

Влияние неоднородностей магнитного поля пробочной конфигурации на пространственно-временные характеристики длинноимпульсного релятивистского электронного пучка

© Л.Ю. Богданов, Н.В. Дворецкая, Г.Г. Соминский, А.Я. Фабировский

Санкт-Петербургский государственный технический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 4 октября 1995 г. В окончательной редакции 6 марта 1996 г.)

Экспериментально исследовано влияние локальных неоднородностей магнитного поля пробочной конфигурации на колебания пространственного заряда и структуру длинноимпульсного релятивистского электронного пучка. Установлено, что результат воздействия зависит от аксиального расположения неоднородности. С помощью неоднородности вблизи катода удастся существенно уменьшить амплитуду колебаний и улучшить транспортировку пучка. Создание неоднородности вдали от катода ведет к ускоренному нарастанию колебаний и к расплыванию поперечной структуры пучка. Дано возможное объяснение механизма воздействия локальных неоднородностей магнитного поля с учетом отражения катодной плазмы и потока электронов от магнитной пробки, а также эффекта скачка дрейфовой скорости.

Введение

Возможность использования релятивистских электронных пучков (РЭП) для создания сверхмощных СВЧ устройств (см., например, [1–3]) определяет интерес к изучению их пространственно-временных характеристик. К сожалению, пока существуют лишь отрывочные сведения о колебаниях объемного заряда и структуре РЭП. Особенно мало данных о длинноимпульсных РЭП. Связано это прежде всего со сложностью экспериментального исследования сильноточных электронных потоков высокой энергии. Разработанная нами ранее методика [4–7] дает информацию о “мгновенных” характеристиках колебаний объемного заряда в широкой полосе частот и на разных участках канала транспортировки РЭП. Ее использование позволило определить характеристики спектра колебаний и выявить их изменения в пространстве [6,7]. Для уточнения модели коллективных процессов в данной работе рассмотрено воздействие на колебания объемного заряда и структуру длинноимпульсного РЭП локальных неоднородностей магнитного поля пробочной конфигурации в канале транспортировки пучка.

Методика измерений и аппаратура

Измерения выполнены на установке СЭР-1, описанной в [4,8]. На рис. 1, а схематически показано сечение системы формирования и транспортировки РЭП. Электроны со взрывоэмиссионного кромочного катода 1 диаметром 20 мм, изготовленного из нержавеющей стали, ускорялись напряжением U в зазоре между катодом и анодом 3, затем дрейфовали в магнитном поле внутри соединенного электрически с анодом канала транспортировки 4 и осаждались на коллекторе 6 в спадающем магнитном поле. Канал транспортировки имел диаметр 32 мм и длину ~ 1.2 м. Катод находился на расстоянии 27 мм от анода.

Ток коллектора I_{col} достигал в импульсе 1.1 кА. Его изменения во времени контролировались при исследовании колебаний пространственного заряда по рентгеновскому излучению с коллектора [7]. Из-за существования конечного сопротивления в цепи разряда генератора импульсных напряжений (ГИН) напряжение U уменьшалось на фронте импульса тока I_{col} от 220 до 180 кВ.

Для создания магнитного поля использовались четыре соосных основных соленоида 7, а также вспомогательные катушки 9 и 10, расположенные соответственно на расстояниях 0.2 и 0.6 м от катода. При выключенных катушках формировалось импульсное магнитное поле B_0 длительностью приблизительно 10 мс, неоднородности которого вдали от краев системы соленоидов не превышали 10%. Распределение магнитной индукции B_0 вдоль оси z показано на рис. 1, б сплошной кривой. С помощью катушек, подключаемых последовательно с соленоидами, вводились локальные неоднородности магнитного поля пробочной конфигурации (штриховая кривая). Изменения магнитного поля $\Delta B(z)$ достигали максимальной величины ΔB_m под серединой катушек. Неоднородности имели полуширину ~ 0.1 м. Измерения выполнены при фиксированном $B_0 = 1$ Тл.

Для определения характеристик колебаний объемного заряда использовались зонды 11 и 12, расположенные соответственно на расстояниях 0.4 и 0.8 м от катода и регистрирующие, согласно проведенному в [5–7] анализу, практически только наведенные сигналы. В специальных холодных измерениях, меняя углубление зондов относительно отверстий в канале транспортировки, устанавливали приблизительно одинаковую (с точностью $\sim 20 \dots 30\%$) их чувствительность по отношению к колебаниям пространственного заряда в пучке. Фиксировались протектированные сигналы зондов, что позволяло выявить изменения амплитуды колебаний во времени.

Для определения поперечной структуры РЭП наблюдалось рентгеновское излучение с торцевого коллектора.

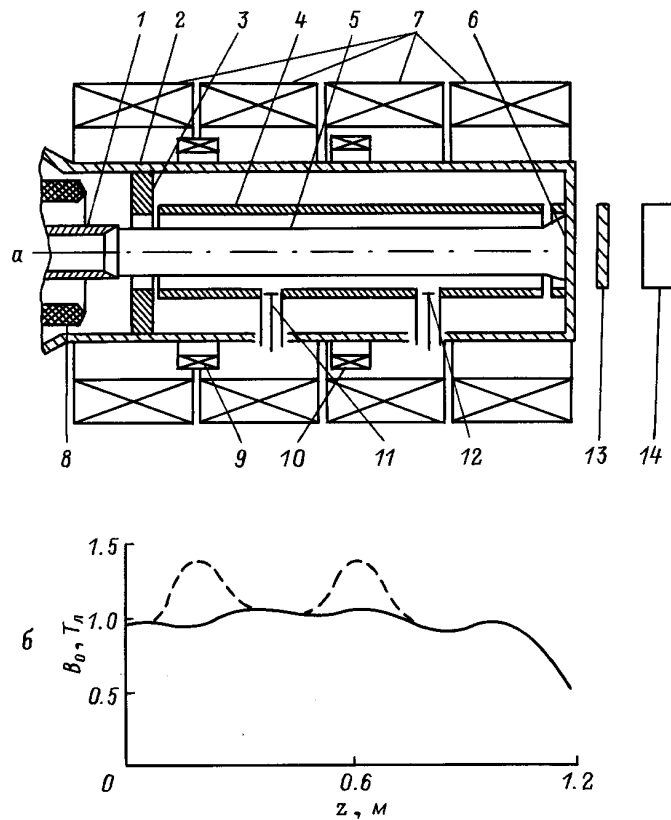


Рис. 1. *a* — схема сечения системы формирования и транспортировки РЭП: 1 — катод; 2 — вакуумная оболочка; 3 — анод; 4 — канал транспортировки; 5 — электронный пучок; 6 — коллектор; 7 — соленоиды для создания магнитного поля B_0 ; 8 — охранный электрод; 9, 10 — вспомогательные катушки; 11, 12 — ВЧ зонды; 13 — камера-обскура; 14 — РЭОП; *b* — зависимость магнитной индукции от z : сплошная линия — при отсутствии локальных неоднородностей, штриховая — локальные неоднородности магнитного поля, создаваемые катушками 9 и 10. Торцев катода (1) и поверхность торцевого коллектора (6) расположены соответственно при $z = 0$ и $z = 1.2$ м.

Распределение рентгеновского излучения в плоскости коллектора фиксировалось с помощью специального рентгеновского электронно-оптического преобразователя (РЭОП), подобного описанному в работе [9]. Излучение с коллектора попадало на вход РЭОП через камеру-обскуру с отверстием диаметром ~ 1 мм. Питание РЭОП импульсами длительностью ~ 100 нс позволяло получать сведения о структуре РЭП в разные моменты времени, изменяя задержку импульса питания относительно импульса тока пучка. Используя постоянное напряжение питания, можно было определять и усредненную за время импульса τ_b структуру пучка. В измерениях с РЭОП обеспечивалось пространственное разрешение $\sim 2 \dots 3$ мм.

Исследования выполнены при непрерывной откачке экспериментального прибора. Давление в нем не превышало 10^{-5} Тор.

Результаты измерений и их обсуждение

Создание локальных неоднородностей магнитного поля пробочной конфигурации вело к заметным изменениям интенсивности колебаний. На рис. 2 показаны

типичные изменения со временем тока коллектора I_{col} (рис. 2, *a*) и амплитуды A продетектированных сигналов с зондов 11 и 12 в отсутствие локальных неоднородностей магнитного поля (рис. 2, *b*), а также при создании локальных одиночных неоднородностей магнитного поля амплитудой $\Delta B_m / B_0$ около 30% с помощью катушек 9 (рис. 2, *в*) и 10 (рис. 2, *z*).

Если неоднородностей магнитного поля нет, вплоть до вершины импульса тока коллектора I_{col} (~ 1.2 мкс) сигналы зондов монотонно увеличиваются во времени (рис. 2, *b*). При этом амплитуда на удаленном от катода зонде 12 заметно больше, чем на зонде 11, что обусловлено нарастанием вдоль пучка волн пространственного заряда [6,7]. Спад тока I_{col} после вершины импульса ведет к уменьшению сигнала только на удаленном от катода зонде. Сигнал же зонда 11 продолжает увеличиваться, достигая максимального значения приблизительно через $1.7 \dots 1.8$ мкс после начала импульса. Это увеличение связано, видимо, с приходом к зонду 11 катодной плазмы. При существующем расположении зондов средняя скорость плазмы должна быть $\sim 2 \cdot 10^7$ см/с, что согласуется с измерениями других авторов [3,10]. Удаленный от катода зонд 12, регистрирующий, как и зонд 11, коле-

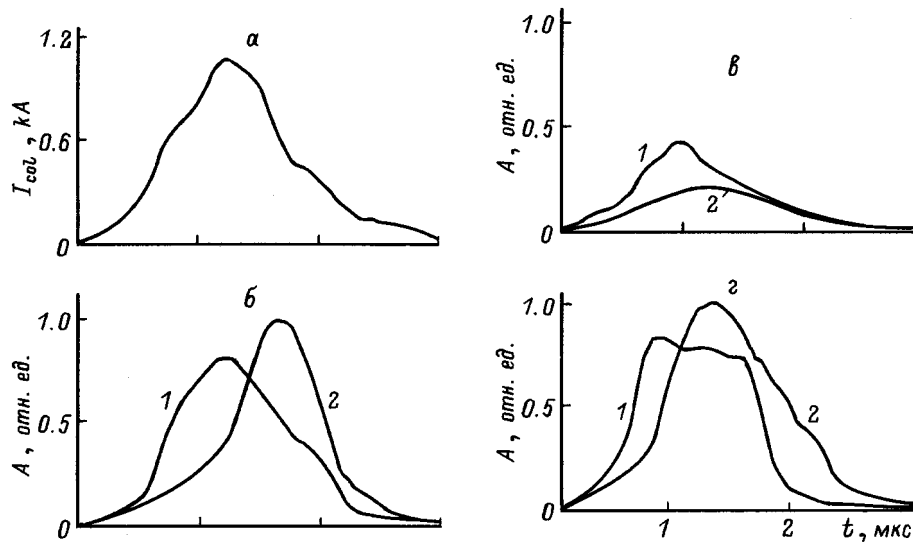


Рис. 2. Изменения во времени тока коллектора и амплитуды протектированных сигналов с зондов 12 (1) и 11 (2). Значения A указаны в отн. ед., единых для всех графиков.

бания только из ближней зоны РЭП, в течение времени $t < 2.5 \dots 3$ мкс "не ощущает" влияния плазмы.

Введение неоднородности магнитного поля с помощью катушки 10 ведет к увеличению скорости нарастания колебаний обоих зондов. Наибольшие по величине сигналы зонда 12 (область $0.5 \leq t \leq 1.6$ мкс на рис. 2, г) близки к максимальным в отсутствие локальных неоднородностей магнитного поля (рис. 2, б).

Более быстрое (по сравнению со случаем $\Delta B = 0$) нарастание колебаний зонда 11 в интервале времен $t \leq 1$ мкс (рис. 2, г) находит объяснение, если магнитная пробка вблизи катушки 10 способна вызвать отражение электронов пучка. Отражение ведет, видимо, к развитию и быстрому увеличению амплитуды колебаний в своеобразной ловушке между катодом и магнитной пробкой подобно тому, как это происходит в винтовых электронных пучках систем гиротронного типа [6,11]. При адиабатическом изменении магнитного поля B от пробки отражаются электроны, для которых отношение поперечной ($V_{\perp 0}$) и продольной ($V_{\parallel 0}$) составляющих скорости перед пробкой удовлетворяет условию

$$\frac{V_{\perp 0}}{V_{\parallel 0}} \geq (B_0 / \Delta B_M)^{1/2}.$$

Отсюда следует, что в РЭП должны существовать электроны, имеющие достаточно большие поперечные скорости $V_{\perp 0} \geq 1.7 \cdot V_{\parallel 0}$ вблизи катушки 10, так как отражение наблюдается при $B_0 / \Delta B_M \simeq 3$. Электроны с таким соотношением составляющих скорости принципиально могут возникать при эмиссии с боковой поверхности катодной плазмы в канале транспортировки, где велико поперечное магнитному электрическое поле. Увеличению отношения $V_{\perp 0} / V_{\parallel 0}$ может способствовать и действие переменных полей пространственного заряда.

Ускоренное при включенной катушке 10 нарастание амплитуды сигнала зонда 12 может быть следствием

воздействия колебаний в ловушке на развитие волн пространственного заряда или результатом дополнительной группировки электронных сгустков в потоке, проходящем через неоднородность магнитного поля. Такой эффект усиления группировки обнаруживается, как известно (см., например, [12,13]), в присутствии колебаний пространственного заряда на участках падения скорости (скачка дрейфовой скорости) электронов.

Отлично от описанного воздействие неоднородного магнитного поля катушки 9 (рис. 2, в). Резкое уменьшение амплитуды сигнала зонда 11 в интервале времен $1.0 < t < 2.5$ мкс определяется, очевидно, отражением от магнитной пробки потока плазмы с катода. Падение же сигналов зонда 11 при $t < 1$ мкс и зонда 12 в течение всего импульса тока РЭП, видимо, связано с механизмами, которые не играли решающей роли при включении катушки 10.

Чтобы понять, почему одинаковые неоднородности магнитного поля на разных вдоль оси участках системы по-разному влияют на коллективные процессы в РЭП, обратим внимание на то, что эти неоднородности создаются на разных расстояниях от катода в областях пучка с сильно отличающимися амплитудами переменных полей. Нарастание с удалением от катода волн пространственного заряда способно заметно изменить поперечные скорости электронов и распределение тока в сечении пучка. Именно эти изменения могут определить различия в воздействии неоднородных полей, создаваемых катушками 10 и 9. От амплитуды переменных полей в потоке может зависеть и развитие эффекта скачка дрейфовой скорости.

В пользу такого объяснения, учитывающего колебания пространственного заряда, говорят исследования структуры РЭП у коллектора. Они свидетельствуют о влиянии зарегистрированных колебаний на удержание электронов и распределение тока в сечении пучка. Полученные

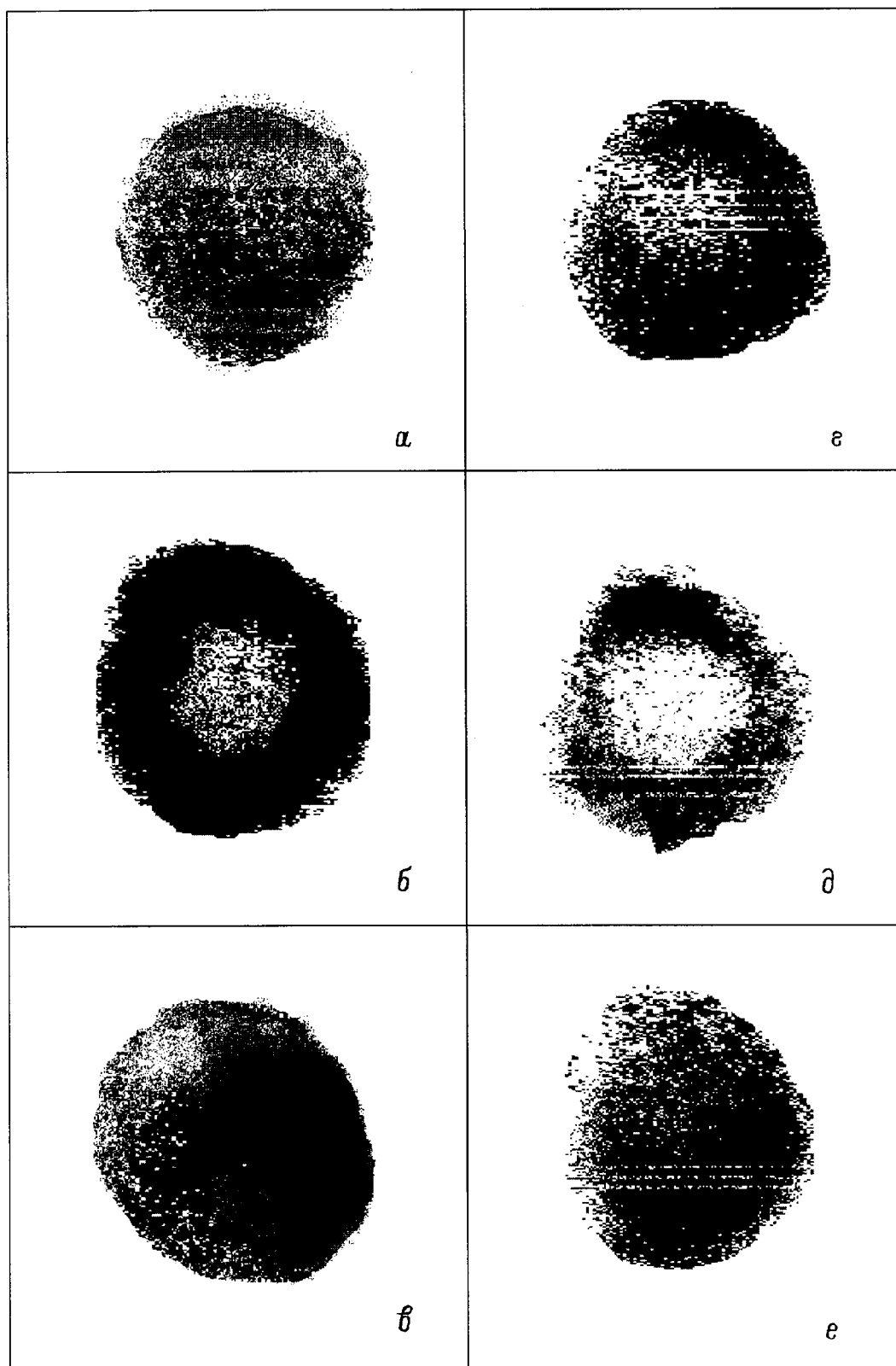


Рис. 3. Типичные "рентгеновские" изображения следа РЭП на торцевом коллекторе. *a, г* — для пучка, распространяющегося в однородном магнитном поле; *б, д* — в присутствии неоднородности магнитного поля, создаваемой катушкой 9; *в, е* — в присутствии неоднородности магнитного поля, создаваемой катушкой 10; *a-в* — усредненные во времени изображения; *г-е* — мгновенные изображения в середине переднего фронта импульса тока РЭП.

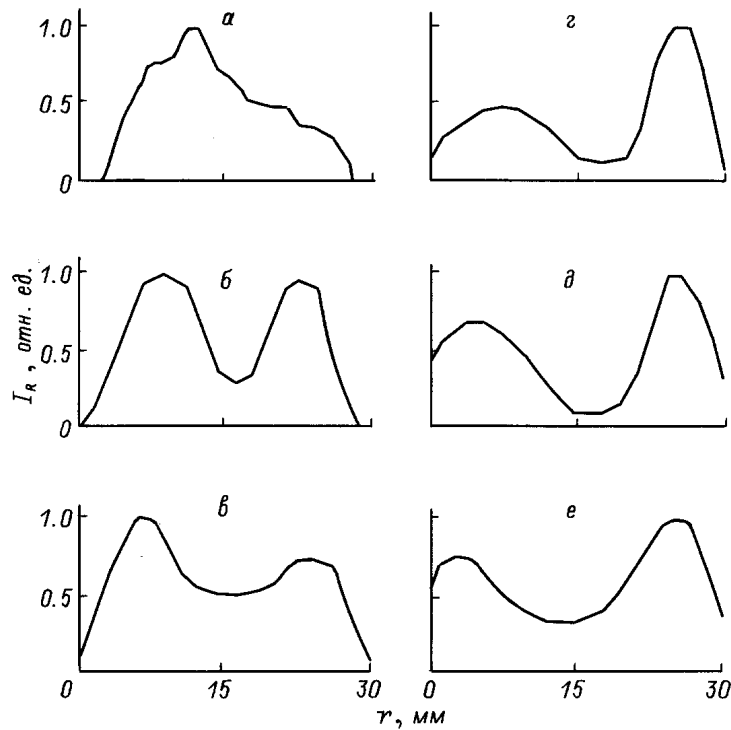


Рис. 4. Радиальные распределения интенсивности свечения I_R экрана РЭОП, зафиксированные в однородном магнитном поле ($a-e$) и в присутствии неоднородности магнитного поля, создаваемого катушкой 9 ($z-e$). a, z — усредненные во времени распределения; b, d — мгновенные распределения в середине переднего фронта импульса тока РЭП; e, e — мгновенные распределения в вершине импульса тока РЭП. Значения I_R указаны в отн. ед. Характеристики $I_R(r)$ пронормированы так, что максимальное значение I_R на каждом графике равно 1. Отсчет радиальной координаты r ведется от края изображения.

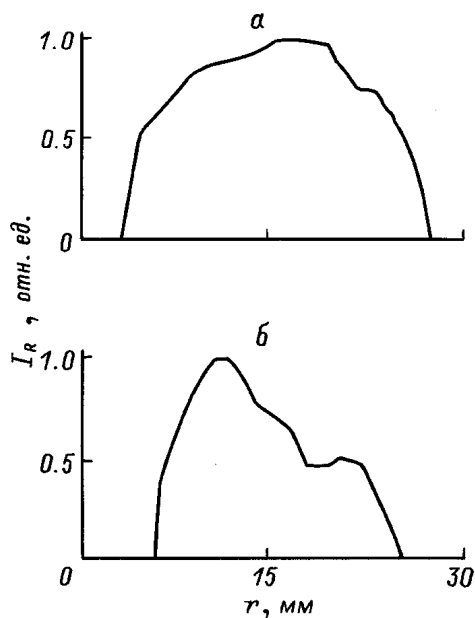


Рис. 5. Радиальные распределения интенсивности свечения I_R экрана РЭОП, зафиксированные в присутствии неоднородности магнитного поля, создаваемого катушкой 10. a — усредненное во времени распределение, b — мгновенное распределение в середине переднего фронта импульса тока РЭП.

данные иллюстрируют рис. 3–5, на которых показаны типичные “рентгеновские” изображения следа пучка на торцевом коллекторе (рис. 3) и распределения в радиальном направлении интенсивности $I_R(r)$ свечения экрана РЭОП (рис. 4, 5). Учитывая уменьшение магнитного поля у торцевого коллектора (B_{col}) по сравнению с полем у катода (B_c) и соответствующее расширение пучка, линейный масштаб по оси абсцисс на рис. 4 и 5 уменьшен в $(B_c/B_{col})^{1/2}$ раз. Это создает определенные удобства для выявления изменений формы сечения пучка у коллектора по сравнению с катодом.

В отсутствие локальных неоднородностей магнитного поля сравнительно невелик (не превышает ~ 3 раз) перепад интенсивности по сечению пучка (рис. 3, a, z и 4, a, b). Мгновенные распределения $I_R(r)$ существенно меняются в течение импульса (рис. 4, b, e), и на усредненном во времени распределении не видна кольцевая структура пучка (рис. 3, a и 4, a). Сравнение мгновенных распределений в разные моменты времени свидетельствует об увеличении диаметра пучка со скоростью $2-4 \cdot 10^5$ см/с на фронте импульса, что согласуется с существующими литературными данными [3,10] и обусловлено расширением катодной плазмы. “Размытость” пучка в этих условиях определяется, вероятно, действием переменных полей, колебаниями РЭП.

Введение неоднородности магнитного поля с помощью катушки 9 повышает контраст изображения и стабили-

зирует его (рис. 3, б, д; 4, б, д, е). В результате кольцевая структура РЭП отчетливо проявляется и на усредненном во времени распределении. Перепад величины I_R по сечению пучка достигает ~ 10 раз. Изменение распределения РЭП в сечении связано, очевидно, с подавлением колебаний пространственного заряда в пучке неоднородностью магнитного поля пробочной конфигурации (рис. 2, в) вблизи катода. Создание такой неоднородности улучшает удержание и транспортировку РЭП.

Введение неоднородности магнитного поля с помощью удаленной от катода катушки I_0 ухудшает удержание РЭП даже по сравнению со случаем, когда выключены обе катушки. Это проявляется в увеличении интенсивности свечения I_R центральной области его сечения (ср. рис. 3, г и 3, е, а также рис. 4, б и 5, б) и связано с усилением колебаний (рис. 2, з).

Основные результаты и выводы

В работе определены пространственно-временные характеристики длинноимпульсного РЭП и влияние на них неоднородностей магнитного поля пробочной конфигурации. Дано объяснение механизма воздействия неоднородностей на колебания и структуру РЭП с учетом отражения плазмы и потока электронов от магнитной пробки, а также эффекта скачка дрейфовой скорости. Выявлена возможность подавления колебаний пространственного заряда и улучшения транспортировки РЭП с помощью неоднородного магнитного поля вблизи катода.

Авторы благодарны студенту Б.А. Мокрову за помощь в работе, а также участникам семинара по сильноточной электронике кафедры физической электроники СПбГТУ за обсуждение материалов.

Работа частично финансировалась Российским фондом фундаментальных исследований РАН.

Список литературы

- [1] Релятивистская высокочастотная электроника / Под ред. А.В. Гапонова-Грехова. Горький: Изд-во ИПФ АН СССР, 1979. 297 с.
- [2] Релятивистская высокочастотная электроника / Под ред. А.В. Гапонова-Грехова. Горький: Изд-во ИПФ АН СССР, 1983. 240 с.
- [3] Бугаев С.П., Канавец В.И., Кошелев В.И., Черепенин В.А. Релятивистские многоволновые СВЧ генераторы. Новосибирск: Наука, 1991. 296 с.
- [4] Богданов Л.Ю., Воскресенский С.В., Соминский Г.Г. // Проблемы физической электроники. Л.: Изд-во ЛИЯФ, 1991. С. 102–119.
- [5] Архипов А.В., Богданов Л.Ю., Воскресенский С.В. и др. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1995. Т. 3. № 4.
- [6] Архипов А.В., Богданов Л.Ю., Воскресенский С.В. и др. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1995. Т. 3. № 5.
- [7] Богданов Л.Ю., Соминский Г.Г. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 12. С. 77–84.
- [8] Архипов А.В., Богданов Л.Ю., Воскресенский С.В. и др. // Проблемы физической электроники. Л.: Изд-во ЛИЯФ, 1989. С. 28–47.
- [9] Бахшаев Ю.Л., Басманов А.Б., Блинов П.И. и др. // Физика плазмы. 1989. Т. 15. № 8. С. 992–999.
- [10] Горев В.В., Долгачев Г.И., Закатов Л.П. и др. // Физика плазмы. 1985. Т. 11. № 7. С. 782–786.
- [11] Лукша О.И., Цыбин О.Ю. // Лекции по электронике СВЧ и радиофизике (9-я зимняя школа-семинар инженеров). Саратов: Изд-во СГУ. 1993. С. 20–29.
- [12] Соминский Г.Г., Цыбин О.Ю. // Тез. докл. IX Всес. конф. по электронике СВЧ. Саратов: Изд-во СГУ, 1979. Т. 1. С. 115.
- [13] Гельвич Э.А., Соминский Г.Г. // Электронная промышленность. 1981. № 7–8. С. 20–25.