

# УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СГУСТКОВ ПРИ ВВЕДЕНИИ РАССТРОЙКИ МЕЖДУ ЧАСТОТОЙ СЛЕДОВАНИЯ СГУСТКОВ И ЧАСТОТОЙ ВОЗБУЖДАЕМОГО ИМИ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЕ КИЛЬВАТЕРНОГО ПОЛЯ

Г.П. Березина, А.М. Егоров, Г.А. Кривоносов, А.Ф. Линник, О.Л. Омелаенко,  
И.Н. Онищенко, В.И. Приступа, В.С. Ус

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
Харьков, Украина  
E-mail: onish@kipt.kharkov.ua

С использованием последовательности сгустков линейного электронного ускорителя «Алмаз-2М» (4,5 МэВ, 1 А, 2 мкс) проведено возбуждение кильватерных полей в диэлектрической структуре первой части последовательности и ускорение в этих полях второй части последовательности сгустков, сдвинутых в ускоряющие фазы при введении расстройки частоты следования сгустков относительно частоты возбуждаемого поля. Изменением величины расстройки показана возможность регулировки числа сгустков, возбуждающих кильватерное поле в структуре, и числа последующих ускоряемых сгустков.

## ВВЕДЕНИЕ

При разработке концепции мультибанчевого диэлектрического кильватерного ускорителя [1] важной проблемой является инжекция сгустков для их ускорения возбужденными кильватерными полями. В коллинеарной схеме ускорителя инжекция ускоряемых сгустков может быть реализована [2] без использования дополнительного ускорителя-инжектора за счет смещения в ускоряющую фазу возбужденного кильватерного поля сгустков задней части последовательности при их отклонении и возвращении на линию возбуждения кильватерного поля сгустками передней части последовательности. В этом методе проблематичным является требуемое быстрое включение отклоняющего магнитного поля. В [3] предложен метод создания последовательности возбуждающих субпикосекундных сгустков (драйверов) с необходимым расстоянием между ними и ускоряемого сгустка (витнеса), отстоящего на расстоянии, обеспечивающем попадание в ускоряющую фазу кильватерного поля. Принцип этого метода, основанного на технике маски, схематически показан на Рис. 1. Исходный электронный пучок (длинный сгусток) направляется в секцию “dog-leg”, имея коррелированную вдоль длины сгустка (т.е. по времени прилета) дисперсию по энергии. Для представленного случая фронт сгустка (“F”) имеет меньшую энергию по сравнению с хвостом сгустка (“B”). Первый магнитный диполь разворачивает различные энергии сгустка в пространстве, превращая корреляцию энергия-время в корреляцию энергия-пространство. Затем сгусток попадает на металлическую маску, состоящую из периодического набора металлических проволочек, приводя к рассеиванию электронов, ударившихся в нити. Проходя через второй диполь, микросгустки, разнесенные по энергиям в пространстве, превращаются в микросгустки, разнесенные по энергиям во времени. Таким образом, формируется последовательность микросгустков, расстояния между которыми определяются маской.

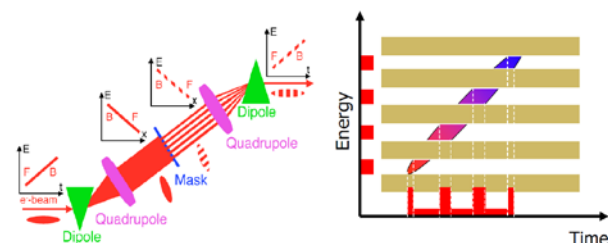


Рис. 1. Слева: упрощенная схема техники получения микросгустков с использованием маски. Справа: структура микросгустков, созданная проволочной маской, во времени и по энергии

В настоящей работе предложен и экспериментально исследован метод возбуждения кильватерного поля одними сгустками и ускорения других сгустков одной и той же последовательности. В этом методе, используемом в коллинеарной схеме концепции [1], отсутствуют дополнительный ускоритель-инжектор и сложные медленно действующие магнитные системы. Суть метода [4] заключается во введении расстройки между частотой следования сгустков  $f_m$  и частотой возбуждаемого кильватерного поля  $f_0$  ( $\Delta f = f_m - f_0$ ). В отсутствие расстройки ( $f_m = f_0$ ) все сгустки находятся в тормозящей фазе возбуждаемого поля и теряют свою энергию на возбуждение колебаний. При наличии расстройки ( $f_m \neq f_0$ ) сгустки передней части последовательности теряют свою энергию на возбуждение кильватерного поля, а сгустки задней части последовательности, смещаясь по фазе, попадают в ускоряющее кильватерное поле, возбуждаемое предыдущими сгустками, и приобретают дополнительную энергию. Для точечных и моноэнергетичных сгустков число сгустков  $N^*$  первой части последовательности, которые возбуждают кильватерное поле, определяется из условия смещения по фазе  $N^*$ -го сгустка на  $\pi$ :

$$N^* = f_m / 2\Delta f. \quad (1)$$

Следующая часть последовательности сгустков такой же длительности ускоряется.

# 1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ С МАГНИТНОГО АНАЛИЗАТОРА

## 1.1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема экспериментальной установки для исследования возбуждения кильватерного поля в диэлектрической структуре последовательностью сгустков и ускорение в этих полях других сгустков той же последовательности, сдвинутых в ускоряющие фазы за счет введения расстройки между частотой следования сгустков и частотой возбуждаемого кильватерного поля, представлена на Рис. 2

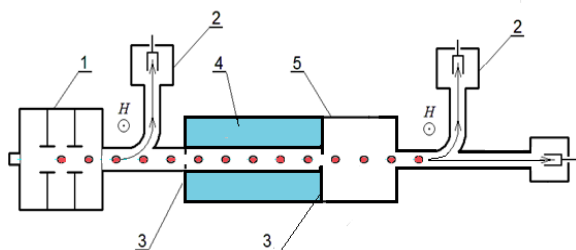


Рис. 2. Схема экспериментальной установки. 1 – ускоритель «Алмаз-2М»; 2 – магнитные анализаторы; 3 – входная и выходная диафрагмы; 4 – тефлоновая трубка; 5 – металлический волновод

Последовательность сгустков релятивистских электронов создавалась с помощью линейного резонансного электронного ускорителя «Алмаз-2М» 1. Энергия сгустков 4,5 МэВ, ток в импульсе 0,8 А, длительность импульса 2 мкс. Каждый импульс представляет собой последовательность  $N=6 \cdot 10^3$  сгустков, каждый зарядом 0,26 нКл и длительностью 60 пс. Период следования сгустков 360 пс. Диэлектрический резонатор представлял собой медный цилиндрический волновод 5 с внутренним диаметром 85 мм, заполненный диэлектрической трубкой 4 из фторопласта ( $\epsilon=2,04$ ,  $\text{tg}\delta=4 \cdot 10^{-4}$ ), с каналом диаметром 2,1 см для прохождения электронных сгустков. Длина заполненной диэлектриком части равна 31 см, что соответствует трем длинам волны основной моды.

Энергетические спектры электронов сгустков измерялись с помощью магнитного анализатора 2, расположенного на выходе диэлектрической структуры.

## 1.2. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИЗМЕРЕНИЮ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ

На Рис. 3,а,б представлены полученные энергетические спектры электронов пучка, прошедших через резонатор без диэлектрика (черные линии – исходные спектры) и через резонатор с диэлектрической трубкой (красные линии – спектры после возбуждения кильватерного поля и взаимодействия с ним). На Рис. 3,а показан резонансный случай (нулевая расстройка  $\Delta f=0$ ), на Рис. 3,б – нерезонансный случай (ненулевая расстройка  $\Delta f=2,5$  МГц).

Из Рис. 3,а следует, что при наличии диэлектрика в случае резонанса весь энергетический спектр смещается на 400 кэВ как целое в область меньших энергий, что обусловлено потерей энергии на возбуждение колебаний всех сгустков как резонансных.

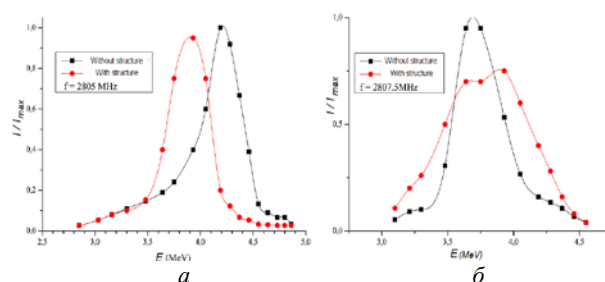


Рис. 3. Энергетические спектры электронов сгустков, прошедших через резонатор без диэлектрика (квадратные точки) и через резонатор с диэлектрической трубкой (круглые точки): а –  $\Delta f = 0$ ; б –  $\Delta f = f_m - f_0 = 2,5$  МГц

При наличии расстройки между частотой следования сгустков и собственной частотой кильватерного поля  $\Delta f = f_m - f_0 = 2,5$  МГц (см. Рис. 3,б) часть сгустков последовательности, смещаясь по фазе, попадает в ускоряющую фазу кильватерной волны, возбуждаемой предыдущими сгустками той же последовательности, и отбирает энергию кильватерного поля. В этом случае в энергетических спектрах электронов наблюдаются как потерявшие энергию электроны (-150 кэВ), так и ускоренные до энергии выше первоначальной (+150 кэВ).

## 2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ПО ОТПЕЧАТКАМ ПУЧКА НА СТЕКЛЯННЫХ ПЛАСТИНАХ

### 2.1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема экспериментальной установки для этого эксперимента показана на Рис. 4.

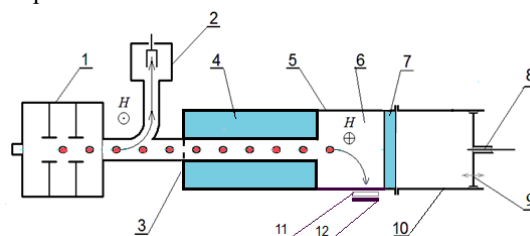


Рис. 4. Схема экспериментальной установки. 1 – ускоритель «Алмаз-2М»; 2 – магнитный анализатор; 3 – входная диафрагма; 4 – тефлоновая трубка; 5 – металлический резонатор; 6 – поперечное магнитное поле; 7 – вакуумная заглушка; 8 – СВЧ-зонд; 9 – пlynджер; 10 – дополнительный волновод; 11 – стеклянная пластина; 12 – коллектор

В этом случае использовался компанд-резонатор, состоящий из металлического резонатора 5, заполненного диэлектриком 4 на такой длине, чтобы на диэлектрической его части укладывалось целое число полуволн, возбуждаемых в диэлектрике, и целое число полуволн в пустой части. В таком компанд-резонаторе отсутствует отражение на границе диэлектрик-вакуум, а структура кильватерного поля в диэлектрической части такая же, как и в диэлектрическом резонаторе. При этом появляется возможность отклонять сгустки на стенки металлического волновода и получать отпечатки сгустков на стеклянной пластине 11.

Энергетические спектры электронных сгустков, прошедших через резонатор без диэлектрика и через резонатор с диэлектрической трубкой, определялись по отпечаткам на стеклянных пластинах 11 электронных сгустков, отклоненных постоянным поперечным магнитным полем 6. Сигнал возбужденного кильватерного поля регистрировался СВЧ-зондом 8.

## 2.2. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИЗМЕРЕНИЮ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ

На Рис. 5,а показаны отпечатки электронов пучка, развернутых постоянным магнитным полем, на стеклянных пластинах, когда частота следования сгустков равна собственной частоте диэлектрической структуры  $f_0 = f_m$  (1 – без диэлектрика и 2 – с диэлектриком в волноводе), а на Рис. 5,б – то же при введении расстройки  $\Delta f = f_m - f_0 = 2,5$  МГц.

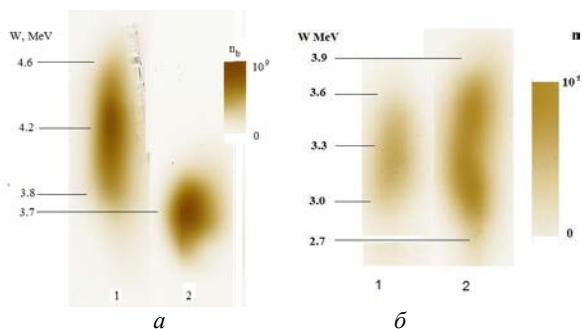


Рис. 5. Отпечатки электронов пучка, развернутого постоянным поперечным магнитным полем, на стеклянных пластинах: а –  $\Delta f = 0$ ; б –  $\Delta f = f_m - f_0 = 2,5$  МГц (1 – без диэлектрика, 2 – с диэлектриком)

Как видно из Рис. 5, так же как и для энергетических спектров, измеренных магнитным анализатором, из спектров, полученных в этих экспериментах, следует, что в случае резонанса ( $\Delta f = 0$ ) и наличии диэлектрика все сгустки теряют свою энергию на возбуждение кильватерного поля. Потери энергии составляют 300 кэВ. При наличии расстройки ( $\Delta f \neq 0$ ) в энергетических спектрах электронов наблюдаются как электроны, потерявшие энергию, так и электроны, ускоренные до энергии выше начальной.

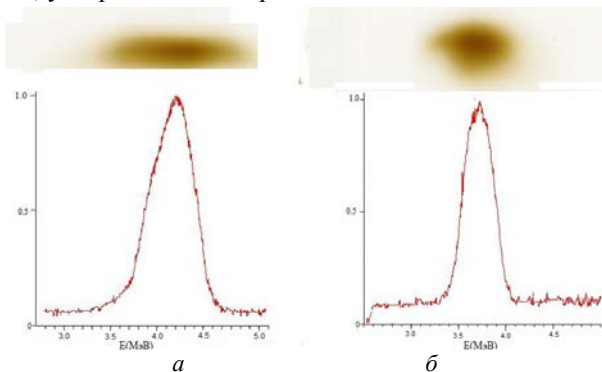


Рис. 6. Распределение плотности потемнения отпечатков пучка на стеклянной пластине для резонансного случая  $\Delta f = 0$ : а – без диэлектрика; б – с диэлектриком

С помощью компьютерной программы проделан анализ плотности потемнения на стеклянных пластинах вдоль отпечатка развернутого пучка. На Рис. 6 показано полученное распределение плотности

потемнения вдоль отпечатка в резонансном случае ( $\Delta f = 0$ ) для резонатора без диэлектрика (см. Рис. 6,а) и резонатора с диэлектрической трубкой (см. Рис. 6,б). В этом случае наблюдаются только электроны, потерявшие энергию на возбуждение кильватерной волны. Потери энергии составляют около 500 кэВ.

На Рис. 7 показано распределение плотности потемнения по сечению при наличии расстройки ( $\Delta f = f_m - f_0 = 2,5$  МГц) для резонатора без диэлектрика (Рис. 7,а) и резонатора с диэлектрической трубкой (Рис. 7,б).

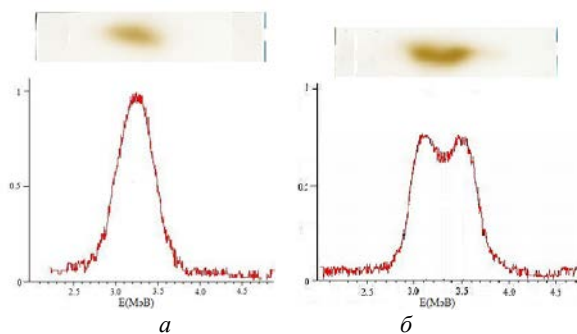


Рис. 7. Распределение плотности потемнения отпечатков пучка на стеклянной пластине в зависимости от энергии при наличии расстройки ( $\Delta f = f_m - f_0 = 2,5$  МГц). а – без диэлектрика; б – с диэлектриком

В этом случае наблюдаются электроны, потерявшие энергию на возбуждение кильватерной волны (-200 кэВ), а также электроны, ускоренные полем волны, возбужденным предыдущими сгустками (+200 кэВ). Асимметрия вызвана возможными большими потерями на стенках диэлектрической трубки замедленных электронов как более чувствительных к действию радиальной компоненты кильватерного поля.

## 3. ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТНОЙ РАССТРОЙКИ НА ВРЕМЕННУЮ ЭВОЛЮЦИЮ СИГНАЛОВ КИЛЬВАТЕРНОГО ПОЛЯ И ТОКА ПУЧКА

Осциллограммы сигналов кильватерного поля для случаев, когда  $\Delta f = 0$ ,  $\Delta f = 1$  МГц и  $\Delta f = 1,5$  МГц показаны на Рис. 8 (верхние). Для рассмотрения их временной эволюции на Рис. 8 (нижние) представлены осциллограммы тока пучка.

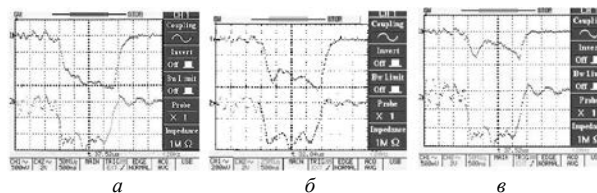


Рис. 8. Осциллограммы сигналов СВЧ-излучения: а –  $\Delta f = 0$ ; б –  $\Delta f = 1,0$  МГц; в –  $\Delta f = 1,5$  МГц

Из Рис. 8 видно, что в резонансном случае ( $\Delta f = 0$ ) амплитуда кильватерного поля быстро нарастает, а потом остается постоянной. В случае ненулевой расстройкой ( $\Delta f = 1,0$  МГц) на импульсе амплитуды кильватерного поля наблюдаются 3 осцилляции. Последние могут быть объяснены биением амплитуды кильватерного поля, вызванным периодическим чередующимся возбуждением кильватерного

поля при торможении части сгустков последовательности и поглощением кильватерного поля при ускорении следующей части последовательности сгустков. При этом продолжительность всей последовательности  $N$  в несколько раз превышает продолжительность каждой части  $N^*$  (для этого случая в 6 раз, т.е.  $N=6N^*$ ).

В случае большей расстройки  $\Delta f = 1,5$  МГц из-за уменьшения длительности возбуждающей части последовательности амплитуда кильватерного поля существенно меньше.

На Рис. 9 представлены экспериментально полученные количества сгустков, которые тормозятся, и сгустков, которые ускоряются, в соответствии с величиной расстройки. Верхняя расчетная кривая получена из (1). Расчет и измеренная зависимость находятся в удовлетворительном согласии.

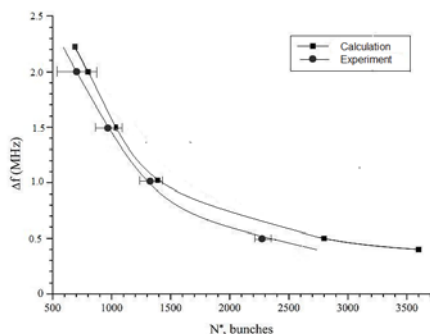


Рис. 9. Соответствие между числом сгустков, возбуждающих кильватерное поле и величиной расстройки  $\Delta f = f_m - f_0$

## ВЫВОДЫ

Показано, что в резонансном случае, т.е. при совпадении частоты следования сгустков с частотой основной моды кильватерного поля, энергетический спектр взаимодействовавших сгустков смещается на 400 кэВ как целое в область меньших энергий, что обусловлено потерей энергии на возбуждение кильватерного поля всеми сгустками.

При введении расстройки между частотой следования сгустков и частой основной возбуждаемой моды кильватерного поля наблюдается ускорение (+150 кэВ) кильватерными полями части сгустков из последовательности. Изменением величины расстройки можно регулировать число сгустков последовательности, которые возбуждают кильватерную волну, и число последующих сгустков, которые попадают в ускоряющую фазу кильватерного поля и получают дополнительную энергию. При увеличении расстройки возникают условия, когда появляется биение кильватерного поля с несколькими частями последовательности заторможенных и ускоренных сгустков.

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

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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 // *Proc. IPAC2013*. 2013, p. 1259.
2. В.А. Вишняков, В.В. Закутин, В.А. Кушнир и др. Экспериментальное исследование доускорения пучка линейного резонансного ускорителя в системе пассивных резонаторов // *Труды 10-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц*. Дубна, 1987, т. 1, с. 257-259.
3. E. Kallos. Plasma wakefield accelerators using multiple electron bunches // *Thesis to the University of Southern California*. 2008, p. 101, 112-113.
4. В.А. Киселев, А.Ф. Линник, В.И. Мирный, И.Н. Онищенко, Г.В. Сотников, В.В. Усков. Об ускорении электронов при возбуждении кильватерных полей в диэлектрических структурах последовательностью релятивистских электронных сгустков // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения»*. 2008, № 4, с. 70-72.

Статья поступила в редакцию 26.10.2015

## ELECTRON BUNCHES ACCELERATION AT DETUNING BUNCH REPETITION FREQUENCY AND FREQUENCY OF WAKEFIELD EXCITED IN A DIELECTRIC STRUCTURE

G.P. Berezina, A.M. Yegorov, G.A. Krivonosov, A.F. Linnik, O.L. Omelaenko, I.N. Onishchenko, V.I. Pristupa, V.S. Us

Using a sequence of bunches of linear electron accelerator "Almaz-2M" (4.5 MeV, 1 A, 2  $\mu$ s) it was carried out the wakefield excitation in the dielectric structure of the first part of the sequence and the acceleration in these fields the second part of the sequence of bunches shifted in the accelerating phases at detuning bunch repetition frequency with the excited wakefield frequency. By changing the detuning value it was shown the ability to govern the number of bunches, exciting wakefield in the structure, and the number of subsequent accelerated bunches.

## ПРИСКОРЕННЯ ЕЛЕКТРОННИХ ЗГУСТКІВ ПРИ ВВЕДЕННІ РОЗСТРОЙКИ МІЖ ЧАСТОТОЮ РУХУ ЗГУСТКІВ І ЧАСТОТОЮ ЗБУДЖУВАННЯ НИМИ В ДІЕЛЕКТРИЧНІЙ СТРУКТУРІ КІЛЬВАТЕРНОГО ПОЛЯ

Г.П. Березіна, О.М. Єгоров, Г.А. Кривонов, А.Ф. Лінник, О.Л. Омелаєнко, І.М. Оніщенко, В.І. Приступа, В.С. Ус

З використанням послідовності згустків лінійного електронного прискорювача «Алмаз-2М» (4,5 МеВ, 1 А, 2 мкс) проведено збудження кильватерних полів у діелектричній структурі першою частиною послідовності і прискорення в цих полях другої частини послідовності згустків, зсунутих у прискорюючі фази при введенні розстройки частоти слідування згустків відносно частоти збуджуваного поля. Зміною величини розстройки показана можливість регулювання числа згустків, що збуджують кильватерне поле в структурі, і числа наступних прискорених згустків.