

04

Возбуждение крупномасштабных электронных вихревых структур в плазменной линзе

© Ю.Н. Чех, А.А. Гончаров, И.М. Проценко

Институт физики НАН Украины, Киев

E-mail: chekh@iop.kiev.ua

Поступило в Редакцию 22 августа 2005 г.

Приводятся первые экспериментальные данные по реализации электронных вихрей в электростатической плазменной линзе при наличии значительного радиального градиента электронной плотности. Экспериментально установлено возбуждение ангармонических волн потенциала большой амплитуды, распространяющихся в азимутальном направлении. На основании измеренных распределений электрических полей показано, что электронные сгустки, образующиеся в результате развития неустойчивости, содержат захваченные частицы, с большой скоростью вращающиеся вокруг соответствующих центров сгустков, образуя вихрь. Экспериментально установлена основная причина, приводящая к ограничению максимальной амплитуды вихрей в сильном магнитном поле.

PACS: 52.35.Qz

Электростатическая плазменная линза (ПЛ) представляет собой устройство, предназначенное для фокусировки сильноточных пучков положительных ионов, действие которой основано на принципах плазмооптики, впервые сформулированных Морозовым [1]. Среда в линзе формируется проходящим интенсивным ионным пучком и электронами вторичной ионно-электронной эмиссии. Плазменная линза является аксиально-симметричной электромагнитостатической ловушкой, в которой электроны удерживаются электрическим полем в аксиальном направлении и магнитным в радиальном. Накапливающийся в линзе отрицательный объемный заряд обеспечивает фокусировку ионов.

Как известно, скольжение электронных слоев в ионно-пучковой плазме, помещенной в скрещенные электрические и магнитные поля, приводит к возбуждению низкочастотной пучково-дрейфовой неустойчивости [2]. Скольжение может быть вызвано как наличием градиента

магнитного поля, так и градиента электронной плотности. В геометрии ПЛ такая неустойчивость приводит к развитию потенциальных волн большой амплитуды, распространяющихся в азимутальном направлении [3]. При достижении волнами определенной амплитуды может происходить захват электронов полем волны. В силу того что в замагниченной плазме любое отклонение от квазинейтральности приводит к завихрению поля скоростей электронов (см., например, [4,5]), реализация условий их захвата может приводить к формированию вихря или цепочки вихрей в зависимости от количества начальных электронных сгустков, возникающих при развитии неустойчивости на линейной стадии. Под термином вихрь подразумевается локализованная структура, имеющая сепаратрису, внутри которой линии тока замкнуты (ср. с [6]).

В работе [7] с помощью двумерного численного моделирования в условиях, максимально приближенных к эксперименту, исследовалось установление стационарных состояний в азимутально-однородной ПЛ и была показана возможность формирования слоистого распределения электронной плотности. Эти электронные слои в силу принципа эквипотенциализации сосредоточиваются вблизи тех силовых линий, которые проходят через промежутки между цилиндрическими электродами-фиксаторами, обеспечивая таким образом перенос ступенчатого распределения потенциала вдоль электродной системы в объем линзы. Очевидно, что чем больше величина перепада потенциала между соседними электродами, тем больше плотность электронного слоя. В данной работе формировался одиночный плотный слой путем задания одной „ступени“ в распределении потенциала по электродам с большим перепадом напряжения. Именно в этой области возможно возбуждение колебаний большой амплитуды.

Эксперименты проводились на установке, детальная схема и описание которой приведены в [8]. В данном эксперименте использовался импульсно-периодический (длительность — $100 \mu\text{s}$, частота повторения — 1 Hz) широкоапертурный (начальный $\varnothing \approx 6 \text{ cm}$) пучок ионов меди с током 400 mA , извлекаемый из вакуумно-дугового ионного источника [9] ускоряющим напряжением 12 kV . Радиус цилиндрических электродов-фиксаторов используемой ПЛ (в работе [8] эта линза обозначалась как „ПЛк“) составлял 37 mm . Изолирующее магнитное поле создавалось с помощью постоянных магнитов, индукция в центре линзы составляла 40 mT . Максимальный положительный потенциал $\varphi_L = 1 \text{ kV}$ подавался на центральный электрод и несколько парных соседних,

расположенных симметрично относительно центрального, остальные электроды заземлялись. Основная часть экспериментов проводилась при подключении центрального и двух соседних электродов (распределение, условно называемое „SPD“). Давление остаточного газа поддерживалось на уровне не выше $1.5 \cdot 10^{-5}$ Торр.

Измерения азимутального и радиального распределений потенциала и электрического поля наблюдаемых нелинейных волн проводились с помощью емкостных зондов. Азимутальный профиль потенциала волн определялся по временным зависимостям сигналов, регистрируемых зондами. Скорость движения волн по азимуту вычислялась по временному сдвигу фаз колебаний, принимаемых двумя зондами, разнесенными на определенный азимутальный угол. Радиальное поле волн определялось с помощью пары сдвоенных емкостных зондов, расстояние между которыми составляло 5 мм. Диаметр чувствительной части зондов составляла 1 мм, длина — 5 мм. Измерительные цепи имели равные коэффициенты передачи с точностью $\approx 10\%$ в диапазоне частот 100 кГц–15 МГц. Особенности используемых цепей не допускали адекватного измерения величины потенциала на временах, сравнимых с длительностью пучка. По этой причине для определения постоянной (в пределах $\approx 20 \mu\text{s}$) составляющей потенциала в ПЛ использовался одиночный радиально-подвижный ленгмюровский зонд. Постоянная составляющая потенциала измерялась без интегрирования принимаемого тока в областях между электронными сгустками (определяющими наблюдаемые волны), т.е. в тех промежутках, где среда наименее возмущена их полями. В этом смысле распределение потенциала и соответствующее распределение электрического поля, измеряемые с помощью ленгмюровского зонда, мы будем условно называть „фоновыми“.

Все зонды вводились практически параллельно оси системы, чувствительные части располагались в центральном сечении линзы. Для записи сигналов использовался осциллограф С8-14 с полосой пропускания 50 МГц.

Как показали исследования, при значительном различии потенциалов, прикладываемых к соседним электродам, в достаточно широком диапазоне условий в объеме линзы возбуждаются регулярные ангармонические волны большой амплитуды $\sim \varphi_L$ (рис. 1), бегущие в направлении скорости $E \times B$ дрейфа (здесь E — фоновое электрическое поле). Частота вращения ν областей постоянной фазы вокруг оси линзы,

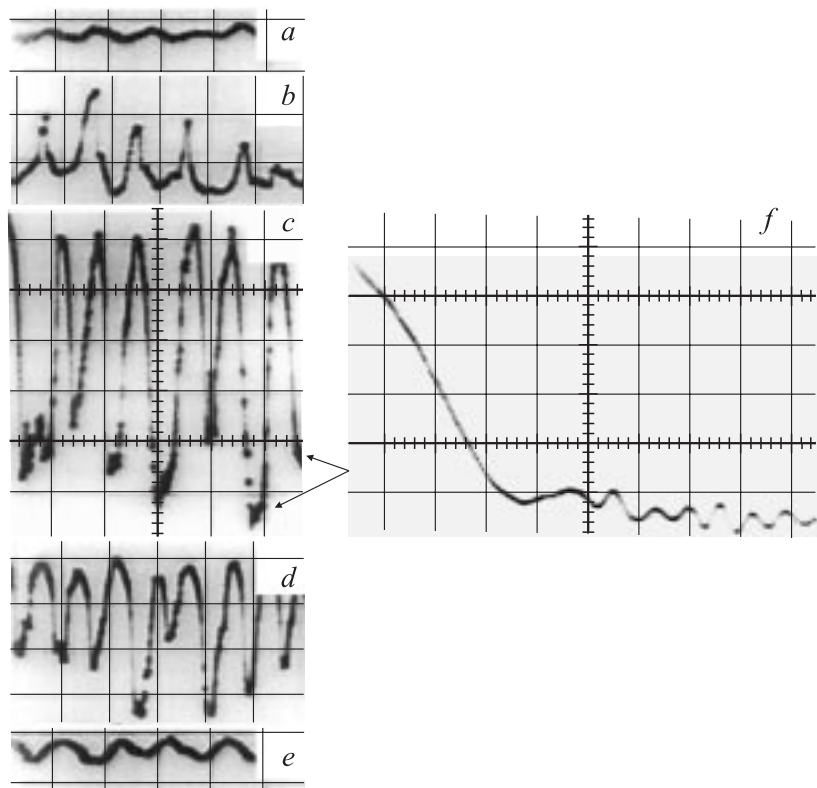


Рис. 1. Осциллограммы колебаний потенциала в центральном сечении линзы, снятые с помощью емкостных зондов; SPD, $\varphi_L = 1$ kV, $m_\theta = 5$; *a* — $r = 5$ mm; *b* — $r = 20$ mm; *c*, *f* — 27.5 mm; *d* — 30 mm; *e* — 32.5 mm; вертикальная раз-
вертка 140 V/дел, горизонтальная — $0.5 \mu\text{s}/\text{div}$, за исключением *f* — $0.02 \mu\text{s}/\text{div}$.

а также количество длин волн m_θ , которые укладываются на 360° , зависят от того, на каком расстоянии от оси с помощью фиксирующих электродов задается скачок потенциала, а также от величины перепада потенциала. При одном и том же напряжении $\varphi_L = 1$ kV в зависимости от используемого распределения потенциала по электродам частота ν составляла $200 \div 500$ kHz, m_θ изменялась в пределах от 4 до 6.

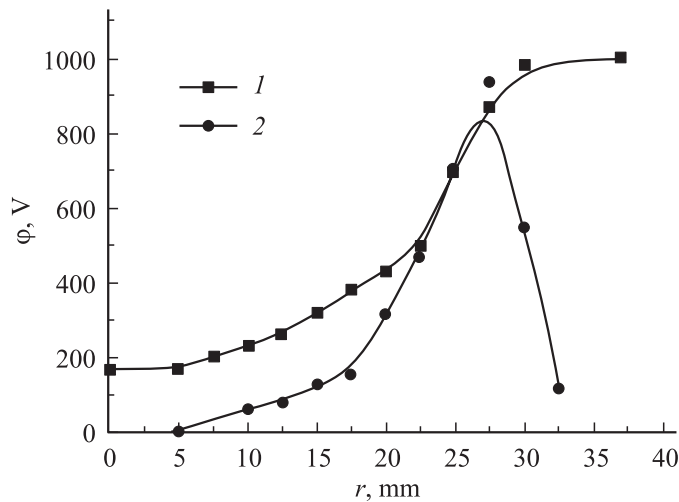


Рис. 2. Радиальные распределения потенциала фонового электрического поля (1) и максимальной амплитуды (размаха) колебаний (2); SPD, $\varphi_L = 1$ kV.

Максимум амплитуды наблюдаемых нелинейных волн располагался в области локализации скачка потенциалов (рис. 2).

Возможность захвата частиц полем волны (или полем электронных сгустков, что эквивалентно) определяется величиной радиальных электрических полей в двух критических областях — на внутренних границах сгустков (ближних к оси) и внешних (ближних к электродам). На внутренних границах фоновое поле и поле сгустков являются противоположно направленными (конкурирующими). В этой области методика проверки выполнения условий захвата очевидна: поле сгустков должно быть больше фонового поля. Действительно, как показали измерения, на расстояниях от оси приблизительно от 17 до 25 mm электрическое поле сгустков существенно превышает фоновое (до трех раз). Здесь и далее приводимые численные параметры относятся к результатам экспериментов, проводившихся при $\varphi_L = 1$ kV, распределение SPD. На внешней границе сгустка условия захвата менее жесткие, в этой области фоновое поле и поле сгустка направлены в одну и ту же сторону. Для проверки этого условия были проведены оценочные численные расчеты траекторий электронов в центральном сечении ПЛ с использованием

распределений электрических полей, полученных экспериментально. В результате было установлено, что условия захвата выполняются с большим запасом и в линзе действительно образуется цепочка вихрей-сгустков, в которых электроны вращаются вокруг их центров со скоростью, намного превышающей скорость движения сгустков как целого. Из имеющихся распределений потенциала и рассчитанных траекторий следует, что вихри имеют форму, близкую к эллиптической, вытянутой по азимуту, их размеры составляют $1 \div 1.5$ см. Из расчета траекторий, в полном соответствии с условием захвата на внутренней границе сгустка, следует, что вихри исчезают лишь при амплитуде волн в 3 раза меньшей наблюдаемой. Дополнительные экспериментальные исследования позволили выявить мелкомасштабные высокочастотные (≈ 70 MHz) колебания, наблюдаемые при прохождении вихря через зонд (см. рис. 1, *c*, области помеченные стрелками, а также рис. 1, *f*, на котором одна из таких областей показана в увеличенном по времени масштабе), причем сопоставление экспериментально измеренной частоты этих колебаний и расчетной частоты вращения показало удовлетворительное согласие. Более того, на рис. 1, *f* видно, что, как и следовало ожидать, ближе к границе вихря частота колебаний меньше, поскольку вблизи сепаратрисы частота вращения электронов в вихре должна быть минимальна. Отметим, что частота вращения электронов фонового распределения вокруг оси системы составляет ≈ 10 MHz, т.е. скорость азимутального движения наблюдаемых структур существенно меньше как скорости дрейфа электронов фона, так и скорости вращения электронов в сгустках. Пользуясь терминологией, предложенной в [4], такие вихри можно характеризовать как медленные.

Таким образом, совокупность полученных результатов, а именно: наличие областей, где поле волн потенциала существенно превышает фоновое поле, формирование локализованных вихрей-сгустков при расчете траекторий движения электронов в электрических полях, полученных экспериментально, удовлетворительное количественное согласие частоты мелкомасштабных колебаний, наблюдаемых при прохождении сгустка через зонд с частотой, полученной при упомянутом выше расчете, а также то, что скорость вращения электронов в сгустках намного превышает скорость их смещения как целого, — позволяют утверждать, что наблюдаемые ангармонические волны потенциала большой амплитуды являются проявлением крупномасштабных медленных электронных вихрей, которые развиваются в объеме ПЛ из пучково-дрейфовой неустойчивости при наличии слоистого распреде-

ления электронной плотности. Отметим, что, как следует из рис. 2, значение потенциала вблизи центров вихрей близко к потенциалу того электрода, на который опираются силовые линии, проходящие через эти области (в данных условиях потенциал этого электрода равен потенциалу земли), т.е. в условиях эксперимента захваченные электроны понижают потенциал пространства до потенциала земли, при этом они получают возможность уходить на электроды ПЛ (нарушается условие продольного удержания) и, таким образом, прекращается их накопление — амплитуда стабилизируется. Амплитуда вихря также может стабилизироваться за счет ухода электронов поперек магнитного поля, если сумма сил инерции и Кулона превысит силу Лоренца (в этом случае вихрь начинает расплываться и в пределе малых магнитных полей охватывает весь объем линзы [4]). Однако, как показывают оценки, в данных экспериментальных условиях количество электронов, накопленных в вихрях, для этого недостаточно и амплитуда стабилизируется по первому из указанных механизмов.

Авторы выражают благодарность И.А. Солошенко и В.И. Маслову за конструктивные дискуссии и полезные замечания.

Список литературы

- [1] Морозов А.И., Лебедев С.В. Плазмооптика // Вопросы теории плазмы. М.: Атомиздат, 1974. Вып. 8. С. 274–380.
- [2] Гришкевич А.Д., Капулкин А.М., Присняков В.Ф. // Ионные инжекторы и плазменные ускорители / Ред. А.И. Морозова, Н.Н. Семашко. М.: Энергоатомиздат, 1990. С. 68–77.
- [3] Goncharov A.A., Dobrovolsky A.N., Zatulagan A.V. et al. // IEEE Trans Plasma Sci. 1993. V. 21. N 5. P. 573–577.
- [4] Гончаров А.А., Маслов В.И., Онищенко И.Н. // Физика плазмы. 2004. Т. 30. № 8. С. 713–721.
- [5] Goncharov A.A., Litovko I.V. // IEEE Trans Plasma Sci. 1999. V. 27. N 4. P. 1073–1078.
- [6] Незлин М.В., Черников Г.П. // Физика плазмы. 1995. Т. 21. № 11. С. 975–999.
- [7] Горшков В.Н., Гончаров А.А., Завалов А.М. // Физика плазмы. 2003. Т. 29. № 10. С. 939–948.
- [8] Гончаров А.А., Проценко И.М., Чех Ю.М. // УФЖ. 2005. Т. 50. № 6. С. 562–567.
- [9] Brown I.G. // Rev. Sci. Instr. 1994. V. 65. N 10. P. 3061–3081.