

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

УДК 621.384.6

РАСЧЕТ ПОРОГОВЫХ УРОВНЕЙ МУЛЬТИПАКТОРНОГО РАЗРЯДА В ОДНОАЗОРНОМ ГРУППИРОВАТЕЛЕ НА ЧАСТОТУ 80 МГц

© 2022 г. М. М. Булгачева^а, *, М. А. Гусарова^а

^аНациональный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, 115409 Россия

*E-mail: margaritabulgacheva@gmail.com

Поступила в редакцию 19.07.2021 г.

После доработки 09.08.2021 г.

Принята к публикации 17.08.2021 г.

В статье приведены результаты расчета пороговых уровней напряженности электрического поля, при которых возможно развитие мультипакторного разряда в одноазорном группирователе на частоту 80 МГц. Рассмотрены два вида геометрии зазора с расширением от 18 до 25 мм и с расширением от 18 до 80 мм. Представлены результаты моделирования мультипакторного разряда с использованием программы MultP-M.

Ключевые слова: мультипакторный разряд, одноазорный группирователь

DOI: 10.56304/S2079562922010109

ВВЕДЕНИЕ

В работе рассматривается резонатор, предназначенный для группировки легких ионов после ускоряющей секции ПОКФ. Геометрия группирователя (банчера) выбрана с учетом размещения магнитов в области резонатора, слева и справа от ускоряющего зазора. Рассмотрены два вида геометрии зазора с расширением от 18 до 25 мм (рис. 1а) и с расширением от 18 до 80 мм (рис. 1б). Рабочее напряжение на резонаторе должно составлять 8 кВ.

Для резонаторов данного типа опасность представляет возможность возникновения мультипакторного разряда [1–4] в двух областях: в области узкого зазора и в области внешней поверхности резонатора [5–8]. В области зазора разряд возникает при низких уровнях напряжения на резонаторе. На высоких уровнях напряжения разряд может возникать на внешней поверхности резонатора.

Пороговые уровни напряженности электрического поля в зазоре могут быть рассчитаны аналитически (1) [9]. Для определения пороговых уровней возникновения мультипакторного разряда в области внешней поверхности требуется трехмерное моделирование траекторий движения частиц данной области [10].

Для двух вариантов геометрии одноазорного группирователя, рассчитанного на рабочую частоту 80 МГц, проведен аналитический расчет пороговых уровней мультипакторного разряда в зазоре и моделирование мультипакторного разряда с использованием программы трехмерного моделирования MultP-M [11–13].

1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ МУЛЬТИПАКТОРНОГО РАЗРЯДА В ЗАЗОРЕ

В узком длинном зазоре опасность представляет двухповерхностный мультипакторный разряд низких порядков [9]. Порядком мультипакторного разряда называется число ВЧ периодов за которое электрон возвращается к поверхности. Проведен аналитический расчет (1) пороговых уровней напряженности электрического поля при которых возможно развитие мультипакторного разряда в зазоре. Результаты расчета пороговых уровней напряженности электрического поля при которых возникает мультипакторный разряд в зазоре на частоте 80 МГц при различной длине зазора

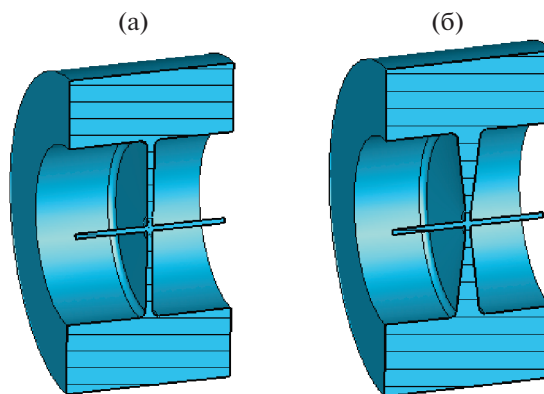


Рис. 1. Геометрия вакуумной области группирователя на частоту 80 МГц: (а) расширение зазора от 18 до 25 мм; (б) расширение зазора от 18 до 80 мм.

Таблица 1. Величина пороговых уровней напряженности электрического поля E , при которых возникает мультипакторный разряд в зазоре на частоте $f = 80$ МГц при различной длине зазора d

d , мм	E , В/м $n = 1$	E , В/м $n = 2$	E , В/м $n = 3$	E , В/м $n = 4$
18	8500	2800	1700	1200
38	17900	6000	3600	2600
58	27400	9100	5400	3900
78	36800	12600	7300	5300

представлены в табл. 1. Так же для двух вариантов геометрии одноззорного группирователя, представленных на рис. 1, получены распределения электрического поля в структуре на рабочем уровне напряжения 8 кВ (рис. 2).

$$E = \frac{d(2\pi f)^2 m}{(2n-1)\pi e}, \quad (1)$$

где E — напряженность поля в зазоре, d — длина зазора, m — масса электрона, e — заряд электрона, n — порядок мультипакторного разряда.

Определено, что при на рабочем уровне напряжения 8 кВ поле в зазоре от центра к периферии спадает от 650 до 100 кВ/м. При этом диапазон уровней поля опасных с точки зрения возникновения мультипакторного разряда лежит в диапазоне от 37 до 1.2 кВ/м, что значительно ниже рабочего.

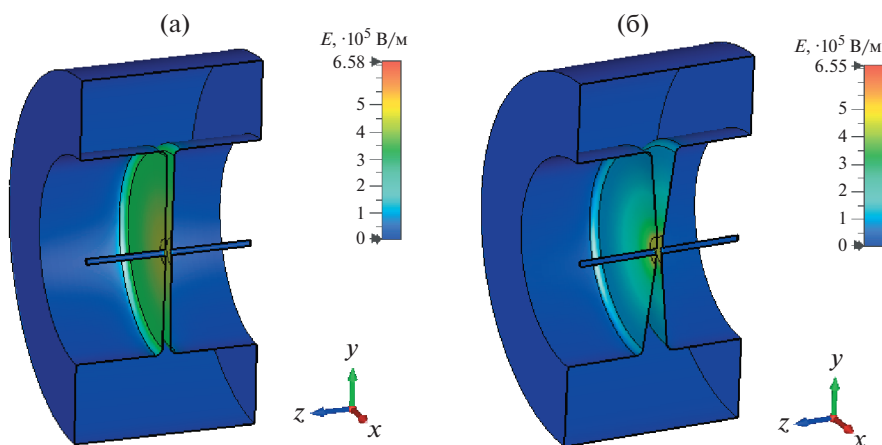
Таким образом показано, что на рабочем уровне напряжения минимальные значения электрического поля в зазоре для обоих вариантов геометрии значительно превышают пороговые уровни возникновения мультипакторного разряда и на

рабочем уровне напряжения мультипакторный разряд не будет представлять опасности. Однако при запуске, в ходе тренировки возможно возникновение мультипакторного разряда. В этой связи больший угол наклона стенки предпочтительнее в связи с тем, что затухание траекторий движения электронов будет происходить быстрее.

2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МУЛЬТИПАКТОРНОГО РАЗРЯДА

Для рассматриваемой структуры проведено трехмерное моделирование мультипакторного разряда в программе MultP-M [11–13]. Получены графики зависимости прироста числа электронов в структуре, по отношению к первичному числу электронов за 10 ВЧ периодов при различных уровнях напряжения на резонаторе (рис. 3). Значение поля отображается в нормированном виде. Единица нормированного поля соответствует напряжению 124 и 180 кВ на резонаторе соответственно.

Из полученных графиков прироста числа частиц в структуре определено, что прирост частиц наблюдается при напряжениях на резонаторе более

**Рис. 2.** Распределение электрического поля в группирователе на рабочем уровне напряжения 8 кВ: (а) геометрия с расширением зазора от 18 до 25 мм; (б) геометрия с расширением зазора от 18 до 80 мм.

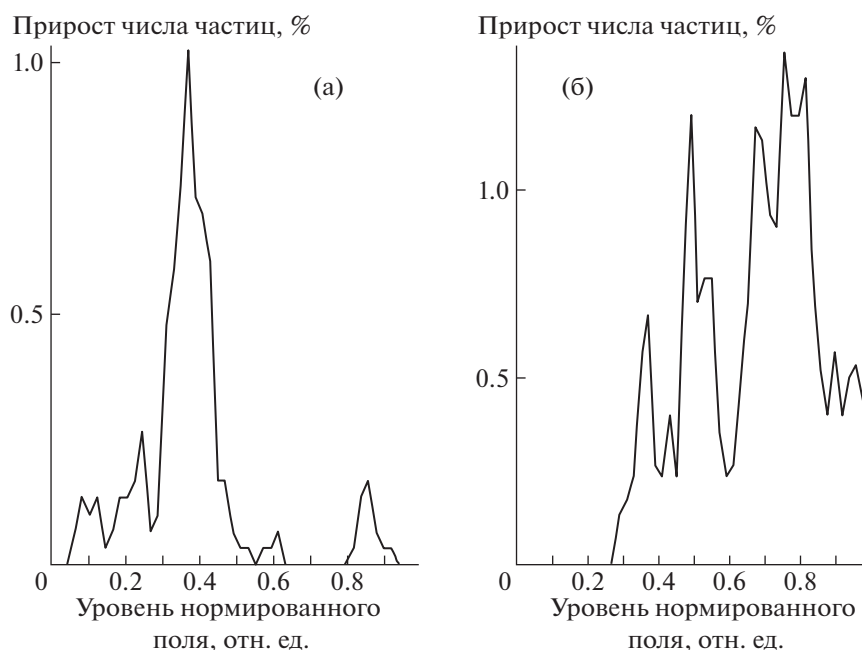


Рис. 3. Графики зависимости прироста числа электронов в структуре, по отношению к первичному числу электронов за 10 ВЧ периодов при различных уровнях напряжения на резонаторе: (а) геометрия с расширением зазора от 18 до 25 мм; (б) геометрия с расширением зазора от 18 до 80 мм.

6 кВ для геометрии с узким зазором и более 45 кВ для структуры с широким зазором. Таким образом показано, что структура с широким зазором позволяет снизить вероятность развития мультипакторного разряда на рабочем уровне напряжения.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен расчет пороговых уровней напряженности электрического поля, при которых возможно развитие мультипакторного разряда в однозазорном группирователе на частоте 80 МГц. Аналитический расчет показал, что пороговые уровни возникновения разряда лежат ниже рабочего уровня для области зазора для обоих вариантов геометрии. Численное моделирование мультипакторного разряда в структуре показало, что геометрия с большим углом наклона стенки предпочтительнее в связи с тем, что затухание траекторий движения электронов будет происходить быстрее и пороговые уровни прироста числа электронов превышают рабочий уровень напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Brown S.* Basic Data of Plasma Physics. 1959 (1994). New York: American Institute of Physics. P. 202–221.
2. *Vaughan J.R.M.* // IEEE Trans. Electron. Device. 1988. ED-35 (7). P. 1172.
3. *Hatch A.J., Williams H.B.* // Phys. Rev. 1958. V. 112. P. 681.
4. *Kishek R.A., Lau Y.Y., Ang L.K. et al.* // Phys. Plasmas. 1998. V. 5 (5). P. 2120.
5. *Shemelin V.D., Belomestnykh. S.* Multipactor in Accelerating Cavities. 2020. Cham: Springer Intl. Publ. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-48198-8>
6. *Гусарова М.А., Каминский В.И., Лалаян М.В., Собенин Н.П.* Мультипакторный разряд в сверхвысоко-частотных узлах и элементах ускорителей заряженных частиц. 2011. Москва: НИЯУ МИФИ. С. 7.
7. *Gusarova M.A. et al.* // Proc. 24th Russian Particle Accelerator Conf. (RuPAC-2014). 2014. Obninsk, Russia. P. 166–168.
8. *Gusarova M.A. et al.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 1067 (8). P. 082005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1067/8/082005>
9. *Padamsee H., Knobloch J., Hays T.* RF Superconductivity for Accelerators. 1998. New York: Wiley. P. 191.
10. *Gusarova M.A. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sec. A. 2009. V. 599 (1). P. 100–105. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.09.047>
11. *Khudyakov. S. et al.* // Proc. 24th Russian Particle Accelerator Conf. (RuPAC-2014). 2014. Obninsk, Russia. P. 169–171.
12. *Gusarova M.A. et al.* // Proc. 5th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC-2014). 2014. Dresden, Germany. P. 433–435.
13. *Gusarova M.A. et al.* // Probl. At. Sci. Tech. Ser. Nucl. Phys. Investig. 2008. V. 49 (3). P. 123–127.

Multipactor Discharge in the Single Gap Bunchers at 80 MHz

M. M. Bulgacheva^{1, *} and M. A. Gusarova¹

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

**e-mail: margaritabulgacheva@gmail.com*

Received July 19, 2021; revised August 9, 2021; accepted August 9, 2021

Abstract—The results of calculating the threshold voltage levels causing multipactor discharge in single-gap buncher cavities at 80 MHz are presented in the article. Two types of gap geometry with an extension from 18 to 25 mm and with an extension from 18 to 80 mm are considered. The results of modeling a multipactor discharge using the MultP-M program are presented.

Keywords: multipactor discharge, single-gap buncher