



КОЛЛЕКТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПРОСТРАНСТВЕННОМ ЗАРЯДЕ РЭП МИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Л.Ю. Богданов, Г.Г. Соминский

С помощью комплекса специально разработанных слабовозмущающих методов диагностики экспериментально изучены пространственно–временные характеристики коллективных процессов в объемном заряде релятивистских электронных пучков микросекундной длительности. Определено влияние на характеристики коллективных процессов условий формирования релятивистских электронных пучков, а также воздействие колебаний пространственного заряда на структуру пучка. Выявлены эффективные способы управления колебаниями с помощью неоднородных полей.

Введение

Видимо, нет особой нужды подробно пояснять необходимость изучения коллективных процессов в релятивистских электронных пучках (РЭП). Огромные и до сих пор неисчерпанные возможности их использования в электронике и энергетике больших мощностей, поиск эффективных способов управления их характеристиками определяют постоянно существующий интерес к этому сложному объекту исследований. К сожалению, однако до сих пор часто не удается получить РЭП достаточно высокого качества. Препятствует этому, в частности, недостаток информации о закономерностях и влиянии на характеристики РЭП протекающих в них коллективных процессов.

Имеется большое количество публикаций, в которых анализируются закономерности формирования и транспортировки РЭП, а также их устойчивость (см., например, [1–7]). В теоретических исследованиях выявлены основные причины развития неустойчивостей, связанных с существованием градиентов скоростей и концентрации электронов. Механизм развития неустойчивостей под действием этих факторов имеет достаточно общий характер и проявляется не только в РЭП (см., например, [8,9]). К сожалению, известные теоретические рассуждения выполнены для сильно идеализированных моделей пучков и, большей частью, в линейном приближении. Они успешно объясняют разрушение РЭП в результате развития, например, диокотронной неустойчивости, однако не позволяют, как правило, определить амплитудно–частотные и пространственно–временные характеристики происходящих в них коллективных процессов в используемых на практике устройствах.

В экспериментальных работах из–за трудностей диагностики сильноточных электронных потоков потоки анализировались преимущественно либо весьма низкочастотные (менее 100 МГц), либо уже существенно высокочастотные (более

3 ГГц) процессы (см., например, [10–13]). Лишь недавно, благодаря использованию достаточно современного комплекса специально разработанных слабозмущающих методов исследования, нами были получены сведения о характеристиках коллективных процессов в широкой полосе частот [14–19]. Были определены амплитудно–частотные и пространственно–временные характеристики колебаний в наименее исследованных ранее РЭП микросекундной длительности, находящихся применение, прежде всего, при построении мощных СВЧ устройств. Изучено, с одной стороны, влияние на характеристики коллективных процессов условий формирования РЭП, а с другой – воздействие колебаний пространственного заряда на их структуру. Выявлены возможные способы управления колебаниями с помощью неоднородных полей. В настоящей работе обобщаются результаты этих последних исследований.

1. Методика измерений и аппаратура. Контрольные измерения

Исследования выполнены в коаксиальных диодах с магнитной изоляцией и кромочными взрывоэмиссионными катодами на сильноточной экспериментальной релятивистской установке СЭР–1 кафедры физической электроники СПбГТУ.

Схематическое изображение сечения экспериментального диода показано на рис. 1. При подаче высокого напряжения на катод 1 у его кромки в результате взрывной эмиссии появляется плазма, заметно расширяющаяся в течение импульса как вдоль магнитного поля, так и в поперечном направлении. Электроны, эмитируемые с ее поверхности, ускоряются в зазоре между катодом и анодом 2, затем дрейфуют внутри канала транспортировки 3 длиной 1 м и осаждаются на

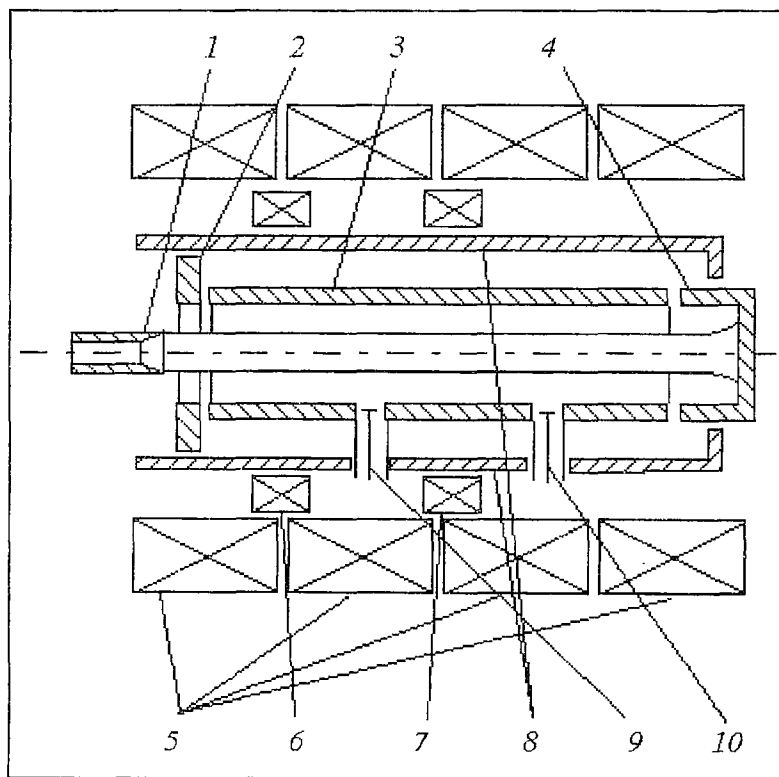


Рис. 1. Схематическое изображение сечения экспериментального прибора: 1 – взрывоэмиссионный кромочный катод, 2 – анод, 3 – канал транспортировки, 4 – торцевой коллектор, 5 – соленоиды, 6 и 7 – дополнительные катушки магнитного поля, 8 – вакуумная оболочка, 9 и 10 – высокочастотные зонды

коллекторе 4 в спадающем магнитном поле. В зависимости от целей эксперимента использовался цилиндрический коллектор с развитой поверхностью или торцевой коллектор. Использовались катоды из нержавеющей стали диаметром $D_k=20$ мм, а также из углерода диаметром 12 и 20 мм. Анод и канал транспортировки имели одинаковый внутренний диаметр $D_a=32$ мм. Расстояние $L_{ка}$ по оси между катодом и анодом можно было плавно регулировать в работающем приборе. Измерения выполнены при фиксированных значениях этого расстояния 12, 27 и 35 мм.

Для удержания РЭП использовалось внешнее магнитное поле B_0 величиной до 1.2 Тл, создаваемое системой соленоидов 5. В части экспериментов при помощи дополнительных катушек 6 и 7 создавались локальные неоднородности магнитного поля. Эти катушки располагались на расстояниях 20 и 60 см от катода. Амплитуда этих неоднородностей в разных экспериментах составляла 30% или 60% от величины основного магнитного поля B_0 .

Для определения характеристик колебаний пространственного заряда использовались высокочастотные зонды 9 и 10, расположенные соответственно на расстояниях 40 и 80 см от катода. Зонды сообщались с областью транспортировки пучка через малые отверстия (диаметром приблизительно 3 мм) и регистрировали наведенные сигналы, связанные с движением ступков пространственного заряда в ближней к ним зоне. Сигналы с зондов подавались на вход широкополосных осциллографов типа С7-19. Изображение с их экрана с помощью телекамеры передавалось для записи и обработки в специализированную ЭВМ. Фурье-анализ разовых реализаций длительностью от 5 до 600 нс позволял получать «мгновенные» спектры колебаний.

Для определения изменений амплитуды колебаний в течение импульса РЭП фиксировались, кроме того, протектированные сигналы с зондов.

Типичные импульсы напряжения U с выхода генератора импульсного напряжения и тока I на коллектор показаны на рис. 2. Здесь хотелось бы обратить внимание на то, что небольшая начальная задержка тока связана с инерционностью использованной в данном случае рентгеновской системы его регистрации. При необходимости можно было проводить измерения менее инерционными методами или учитывать особенности рентгеновской регистрации. Максимальное напряжение в экспериментах достигало 220 кВ. В зависимости от условий формирования РЭП и величины магнитного поля амплитуда тока I на коллектор и его длительность изменялись соответственно в пределах от 500 до 1200 А и от 1 до 3 мкс.

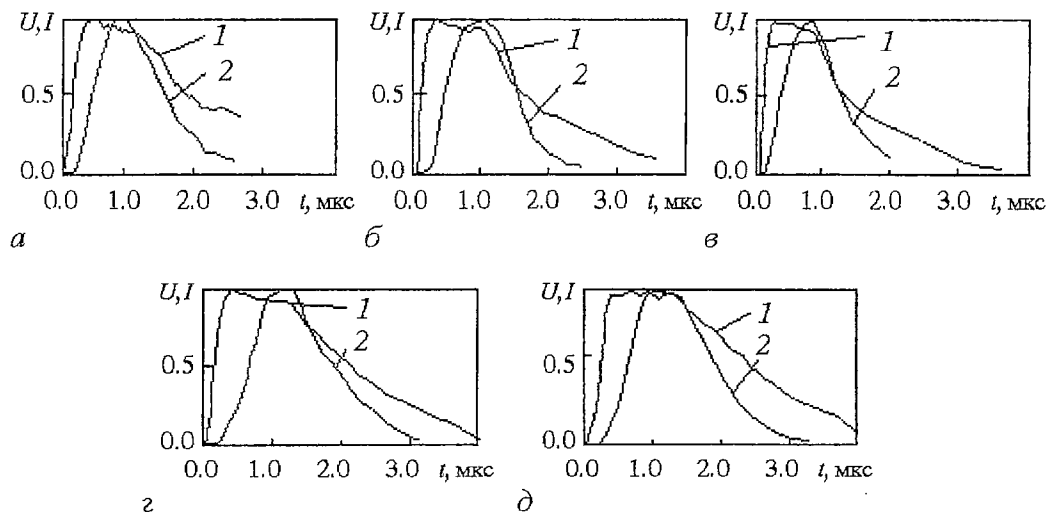


Рис. 2. Типичные импульсы U (1) и I (2) для различных условий формирования РЭП. а, б, в – катод из углерода, г, д – катод из нержавеющей стали. а – $D_k=12$ мм, $L_{ка}=27$ мм; б – $D_k=20$ мм, $L_{ка}=27$ мм; в – $D_k=20$ мм, $L_{ка}=12$ мм; г – $D_k=20$ мм, $L_{ка}=27$ мм; д – $D_k=20$ мм, $L_{ка}=35$ мм. Значения U и I даны в относительных единицах

Для определения структуры РЭП измерялись характеристики теплового или тормозного рентгеновского излучения с торцевого коллектора, бомбардируемого электронами пучка. Для построения рентгеновского изображения излучение с коллектора через камеру-обскуру направлялось на вход специально сконструированного электронно-оптического преобразователя (ЭОП). Усиленное видимое излучение с экрана ЭОП с помощью телевизионной аппаратуры вводилось в специализированную ЭВМ, где могло быть зафиксировано и обработано. Тепловое излучение с коллектора попадало непосредственно на телекамеру через систему зеркал и также записывалось на ЭВМ. Рентгеновская методика обеспечивала высокое временное (менее 100 нс) разрешение, но сравнительно небольшое пространственное (около 2 мм). На основе теплового излучения определялась структура пучка, усредненная за время импульса тока, но пространственное разрешение в данном случае достигало десятых долей миллиметра. Поэтому в зависимости от целей эксперимента для определения структуры РЭП с высоким разрешением в пространстве или во времени целесообразно регистрировать соответственно тепловое или рентгеновское излучение с коллектора. Структура пучка вдали от коллектора контролировалась в случае необходимости по следам на твердотельных мишенях.

Анализ «тепловых» изображений, выполненный на начальном этапе работы, показал, что для получения трубчатого пучка у коллектора магнитное поле B_0 должно превышать приблизительно 0.5 Тл. Иллюстрирует это рис. 3, на котором показаны такие изображения и полученные на основании их обработки распределения интенсивности излучения для двух полей 0.35 и 0.5 Тл.

Наряду с этими данными об удержании пучка однородным магнитным полем, в экспериментах по исследованию структуры пучка были выявлены нетривиальные закономерности воздействия на его транспортировку локальных неоднородностей магнитного поля. Было установлено, что с помощью локальных неоднородностей магнитного поля можно изменять распределение плотности тока в пучке. Эти данные представлены на рис. 4, где показаны «рентгеновские» изображения пучка, полученные при основном ведущем магнитном поле $B_0=1$ Тл. Оказалось, что локальное увеличение на 30% магнитного поля ближней к катоду катушкой (см.

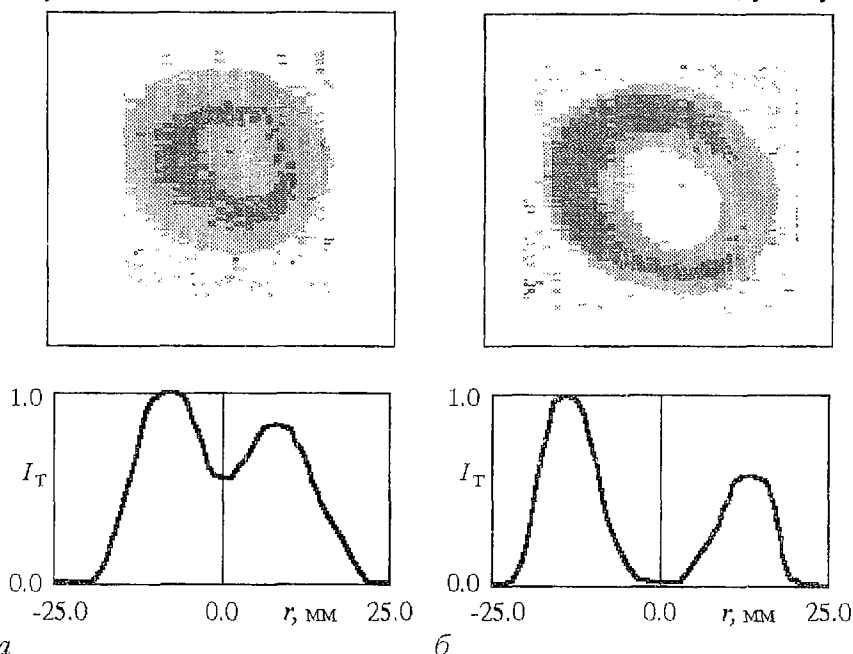


Рис. 3. Фотографии, полученные при регистрации теплового излучения с коллектора, и соответствующие им (в одном из сечений по диаметру) распределения интенсивности излучения $I_T(r)$: а - $B_0=0.35$ Тл; б - $B_0=0.5$ Тл

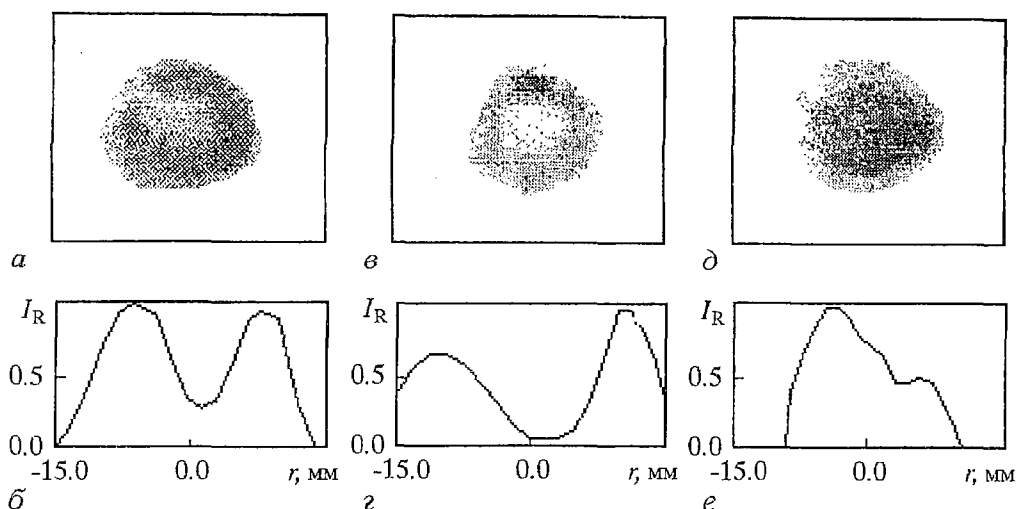


Рис. 4. «Рентгеновские» изображения пучка на коллекторе и распределения по диаметру интенсивности $I_R(r)$ свечения экрана ЭОПа, момент регистрации $t_R=0.5$ мкс

рис. 4, в, г) повышает контраст кольцевого изображения по сравнению со случаем транспортировки РЭП в однородном поле (см. рис. 4, а, б). В то же время создание такой же неоднородности с помощью удаленной катушки только ухудшает удержание пучка (см. рис. 4, д, е), что проявляется в увеличении интенсивности излучения из центральной области его сечения. Обнаруженные изменения структуры пучка мы объясняем влиянием создававшихся неоднородностей магнитного поля на коллективные процессы в нем. Поэтому приступим теперь к непосредственному рассмотрению характеристик колебаний в пучке.

2. Исследование колебаний пространственного заряда

Измерения показали, что амплитуда колебаний меняется во времени и вдоль канала транспортировки. На рис. 5 приведены демонстрирующие это типичные

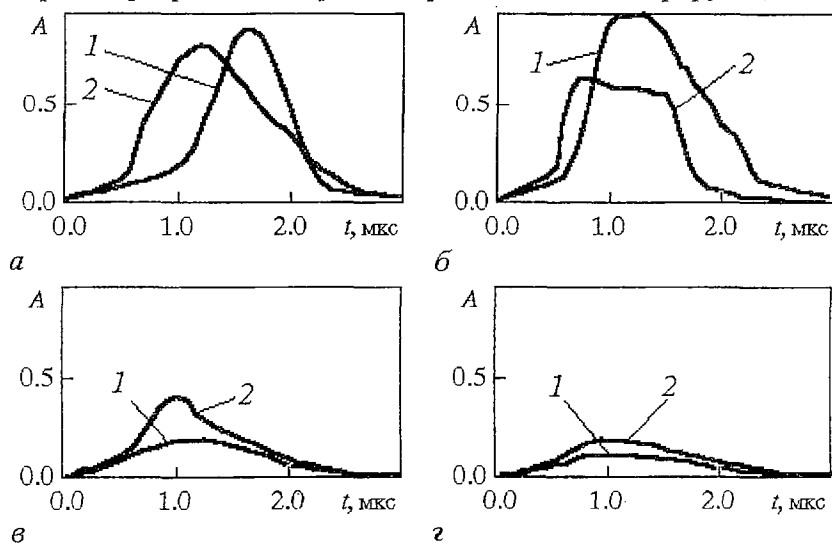


Рис. 5. Изменения амплитуды колебаний во времени $A(t)$, $B_0=1$ Тл, катод из нержавеющей стали, $L_{ка}=27$ мм: а – однородное магнитное поле; б – локальное увеличение на 30% магнитного поля с помощью дальней катушки; в – локальное увеличение на 30% магнитного поля с помощью ближней катушки; г – локальное увеличение на 60% магнитного поля с помощью ближней катушки

импульсы протектированных сигналов с ближнего от катода (кривые 1) и удаленного от него (кривые 2) зондов. При работе в однородном магнитном поле (см. рис. 5, а) на переднем фронте импульса тока четко выделяется временной участок, для которого характерно нарастание колебаний пространственного заряда с удалением от катода. Эти данные свидетельствуют, что сигналы с удаленного зонда в это время определяются нарастающими волнами в пучке.

Таблица

Экспериментально измеренные (t^*) и расчетные (t_3) значения времени перехода к резкому увеличению скорости нарастания амплитуды колебаний для исследованных в работе систем формирования РЭП

Материал катода	Нержавеющая сталь		Углерод			
	20		12		20	
D_k , мм	20		12		20	
$L_{ка}$, мм	27	35	12	27	12	27
t^* , мкс	0.5–0.6	0.7–0.9	0.2	0.4–0.5	0.0–0.1	0.3–0.4
t_3 , мкс	0.6	0.85	0.15	0.4	0.05	0.35

Амплитуда колебаний в области удаленного зонда увеличивается со временем. Скорость этого процесса сначала невелика, а затем после некоторого характерного для данной системы момента времени резко возрастает. Как оказалось, длительность этой задержки существенно зависит от геометрии участка ускорения электронов и материала катода. В таблице приведены экспериментально измеренные значения задержки t^* – момента перехода к резкому увеличению скорости нарастания амплитуды колебаний для исследованных в работе систем формирования РЭП. Наибольшие амплитуды колебаний пространственного заряда были зарегистрированы у дальнего зонда в районе вершины импульса тока. Согласно проведенной в холодных измерениях калибровке, переменные поля здесь

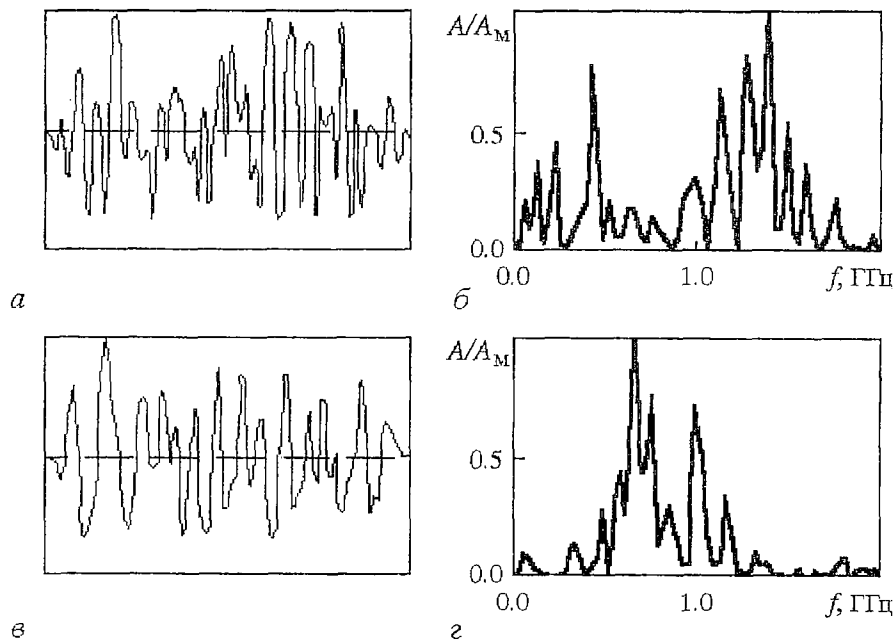


Рис. 6. Типичные реализации и рассчитанные по ним спектры колебаний с ближнего (а), (б) и дальнего (е), (з) зондов для катода из нержавеющей стали, $B_0=1$ Тл, $L_{ка}=27$ мм, $t_R=0.8$ мкс; длительность реализаций (а),(е) – 15 нс

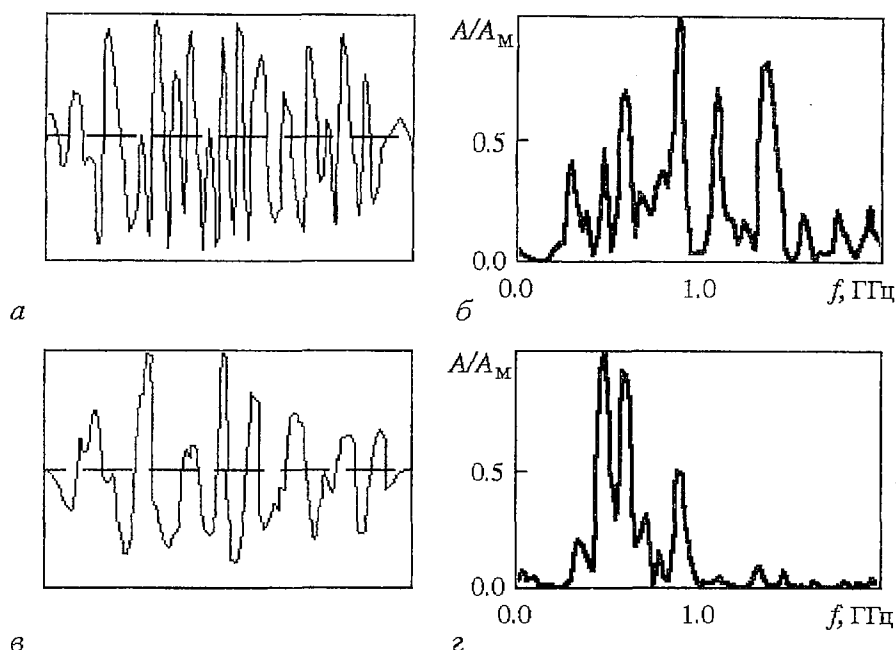


Рис. 7. Типичные реализации и рассчитанные по ним спектры колебаний с ближнего (а), (б) и дальнего (в), (г) зондов для катода из углерода, $B_0=1$ Тл, $D_k=20$ мм, $L_{ка}=12$ мм, $t_R=0.4$ мкс; длительность реализаций (а), (в) – 15 нс

достигают значений порядка 10^6 В/м (то есть – примерно 10% от статического поля между пучком и стенкой канала транспортировки).

Типичные временные реализации сигналов и рассчитанные по ним мгновенные спектры для катодов из нержавеющей стали и из углерода, полученные вблизи вершины импульсов тока, то есть в условиях когда колебания электронного пространственного заряда наиболее интенсивны, показаны соответственно на рис. 6 и 7. Здесь пары рисунков а, б получены соответственно для ближнего, а в, г – для дальнего от катода зондов. Спектры колебаний малой амплитуды, характерные для исследованных систем в начальные моменты времени ($t < t^*$), для тех же зондов в приборе с катодом из нержавеющей стали приведены на рис. 8. Полученные данные позволяют выделить следующие особенности спектров.

Состав спектра заметно меняется с течением времени. В начальные моменты (до t^*) в сигналах обоих зондов выделяются низкочастотные колебания в интервале 100...300 МГц. В условиях же, когда колебания достаточно интенсивны (на участке резкого нарастания их амплитуды вплоть до вершины импульсов тока), в спектре преобладают гораздо более высокочастотные составляющие в области

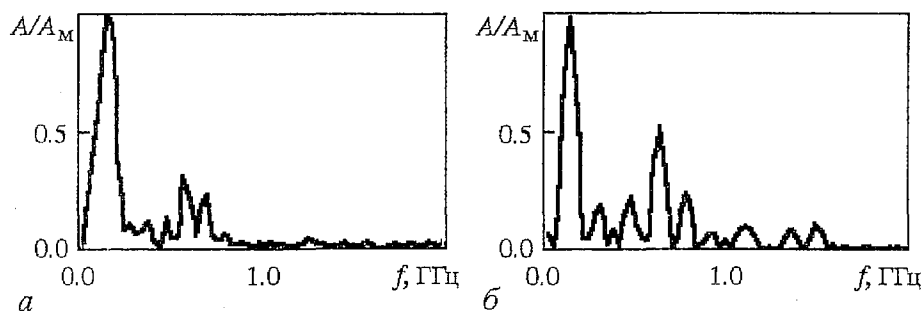


Рис. 8. Низкочастотные спектры колебаний малой амплитуды для катода из нержавеющей стали, $B_0=1$ Тл, $L_{ка}=27$ мм, $t_R=0.4$ мкс $< t^*$: а – ближний зонд; б – дальний зонд

$300 < f < 1500$ МГц. Довольно сильные изменения спектра происходят и с удалением от катода. Сравнение характеристик для разных зондов показывает, что вдали от катода на этапе $t > t^*$ уменьшается количество пиков спектра большой амплитуды и максимальную интенсивность приобретают колебания на частотах 500...1000 МГц. Уменьшение числа наиболее интенсивных пиков спектра вдали от катода может соответствовать более упорядоченному движению сгустков пространственного заряда, например, из-за выделения здесь одного наиболее сильного механизма их формирования, имеющего конвективную природу.

Отсутствие данных о пространственном изменении параметров в ближней к катоду зоне затрудняет определение природы коллективных процессов здесь. Сигналы с ближнего к катоду зонда принципиально могут быть обусловлены не только усилением волн, распространяющихся вдоль пучка, но и колебательными процессами другого типа.

На основе приведенных данных невозможно однозначно определить механизмы развития коллективных процессов в РЭП. Необходимая для прояснения картины коллективных явлений информация получена при исследовании влияния на колебания пространственного заряда локальных неоднородностей магнитного поля. Происходящие под действием неоднородных полей изменения амплитудных характеристик колебаний иллюстрирует рис. 5. Эффект воздействия зависит не только от величины неоднородности, но и от ее расположения по длине канала транспортировки. Локальное увеличение магнитного поля на 30% с помощью ближней к катоду катушки (см. рис. 5, в) подавляет сигналы с обоих зондов. Уменьшение амплитуды колебаний у дальнего зонда по сравнению со случаем однородного магнитного поля для разных систем формирования пучка происходит в $1.5 \div 4$ раза. Увеличение этой неоднородности магнитного поля до 60% приводит к дополнительному снижению амплитуды колебаний у дальнего зонда в $2 \div 4$ раза (см. рис. 5, г). Напомним, что при локальном увеличении магнитного поля с помощью ближней катушки было отмечено улучшение удержания и транспортировки РЭП (см. рис. 4, в, г). Теперь становится очевидным, что это связано с подавлением колебаний пространственного заряда в пучке.

Введение подобной неоднородности магнитного поля с помощью удаленной от катода катушки (см. рис. 5, б), наоборот, ведет к увеличению скорости нарастания колебаний у обоих зондов, что приводит к ухудшению удержания РЭП. Более быстрое (по сравнению со случаем однородного магнитного поля) нарастание колебаний у ближнего зонда при подключении дальней катушки находит объяснение, если предположить, что создание пробки магнитного поля приводит к отражению части электронов РЭП, которые оказывают сильное влияние на характеристики регистрируемых колебаний. Учитывая адиабатическое изменение магнитного поля в области неоднородности, для определения условий отражения можно воспользоваться выражением для адиабатического инварианта и записать

$$V_{\perp 0} / V_{\parallel 0} \geq (B_0 / \Delta B)^{1/2},$$

где $V_{\perp 0}$ и $V_{\parallel 0}$ – соответственно перпендикулярная и продольная составляющие скорости электронов, подлетающих к магнитной пробке, а ΔB – максимальное увеличение магнитного поля в этой области. Так как воздействие неоднородностей магнитного поля становится ощутимым при $B_0 / \Delta B = 3$, ясно, что отражены могут быть электроны с поперечными скоростями, превышающими величину продольной приблизительно в 1.7 раза. В наших условиях такие поперечные скорости могут быть приобретены выходящими из катодной плазмы электронами при движении в поперечном магнитном электрическом поле напряженностью порядка 10^6 В/см. Оценки показали, что столь большие поперечные поля E_{\perp} могут возникать у неоднородностей внешней боковой границы плазмы вблизи входа в канал транспортировки, то есть с запаздыванием относительно начала импульса тока. Такая задержка определяется расстоянием от катода до этой области и

скоростью расширения катодной плазмы. Для оценки времени запаздывания t_3 были проведены приближенные расчеты электрических полей E_{\perp} у передней кромки плазменного эмиттера при разных положениях его относительно входа в канал транспортировки и определены изменения этого поля во времени $E_{\perp}(t)$ для разных катодных систем с учетом имеющихся сведений о закономерностях движения катодной плазмы [2,19–21]. На рис. 9 показаны типичные зависимости такого типа. При их построении принималось, что скорости поперечного и продольного расширения плазмы с катода из нержавеющей стали равны соответственно $3 \cdot 10^5$ и $3 \cdot 10^6$ см/с, а для катода из углерода эти же скорости имеют величину $5 \cdot 10^5$ и $5 \cdot 10^6$ см/с. Полученные данные позволили определить время t_3 , соответствующее моменту, когда максимальное значение поперечной составляющей электрического поля у плазменного эмиттера достигает значения 10^6 В/см.

Сравнение расчетных значений задержки t_3 появления электронов с большими поперечными скоростями с измеренным экспериментально запаздыванием t^* резкого нарастания сигналов с дальнего зонда (см. таблицу) показывает, что для всех исследованных систем эти времена близки по величине. Это подтверждает важную роль электронов с большими поперечными скоростями в развитии колебаний пространственного заряда.

3. Возможные механизмы развития колебаний пространственного заряда в РЭП

Электроны с большими поперечными скоростями в соответствии с описанным механизмом их образования, по-видимому, могут присутствовать только в ореоле РЭП и их ток должен быть мал по сравнению с полным током пучка (об этом, во всяком случае, говорит практическая неизменность полного тока при создании магнитных пробок). Поэтому маловероятно, что наблюдаемые в эксперименте интенсивные колебания у дальнего от катода зонда связаны с процессами лишь на внешней границе пучка. Возможной причиной возникновения таких колебаний представляется развитие двухпоточковой неустойчивости, обусловленной взаимодействием электронов периферии (ореола) пучка с большими поперечными (соответственно малыми продольными) скоростями и электронов с торца плазменного эмиттера с большими продольными скоростями. Наиболее эффективным такое взаимодействие должно быть при синхронизме быстрой и медленной волн пространственного заряда в этих потоках. Из этого условия следует выражение для частоты колебаний, имеющих максимальный инкремент нарастания,

$$f = (1/2\pi) (V_{\parallel 1} \omega_{n2} + V_{\parallel 2} \omega_{n1}) / (V_{\parallel 2} - V_{\parallel 1}).$$

Здесь $V_{\parallel 1}$, ω_{n1} и $V_{\parallel 2}$, ω_{n2} – продольные скорости и редуцированные плазменные частоты соответственно для электронных потоков из ореола пучка и с торца плазменного эмиттера. При типичных для нашей установки условиях это

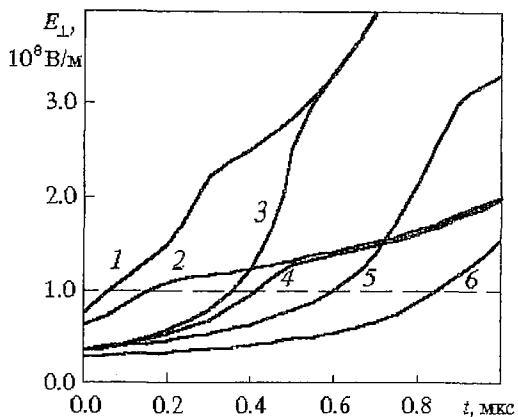


Рис. 9. Рассчитанные зависимости $E_{\perp}(t)$ для разных условий формирования РЭП. Кривые 1–4 – катод из углерода; кривые 5,6 – катод из нержавеющей стали: 1 – $D_k=20$ мм, $L_{ка}=12$ мм; 2 – $D_k=12$ мм, $L_{ка}=12$ мм; 3 – $D_k=20$ мм, $L_{ка}=27$ мм; 4 – $D_k=12$ мм, $L_{ка}=27$ мм; 5 – $D_k=20$ мм, $L_{ка}=27$ мм; 6 – $D_k=20$ мм, $L_{ка}=35$ мм

соотношение дает значение частоты около 500 МГц, приблизительно соответствующее наиболее интенсивным колебаниям, наблюдавшимся в экспериментах.

Двухпотоковая модель развития колебаний согласуется и с другими полученными результатами. Конвективное нарастание колебаний при взаимодействии сонаправленных потоков позволяет объяснить обнаруженный рост их амплитуды по длине пучка. Снижение амплитуды колебаний у дальнего зонда при локальном увеличении магнитного поля с помощью ближней к катоду катушки происходит, видимо, из-за того, что при этом воздействии в области за пробкой магнитного поля исчезают электроны с большими поперечными скоростями из ореола РЭП.

Не противоречат приведенной модели, учитывающей отражение электронов, и данные об усилении колебаний при создании пробки магнитного поля дальней от катода катушкой. Для объяснения этого явления нужно, как нам кажется, учесть, что отраженные электроны накапливаются в своеобразной ловушке между катодом и магнитной пробкой. При этом в достаточно протяженной ловушке могут развиваться специфические колебания долгоживущих осциллирующих электронов (см., например, [22–25]). При достаточно большой интенсивности эти колебания могут регистрироваться, как известно [25], не только в самой ловушке, но и за ней – в сигнале с дальнего зонда, как это и было зафиксировано в наших экспериментах.

Наличие двухпотокового усиления не исключает и других возможностей развития колебаний. Зарегистрированные колебания частично могут быть связаны, например, с развитием диокотронной неустойчивости в потоке электронов, эмитированных с боковой поверхности плазменного эмиттера. Очевидно, что при этом в пучке будут возникать вращающиеся в азимутальном направлении неоднородности пространственного заряда, обусловленные поступлением в пучок электронов из сгустков, вращающихся над поверхностью катодной плазмы. Колебания такого типа должны усиливаться с продвижением катодной плазмы к аноду в область сильного поперечного электрического поля, то есть, как и двухпотоковые, развиваются с задержкой относительно начала импульса тока. Подобные автоколебания в системах магнетронного типа описаны в литературе [26,27]. В [26] дано выражение для частоты ω таких «магнетронных» колебаний в диоде с магнитным полем B_0 , радиусом катода r_k и радиусом анода r_a

$$\omega/n = \Omega_c/2 \{1 - (r_k/r_a)^2\} \{1 - [1 - (B_{кр}/B_0)^2]^{1/2}\},$$

где n – номер вида, Ω_c – циклотронная частота, $B_{кр}$ – критическое магнитное поле для зазора катод–анод. Оценки, проведенные с помощью этого соотношения, дают хорошее совпадение с экспериментом. Так для первого вида получаем значения частоты $f = \omega/2\pi \approx 500$ МГц, близкие к тем, которые соответствуют наиболее интенсивным колебаниям пространственного заряда.

Однозначно определить на основе имеющихся экспериментальных данных и сделанных оценок относительную роль рассмотренных типов колебаний пока невозможно. Реальной представляется ситуация, в которой коллективные процессы в РЭП носят трехмерный характер, одновременно существуют разные типы колебательных движений и при малом изменении характеристик пучка происходит перераспределение энергии между ними.

В предыдущих рассуждениях мы сосредоточили свое внимание на причинах существования интенсивных высокочастотных колебаний. Завершая анализ полученных данных, хотелось бы сказать несколько слов и о возможных механизмах развития низкочастотных процессов малой амплитуды, зарегистрированных в начале импульсов тока РЭП. Вряд ли эти колебания связаны с нестабильностями эмиссии катода. Спектр нестабильностей довольно хорошо изучен [2] и существенно отличается от наблюдаемого нами. Механизм развития колебаний может быть обусловлен взаимодействием пучка с полями

коаксиального резонатора, образованного трубой дрейфа и вакуумной оболочкой экспериментального прибора длиной около 1.5 м. Другой возможной причиной появления НЧ колебаний могут быть осцилляции электронов, упруго отраженных от коллектора. Частота таких колебаний должна быть порядка 100 МГц и близка к выявленной в экспериментах.

Упомянутые низкочастотные колебания имели малую амплитуду и практически не влияли, как нам кажется, на развитие и характеристики колебаний конвективной природы, на которых мы сосредоточили в работе основное внимание.

Заключение

Подводя итоги работы, следует отметить следующие важнейшие ее результаты.

- Разработана и реализована слабовозмущающая методика экспериментального определения основных закономерностей коллективных процессов в микросекундных РЭП, обладающая высокими показателями пространственного и временного разрешения.

- Определены пространственно–временные характеристики коллективных процессов в РЭП с параметрами, типичными для используемых в мощных СВЧ устройствах. Выявлено влияние условий формирования РЭП на характеристики колебаний и воздействие колебаний на его удержание и транспортировку.

- Проанализированы наиболее вероятные механизмы развития зафиксированных колебательных процессов.

- Выявлены возможности управления колебательными процессами и структурой РЭП с помощью локальных неоднородностей магнитного поля.

Библиографический список

1. Рухадзе А.А., Богданкевич Л.С., Росинский С.Е., Рухлин В.Г. Физика сильнооточных релятивистских электронных пучков. М.: Атомиздат, 1980. 165 с.

2. Бугаев С.П., Канавец В.И., Кошелев В.И., Черепенин В.А. Релятивистские многоволновые СВЧ–генераторы. Новосибирск: Наука, СО, 1991. 296 с.

3. Иванов В.С., Кременцов С.И., Райзер М.Д. и др. Нитевидная структура трубчатого релятивистского электронного пучка // Физика плазмы. 1981. Т.7, вып.4. С.784.

4. Нечаев В.Е. Диокотронная неустойчивость замагниченных трубчатых пучков // Изв. вузов. Радиофизика. 1982. Т.25, вып.9. С. 1067.

5. Овсянникова О.Б., Каменец Ф.Ф., Лейман В.Г. Неустойчивость трубчатых сильнооточных электронных пучков // РЭ. 1984. Т.29, № 10. С.1985.

6. Еремеев А.И., Кабанов В.С., Стрелков П.С., Федотов А.В., Шкварунец А.Г. Экспериментальное исследование и численное моделирование диокотронной неустойчивости сильнооточных РЭП // Физика плазмы. 1988. Т.14, вып. 8. С. 958.

7. Розанов Н.Е. Слиппинг – неустойчивость частично скомпенсированного слабозамагниченного электронного пучка // ЖТФ. 1991. Т.61, вып.11. С.151.

8. Шевчик В.Н., Шведов Г.Н., Соболева А.В. Волновые и колебательные явления в электронных потоках на СВЧ. Саратов: Изд–во СГУ, 1962. 335 с.

9. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. М.: Наука. 1984. 432 с.

10. Пушкарев С.С., Бондаренко В.А., Гадецкий Н.П. и др. Многоканальный анализатор для измерения частотно–фазовых характеристик волн пространственного заряда в СРЭП // ПТЭ. 1989. № 9. С. 31.

11. Александров А.Ф., Галузо С.Ю., Михеев В.В. и др. Применение релятивистского электронного потока, формируемого катодом со взрывной эмиссией, для получения длительной СВЧ генерации // ЖТФ. 1982. Т.52, вып.1. С.110.

12. Бугаев С.П., Дейчули М.П., Канавец В.И. и др. Разрушение релятивистского сильноточного электронного пучка при генерации мощных импульсов электромагнитного излучения // РЭ. 1984. № 3. С.557.

13. Жерлицин А.Г., Мельников Г.В., Фоменко Г.П. О модуляции сильноточного электронного пучка при формировании виртуального катода // ЖТФ. 1987. Т.57, вып. 3. С.546.

14. Богданов Л.Ю., Воскресенский С.В., Соминский Г.Г. Исследование характеристик релятивистского электронного пучка // Проблемы физической электроники. Л.: Изд-во ЛИЯФ, 1991. С.102.

15. Богданов Л.Ю., Соминский Г.Г. Исследование колебаний пространственного заряда релятивистского электронного пучка // ЖТФ. 1995. Т.65, вып.12. С.77.

16. Архипов А.В., Богданов Л.Ю., Воскресенский С.В., Дворецкая Н.В., Левчук С.А., Лукиа О.И., Соминский Г.Г. Пространственно-временные характеристики электронных потоков мощных СВЧ устройств // Лекции по СВЧ электронике и радиофизике (10-я зимняя школа-семинар инженеров). Кн.2. Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 1996. С.3-34.

17. Bogdanov L.Yu., Sominski G.G. Experimental study of collective processes in REB // Proceedings of 11th Int. Conf. «BEAMS 96». Prague. Czech. Rep. 1996. Vol.1. P. 319.

18. Богданов Л.Ю., Дворецкая Н.В., Соминский Г.Г., Фабировский А.Я. Влияние неоднородностей магнитного поля пробочной конфигурации на пространственно-временные характеристики длинноимпульсного релятивистского электронного пучка // ЖТФ. 1997. Т.67, вып.8. С.83.

19. Богданов Л.Ю. Пространственно-временные характеристики коллективных процессов в РЭП микросекундной длительности с магнитным удержанием: Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. СПб: СПбГТУ, 1997. 115 с.

20. Зайцев Н.И., Кораблев Г.С., Шемякин Б.П. Элементы динамики катодной и коллекторной плазмы в диоде с магнитной изоляцией // Физика плазмы. 1981. Т. 7, вып.3. С. 560.

21. Горев В.В., Долгачев Г.И., Закатов Л.П., Орешко А.Г., Скорюпин В.А. Динамика нарушения магнитной изоляции электронного диода // Физика плазмы. 1985. Т.11, вып.7. С.782.

22. Лукиа О.И. Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. СПб: СПбГТУ, 1992. 178 с.

23. Лукиа О.И., Цыбин О.Ю. Пространственно-временная структура электронного потока в электронно-оптической системе гиротронного типа // Лекции по электронике СВЧ и радиофизике (9-ая зимняя школа-семинар). Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1993. С. 20-29.

24. Лукиа О.И., Соминский Г.Г. Исследование колебаний пространственного заряда в винтовых электронных пучках систем гиротронного типа // ЖТФ. 1994. Т. 64, вып.11. С.160.

25. Лукиа О.И., Соминский Г.Г. Пространственно-временные характеристики коллективных процессов в винтовых электронных пучках систем гиротронного типа // ЖТФ. 1995. Т. 65, вып. 2. С. 198.

26. Кузнецов М.И., Бербасов В.А., Нечаев В.Е. Исследование флуктуаций в магнетроне // Изв. вузов. Радиофизика. 1960. Т.3. Ч.1, вып.1. С. 102-109; Ч. 2, вып.2. С.290.

27. Бербасов В.А., Кузнецов М.И., Степанов С.В. Экспериментальное исследование роли флуктуаций электрического поля в механизме токопрохождения в магнетронном диоде в режиме отсечки // Изв. вузов. Радиофизика. 1968. Т.11, № 9. С.1423.

Санкт-Петербургский
государственный
технический университет

Поступила в редакцию 23.10.97

COLLECTIVE PROCESSES IN THE SPACE CHARGE OF MICROSECOND REB

L.Yu. Bogdanov, G.G. Sominski

Characteristics of collective processes in the space charge of relativistic electron beams (REB) were studied in pulses of microsecond duration. A specially developed set of experimental techniques with resolution in time and location was used in the work. Influence of REB formation conditions, as well as of space charge oscillations, upon the beam structure had been observed and studied. Methods of effective control over the beam oscillations using non-uniform fields were proposed and tested.



Богданов Леонид Юрьевич – родился в Ленинграде в 1960 году. Окончил ЛПИ (1984). Кандидат физико-математических наук (1997). Ведущий инженер СПбГТУ. Автор 20 научных публикаций. Область научных интересов – диагностика релятивистских электронных потоков.



Соминский Геннадий Гиршевич – родился в Ленинграде в 1935 году, окончил ЛПИ (1960), защитил диссертации на соискание степени кандидата физико-математических наук (1967) и доктора физико-математических наук (1984). Профессор СПбГТУ. Автор более 120 научных работ. Область научных интересов – эмиссионная, микро-, СВЧ электроника, экспериментальное исследование сильнотоковых электронных потоков.