

ВОЗБУЖДЕНИЕ КИЛЬВАТЕРНЫХ ВОЛН ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬЮ СГУСТКОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДАХ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

В.А. Киселев, А.Ф. Линник, В.И. Мирный, И.Н. Онищенко, Г.В. Сотников, В.В. Усков
*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*
E-mail: kiselev@kipt.kharkov.ua

Исследуется возможность повышения эффективности возбуждения кильватерных волн в диэлектрических волноводах прямоугольного сечения путем увеличения связи между сгустками и возбуждаемой волной, достигаемого уменьшением сечения пролетного канала. При этом для каждой конфигурации проводились расчеты и соответствующие изменения размеров диэлектрических пластин для обеспечения совпадения частоты следования сгустков с частотой основной поперечной моды диэлектрического волновода. Установлено, что уменьшение пролетного канала приводит к существенному изменению топографии суммарного поля возбуждаемых кильватерных волн.

1. ВВЕДЕНИЕ

В предшествующих работах [1-3] было показано, что при возбуждении кильватерных волн последовательностью сгустков релятивистских электронов в диэлектрических волноводах прямоугольного сечения, в отличие от цилиндрического, реализуется многомодовый режим возбуждения кильватерного поля с квазиэквидистантным спектром, при котором происходит значительное увеличение амплитуды возбуждаемого поля. Кроме того, отмечалось, что увеличение амплитуды зависит от величины сечения пролетного канала. Канал меньшего сечения улучшает связь между электронными сгустками и возбуждаемой волной, что, соответственно, приводит к увеличению амплитуды кильватерного поля.

Однако, только перемещение двух диэлектрических пластин для уменьшения сечения пролетного канала без изменения их геометрии приводит к тому, что частота основной поперечной моды диэлектрического волновода перестает совпадать с частотой следования сгустков. Такое совпадение можно обеспечить соответствующим изменением толщины диэлектрических пластин или частоты следования сгустков, задаваемой ускорителем.

В настоящей работе исследуется возможность увеличения эффективности возбуждения кильватерных волн путем уменьшения сечения пролетного канала при одновременном обеспечении совпадения частоты основной моды возбуждаемого кильватерного поля с частотой следования электронных сгустков путем соответствующего изменения их толщины.

2. РАСЧЕТ ДИСПЕРСИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Из теории известно [4,5], что собственные волны симметричного диэлектрического волновода имеют

как симметричное распределение поля в поперечном сечении структуры, так и антисимметричное. Симметричные электронные сгустки возбуждают только волны с симметричным распределением продольного электрического поля. Такое симметричное распределение имеют как *LSM*-, так и *LSE*-волны прямоугольного волновода, частично заполненного диэлектриком.

Перемещение диэлектрических пластин от стенок металлического волновода к оси, превращает диэлектрический волновод из трехзонной системы в пятизонную, состоящую из двух диэлектрических зон и трех вакуумных, из которых центральная является пролетным каналом для последовательности сгустков.

Для расчета ее дисперсионных свойств можно воспользоваться результатами работ [6,7], в которых такая система использовалась для увеличения коэффициента трансформации при движении возбуждающих сгустков и ускоряемого сгустка в различных вакуумных каналах, в которых амплитуды кильватерного поля существенно отличаются. Используя дисперсионные уравнения для *LSM*- и *LSE*-волн, полученные в [6,7], нами были выполнены расчеты размеров смещенных диэлектрических пластин, обеспечивающих совпадение частоты следования сгустков f_m с частотой f_0 возбуждаемой ими волны LSM_{21} .

Расчеты проводились для частоты следования сгустков $f_m = 2805$ МГц для поперечных размеров металлического волновода $(8,5 \times 18)$ см² (диэлектрическая постоянная диэлектрика $\epsilon = 2,1$) и ширины вакуумного канала 2 см. Расчеты показали, что в случае расположения диэлектрических пластин параллельно широкой стороне волновода толщина пластин должна быть равной 2,39 см, а вдоль узкой стороны волновода – 4,66 см.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Эксперименты проводились, как и в [3], на установке со следующими параметрами: энергия – 4,5 МэВ, длительность импульса тока – 2 мкс, количество сгустков в импульсе – $6 \cdot 10^3$, диаметр сгустков на выходе из ускорителя ≈ 1 см, заряд – 0,16 нК.

3.1. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЛАСТИНЫ ВДОЛЬ КОРОТКОЙ СТОРОНЫ ВОЛНОВОДА

Для пластин, расположенных вплотную к узким сторонам волновода, как было рассчитано ранее [3] для резонансного возбуждения кильватерных волн последовательностью сгустков релятивистских электронов, толщина диэлектрических пластин должна быть 2,07 см. Распределения E_z -составляющей суммарного электрического поля по осям x и y , измеренные с помощью СВЧ-зонда, показаны на Рис.1.

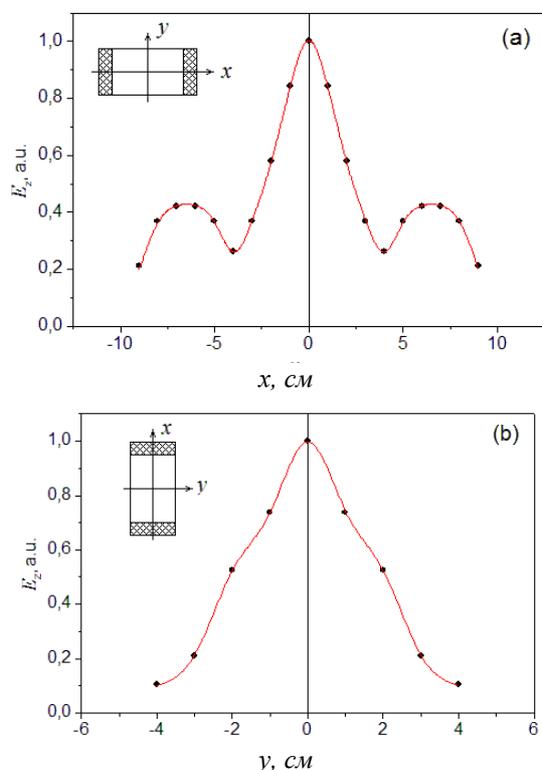


Рис.1. Распределения продольной составляющей возбуждаемого поля E_z по оси x (а) и оси y (б)

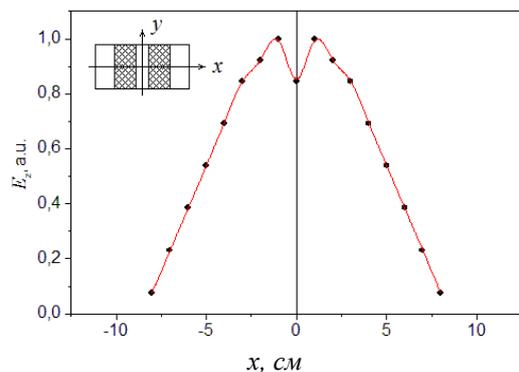


Рис.2. Распределение продольной составляющей возбуждаемого поля E_z по оси x

При отодвинутых от стенок волновода пластинах толщиной 4,66 см и расстоянии между ними 2 см распределение E_z по оси y носит такой же характер, как и для случая примыкающих к стенкам пластин. В то же время распределение поля E_z по оси x в значительной степени изменяется (Рис.2).

При этом максимальная амплитуда СВЧ-сигнала увеличилась во втором случае более чем в 2 раза, что соответствует результатам измерений средней мощности излучения, полученным с помощью измерителя мощности МЗ-54, которая увеличилась почти в 5 раз.

3.2. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЛАСТИНЫ ВДОЛЬ ШИРОКОЙ СТОРОНЫ ВОЛНОВОДА

При расположении пластин вплотную к широким сторонам волновода распределения составляющей поля E_z по оси x и по оси y радикально отличаются от таких распределений для случая с расположением пластин вдоль узкой стороны волновода (Рис.3).

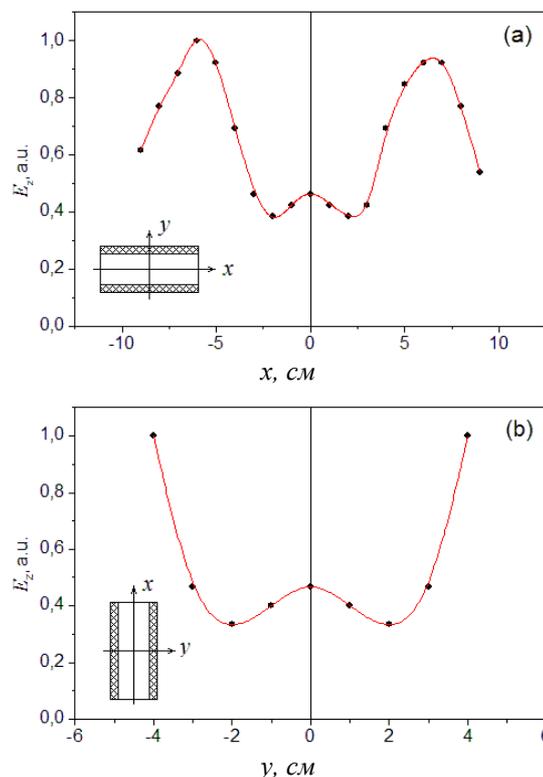


Рис.3. Распределения продольной составляющей возбуждаемого поля E_z по оси x (а) и оси y (б)

Максимальное поле при такой конфигурации возбуждается не в центре системы, а на расстоянии 6 см от центра по оси y . Это открывает новые возможности увеличения коэффициента трансформации в рассматриваемой двухпучковой схеме ускорения.

Увеличение амплитуды сигнала возбуждаемого поля на краях диэлектрического волновода (Рис.1,б и Рис.3,б) связано, по-видимому, с возбуждением более высоких радиальных мод. О наличии таких

мод свидетельствуют рассчитанные дисперсионные зависимости для таких структур [3].

При сближении диэлектрических пластин для уменьшения пролетного канала до 2 см толщина диэлектрических пластин для резонансного возбуждения, согласно расчетам, составляет 2,39 мм. Средняя мощность СВЧ-излучения в этом случае возросла более чем в 4 раза по сравнению со случаем расположения пластин диэлектрика вплотную к широким сторонам волновода. Распределения продольной составляющей электрического поля E_z по осям x и y , измеренные с помощью СВЧ-зонда, показаны на Рис.4.

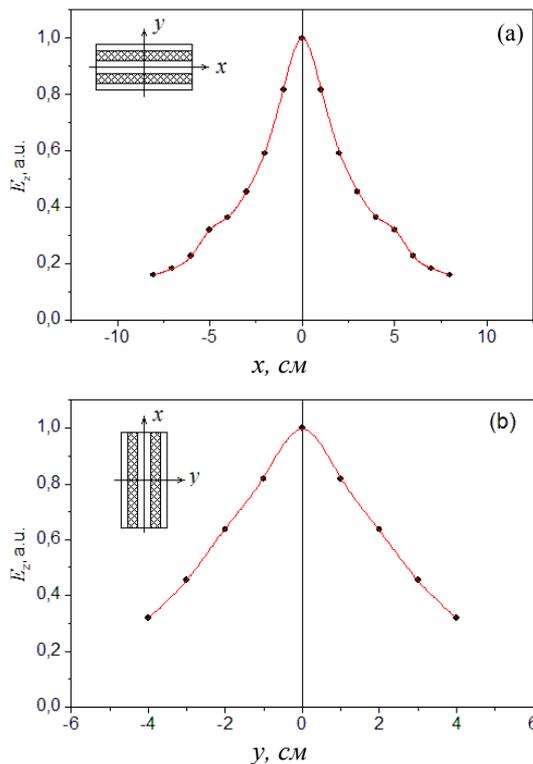


Рис.4. Распределения продольной составляющей возбуждаемого поля E_z по оси x (а) и оси y (б)

Из графиков видно, что произошло существенное изменение распределения E_z -составляющей поля по обеим координатам, что, по-видимому, связано с возбуждением меньшего числа высоких радиальных мод по сравнению с предыдущим случаем.

Особенно значительное увеличение средней мощности излучения (в 10 раз по сравнению с системой, показанной на Рис.3) наблюдалось при несимметричном смещении одной из пластин, а именно, размещением ее под углом к стенке волновода с целью приближения ее к области распространения электронных сгустков при минимальном изменении дисперсионных свойств системы. Распределение поля E_z по оси y показано на Рис.5.

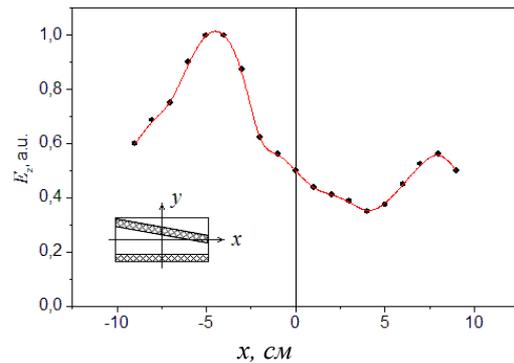


Рис.5. Распределение составляющей возбуждаемого поля E_z по оси x

Надо полагать, что в этом случае имеет место как увеличение коэффициента связи сгустков с возбуждаемой волной, так и более точное совпадение собственной частоты основной поперечной моды диэлектрического волновода с частотой следования электронных сгустков.

О существенной роли связи пучка с возбуждаемой волной свидетельствуют осциллограммы сигналов СВЧ-излучения, приведенные на Рис. 6, для расположения пластин диэлектрика вдоль широкой стороны волновода и сдвинутых на расстояние 2 см друг от друга.

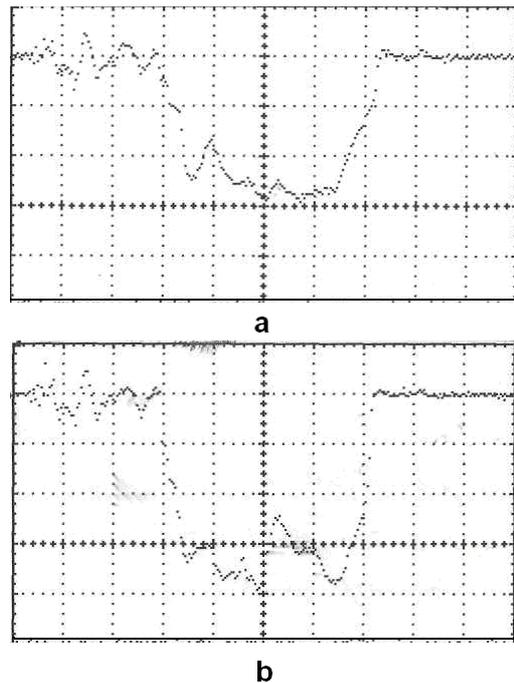


Рис.6. Осциллограммы сигналов СВЧ-излучения

Осциллограмма, показанная на Рис.6,а, соответствует прохождению пучка электронов по центру вакуумного канала, а на Рис.6,б – когда пучок смещен на 0,5 см от оси к одной из пластин. Видно, что во втором случае амплитуда сигнала СВЧ-излучения существенно увеличивается, а наблюдаемый в середине импульса провал связан, вероятно, с выбросом электронов пучка на стенки более сильным возбуждаемым поперечным кильватерным полем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При возбуждении кильватерных полей в диэлектрических волноводах прямоугольной конфигурации последовательностью сгустков релятивистских электронов напряженность возбуждаемого поля можно увеличить уменьшением величины пролетного канала, в результате чего увеличивается связь между сгустками и возбуждаемой волной. При этом толщина диэлектрических пластин и величина пролетного канала должны подбираться таким образом, чтобы частота основной моды диэлектрического волновода совпадала с частотой следования электронных сгустков.

Установлено, что уменьшение пролетного канала приводит к существенному изменению топографии суммарного поля возбуждаемых кильватерных волн. Это, вероятно, связано с изменением модового состава кильватерных полей, а именно, уменьшением вклада высоких радиальных гармоник, что подтверждается проведенными расчетами.

ЛИТЕРАТУРА

1. T.V. Zhang, J.L. Hirschfield, T.S. Marshall, B. Hafizi. Coherent Multimode Dielectric Wake-field Accelerators // *Phys. Rev.* 1997.-v.E56, №4, p.4647-4655.
2. V.A. Kiselev, J.L. Hirshfield, A.F. Linnik, et al. Wakefield Excitation by a Sequence of Electron Bunches in a Rectangular Waveguide Lined with Dielectric Slabs // *12 Advanced Accelerator Con-*

sept Workshop, Lace, Geneva, Wisconsin. 10-15 July 2006: Editors Manoel Conde and Catherine Eyberger; AIP Conferense Proceedings. 2006, v.877, p.851-858.

3. В.А. Киселев, А.Ф. Линник, Т.С. Маршалл, и др. Возбуждение кильватерных волн последовательностью коротких сгустков релятивистских электронов в диэлектрических структурах прямоугольной конфигурации // *Тезисы XX Международного семинара по ускорителям заряженных частиц*. Алушта, Крым, 9-15 сентября 2007, с.52.
4. Ю.В. Егоров. *Частично заполненные волноводы*. М.: «Советское радио», 1967, 216 с.
5. L. Pincherle. Electromagnetic waves in metal tubes longitudinally with two dielectric // *Phys. Rev.* 1944, v.66, №5-6, p.118-130.
6. C. Wang, J.L. Hirshfield. Theory of wakefield in multizone dielectric // *Phys. Rev. ST Accel. Beams.* 2006, v.9, №3, 03 1301(18).
7. Г.В. Сотников, И.Н. Онищенко, Дж.Л. Хиршфилд, Т.К. Маршалл. «Пятизонная двухканальная кильватерная диэлектрическая структура для экспериментов по двухпучковому ускорению в ANL // *Тезисы XX Международного семинара по ускорителям заряженных частиц*. Алушта, Крым, 9-15 сентября 2007. с.50.

Статья поступила в редакцию 13.05.2008 г.

WAKEFIELD EXCITATION BY A SEQUENCE OF RELATIVISTIC ELECTRON BUNCHES IN DIELECTRIC WAVEGUIDES OF RECTANGULAR CROSS-SECTION OF VARIOUS CONFIGURATIONS

V.A. Kiselyov, A.F. Linnik, V.I. Mirny, I.N. Onishchenko, G.V. Sotnikov, V.V. Uskov

The possibility to enhance the efficiency of wake wave excitation in dielectric waveguides of rectangular cross-section was investigated by increase of electron bunches coupling with excited wakefield that was achieved by decrease of transit channel cross-section. At that for each configuration the required changes of dielectric plates size were made to for maintain the coincidence concurrence of bunch repetition frequency and frequency of the principal transverse mode of the corresponding dielectric waveguide. It is established, the decrease of transit channel leading to essential changing of topography of total field excited wake wave.

ЗБУДЖЕННЯ КІЛЬВАТЕРНИХ ХВИЛЬ ПОСЛІДОВНІСТЮ ЗГУСТКІВ РЕЛЯТИВІСТСЬКИХ ЕЛЕКТРОНІВ В ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ХВИЛЕВОДАХ ПРЯМОКУТНОГО ПЕРЕРІЗУ РІЗНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ

В.А. Кисельов, А.Ф. Лінник, В.І. Мирний, І.М. Онищенко, Г.В. Сотніков, В.В. Усков

Досліджується можливість підвищення ефективності збудження кильватерних хвиль в діелектричних хвилеводах прямокутного поперечного перерізу шляхом збільшення зв'язку між згустками і збуджуваною хвилею, яке досягається зменшенням перерізу прольотного каналу. При цьому для кожної конфігурації провадилися розрахунки та відповідні зміни розмірів діелектричних пластин для забезпечення збігання частоти слідування згустків та частоти основної поперечної моди діелектричного хвилеводу. Встановлено, що зменшення прольотного каналу призводить до суттєвої зміни топографії сумарного поля кильватерних хвиль, що збуджуються.