

# РАЗРАБОТКА СОГЛАСОВАННОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МУЛЬТИБАНЧЕВОЙ СХЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ В НЕМ КИЛЬВАТЕРНЫХ ПОЛЕЙ

*Г.П. Березина, А.М. Егоров, Г.А. Кривонос, А.Ф. Линник, И.Н. Онищенко, В.С. Ус*  
*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,*  
*Харьков, Украина*

*E-mail: berezina@kipt.kharkov.ua*

Мультибанчевая схема возбуждения кильватерных полей в диэлектрическом волноводе длинной последовательностью релятивистских электронных сгустков заключается в когерентном сложении кильватерных полей отдельных сгустков последовательности, так что суммарное кильватерное поле оказывается равным кильватерному полю сгустка с зарядом, эквивалентным суммарному заряду всех сгустков последовательности. Экспериментальная демонстрация правильности мультибанчевой схемы требует быстрой (пикосекундный диапазон) электронной техники для регистрации во времени кильватерных полей отдельных сгустков. Эта проблема решается измерением амплитуды огибающей цуга возбужденного кильватерного поля всей последовательности в зависимости от длины диэлектрического волновода. В такой зависимости амплитуда огибающей растет скачками через каждое увеличение длины волновода на длину волны, свидетельствуя о вкладе очередного сгустка. Проведены работы по минимизации отражений (адиабатические переходы, толщина диэлектрической вакуумной заглушки, поглотители) с целью обеспечить волноводный режим возбуждения. Сравнение измеренного КСВН полученного диэлектрического волновода в зависимости от его длины с экспериментальной зависимостью амплитуды возбужденного кильватерного поля от длины волновода показало их соответствие в согласии с теорией и численным моделированием.

## ВВЕДЕНИЕ

Для создания будущих коллайдеров необходимо радикально повысить темп ускорения с целью уменьшить их габариты и стоимость. В существующих новых схемах получения высокоградиентных ускоряющих полей используются кильватерные поля, возбуждаемые в плазме и диэлектрических структурах релятивистским электронным сгустком с большим зарядом. В концепции мультибанчевого диэлектрического кильватерного ускорителя [1, 2] предложено вместо сгустка с большим зарядом использовать регулярную последовательность сгустков с эквивалентным суммарным зарядом.

Для экспериментальной проверки когерентного суммирования кильватерных полей отдельных сгустков последовательности необходимо иметь последовательность с варьированным числом сгустков, что трудно реализуемо из-за малого периода следования сгустков. В [3] предложена альтернатива варьированию длительности последовательности, заключающаяся в использовании варьирования длины диэлектрического волновода, возбуждаемого одной длинной последовательностью сгустков. Возможность такой замены следует из того, что при наличии групповой скорости  $v_g$  возбуждаемой кильватерной волны выход её из волновода конечной длины ограничивает число сгустков последовательности, дающих вклад в рост суммарного поля. Максимальное число сгустков  $N_{max}$ , кильватерные поля которых при когерентном сложении увеличивают амплитуду суммарного поля, прямо пропорционально длине волновода  $L$ :

$$N_{max} = L / \lambda (v_0 / v_g - 1) + 1, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны основной возбуждаемой моды, равная расстоянию между сгустками;  $v_0$  – скорость сгустка. Инжекция следующих сгустков не приводит к росту суммарного кильватерного поля. Увели-

чивая длину диэлектрического волновода, можно менять число сгустков  $N_{max}$ , которые приводят к соответствующему увеличению суммарного кильватерного поля на выходе волновода.

Для экспериментальной реализации такой альтернативы требуется максимально согласованный диэлектрический волновод изменяемой длины. В работе представлены результаты исследования согласования диэлектрических структур различных длин, позволяющим возбуждать в них кильватерные поля по волноводному режиму. Измерены КСВН этих структур и определено их соответствие полученной зависимости суммарного кильватерного поля от числа возбуждающих сгустков, подтверждающей когерентное суммирование их кильватерных полей.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема установки, на которой проводились эксперименты по возбуждению кильватерных полей в диэлектрической структуре круглого поперечного сечения последовательностью сгустков релятивистских электронов показана на Рис. 1.

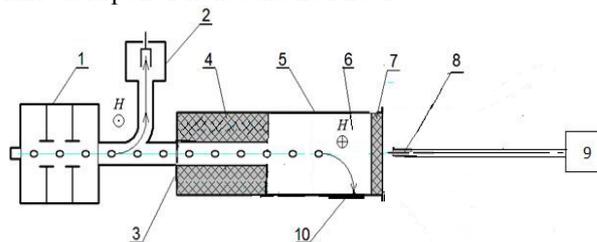


Рис. 1. 1 – ускоритель «Алмаз-2М»; 2 – магнитный анализатор; 3 – диафрагма; 4 – диэлектрическая структура; 5 – волновод; 6 – область поперечного магнитного поля; 7 – фторопластовая вакуумная заглушка; 8 – СВЧ-зонд; 9 – осциллограф; 10 – стеклянная пластина

Энергия пучка релятивистских электронов 4,5 МэВ, средний ток пучка в импульсе 0,8 А, длительность импульса 2 мкс. Каждый импульс представляет собой последовательность  $N = 6000$  электронных сгустков с длительностью каждого 60 пс и интервалом между ними 300 пс с зарядом сгустка 0,26 нКл. Частота прохождения сгустков 2805 МГц.

Для исследования мультибанчевого режима возбуждения кильватерных полей нами использовался медный цилиндрический волновод с внутренним диаметром 85 мм и толщиной стенки 2 мм, который заполнен диэлектриком из фторопласта Ф-4 ( $\epsilon = 2,04$ ;  $tg\delta = 4 \cdot 10^{-4}$ ). Внешний диаметр диэлектрической вставки 85 мм, а диаметр канала в диэлектрике (2,1 см) рассчитывался таким образом, чтобы частота прохождения сгустков  $f_m = 2805$  МГц совпадала с частотой возбужденной в диэлектрической структуре кильватерной волны ( $f_m = f_0$ ).

Фотография экспериментальной установки с диэлектрической структурой показана на Рис. 2.



Рис. 2. Диэлектрическая структура круглого поперечного сечения, установленная на выходе ускорителя

Эксперименты проводились путем измерения амплитуды возбуждаемых кильватерных полей СВЧ-зондом при использовании для замены длины диэлектрика набора цилиндрических диэлектрических вставок с каналом для сгустков, каждая из которых имела длину 2,66 см, что соответствует  $\frac{1}{4}$  длины возбуждаемой волны. Теоретические расчеты показали, что для параметров рассматриваемой установки групповая скорость основной  $E_{01}$ -моды возбужденного черенковского кильватерного поля составляет 0,492 с, где с – скорость света. В соответствии с (1) это означает, что при длине диэлектрического волновода  $L = \lambda$  возбужденные черенковские кильватерные поля сгустков не перекрываются и, соответственно, не складываются. В результате амплитуда суммарного поля всей последовательности сгустков равна амплитуде кильватерного поля одного сгустка, т. е. реализуется сценарий возбуждения одним сгустком. Последовательное увеличение длины диэлектрического волновода до 35 см позволяет проследить эволюцию возбуждения последовательностью из 1, 2, 3 и 4 сгустков. Отметим, что на входной границе диэлектрического волновода генерируется переходное излучение, которое

необходимо измерить, беря  $L \ll \lambda$ , и затем вычесть из общего сигнала.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

### 2.1. НЕСОГЛАСОВАННАЯ СТРУКТУРА

Вначале эксперименты проводились на исходной несогласованной структуре (см. Рис. 1) без тщательного согласования для приближения к волноводному режиму функционирования. Измерения амплитуды возбужденного кильватерного поля в зависимости от длины диэлектрического волновода (изготовленного в виде набора фторопластовых вставок  $\Delta L = 0,25\lambda$  каждая) были выполнены при частоте прохождения сгустков  $f_m = 2805$  МГц, которая совпадала с частотой возбужденного кильватерного поля  $f_0$  ( $f_m = f_0$ ).

Предыдущие эксперименты показали, что при увеличении длины диэлектрического волновода вместе с линейным нарастанием амплитуды кильватерного поля, которое предвиделось в соответствии с (1), наблюдаются периодические осцилляции с нарастающей амплитудой (Рис. 3). Пространственный период осцилляций кратный длине основной моды. Такое поведение полученной зависимости может возникать из-за частичного отражения кильватерной волны от выходного торца диэлектрика, от конца металлического волновода и от диэлектрической вакуумной заглушки.

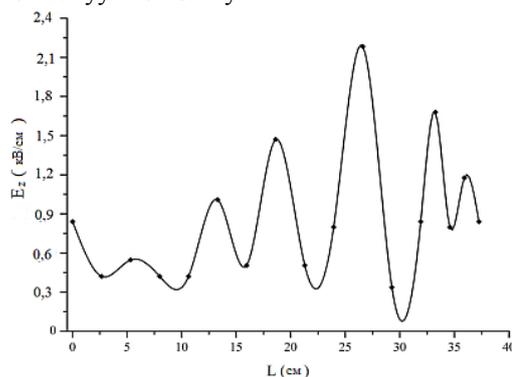


Рис. 3. Зависимость амплитуды  $E_z$  составляющей возбуждаемого кильватерного поля от длины диэлектрического волновода

Как видно из Рис. 3, даже в отсутствие диэлектрика в волноводе ( $L=0$ ), регистрируется СВЧ-сигнал на выходе волновода. Он может быть объяснен возникновением переходного излучения на диафрагме. Его величина уменьшается в 2 раза, если после диафрагмы вставлена диэлектрическая вставка длиной значительно меньше длины возбужденной волны, при которой можно пренебречь возбуждением черенковских излучений. Вычитая это поле переходного излучения, можно проследить поставленную задачу о зависимости суммарного черенковского поля от длины диэлектрического волновода, а соответственно, от числа сгустков, которые когерентно возбуждают поле.

### 2.2. СОГЛАСОВАННАЯ СТРУКТУРА

Для уменьшения уровня отражения на установке был проведен ряд изменений, которые позволяют

уменьшить коэффициент отражения, т. е. минимизировать коэффициент стоячей волны диэлектрической структуры. К ним относятся:

- установка диэлектрического конуса на конце диэлектрической вставки для уменьшения отражения от границы диэлектрик – вакуум;
- установка конусного рупора на выходе волноводно-диэлектрической структуры для уменьшения отражения от конца волновода;
- оптимизация толщины фторопластовой вакуумной заглушки, при которой коэффициент отражения для данной длины волны минимальный.

Минимизация отражений путем указанных изменений определялась по измерениям коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) диэлектрической структуры.

Измерения КСВН волноводно-диэлектрической структуры проводились на стенде, схема которого приведена на Рис. 4.

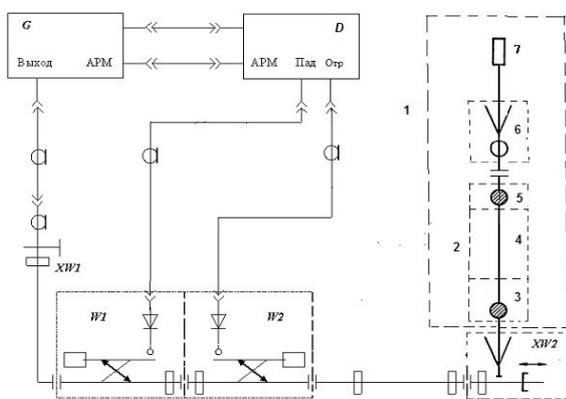


Рис. 4. Структурная схема измерений КСВН волноводно-диэлектрического тракта:

*G* – СВЧ-генератор; *D* – индикаторный блок панорамного измерителя КСВН Р2-53; *W*<sub>1</sub>, *W*<sub>2</sub> – направленные ответвители падающей и отраженной волн из комплекта Р2-40; *XW*<sub>1</sub> – коаксиально-волноводный переход; *XW*<sub>2</sub> – переход с прямоугольного волновода на цилиндрический; 1 – исследуемая структура; 2 – волноводно-диэлектрический тракт; 3 – диэлектрическая структура; 4 – цилиндрический волновод; 5 – диэлектрическая заглушка; 6 – конусный рупор; 7 – поглощающая нагрузка

Измерения КСВН проводились панорамным КСВ-метром Р2-53, в комплект которого входит СВЧ-генератор (диапазон 2...4 ГГц) и индикатор КСВ. В качестве волноводного тракта использовался волновод R32 с прямоугольным поперечным сечением 72×34 мм и два направленных ответвителя.

Генератор соединен с волноводным трактом с помощью коаксиально-волноводного перехода.

Измеритель может работать как в режиме качающейся частоты, так и в непрерывном режиме на фиксированной частоте (с ручной перестройкой). Работы проводились на частоте  $f = 2805$  МГц ( $\lambda = 10,6357$  см).

Перед измерениями проводилась калибровка КСВ-метра поочередным подключением к открытому концу волноводного тракта короткозамыкателя (коэффициент отражения  $R=1$ ) либо поглощающей нагрузки ( $R=0$ ), что соответствует двум режи-

мам работы волноводного тракта с  $КСВН=\infty$  и  $КСВН=1$  [4]:

$$КСВН = \frac{1 + R}{1 - R}, \quad (2)$$

где  $R = \frac{\sqrt{I_{omp.}}}{\sqrt{I_{nad.}}}$ ,  $I_{omp.}$  и  $I_{nad.}$  – величины продетектированных токов, создаваемых отраженной и падающей волной.

Коэффициент отражения симметричной собственной волны от пластинки толщиной  $d$ , которая расположена в цилиндрическом металлическом волноводе радиуса  $b$ , определяется выражением [5]:

$$R = -\frac{i(1 - Z_s^2) \operatorname{tg}(\kappa d)}{2Z_s^2 - i(1 + Z_s^2) \operatorname{tg}(\kappa d)}, \quad (3)$$

где  $Z_s = \frac{\kappa}{k_z c}$ ,  $\kappa = \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon - \frac{\mu_{0n}^2}{b^2}}$ ,  $k_z = \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - \frac{\mu_{0n}^2}{b^2}}$ ,

$\mu_{0n}$  – корни функции Бесселя нулевого порядка;  $\omega$  – частота волны;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость пластинки. Из (3) следует, что при  $\kappa d = \pi$ , т.е.  $d = 0,5\lambda$ , отражение отсутствует.

Для экспериментального определения оптимальной толщины вакуумной заглушки, которая минимизирует отражение от неё, была измерена зависимость КСВН волноводно-диэлектрической структуры от толщины заглушки (Рис. 5).

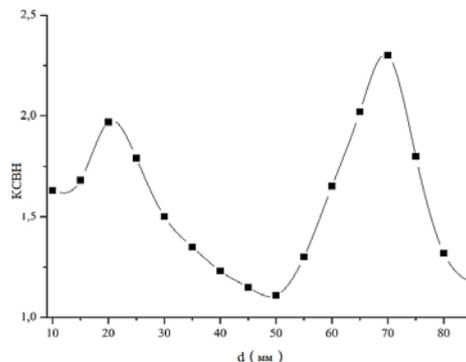


Рис. 5. Зависимость КСВН от толщины вакуумной заглушки

Из Рис. 5 видно, что минимальное значение КСВН наблюдается при толщине заглушки 50 мм, что соответствует  $0,5\lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны возбужденного кильватерного поля в соответствии с упомянутым выше [3]. Эта толщина была взята для «согласованного» диэлектрического волновода.

С помощью описанной аппаратуры и переходного устройства, которое преобразует волну типа  $H_{10}$  прямоугольного волновода в волну  $E_{01}$  круглого волновода, проведены измерения КСВН цилиндрического волновода, частично заполненного диэлектриком, в зависимости от конфигурации структуры (начальной и согласованной).

Зависимость КСВН круглого волновода от длины заполнения набором вставок из фторопласта длиной каждая  $\Delta L = 0,25\lambda$  для начальной структуры приведена на Рис. 6 (кривая 1). Наблюдаются периодические изменения КСВН (от 1,05 до 1,8), связан-

ные с отражением падающей волны от выходного торца набора цилиндрических вставок из диэлектрика, от конца волновода и от цилиндрической вакуумной заглушки.

Измеренная зависимость КСВН согласованной конфигурации волноводно-диэлектрической структуры от длины заполнения фторопластовыми вставками до полной длины  $L = 3,25\lambda$ , с оптимальной толщиной заглушки ( $d = 0,5\lambda$ ), с конусным медным рупором на выходе волноводно-диэлектрической структуры и с поглощающим ферритовым поглотителем после рупора приведена на Рис. 6 (кривая 2).

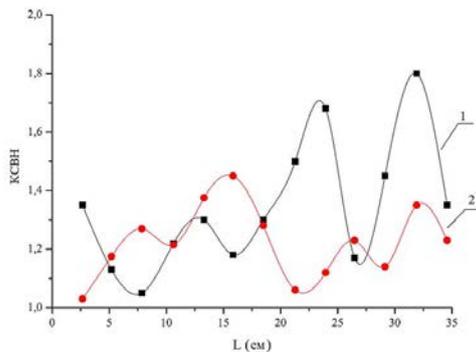


Рис. 6. Зависимость КСВН круглого цилиндрического волноводно-диэлектрического тракта от длины диэлектрической части: 1 – начальная диэлектрическая структура; 2 – согласованная структура

При сравнении зависимости КСВН круглого волноводно-диэлектрического тракта от длины заполнения его фторопластом для начального и последнего вариантов структуры видно, что внесенные изменения позволили снизить значения КСВН согласованной конфигурации волноводно-диэлектрической структуры.

При выполнении всех условий для уменьшения отражений измерения суммарной амплитуды возбуждаемого кильватерного поля в зависимости от длины диэлектрического волновода были проведены на установке, схема которой показана на Рис. 7.

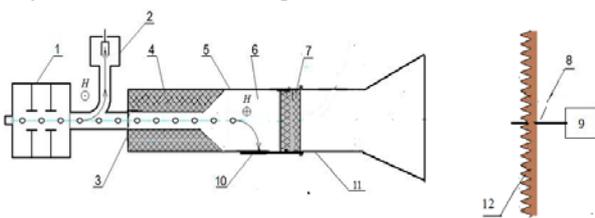


Рис. 7. Схема установки с согласованным волноводом: 1 – ускоритель «Алмаз-2М»; 2 – магнитный анализатор; 3 – диафрагма; 4 – диэлектрик; 5 – волновод; 6 – область поперечного магнитного поля; 7 – диэлектрическая вакуумная заглушка; 8 – СВЧ-зонд; 9 – осциллограф; 10 – стеклянная пластина; 11 – дополнительный волновод с рупором; 12 – ферритовый поглотитель высокочастотного излучения

Результаты исследований зависимости амплитуды возбужденного кильватерного поля от длины диэлектрической структуры показаны на Рис. 8. Видно, что амплитуды возбужденных кильватерных полей возрастают линейно с увеличением длины диэлектрика в волноводе, что свидетельствует о ко-

герентном сложении полей от сгустков. Осцилляции на фоне линейного роста свидетельствуют о неполном согласовании диэлектрической структуры с волноводным трактом и открытым пространством.

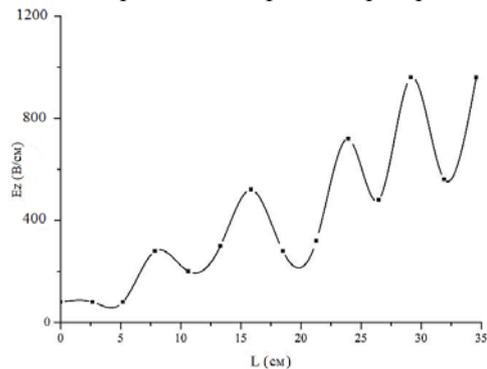


Рис. 8. Зависимость амплитуды возбужденного кильватерного поля от длины диэлектрической структуры

Исследовался также альтернативный вариант согласования для уменьшения отражения и реализации волноводного режима, в котором правомерна формула (1). В этом варианте к выходному торцу диэлектрика пристыковывался диэлектрический конус, а перед фторопластовой заглушкой размещался ферритовый поглотитель (Рис. 9).

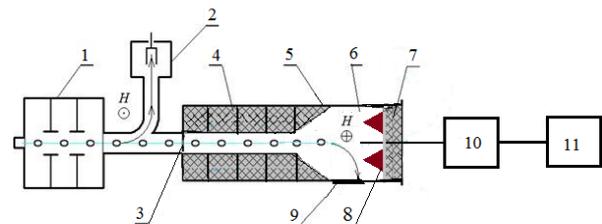


Рис. 9. 1 – ускоритель «Алмаз-2М»; 2 – магнитный анализатор; 3 – диафрагма; 4 – диэлектрик; 5 – волновод; 6 – область поперечного магнитного поля; 7 – диэлектрическая заглушка; 8 – ферритовый поглотитель; 9 – металлический коллектор; 10 – волномер ВМТ-10; 11 – осциллограф

На оси поглотителя находился штыревой СВЧ-зонд, выходящий за границу поглотителя на 1 см. Измеренная зависимость амплитуды кильватерного поля без диэлектрического конуса и с ним от длины диэлектрического волновода показана на Рис. 10.

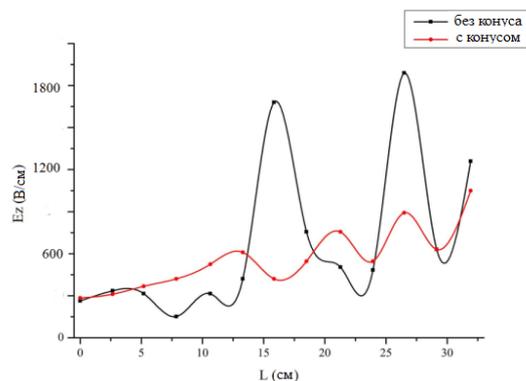


Рис. 10. Зависимость амплитуды кильватерного поля от длины диэлектрического волновода без диэлектрического конуса и с ним

## ВЫВОДЫ

Используемые в работе способы согласования волноводно-диэлектрического тракта позволили существенно уменьшить измеренные КСВН для всех экспериментальных длин диэлектрического волновода.

Полученный согласованный диэлектрический волновод был использован для возбуждения в нем кильватерных полей в зависимости от его длины, а следовательно, от количества сгустков, для которых кильватерное поле возрастает при неизменной длине последовательности. В результате уменьшенных резонансных накоплений поля экспериментально получен практически линейный рост суммарного кильватерного поля от длины диэлектрического волновода, возбуждаемого длиной последовательностью сгустков. Этот результат свидетельствует о когерентном сложении кильватерных полей тех сгустков, поля которых перекрываются с ростом длины диэлектрического волновода. Измеренные величины кильватерного поля, возбуждаемого 1, 2, 3 и 4-мя сгустками, согласуются с теоретическими расчетами и численным моделированием.

Работа поддержана программой «Global Initiatives for Proliferation Prevention (GIPP)», проект ANL-T2-247-UA (УНТЦ № P522).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. T.B. Zhang, J.L. Hirshfield, T.C. Marshall, B. Hafizi. Stimulated dielectric wake-field accelerator // *Phys. Rev. E*. 1997, v. 56, № 4, p. 4647.
2. I.N. Onishchenko, V.A. Kiselev, A.F. Linnik, G.V. Sotnikov. Concept of dielectric wakefield accelerator driven by a long sequence of electron bunches // *IPAC'13*, Shanghai, China, 12-17 May, 2013.
3. В.А. Киселев, И.Н. Онищенко, Г.В. Сотников. Возбуждение кильватерного поля в диэлектрических волноводах последовательностью релятивистских электронных сгустков // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения»*. 2015, № 4, с. 11-116.
4. И.В. Лебедев. *Техника и приборы СВЧ*. Т.1. М.: «Высшая школа». 1970, 440 с.
5. Levi Schachter. *Beam-Wave Interaction in Periodic and Quasi-Periodic Structures*. Springer. 2011, p. 66.

*Статья поступила в редакцию 30.10.2015*

## MATCHED DIELECTRIC WAVEGUIDE ELABORATION FOR RESEARCH OF MULTIBUNCH SCHEME OF WAKEFIELD EXCITATION THEREIN

*G.P. Berezina, A.M. Yegorov, G.A. Krivososov, A.F. Linnik, I.N. Onishchenko, V.S. Us*

Multibunch scheme of wakefield excitation in a dielectric waveguide by a long sequence of relativistic electron bunches concludes to the coherent addition wakefields of individual bunches of the sequence, so that the total wake field is equal to the wake field of the bunch with a charge equivalent to the total charge of all bunches sequence. Experimental demonstration of the consistency of the multibunch scheme requires fast time (picosecond range) of electronic equipment for the registration in time wakefields of separate bunches. This problem can be solved by measuring the amplitude of the envelope of the wakefield train excited by the entire sequence in dependence on the length of the dielectric waveguide. In such dependence the envelope amplitude increases stepwise by every increase in the waveguide length on the wavelength, indicating the contribution of every bunch. In the work measures were carried out to minimize reflections (adiabatic transitions, the thickness of the dielectric vacuum plugs, absorbers) in order to provide a waveguide regime excitation. Comparison of the measured SWR of the obtained dielectric waveguide, depending on its length with the experimental dependence of the amplitude of the excited wakefield on the waveguide showed their correspondence in accordance with the theory and simulation.

## РОЗРОБКА УЗГОДЖЕНОГО ДІЕЛЕКТРИЧНОГО ХВИЛЕВОДУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ МУЛЬТИБАНЧЕВОЇ СХЕМИ ЗБУДЖЕННЯ В НЬОМУ КІЛЬВАТЕРНИХ ПОЛІВ

*Г.П. Березіна, О.М. Єгоров, Г.А. Кривососов, А.Ф. Лінник, І.М. Оніщенко, В.С. Ус*

Мультибанчева схема збудження кильватерних полів у діелектричному хвилеводі довгою послідовністю релятивістських електронних згустків полягає в когерентному складанні кильватерних полів окремих згустків послідовності, так що сумарне кильватерне поле виявляється рівним кильватерному полю згустку із зарядом, еквівалентним сумарному заряду всіх згустків послідовності. Експериментальна демонстрація правильності мультибанчевої схеми вимагає швидко часової (пікосекундний діапазон) електронної техніки для реєстрації в часі кильватерних полів окремих згустків. Ця проблема вирішується вимірюванням амплітуди огинаючої цуга збудженого кильватерного поля всією послідовністю в залежності від довжини діелектричного хвилеводу. У такій залежності амплітуда огинаючої зростає стрибками через кожне збільшення довжини хвилеводу на довжину хвилі, засвідчуючи про вклад чергового згустку. У роботі проведено заходи з мінімізації відбиттів (адіабатичні переходи, товщина діелектричної вакуумної заглушки, поглиначі) з метою забезпечити хвилеводний режим збудження. Порівняння вимірюваного КСВН отриманого діелектричного хвилеводу в залежності від його довжини з експериментальною залежністю амплітуди збудженого кильватерного поля від довжини хвилеводу показало їх відповідність у згоді з теорією та чисельним моделюванням.