

10;09;12

Управляемая кильватерная ускорительная структура с возможностью селекции мод

© А.М. Альтмарк, А.Д. Канарейкин, И.Л. Шейнман

С.-Петербургский государственный электротехнический университет
E-mail: lab@physics.etu.spb.ru

Поступило в Редакцию 6 марта 2003 г.
В окончательной редакции 16 июня 2003 г.

Рассмотрена возможность управления частотным спектром излучения Вавилова–Черенкова в диэлектрическом кильватерном СВЧ-волноводе с помощью внешнего слоя сегнетоэлектрика. Предложенная многослойная схема волновода в сочетании с особой конфигурацией управляющих сегнетоэлектриком электродов допускает как управление частотным спектром, так и подавление мод, соответствующих отклоняющим пучок (дефокусирующим) полям волновода.

Новый метод кильватерного ускорения заряженных частиц, использующий кильватерные поля за проходящими через диэлектрическую волноводущую структуру электронными сгустками, в настоящее время является объектом интенсивных экспериментальных и теоретических исследований [1–4]. Комплексное изучение кильватерного метода ускорения в диэлектрических волноводах проводится в СПбГЭТУ совместно с Аргоннской Национальной Лабораторией.

Одним из распространенных типов диэлектрических волноводов [1–3] является однослойный волновод, представляющий собой диэлектрическую (как правило, керамическую) трубку с внутренним вакуумированным каналом для пролета сгустков. Внешняя сторона диэлектрической трубки металлизирована.

Кильватерное ускорение предполагает систему передачи энергии от сильноточного электронного сгустка к слаботочному сгустку высоких энергий. Сильноточные электронные сгустки малых энергий возбуждают в волноводной системе черенковскую электромагнитную волну с продольной компонентой электрического поля до 100 MV, которая используется для ускорения последующего слаботочного сгустка.

Однако наряду с продольными полями в кильватерных волноводах возбуждаются столь же значительные поперечные поля, которые приводят к отклонению пучка от оси волновода и попаданию частиц на

стенки [3], тем самым вызывая потери заряда сгустков и поверхностный электрический пробой материала диэлектрика.

С другой стороны, удовлетворение фазовым соотношениям (необходимость держать слаботочный сгусток в ускоряющей фазе волны) требует соблюдения жестких допусков на параметры волноведущей структуры и позиционирование сгустков. Изменение диэлектрической проницаемости волноведущей системы позволило бы в реальном времени регулировать фазовые соотношения волна–сгусток и обеспечить оптимальные энергетические условия для ускорения [4].

Для решения этих проблем предложена управляемая ускорительная система с возможностью перестройки спектра частот излучения Вавилова–Черенкова в волноводе при помощи тонкого сегнетоэлектрического слоя, нанесенного на внешнюю сторону диэлектрического заполнения волновода [5].

Целью настоящей статьи является создание ускорительного устройства с возможностью изменения резонансной частоты диэлектрического волновода (возбуждаемого кильватерным полем электронного пучка либо внешним СВЧ источником) одновременно с подавлением поперечных полей, отклоняющих электронный пучок. На рис. 1 приведена предлагаемая многослойная структура: слой высокочастотной керамики с внутренним вакуумированным каналом радиуса R_c и внешним радиусом R_d , тонкий слой сегнетоэлектрического материала радиуса R_f с внешними микрополосами продольных изолированных электродов и слой поглощающего материала (феррита), покрытого металлической оболочкой радиусом R_w .

Постоянное напряжение на электродах (до $10 \text{ V}/\mu\text{m}$ для используемого материала) позволяет изменять диэлектрическую проницаемость сегнетоэлектрика и таким образом перестраивать основную частоту ускоряющей структуры. Для создания электродов мы планируем использовать хорошо развитую технологию фотолитографии и микро-травления, широко используемую в области разработки и проектирования высокочастотных фазовращателей и перестраиваемых фильтров на основе тонких сегнетоэлектрических пленок [6]. Для применения этой технологии в настоящем проекте необходимо решить следующие основные вопросы.

- Конфигурация электродов должна обеспечивать распространение только основной ускоряющей моды волновода и подавление отклоняющих мод.

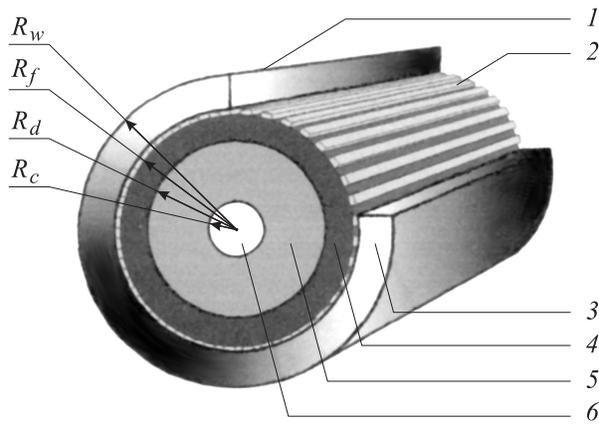


Рис. 1. Перестраиваемый ускорительный волновод с подавлением поперечных отклоняющих мод: 1 — металлическое покрытие, 2 — электроды, 3 — феррит, 4 — сегнетоэлектрик, 5 — диэлектрик, 6 — вакуумированный канал.

- Получение максимальной амплитуды проникающего в сегнетоэлектрический слой постоянного поля для увеличения диапазона управляемости.

- Конфигурация электродов должна удовлетворять условию внесения минимальных электродинамических потерь в микроволновом диапазоне.

Ускоряющий волновод, рассчитанный на 10–15 GHz, требует выбора специфических размеров топологии микроэлектродов. Для сегнетоэлектрической пленки толщиной 180–220 μm , которая предназначена для управления керамическим волноводом со средней частотой 13.625 GHz, согласно расчетам, оптимальное отношение $h = 3d$, где h — толщина слоя, d — ширина микрополосы. Промежуток между электродами приблизительно должен быть равен d . Для частот 10–15 GHz указанная величина d составляет 50–60 μm . Постоянное электрическое поле 0.5–1 kV прикладывается поперек этого промежутка, чтобы обеспечить создание управляющего поля до 10 V/ μm внутри слоя сегнетоэлектрика.

Предлагаемое продольное расположение управляющих микрополосковых электродов будет поддерживать только продольные ускоряющие

электрические моды кильватерного СВЧ-поля. Это позволит использовать проводящие микрополосы на поверхности сегнетоэлектрика не только как контакты для создания постоянного управляющего поля, но и в качестве системы подавления поперечных отклоняющих мод.

При разработке приведенной выше топологии авторы использовали метод фильтра E. Chojnacki [7], состоящий в подавлении поперечных отклоняющих мод волновода посредством продольной анизотропии внешнего проводящего волновода взамен сплошной внешней изотропной металлизации. Основная идея подавления поперечных мод путем создания чисто продольной проводимости оболочки волновода посредством продольных изолированных проводников была первоначально предложена в [7], численное моделирование и первая экспериментальная демонстрация приведены в [8].

Гибридные моды для диэлектрических волноводов требуют возникновения как осевого, так и азимутального поверхностного электрического тока в оболочке волновода. Если же внешний проводник допускает только осевую поверхностный ток (очевидно, это соответствует нашей конфигурации рис. 1), отклоняющие моды будут поглощаться за пределами окруженного продольными электродами пространства волновода, затухая в форме поверхностных волн внутри микроволнового поглотителя вокруг структуры. В результате выбранная специальная конфигурация микрополос электродов обеспечивает распространение в волноводе только единственной основной моды.

Численное моделирование и эксперимент показали, что на ускоряющие поля аксиально проводящая граница не влияет и в то же самое время поперечные поля экспоненциально затухают на протяжении нескольких периодов [8].

На рис. 2 показана структура радиального поля первой поперечной моды волновода от расстояния z за сгустком с зарядом $Q = 100$ нС, длиной 0.4 см, смещенного относительно оси волновода на $r_0 = 0.001$ см, для трех различных толщин феррита Δ . Параметры волновода: $R_c = 0.5$ см, $R_d = 0.6$ см, $R_f = 0.6233$ см, $R_w = R_f + \Delta$, $\epsilon_{diel} = 16$, $\epsilon_{ferroel} = 200$, $\sigma_{ferrite} = 0.1$ ($\Omega \cdot \text{m}$)⁻¹, $\mu_{ferrite} = 10$, $\epsilon_{ferrite} = 1$. Из рис. 2 видно, что увеличение толщины ферритового слоя наряду с поглощением энергии в нем (характеризующимся экспоненциальным спаданием амплитуды отклоняющей моды внутри волновода) приводит также к дополнительному снижению амплитуды отклоняющего поля в вакуумированной части волновода за счет перераспределения его за пределы

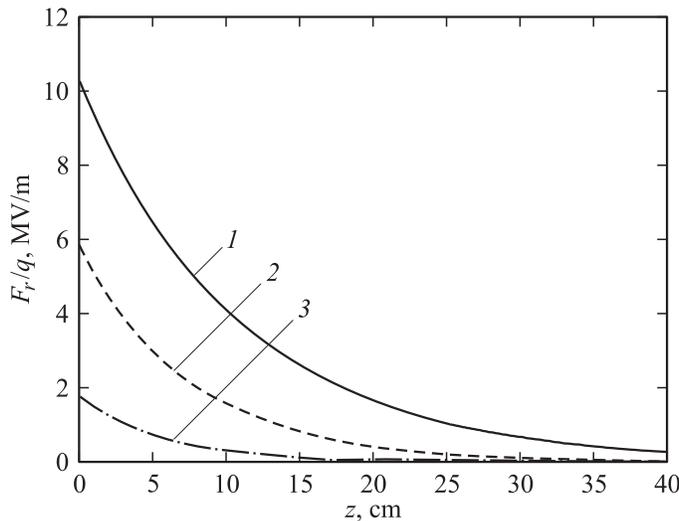


Рис. 2. Зависимость амплитуды радиального отклоняющего поля первой поперечной моды волновода от расстояния z за сгустком для трех толщин феррита: 1 — $\Delta = 0.002$ cm, 2 — $\Delta = 0.005$ cm, 3 — $\Delta = 0.05$ cm.

окруженного продольными электродами пространства волновода. При позиционировании ускоряющих и ускоряемых электронных сгустков на расстояния $z = 23 \dots 25$ cm друг от друга (что соответствует примерно 10λ , где λ — длина волны, для основной частоты волновода 13.625 GHz) радиальное поле первой моды подавляется в 100 и более раз и становится сравнимым или меньшим амплитуды отклоняющей силы для нулевой моды. Последняя, согласно нашим расчетам, не превышает 100 V/m для приведенной геометрии и в отсутствие дополнительного слоя феррита в традиционном волноводе пренебрежимо мала по сравнению с амплитудой радиальной силы первой моды.

Таким образом, продольная структура электродов, используемая для управления диэлектрической постоянной сегнетоэлектрика, в сочетании с дополнительной поглощающей оболочкой позволяет обеспечить подавление поперечных отклоняющих мод при сохранении всех преимуществ возможности управления частотным спектром волновода. Следует отметить, что возможность оперативной подстройки частоты

волновода (а тем самым фазовой скорости ускоряющей волны) выгодно отличает структуры с керамическим заполнением от стандартных вакуумированных структур и открывает широкие возможности их использования в системах, требующих жесткой синхронизации „волна–пучок“.

Работа поддержана грантом Минобразования России и Комитета по науке и высшей школе С.-Петербурга № PD02–1.2–104, а также грантом DoE SBIR DE–FG02–02ER83418.

Список литературы

- [1] *Kanareykin A.D., Sheinman I.L., Nenasheva E.A.* et al. // *Physics at the Turn of the 21st Century: Abstracts of the Intern. Conf. September 28–October 2, 1998.* St. Petersburg, Russia. P. 57–58.
- [2] *Rosing M., Gai W.* // *Phys. Rev. D.* 1990. V. 42. N 5. P. 1829–1834.
- [3] *Gai W., Kanareykin A.D., Kustov A., Simpson J.* // *Phys. Rev. E.* 1997. V. 55. N 3. P. 3481–3488.
- [4] *Power J.G., Gai W., Kanareykin A.D.* Transformer Ratio Enhancement Using A Ramped Bunch Train In A Collinear Wakefield Accelerator, AIP Conference Proceedings 569. New York: American Institute of Physics, 2001. P. 605–615.
- [5] *Канарейкин А.Д., Шейнман И.Л., Альтмарк А.М.* // *Письма в ЖТФ.* 2002. Т. 28. В. 21. С. 75–81.
- [6] *Вендик О.* Сегнетоэлектрики в технике СВЧ. М.: Радио, 1979. С. 44.
- [7] *Chojnacki E.* et al. // *J. Appl. Phys.* V. 69. 1991. P. 6257.
- [8] *Gai W., Ching-Hung Ho.* // *J. Appl. Phys.* 1991. V. 70. N 7. P. 3955–3957.