

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

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

Численные и аналитические методы моделирования СВЧ/ТГц структур на основе диэлектрика

СВЧ/ТГц волноводные структуры являются основой для разработки нового поколения ускорителей на базе кильватерного метода ускорения заряженных частиц, а также лазеров на свободных электронах. Рассмотрены численные и аналитические методы расчета излучения Вавилова-Черенкова, генерируемого релятивистскими электронными сгустками в волноводах с диэлектрическим заполнением.

Ключевые слова: СВЧ, ТГц, ускоряющие структуры, кильватерное ускорение, диэлектрический волновод, электронный сгусток

Современная ускорительная техника находится в поиске новых методов для обеспечения прогресса в области экспериментальной физики высоких энергий. Разработанные технологии кильватерного ускорения электронов в структурах с диэлектрическим заполнением на эффекте Вавилова–Черенкова являются одним из наиболее перспективных направлений создания высокоградиентных структур современных линейных ускорителей для физики высоких энергий [1]. Линейные кильватерные ускорители с диэлектриком рассматриваются также в качестве источников последовательности электронных сгустков для лазера на свободных электронах как источника ультракоротких импульсов рентгеновского излучения [2].

Одним из самых существенных требований к ускорителю является требование создания высокого градиента ускоряющей структуры для того, чтобы электронный сгусток набрал энергию \sim ГэВ на предельно коротких расстояниях. Волноводные структуры, заполненные диэлектриком, с возбуждением поля в них как непосредственно сильноточным электронным пучком, так и за счет внешнего высокочастотного генератора большой мощности, интенсивно исследовались на протяжении последних лет [1]–[15] с точки зрения перспектив их использования как высокоградиентных линейных ускорителей.

Ключевыми задачами здесь являются расчеты полей и частот генерации излучения Вавилова-Черенкова проходящими через диэлектрическую структуру сильноточными релятивистскими электронными пучками, а также моделирование и оптимизация параметров ускоряющих структур в СВЧ и ТГц диапазонах. Особое значение имеет описание самосогласованного движения релятивистского электронного пучка в создаваемых им полях излучения Вавилова-Черенкова.

Ускоряющая структура с диэлектрическим заполнением представляет собой диэлектрический волновод с осевым вакуумным каналом для пролета пучка, заключенный в проводящую металлическую оболочку. Как правило, в структурах с диэлектрическим заполнением в СВЧ диапазоне предполагается использование цилиндрической геометрии, рис. 1, что существенно как для достижения максимальных ускоряющих градиентов, так и для получения максимально возможного шунтового

импеданса структуры. Аналитический модовый анализ подобных ускоряющих структур для продольных и поперечных компонент электрического поля был разработан в [3, 4].

Наряду с цилиндрической геометрией в СВЧ и ТГц диапазонах рассматриваются также прямоугольные в сечении структуры с диэлектрическим заполнением [5-11], рис. 2, что вызвано рядом технологических причин [11].

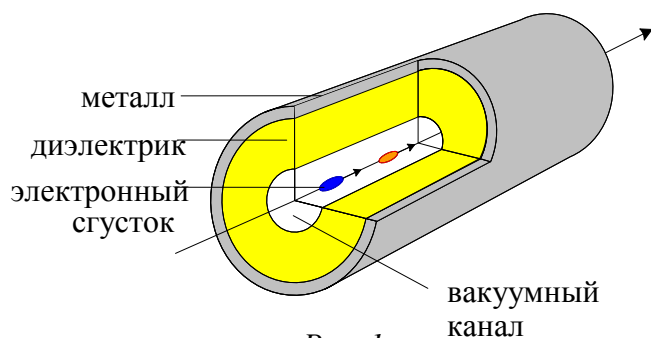


Рис. 1.

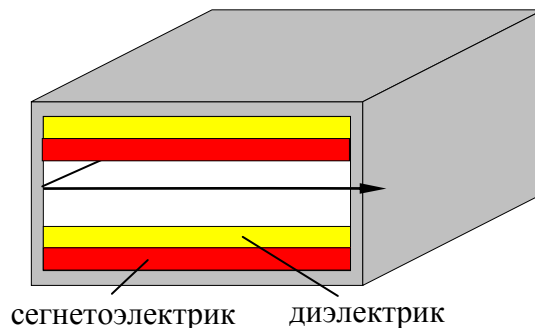


Рис. 2

Удовлетворение фазовым соотношениям (необходимость держать слаботочный сгусток в ускоряющей фазе волны) требует соблюдения жестких допусков на параметры волноведущей структуры и позиционирование сгустков. В случае ускорения ультрарелятивистских сгустков прирост энергии пучка не сопровождается нарушением фазовых соотношений волна-сгусток. Однако сохраняется проблема компенсации частотных сдвигов, вызванных отклонением реальных параметров структуры от расчетных параметров, а также межсекционным согласованием волноводов ускорителя. Изменение диэлектрической проницаемости волноведущей системы позволяет оперативно регулировать фазовые соотношения волна – сгусток и обеспечивать наиболее выгодные энергетические условия для ускорения. Для кильватерной ускорительной структуры с диэлектрическим заполнением как цилиндрической, так и прямоугольной геометрии была предложена схема управления частотным спектром волновода с помощью введения в заполнение волновода дополнительного слоя сегнетоэлектрика [5], рис. 2. Его нелинейные свойства допускают управление частотным спектром волновода путем приложения к сегнетоэлектрическому слою статического электрического напряжения или вариацией температуры структуры.

Теоретический анализ параметров генерации излучения Вавилова-Черенкова, а также моделирование диэлектрических ускорительных структур цилиндрической и прямоугольной геометрии проводился на основе неоднородной системы уравнений Максвелла. Ее решение производится методами преобразования Фурье-Бесселя в цилиндрической геометрии и разложением по собственным функциям поперечных операторов в прямоугольной. При этом кильватерное поле за гауссовым сгустком имеет вид

$$E_z(\zeta, r) = q \sum \psi_{E_{z,n,m}}(f_{n,m}, r) \exp\left(-k_{z,n,m}^2 \sigma_z^2 / 2\right) \cos(k_{z,n,m} \zeta),$$

где $\psi_{E_z n, m}(f_{n, m}, r)$ – коэффициенты ряда, зависящие от геометрии, диэлектрической проницаемости волновода и начального положения заряда, $k_{z n, m} = 2\pi f_{n, m}/(\beta c)$ – продольная компонента волнового вектора кильватерной волны, $f_{n, m}$ – собственные частоты волновода, σ_z характеризует длину сгустка, $\zeta = z - Vt$ – расстояние за сгустком. Выражения для амплитуд полей генерации, как и решения дисперсионных уравнений для цилиндрического волновода приведены в [3], а для структур прямоугольной геометрии результаты представлены в [12].

Для определения полей в кильватерных структурах цилиндрической и прямоугольной геометрии нашей научной группой был разработан программные комплексы Waveguide [6] и Rectangular [12], позволяющие находить поля генерации, создаваемые цепочкой релятивистских электронных сгустков в структурах соответствующей геометрии. В качестве примера на рис. 3 приведен результат расчета кильватерного поля, генерируемого в цилиндрической диэлектрической кильватерной ускорительной структуре с базовой частотой 13.625 ГГц и радиусом вакуумного канала 5 мм цепочкой из 4-х сгустков. Оптимизация геометрических размеров слоев волновода, а также электродинамических параметров материала его заполнения, осуществляется с целями увеличения шунтового импеданса структуры, оптимизации групповой скорости и повышения амплитуды кильватерной волны в структуре. Рис. 4 иллюстрирует выбор оптимальных размеров волновода для получения максимальных кильватерных полей в структуре.

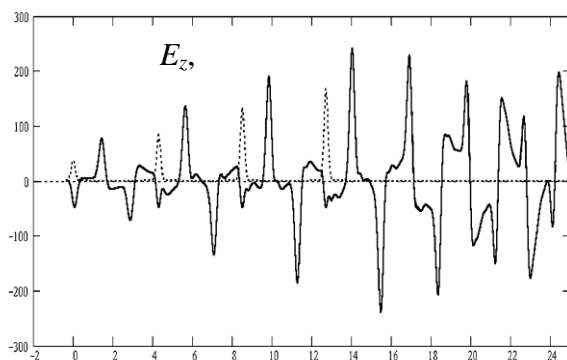


Рис. 3.

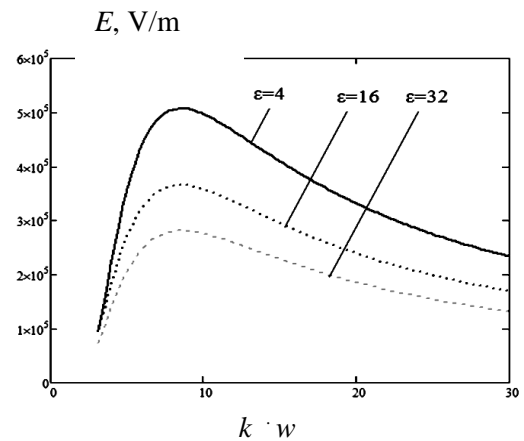


Рис. 4.

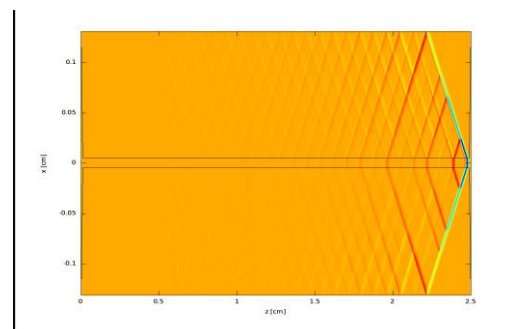
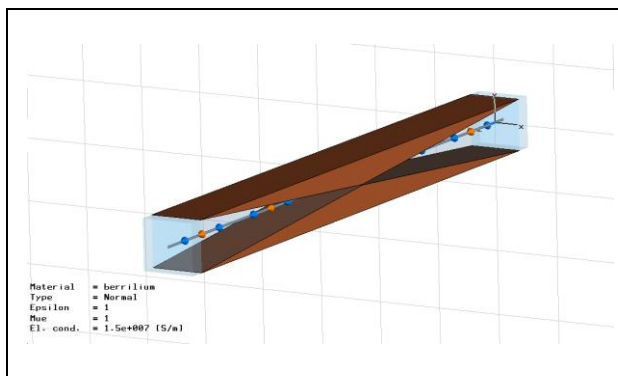


Рис. 5.

Рис. 6.

Численный анализ свойств излучения Вавилова-Черенкова в структурах со сложным (поперечно-неоднородным заполнением) осуществляется с помощью ряда пакетов программ, специально разработанных для расчетов кильватерных полей в 3D геометриях. Для этих целей использовался, в частности, новый гибридный FDTD-Фурье пакет ARAKIS/SLAB, успешно примененный для расчета кильватерных полей в многослойных коллиматорах с диэлектриком [13]. В данном пакете используется 2D подход в сочетании с численным Фурье разложением поперечных компонент кильватерного поля, что позволяет существенно сократить требуемые объемы памяти и увеличить скорость вычислений по сравнению с часто используемым 3D пакетом CSTTM [13, 14]. На рис. 6 приведены результаты расчета кильватерных полей, генерируемых сгустком в 3нКл длиной 30 мкм в коллиматоре рис. 5, использованного для проекта коллайдера CLIC [13].

Представленные методы расчета полей излучения Вавилова-Черенкова в кильватерных ускорительных структурах открывают перспективы для разработки нового поколения ускорителей для физики высоких энергий и перспективных источников излучения в интенсивно осваиваемом в настоящее время терагерцовом диапазоне частот.

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. 61, 2756 (1988).
2. C.Jing, A. Kanareykin, J.G. Power, A. Zholents. Dielectric Wakefield Accelerator to Drive the Future FEL Light Source. Proceedings IPAC'11, 2011. P. 1485-1487.
3. Канарейкин А.Д., Шейнман И. Л., Альтмарк А.М. Возбуждение цилиндрических диэлектрических волноводов релятивистским электронным сгустком // «Известия СПбГЭТУ. Сер. «Физика. Математика. Химия». 2001. Вып. 1. С. 13–20.
4. M. Rosing and W. Gai. Phys. Rev. D, 1990. Vol. 42. №5. P. 1829–1834.
5. Альтмарк А. М., Канарейкин А. Д., Шейнман И. Л. Управляемая ускорительная кильватерная структура с диэлектрическим заполнением//ЖТФ. 2005. Т.75. Вып.1. С.89-97.
6. А. Д. Канарейкин, И. Л. Шейнман. Анализ потерь в прямоугольной многослойной управляемой структуре с диэлектрическим заполнением // Письма в ЖТФ. 2007, Т. 33, № 8, с. 59–64.
7. L. Xiao, W. Gai, X. Sun. Field. Physical Review E, V. 65, 2001, pp. 1-9.
8. C. Jing, W. Liu, Wei Gai, L. Xiao, and T. Wong. Phys. Rev. E 68 016502, 2003
9. A. Tremaine, J. Rosenzweig, P. Schoessow, W. Gai. Phys. Rev. E 56 7204 (1997).
10. C. Wang, J.L. Hirshfield. Theory of wakefields in multizone dielectric lined waveguide // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2006, v.9, №3, 031301(18).
11. Kanareykin A. Journal of Physics, Conf. Ser., 236 (2010), 012032
12. С. С. Батурин, И. Л. Шейнман, А. М. Альтмарк, А. Д. Канарейкин. Кильватерное излучение, генерируемое электронным сгустком в прямоугольном диэлектрическом волноводе. ЖТФ, 2012, Т. 82, № 5, с. 106-114.
13. A. Kanareykin, P. Schoessow, R. Tomas Garcia, S. Baturin. Dielectric Collimators For Linear Collider Beam Delivery System. Proceedings PAC'11, N.Y., pp. 2330-2333, 2011
14. www.cst.com