

09;10;12

©1995 г.

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

*Л.Ю.Богданов, Г.Г.Соминский*

Санкт-Петербургский государственный технический университет,

195251, Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 3 августа 1994 г.

В окончательной редакции 17 января 1995 г.)

Разработана и реализована слабозмущающая методика исследования пространственно-временных характеристик коллективных процессов в объемном заряде РЭП. Определены амплитудно-частотные характеристики колебаний пространственного заряда на разных участках импульса тока и в разных областях канала транспортировки в широком интервале изменения тока пучка (300...1000 А) и удерживающего магнитного поля (0.15–1.0 Тл). Обнаружены интенсивные колебания на частотах 100...2500 МГц. Установлена конвективная природа нарастания колебаний на переднем фронте импульса. Выявлено изменение спектра колебаний вдоль пучка, обусловленное, видимо, изменениями его структуры. Обнаружено влияние катодной плазмы на колебания в канале транспортировки РЭП. Определена частота колебаний, излучаемых распадающейся плазмой.

### Введение

Одной из трудноразрешимых проблем СВЧ электроники больших мощностей является создание длинноимпульсных релятивистских электронных пучков (РЭП) высокого качества. Препятствуют этому коллективные процессы в пространственном заряде РЭП, явления, связанные с возникновением и движением катодной и коллекторной плазмы (см., например, [1–4]). Для выявления эффективных путей совершенствования систем формирования и транспортировки РЭП необходимы сведения о происходящих в них колебаниях пространственного заряда.

В настоящей работе предпринята попытка определить пространственно-временные характеристики коллективных процессов в РЭП. Выполненные ранее исследования ограничивались регистрацией колебаний с частотами ниже ~ 100 МГц [5] или выше ~ 2000–5000 МГц [6,7]. Использование разработанной нами методики [4] позволяет одновременно фиксировать колебания в широкой полосе частот от 100 до

5000 МГц. Для определения пространственных характеристик колебательных процессов в данной работе регистрировались и сравнивались высокочастотные сигналы из разных участков канала транспортировки РЭП.

## Методика измерений и аппаратура

Исследования проведены на установке СЭР-1 [3] в диоде с магнитной изоляцией, схема которого показана на рис. 1. Электроны в взрывоэмиссионной кромочного катода 1 диаметром 20 мм, изготовленного из нержавеющей стали, ускорялись напряжением  $U$ , подаваемым на катод относительно заземленных корпуса прибора 2, графитового анода 3 и металлического канала транспортировки 4 длиной 1 м и внутренним диаметром  $d_t = 36$  мм. Пучок электронов 5, эмиттированных с катода, распространялся в приблизительно однородном магнитном поле  $B_t$  в канале 4 и оседал на коллекторе 6 в уменьшающемся краевом поле магнитной системы. Магнитное поле создавалось четырьмя соосными соленоидами 7. Неоднородность магнитного поля  $B_t$  не превышала 10%.

Измерения выполнены в режиме разовых импульсов длительностью  $\tau_i \sim 2$  мкс при фиксированном напряжении  $U = 220$  кВ в широком интервале магнитных полей  $0.15 < B_t < 1.0$  Тл. Импульсы магнитного поля имели длительность  $\sim 10$  мс. Ток пучка  $I$  регулировался в пределах от 0.3 до 1.1 кА по методике, описанной в [8], осевым перемещением катода 1 относительно соединенного с ним электрически неподвижного охранного электрода 8.

Как показали выполненные ранее исследования [4], поперечная структура РЭП существенно меняется в указанном интервале магнитных полей. Пучок имеет кольцевое сечение с толщиной стенки существенно меньше радиуса РЭП только при магнитных полях  $B_t > 0.5$  Тл. Уменьшение магнитного поля до 0.35 Тл приводит к приблизительно однородному распределению плотности тока в сечении пучка. Таким образом, измерения при разных магнитных полях позволяют выявить связь колебаний пространственного заряда с поперечной структурой РЭП.

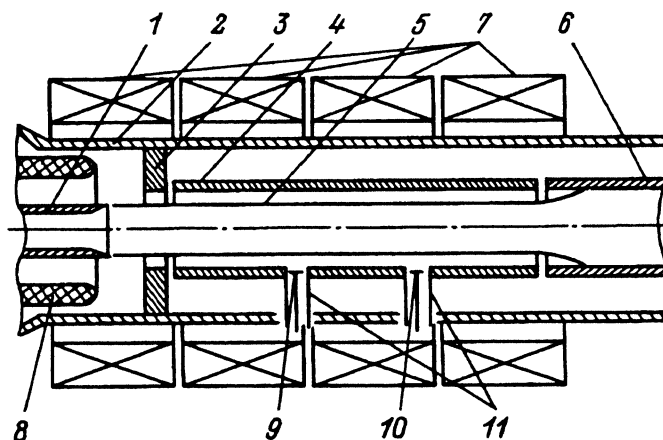


Рис. 1. Схема сечения экспериментального прибора.

Характеристики колебаний пространственного заряда в канале транспортировки определялись с помощью двух одинаковых зондов 9 и 10, разнесенных вдоль оси канала транспортировки на расстояние 40 см и сообщающихся с полостью внутри канала 4 через малое (диаметром 3 мм) отверстие. Расположение зондов показано на рис. 1. Зонд 9 находился на расстоянии 40 см от катода.

Чтобы свести к минимуму влияние на развитие колебаний в пучке своеобразного резонатора, образованного корпусом прибора 2 и каналом транспортировки 4, анод 3, расположенный у входа в канал, был изготовлен из углерода и выполнял одновременно роль поглотителя ВЧ колебаний.

Сигналы с зондов коаксиальными кабелями 11 подавались на широкополосные осциллографы типа С7-19 в специальной измерительной комнате [3]. Фокусировались разовые временные реализации сигналов длительностью от 6 до 600 нс. Фурье-анализ этих реализаций, выполняемый с помощью ЭВМ, позволял определять "мгновенный" спектр колебаний [4]. Сигналы с экранов осциллографов вводились в ЭВМ с помощью специальной телевизионной системы.

Для предотвращения прямого попадания электронов большой энергии с катода на зонды они были углублены относительно внутренней поверхности канала 4 приблизительно на 2 мм. При такой конструкции зондов на них могут попасть только медленные вторичные электроны, образующиеся, например, в результате ионизации остаточного газа над их поверхностью. Перенос этих электронов к зонду возможен под действием возникающих в канале ВЧ полей. Зонд доступен медленным электронам только из сравнительно небольшого телесного угла. Таким образом, существует возможность регистрации зондами не только наведенных ВЧ сигналов, обусловленных коллективными движениями пространственного заряда, но и ВЧ модуляции потока медленных вторичных электронов. Однако в обоих случаях, если исключить проникновение в регистрирующую аппаратуру паразитных сигналов, зонды "связаны" преимущественно с коллективными процессами в ближней зоне. В этом случае, сравнивая полученные одновременно сигналы с зондов, можно определить изменения характеристик колебательных процессов вдоль оси.

Принципиально зонды могут фиксировать ВЧ сигналы из дальней зоны РЭП, распространяющиеся вдоль канала транспортировки. Но критическая длина волны этого круглого волновода  $\lambda_{cr} < \pi d_t$ . Поэтому ВЧ сигналы из дальней зоны на частотах менее 2500 МГц существенно ослаблены. Основные же измерения в данной работе выполнены в наименее исследованном ранее диапазоне от 100 до 2500 МГц.

Тщательная экранировка защищала зонды от внешних наводок. Чтобы свести к минимуму паразитные сигналы в измерительной комнате при исследовании колебательных процессов, ее связь с экспериментальной установкой осуществлялась только по кабелям зондов. Изменения во времени тока пучка фиксировались с помощью специального изолированного от экспериментального прибора датчика по изменению рентгеновского излучения с коллектора. На рис. 2 показана типичная форма зарегистрированного таким образом импульса тока. Использование разработанной системы синхронизации позволяло определять характеристики ВЧ колебаний на разных участках импульса, а также после его окончания. Для выявления закономерностей

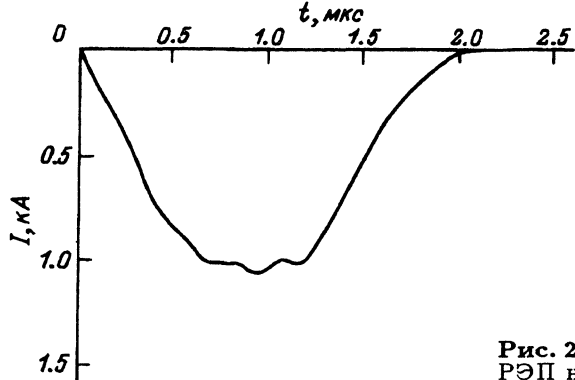


Рис. 2. Форма импульса тока РЭП на коллектор.

изменения характеристик колебаний во времени была предусмотрена возможность сравнения реализаций сигналов, полученных с одного из зондов на разных участках импульса тока.

Для доказательства того, что принятые меры позволили регистрировать интересующие нас колебания пространственного заряда, были проведены контрольные измерения. В созданном экспериментальном приборе предусмотрена возможность экранировать зонды от пучка с помощью специального тонкостенного (с толщиной стенки  $\sim 100$  мкм) металлического цилиндрического электрода, перемещаемого вдоль оси и перекрывающего в одном из своих положений зондовые отверстия в канале транспортировки. Такая экранировка приводила к пропаданию ВЧ сигналов. Сигналы исчезали и в случае, если при отключении части катушек магнитной системы пучок осаждался на стенках канала до зондов. Такие измерения подтверждают связь зондов с колебаниями пространственного заряда в ближней от них зоне.

Для выявления относительной роли наведенных сигналов и тока на зонды медленных электронов измерения выполнены при разных давлениях остаточного газа в интервале от  $10^{-6}$  до  $10^{-5}$  Тор. Практическое отсутствие связи амплитуды сигналов с давлением свидетельствует, на наш взгляд, о том, что они обусловлены в основном наведенными сигналами.

## Результаты измерений

Колебания пространственного заряда возникают с заметной задержкой  $\Delta t \sim 0.4-0.8$  мкс относительно начала импульса тока. Спектры колебаний, регистрируемых обоими зондами, в исследованных режимах качественно подобны. Наиболее стабильны и воспроизводимы колебания вблизи вершины импульса тока. Выделяются пики на дискретных частотах в интервале от 500 до 1500 МГц. Значение частот на вершине импульса, соответствующих максимальной амплитуде  $A_m$  колебаний, несколько отличаются для зондов 9 и 10 и близки соответственно к 1400 и 1000 МГц.

На рис. 3 показаны типичная реализация сигнала с зонда 10 (а) длительностью 6 нс и полученный в результате ее обработки "мгновенный" спектр (б). Отмечены максимальная его амплитуда  $A_m$  и соответствующая частота  $f_m$ . Амплитуда колебаний увеличивается с ростом тока пучка  $I$  и магнитного поля  $B_t$ .

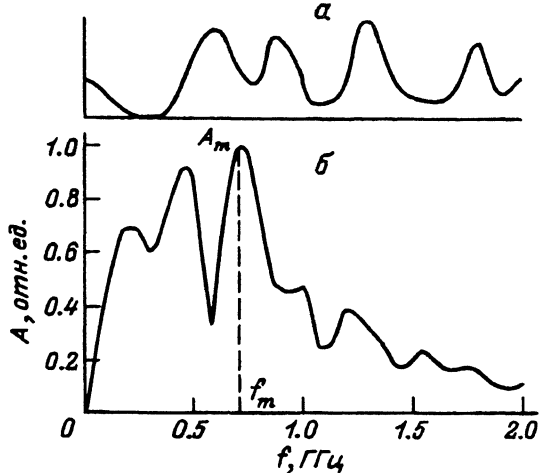


Рис. 3. Типичная реализация сигнала с зонда 10 длительностью 6 нс (а) и полученный в результате ее обработки мгновенный спектр (б).

Рис. 4 иллюстрирует изменения  $A_m$  с  $I$  (а) и  $B_t$  (б). Приведены характеристики, полученные в результате обработки спектров более ста реализаций сигналов с зонда 10. Разброс значений  $A_m$  при фиксированных токе и магнитном поле ограничен пределами заштрихованных зон. Согласно проведенной в холодных измерениях калибровке чувствительности зондов по отношению к ВЧ полям в канале транспортировки при токе  $I = 1100$  А и магнитном поле  $B_t = 0.75$  Тл ВЧ поля РЭП вблизи зонда достигают значений  $\sim 10^6$  В/м.

Принципиально наблюдаемые колебания могут быть обусловлены высокочастотной модуляцией тока с катода [2]. Однако рост их интенсивности во времени, а также с увеличением тока и магнитного поля свидетельствуют, на наш взгляд, о связи колебаний с развитием неустойчивости пространственного заряда РЭП. Рост тока при фиксированном магнитном поле и увеличение магнитного поля при заданном

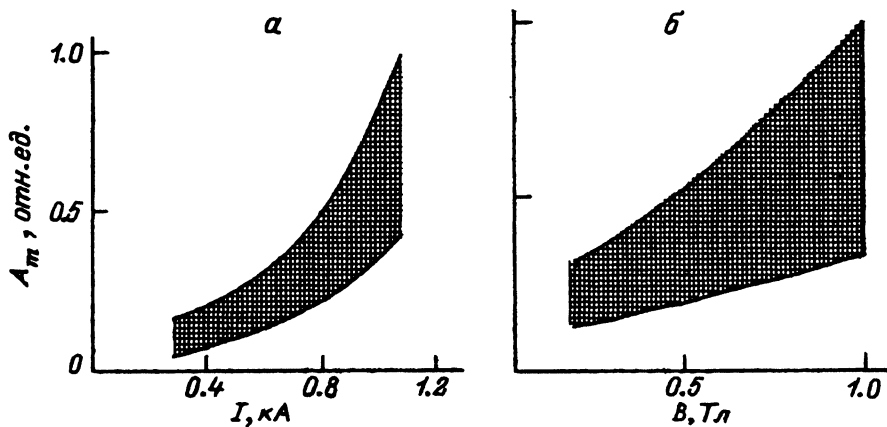


Рис. 4. Зависимости изменения величины  $A_m$  от тока  $I$  при  $B_t = 0.75$  Тл (а) и от магнитного поля  $B_t$  при  $I = 1100$  А (б).

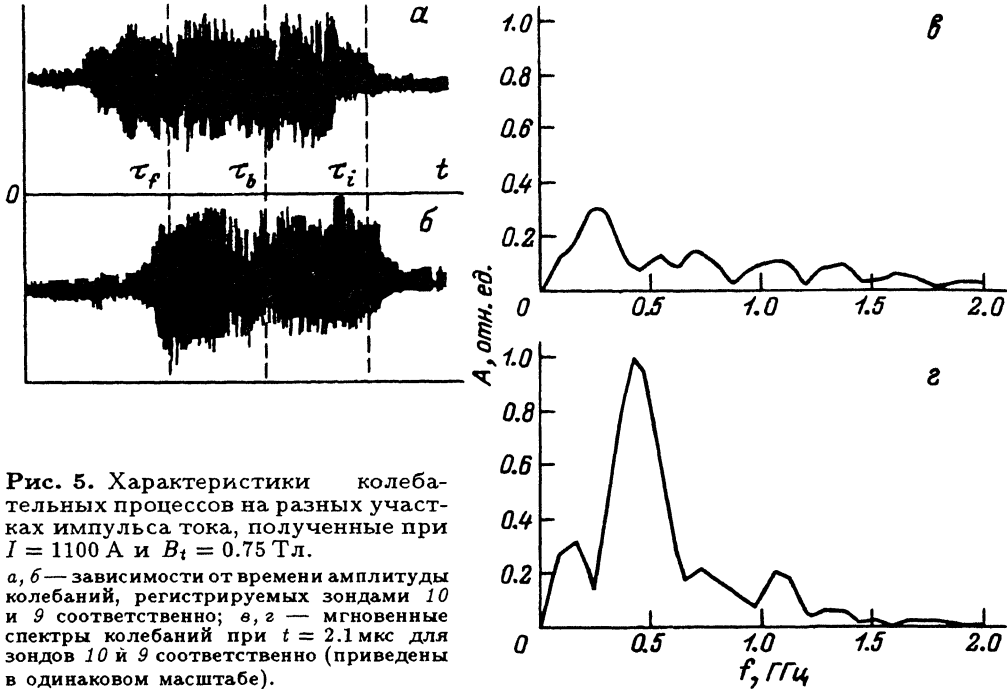


Рис. 5. Характеристики колебательных процессов на разных участках импульса тока, полученные при  $I = 1100$  А и  $B_t = 0.75$  Тл.

$a, б$  — зависимости от времени амплитуды колебаний, регистрируемых зондами 10 и 9 соответственно;  $v, z$  — мгновенные спектры колебаний при  $t = 2.1$  мкс для зондов 10 и 9 соответственно (приведены в одинаковом масштабе).

токе повышают концентрацию электронов в кольцевом сечении РЭП, что, как известно (см., например, [9,10]), ведет к росту скорости нарастания волн пространственного заряда, связанных, например, с наличием градиентов скоростей электронов в продольном и в поперечном магнитному полю направлениях.

Отмеченное выше различие частот  $f_m$  наиболее интенсивных колебаний разных зондов может быть обусловлено изменением структуры РЭП вдоль его оси, связанным, например, с его "шнурованием" [11].

Для получения дополнительной информации о закономерностях и механизмах колебательных процессов в РЭП интересно проследить более подробно их изменение в пространстве и во времени.

Регистрация последовательности реализаций максимальной (для осциллографа С7-19) длительности 600 нс позволила восстановить достаточно общую картину изменения интенсивности колебательных процессов в канале транспортировки РЭП в течение времени. На рис. 5 показаны построенные таким образом типичные характеристики амплитуды колебаний для зондов 10 ( $a$ ) и 9 ( $б$ ). Здесь же отмечены начало импульса тока ( $t = 0$ ), конец переднего фронта ( $t = \tau_f$ ) и вершины ( $t = \tau_B$ ), а также момент окончания тока пучка ( $t = \tau_i$ ). В разных импульсах хорошо воспроизводятся следующие основные закономерности.

Задержка  $\Delta t$  возникновения интенсивных колебаний различна для зондов 9 и 10. Величина  $\Delta t = \Delta t_1$  на зонде 9 ( $\sim 0.6$  мкс) заметно больше соответствующего значения  $\Delta t_2$  ( $\sim 0.4$  мкс) зонда 10.

Сравнение полученных одновременно мгновенных спектров сигналов с зондов 9 и 10 свидетельствуют о конвективной природе нарастания колебаний, так как на фронте импульса они усиливаются с удале-

нием от катода. Приблизительно равенство максимальных значений амплитуд сигналов на вершине импульса говорит о существовании эффективного нелинейного механизма ограничения их интенсивности.

На заднем фронте импульса амплитуда колебаний падает, но высокочастотные сигналы удается зарегистрировать на обоих зондах и по окончании тока пучка ( $t > 2$  мкс). Спад интенсивности колебаний происходит быстрее на зонде 10, чем на зонде 9.

Колебания, регистрируемые зондами при  $t > 2$  мкс, могут быть связаны с процессами в распадающейся по окончании импульса плазме. Анализ соответствующих реализаций сигналов свидетельствует, что в спектре распадающейся плазмы преобладают колебания на одной выделенной частоте (рис. 5, в, з). Приняв, что она равна электронной плазменной частоте, можно определить концентрацию плазмы  $n_p$ . Проведенные таким образом оценки оценки показывают, что вблизи зонда 9  $n_p \sim 10^9$  см<sup>-3</sup>, а у зонда 10 эта величина приблизительно на порядок меньше.

Поскольку "плазменные" колебания при  $t > 2$  мкс уменьшаются по амплитуде с удалением от катода, то можно предположить, что они связаны с движением катодной плазмы в сторону коллектора. Полученные данные позволяют оценить среднюю скорость движения катодной плазмы в канале транспортировки  $\sim 2-4 \cdot 10^7$  см/с, что согласуется по порядку величины с литературными данными [1,2].

Колебания распадающейся плазмы преобладают на заднем фронте импульса тока пучка. Как уже отмечалось, спектры сигналов на переднем фронте и вершине импульса отличны от "плазменных". Тем не менее нельзя на данном этапе отрицать возможность существенного влияния эффектов в прикатодной плазме и на развитие колебаний пространственного заряда РЭП.

### Заключение

Подводя итоги настоящей работы, отметим важнейшие ее результаты.

Разработана и реализована слабозмущающая методика исследования пространственно-временных характеристик коллективных процессов в объемном заряде РЭП.

Определены амплитудно-частотные характеристики колебаний пространственного заряда на разных участках импульса тока и в разных областях канала транспортировки в широком интервале изменения тока пучка и удерживающего магнитного поля. Установлена конвективная природа нарастания колебаний на фронте импульса. Выявлено изменение спектра колебаний вдоль пучка, обусловленное, видимо, изменениями его структуры.

Обнаружено влияние катодной плазмы на колебания в канале транспортировки РЭП.

Авторы признательны участникам семинара сектора сильноточной и СВЧ электроники кафедры физической электроники СПбГТУ за полезное обсуждение результатов работы.

- [1] Бугаев С.П., Ильин В.П., Кошелев В.И. и др. // Релятивистская высокочастотная электроника. Горький, 1979. С. 5-75.
  - [2] Бугаев С.П., Канавец В.И., Кошелев В.И., Черепенин В.А. Релятивистские мноволновые СВЧ генераторы. Новосибирск: Наука, 1991. 296 с.
  - [3] Артипов А.В., Богданов Л.Ю., Воскресенский С.В. и др. // Проблемы физической электроники. Л., 1989. С. 28-47.
  - [4] Богданов Л.Ю., Воскресенский С.В., Солинский Г.Г. // Проблемы физической электроники. Л., 1991. С. 102-119.
  - [5] Пушкарев С.С., Бондаренко В.А., Гадецкий Н.П. и др. // ПТЭ. 1989. № 9. С. 31-33.
  - [6] Кузнецов М.В., Магаметзянов Ф.Х., Рабинович М.С. и др. // Релятивистская высокочастотная электроника. Вып. 3. Горький, 1983. С. 160-183.
  - [7] Жерлицын А.Г., Кузнецов С.И., Мельников Г.В., Фоменко Г.П. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 7. С. 1384-1387.
  - [8] Бондарь Ю.Ф., Заворотный С.И., Ипатов А.Л. и др. // Физика плазмы. 1982. Т. 8. № 5. С. 941-946.
  - [9] Нечаев В.Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 1982. Т. 25. № 9. С. 1067-1074.
  - [10] Mostrom M.F., Jones M.E. // Phys. Fluids. 1983. Vol. 26. N 6. P. 1649-1658.
  - [11] Иванов В.С., Кременцов С.И., Райзер М.Д. и др. // Физика плазмы. 1981. Т. 7. № 4. С. 784-789.
-