

05;10

Использование многослойного диэлектрического заполнения для уменьшения потерь мощности в ускорительных структурах

© А.М. Альтмарк, А.Д. Канарейкин

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
E-mail: aaltmark@mail.ru

Поступило в Редакцию 28 июня 2007 г.

Исследована возможность повышения эффективности ускорения в структурах с диэлектрическим заполнением. Рассмотрен способ существенного уменьшения потерь в структуре за счет использования брэгговского принципа устройства волновода для фокусировки СВЧ-излучения вдоль оси структуры. При этом диэлектрическое заполнение волновода представляет собой набор слоев с чередующимися высокими и низкими значениями диэлектрической проницаемости, что позволяет уменьшить величину магнитного поля во внешней металлической оболочке ускорительной структуры. Приведен расчет для двух типов предложенных структур с двух- и четырехслойным заполнением для моды TM_{03} на частоте 11.4 GHz и показано уменьшение потерь с -14 до -2 dB/m при использовании многослойного заполнения в структуре.

PACS: 84.40.Az

Ускорение электронов в структурах с диэлектрическим заполнением интенсивно исследуется в течение последних лет как один из наиболее перспективных новых методов ускорения заряженных частиц [1–3]. Наибольшее распространение получила ускорительная структура, представляющая собой диэлектрический волновод цилиндрической формы, выполненный из высокодобротной керамики и помещенный внутрь проводящей цилиндрической оболочки [1–3]. Внутри диэлектрика (керамики) имеется вакуумный канал для пролета заряженных частиц (рис. 1). Структура на основе цилиндрического диэлектрического волновода обладает рядом достоинств: простотой геометрии структуры, низкими значениями отклоняющих полей, концентрации ускоряющего поля E_z в вакуумном пролетном канале [2]. Недавние эксперименты показали

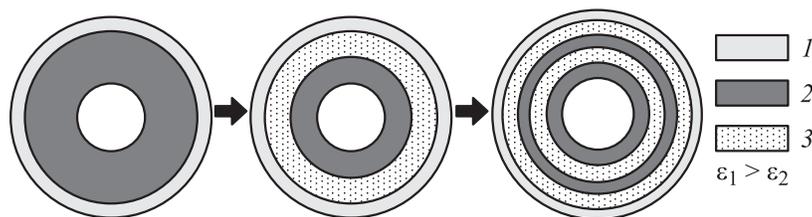


Рис. 1. Поперечное сечение ускорительной структуры с однослойным и многослойным диэлектрическим заполнением: 1 — металл, 2 — материал с ϵ_1 , 3 — материал с ϵ_2 .

как возможность кильватерной генерации высоких ускоряющих полей в подобных структурах (более 100 мВ/м) [4], так и перспективы разработки подобных диэлектрических структур с внешним СВЧ-источником [5]. Следует также отметить разработку для подобного типа структур диэлектрических волноводов на основе кварцевого стекла [5] и искусственного алмаза [6], что открывает новые перспективы для получения высоких ускоряющих градиентов.

Одним из проблемных моментов при использовании традиционной однослойной цилиндрической диэлектрической структуры является относительно высокая величина коэффициента затухания α_0 СВЧ-поля, что определяется диэлектрической проницаемостью и потерями материала заполнения. Диэлектрик подобной системы подбирается исходя из необходимого замедления волны (за счет величины диэлектрической проницаемости) и низких значений тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$, причем значение групповой скорости также ограничено. Чтобы удовлетворить требованиям по замедлению волны и обеспечению необходимой величины групповой скорости, подбирается материал с относительно высокими значениями диэлектрической проницаемости ϵ . Однако использование таких материалов является причиной роста потерь в металлической оболочке (джоулевы потери), определяемых величиной касательной компоненты магнитного поля H_θ на границе с внешним проводником (медью) [7]. При этом джоулевы потери значительно превосходят потери в объеме диэлектрика. Например, в однослойном волноводе с параметрами из таблицы, который окружен медной оболочкой и диэлектрическое заполнение в котором имеет

Сравнение характеристик диэлектрических волноводов с базовой частотой 11.424 GHz

Волновод	Одно- слойный	Одно- слойный	Двух- слойный	Четырех- слойный
Базовая частота, GHz	11.424	11.424	11.424	11.424
Мода TM_{0n}	TM_{01}	TM_{03}	TM_{03}	TM_{03}
Групповая скорость	0.055	0.033	0.069	0.056
Q	2249	5102	6984	8501
r , $M\Omega/m$	15	8.72	15.00	22.00
rQ	8756	1708	2143	2585
Энергетические потери, dB/m	-14.4	-5.86	-2.14	-2.20
α_0 , 1/m	1.66	0.67	0.24	0.25
ε_1	29.6	29.6	29.6	29.6
ε_2	29.6	29.6	9.7	9.7
Внутренний радиус, mm	3.00	3.00	3.00	3.00
Внешние радиусы, mm	4.27	9.168	5.44–12.26	5.44–7.83–9.02–11.35

$\text{tg } \delta \sim 10^{-4}$, джоулевы потери составляют 84% от общих потерь в волноводе.

В данной работе исследуется диэлектрический волновод с многослойным диэлектрическим заполнением с целью снижения потерь мощности в структуре. Принцип построения многослойной ускорительной структуры основан на конструкции оптических волноводов Брэгга [8]. Диэлектрическое заполнение волновода представляет собой набор слоев с чередованием высоких и низких значений диэлектрической проницаемости (рис. 1). В оптических ускорительных структурах Брэгга подобный набор диэлектрических слоев используется с целью отражения ускоряющих TM -мод для концентрации их в вакуумном канале, что не требует металлической оболочки волновода [8]. Для построения ускорительной структуры, работающей в СВЧ-диапазоне, концепция волноводов Брэгга предлагается для уменьшения величины магнитного поля на проводящей поверхности и, как следствие, уменьшения джоулевых потерь в металле. При этом слой, примыкающий к металлической оболочке, должен иметь низкое значение ε .

Авторами работ [7] также показано, что слоистая структура диэлектрического заполнения позволяет подавлять *HEM*-моды, которые вносят определяющий вклад в ускоряющее поле. Однако в волноводах, выполненных по схеме фильтра Чойнаки [9], *HEM*-моды подавляются еще более эффективно. Следует также отметить, что двухслойная структура с диэлектрическим заполнением позволяет осуществлять и тонкую подстройку частоты (управляемая структура), если один из слоев выполнен из высокодобротного BST сегнетоэлектрика [10].

В ходе настоящей работы был проведен электродинамический анализ потерь в двухслойной и четырехслойной диэлектрических структурах, получены выражения для всех компонент электромагнитного поля. С использованием полученных аналитических выражений были рассчитаны полные энергетические потери, включающие в себя потери как в металлической оболочке, так и в объеме диэлектрического заполнения. Ускоряющие *TM*-моды генерируются сторонним источником, расположенным на торце волновода, причем их фазовая скорость равна скорости ускоряемого сгустка, как правило, ультрарелятивистского, $v = c$. При этом возможна генерация, например, *TM*₀₃-моды без возбуждения *TM*₀₁-й и *TM*₀₂-й моды, что существенно для разработки структур на частоты 10–30 GHz [5]. Выбор более высокочастотной моды *TM*₀₃ связан с технологическими задачами производства 2- и 4-слойных структур из высокодобротной электропрочной керамики [5,6].

В простейшем случае необходимого эффекта уменьшения магнитного поля на проводящей поверхности можно добиться с помощью только одного дополнительного слоя с $\epsilon_2 < \epsilon_1$ между диэлектрическим заполнением и металлической оболочкой. На рис. 2 представлена поперечная структура *TM*_{0,3}-моды в двухслойном волноводе. На рис. 2, *b* показана зависимость азимутальной компоненты напряженности магнитного поля от радиальной координаты r . В области диэлектрического слоя с ϵ_2 величина H_θ на поверхности металлической оболочки уменьшается для многослойной структуры, что, в свою очередь, определяет снижение потерь мощности в металле. Анализ поперечной структуры радиального поля E_r для *TM*₀₃-моды в двухслойном волноводе (рис. 2, *a*) показывает, что на границе раздела двух диэлектрических слоев значение E_r может быть близко к нулю. Данное обстоятельство практически исключает вероятность электрического пробоя, который мог бы быть вызван наличием вакуумных полостей на границе раздела двух сред. Для *TM*₀₃-й моды всегда есть свободный параметр — относительная толщина слоев керамики, что позволяет устранить разрыв поперечного

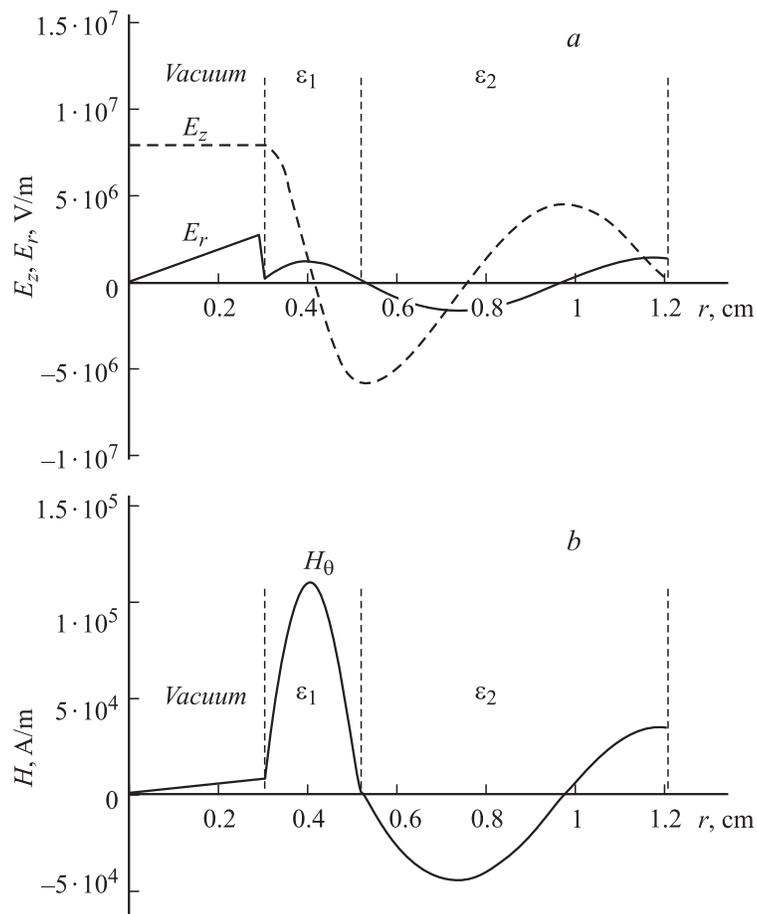


Рис. 2. Поперечная структура продольного E_z и радиального E_r электрических полей (a), азимутального H_θ магнитного поля (b) для моды TM_{03} (частота 11.42 GHz) в двухслойном волноводе с параметрами из таблицы.

поля вдоль поверхности разрыва диэлектрической проницаемости. Это обстоятельство также подтверждает правильность выбора TM_{03} -моды в качестве основной ускоряющей для данного типа структуры.

В таблице представлены результаты расчетов для волноводов с различным количеством слоев керамики. Для сравнения характеристик многослойной и однослойной структур были проведены расчеты для волноводов с базовой частотой 11.424 GHz, выбор которой обусловлен наличием достаточного СВЧ-источника и условиями синхронизации с сопрягающими волновод устройствами [5]. В качестве материалов диэлектрических слоев выбраны керамика МСТ-30 с $\epsilon_1 = 29.6$ и Al_2O_3 с $\epsilon_2 = 9.7$. Преимущество многослойной волноведущей структуры перед однослойной вытекает из анализа таких характеристик, как шунтовой импеданс r_s , добротность Q и коэффициент затухания α . Из таблицы видно, что по сравнению с однослойным волноводом, в котором основной ускоряющей модой является TM_{01} -мода, в четырехслойном волноводе с ускоряющей TM_{03} -модой добротность Q в 3.77 раза выше, шунтовой импеданс — в 1.47 раза, что обусловлено снижением доли энергии, рассеиваемой в металлической оболочке волновода. В таблице также приведены данные для моды TM_{03} однослойного волновода для подтверждения, что изменение импеданса и потерь связано не с переходом на более высокую рабочую моду, а с использованием многослойной ускоряющей структуры.

Следует отметить, что в многослойной диэлектрической структуре наблюдается снижение не только потерь в металле, но и полных энергетических потерь, что выражается в повышении добротности (см. таблицу). Использование многослойной ускорительной структуры позволит снизить потери мощности при сохранении требуемых значений групповой скорости структуры, что открывает большие перспективы по практическому использованию таких систем для целей ускорения в структурах с диэлектрическим заполнением.

Настоящая работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 06-02-16442-а.

Список литературы

- [1] Gai W., Schoessow P., Cole B., Konecny R., Norem J., Rosenzweig J., Simpson J. // Phys. Rev. Lett. 1988. V. 61. P. 2756–2758.
- [2] Gai W., Kanareykin A., Konecny R., Sun X., Wong T. // Review of Scientific Instruments. 2000. V. 71. N 6. P. 601–604.
- [3] Jing C., Kanareykin A., Power J., Conde M., Yusof Z., Shoessow P., Gai W. // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 98. P. 144 801–144 804.

- [4] *Conde M. et al.* // <http://www.hep.anl.gov/pmalhotr/awa-new/links/doe-rev07/conde.pdf>
- [5] *Jing C., Gai W., Konecny R., Power J., Liu W., Gold S.H., Kinkead A.K., Kanareykin A., Kazakov S.* // Advanced Accelerator Concept Workshop AAC-2006. AIP Conference Proceedings. 2006. V. 877. P. 303–310.
- [6] *Kanareykin A., Schoessow P., Conde M., Gai W.* // Advanced Accelerator Concepts Workshop. AIP Conference Proceedings. 2006. V. 877. P. 320–330.
- [7] *Jing C., Liu W.M., Gai W., Power J.C., Wong T.* // NIM-A. 2005. V. 539. P. 445–454.
- [8] *Schachter L., Byer R.L., Siemann R.H.* // Phys. Rev. E. 2003. V. 68. P. 036502.
- [9] *Gai W., Ho C.* // J. Appl. Phys. 1991. V. 70. P. 3955.
- [10] *Альтмарк А.М., Канарейкин А.Д., Шейнман И.Л.* // ЖТФ. 2005. Т. 75. В. 1. С. 89–98.