

# ИССЛЕДОВАНИЕ МУЛЬТИБАНЧЕВОЙ СХЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ КИЛЬВАТЕРНЫХ ПОЛЕЙ

*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: v\_us@kipt.kharkov.ua*

Экспериментально с помощью осциллографа Tektronix TDS 6154C (полоса пропускания 15 ГГц) измерена зависимость суммарного кильватерного поля от числа сгустков. Представлены результаты экспериментальных исследований многобанчевой концепции кильватерного ускорителя, т.е. увеличение амплитуды кильватерного поля за счет когерентного сложения кильватерных полей отдельных сгустков последовательности, что позволяет использовать для возбуждения ускоряющего кильватерного поля вместо одного драйверного сгустка с большим зарядом последовательность сгустков с умеренным зарядом.

## ВВЕДЕНИЕ

В работе представлены экспериментальные исследования многобанчевой концепции, т.е. увеличение амплитуды кильватерного поля за счет когерентного сложения кильватерных полей отдельных сгустков последовательности, что позволяет использовать для возбуждения ускоряющего кильватерного поля вместо одного драйверного сгустка с большим зарядом последовательность сгустков с умеренным зарядом. Экспериментально с помощью осциллографа Tektronix TDS 6154C с полосой пропускания 15 ГГц измерялась зависимость суммарного кильватерного поля от числа сгустков в последовательности. Как было показано ранее [1], при инжекции последовательности сгустков в диэлектрический волновод конечной длины  $L$ , из-за выноса возбужденных полей с выходного конца волновода с групповой скоростью  $v_g$ , в увеличении суммарного кильватерного поля участвуют не все сгустки последовательности. Максимальное число сгустков, суммирование кильватерных полей которых приводит к увеличению амплитуды кильватерного поля, определяется выражением:

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

где  $\lambda$  – длина волны основной возбуждаемой моды,  $v_0$  – скорость электронов пучка. Инжекция последующих сгустков не приводит к росту суммарного кильватерного поля. Увеличивая длину диэлектрического волновода, можно изменять число сгустков  $N_{\max}$ , приводящих к увеличению суммарного кильватерного поля на выходе волновода. В частности, для волновода длиной меньше длины возбуждаемой кильватерной волны реализуется односгусточный режим, т.е. поля сгустков не перекрываются, так что огибающая полей всей последовательности имеет амплитуду кильватерного поля, возбуждаемого одним сгустком. Поэтому зависимость амплитуды суммарного кильватерного поля от числа инжектированных сгустков нами исследуется через зависимость от длины диэлектрического волновода.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Эксперименты по возбуждению кильватерных волн в диэлектрических структурах были выполнены на линейном резонансном электронном ускорителе “Алмаз-2М”, обеспечивающем пучок релятивистских электронов, энергию которых можно изменять в пределах 2,5...4,8 МэВ, ток в импульсе – 0,5...1 А при длительности импульса до 2 мкс. Каждый импульс представляет собой последовательность  $N = 6000$  электронных сгустков с длительностью каждого 60 пс и интервалом между ними 300 пс (при частоте следования сгустков 2805 МГц), с зарядом сгустка от 0,16 до 0,32 нКл. Частоту следования сгустков можно изменять в пределах 2803...2807 МГц. Ширина энергетического спектра – до 9%. К ускорителю “Алмаз-2М” присоединена камера, в которой может размещаться диэлектрическая структура. В результате создана экспериментальная установка для исследования возбуждения кильватерных полей последовательностью сгустков релятивистских электронов в диэлектрических структурах круглого или прямоугольного поперечного сечения и ускорения электронов возбуждаемыми кильватерными полями. Схема экспериментальной установки представлена на Рис. 1.

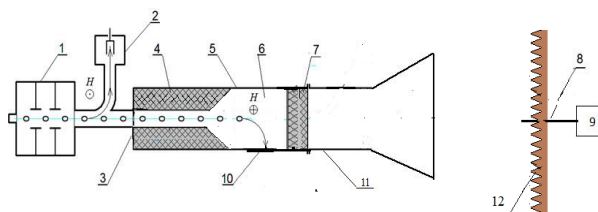


Рис. 1. Схема установки:

- 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 Tektronix TDS 6154C;
- 10 – стеклянная пластина;
- 11 – дополнительный волновод с раструбом;
- 12 – ферритовый поглотитель высокочастотного излучения

Диэлектрическая структура представляла собой медный цилиндрический волновод 5 с внутренним диаметром 85 мм, заполненный диэлектрическими вставками 4 из фторопласта ( $\epsilon = 2,04$ ,  $\text{tg}\delta = 4 \cdot 10^{-4}$ ), внешний диаметр которых равен внутреннему диаметру медного волновода, с каналом диаметром 2,1 см для прохождения электронных сгустков. Длину заполненной диэлектриком части можно изменять от  $L = 0,25\lambda$  до  $L = 3\lambda$  ( $\lambda$  – длина волны основной моды 10,63 см), используя набор втулок, представленных на Рис. 2.



Рис. 2. Элементы волноводно-диэлектрической структуры: диэлектрические втулки длиной  $L = 0,25\lambda$ ,  $0,5\lambda$ ,  $1,0\lambda$  и дополнительный волновод с раструбом

В экспериментах использовался осциллограф GDS-840C с полосой пропускания 250 МГц, который позволял регистрировать огибающие амплитуды импульсов тока пучка и амплитуды возбуждаемого кильватерного поля.

Для получения реализации возбуждаемых колебаний и исследования их спектрального состава использовался высокочастотный осциллограф Tektronix TDS 6154C с полосой пропускания 15 ГГц (Рис. 3).



Рис. 3. Общий вид высокочастотного осциллографа Tektronix TDS 6154C с полосой пропускания 15 ГГц

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На Рис. 4 показаны огибающие сигналов при развёртке 1 мкс/дел., полученные с помощью осциллографа GDS-840C.

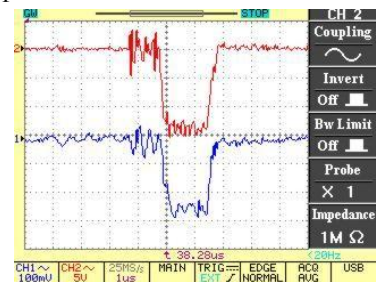


Рис. 4. Осциллограммы огибающих амплитуды импульсов тока пучка и амплитуды возбуждаемого кильватерного поля

Верхняя – амплитуда возбуждаемого кильватерного поля; нижняя – амплитуда тока электронного пучка.

Сигнал излучения принимался СВЧ-зондом 8, расположенным перед ферритовым поглотителем 12 на Рис. 1 и поступал на осциллограф Tektronix TDS 6154C. На Рис. 5 показана реализация макроимпульса СВЧ-излучения длительностью 1,5 мкс при длине диэлектрической вставки  $L = 0,5\lambda$ .

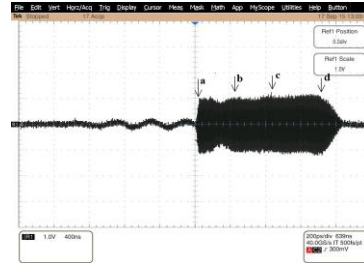


Рис. 5. Осциллограмма макроимпульса СВЧ-излучения (развёртка 400 нс/дел.)

Структура заполнения огибающей кильватерного поля была исследована с помощью осциллографа Tektronix TDS 6154C с быстрой развёрткой 200 пс/дел.

На Рис. 6,а-г показаны реализации колебаний кильватерного поля в различные моменты времени относительно начала макроимпульса, указанные стрелками на Рис. 5.

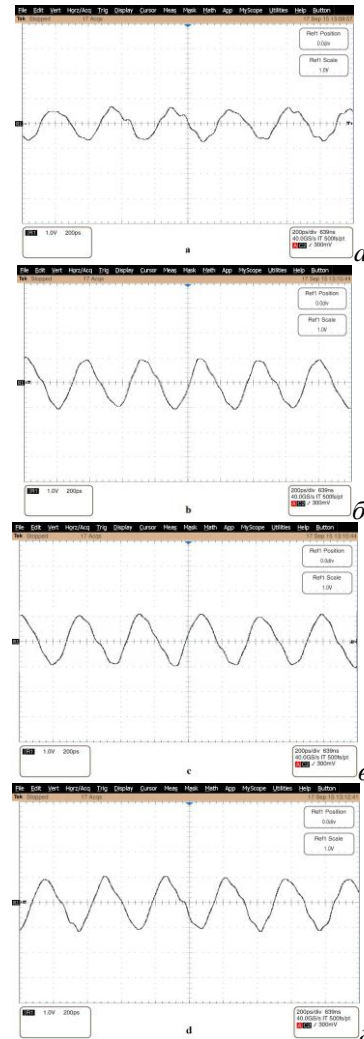


Рис. 6. Реализации колебаний кильватерного поля в различные моменты времени: а – 80 нс; б – 0,5 мкс; в – 1,0 мкс; г – 1,5 мкс

Видно, что в начале макроимпульса колебания имеют сложную форму за счет сложения переходного и черенковского излучений. Затем происходит рост амплитуды черенковского излучения и её стабилизация, что соответствует однобанчевому режиму. При этом вклад переходного излучения уменьшается.

На Рис. 7,а,б,в приведены реализации кильватерного поля, возбуждаемого последовательностью электронных сгустков в диэлектрическом волноводе длиной  $L = \lambda, 2\lambda, 3\lambda$ . Осциллограммы сняты в момент времени, отстоящий от начала макроимпульса на 1 мкс.

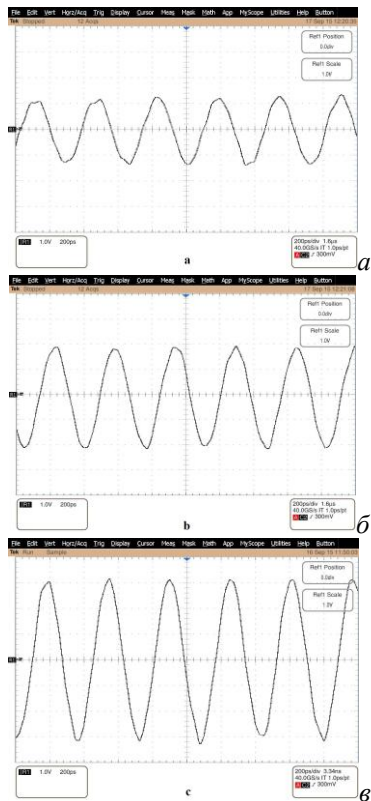


Рис. 7. Реализации кильватерного поля, возбуждаемого последовательностью электронных сгустков в диэлектрическом волноводе длиной:  
а –  $L = \lambda$ ; б –  $L = 2\lambda$ ; в –  $L = 3\lambda$

Из Рис. 7 видно, что измеренные в эксперименте амплитуды кильватерного поля растут линейно пропорционально длине диэлектрической структуры, т. е. числу сгустков. Эти результаты находятся в соответствии с теорией и являются экспериментальным доказательством когерентного сложения кильватерных полей, возбуждаемых отдельными периодически следующими сгустками.

## ВЫВОДЫ

Проведены эксперименты по возбуждению кильватерных полей в диэлектрических структурах последовательностью электронных сгустков. С помощью высокочастотного осциллографа Tektronix TDS 6154C получены реализации возбуждаемого кильватерного поля.

Показано, что при длине структуры  $L = 0,5\lambda$  реализуется однобанчевый режим возбуждения кильватерного поля, то есть амплитуда поля не зависит от числа сгустков и равна амплитуде поля, возбуждаемого одним сгустком.

При увеличении длины диэлектрической структуры  $L = \lambda, 2\lambda, 3\lambda$  амплитуда возбуждённого кильватерного поля растёт пропорционально длине структуры, что свидетельствует о когерентном сложении полей от одного, двух и трёх сгустков.

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

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.А. Киселёв, 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»* (6). 2008, № 4, р. 70-72.

Статья поступила в редакцию 11.03.2016

## INVESTIGATION OF A MULTIBUNCH SCHEME OF THE WAKEFIELD EXCITATION

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

By oscilloscope Tektronix TDS 6154C (bandwidth 15 GHz) experimentally measured dependence amplitude of the wakefield as a function of the number of bunches. Results of experimental researches multibunch concept of the wakefield accelerator are presented, i.e. amplitude magnification of wakefields at the expense of coherent addition wakefields of separate bunches of sequence that allows to use for excitation accelerating wakefields instead of one driver bunch with a big charge sequence of bunches with a moderate charge.

## ДОСЛІДЖЕННЯ МУЛЬТИБАНЧЕВОЇ СХЕМИ ЗБУДЖЕННЯ КІЛЬВАТЕРНИХ ПОЛІВ

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

Експериментально за допомогою осцилографа Tektronix TDS 6154C (смуга пропускання 15 ГГц) отримана залежність сумарного кильватерного поля від числа згустків. Представлені результати експериментальних досліджень мультібанчевої концепції кильватерного прискорювача, тобто збільшення амплітуди кильватерного поля за рахунок когерентного додавання кильватерних полів окремих згустків послідовності, що дозволяє використовувати для збудження прискорюючого кильватерного поля замість одного драйверного згустка з великим зарядом послідовність згустків з помірним зарядом.