

# ВОЗБУЖДЕНИЕ КИЛЬВАТЕРНЫХ ПОЛЕЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬЮ СГУСТКОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ В ПЛАЗМЕ, ОБРАЗУЕМОЙ ПРИ ИХ ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ НЕЙТРАЛЬНЫЙ ГАЗ РАЗЛИЧНОГО ДАВЛЕНИЯ

*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*

Проведено экспериментальное исследование эффективности возбуждения кильватерных полей в плазме, образованной при прохождении последовательности коротких сгустков релятивистских электронов через нейтральный газ различного давления. Обнаружено две области давлений; 1...3 и 760 Торр, в которых интенсивно возбуждаются плазменные кильватерные поля. В диапазоне давлений 50...100 Торр наблюдаются биения тока пучка, вызванные расстройкой между частотой кильватерного поля, возбуждаемого в нерезонансной плазме, и частотой следования сгустков, приводящей к периодическому возбуждению кильватерного поля (биениям).

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие новых методов ускорения заряженных частиц вызвано достижением физических пределов напряжённости полей и предельных уровней мощности для традиционных схем ускорения. В обычных линейных ускорителях заряженные частицы ускоряются электрическим полем, которое движется синхронно с ними и создаётся с помощью мощного СВЧ-излучения с напряжённостью поля в пределах 20...50 МВ/м. При превышении этой напряжённости поля происходит электрический пробой. Поскольку напряжённость электрического поля должна быть меньше порога пробоя, для ускорения частиц до энергий в сотни гигаэлектронвольт требуются многокилометровые расстояния.

К новым методам ускорения относится ускорение заряженных частиц кильватерными полями, возбуждаемыми в плазме, причём генерация полей может осуществляться как коротким и плотным сгустком релятивистских электронов, так и лазерным импульсом [1-4]. В плазме с плотностью  $n_p$  можно создать электрическое поле с амплитудой порядка

$$E_0 = \frac{mc\omega_p}{e} = \sqrt{4\pi n_p mc^2}. \text{ Например, в плазме плотностью } 10^{18} \text{ электронов в } 1 \text{ см}^3 \text{ можно создать волну с пиковым электрическим полем } 100 \text{ ГВ/см. Однако продольные и поперечные градиенты плотности плазмы (создание безградиентной плазмы – очень трудная задача) мешают получить максимальную напряжённость возбуждённого поля. Особенно это существенно при использовании большого количества сгустков с небольшим зарядом вместо одного сгустка с большим зарядом, когда используется когерентное сложение полей от большого количества сгустков.}$$

В нашей работе исследуется возбуждение кильватерных полей в плазме большим количеством (до 6000) сгустков релятивистских электронов при их прохождении через нейтральный газ разного давления. Ранее [5] нами было показано, что при инъекции последовательности сгустков в нейтральный газ при атмосферном давлении создаётся плазма, причём её плотность такова, что плазменная частота совпадает с частотой прохождения сгустков ( $\omega_p \approx \omega_m$ , где

$\omega_p$  – плазменная частота,  $\omega_m$  – частота модуляции пучка). В этом случае короткий по сравнению с длиной волны электронный сгусток создавал в плазме кильватерное поле, которое затем усиливалось последующими сгустками. При этом, в соответствии с теорией [6], происходило сложение кильватерных полей отдельных сгустков. Насыщение уровня кильватерного поля определялось явлением захвата последующих сгустков в поле возбуждаемой волны.

Однако при проведении этих экспериментов существенное влияние на возбуждение оказывает диссипация плазменных волн, обусловленная парными столкновениями электронов с нейтральными частицами. В связи с этим нами были проведены исследования возможности возбуждения кильватерных волн последовательностью сгустков релятивистских электронов в плазме, создаваемой самой последовательностью сгустков в нейтральном газе при различных давлениях, для выяснения диапазона давлений в котором возможно наиболее эффективное возбуждение кильватерных волн. Эффективность возбуждения кильватерных волн в этих условиях определялась путём измерения Ez-составляющей электрического поля, потерь энергии электронов релятивистских сгустков и наличием ускоренных в этих полях электронов, а также путём сравнения амплитуды СВЧ-колебаний при наличии резонатора и полуограниченного волновода.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исследование амплитуды СВЧ-излучения, потеря энергии электронами сгустков и величины тока пучка проводилось на установке, схема которой показана на Рис.1. Пучок релятивистских электронов создавался с помощью линейного резонансного 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 6000 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, его заряд  $\approx 0.16$  нК.

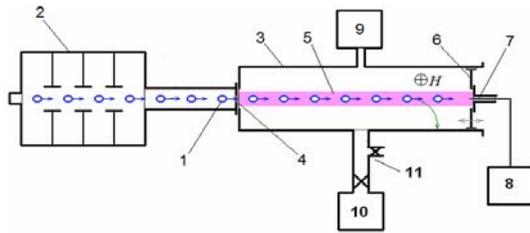


Рис.1. Схема установки: 1 – ускоренные электроны; 2 – ускоритель; 3 – камера взаимодействия; 4 – диафрагма; 5 – плазменный канал; 6 – подвижная заглушка; 7 – СВЧ-зонд; 8 – осциллограф; 9 – вакуумный датчик; 10 – вакуумный насос; 11 – напекатель газа

Пучок инжектировался в прямоугольный волновод сечением  $72 \times 34$  мм и длиной 25 см. Давление нейтрального газа в волноводе можно было менять от 760 до  $5 \cdot 10^{-2}$  Торр. В качестве нейтрального газа использовался воздух. Волновод откачивался через патрубков, а нейтральный газ напускался с помощью напекателя. Измерение СВЧ-излучения на выходе волновода проводилось в режиме полуограниченного волновода и резонатора. В первом случае выход волновода закрывался фторопластовой пластиной толщиной 10 мм (ослабление СВЧ-излучения при прохождении через такую пластину составляет не более 1%). СВЧ-зонд, которым измеряется  $E_z$ -составляющая возбуждаемого поля, располагался за фторопластовой заглушкой. В случае резонатора выходной конец волновода закрывался металлической пластиной, в центре которой находился зонд. Для измерения величины тока, проходящего через волновод, зонд заменялся цилиндром Фарадея диаметром 15 мм. Потери энергии электронов сгустков определялись по величине экстраполированного пробега электронов, которая измерялась по толщине окрашенного слоя, образуемого электронами в стеклянных пластинах, расположенных параллельно оси пучка [7].

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На Рис.2 показана зависимость амплитуды  $E_z$ -составляющей возбуждаемого поля от давления нейтрального газа в случае резонатора (кривая 1). В полуограниченном волноводе характер изменения амплитуды такой же, но амплитуда в 5 раз меньше, чем в случае резонатора.

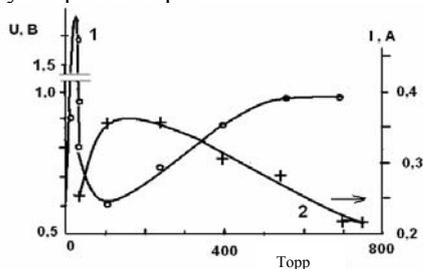


Рис.2. Кривые амплитуды  $E_z$ -составляющей возбуждаемого поля (кривая 1) и величины тока пучка (кривая 2) при разных давлениях нейтрального газа

Здесь же показано изменение величины тока релятивистского пучка, который проходил через систему и измерялся цилиндром Фарадея диаметром 1.5 см, размещенным в центре металлической заглушки. Кривая 2 (см. Рис.2) показывает, что ток

пучка уменьшается в результате разброса электронов поперечной составляющей возбуждаемого поля.

Уменьшение амплитуды СВЧ-излучения и уменьшение разброса электронов пучка свидетельствуют о том, что при уменьшении давления необходимо большее время для того, чтобы в результате ударной ионизации и возбуждения кильватерного поля плотность плазмы достигла резонансного значения, когда  $\omega_p \approx \omega_m$ . Об этом свидетельствуют и осциллограммы СВЧ-излучения, приведенные на Рис.3. Если при атмосферном давлении максимальная амплитуда возбуждаемого поля достигается за короткое время, то при давлении 300 Торр максимум поля достигается только к середине импульса тока, а при давлении 40 Торр амплитуда не достигает своего максимального значения.

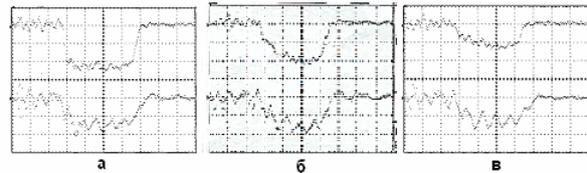


Рис.3. Осциллограммы  $E_z$ -составляющей возбуждаемого поля при разных давлениях: 760 Торр (а); 300 Торр (б); 40 Торр (в) (внизу – ток пучка на стенки волновода)

В диапазоне давлений от  $3.5$  до  $5 \cdot 10^{-1}$  Торр наблюдается резкое возрастание амплитуды  $E_z$ -составляющей возбуждаемого поля (см. Рис.2). Более детальное распределение амплитуды поля в этом диапазоне показано на Рис.4,а, а осциллограмма СВЧ-излучения при давлении  $P=2$  Торр приведена на Рис.4,б.

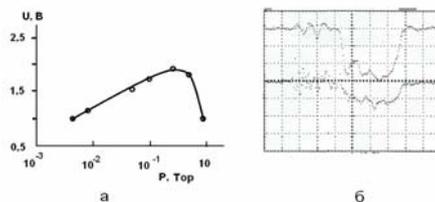


Рис.4. Зависимость амплитуды  $E_z$ -составляющей возбуждаемого поля от давления

Полученные результаты дают нам основание предполагать, что наблюдаются два диапазона давлений, где развивается пучково-плазменный разряд (ППР) при распространении модулированного электронного релятивистского пучка через нейтральный газ: давления, близкие к атмосферному, и давления в диапазоне  $2 \dots 10^{-1}$  Торр. Классическое ППР для нерелятивистских пучков развивается при давлениях  $10^{-3} \dots 10^{-4}$  Торр. Однако, учитывая то, что вероятность ионизации для электронов с энергией  $4 \dots 5$  МэВ значительно ниже, чем для электронов, энергия которых лежит в диапазоне десятков килоэлектронвольт очевидно, что развитие ППР в этом случае смещается в область более высоких давлений.

Измерения потерь энергии по величине экстраполированного пробега электронов в стекле при давлении  $P=2$  Торр (Рис.5) показали, что около 20% энергии электронов расходуется на возбуждение кильватерного поля. Поперечная составляющая поля приводит к разбросу электронов сгустков в радиальном направлении.

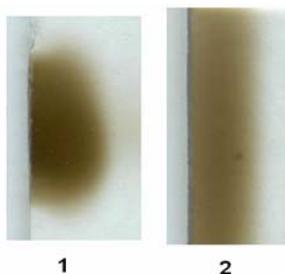


Рис.5. Потемнение стекла под действием электронов сгустков по глубине:

1 - на входе в волновод; 2 - на выходе из волновода

Отметим, что в диапазоне давлений от 100 до 50 Торр наблюдаются биения тока пучка, регистрируемые цилиндром Фарадея (Рис.6).

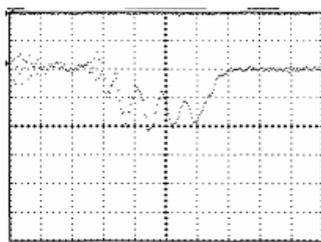


Рис.6. Осциллограммы тока пучка

Это явление можно объяснить наличием расстройки между собственной частотой образованной плазмы  $\omega_p$  и частотой модуляции пучка  $\omega_m$  ( $\Delta\omega = \omega_m - \omega_p$ ). В этом случае некоторое количество сгустков возбуждает кильватерное поле, а последующие сгустки, сдвигаясь по фазе, могут попадать или в фокусирующую, или в дефокусирующую фазы поперечной составляющей возбуждаемого поля.

### ВЫВОДЫ

1. Проведенные эксперименты по исследованию возбуждения кильватерных волн в плазме, которая создаётся последовательностью коротких сгустков релятивистских электронов при их прохождении через нейтральный газ различного давления, показали, что имеются два диапазона давлений, в которых амплитуда возбуждаемого поля максимальна и частота следования сгустков  $\omega_m$  близка к плазменной частоте  $\omega_p$  ( $\omega_p = \omega_m$ ). Один диапазон давлений находится в области атмосферного давления, второй – в диапазоне от  $2 \dots 10^{-1}$  Торр. Развитие пучково-плазменного

разряда во втором диапазоне происходит при больших давлениях, по сравнению с классическим ППР для нерелятивистских пучков ( $10^3 \dots 10^4$  Торр). Это связано с уменьшением сечения ионизации для релятивистских пучков (в диапазоне 2...4 МэВ) по сравнению с нерелятивистскими пучками.

2. Обнаружен эффект биений тока пучка, связанный с наличием расстройки между плазменной частотой и частотой следования сгустков ( $\Delta\omega = \omega_m - \omega_p$ ), когда некоторая часть сгустков последовательно, смещаясь по фазе, может попадать в фокусирующую, или в дефокусирующую фазы поперечной составляющей возбуждаемого поля.

### ЛИТЕРАТУРА

1. P. 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.
2. C. Joshi. Plasma accelerators // *V mire nauki* (transl. from Scientific America). 2006, №5, p.17-23 (In Russian).
3. V.A. Kiselev, A.F. Linnik, T.S. Marshall, I.N. Onischenko, N.I. Onischenko, G.V. Sotnikov, V.V. Uskov. Research on Wake-field Excitation in a Cylindrical Dielectric Waveguide and Resonator by a Sequence of Electron Bunches // *Strong microwave in plasma*. N. Novgorod, Russia. 2006, v.1, p.303-310.
4. S.P.D. Mangles, C.D. Murphy, Z. Najmudin, et al. Monoenergetic beams of relativistic electrons from intense laser-plasma interaction // *Nature*. 2004, v.431, p.535-538.
5. A.K. Berezin, V.A. Kiselev, I.N. Onischenko, Ya.B. Fainberg, et al. Plasma wakefield excitation by pulse, containing a regulated amount of short bunches // *Физика Плазмы*. 1994, в.20, №7-8, p.663-670.
6. В.А. Балакирев, И.Н. Онищенко, Ю.П. Блюх, Я.Б. Файнберг // *Физика Плазмы*. 1998, т.14, в.2, с.218-225.
7. В.А. Киселёв, А.Ф. Линник, И.Н. Онищенко, В.В. Усков. Датчик энергии релятивистских электронов, используемый в кильватерном ускорителе // *ВАНТ. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2010, №3, с.160-162.

Статья поступила в редакцию 07.06.2010 г.

### EXCITATION WAKEFIELD BY SEQUENCE OF BUNCHES OF THE RELATIVISTIC ELECTRONS IN PLASMA, PRODUCED AT ITS PASSAGE THROUGH NEUTRAL GAS OF VARIOUS PRESSURE

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

The experimental research of efficiency of excitation wakefield in plasma of a sequence of short bunches of relativistic electrons produced at its passage through the neutral gas of various pressure is carried out. It is revealed two ranges of pressure: 1...3 and 760 Torr, in which plasma wakefields are intensively excited. In the pressure range 50...100 Torr beam current beating is observed that is caused by detuning between frequency of the wakefield, excited in nonresonant plasma, and frequency of bunches repetition, resulting in periodic excitation of wakefield (beating).

### ЗБУДЖЕННЯ КІЛЬВАТЕРНИХ ПОЛІВ ПОСЛІДОВНІСТЮ ЗГУСТКІВ РЕЛЯТИВІСТСЬКИХ ЕЛЕКТРОНІВ В ПЛАЗМІ, ЯКА УТВОРЮЄТЬСЯ ПРИ ЇХ ПРОХОДЖЕННІ ЧЕРЕЗ НЕЙТРАЛЬНИЙ ГАЗ РІЗНОГО ТИСКУ

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

Проведено експериментальні дослідження ефективності збудження кильватерних полів в плазмі, яка створюється при проходженні послідовності коротких згустків релятивістських електронів через нейтральний газ різного тиску. Виявлено дві області тиску: 1...3 і 760 Торр, в яких інтенсивно збуджуються плазмові кильватерні поля. В діапазоні тиску 50...100 Торр спостерігаються биття струму пучка, викликані різницею між частотою кильватерного поля, яке збуджується в нерезонансній плазмі, і частотою слідування згустків, що призводить до періодичного збудження кильватерного поля (биття).