

# ОБ УСКОРЕНИИ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ КИЛЬВАТЕРНЫХ ПОЛЕЙ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬЮ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ СГУСТКОВ

*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*

Представлен возможный физический механизм появления ускоренных электронов при возбуждении кильватерных полей в диэлектрических структурах последовательностью релятивистских электронных сгустков, заключающийся в расплывании сгустков в пространстве дрейфа из-за существующего энергетического разброса электронов в используемом ускорителе и попадании части электронов сгустков в ускоряющую фазу возбужденного поля. Проведен анализ выполненных в ХФТИ экспериментов по исследованию концепции кильватерного ускорения заряженных частиц, подтверждающий предложенный механизм возникновения электронов с энергией, превышающей начальную энергию инжектируемых в структуру электронов.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно исследуется возможность создания ускорителя на кильватерном поле Вавилова-Черенкова, возбуждаемом в диэлектрической структуре последовательностью коротких электронных сгустков [1,2]. В традиционной схеме кильватерного ускорения ведущий электронный сгусток с большим зарядом при пролете в вакуумном канале генерирует кильватерную моду черенковского излучения. Следующий за ним сгусток с малым зарядом ускорится в этом поле. Вместо одного ведущего сгустка с большим зарядом можно использовать регулярную последовательность сгустков, что в случае накопления полей от большого числа сгустков дает значительное увеличение амплитуды возбуждаемых полей [3].

Но создание и инжекция ускоряемого сгустка в нужную фазу кильватерной волны является сложной задачей, затрудняющей развитие метода кильватерного ускорения. Поэтому вызывает интерес возможность ускорения части сгустка или части каждого из последовательности сгустков, создающих кильватерное поле.

В наших предыдущих экспериментах [1-3] по возбуждению кильватерных полей в диэлектрических структурах последовательностью релятивистских электронных сгустков были обнаружены ускоренные электроны. В данной работе представлен возможный физический механизм появления ускоренных электронов, заключающийся в расплывании сгустков в пространстве дрейфа из-за существующего энергетического разброса электронов в используемом ускорителе и попадании части электронов сгустков в ускоряющую фазу возбужденного поля.

## 2. РАСПЛЫВАНИЕ СГУСТКОВ В ПРОСТРАНСТВЕ ДРЕЙФА

В проводимых экспериментах источником электронных сгустков являлся линейный резонансный ускоритель «Алмаз-2» [4].

Из ускорителя инжектируется импульс, который состоит из 6000 электронных сгустков с периодом  $T = 360$  пс. Заряд каждого сгустка  $q \approx 0,16$  нК. Энергия  $W = 4.5$  МэВ, средний ток в импульсе длительностью  $\tau_{им} = 2$  мкс составлял  $I_{cp} = 0.5$  А.

Изменения энергии и фазы электронов в процессе ускорения в таком ускорителе описаны в [5], где показано, что в передней части сгустков преобладают более высокоэнергетичные электроны, а к концу сгустка энергия электронов падает.

Полный фазовый размер сгустков на выходе ускорителя, измеренный с помощью высокочастотных сепараторов [6,7], достигает  $135^\circ$ . Такая фазовая ширина соответствует полной длине сгустка  $L_0 \approx 4$  см.

Особенностью ускорителя является возможность изменения ширины энергетического спектра пучка (от  $\approx 9$  до  $\approx 22\%$ ) при незначительных изменениях частоты возбуждения клистрона ускорителя (от 2805 до 2799 МГц).

Диэлектрическая структура прямоугольного поперечного сечения находилась на расстоянии 1,5 м от выхода ускорителя (существовала зона дрейфа). В этом случае необходимо учитывать расширение сгустков из-за различия в скорости частиц с номинальной энергией и частиц с минимальной (преобладающее число которых находится в задней части сгустка) и максимальной энергией (преобладающее число которых находится в передней части сгустка).

Полная длина сгустков –  $L$  (на уровне  $\sim 0,1$ ) за счет отставания электронов с минимальной энергией от электронов с «номинальной» энергией (усредненной по энергиям электронов в сгустке) –  $\Delta L_1$  и опережения электронов с максимальной энергией –  $\Delta L_2$  после прохождения расстояния 1,5 м в зависимости от ширины энергетического спектра показана в Таблице.

Для увеличения амплитуды кильватерного поля при использовании большого количества сгустков был использован резонаторный режим возбуждения кильватерного поля [8,9].

$\delta W/W\%$	$L_{0+\Delta L_1+\Delta L_2}=L$
9	4+0,29+0,12=4,41 см
12	4+1,15+0,27=5,42 см
22	4+2,07+0,24=6,31 см

Параметры резонатора выбирались таким образом, чтобы в момент, когда волна, отраженная от выходного конца резонатора доходит до входа, в него инжектировался очередной электронный сгусток. Это обеспечивает сложение полей от большого количества электронных сгустков и ослабляет влияние длины сгустков на амплитуду возбуждаемого кильватерного поля.

### 3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ СГУСТКОВ ПОСЛЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

Возбуждение кильватерных полей и сопутствующее ускорение в них части электронов сгустков исследовалось при инжекции последовательности сгустков в волновод прямоугольного поперечного сечения  $8,5 \times 18 \text{ см}^2$ , вдоль узких сторон которого располагались пластины из фторопласта ( $\epsilon = 2,1$ ;  $\text{tg}\delta = 1,5 \times 10^{-4}$ ). Толщина диэлектрических пластин составляла 2,2 см, их длина была равна 53,4 см. Использовался резонаторный режим с возбуждением волны  $LSM_{1,1,10}$  [10]. Эксперименты проводились для трех указанных выше ширин функции распределения по энергиям электронов.

#### 3.1. «УЗКИЙ» ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР

Для начальной ширины энергетического спектра  $\delta W/W = 9\%$  на Рис.1 представлены «отпечатки» на стеклянных пластинах электронных сгустков, развернутых в поперечном магнитном поле после прохождения участка волновода с диэлектриком.

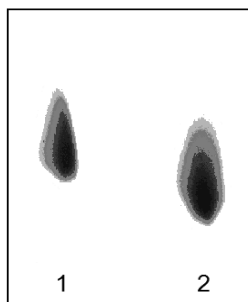


Рис.1. «Отпечатки» пучка на стеклянных пластинах при начальной ширине энергетического спектра  $\delta W/W = 9\%$ : 1 – без диэлектрической структуры, 2 – с диэлектрической структурой

По отпечаткам можно судить об изменениях энергетического спектра сгустков, происшедших после возбуждения ими кильватерных полей и возможного ускорения электронов, попавших в ускоряющие фазы.

Видно, что для этого случая с «узким» энергетическим спектром практически все электроны сгустков теряют энергию на возбуждение кильватерных полей в диэлектрической структуре. Величина тормозящего поля, измеренная по потерям энер-

гии электронами, составляет  $\approx 2,5 \text{ МВ/м}$ . Ускоренные электроны не обнаруживаются. Объясняется это тем, что для этого случая на длине дрейфа сгустки расплываются незначительно (см. Таблицу), так что их длина не превышает половину возбужденной длины волны, и электроны не попадают в ускоряющие фазы.

#### 3.2. «СРЕДНИЙ» ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РАЗБРОС

При инжекции в волноводно-диэлектрическую структуру электронных сгустков с начальной шириной энергетического спектра 12% происходят качественные изменения энергии электронов (Рис.2). Кроме замедленных электронов наблюдаются также и ускоренные электроны. Максимальное увеличение энергии 0,5 МэВ, что соответствует ускоряющему полю  $E \approx 1 \text{ МВ/м}$ .

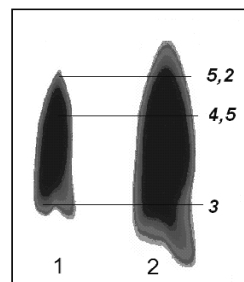


Рис.2. «Отпечатки» пучка при начальной ширине энергетического спектра  $\delta W/W = 12\%$ : 1 – без диэлектрической структуры, 2 – с диэлектрической структурой

В этом случае длина сгустка на входе в диэлектрическую структуру (см. Таблицу) несколько превышает половину длины волны кильватерного поля, так что электроны, которые попадают в ускоряющую фазу кильватерной волны, могут ускоряться. Отметим, что энергию, большую исходной, будут иметь электроны из передней части сгустков, обладающие наибольшей энергией [5]. Электроны из задней части сгустков при попадании в ускоряющую фазу кильватерного поля не успеют набрать энергию больше исходной. К тому же под действием ускоряющего поля они будут смещаться в тормозящую фазу кильватерной волны.

#### 3.3. «ШИРОКИЙ» ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР

При энергетическом разбросе  $\delta W/W \approx 22\%$  (Рис.3) длина сгустка на входе в диэлектрическую структуру увеличивается до 6,18 см и становится больше 0,6 возбуждаемой длины волны.

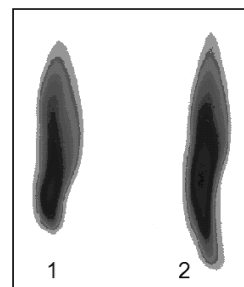


Рис.3. «Отпечатки» пучка при начальной ширине энергетического спектра  $\delta W/W = 22\%$ :

1 – без диэлектрической структуры, 2 – с диэлектрической структурой

При этом взаимодействие сгустков с диэлектрической структурой заметно ослабляется – падает амплитуда возбуждаемой волны, а энергетический спектр сгустков изменяется незначительно, хотя еще наблюдаются как замедленные, так и незначительно ускоренные частицы.

### ВЫВОДЫ

Проведен анализ выполненных в ХФТИ экспериментов по исследованию концепции кильватерного ускорения заряженных частиц в диэлектрических структурах. Найдено возможное объяснение появлению в энергетическом спектре электронов последовательности сгустков, возбуждающих кильватерное поле, ускоренных электронов до энергии, превышающей исходную. При расплывании сгустков в пространстве дрейфа, из-за существующего энергетического разброса электронов в используемом ускорителе, часть электронов каждого сгустка может ускоряться в возбуждаемых кильватерных полях.

### ЛИТЕРАТУРА

1. I.N. Onishchenko, V.A. Kiselev, A.K. Berezin, et al. // *Proc. of the PAC*, New York 1995 (IEEE, New York, 1995), p.782.
2. V.A. Kiselev, A.F. Linnik, T.S. Marshall, et al. Research on Wake-field Excitation in a Cylindrical Dielectric Waveguide and Resonator by a Sequence of Electron Bunches // *Strong microwave in plasma*. 2006, v.1, p.303-310, N. Novgorod, Russia.
3. V.A. Kiselev, A.F. Linnik, T.S. Marshall, et al. Research on Wake-field Excitation in a Cylindrical Dielectric Waveguide and Resonator by a Sequence of Electron Bunches // *Strong microwave in plasma*. 2006, v.1, p.303-310, N. Novgorod, Russia.
4. В.М. Грижко, В.А. Вишняков, И.А. Гришаев, А.И.Зыков, Е.К. Островский. Линейный ускоритель электронов на 40 МэВ // *ЖТФ*. 1964, т.34, в.10, с.1903-1905.
5. А.Н. Лебедев, А.В. Шальнов. *Основы физики и техники ускорителей*. М.: «Энергоатомиздат». 1991. с.325.
6. Г.М. Иванов, В.В. Пилипенко, Л.А. Махненко, А.Н. Довбня. Измерение распределения заряда по фазам в сгустках на линейном ускорителе с бегущей волной // *Линейные ускорители*. Харьков: ФТИ АН УССР. 1967, с.81-88.
7. А.И. Зыков, Г.Д. Крамской, Е.К. Островский. Измерение фазового спектра ускоренных электронов с помощью высокочастотного сепаратора // *ЖТФ*. 1969, т.39, №6, с.1007-1010.
8. T.C. Marshall, J-M. Fang, J.L. Hirshfield, and Park S-Y. Multi-mode, Multi-bunch Dielectric Wake Field Resonator Accelerator // *Advanced Accelerator Concepts: 9<sup>th</sup> Workshop* / Edited by P.L. Colestock and S. Kelley. *AIP Conf. Proc.* 569. 2000, p.316-325.
9. В.А. Балакирев, И.Н. Онищенко, Д.Ю. Сидоренко, Г.В. Сотников. Ускорение заряженных частиц кильватерными полями в диэлектрическом резонаторе с каналом для возбуждающего сгустка // *Письма в ЖТФ*. 2003, т.29, в.14, с.39-45.
10. 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 Concept Workshop Lake Geneva Wisconsin. AIP Conference Proceedings*. 2006, v.877, p.851-858.

Статья поступила в редакцию 27.05.2008 г.

## TO ELECTRONS ACCELERATION AT WAKEFIELD EXCITATION IN DIELECTRIC STRUCTURES BY A SEQUENCE OF RELATIVISTIC ELECTRON BUNCHES

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

The possible physical mechanism of occurrence accelerated electrons at wakefield excitation in dielectric structures by a sequence of relativistic electron bunches is presented, which concludes to bunch stretching in the drift space due to electron energy dispersion existing in the used accelerator and further migration of a part of bunch electrons to the accelerating phase of the excited field. The analysis of the experiments, executed in NSC KIPT, on research of the concept of wakefield acceleration of charged particles is performed that confirms the supposed mechanism of originating electrons with an energy exceeding the initial energy of electrons injected in the structure.

## ПРО ПРИСКОРЕННЯ ЕЛЕКТРОНІВ ПРИ ЗБУДЖЕННІ КІЛЬВАТЕРНИХ ПОЛІВ В ДІЕЛЕКТРИЧНИХ СТРУКТУРАХ ПОСЛІДОВНІСТЮ РЕЛЯТИВІСТСЬКИХ ЕЛЕКТРОННИХ ЗГУСТКІВ

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

Представлено можливий фізичний механізм появи прискорених електронів при збудженні кильватерних полів в діелектричних структурах послідовністю релятивістських електронних згустків, який полягає в «розпливанні» згустків в просторі дрейфу через суттєвого енергетичного розкиду електронів в існуючому прискорювачі і попаданні частини електронних згустків у прискорюючу фазу збудженого поля. Проведено аналіз виконаних в ХФТІ експериментів по дослідженню концепції кильватерного прискорювання заряджених часток, який підтверджує запропонований механізм виникнення електронів з енергією, що перевищує початкову енергію інжекттованих в структуру електронів.