

ФОКУСИРОВКА РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ СГУСТКОВ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ КИЛЬВАТЕРНОГО ПОЛЯ В ПЛАЗМЕ

В.А. Киселёв, А.Ф. Линник, И.Н. Онищенко, В.И. Приступа

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

E-mail: onish@kipt.kharkov.ua

Экспериментально исследована фокусировка релятивистских электронных сгустков кильватерными полями, возбуждаемыми ими в плазме. Для размещения сгустков в различных фазах кильватерного поля использована расстройка между частотой следования сгустков и частотой возбуждаемого поля. Для усиления роли радиальной компоненты кильватерного поля сгусткам, получаемым на линейном электронном ускорителе, путем диафрагмирования придавалась удлиненная форма – длина сгустка существенно превосходила его диаметр. Увеличение амплитуды кильватерного поля достигалось использованием плазменного резонатора.

1. ВВЕДЕНИЕ

Ускорение заряженных частиц продольной составляющей кильватерного поля, возбуждаемого в плазме релятивистским электронным сгустком или их последовательностью, является одним из новых методов ускорения электронов с темпом ускорения, на несколько порядков превышающим применяемые в традиционных ускорителях [1-6]. Другой важный аспект, возникающий при движении сгустков в плазме, связан с возможностью фокусировки сгустков поперечной компонентой кильватерного поля, фокусировка которыми на три-четыре порядка превышает фокусирующие градиенты традиционных магнитных систем [7]. Фокусировка такого рода особенно привлекательна для пучков будущих коллайдеров, в которых высокая светимость ускоренных пучков требует чрезвычайно малых их поперечных размеров в месте встречи.

В плазменных линзах, используемых в существующих коллайдерах, фокусировка пучка релятивистских электронов обусловлена тем, что благодаря компенсации объемного заряда пучка при его прохождении через плазму расталкивающее радиальное электрическое поле сгустка уменьшается, так что преобладающей становится фокусировка пучка собственным азимутальным магнитным полем.

При прохождении плазмы короткого электронного сгустка возбуждаемое в плазме кильватерное поле также может фокусировать сгусток радиальной компонентой электрического поля кильватерной волны при соответствующей фазе сгустка в кильватерной волне [7,8]. Эффект такой фокусировки кильватерным полем был продемонстрирован нами в эксперименте с игольчатыми электронными сгустками [9]. Такая геометрия сгустков (длина сгустка, оставаясь меньше длины возбуждаемой волны, значительно превышает его диаметр) обеспечивает превалирование радиальной компоненты кильватерного поля по сравнению с продольной [10,11], что является важным для осуществления фокусировки сгустка.

В настоящей работе для исследования фокусирующего действия кильватерного поля в плазме использовалась последовательность электронных сгустков, частота следования которых не совпадает с

частотой возбуждаемого кильватерного поля. Варьируя расстройку частот путем изменения плотности плазмы, можно создать условия, когда часть последовательности электронных сгустков может смешаться в фокусирующие и дефокусирующие фазы кильватерного поля. Это позволяет наряду с биениями амплитуды кильватерного поля наблюдать на радиальных портретах сгустков две группы электронов – фокусируемых и дефокусируемых. Аналогичный подход для получения ускоряемых сгустков (витнесов) нами применялся в экспериментах по ускорению диэлектрическими кильватерными полями [12], где однако расстройка обеспечивалась изменением частоты следования сгустков.

Для усиления фокусирующего эффекта кильватерного поля путем увеличения отношения его радиальной компоненты к продольной было проведено диафрагмирование сгустков, так что последовательность электронных сгустков в виде коротких цилиндров (длина 1.7 см, диаметр 1.0 см), использованная ранее в наших экспериментах по когерентному возбуждению кильватерного поля в плазменном резонаторе длиной последовательностью сгустков [13], становилась последовательностью игольчатых сгустков (длина 1.7 см, диаметр 4 мм).

Фокусировка сгустков более выражена при больших величинах кильватерного поля, в связи с чем нами использовался резонаторный режим возбуждения, в котором, как показано экспериментально, амплитуда возбужденного поля в 5 раз превышает поле, получаемое в волноводном случае [13].

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема установки, на которой проводились эксперименты, показана на Рис.1. Пучок релятивистских электронов создавался с помощью линейного резонансного электронного ускорителя. Параметры пучка: энергия – 4,5 МэВ, ток в импульсе – 0,5 А, длительность импульса – 2 мкс, частота модуляции пучка – 2805 МГц. Каждый импульс состоит из последовательности $6 \cdot 10^3$ электронных сгустков с длительностью каждого $\tau_{сг} \approx 60$ пс и временным интервалом между ними 300 пс. Диаметр пучка на выходе из ускорителя ~ 10 мм, длина сгустка ≈ 17 мм, заряд – 0,16 нК.

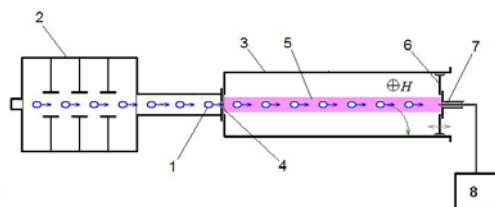


Рис.1. Схема установки: 1 – последовательность сгустков; 2 – электронный ускоритель; 3 – камера взаимодействия; 4 – диафрагма; 5 – плазменный столб; 6 – передвижная заглушка; 7 – СВЧ-зонд; 8 – осциллограф

Такая последовательность сгустков через титановую фольгу выводилась в стандартный 10 см-волновод (сечением 34×72 мм) длиной 15 см, в котором находился воздух при атмосферном давлении. Для уменьшения соотношения диаметра сгустков к его длине (т.е. увеличения отношения радиальной компоненты возбуждаемого поля к продольной) на входе в волновод устанавливалась металлическая диафрагма с диаметром отверстия 4 мм.

Как было показано ранее [13], такой пучок электронов при его выводе в атмосферу создает плазму, с которой эффективно взаимодействует, причем на расстоянии 10...15 см от выходной фольги плазма является резонансной, т.е. плазменная частота ω_p равна частоте следования сгустков ω_m . Исследования возбуждения кильватерных волн в такой системе можно было проводить как в волноводном режиме, когда выходной конец волновода оставался открытым, так и в режиме резонатора. В резонаторном случае выходной конец волновода закрывался металлическим плунжером, который мог передвигаться по длине волновода и изменять его длину.

В экспериментах с помощью СВЧ-зондов измерялись E_z - и E_r -составляющие возбуждаемого кильватерного поля. Для измерения тока электронов, проходящих через волновод, СВЧ-зонд заменялся цилиндром Фарадея. По потемнению стекол под действием релятивистских электронов измерялись диаметры пучка на различных расстояниях от выходной фольги.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Эксперименты с током $I_b=0,5$ А и при длине сгустка, близкой к его диаметру ($l=1,7$ см, $a=1$ см), проводились в условиях полуограниченного волновода и при наличии резонатора. В первом случае, согласно работе [7], создаётся резонансная плазма ($\omega_p \approx \omega_m$), сгустки находятся в тормозящей фазе возбуждаемого поля и в слабом радиальном поле, так как, согласно [8] в полуограниченном волноводе поле складывается только от небольшого числа сгустков и далее оно выходит на стационар. Измерения диаметра пучка по потемнению стёкол под действием релятивистских электронов в этом случае показали, что пучок расходится в результате углового разброса на выходной фольге и из-за столкновений с нейтральными частицами газа (Рис.2), а поперечное поле небольшой амплитуды в этом случае недостаточно для фокусировки.

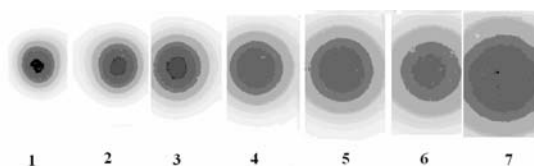


Рис.2. Диаметры пучка на различных расстояниях от выходной фольги: 1 – 0 см; 2 – 5 см; 3 – 7 см; 4 – 9 см; 5 – 11 см; 6 – 13 см; 7 – 15 см. (Полуоткрытый волновод $I_b=0,5$ А)

Потемнение на стеклянных пластинах сканировалось с разрешением 600×600 dpi. Оптическая плотность сканера 2.0 D.

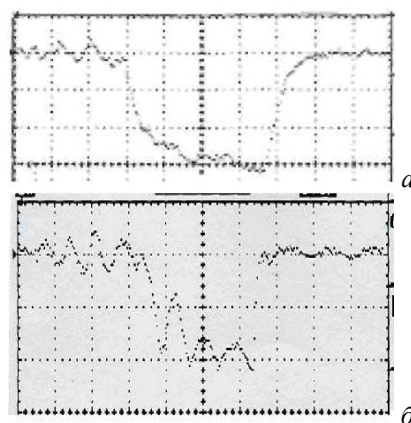


Рис.3. Осциллограммы: а – E_z -составляющей кильватерного поля (резонатор); б – тока электронов

При наличии резонатора амплитуда поля нарастает почти в течение всего импульса тока (Рис.3,а) и более чем в 5 раз превосходит амплитуду поля в полуограниченном волноводе, поэтому часть электронных сгустков, находящихся в фокусирующей фазе кильватерного поля, удерживается в пределах одного и того же поперечного размера, а другая часть – дефокусируется (Рис.4).

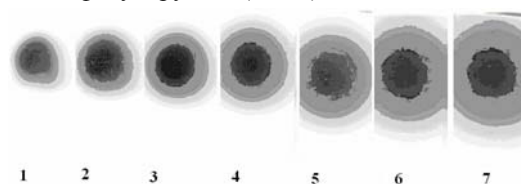


Рис.4. Диаметры пучка на различных расстояниях от выходной фольги: 1 – 0 см; 2 – 5 см; 3 – 7 см; 4 – 9 см; 5 – 11 см; 6 – 13 см; 7 – 15 см. (Резонатор $I_b=0,5$ А)

При уменьшении тока в два раза как на осциллограммах СВЧ-излучения, так и на осциллограммах тока пучка, снятых с помощью цилиндра Фарадея (см. Рис.3,б), наблюдаются биения, которые могут быть связаны с тем, что при уменьшении тока создаётся плазма с плотностью ниже резонансной, в результате чего возникает расстройка между плазменной частотой ω_p и частотой следования сгустков ω_m . Такая расстройка может привести к тому, что часть сгустков последовательности может попадать как в ускоряющую фазу (амплитуда поля будет уменьшаться), так и в фокусирующую или дефокусирующую фазы поперечной составляющей поля, возбуждённого предшествующими сгустками. Количество таких колебаний зависит от величины расстройки.

Для проверки этого явления на входе в волновод была поставлена диафрагма диаметром 4 мм, через которую пучок с током 0.25 А проходил в волновод. Наличие такой диафрагмы приводит также к тому, что улучшается соотношение длины и поперечного размера сгустка для возбуждения поперечной составляющей кильватерного поля. Если без диафрагмы соотношение $l/a = 1.7$, то при наличии диафрагмы это соотношение равно 4.

Как и в первом случае, для полуограниченного волновода наблюдается только дефокусировка электронных сгустков (Рис.5).

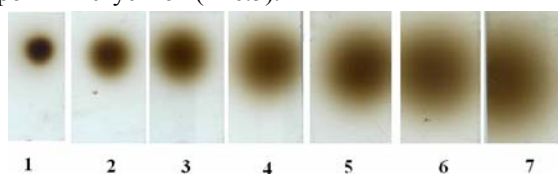


Рис.5. Диаметры пучка на различных расстояниях от выходной фольги: 1 – 0 см; 2 – 5 см; 3 – 7 см; 4 – 9 см; 5 – 11 см; 6 – 13 см; 7 – 15 см. (Полуоткрытый волновод $I_b = 0,25$ А)

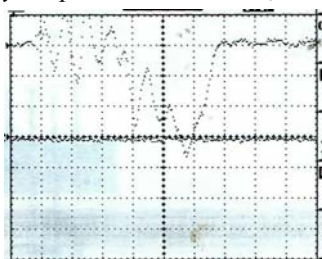


Рис.6. Осциллограмма E_z -составляющей кильватерного поля; ($I_b = 0,25$ А)

При наличии резонатора осциллограмма СВЧ-излучения, приведенная на Рис.6, показывает, что максимальная амплитуда поля достигается в конце импульса, а биения в течение импульса свидетельствуют о наличии расстройки между ω_p и ω_m , в результате чего часть сгустков последовательности может попадать в ускоряющую и фокусирующую фазу возбуждаемой волны.

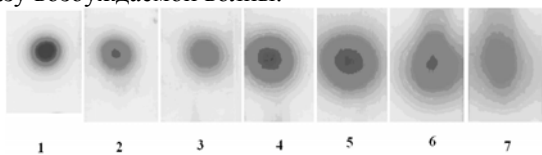


Рис.7. Диаметры пучка на различных расстояниях от выходной фольги: 1 – 0 см; 2 – 5 см; 3 – 7 см; 4 – 9 см; 5 – 11 см; 6 – 13 см; 7 – 15 см. (Резонатор $I_b = 0,25$ А)

Это подтверждается измерениями диаметра пучка по отпечаткам на стекле (Рис.7), на которых наблюдается как фокусирующее, так и дефокусирующее действие поперечной составляющей возбуждаемого поля. Фокусировка пучка соответствует положению максимума поля в резонаторе.

ВЫВОДЫ

Экспериментально показана фокусировка релятивистских электронных сгустков возбуждаемым в плазме кильватерным полем. Фокусируемые сгустки помещались в фокусирующие фазы кильватерного поля при введении расстройки между частотой следования сгустков и плазменной частотой. Последняя

в эксперименте изменялась при изменении числа частиц в сгустках (тока пучка), приводящем к изменению условий ионизации газа, в котором распространялся пучок.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.К. Березин, Я.Б. Файнберг, А.М. Егоров, В.А. Киселёв и др. Взаимодействие модулированного релятивистского пучка с плазмой // *ЖЭТФ*. 1972, т.63, в.3(9), с.861-873.
2. Chen, J.M. Dawson, R.W. Huff, and T.C. Katsouleas. Acceleration of electrons by the interaction of a bunched electron beam with a plasma // *Phys. Rev. Lett.* 1985, v.54, №7, p.693.
3. J.B. Rosenzweig, et al. Experimental Observation of Wake-Field Acceleration // *Phys. Rev. Lett.* 1988, v.61, p.98.
4. K. Nakajima, A. Enomoto, N. Kobayashi, et al. Plasma Wake-field accelerator experiments at KER // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 1990, v.A202, p.12-20.
5. A.K. Berezin, Ya.B. Fainberg, V.A. Kiselev, et al. Wakefield excitation in plasma by relativistic electron beam, consisting regular chain of short bunches // *Fizika Plasmy*. 1994, v.20, №7-8, p.663-670.
6. I. Blumenfeld, C.E. Clayton, F.-J. Decker, et al. Energy doubling of 42 GeV electrons in a metre-scale plasma wakefield accelerator // *Nature, Letters*. 2007, v.445, p.741-744.
7. G. Hairapetian, P. Devis, C. Joshi, C. Pellegrin, T. Katsouleas. Transverse dynamic of a short relativistic electrons bunch in a plasma lens // *Phys. Plasma*. 1995, v.2 (6), p.2555-2561.
8. K.V. Lotov, V.I. Maslov, I.N. Onishchenko, E.N. Svistun. Simulation of plasma wakefield excitation by a sequence of relativistic electron bunches // *Problems of Atomic Science and Technology. Series «Plasma Physics»*. 2008, №6, p.114-116.
9. Я.Б. Файнберг, В.А. Балакирев, В.И. Карась, А.К. Березин, В.А. Киселев, И.Н. Онищенко, А.П. Толстолужский. Диагностика кильватерных полей в плазме с использованием зондирующего электронного пучка и микроканальных пластин // *Письма в ЖТФ*. 1996, т.22, №17, с.31-35.
10. R. Keinigs, M.E. Jones // *Phys. Fluids*. 1987, v.30, №1, p.252.
11. В.А. Балакирев, В.И. Карась, А.П. Толстолужский, Я.Б. Файнберг. Возбуждение кильватерных полей релятивистским электронным сгустком в радиально неоднородной плазме // *Физика плазмы*. 1997, т.23, №4, с.316-324.
12. В.А. Киселев, А.Ф. Линник, И.Н. Онищенко и др. Об ускорении электронов при возбуждении кильватерных полей в диэлектрических структурах последовательностью релятивистских электронных сгустков // *Problems of Atomic Science and Technology. Series «Plasma Electronics and New Methods of Acceleration»*. 2008, №4, p.70-72.
13. V.A. Kiselev, A.F. Linnik, I.N. Onishchenko, et al. Wakefield excitation in plasma resonator by a sequence of relativistic electron bunches // *Problems of Atomic Science and Technology. Series «Plasma Physics»*. 2008, №6, p.135-137.

Статья поступила в редакцию 07.06.2010 г.

FOCUSING OF THE RELATIVISTIC ELECTRON BUNCHES BY WAKEFIELD EXCITED IN PLASMA

V.A. Kiselev, A.F. Linnik, I.N. Onischenko, V.I. Pristupa

Focusing of the relativistic electron bunches by wakefield excited by them in plasma are investigated. For spacing of bunches in various phases of wakefield the detuning between frequency of bunches repetition and frequency of the excited field is used. For enhancement of the role of radial component of wakefield the bunches produced in the linear electron accelerator, by aperturing were put into elongated shape - length of the bunch essentially exceeded its diameter. Increase of the wakefield amplitude was achieved by use of the plasma resonator.

ФОКУСУВАННЯ РЕЛЯТИВІСТСЬКИХ ЕЛЕКТРОННИХ ЗГУСТКІВ ПРИ ЗБУДЖЕННІ КІЛЬВАТЕРНОГО ПОЛЯ У ПЛАЗМІ

В.А. Кисельов, А.Ф. Лінник, І.М. Оніщенко, В.І. Приступа

Експериментально досліджено фокусування релятивістських електронних згустків кільватерними хвилями, які збуджуються ними в плазмі. Для розміщення згустків в різних фазах кільватерного поля використана розбіжність між частотою слідування згустків та частотою збуджуваного поля. Для підсилення ролі радіальної компоненти кільватерного поля згусткам, які отримуються на лінійному прискорювачі електронів, шляхом діафрагмування надавалась видовжена форма – довжина згустка суттєво перевищувала його діаметр. Збільшення амплітуди кільватерного поля досягалося при використанні плазмового резонатора.