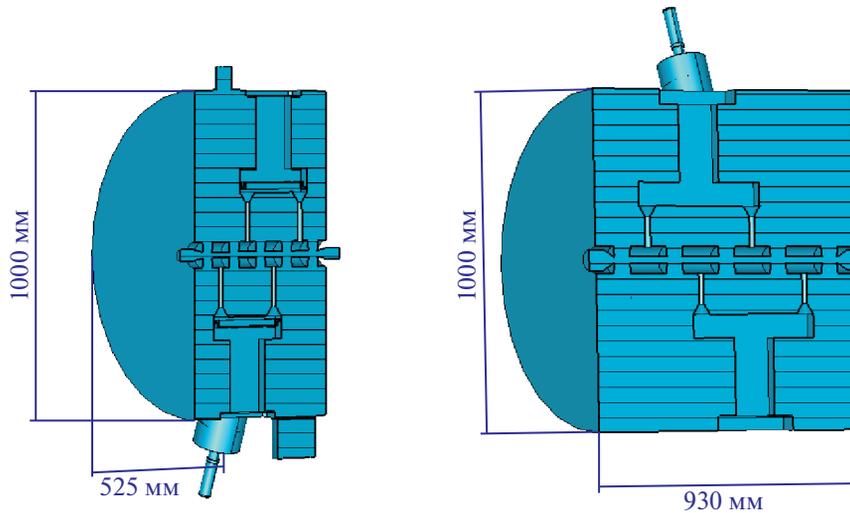


Рис. 1. Вакуумная модель структур на относительную скорость частиц 0.06 (слева), 0.1 (справа).

структуры с $\beta = 0.06$ и не более 150 кВт для структуры с $\beta = 0.1$), а так же обеспечения распределения поля на оси при котором величина поля в крайних ускоряющих зазорах составляет не менее 50% от величины поля в центральных зазорах.

ВЫБОР ДЛИНЫ УСКОРЯЮЩЕГО ЗАЗОРА

Рабочим видом колебаний для резонаторов ИИ-типа является волна H_{110} , с периодом колебания π , при котором линии напряженности ускоряющего поля в соседних зазорах направлены противоположно, а длина периода структуры составляет половину длины волны. На рис. 2 представлена упрощенная схема с двумя зазорами, где d – период структуры, g – длина ускоряющего зазора.

На виде колебаний π период структуры определяется согласно выражению (1).

$$d = \frac{\beta\lambda}{2}, \tag{1}$$

где β – относительная скорость ускоряемых частиц, λ – длина волны. В табл. 1 приведены результаты расчета периода структуры для структур,

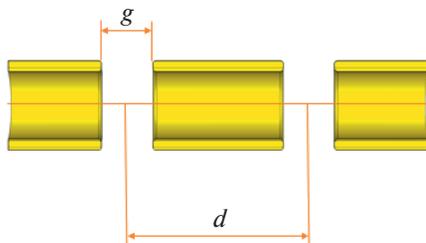


Рис. 2. Упрощенная схема с двумя зазорами.

рассчитанных на скорости 0.06c и 0.1c на частоте 80 МГц.

Для обеспечения максимальной эффективности структуры, т.е., максимального времяпролетного фактора, выгодно уменьшать длину ускоряющего зазора. С другой стороны, уменьшение зазора приводит к увеличению его емкости, а следовательно, к падению шунтового сопротивления структуры. Наличие двух конкурирующих требований приводит к необходимости компромисса. В работах [6, 7] показано, что для двухзазорных структур максимальная эффективность структуры достигается при соотношении длины зазора к межзазорному расстоянию примерно $a = 1/3$. Для многозазорных резонаторов ИИ-типа в работе [8] показано, что эффективными считаются структуры, у которых отношения длины ускоряющего зазора, к межзазорному расстоянию не превышает $a < 0.6$.

Так же, при выборе длины ускоряющего зазора, необходимо учитывать влияние радиуса апертуры r_a трубок дрейфа на распределение поля. При больших величинах r_a электрическое поле может проникать через апертуру внутрь трубки дрейфа, и благодаря этому ускоряющий зазор как бы удлиняется. В работе [9] приводится выражение (2) для вычисления эффективной длины ускоряющего зазора g_e :

$$g_e = \sqrt{g^2 + 4r_a^2}. \tag{2}$$

В табл. 1 представлены результаты расчета диапазона длин ускоряющего зазора для рассматриваемых структур с учетом получения максимальной эффективности структуры при сохранении высокого шунтового сопротивления, а также с учетом влияния радиуса апертуры. Показано, что длина ускоряющего зазора для структуры со скоростью 0.06c лежит в диапазоне от 37 до 67 мм, для струк-

Таблица 1. Результаты расчета диапазона длин ускоряющего зазора с учетом провисания поля

f , МГц	λ , м	β	d , м	g , м ($a = 1/3$)	g_e , м ($a = 1/3$; $r_a = 9.0$ мм)	g , м ($a = 0.6$)
80.0	3.75	0.06	0.112	0.037	0.042	0.067
80.0	3.75	0.1	0.188	0.062	0.065	0.113

туры со скоростью $0.1c$ в диапазоне от 62 до 113 мм.

ВЫБОР ГЕОМЕТРИИ И ТОЛЩИНЫ ТРУБОК ДРЕЙФА

Геометрия трубки дрейфа определяет такой важный параметр как шунтовое сопротивление (3), которое отвечает за мощность потерь в стенках резонатора, а, следовательно, за эффективность работы ускорителя. А так же влияет на равномерность распределения ускоряющего поля на оси структуры.

$$Z = \frac{\left(\int_0^l |E_{0z}(z)| dz \right)^2}{P}. \quad (3)$$

В ходе разработки структур были рассмотрены три варианта геометрии пролетных трубок (рис. 3): простая цилиндрическая, цилиндрическая с компенсирующими кольцами и цилиндрическая со скосами.

На графике, представленном на рис. 4, приведена полученная зависимость шунтового сопротивления от толщины трубок дрейфа l на примере структуры, рассчитанной на частоту 80 МГц и $\beta = 0.06$. Для этой же структуры получены графики распределения напряженности ускоряющего поля на оси для конструкции с трубками дрейфа толщиной 5, 50 мм и для геометрии с компенсационными кольцами (рис. 5). Длина зазора для структуры с $\beta = 0.06$, обеспечивающая величину напряженности ускоряющего поля в крайних ускоряющих зазорах не менее 50% от величины поля в центральных зазорах, составила $g = 42$ мм, что вхо-

дит в допустимый диапазон для данного значения β . Аналогичные расчеты были проведены для структуры со скоростью $0.1c$. Длина зазора составила 62.0 мм.

Из графика, представленного на рис. 4 видно, что с уменьшением толщины трубок дрейфа шунтовое сопротивление структуры линейно растет, а следовательно потери снижаются. Однако равномерность распределения ускоряющего поля на оси ухудшается (рис. 5). При малой толщине стенок трубок дрейфа наблюдается снижение напряженности электрического поля в центральных ускоряющих зазорах и сильная неравномерность поля в боковых зазорах. Важно так же учитывать, что при использовании плоских трубок дрейфа с увеличением толщины увеличивается вероятность возникновения мультипакторного разряда, который может возникать в зазоре между двумя параллельными поверхностями и приводить к деградации поверхности [10]. Для предотвращения развития мультипакторного разряда возможно использование трубок дрейфа со скосами (рис. 3в), которые обеспечивают спад поля и отсутствие стабильных траекторий движения частиц [8].

Структура с тонкими трубками дрейфа и компенсирующими кольцами по бокам, так же характеризуется равномерным распределением ускоряющего поля (рис. 5) и пониженной вероятностью возникновения мультипакторного разряда за счет смещения параллельных плоскостей относительно друга.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ЭДХ

Для определения максимально возможных значений напряжений U на пятиззорных резона-

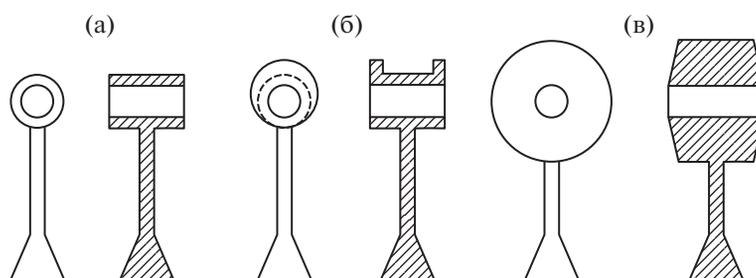


Рис. 3. Изображение различных видов трубок дрейфа: (а) тонкая трубка дрейфа, (б) тонкая трубка дрейфа с компенсационными кольцами, (в) толстая трубка дрейфа со скосом.

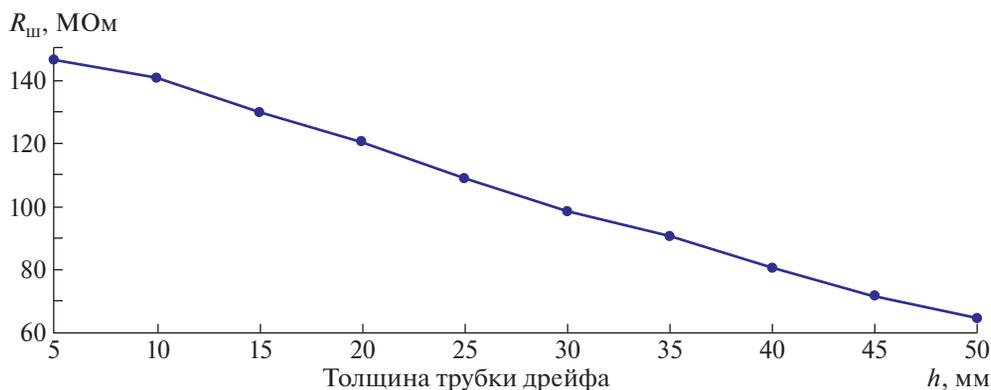


Рис. 4. График зависимости шунтового сопротивления от толщины трубок дрейфа.

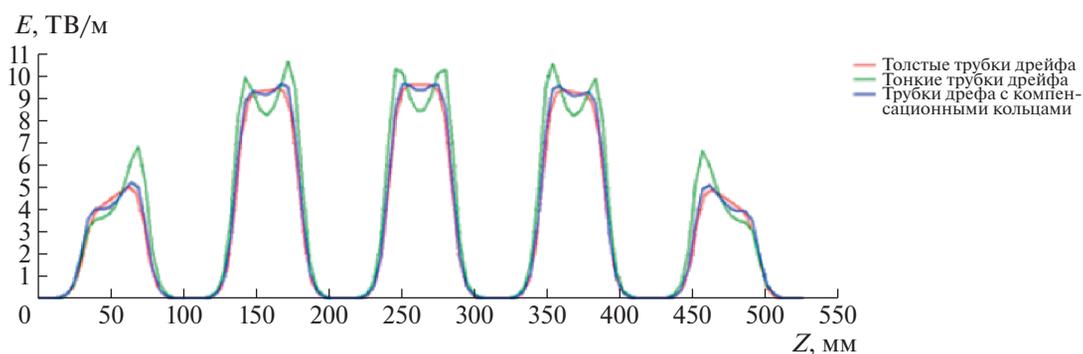


Рис. 5. График распределения ускоряющего поля вдоль оси пролета пучка.

торах ИИ–типа, рассчитанных на частоту 80.0 МГц, при которых потери в стенках резонатора P не будут превышать 50 кВт для структур со скоростью 0.06с и 150 кВт для структур со скоростью 0.1с рассчитаны значения шунтовых сопротивлений $R_{ш}$ для трех вариантов геометрии трубок дрейфа (рис. 3). Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Показано, что для структуры со скоростью 0.06с напряжение на резонаторе при ограничении мощности потерь в 50 кВт лежит в диапазоне от

2.14 до 2.7 МВ, для структуры со скоростью 0.1с при ограничении мощности потерь в 150 кВт напряжение в диапазоне от 3.5 до 4.8 МВ.

Структуры со скошенными торцами трубок дрейфа для предотвращения мультипаткорного разряда обеспечивают равномерность поля до значений напряжения 2.1 и 3.5 МВ соответственно. Геометрия трубок дрейфа с компенсирующими кольцами позволяет повысить эти значения до 2.4 и 3.8 МВ соответственно. Таким образом показано, что геометрия с использованием тонких трубок

Таблица 2. Значения шунтовых сопротивлений и максимальных значений напряжения на резонаторе с учетом ограничения по мощности потерь в стенках резонатора

Параметр	Структура с трубками дрейфа типа рис. 3а	Структура с трубками дрейфа типа рис. 3б	Структура с трубками дрейфа типа рис. 3в	Структура с трубками дрейфа типа рис. 3а	Структура с трубками дрейфа типа рис. 3б	Структура с трубками дрейфа типа рис. 3в
β		0.06			0.1	
P , кВт		50			150	
t , мм	5	5	50	5	5	50
$R_{ш}$, МОм	143.4	123.1	89.7	156.2	95.8	80.3
U , МВ	2.7	2.4	2.1	4.8	3.8	3.5

дрейфа с компенсационными кольцами позволяет обеспечить возможность получения большего значения ускоряющего поля (напряжения на резонаторе) по сравнению со структурой со скосами и при этом избежать ухудшения равномерности распределения ускоряющего поля на оси. Однако при принятии решения о выборе геометрии трубок дрейфа так же следует учитывать тот факт, что структура со скосами является на порядок проще и дешевле в изготовлении по сравнению со структурой с компенсационными кольцами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты расчетов показали, что пятизачорные ускоряющие структуры ИН-типа на частоте 80 МГц со скоростью 0.06c позволяют обеспечить напряжение на резонаторе при ограничении мощности потерь в 50 кВт с сохранением равномерности распределения ускоряющего поля на оси структуры от 2.1 до 2.4 МВ. При этом для обеспечения равномерности распределения ускоряющего поля на оси при напряжениях свыше 2.1 МВ необходимо использовать геометрию пролетных трубок с компенсационными кольцами. Для структуры со скоростью 0.1c, при ограничении мощности потерь в 150 кВт, этот диапазон составляет от 3.5 до 3.8 МВ. Геометрия с компенсационными трубками требуется при напряжениях выше 3.5 МВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Kurennoy S., Rybarcyk L. and Wangler T.* // Proc. PAC07, FROBC03. P. 3824–3826. <https://doi.org/10.1109/PAC.2007.4439921>
2. *Paramonov V.V., Durkin A.P.* // Proc. Conf. LaPlas-2019. 2019. Moscow: NRNU MPhI. P. 122–123.
3. *Ratzinger U. et al.* // Efficient Heavy Ion Acceleration with IH-Type Cavities for High Current Machines in the Energy Range. Proc. LINAC2016. East Lansing, MI, USA.
4. *Tang R. et al.* // RF and Primary Beam Dynamics Design of a 325 MHz IH-DTL. Proc. IPAC2017. Copenhagen, Denmark.
5. *Henderson, S. et al.,* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2014. V. 763. P. 610–673. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.03.067>
6. *Delayen J.R.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 1987. V. 259. P. 341–357.
7. *Звягинцев В.Л.* Теоретическое и экспериментальное исследование сверхпроводящих коаксиальных четвертьволновых резонаторов для линейных ускорителей ионов / Дисс. к.т.н. 2013. Москва.
8. *Ratzinger U.* // Proc. CAS-CERN Accelerator School: Radio Frequency Engineering. 2015. P. 351. <https://doi.org/10.5170/CERN-2005-003.351>
9. *Ben-Zvi, Brennan J.M.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 1983. V. 212. P. 73–79.
10. *Гусарова М.А.* Мультипакторный разряд в элементах и узлах линейных ускорителей / Дисс. к.т.н. 2009. Москва.

Development OF IH–Type Acceleration Structures

A. A. Gorchakov¹, *, M. A. Gusarova¹, M. V. Lalayan¹, and S. E. Toporkov¹

¹National Research Nuclear University MPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*e-mail: aagorchakov@mephi.ru

Received July 19, 2021; revised September 9, 2021; accepted September 28, 2021

Abstract—The paper presents the results of the development of short five-band accelerating structures of IH-type with a fixed length of accelerating gaps, calculated at a frequency of 80 MHz and velocities of 0.06c and 0.1c. The issues of choosing the optimal length of accelerating gaps, the geometry of drift tubes and the system of fixing drift tubes, taking into account restrictions on the magnitude of high-frequency losses in the walls of the resonator and ensuring the field distribution on the axis, at which the field value in the extreme accelerating gaps is at least 50% of the field value in the central gaps, are considered.

Keywords: accelerating structures, accelerating gaps, cavity walls, IH-type cavities