

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОФИЛИРОВАННЫХ СГУСТКОВ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТРАНСФОРМАЦИИ В КОАКСИАЛЬНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ

Г.В. Сотников^{1,2}, Т.К. Маршалл^{2,3}, Дж.Л. Хиршфилд⁴

¹Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина;

²Omega-P, Inc., 258 Bradley Street, New Haven, Connecticut, USA;

³Department of Applied Physics, Columbia University, New York City, USA;

⁴Department of Physics, Yale University, New Haven, Connecticut, USA

E-mail: sotnikov@kipt.kharkov.ua

Основной параметр диэлектрического кильватерного ускорителя - коэффициент трансформации. Для его увеличения используются профилированные последовательности сгустков (RBT) или многослойные диэлектрические структуры (CDWA). Мы показываем возможность применения RBT для увеличения коэффициента трансформации в CDWA. Двухканальная диэлектрическая структура представляет собой две концентрические диэлектрические трубки, окруженные металлическим кожухом. Мы показываем также, что для значительного увеличения коэффициента трансформации в CDWA традиционная RBT-техника должна быть модифицирована, и описываем ее измененный алгоритм. Улучшенный алгоритм нами продемонстрирован на примерах 30 ГГц CDWA и 0,44 ТГц CDWA. В первом случае удалось увеличить коэффициент трансформации с 3,8 до 20, а во втором – с 5,5 до 17. Изучена также поперечная устойчивость профилированных драйверных сгустков в CDWA и проведено сравнение с одноканальными диэлектрическими структурами.

1. ВВЕДЕНИЕ

Диэлектрические кильватерные ускорители стали привлекательной альтернативой традиционным полностью металлическим конструкциям ускорителей, которые используются для электрон/позитрон линейных коллайдеров [1]. В диэлектрическом кильватерном ускорителе (DWA) мощный ведущий сгусток или цепочка сгустков создают, благодаря черенковскому излучению, кильватерное поле; часть энергии поля затем передается ведомому сгустку, позиционированному так, чтобы на него действовала ускоряющая сила.

Однако, кроме возможности создавать высокие ускоряющие градиенты, ускоритель должен обладать и другими достоинствами, такими как привлекательный коэффициент трансформации (Т). Коэффициент трансформации, характеризующий эффективность передачи энергии ведущего сгустка к ускоряемому сгустку в DWA, как правило, меньше 2 в коллинеарном устройстве, где ведущий и ускоряемый (ведомый) сгустки движутся вдоль одной и той же траектории [2-5]. Для увеличения коэффициента трансформации существуют две возможности. Первая связана с использованием длинного сгустка с линейно нарастающим током [6] или последовательности сгустков с линейно нарастающим зарядом в каждом сгустке и определенным расстоянием между ними [7-9]. Этот метод носит название RBT-метод. Вторая возможность увеличить Т связана с использованием многослойных диэлектрических структур с отдельными каналами для ведущего и ведомого сгустков. Цилиндрической конфигурацией многослойной диэлектрической ускорительной структуры является коаксиальная DWA (CDWA). Мы показали, что $T \sim 5-6$ может быть получен в CDWA терагерцового диапазона частот [1]. Естественное желание - объединить эти два метода, чтобы

еще больше увеличить коэффициент трансформации в CDWA.

В этой статье мы представим улучшенный RBT-алгоритм [10], позволяющий значительно увеличить коэффициент трансформации, и проведем численные исследования возбуждения кильватерных полей последовательностью сгустков с улучшенным профилем распределения зарядов в CDWA терагерцового диапазона частот.

2. УЛУЧШЕННЫЙ АЛГОРИТМ ПРОФИЛИРОВАНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ СГУСТКОВ

Коаксиальная диэлектрическая ускорительная структура, которая исследуется в настоящей работе, представляет собой две концентрические диэлектрические трубки, помещенные в цилиндрический металлический волновод (Рис.1). Два вакуумных канала используются для транспортировки ведущего и ведомого сгустков: кольцевой ведущий сгусток распространяется в широком канале, ведомый сгусток – в узком осевом канале.

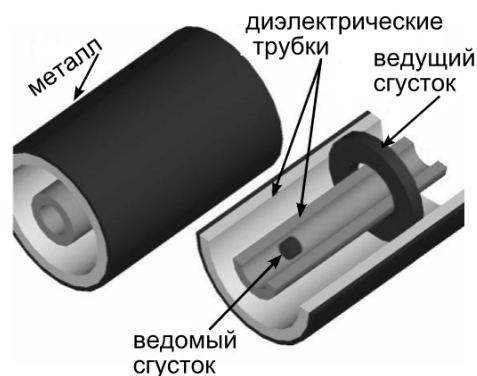


Рис.1. Геометрия коаксиальной диэлектрической ускорительной структуры

Для численного исследования возможности увеличения коэффициента трансформации мы выбрали параметры структуры такие же, как в работе [1], где были проведены аналитические исследования возбуждения структуры одиночным сгустком. В качестве материала диэлектрика был выбран алмаз. Параметры структуры и сгустков, использованные в исследованиях, приведены в таблице.

Параметры структуры и сгустков

Частота основной рабочей моды E_{02} , ТГц	0,44
Внешний диаметр внешней диэлектрической трубки, мкм	1581
Внутренний диаметр внешней диэлектрической трубки, мкм	1415
Внешний диаметр внутренней диэлектрической трубки, мкм	300
Внутренний диаметр внутренней диэлектрической трубки, мкм	100
Относительная диэлектрическая проницаемость (алмаз)	5,7
Продольный RMS-размер сгустка 2σ (гауссово распределение), мкм	277,12
Полная длина сгустка, использованная в PIC-моделировании, мкм	692,8
Внешний диаметр сгустка (однородное распределение заряда), мкм	1157,5
Внутренний диаметр сгустка, мкм	557,5
Энергия электронов сгустка, ГэВ	5
Полный заряд сгустков, нКл	6
Число сгустков	4

Для приведенных в таблице параметров структуры и сгустка на Рис.2 показано поперечное распределение азимутально-симметричных собственных волн волновода, возбуждаемых одиночным электронным сгустком.

Для вычисления собственных частот и собственных мод использовалась аналитическая теория, построенная в работе [1]. Частоты волн, поперечная структура которых приведена на Рис.2, равны: 238, (E_{01}), 440,9 (E_{02}), 922,5 (E_{03}), 1052,9 ГГц (E_{04}).

$$T = \frac{\text{максимум ускоряющего поля в ускорительном канале}}{\text{максимум тормозящего поля внутри ведущего сгустка}} \quad (1)$$

Результаты исследований увеличения коэффициента трансформации представлены на Рис.3-6. Для численного исследования использовался хорошо известный PIC-алгоритм, реализованный в CST PARTICLE STUDIO [11].

Рис.3 показывает продольное кильватерное поле, возбуждаемое ведущим сгустком, на оси структуры (вдоль которой ускоряемый сгусток движется) и вдоль прямой, проведенной через средний радиус кольцевого канала для ведущего сгустка. Из приведенных кривых следует, что коэффициент трансформации равен 4,73 (максимум ускоряющего поля на оси центрального канала равен 550 МэВ/м, а максимум тормозящего поля внутри ведущего сгустка, вдоль его центральной оси, равен 116 МэВ/м). Из Рис.3 также видно, что на расстояниях, меньших 4,2 мм от входа в структуру, кильватерное поле сильно подавлено. Это связано с известной «волной гашения» [12], привлекаемой для описания распро-

Основная рабочая мода коаксиальной структуры – E_{02} , так как она имеет противоположные знаки электрического поля в ускорительном канале и канале транспортировки ведущего сгустка. Но наряду с модой E_{02} первая радиальная мода E_{01} и еще несколько последующих мод имеют большую амплитуду в ускорительном канале. Стоит отметить, что в любом CDWA, по крайней мере, одна мода, E_{01} , имеет сравнимую с модой E_{02} амплитуду. Указанное свойство многомодовости коаксиальной диэлектрической структуры будет усложнять когерентное сложение полей от регулярной последовательности электронных сгустков, и, таким образом, увеличение коэффициента трансформации путем традиционного способа профилирования последовательности сгустков [7-9] не является очевидным фактом. Ниже, путем численного моделирования мы проверим применимость традиционного способа к исследуемой коаксиальной диэлектрической структуре.

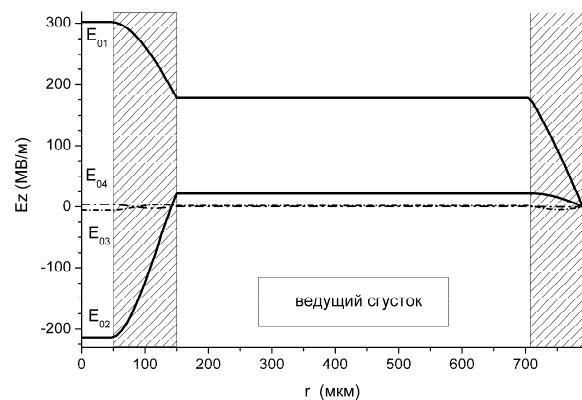


Рис.2. Поперечное распределение первых шести собственных мод E_{0n} диэлектрической структуры, возбуждаемых одиночным электронным сгустком.

Прямоугольники показывают положения диэлектрических трубок (косая штриховка) и ведущего сгустка

Везде ниже мы будем использовать следующее определение коэффициента трансформации T :

странения кильватерного поля в замедляющих структурах конечной длины. Таким образом, из Рис.3 следует, что когерентное сложение кильватерных полей ограничено зоной конечной протяженности позади ведущего сгустка. Ее протяженность зависит от длины структуры и групповой скорости волн, возбуждаемых при прохождении сгустков в структуре [12,1].

Перейдем теперь к последовательности сгустков. На Рис.4 приведено распределение продольного кильватерного поля в ускорительной структуре, возбуждаемой регулярной последовательностью из четырех сгустков. Заряды всех сгустков равны, и полный заряд всех сгустков равен заряду одиночного сгустка, использованного в предыдущем примере. Расстояние между соседними сгустками равно 1225 мкм, что приблизительно соответствует расстоянию между двумя максимумами тормозящего поля в канале ведущего сгустка (см. Рис.3). Макси-

мум поля определяется суперпозицией двух радиальных мод – E_{01} и E_{02} . Длина волны основной рабочей моды кильватерного поля равна ~ 680 мкм.

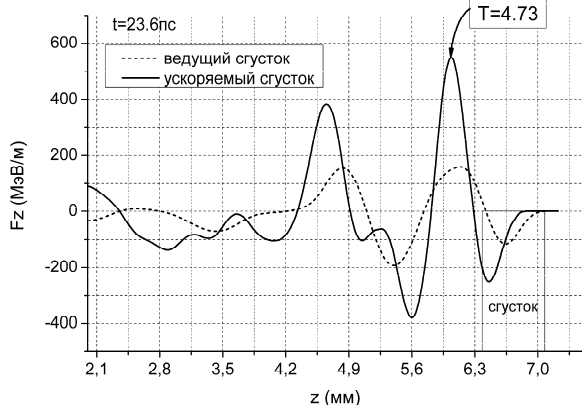


Рис.3. Продольная сила, действующая на электрон в кильватерном поле, создаваемом одиночным сгустком с зарядом 6 нКл и энергией 5 ГэВ, в CDWA, имеющей параметры, приведенные в таблице. Сплошная линия – поле в центре ускорительного канала; пунктирная линия – поле в центре кольцевого канала для ведущего сгустка. Голова сгустка находится на расстоянии $z=7,1$ мм от входа в структуру (прямоугольник показывает положение сгустка) и сгусток движется слева направо

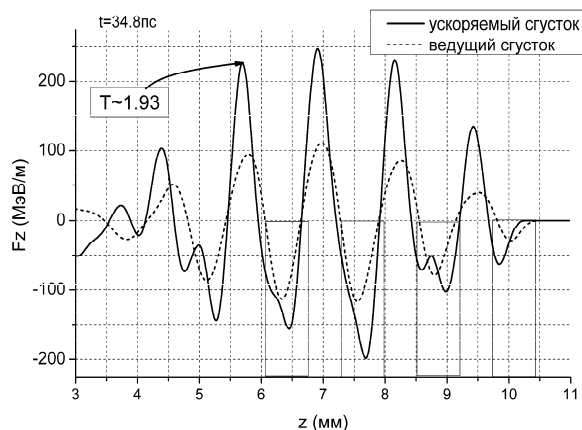


Рис.4. Продольная сила, действующая на электрон в кильватерном поле в ускорительном канале (сплошная линия) и в канале ведущего сгустка (пунктирная линия), создаваемом однородной последовательностью из 4-х сгустков с одинаковым зарядом (1,5 нКл) и периодом следования, равным периоду результирующего кильватерного поля одиночного сгустка. Сгустки следуют слева направо, серые прямоугольники показывают их положение

Для усиления рабочей моды имело смысл выбрать период следования сгустков, равный периоду основной моды. Но такой выбор невозможен вследствие достаточно длинных сгустков, использованных в моделировании (см. таблицу), а размещение последующих сгустков с периодом, равным двойному периоду основной моды, является нецелесообразным вследствие быстрого затухания кильватерного поля позади ведущего сгустка вследствие эффектов групповой скорости (см. Рис.3).

Максимум ускоряющего градиента в ускорительном канале позади последнего сгустка равен

226 МэВ/м, а максимум тормозящей силы (который локализован внутри третьего сгустка) равен 117 МэВ/м. Таким образом, коэффициент трансформации равен 1,93. Сравнивая эти числа с аналогичными для одиночного сгустка, приходим к выводу, что однородная последовательность сгустков не дала выигрыша ни в темпе ускорения, ни в коэффициенте трансформации. Отметим, что в случае однородной структуры кильватерное поле от однородной последовательности сгустков равно кильватерному полю одиночного сгустка (при равенстве полного заряда сгустков), а коэффициент трансформации слабо (логарифмически), но растет с увеличением количества сгустков [2].

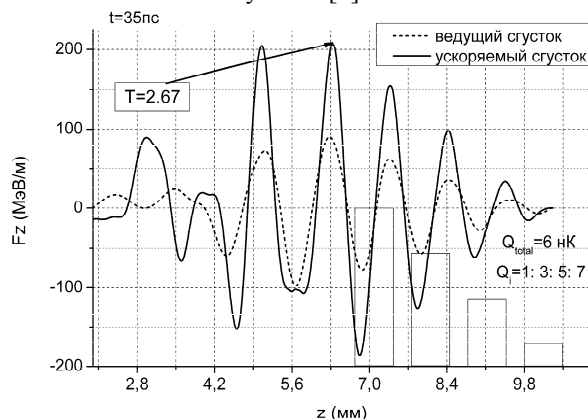


Рис.5. То же самое, что на Рис.4, для последовательности из 4-х сгустков с линейно нарастающим зарядом и периодом следования 1220 мкм, который равен периоду рабочей моды E_{02} кильватерной волны. Голова первого сгустка находится на расстоянии $z=10,5$ мм от входа в структуру

Рассмотрим возможность использования традиционного алгоритма увеличения коэффициента трансформации в случае CDWA. На Рис.5 показано кильватерное поле, возбуждаемое цепочкой из 4-х сгустков с профилированным профилем заряда [7,9]. Полный заряд цепочки сгустков (6 нКл) равен заряду одиночного сгустка на Рис.3, и распределение зарядов среди сгустков такое, что заряд растет [9] от первого к последнему сгустку как нечетные целые числа 1:3:5:7. Расстояние между соседними ведущими сгустками равно 1,02 мм (1,5 периода основной рабочей моды кильватерной волны). Максимальное тормозящее поле (77,5 МэВ/м) действует на частицы четвертого сгустка, а максимальное ускоряющее поле в ускорительном канале равно 207 МэВ/м. Коэффициент трансформации, вычисленный с использованием этих полей, равен 2,67. Т.е. коэффициент трансформации даже меньше, чем в случае одиночного сгустка. Таким образом, традиционный способ профилирования зарядов сгустков в последовательности с постоянным расстоянием между сгустками не позволяет увеличить коэффициент трансформации.

Уменьшение коэффициента трансформации может быть объяснено многомодовым свойством возбуждаемого кильватерного поля в CDWA, отмеченное выше. Чтобы увеличить коэффициент трансформации в коаксиальной многослойной диэлектрической структуре необходимо использовать моди-

фицированный алгоритм профилирования цепочки сгустков [10]. Улучшенный алгоритм основан на известной теореме¹: кильватерные поля с максимальным коэффициентом трансформации создаются последовательностью сгустков, чьи частицы теряют одну и ту же энергию [7]. Для одномодового устройства из этого утверждения следует, что заряд n -го сгустка должен изменяться согласно следующему соотношению [7]:

$$Q_n = Q_1[1 + T(n-1)], \quad (2)$$

где Q_1 - заряд первого сгустка и T - коэффициент трансформации одиночного сгустка. Расстояние между сгустками должно быть одним и тем же и равным нечетному целому числу длин кильватерной волны. В случае многомодовой ускорительной структуры такой простой формулы не существует; поэтому, чтобы получить необходимые расстояния между сгустками и величины их зарядов необходимо выполнить численные расчеты несколько раз, число которых равно числу сгустков в последовательности. Сначала выполняется моделирование с одиночным сгустком, находится положение и величина максимума ускоряющего поля в кольцевом канале ведущего сгустка. Затем в это положение помещается второй сгусток с зарядом, компенсирующим ускоряющее поле и обеспечивающим такое же тормозящее поле как в первом сгустке. Для этого величина заряда второго сгустка должна быть в $(1 + T)$ раз больше заряда первого сгустка. Затем выполняется моделирование возбуждения структуры двумя сгустками, и повторяется процедура нахождения положения последующего сгустка и его заряда. Т.е. каждый последующий сгусток должен быть помещен в максимум ускоряющего поля от предшествующих сгустков, и заряд n -го сгустка выбирается согласно соотношению [10]:

$$Q_n = Q_1[1 + T_{n-1}], \quad (3)$$

где T_{n-1} - коэффициент трансформации после $(n-1)$ -го сгустка.

Возможность увеличения коэффициента трансформации в многомодовой ускорительной структуре при использовании улучшенного алгоритма профилирования последовательности сгустков продемонстрирована на Рис.6. Расстояние между сгустками составляет приблизительно 1,9 мм, и отношения зарядов сгустков с первого по последний относятся как 1,0: 2,35: 4,5: 7,7; при этом полный заряд последовательности (6 нКл) удерживается равным заряду одиночного сгустка (см. Рис.3). Коэффициент трансформации, вычисленный по ускоряющему полю за последним сгустком, равен 17,3 – это значение в 3,7 раза больше коэффициента трансформации T в случае возбуждения структуры одиночным сгустком. Заметим, что максимум кильватерного поля после четвертого сгустка равен 285,1 МэВ/м, понизившись от значения 550 МэВ/м в случае одиночного сгустка (см. Рис.3).

Описанный алгоритм распределения зарядов между сгустками последовательности и установле-

ния расстояний между сгустками был выявлен с целью получения однородного торможения сгустков.

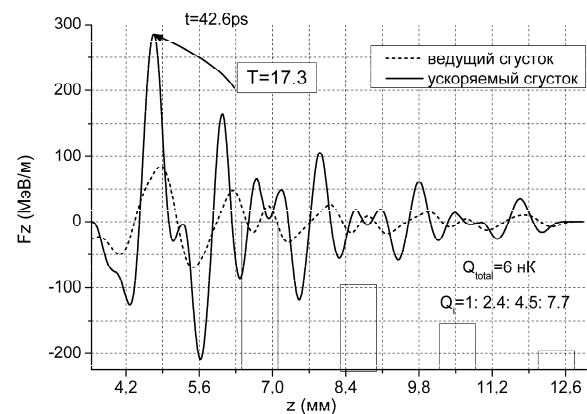


Рис.6. То же самое, что на Рис.4, для последовательности из 4-х сгустков с улучшенным алгоритмом распределения заряда между сгустками и расстояния между соседними сгустками. Заряд сгустка растет от первого к последнему сгустку последовательности в отношении 1:2,4:4,5:7,7. Расстояние между сгустками равно $\approx 1,9$ мм

Это означает, что такое правило позволит отобрать больше энергии от всей цепочки сгустков, чем, например, для случая одиночного сгустка, приведенного на Рис.3, и таким образом увеличить эффективность ускорителя.

Приведенный на Рис.6 пример доказывает, что значительное увеличение T возможно в многомодовой структуре CDWA, если использовать более гибкий RBT-метод. Более сложный алгоритм (в сравнении с [7,9]) для задания зарядов сгустков и их положений друг относительно друга связан с многомодовым возбуждением CDWA. В случае одномодовой диэлектрической структуры традиционный способ использования RBT для увеличения T остается справедливым.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как правило, в кильватерных ускорительных структурах увеличение коэффициента трансформации приводит к уменьшению ускоряющего градиента, а значит и к увеличению длины ускорителя. Возникает вопрос о целесообразности получения увеличенного значения коэффициента трансформации. Ответ на него зависит от того, какая конечная цель стоит при создании нового ускорительного комплекса. Поясним это на примерах результатов, приведенных в настоящей работе.

Пусть мы используем одиночный ведущий сгусток, который обеспечивает ускорительный градиент 550 МэВ/м при коэффициенте трансформации 4,7. Тогда на длине одного ускорительного модуля (длина, на которой ведущий сгусток потеряет всю энергию) $L = 43,1$ ускоряемый сгусток приобретет энергию 23,7 ГэВ. Для того, чтобы достичь энергии 3,5 ТэВ (как в CLIC), потребуется 150 таких ускорительных модулей и полная длина ускорителя будет равна $150 \times 43,1 \text{ м} = 6,4 \text{ км}$.

¹Теорема строго доказана для одномодовой структуры.

Аналогичные оценки для цепочки сгустков с улучшенным алгоритмом RBT, обеспечивающие ускоряющий градиент 285,1 МэВ/м и коэффициент трансформации $T = 17,3$ (см. Рис.6), дают полную длину ускорителя 12,1 км, и для этого потребуется 40 ускорительных модулей.

Таким образом, если требуется более короткий ускоритель, то необходимо использовать одиночный сгусток в CDWA. Если требуется уменьшить количество ускорительных модулей, а значит и поднять эффективность ускорительного комплекса, целесообразно использовать последовательность сгустков с улучшенным алгоритмом профилирования последовательности сгустков.

Исследования выполнены с частичной поддержкой министерства энергетики США и управления физики высоких энергий, грант № DE-SC000-0924.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. G.V. Sotnikov, T.C. Marshall, and J.L. Hirshfield. Coaxial two-channel high-gradient dielectric wakefield accelerator // *Phys. Rev. Accel. Beams* 12, 061302, 2009.
2. R.D. Ruth, A.W. Chao, P.L. Morton, and P.B. Wilson // *Particle Accelerators*. 1985, v.17, №3-4, p.171-189.
3. A.W. Chao. *Physics of collective beam instabilities in high energy accelerators*. New York: Wiley, 1993.
4. G.A. Voss and T. Weiland. Particle acceleration by wake fields // *Report No. DESY M-82-10*, 1982.
5. K.L.F. Bane, P.B. Wilson, and T. Weiland. Wake fields and wake field acceleration, in *Physics of High Energy Particle Accelerator // AIP Conf. Proc. №127* (AIP, New York, 1985), p.875-928.
6. K.L.F. Bane, P. Chen, P.B. Wilson. On collinear wake field acceleration // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1985, v.32, p.3524-3526.
7. С.С. Ваганян, Э.М. Лазиев, В.М. Цаканов. О коэффициенте трансформации в схемах ускорения кильватерным полем // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Ядерно-физические исследования»* (15). 1990, №7, с.32-36.
8. J.T. Seeman. Collective Electron Driven Linac for High Energy Physics // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1983, v.30, №4, p.3180-3182.
9. C. Jing, A. Kanareykin, J.G. Power, et al. Observation of Enhanced Transformer Ratio in Collinear Wakefield Acceleration // *Phys. Rev. Lett.* 2007, v.98, p.144801.
10. G.V. Sotnikov and T.C. Marshall. Improved ramped bunch train to increase the transformer ratio of a two-channel multimode dielectric wakefield accelerator // *Phys. Rev. ST Accel. Beams*. 2011, v.14, p.031302.
11. <https://cst.com/Content/Products/PS/Overview.aspx>
12. В.А. Балакирев, И.Н. Онищенко, Д.Ю. Сидоренко, Г.В. Сотников. Возбуждение кильватерного поля релятивистским электронным сгустком в полубесконечном диэлектрическом волноводе // *ЖЭТФ*. 2001, т.120, №1(7), с.41-51.

Статья поступила в редакцию 23.09.2011 г.

USE OF RAMPED BUNCHES FOR AN ENHANCING OF TRANSFORMER RATIO IN COAXIAL DIELECTRIC STRUCTURES

G.V. Sotnikov, T.C. Marshall, J.L. Hirshfield

A main parameter of the dielectric wakefield accelerator is the transformation ratio. To increase it was suggested to use ramped bunch trains (so-called the RBT-technics) or multizone dielectric structures (CDWA). We demonstrate the possibility of use of RBT-technics to increase the transformer ratio in two channel dielectric structures. Two channel dielectric structure is two concentric dielectric tubes, mounted in metal casing. Axial vacuum channel is the acceleration channel for witness bunch, and the second vacuum channel is the transport channel for drive bunches. We show that for a significant increase in the transformer ratio in coaxial dielectric structures the conventional RBT technics should be modified. We report a modified algorithm of the charge distribution between bunches of train and spacing between them. Improved algorithm for the RBT-technics has been demonstrated for 30 GHz CDWA and 0,44 THz CDWA. In the first case it is possible to increase the transformer ratio from 3,8 to 20, while in the second case it was possible to increase the transformer ratio from 5,5 to 17. Also we study the transverse stability of the ramped drive bunch train in coaxial dielectric structures and compare this stability with single-channel dielectric structures.

ЗАСТОСУВАННЯ ПРОФІЛЬОВАНИХ ЗГУСТКІВ ДЛЯ ЗБІЛЬШЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТРАНСФОРМАЦІЇ В КОАКСІАЛЬНИХ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ СТРУКТУРАХ

Г.В. Сотніков, Т.К. Маршалл, Дж.Л. Хіршфілд

Основний параметр діелектричного кильватерного прискорювача є коефіцієнт трансформації. Для його збільшення використовуються профільовані послідовності згустків (RBT) або багат шарові діелектричні структури (CDWA). Ми показуємо можливість застосування RBT для збільшення коефіцієнта трансформації в CDWA. Двоканальна діелектрична структура являє собою дві концентричні діелектричні трубки, оточені металевим кожухом. Ми показуємо також, що для значного збільшення коефіцієнта трансформації в CDWA традиційна RBT-техніка повинна бути модифікована, й описуємо її змінений алгоритм. Поліпшений алгоритм нами продемонстровано на прикладах 30 ГГц CDWA та 0,44 ТГц CDWA. У першому випадку вдалося збільшити коефіцієнт трансформації з 3,8 до 20, а в другому – з 5,5 до 17. Вивчена також поперечна стійкість профільованих ведучих згустків в CDWA і проведено порівняння з одноканальними діелектричними структурами.