

НЕЛИНЕЙНЫЙ АНАЛИЗ УСКОРЕНИЯ ТЕСТОВЫХ СГУСТКОВ КИЛЬВАТЕРНЫМ ПОЛЕМ, ВОЗБУЖДАЕМЫМ ЭЛЕКТРОННЫМИ СГУСТКАМИ В ПЯТИЗОННОМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ РЕЗОНАТОРЕ

К.В. Галайдыч, Г.В. Сотников

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

E-mail: sotnikov@kipt.kharkov.ua

Проведен численный нелинейный анализ ускорения тестового электронного сгустка кильватерным полем, возбуждаемым ведущим электронным сгустком в пятизонном диэлектрическом резонаторе. Численное моделирование проведено на основе системы нелинейных уравнений, описывающих самосогласованное взаимодействие инжектируемых в резонатор сгустков заряженных частиц и возбуждаемого ими электромагнитного поля. Исследована поперечная динамика ведущего и ускоряемого сгустков.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одним из активно исследуемых методов ускорения заряженных частиц является метод ускорения кильватерными полями, возбуждаемыми в диэлектрических структурах.

Данный метод принадлежит к так называемым двухпучковым методам ускорения, в которых короткий релятивистский сгусток (или их регулярная последовательность) с большим зарядом (используемые ведущие сгустки – несколько десятков нанокколонов) возбуждает в волноводной структуре интенсивное кильватерное поле, в котором ускоряется инжектируемый тестовый сгусток с малым зарядом (используемые ускоряемые сгустки – несколько нанокколонов или меньше).

Такой принцип ускорения заряженных частиц экспериментально был продемонстрирован в Аргоннской национальной лаборатории [1].

Традиционно исследуемые ускорительные структуры имеют, как правило, либо цилиндрическую, либо прямоугольную геометрию. Несмотря на некоторые трудности при изготовлении цилиндрических структур и предъявляемые высокие требования к допускам на их параметры, именно им посвящено основное число теоретических исследований. В последнее время все больше внимания уделяется исследованиям структур, имеющих прямоугольную конфигурацию в поперечном сечении. Такие структуры обладают рядом технологических преимуществ по сравнению с цилиндрическими как по изготовлению, так и по их настройке. Различают структуры с одним или несколькими каналами для транспортировки ведущих и тестовых сгустков. Двухканальная диэлектрическая структура была предложена в работе [2]. Предложенная структура – прямоугольный волновод с тремя диэлектрическими пластинами и двумя вакуумными каналами. В работе [3] был проведен подробный модовый анализ данной структуры. В [4] сформулированная в общем виде нелинейная самосогласованная теория возбуждения кильватерных полей в многослойном диэлектрическом резонаторе, позволяет исследовать динамику заряженных сгустков в прямоугольном резонаторе при произвольном количестве диэлектрических слоев.

Современное состояние и последние результаты исследований пятизонной двухканальной диэлектрической ускорительной структуры представлены в работе [5].

В проведенных ранее теоретических исследованиях было рассмотрено только возбуждение кильватерного поля ведущими сгустками. В данной работе на основе численного моделирования сделана попытка анализа непосредственно процесса ускорения тестового электронного сгустка в интенсивном кильватерном поле, возбуждаемом в пятизонном диэлектрическом резонаторе.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим прямоугольный резонатор размерами $a \times b \times L$ (ширина \times высота \times длина), внутри которого расположены диэлектрические пластины с диэлектрической проницаемостью ϵ таким образом, что имеются два вакуумных канала для транспортировки заряженных частиц. Боковые стенки резонатора прозрачны для заряженных частиц и непрозрачны для электромагнитного поля. Через эти боковые стенки в один из вакуумных каналов резонатора инжектируется ведущий сгусток, а через некоторое время в другой вакуумный канал инжектируется уже ускоряемый сгусток. На Рис.1 представлен эскиз исследуемого резонатора.

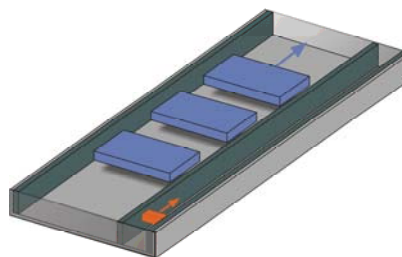


Рис.1. Схематический вид пятизонного двухканального диэлектрического резонатора

Там же схематически показано расположение и направление движения вдоль вакуумных каналов ведущих сгустков (обозначены синим цветом) и тестового сгустка (обозначен красным цветом).

Заряженные сгустки будем моделировать макрочастицами, а их динамику будем описывать в переменных Лагранжа.

Плотности заряда и тока представим в виде:

$$\begin{aligned} \rho &= \sum_{p \in V_R} q_p \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_p(t, t_0)), \\ \mathbf{j} &= \sum_{p \in V_R} q_p \mathbf{v}_p \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_p(t, t_0)), \end{aligned} \quad (1)$$

где q_p – заряд макрочастицы; t_0 – время влета в резонатор; \mathbf{r}_p и \mathbf{v}_p – ее координата и скорость, зависящие от времени t . Суммирование в (1) ведется по всем частицам, находящимся в объеме резонатора V_R .

Возбуждаемое сгустками частиц с плотностями заряда и тока, которые определены как (1), поле будем представлять в виде суммы потенциального и вихревого полей [6]:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}^t + \mathbf{E}^l, \quad (2)$$

где потенциальное электрическое поле удовлетворяет уравнению Пуассона

$$\nabla \cdot (\varepsilon \mathbf{E}^t) = 4\pi\rho, \quad (3)$$

а вихревые поля удовлетворяют первому и второму уравнениям Максвелла:

$$\nabla \times \mathbf{H}^t = \frac{\varepsilon}{c} \frac{\partial \mathbf{E}^t}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}, \quad (4)$$

$$\nabla \times \mathbf{E}^t = -\frac{\mu}{c} \frac{\partial \mathbf{H}^t}{\partial t}.$$

Аналитические выражения для компонент вихревого поля можно искать в виде разложения в ряд по собственным вихревым полям пустого многозонального резонатора. Т.е., представить \mathbf{E}^t и \mathbf{H}^t в виде

$$\mathbf{E}^t = \sum_s A_s(t) \mathbf{E}_s(\mathbf{r}), \quad \mathbf{H}^t = -i \sum_s B_s(t) \mathbf{H}_s(\mathbf{r}), \quad (5)$$

где функции $\mathbf{E}_s(\mathbf{r})$ и $\mathbf{H}_s(\mathbf{r})$ удовлетворяют уравнениям Максвелла без источников:

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{H}_s &= -i(\omega_s / c) \varepsilon \mathbf{E}_s, \\ \nabla \times \mathbf{E}_s &= i(\omega_s / c) \mu \mathbf{H}_s. \end{aligned} \quad (6)$$

Используя развитую в [6] методику, можно получить аналитические выражения для коэффициентов разложения $A_s(t)$ и $B_s(t)$. Они имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} A_s(t) &= -\int_0^t dt' \cos \omega_s(t-t') R_s(t'), \\ B_s(t) &= -\int_0^t dt' \sin \omega_s(t-t') R_s(t'), \\ R_s(t) &= \frac{1}{N_s} \sum_{p \in V_R} q_p \mathbf{v}_p(t) \mathbf{E}_s^*(\mathbf{r} = \mathbf{r}_p). \end{aligned} \quad (7)$$

Выражения для компонент вихревого и потенциального полей, дисперсионные уравнения для определения собственных частот ω_s , а также выражения для норм собственных колебаний N_s представлены в работах [4,7].

Динамика частиц сгустков описывается уравнениями движения:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{r}_p(t, t_0)}{dt} &= \frac{\mathbf{p}_p}{m_p \gamma_p}, \\ \frac{d\mathbf{p}_p(t, t_0)}{dt} &= q_p (\mathbf{E} + \frac{1}{m_p c \gamma_p} \mathbf{p}_p \times \mathbf{H}), \end{aligned} \quad (8)$$

где $\gamma_p^2 = 1 + (\mathbf{p}_p / m_p c)^2$.

Уравнения для амплитуд полей совместно с уравнениями движения частиц описывают самосогласованное взаимодействие инжектируемых в резонатор заряженных сгустков с электромагнитным полем, возбуждаемым этими же сгустками. В данной работе анализ такого взаимодействия был выполнен численно с использованием метода Рунге-Кутты четвертого порядка.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Целью численных расчетов был анализ ускорения тестового сгустка в кильватерном поле, возбуждаемом драйверным сгустком.

Для численных расчетов были выбраны следующие параметры: ширина резонатора $a = 18,576$ мм, высота $b = 6$ мм, длина $L = 99,878$ мм, толщины диэлектрических пластин составляли 1,23; 2,28 и 1,05 мм, ширины вакуумных каналов – 2 и 12 мм, диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 4,76$, размеры ведущего сгустка – $6 \times 2 \times 4$ мм (ширина \times высота \times длина сгустка), размеры ускоряемого сгустка – $0,9 \times 0,9 \times 4$ мм, заряд ведущего сгустка составлял 50 нКл, заряд тестового сгустка – 1 нКл, начальная энергия электронов обоих сгустков 14 МэВ.

Приведем результаты численных расчетов. На Рис.2 для момента времени $t = 0,233$ нс приведено аксиальное распределение вдоль осей вакуумных каналов продольной компоненты силы, действующей соответственно на драйверный сгусток (см. Рис.2,а) и ускоряемый (см. Рис.2,б).

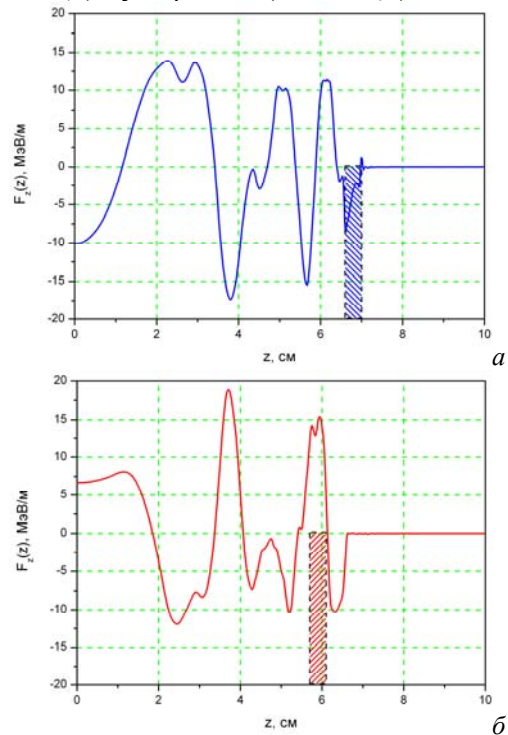


Рис.2. Аксиальное распределение продольной составляющей силы: а – вакуумный канал для ведущих сгустков; б – вакуумный канал для тестового сгустка ($t = 0,233$ нс)

На Рис.2 прямоугольниками условно изображены ведущий и тестовый сгустки. Сгустки двигаются слева направо. Интервал времени между инъекцией

обоих сгустков определяется из требования наибольшего времени нахождения тестового сгустка в ускоряющей фазе кильватерного поля на протяжении его прохождения через резонатор.

На Рис.3 для последовательных моментов времени изображена энергия драйверного и ускоряемого сгустков в зависимости от их продольной координаты.

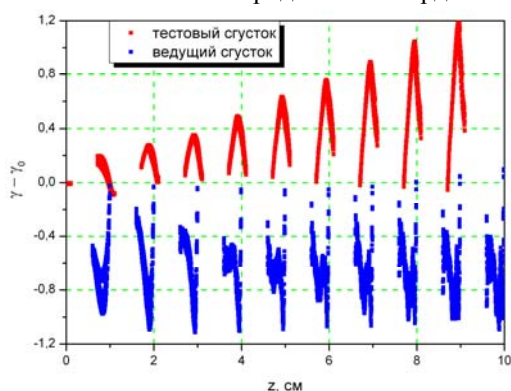


Рис.3. Динамика изменения энергии одиночных ведущего и тестового сгустков за интервал времени от входа ведущего сгустка в резонатор до достижения им выходного торца

Кроме изменения энергии сгустками при прохождении вдоль каналов транспортировки также важным вопросом является вопрос о поперечной устойчивости заряженных сгустков. На Рис.4 изображена продольная и поперечная динамика возбуждающего и ускоряемого сгустков для последовательных моментов времени. Плоскость инжекции сгустков соответствует значению продольной координаты $z = 0$. Тестовый сгусток инжектировался в резонатор спустя 0,03 нс после начала инжекции драйверного.

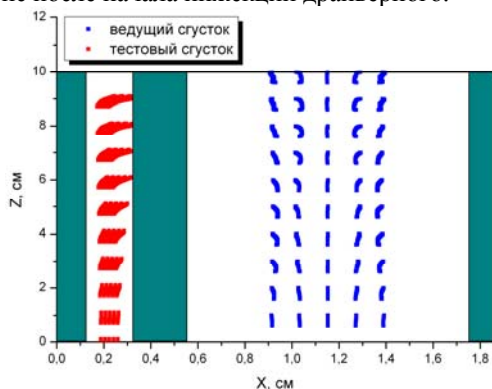


Рис.4. Продольная и поперечная динамика одиночных ведущего и тестового сгустков за интервал времени от входа ведущего сгустка в резонатор до достижения им выходного торца

Видно, что поперечное смещение частиц драйверного сгустка является незначительным. В то время как ускоряемый сгусток при своем движении вдоль канала транспортировки смещается как целое и его частицы начинают попадать на диэлектрическую пластину.

До сих пор мы рассматривали ускорение тестового сгустка в кильватерном поле, возбуждаемом одиночным драйверным сгустком. Наряду с этим, эффективным является использование для возбуждения резонатора регулярной последовательности заряженных сгустков. Одним из достоинств исполь-

зования последовательности сгустков является возможность выделения необходимой рабочей моды. В работе [3] исследовался прямоугольный волновод с тремя диэлектрическими пластинами и двумя вакуумными каналами. Было показано наличие собственной моды колебаний с симметричным поперечным распределением аксиальной составляющей электрического поля в вакуумных каналах. В работе [4] было отмечено, что оптимизацией геометрических параметров резонатора удается добиться выделения такой рабочей моды. Численные расчеты показали, что этого можно добиться при оптимальном выборе высоты резонатора. Изменяя высоту резонатора можно управлять амплитудами составляющих полного поля и, в частности, уровнем возбуждения паразитных гармоник.

При изменении высоты резонатора мы удерживали неизменной частоту резонансной со сгустком моды и симметричное распределение ее продольного поля в обоих вакуумных каналах. Это достигалось путем подстройки ширины диэлектрических пластин при сохранении ширины драйверного и ускорительного каналов.

На Рис.5 изображено движение тестового сгустка, инжектированного спустя 3,67 нс после начала инжекции последовательности из 100 драйверных сгустков с частотой следования, равной частоте рабочей моды колебаний и составлявшей 30 ГГц, в резонатор шириной $a = 17,668$ мм, высотой $b = 12$ мм и длиной $L = 99,87$ мм. Толщины диэлектрических пластин составляли 1,12; 1,83 и 0,72 мм соответственно. Все ведущие сгустки к этому моменту времени покинули резонатор.

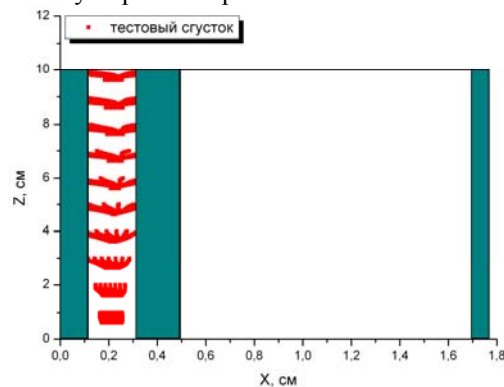


Рис.5. Положения частиц тестового сгустка в последовательные моменты времени от входа сгустка в резонатор до достижения им выходного торца в кильватерном поле, возбужденном последовательностью из 100 ведущих сгустков

Последовательность возбуждающих сгустков выделяет резонансную рабочую моду и подавляет моды, дающие вклад в силу, отклоняющую сгусток, как целое, к пластине. Как следствие, поперечная динамика тестового сгустка становится более симметричной относительно оси ускорительного канала и потери частиц на диэлектрические пластины значительно уменьшаются. При инжекции в резонатор регулярной последовательности сгустков возможно добиться когерентного сложения полей [8] от всех сгустков последовательности и ускорять тестовый сгусток в кильватерном поле большей амплитуды.

На Рис.6 продемонстрирована динамика прироста энергии ускоряемого сгустка.

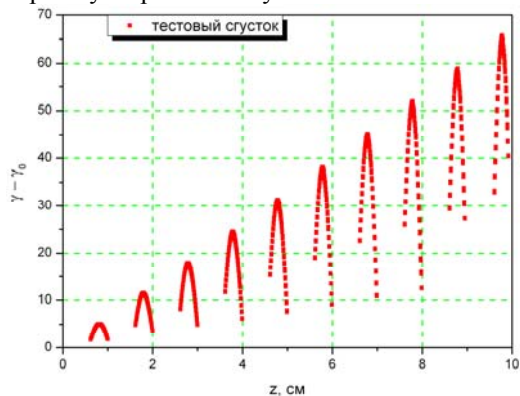


Рис.6. Динамика изменения энергии тестового сгустка в кильватерном поле, возбужденном последовательностью из 100 ведущих сгустков, за интервал времени от входа сгустка в резонатор до достижения им выходного торца

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты нелинейного численного анализа процесса ускорения тестового сгустка в кильватерном поле, возбуждаемом как одиночным ведущим сгустком, так и регулярной последовательностью сгустков в пятизонном диэлектрическом резонаторе.

Проанализирована поперечная динамика ведущих и ускоряемого сгустков. Показано, что поперечное смещение частиц ведущих сгустков является незначительным и приводит к слабому изменению формы сгустка. В то время, как в процессе ускорения тестового сгустка возможность его транспортировки через вакуумный канал без потери тока усложняется.

Для уменьшения поперечного смещения тестового сгустка предложено возбуждать резонатор регулярной последовательностью драйверных сгустков. Выполненный теоретический анализ движения тестового сгустка в кильватерном поле последовательности сгустков подтвердил существенное уменьшение поперечной отклоняющей силы.

NONLINEAR ANALYSIS OF THE TEST BUNCHES ACCELERATION IN THE WAKEFIELD, EXCITED BY ELECTRON BUNCHES IN THE FIVE-ZONE DIELECTRIC RESONATOR

K.V. Galaydych, G.V. Sotnikov

A numerical nonlinear analysis of the acceleration of a test electron bunch in the wakefield, excited by the drive electron bunch in a five-zone dielectric resonator is carried out. Numerical simulation was investigated on the basis of a system of nonlinear equations describing the self-consistent interaction of the charged particles bunches, injected into the resonator, and electromagnetic fields excited by them. The transverse dynamics of drive and witness bunches is studied.

НЕЛІНІЙНИЙ АНАЛІЗ ПРИСКОРЕННЯ ТЕСТОВИХ ЗГУСТКІВ КІЛЬВАТЕРНИМ ПОЛЕМ, ЩО ЗБУДЖУЄТЬСЯ ЕЛЕКТРОННИМИ ЗГУСТКАМИ У П'ЯТИЗОННОМУ ДІЕЛЕКТРИЧНОМУ РЕЗОНАТОРІ

К.В. Галайдич, Г.В. Сотніков

Проведено чисельний нелінійний аналіз прискорення тестового електронного згустка кильватерним полем, що збуджується драйверним електронним згустком у п'ятизонному діелектричному резонаторі. Чисельне моделювання проведено на основі системи нелінійних рівнянь, що описують самоузгоджену взаємодію згустків заряджених часток, що інжектуються в резонатор, та електромагнітного поля, що збуджують ці згустки. Досліджено поперечну динаміку драйверного згустка та згустка, що прискорюється.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. W. Gai, M.E. Conde, R. Konecny, et al. Experimental demonstration of dielectric structure based two beam acceleration // *Advanced Accelerator Concepts. AIP Conf. Proc.* 2000, v.569, p.287-293.
2. C.Wang, V.P. Yakovlev, J.L. Hirshfield. Rectangular dielectric-lined two-beam wakefield accelerator structure // *Proc. PAC 2005, IEEE*, p.1333-1335.
3. G.V. Sotnikov, I.N. Onishchenko, J.L. Hirshfield, T.C. Marshall. A five-zone two-channel dielectric wakefield structure for two beam acceleration experiments at argonne national laboratory // *Problems of Atomic Science and Technology. Series «Nuclear Physics Investigations»*. 2007, №3(49), p.148-152.
4. K.V. Galaydych, G.V. Sotnikov. Nonlinear theory of wakefields excitation in a rectangular multizone dielectric resonator // *Phys. Rev. ST Accel. Beams*. 2011, v.14, №1, 011302(8).
5. S.V. Shchelkunov, J.L. Hirshfield, M.A. LaPointe, et al. Status of dielectric – lined two – channel rectangular high transformer ratio accelerator structure experiment// <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/PAC2011/papers/mop107.pdf>
6. Л.А. Вайнштейн. *Электромагнитные волны*. 2-е изд. М.: «Радио и связь». 1988, 440с.
7. C. Wang, J.L. Hirshfield. Theory of wakefields in multizone dielectric lined waveguide // *Phys. Rev. ST Accel. Beams*. 2006, v.9, №3, 031301(18).
8. Н.И. Онищенко, Г.В. Сотников. Теоретические исследования резонаторной концепции ускорителя на кильватерных полях в диэлектрике // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения»* (5). 2006, №5, с.203-207.

Статья поступила в редакцию 25.11.2011 г.