

С.С. Батурин, И.Л. Шейнман, А.Д. Канарейкин
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Анализ структуры излучения Вавилова-Черенкова, генерируемого электронным сгустком в СВЧ прямоугольном диэлектрическом волноводе с анизотропным заполнением

Проведен аналитический метод расчета излучения Вавилова-Черенкова, генерируемого релятивистским электронным сгустком в прямоугольном волноводе с поперечно-неоднородным анизотропным диэлектрическим заполнением. Представлен метод построения ортогонального базиса поперечного оператора с последующим его использованием для нахождения кильватерного поля. Получены дисперсионное уравнение для структуры и выражения для кильватерного поля, создаваемого точечным электронным сгустком. На основе изложенного формализма для генераторного сгустка ускорителя AWA Аргоннской Национальной лаборатории проведены расчеты параметров ускорительной структуры на основе сапфира, допускающей генерацию градиентов $> 100 \text{ МВ/м}$.

Ключевые слова: кильватерное ускорение, ускорительная структура, прямоугольный волновод, диэлектрический волновод, электронный сгусток

Область перспективных ускорителей заряженных частиц находится в поиске новых революционных технологий, позволяющих достичь прогресса в создании ускорителей для экспериментов физики высоких энергий. Методы, основанные на концепции кильватерного ускорения в структурах с диэлектрическим заполнением, в настоящее время являются одними из наиболее многообещающих в смысле возможности создания высокоградиентных ускоряющих структур для будущего поколения линейных коллагеров [0, 2]. Эти структуры могут быть возбуждены сильноточным электронным пучком (проект коллагера CLIC) или мощным внешним источником СВЧ-излучения. Ускоряющая структура с диэлектрическим заполнением представляет собой диэлектрический волновод с осевым вакуумным каналом для пролета пучка, заключенный в проводящую металлическую оболочку. Сильноточный (до 100 нК), короткий (1-2 мм) генераторный электронный сгусток низких энергий (15-100 МэВ) возбуждает излучение Вавилова-Черенкова (кильватерное поле), которое используется для ускорения менее интенсивного электронного сгустка высоких энергий, движущегося за ведущим сгустком на расстоянии, соответствующем ускоряющей фазе кильватерной СВЧ волны. Диэлектрические кильватерные структуры обеспечивают, наряду с высоким темпом ускорения, также возможность управления частотным спектром структуры посредством введения дополнительных сегнетоэлектрических слоев [3], а также возможность использования для создания ускорительной структуры новых перспективных материалов с уникальными свойствами, таких, как алмаз и сапфир [4].

Как правило, в структурах с диэлектрическим заполнением предполагается использование цилиндрической геометрии, 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 [5]. В то же время, в последнее время в ряде случаев рассматриваются также прямоугольные в сечении структуры с диэлектрическим заполнением [6-12], что вызвано как технологическими сложностями изготовления цилиндрических структур с высокими требованиями к допускам на геометрические параметры и однородность диэлектрической проницаемости заполнения вдоль структур [3], так и возможным использованием для генерации плоского электронного сгустка. Прямоугольные структуры могут быть использованы для тестовых экспериментов при анализе новых ускорительных схем [11] и для изучения свойств материалов, перспективных для высоких темпов ускорения и импульсного нагрева структуры (алмаз, сапфир) [4].

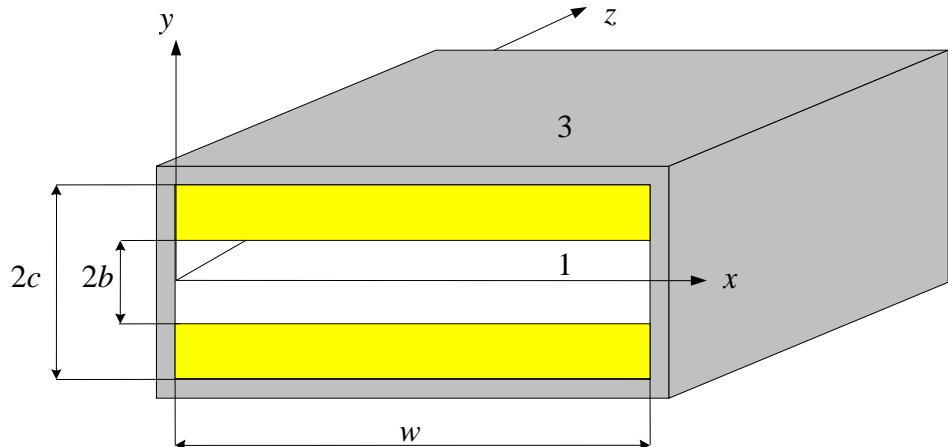


Рис. 1.

Теоретический анализ диэлектрических ускорительных структур прямоугольной геометрии к настоящему времени проводился в ряде работ [6-12]. Для нахождения амплитуд мод излучения Вавилова – Черенкова, возбуждаемых в прямоугольном волноводе с диэлектрическим заполнением ранее использовались техника согласования импедансов [7-9], наряду с методом поперечного резонанса [12]. При использовании подобного формализма, вместо прямого решения неоднородной системы уравнений Максвелла (что является стандартным аналитическим подходом при анализе кильватерных полей в цилиндрических структурах [5]), приходится выражать амплитуды кильватерных полей через шунтовой импеданс (или интегральный фактор потерь) каждой из мод структуры. Подобный подход использует определенные приближения, тогда как прямое решение неоднородной системы уравнений Максвелла без косвенных построений всегда предпочтительнее для анализа задач генерации в волноведущих структурах. В работах [10, 11] приведен анализ на основе прямого решения уравнений Максвелла двухканальной прямоугольной структуры с диэлектрическим заполнением, разрабатываемой для повышения коэффициента трансформации энергии от ведущего пучка к ускоряемому пучку. Однако ряд использованных в [11] математических моментов (такие как изменение знака весового коэффициента в определении нормы и полнота рассматриваемой системы функций, по которой велось разложение) остался без строгого обоснования и требуют дополнительного исследования.

Рассмотрим прямоугольный волновод с симметричным заполнением в виде трансверсально-изотропных диэлектрических слоев, параллельных оси x и вакуумным каналом в центре (рис. 1). В этом случае в направлении оси y заполнение является неоднородным и компоненты тензоров диэлектрической и магнитной проницаемости зависят от y : $\hat{\epsilon} = \hat{\epsilon}(y)$, $\mu = \mu(y)$.

$$\hat{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_{\parallel}(y) & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{\perp}(y) & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{\parallel}(y) \end{pmatrix}, \quad \mu = \begin{pmatrix} \mu_{\parallel}(y) & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{\perp}(y) & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{\parallel}(y) \end{pmatrix}.$$

Из системы уравнений Максвелла следуют уравнения для нормальных к плоскости слоя компонент электрического и магнитного полей

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial \zeta^2} + T_E E_y = \frac{-e}{\epsilon_0 (1 - \epsilon_{\perp} \mu_{\parallel} \beta^2)} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{n}{\epsilon_{\parallel}} \right), \quad \frac{\partial^2 H_y}{\partial \zeta^2} + T_H H_y = \frac{-ev}{1 - \epsilon_{\parallel} \mu_{\perp} \beta^2} \left(\frac{\partial n}{\partial x} \right),$$

где

$$T_E = \frac{1}{(1 - \epsilon_{\perp} \mu_{\parallel} \beta^2)} \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\epsilon_{\parallel}} \frac{\partial}{\partial y} [\epsilon_{\perp} \cdot] \right) \right],$$

$$T_H = \frac{1}{(1 - \epsilon_{\parallel} \mu_{\perp} \beta^2)} \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_{\parallel}} \frac{\partial}{\partial y} [\mu_{\perp} \cdot] \right) \right].$$

Решениями полученных дифференциальных уравнений являются:

$$E_y = \sum_{n,m} \frac{q}{\epsilon_0} \frac{\epsilon_{1\perp}}{\epsilon_{1\parallel}} \frac{\Psi_{E,n,m}(x, y)}{\langle \Phi_{E,n,m}, \Psi_{E,n,m} \rangle} \frac{\partial \bar{\Phi}_{E,n,m}(x_0, y_0)}{\partial y} F_{n,m}(\zeta),$$

$$H_y = qv\mu_{1\perp} \sum_{n,m} \frac{\Psi_{H,n,m}(x, y)}{\langle \Phi_{H,n,m}, \Psi_{H,n,m} \rangle} \frac{\partial \bar{\Phi}_{H,n,m}(x_0, y_0)}{\partial x} F_{n,m}(\zeta),$$

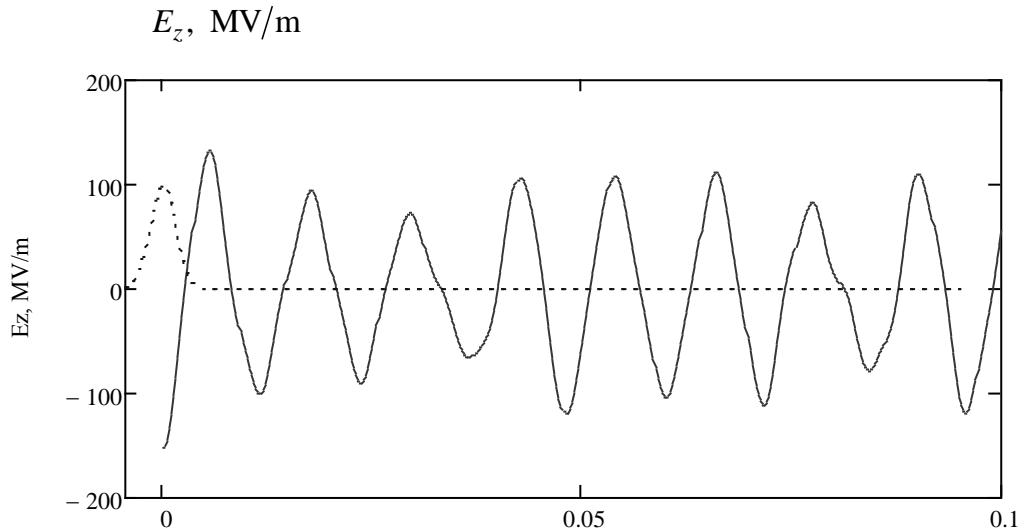
где $\Psi_{n,m}, \Phi_{n,m}$ – собственные функции поперечных операторов и сопряженных им операторов соответственно. $F(\zeta) = -\sin(k_z \zeta)/k_z$ при $\lambda_{E,n,m} > 0$, $k_z = \sqrt{\lambda_{E,n,m}}$; $F(\zeta) = \exp(-k_z \zeta)/(2k_z)$ при $\lambda_{E,n,m} < 0$, $k_z = \sqrt{|\lambda_{E,n,m}|}$.

Выражение для оставшихся компонент полей могут быть найдены из уравнений Максвелла.

На основе полученных выражений был проведен аналитический анализ кильватерных полей, генерируемых гауссовым релятивистским электронным сгустком с параметрами ускорителя AWA в прямоугольной ускоряющей структуре на основе сапфира [4], разрабатываемой в настоящее время в Аргоннской Национальной лаборатории: $w = 11$ mm, $b = 1.5$ mm, $c = 2.39$ mm, $\epsilon_{2\perp} = 11.5$, $\epsilon_{2\parallel} = 9.4$ (рис. 1), что соответствует частоте 25 GHz ускоряющей LM моды структуры.

В качестве источника черенковского излучения рассматривался генераторный электронный сгусток с гауссовым распределением заряда и энергией $W = 15$ MeV, зарядом $q = 100$ nC и длиной сгустка $\sigma_z = 1.5$ mm. Зависимость продольной компоненты

электрического поля E_z , создаваемого сгустком, от расстояния за ним $\xi = z - vt$ представлена на рис. 2 (сгусток расположен в точке $x_0 = w/2$; $y_0 = 0$; $\xi_0 = 8$ см, точка наблюдения $x = w/2$; $y = 0$; $\xi = z - vt$), причем отметим высокий ускоряющий градиент более 100 MV/m кильватерного излучения за сгустком.



На рис. 3 представлены зависимости поперечной структуры полей E_z и H_z . Необходимо отметить возникновение значительных продольных магнитных полей на границе волновода, а также достижение максимума продольного электрического поля вблизи границы диэлектрического слоя.

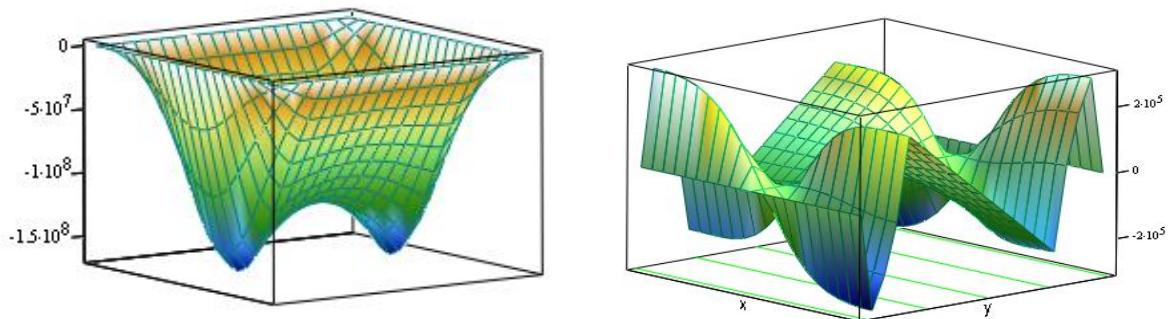


Рис. 3.

Таким образом, в настоящей работе представлен аналитический метод расчета кильватерных полей излучения Вавилова-Черенкова в ускорительной структуре прямоугольного сечения с анизотропным диэлектрическим заполнением. На основе предложенного метода для ускорителя AWA проведена разработка диэлектрической структуры, допускающей ускоряющие градиенты свыше 100 MV/m.

Настоящая работа поддержана грантами РФФИ № 09-02-00921-а и Минобрнауки (ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры России»).

Библиографический список

1. W. Gai, P. Schoessow, B. Cole, R. Konecny et al. Phys. Rev. Lett. 61, 2756 (1988).
2. W.Gai. AIP Conference Proceedings v. 1086, pp. 3-11, 2009.
3. А. М. Альтмарк, А. Д. Канарейкин, И. Л. Шейнман. Управляемая ускорительная кильватерная структура с диэлектрическим заполнением // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 1. С. 89-97.
4. A.Kanareykin. Journal of Physics, Conf. Ser., 236 (2010), 012032
5. M. Rosing and W. Gai. Phys. Rev. D, 1990. Vol. 42. №5. P. 1829–1834.
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. Г. В. Сотников, И. Н. Онищенко, Дж.Л. Хиршфилд, Т.К. Маршалл. Пятизонная двухканальная кильватерная диэлектрическая структура для экспериментов по двухпучковому ускорению в ANL. Проблемы атомной науки и технологии. 2008. № 3. Серия: Ядерно-физические исследования (49), с.148-152.
12. C.A.Balanis. Advanced Engineering Electromagnetics. Wiley, N.Y., 1989, p. 410-414.