

УДК 533.9

ВОЗБУЖДЕНИЕ КИЛЬВАТЕРНЫХ ВОЛН В ПЛАЗМЕ ПУЧКОМ МИКРОТРОНА

М.Л. ПЕТРОСЯН, Б.В. ПЕТРОСЯН, Г.М. ПЕТРОСЯН

Ереванский физический институт им. А.И. Алиханяна

(Поступила в редакцию 2 апреля 2007 г.)

Проведено экспериментальное исследование возбуждения кильватерных волн в плазме последовательностью электронных сгустков пучка микротрона. Результаты измерения спектра электронов после прохождения плазмы подтверждают эффект сложения волн от последовательности порядка 100 сгустков, что приводит к увеличению амплитуды от 1 В/см до 100 В/см.

1. Введение

Идеи о возможности использования продольных кильватерных волн, возбуждаемых движущимися в плазме сгустками электронов, для ускорения заряженных частиц были высказаны еще в 50-х годах [1-3]. Интерес к PWA (Plasma Wakefield Accelerator) возродился в середине 80-х годов в серии теоретических работ, выполненных в SLAC, ЕрФИ и UCLA [4-9]. В схеме PWA первый, более сильноточный сгусток возбуждает в плазме продольные кильватерные волны, а второй сгусток, находящийся на подходящей фазе плазменной волны, ускоряется. В теоретических работах предсказывается возможность обеспечить темп ускорения порядка ГэВ/м [5].

Принципиальную возможность ускорения частиц кильватерными волнами, возбуждаемыми электронными сгустками, была доказана экспериментально в 1988 г. в Аргонской национальной лаборатории [10]. Последующие экспериментальные работы, выполненные в Аргон-Висконсин в США [10-12], КЕК в Японии [13,14] и ХФТИ АН УССР [15], были направлены на оптимизацию процесса ускорения и на повышение наблюдаемого темпа ускорения. Для практического применения данного метода необходимо решить две проблемы: 1) реально достижимый темп ускорения должен быть не меньше, чем у традиционных ускорителей; 2) PWA должен иметь высокий коэффициент трансформации, который является отношением прироста энергии ускоряемого сгустка к энергии, потерянной сгустком возбуждения. Один из недостатков этого ускорения – то, что увеличение энергии электронов ускоряемого сгустка в линейном режиме ограничено ниже, чем 50% от энергии электронов сгустка возбудителя [4].

В настоящее время достигнутые темпы ускорения уже соизмеримы с темпами ускорения традиционных методов, однако прирост энергии в ускоряемом сгустке еще

намного меньше, чем энергия возбуждающего сгустка, т.е. пока действует ограничение по коэффициенту трансформации для линейного режима и не достигнуто удвоение энергии. Такая ситуация выдвигает на первый план проблему повышения темпа ускорения и прироста энергии. Для увеличения темпа ускорения необходимо увеличить количество заряда в возбуждающих сгустках или использовать большое число возбуждающих сгустков, т.е. последовательность относительно слаботочных сгустков [5].

Сгустки с большим зарядом (несколько десятков нКл) получают в специальных сильноточных ускорителях и дальнейшее увеличение заряда весьма затруднительно. Наиболее доступным является вариант использования последовательности, цуга относительно слаботочных сгустков (до одного нКл в сгустке), получаемых на обычных, даже на коммерческих, ускорителях. При этом для суммирования волн от отдельных сгустков необходимо, чтобы частота следования сгустков равнялась частоте плазменной волны, т.е. выполнялось условие резонанса. Пока этот метод находится еще на стадии исследования. В настоящее время выполнено несколько работ по экспериментальному исследованию возбуждения кильватерных волн в плазме со многими сгустками [16-19]. Однако в этих работах не наблюдалось увеличения амплитуды волны адекватно к увеличению числа используемых сгустков. Авторы ссылаются на несколько причин, объясняющих полученные результаты: влияние размеров плазменной камеры, неоднородность плазмы, затухание плазменных волн.

Задача данной работы – продолжение исследований в данном направлении с целью уточнения процесса возбуждения плазменных волн цугом электронных сгустков и, в частности, более четкая регистрация суммирования волн от сгустков цуга.

2. Экспериментальная установка

Для четкого наблюдения эффекта суммирования волн от нескольких сгустков необходимо: 1) использовать идентичные сгустки, особенно по количеству зарядов в сгустках; 2) чтобы начальный энергетический разброс сгустка был меньше, чем ожидаемое изменение энергии электронов; 3) чтобы амплитуда возбуждаемой волны от одного сгустка была намного меньше возможного максимального значения амплитуды волны в плазме.

Эти требования обеспечиваются при проведении исследования на пучке микротрона. Основное преимущество микротрона в том, что при сравнительно высокой монохроматичности пучка ($\sim 3 \times 10^{-3}$) и при сравнительно низкой энергии электронов можно провести более точные измерения влияния плазменных волн на спектральный состав электронного пучка.

Схема экспериментальной установки, созданной на пучке микротрона ЕрФИ, приведена на рис.1. Ниже приведены основные параметры пучка микротрона:

Энергия электронов	7,5 МэВ
Длина сгустков	5 мм
Диаметр пучка	3 мм
Расстояние между сгустками.....	11 см
Длительность импульса (длительность цуга сгустков).....	1,5 мкс

Плотность электронов в сгустке.....	10^8 см^{-3}
Энергетический разброс электронов	2×10^{-3}
Заряд в сгустке.....	10 пКл

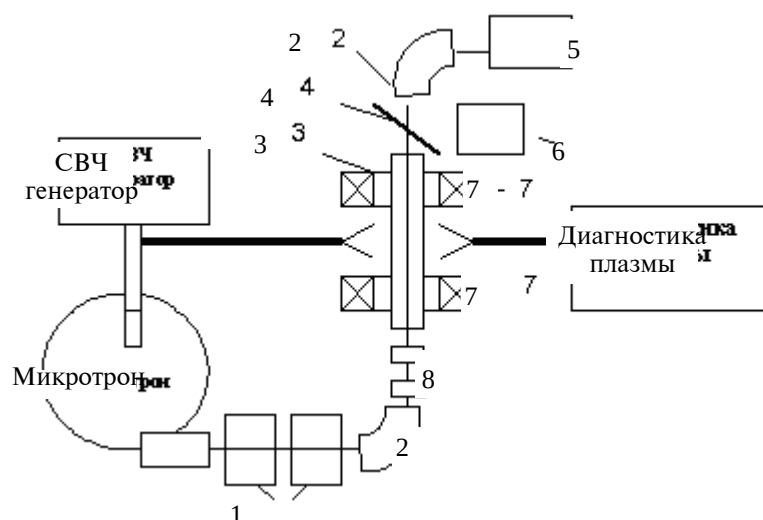


Рис.1. Схема экспериментальной установки. 1 – квадрупольные линзы, 2 – поворотные магниты, 3 – плазменная камера, 4 – передвижное зеркало, 5 – система регистрации спектрометра, 6 – телекамера, 7 – соленоиды, 8 – корректирующие магниты.

Пучок электронов микротрона после прохождения через поворотные магниты и квадрупольные линзы пропусклся через плазменную камеру (рис.1). Плазма в камере создавалась с помощью тлеющего разряда, при этом использовался полый катод. Основные параметры плазменной камеры следующие:

Длительность разряда.....	40 мкс
Импульсный ток в разряде.....	~ 3 А
Напряжение источника питания.....	~ 20 кВ
Давление газа в камере	10^{-1} – 10^{-2} Торр
Плотность плазмы	10^8 – $1,5 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$
Длина плазменной камеры	1 м
Диаметр плазменной камеры.....	5 см

Плотность плазмы в диапазоне 5×10^{10} – $5 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$ выбиралась путем измерения режима разряда в плазменной камере и с помощью СВЧ диагностики. Измерение спектрального распределения электронного пучка после взаимодействия с плазмой проводилось при длинах волн плазменной волны вплоть до 11,4 см (плотность плазмы порядка 10^{11} см^{-3}), т.е. при условиях резонанса. Плотность электронов в пучке составляла $5 \times 10^7 \text{ см}^{-3}$.

3. Результаты измерения

Ожидаемую величину напряженности поля кильватерной волны в плазме от одного сгустка можно оценить с помощью формулы [5]

$$\varepsilon = -eE_{1z} \cong 8\pi^2 eQ / \lambda_p^2, \quad (1)$$

где ε – темп ускорения, E_{1z} – продольная составляющая электрического поля плазменной волны, Q – заряд в сгустке, λ_p – длина плазменной волны, e – заряд электрона. При данных значениях параметров пучка и плазмы напряженность поля получается порядка 1 В/см, а прирост энергии – порядка 100 эВ.

Из-за малого значения ожидаемой величины напряженности поля кильватерной волны и, следовательно, незначительного изменения спектрального состава электронного пучка, к спектрометру предъявляются весьма жесткие требования: высокое разрешение и возможность регистрации спектрального распределения пучка в течение одного импульса тока микротрона. Второе требование обусловлено тем, что изменение (дрейф) параметров пучка от импульса к импульсу может быть больше, чем измеряемые параметры. Для этих измерений был создан спектрометр, аналогичный спектрометру, описанному в работе [20]. При экспериментальном исследовании спектральных характеристик электронных пучков ускорителей, когда начальный узкий угловой разброс пучка почти сохраняется, а поперечные размеры пучка значительны, наиболее выгодно работать с поворотом на угол $\pi/2$, так как параллельный монохроматический пучок после поворота на $\pi/2$ в однородном магнитном поле фокусируется в точку, что уменьшает влияние поперечного размера пучка на дисперсионную характеристику спектрометра.

Система регистрации позволяет получить спектральное распределение электронного пучка в каждом импульсе тока ускорителя. Изображение пучка, полученное на люминофорном экране, расположенном на выходе спектрометра, через оптическую систему проектируется на вход фотоумножителя. Изображение сканируется с помощью щели шириной 0,4 мм и подвижного зеркала, которое приводится в движение с помощью электромагнитного вибратора, работающего синхронно с частотой запуска ускорителя. Время послесвечения люминофора выбрано таким, чтобы оно было меньше периода работы ускорителя, но больше ожидаемой длительности импульса микротрона и длительности сканирования выходного изображения спектрометра. С помощью фазовращателя в цепи питания электромагнитного вибратора начало сканирования сдвигается по фазе так, чтобы измерения проходили при окончании высоковольтных наводок микротрона. Разрешение спектрометра равно 10^{-3} или 7,5 кэВ при энергии электронов 7,5 МэВ, т.е. спектрометр будет чувствовать изменение спектра, если будет сложение кильватерных волн порядка 100 сгустков.

Если не учитывать затухание, то при суперпозиции волн всех 4000 сгустков темп ускорения мог бы достичь 4 МэВ/м. Отметим, что максимально возможное значение напряженности поля кильватерной волны в плазме в линейном режиме определяется выражением [5]

$$E_{\max} = \frac{m_e \omega_p c}{e} \cong 96 \sqrt{n_0 [\text{cm}^{-3}]} \left[\frac{\text{В}}{\text{М}} \right] \quad (2)$$

и составляет 2×10^6 МВ/см при плотности плазмы $n_0 = 10^{11}$ см⁻³. Т.е. в данном случае мы находимся далеко от нелинейного режима возбуждения плазменных волн.

Результаты измерения спектра электронов после прохождения плазмы приведены на рис.2. Как видно из рисунка, имеет место расширение спектрального распределения пучка электронов после взаимодействия с плазмой. Полуширина спектрального распределения составляет ~ 10 кэВ, что соответствует величине поля кильватерных волн (приблизительно 100 В/см). При этом, как было указано, расчетная величина поля кильватерных волн, возбуждаемых одним сгустком, составляет всего один вольт на сантиметр. В случае периодической последовательности сгустков напряженность поля значительно увеличивается.

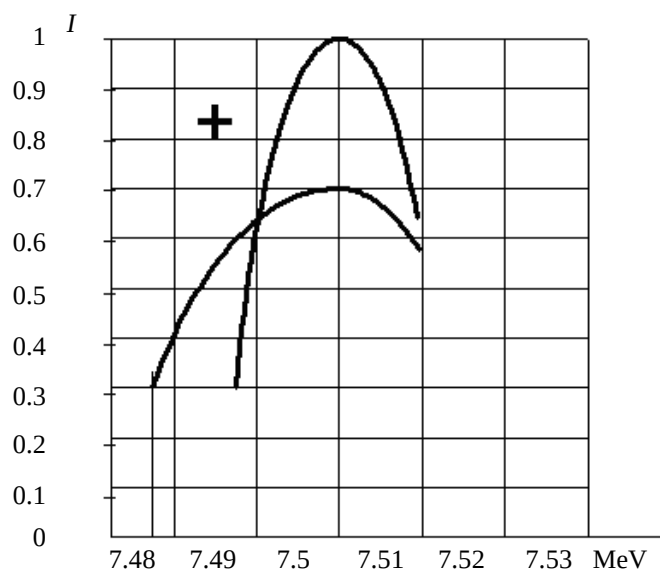


Рис.2. Спектральное распределение электронов до и после взаимодействия с плазмой. По оси ординат приведена интенсивность электронов в относительных единицах. Спектральное распределение I без плазмы и I_p с плазмой (нижняя кривая). Величина ошибок по обеим осям показана крестиком.

Кроме спектрального распределения, измерялось также поперечное сечение пучка на выходе плазменной камеры. Предполагается, что изменение поперечного сечения пучка обусловлено величиной напряженности кильватерной волны. Зависимость изменения поперечного сечения пучка от плотности плазмы приведена на рис.3. Как видно из рисунка, кривая зависимости имеет минимальное значение при плотности плазмы $1,4 \times 10^{11}$ см⁻³ и при этом расстояние между электронными сгустками составляет половину длины плазменных волн, и каждый сгусток уменьшает поле предыдущего сгустка.

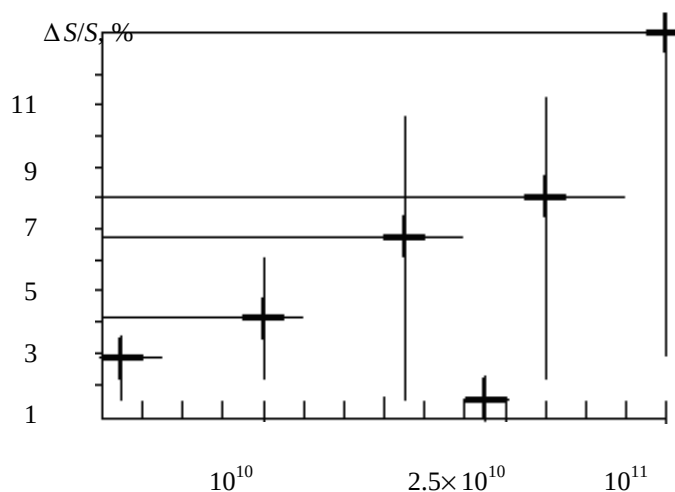


Рис.3. Относительное изменение поперечного сечения пучка в процентах в зависимости от плотности плазмы.

4. Заключение

Результаты измерения спектра электронов после прохождения плазмы подтверждают эффект сложения волн от последовательности сгустков, что приводит к увеличению амплитуды от 1 В/см до 100 В/см. Однако это значение остается значительно меньше максимально возможной величины 40 кВ/см. Наиболее вероятной причиной малых значений амплитуд кильватерных волн является ограниченная длина плазменной камеры, а также затухание волн в плазме. Сравнение результатов экспериментального исследования с теоретическими расчетами усложняется тем, что в теоретических расчетах не учитываются конечные размеры плазменной камеры и затухание волн в плазме. Так как оба фактора приводят к уменьшению амплитуды волны, то по этим результатам трудно определить, который из них является доминирующим, и необходимо продолжить теоретические и экспериментальные исследования с учетом реальных параметров плазмы.

В заключение авторы выражают благодарность проф. Э.Д. Газазяну за полезные обсуждения и замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Y.B.Feinberg. Proc. of Collective Acceleration, CERN, **1**, 84 (1956).
2. Я.Б.Файнберг. Атомная энергия, **6**, 431 (1959).
3. Б.М.Болотовский. Труды ФИАН СССР, **22**, 3 (1964).
4. R.D.Ruth, P.Chen. Plasma Accelerators. SLAC-PUB-3906, Stanford Univ., 1985.
5. P.Chen, J.M.Dawson. The Plasma Wake-Field Accelerator. SLAC-PUB-3601, 1985.
6. R.D.Ruth, A.M.Chao, P.L.Norton, P.Wilson. Part. Acc., **17**, 171 (1985).
7. T.Katsouleas. Phys. Rev. A, **33**, 2056 (1986).

8. **А.Ц.Аматуни, Э.В.Сехпосян, С.С.Элбакян.** “О возможности ускорения заряженных частиц кильватерной волной электронного сгустка в плазме”. Труды XIII Международной конференции по ускорителям частиц высоких энергий. Новосибирск, Наука, т.1, с.175, 1987.
9. **А.Ц.Аматуни, Е.М.Лазиев, Г.А.Нагорский, М.Л.Петросян, Э.В.Сехпосян, С.С.Элбакян.** ЭЧАЯ, **20**, 1247 (1989).
10. **J.B.Rosenzweig, D.B.Cline,** et al. Phys. Rev. Lett., **61**, 98 (1988).
11. **J.B. Rosenzweig, P.Schoessow, B.Cole,** et al. Phys. Fluids, **132**, 1376 (1990).
12. **J.P.Simpson.** NIM, **1340/41**, 908 (1989).
13. **A.Ogata.** Preprint. KEK 92-77, August 1992.
14. **H.Nakanishi, A.Emoto, K.Nakajima,** et al. Part. Acc., **32**, 209 (1990).
15. **А.К.Березин, В.А.Киселев, Я.Б.Файнберг.** Укр. физ. журн., **24**, 94 (1979).
16. **A.Ogata, Y.Yoshida, N.Yugami, Y.Nishida, H.Nakanishi, K.Nakajima, H.Shibata, T.Kozawa, T.Kobayashi, T.Ueda.** Direct Observation of Plasma Wakefield Caused by a Train of LINAC Bunches. PAC-91, San Francisco, California, 1991, p.622.
17. **T.Kobayashi, M.Uesaka, H.Shibata, M.Arinaga, T.Kawakubo, K.Nakajima, H.Nakanishi, A.Ogata, Y.Yoshida, N.Yugami, Y.Nishida.** Plasma wakefield acceleration driven by multiple bunches. EPAC-96, Barcelona, 1996, p.856.
18. **С.А.Бабаджанян, Э.В.Сехпосян, С.С.Элбакян.** Изв. НАН Армении, Физика, **28**, 3 (1993).
19. **А.Ц.Аматуни, Э.В.Сехпосян, А.Г.Хачатрян, С.С.Элбакян.** Изв. НАН Армении, Физика, **28**, 8 (1993).
20. **Г.Г.Мантасян, Б.В.Петросян, М.Л.Петросян, Л.В.Хачатрян.** Спектрометр электронных пучков на энергию до 20 МэВ. Препринт ЕрФИ 757(72)-84, Ереван, 1984.

ՄԻԿՐՈՏԴՐՈՆԻ ՓՆՋԻ ՄԻՋՈՑՈՎ ՊԼԱԶՄԱՅՈՒՄ
ՀԵՏՔԱՅԻՆ ԱԼԻՔՆԵՐԻ ԳՐԳՌՈՒՄԸ

Մ.Լ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Բ.Վ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Գ.Մ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

Կատարված է պլազմայում միկրոտրոնի փնջի էլեկտրոնային թանձրուկների հաջորդականությամբ պլազմայում հետքային ալիքների գրգռման հետազոտումը: Պլազմայով անցնելուց հետո էլեկտրոնների սպեկտրի չափման արդյունքները հաստատում են ալիքների գումարման էֆեկտը մոտ 100 թանձրուկների հաջորդականությունից, ինչը բերում է ալիքի ամպլիտուդի աճին 1 Վ/սմ-ից մինչև 100 Վ/սմ:

EXCITATION OF WAKE-FIELD WAVES
IN PLASMA BY A MICROTRON BEAM

M.L. PETROSYAN, B.V. PETROSYAN, G.M. PETROSYAN

The experimental study of excitation of wake-field waves in plasma by a sequence of electron bunches of a microtron beam is carried out. Results of measurements of the electron spectrum after their passage through plasma confirm the effect of addition of waves from sequence of about 100 bunches which leads to the increase in the amplitude from 1 V/cm up to 100 V/cm.