

**А.М. Альтмарк, А.Д. Канарейкин, И.Л. Шейнман,  
С.С. Батури**

Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

## **Динамика электронного сгустка в прямоугольном волноводе с диэлектрическим заполнением**

*Поперечная динамика частиц, обусловленная собственными отклоняющими полями пучка в кильватерной ускорительной структуре, является серьезным ограничением эффективности метода кильватерного ускорения. В данной работе мы представляем результаты численных расчетов динамики пучка в прямоугольном волноводе. Расчеты проведены на основе аналитических формул для кильватерного поля, создаваемого точечным зарядом, которые инкорпорированы в программу расчетов динамики пучков BBU 3000. Показано, что основной вклад в отклоняющее поле вносят LSE моды.*

**Ключевые слова:** кильватерное ускорение, диэлектрический волновод, электронный сгусток, поперечная динамика

Новый метод кильватерного ускорения с использованием пучков заряженных частиц, проходящих через диэлектрический волновод, в настоящее время является предметом интенсивных экспериментальных и теоретических исследований [1-5].

Методы кильватерного ускорения в диэлектрических структурах являются одними из самых многообещающих в настоящее время для достижения высоких ускоряющих градиентов, а также их использования при создании нового поколения линейных коллайдеров [2-4]. Ускорительная структура представляет собой частично заполненный диэлектриком волновод, в частности, в настоящей статье будет рассмотрен волновод прямоугольной геометрии, рис.1. Ускоряющий (генераторный) сгусток электронов с высоким зарядом распространяется в вакуумной полости и генерирует излучение Вавилова-Черенкова (кильватерное поле). Продольное электрическое поле генераторного сгустка используется для ускорения следующего за ним ускоряемого сгустка с высокой энергией и малого заряда. Ускоряющий сгусток генерирует электромагнитные поля с амплитудой продольного электрического поля 100 МВ/м в структурах с частотами порядка нескольких ГГц, а также поля, достигающие значения порядка ГВ/м, в структурах с частотами порядка ТГц [5].

Динамика пучка в кильватерном ускорителе создает дополнительные проблемы по контролю устойчивости пучка, которые не существуют в традиционных ускорительных структурах [6]. Ускоряющий сгусток, распространяющийся в ускорительной структуре, теряет свою энергию, что приводит к росту эммитанса, увеличению разброса по энергии среди частиц и отклонению хвостовой части сгустка при его смещении относительно оси волновода.

Последний эффект вызван влиянием отклоняющего кильватерного поля и является серьезным ограничением в использовании кильватерных диэлектрических ускорителей за счет оседания частиц на стенках ускорительной структуры [6,13].

Целью данной работы является численное моделирование динамики пучка в прямоугольном волноводе (рис. 1), активно используемого для тестовых исследований кильватерных структур в связи с наличием у данной геометрии технологических и конструктивных преимуществ по сравнению с традиционным исполнением ускорительных структур в виде цилиндрического волновода. Мы представляем программный код для быстрого и точного расчета динамики пучка в прямоугольном волноводе [13].

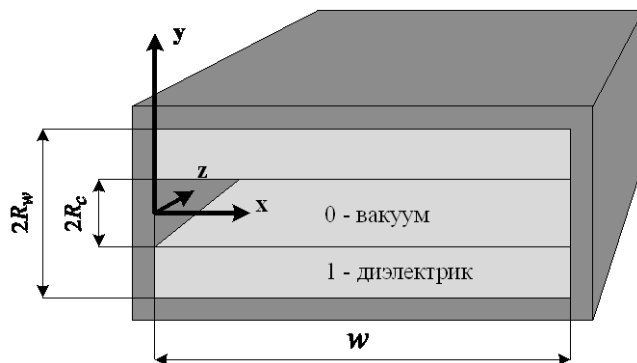


Рис. 1.

Полное кильватерное поле может быть представлено в виде разложения на *LSM* (продольно магнитные) и *LSE* (продольно электрические) моды, причем каждый тип этих мод состоит из четных и нечетных компонентов соответственно, эта классификация волн основана на симметрии собственных функций поперечных операторов волновода относительно *y* координаты [7-9]. Поперечная отклоняющая сила представляет собой векторную сумму компонент  $F_x$  и  $F_y$ , которые могут быть выражены в системе СГС как:

$$F_x = E_x - \beta H_y, \quad F_y = E_y + \beta H_x.$$

На рис. 2 показана зависимость поперечного поля от поперечных координат *x* и *y*, причем предполагаем, что поперечные координаты и сгустка и точки наблюдения совпадают. Увеличивая смещения заряда по оси *y*, можно увидеть, что все типы мод вносят вклад в отклоняющее поле. Вклад асимметричной *LSE* моды в отклоняющее поле является самым максимальным, рис. 2а. При смещении заряда вдоль оси *x* отклоняющее поле определяется только нечетными *LSM* и четными *LSE*-модами. Как видно из рис. 2б максимум поперечного поля достигается при смещении сгустка по *x* на четверть ширины волновода  $w/4$ .

Численное моделирование поперечной динамики пучка проводилось для параметров пучка Аргоннского кильватерного ускорителя:  $Q=100$  нКл,  $\sigma_z=0.4$  см,  $\sigma_x=0.3$  см,  $\sigma_y=0.1$  см,  $W=15$  МэВ [10-11]. Пучок движется в диэлектрической структуре (рис. 1) с параметрами  $R_d=0.5$  см,  $R_w=1$  см,  $\varepsilon=10$ ,  $w=2.3$  см.

Разработанный алгоритм расчета динамики пучка в прямоугольном волноводе интегрирован в программу BBU-3000, которая использовалась для быстрого и точного расчета динамики в цилиндрических волноводах [13]. Новые возможности программы позволяют более точно и эффективно производить расчеты для прямоугольных диэлектрических волноводов [7-9, 12].

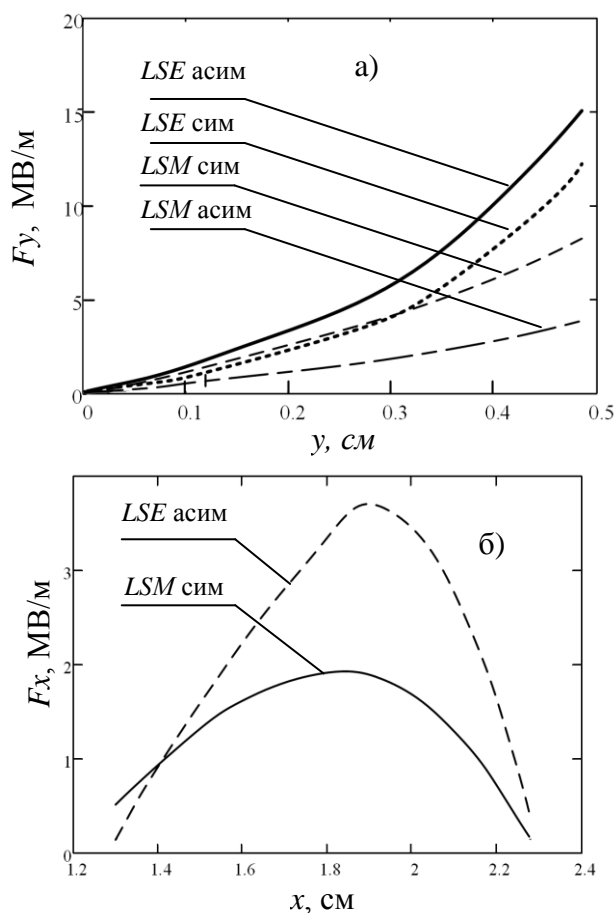


Рис. 2.

Для сгустка, распространяющегося в прямоугольном волноводе, наибольшее отклоняющее воздействие испытывают частицы, находящиеся в хвостовой части. Расчеты показали, что при начальном смещении сгустка вдоль оси  $y$  на 3 мм, он пролетает в волноводе только 4 см, после чего частицы попадают на диэлектрическую стенку. Поперечный срез сгустка показывает, что наибольшее отклоняющее воздействие испытывают частицы, расположенные в центре хвостовой части сгустка сгустка.

В то же время, уменьшение начального смещения сгустка до 800 мкм увеличивает дистанцию пролета лишь до 10 см. Представленные результаты исследования показывают, что введение внешней фокусировки в прямоугольный диэлектрический кильватерный ускоритель является столь же необходимой мерой, как и в ускорителях цилиндрической формы, которые исследовались в работах [6,13]. Необходимо спроектировать систему внешней фокусировки FODO для контроля поперечной устойчивости пучка в присутствии сильных отклоняющих полей.

Разработанный алгоритм расчета поперечной динамики пучков инкорпорирован в программу BBU-3000, что расширило возможности данной программы для расчета динамики пучков.

Результаты численного моделирования динамики показали, что основной вклад в ускоряющее поля вносят асимметричные  $LSE$  моды. Наибольшее отклоняющее воздействие возникает вдоль оси  $y$ , перпендикулярной диэлектрическому заполнению

волновода. Максимальное отклоняющее воздействие по  $x$  наблюдается при смещении сгустка на четверть ширины волновода. Расчеты для указанных параметров пучка и волновода определяют дистанцию его пролета без фокусировки, которая варьируется в диапазоне от 4 до 10 см. Указано на необходимость использования в процессе ускорения квадрупольной фокусирующей системы.

Работа поддержана грантами РФФИ и Минобрнауки (ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры России»).

#### Библиографический список

1. Gai W., Schoessow P., Cole B., Konecny R. et al. // Phys. Rev. Lett. 1988. 61. 2756.
2. Gai W. // AIP Conference Proceedings. 2009. v. 1086. pp. 3-11.
3. Conde M.E. // Proceedings of PAC07, Albuquerque (New Mexico, USA) 2007. pp.1899-1903.
4. A.Kanareykin // Journal of Physics, Conf. Ser. 2010. 236. 012032.
5. Thompson M. C., et al., // Phys. Rev. Lett. 2008. 100. 214801.
6. Gai W., Kanareykin A. D., Kustov A., Simpson // J.. Phys. Review E. 1997. v.55. №3. pp.3481-3488.
7. Xiao L., Gai W., Sun X. // Physical Review E.2001. V. 65. pp. 1-9.
8. Jing C., Liu W., Gai W., Xiao L., and Wong T. // Phys. Rev. E 2003. 68. 016502.
9. Zhang T-B., Hirshfield J. L., Marshall T. C., Hafizi B. // Phys. Rev. E. 1997.56.
10. Altmark A., Kanareykin A., Sheinman I. // Proc. PAC03, Portland (USA) 2003 1899. pp.1897.
11. Altmark A.M., Kanareykin A. D., and Sheinman I. L. // Techn. Phys. 2005.50.1.
12. Altmark A., Sheynman I.L., Baturin S., Kanareykin A. // Proc. of IPAC. Kyoto (Japan). 2010. THPD057.
13. Altmark A., Schoessow P., Kanareykin A., Jing C., Kustov A., Power J.G., Gai W. // AIP Conf. Proc. 2009. 1086. pp.404-409.