

04;09;10;12

Коллективные процессы в микросекундном релятивистском электронном пучке: основные закономерности и механизмы

© Е.В. Ганичев, Н.В. Дворецкая, Г.Г. Соминский

Санкт-Петербургский государственный технический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: sominski@rphf.spbstu.ru

(Поступило в Редакцию 8 января 2002 г.)

Изучены коллективные процессы в пространственном заряде микросекундных релятивистских электронных пучков с магнитной изоляцией. Определены пространственно-временные характеристики низкочастотной и высокочастотной ветвей колебаний и изучено воздействие на колебания такого типа магнитной компрессии пучков вблизи катода. Выявлен основной источник низкочастотных колебаний — коллективные движения пространственного заряда, развивающиеся в скрещенных электрическом и магнитном полях вблизи катода. Получены данные, свидетельствующие о том, что основной причиной высокочастотных колебаний является развитие двухпоточковой неустойчивости в пучке. Обнаружена возможность подавления низкочастотных и высокочастотных колебаний с помощью компрессии релятивистских электронных пучков вблизи катода и объяснен механизм воздействия неоднородных магнитных полей с учетом их влияний на движение катодной плазмы.

Введение

Для успешного использования при создании СВЧ приборов большой мощности необходимы релятивистские электронные пучки (РЭП) высокого качества (см., например, [1]). Препятствуют формированию качественных РЭП развивающиеся в них колебания пространственного заряда. Колебания ведут к нарушению магнитной изоляции РЭП, становятся источником паразитных сигналов. Выполненные ранее исследования [2–4] позволили определить некоторые важнейшие характеристики колебаний пространственного заряда длинноимпульсных (микросекундных) релятивистских электронных пучков. В типичной системе формирования РЭП, коаксиальном диоде с магнитной изоляцией (КДМИ-1) и взрывоэмиссионным катодом, были выявлены две основные ветви колебаний пространственного заряда, развивающихся в электронных пучках такого типа: низкочастотные (НЧ) в области частот $\sim 100\text{--}300\text{ МГц}$ и высокочастотные (ВЧ), максимум амплитуды которых лежит в районе $400\text{--}800\text{ МГц}$. Была обнаружена связь характеристик колебаний ВЧ ветви с движением катодной плазмы и формированием в ореоле РЭП потока электронов с боковой поверхности плазменного эмиттера с большими поперечными скоростями. Были рассмотрены два возможных механизма возникновения ВЧ колебаний, в которых должна быть существенна роль электронов с большими поперечными скоростями [4]. Один из них может быть связан с развитием двухпоточковой неустойчивости из-за взаимодействия малого по плотности потока в ореоле РЭП с основным потоком электронов с торца плазменного эмиттера. Альтернативный механизм — диокотронная неустойчивость в электронном потоке у боковой поверхности плазменного эмиттера. Оба указанные механизма должны приводить

к развитию колебаний пространственного заряда в РЭП на частотах, соответствующих области максимальной интенсивности наблюдавшихся в экспериментах ВЧ излучений.

Были рассмотрены [4] причины возникновения не только ВЧ, но и НЧ колебаний. В частности, указывалось на возможную их связь с раскачкой колебаний пространственного заряда в потоке электронов, отражающихся от коллектора и движущихся длительное время в области между коллектором и катодом. Однако природа низкочастотных колебаний также не нашла пока однозначного объяснения. Ограниченность экспериментальных данных, полученных в КДМИ-1 с заданной геометрией электродов и фиксированной энергией электронов ($\sim 200\text{--}240\text{ keV}$) и магнитным полем ($\sim 1\text{ Т}$), затрудняла оценку общности полученных в работах [2–4] результатов. Трудности в интерпретации этих результатов были связаны, кроме того, с отсутствием информации о характеристиках коллективных процессов в ближней к катоду зоне, а также о влиянии на эти процессы неоднородностей магнитного поля у катода, которые обычно используются для компрессии РЭП. В данной работе описаны полученные авторами новые данные, которые позволяют лучше понять закономерности и природу коллективных процессов в РЭП. Исследования выполнены в диоде КДМИ-2 с существенно отличной от КДМИ-1 геометрией системы формирования и транспортировки РЭП. Колебания пространственного заряда регистрировались не только в канале транспортировки пучка, но и вблизи эмиттера. Созданные устройства формирования магнитного поля B позволяли регулировать его величину и степень магнитной компрессии пучка у катода.

Методика измерений и аппаратура

Исследования выполнены на экспериментальной установке СЭР-1 [2–4]. В табл. 1 сопоставляются характеристики диодов КДМИ-1 и КДМИ-2.

Характеристики колебаний были изучены в приборах с кромочными взрывоэмиссионными катодами из нержавеющей стали в широком интервале изменения удерживающих РЭП магнитных полей (0.6–1.4 Т). Импульсы ускоряющего электроны напряжения U имели амплитуду ~ 220 кэВ. Их длительность ограничивалась магнитной изоляцией РЭП и менялась в исследованных режимах ориентировочно от 2 до 5 μ s.

Схема сечения КДМИ-2 показана на рис. 1. Электроны, эмиттированные катодом, ускорялись в зазоре между катодом и анодом, далее двигались внутри заземленного и соединенного электрически с анодом канала транспортировки и, наконец, осаждались на внутренней поверхности изолированного от него коллектора. Распределение магнитного поля B задавалось соленоидами $C1$ – $C5$. При выключенном соленоиде $C5$ магнитное поле приблизительно однородно на всем участке ускорения электронов и транспортировки пучка, за исключением коллекторной области. Поле корректирующей катушки $C4$ позволяло исключить попадание электронов с катода на заземленные электроды, расположенные с противоположной стороны от входа в канал транспортировки. Выключение соленоида $C2$ обеспечивало компрессию пучка по площади примерно в 2 раза. При выключенных одновременно катушках $C2$ и $C3$ компрессия достигала 4 раз. Соленоид $C5$ использовался для создания локальной неоднородности магнитного поля перед коллектором.

Ток пучка на коллектор I_C в исследованных режимах менялся в пределах ориентировочно от 0.7 до 2 кА. Длительность переднего фронта импульса U не превышала ~ 0.4 μ s. На вершине импульса происходил медленный спад напряжения, определяемый разрядом емкостей генератора импульсных напряжений. Формирование в результате расширения катодной плазмы [1] плазменной закоротки между катодом и заземленными электродами приводило к резкому падению напряжения на заднем фронте импульса U .

Для получения информации о колебаниях пространственного заряда РЭП использовались зонды $P1$ и $P2$, расположенные соответственно на расстояниях 40 и 80 см от катода, а также зонд $P3$ над держателем

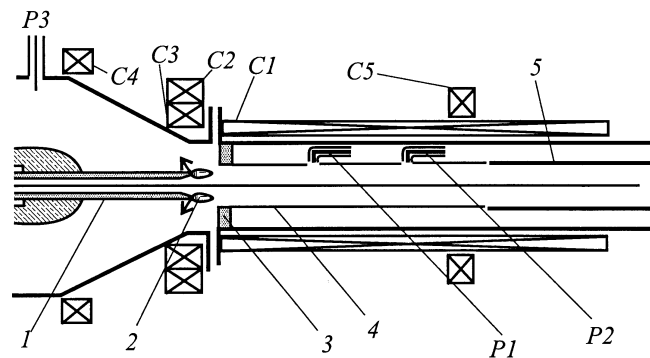


Рис. 1. Схема экспериментального прибора КДМИ-2: 1 — катод, 2 — катодная плазма, 3 — анод, 4 — канал транспортировки, 5 — коллектор. $C1$ – $C5$ — соленоиды, $P1$ – $P3$ — зонды. Стрелками показано направление силовых линий электрического поля у „внутренней“ поверхности катодной плазмы.

катода. Регистрируя наведенные на зонды сигналы в разные моменты времени в течение импульса тока пучка, можно было проследить за изменениями характеристик колебаний пространственного заряда. Фурье-анализ коротких (длительностью ~ 30 – 120 ns) разовых временных реализаций [2–4] позволял определить вид „мгновенных“ спектров колебаний. Зонды $P1$ и $P2$ сообщались через малые (диаметром 5 мм) отверстия с областью транспортировки РЭП и фиксировали наведенные сигналы из ближней к ним зоны [2–4] на расстояниях от катода соответственно ~ 40 и ~ 80 см. С помощью зонда $P3$ регистрировались ВЧ сигналы, поступающие к нему из области вблизи катода по коаксиальной линии, образованной держателем катода и внешним электродом (оболочкой) прибора. Сигналы на частотах менее 1 GHz из дальней от катода зоны канала транспортировки пучка практически не могли достигнуть входа в указанную коаксиальную линию, так как критическая длина волны круглой трубы дрейфа пучка не превышает ориентировочно 20 см.

Результаты исследований и их обсуждение

Как показали проведенные эксперименты, спектральные характеристики колебаний пространственного заряда в РЭП качественно подобны во всем исследованном интервале магнитных полей и токов пучка. Воспользуемся для их описания экспериментальными данными, полученными преимущественно при магнитном поле $B = 1$ Т. Такие данные удобно сопоставлять с результатами исследования КДМИ-1 [2–4]. Рассмотрим сначала результаты исследования колебаний пространственного заряда в РЭП, который удерживается в однородном вдоль оси магнитном поле.

Спектры колебаний в дальней от катода зоне канала транспортировки РЭП (на расстояниях от катода $L \geq 40$ см) определялись с помощью зондов $P1$ и $P2$.

Таблица 1.

Основные характеристики	КДМИ-1	КДМИ-2
Диаметр катода D_C , mm	20	37
Диаметр канала транспортировки D_T , mm	32	52
Расстояние между катодом и анодом L_{ca} , mm	12, 27	30
Длина канала транспортировки L_T , mm	~ 1200	~ 1450

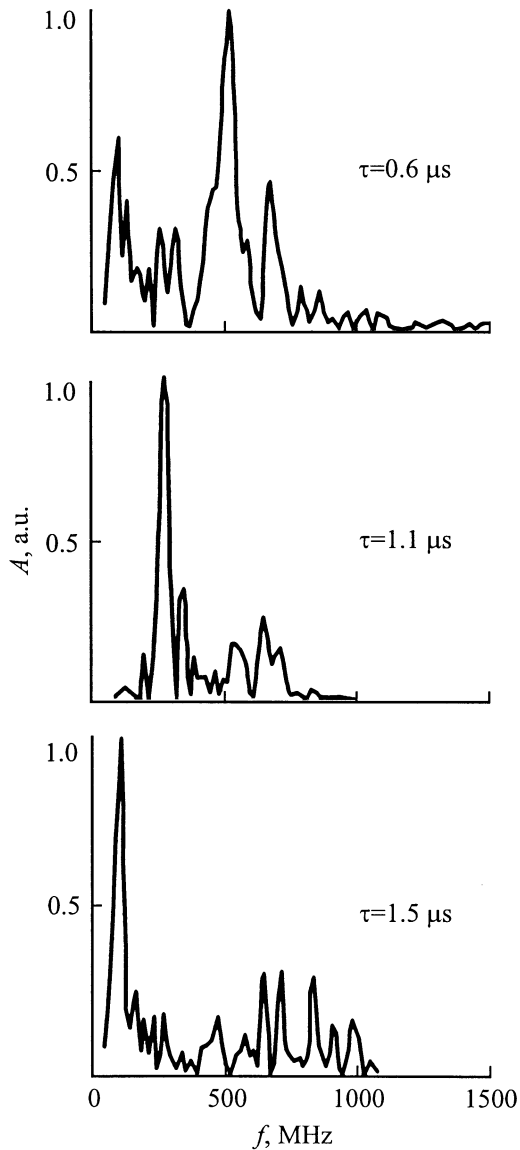


Рис. 2. Типичные спектры колебаний пространственного заряда, зарегистрированные зондом 1 при магнитном поле $B = 1$ Т в разные моменты времени τ относительно начала импульса.

Полученные данные иллюстрируют рис. 2 и 3, на которых приведены спектры, зафиксированные в разные моменты времени (с разной задержкой τ) относительно начала импульса РЭП. Данные на этих и последующих рисунках получены при $U = 220$ кВ. В интервале времен $0.3 \leq \tau \leq 1.0-1.2 \mu\text{s}$ на них можно выделить две области частот с повышенными амплитудами колебаний в районе 100–300 и 400–800 МГц.¹ Максимальные амплитуды A_m обеих ветвей колебаний немонотонно ме-

¹ Наряду с этим иногда наблюдались сравнимые по амплитуде колебания на частотах менее 50 МГц. Эти плохо воспроизводимые колебания могли быть связаны, например, с флуктуациями тока электронов со взрывоэмиссионного катода [1]. Здесь и ниже анализируются закономерности колебательных процессов только на частотах $f > 50$ МГц.

няются во времени и достигают в отсутствие компрессии у катода во всех исследованных режимах наибольшей величины в интервале значений $\tau \sim 0.5-0.8 \mu\text{s}$, т.е. с задержкой относительно переднего фронта импульса напряжение U . На рис. 4, *a, b* показаны типичные изменения максимальных амплитуд колебаний A_m от времени их регистрации τ в сигналах зонда *P1*. Соотношения максимальных амплитуд НЧ (A_{LFm}) и ВЧ (A_{HFm}) ветвей колебаний различны на зондах *P1* и *P2*. На ближнем к катоду зонде *P1* амплитуды A_{LFm} и A_{HFm} близки по величине. На удаленном же от него зонде *P2* $A_{HFm} \gg A_{LFm}$.

Подытоживая результаты измерений, выполненных с помощью зондов *P1* и *P2*, можно утверждать, что основные характеристики колебаний пространственного заряда РЭП в канале их транспортировки в отсутствие сильных вариаций магнитного поля на пути формирования и транспортировки пучка качественно подобны в диодах КДМИ-1 и КДМИ-2, отличающихся своими размерами. Среди таких общих особенностей хотелось бы

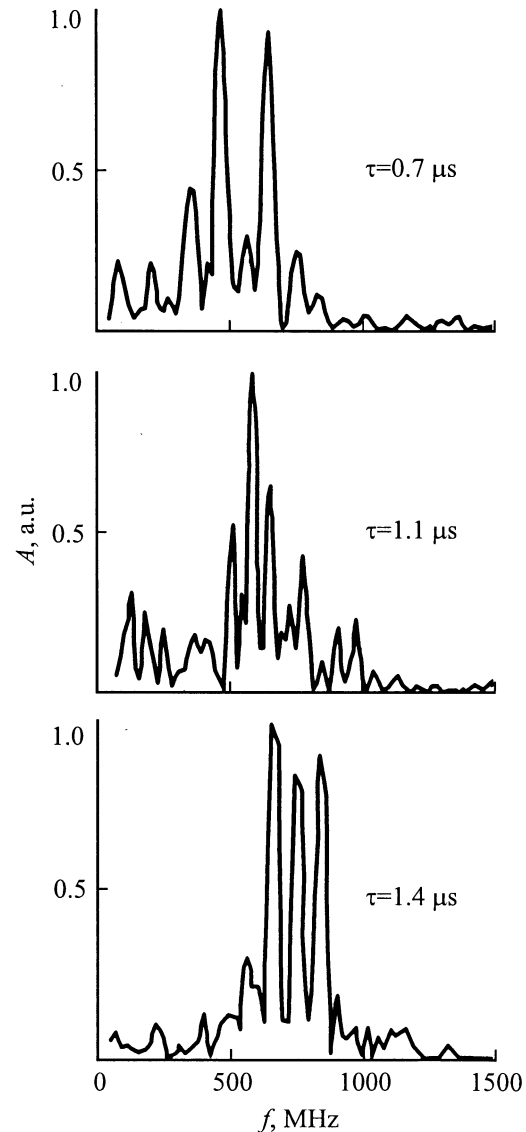


Рис. 3. То же, что на рис. 2, для зонда 2.

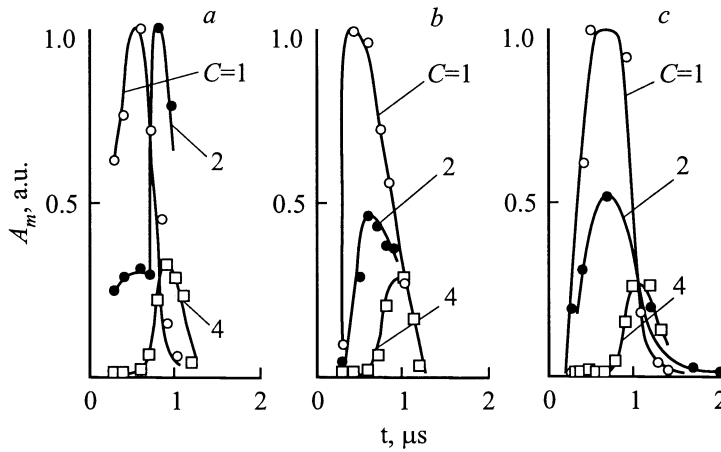


Рис. 4. Зависимости максимальной амплитуды A_m составляющих спектра колебаний пространственного заряда от времени t их регистрации, измеренные при разных уровнях компрессии C зондами 1 (*a*), 2 (*b*) и 3 (*c*) при магнитном поле $B = 1$ Т. *a* и *c* — изменения НЧ составляющей спектра, *b* — иллюстрирует изменения ВЧ составляющей спектра.

отметить не только приблизительно одинаковую структуру спектров, включающих НЧ и ВЧ ветви колебаний. Заслуживает внимания также отмеченное выше нарастание амплитуды колебаний после окончания переднего фронта импульса, ускоряющего электроны напряжением. Как уже упоминалось, такое нарастание, впервые обнаруженное в [4] при исследовании КДМИ-1, было объяснено движением катодной плазмы на участке ускорения электронов и связанным с этим появлением группы электронов с большими поперечными скоростями. Отмеченная разница в соотношении A_{LFm}/A_{HFm} для зондов *P1* и *P2* может быть связана с нарастанием ВЧ колебаний в направлении от зонда *P1* к зонду *P2*, которое также наблюдалось в работе [4]. Такое изменение амплитуд ВЧ колебаний принципиально может существовать как при развитии двухпоточковой неустойчивости в РЭП, так и в случае, когда эти колебания связаны с развитием диокотронной неустойчивости у боковой поверхности катодной плазмы [4]. Полученные в работе [4] данные не давали оснований для того, чтобы предпочесть ту или другую модель. Проведенные в настоящей работе измерения показали, что независимо от магнитного поля амплитуды ВЧ колебаний максимальны на зондах *P1* и *P2* всегда в районе 400–800 МГц. Иллюстрируют это типичные спектры зонда *P2*, приведенные для магнитных полей 1, 0.8 и 0.6 Т на рис. 3 и 5. Нам представляется, что отсутствие связи характерных частот ВЧ колебаний с магнитным полем свидетельствует в пользу „двухпоточкового“ механизма их развития. Если бы ВЧ колебания были связаны с диокотронной неустойчивостью и обусловленным ею азимутальным движением сгустков пространственного заряда в скрещенных полях у боковой поверхности плазменного эмиттера, следовало бы ожидать увеличения их частоты с уменьшением магнитного поля из-за возрастания дрейфовой скорости азимутального движения $V_d = E_{\perp}/B$ сгустков.

Таким образом, полученные в КДМИ-2 данные не только свидетельствуют об общности коллективных яв-

лений в существенно отличающихся системах формирования РЭП и в существенно различных режимах, но позволяют в большей степени конкретизировать модель ВЧ ветви колебаний.

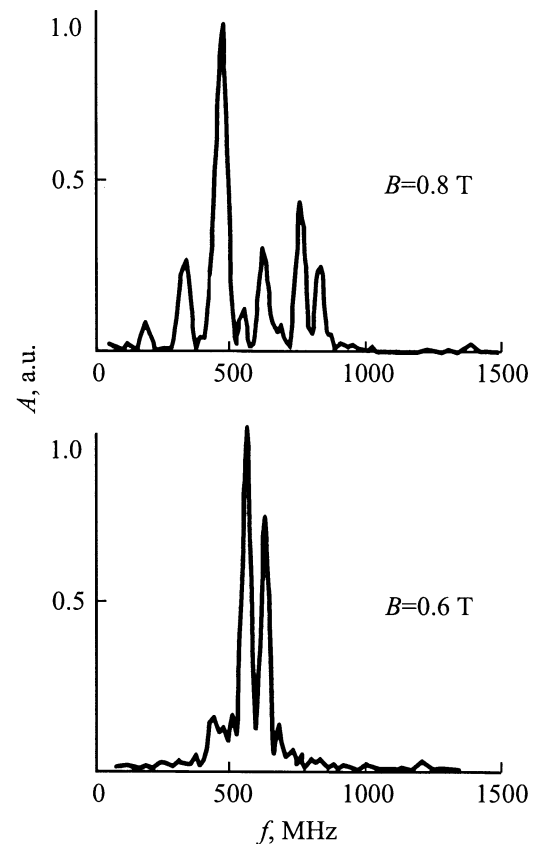


Рис. 5. Спектры колебаний пространственного заряда, зарегистрированные зондом 2 в момент времени $t = 1.1 \mu\text{s}$ относительно начала импульса U при двух значениях магнитного поля.

Информация о колебаниях пространственного заряда в ближней к катоду зоне формирования РЭП была получена с помощью зонда *P3*. Типичные зарегистрированные с его помощью спектры приведены на рис. 6. Здесь так же, как и на зондах *P1* и *P2*, амплитуда регистрируемых колебаний максимальна при $\tau = 0.5\text{--}0.8\ \mu\text{s}$. Однако во всем интервале времен регистрации $\tau \leq 1.0\text{--}1.1\ \mu\text{s}$ низкочастотные колебания в сигнале первого зонда существенно больше по амплитуде, чем высокочастотные. Особенно велика эта разница при $\tau = 0.5\text{--}0.8\ \mu\text{s}$, когда отношение A_{LFm}/A_{HFm} превышает 100 раз. С задержкой времени регистрации (при $1.1 \leq \tau \leq 1.5\ \mu\text{s}$) амплитуда ВЧ составляющих спектра в сигнале с первого зонда возрастает и отношение A_{LFm}/A_{HFm} уменьшается по величине, оставаясь все же больше единицы. В спектрах третьего зонда, измеренных при временах задержки $\tau \geq 1.1\text{--}1.2\ \mu\text{s}$, можно выделить составляющие на частотах, приблизительно кратных основной низкой частоте. Учитывая, что излучения на частотах основных регистрируемых пиков спектра не могут проникнуть к зонду 3 из канала транспортировки пучка, их можно связать с развитием нелинейных колебательных процессов и формированием с течением времени высших гармоник НЧ колебаний пространственного заряда непосредственно вблизи этого зонда.

Сравнение спектров, полученных с помощью зондов *P1–P3* (рис. 2–6), свидетельствует, как нам кажется, о том, что в интервале времен $\tau \leq 1.0\text{--}1.2\ \mu\text{s}$ основным источником низкочастотных колебаний является область вблизи катода. Источник же ВЧ колебаний на этом этапе — электронный пучок в канале транспортировки. Колебания на частотах порядка 100–300 МГц могут быть связаны с коллективным движением электронов в своеобразном магнетронном диоде, образованном держателем катода и внешним металлическим кожухом экспериментального прибора (рис. 1). Облако электронов здесь может первоначально формироваться потоком электронов с плазменного эмиттера в противоположную от коллектора сторону. Действительно, из-за радиального расширения катодной плазмы у ее поверхности, обращенной в сторону, противоположную каналу транспортировки, должны возникать электрические поля, направленные к держателю катода. На рис. 1 стрелками показано направление силовых линий электрического поля у „внутренней“ поверхности катодной плазмы. Если принять для оценки, что скорость радиального расширения плазмы имеет величину $\sim 5 \cdot 10^5\ \text{cm/s}$ [1], то ко времени (0.5–0.8 μs), когда амплитуда НЧ колебаний становится максимальной, здесь создается своеобразный торцевой плазменный эмиттер—„поджигатель“, возвышающийся над поверхностью катода на 2.5–4 мм. Даже сравнительно небольшой по плотности поток электронов с поджигателя способен вызвать вторичную эмиссию с держателя катода, которая будет способствовать накоплению пространственного заряда у боковой его поверхности. Регистрируемые зондом *P3* НЧ сигналы могут быть обусловлены движением сгруппированного в сгустки электронного пространственного заряда как в

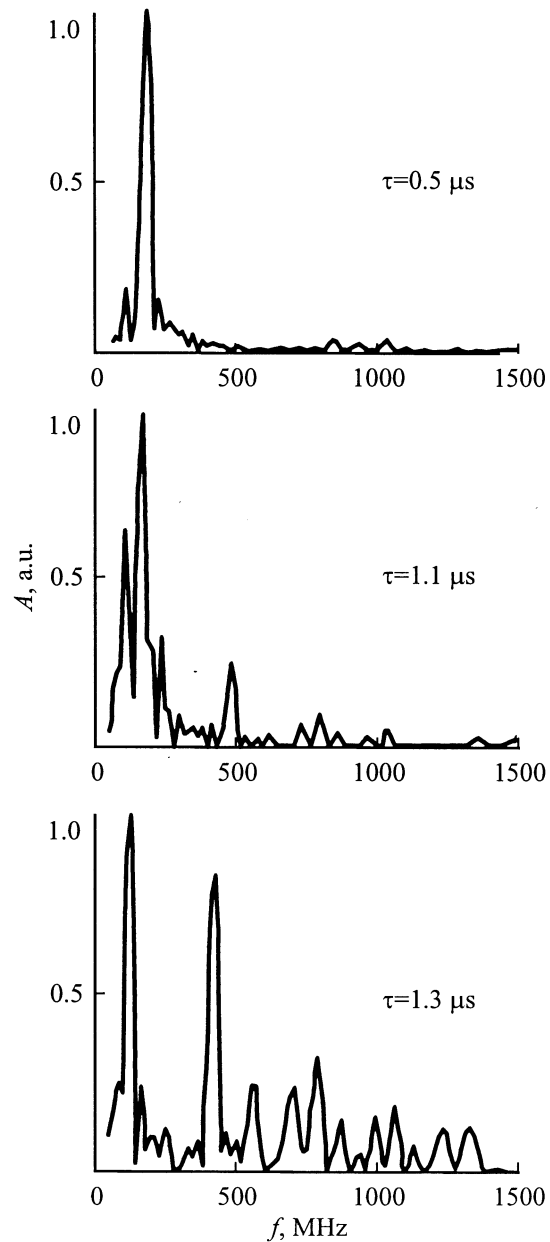


Рис. 6. Типичные спектры колебаний пространственного заряда, зарегистрированные зондом *I* при магнитном поле $B = 1\ \text{T}$ в моменты времени τ относительно начала импульса.

азимутальном, так и в аксиальном направлениях. Описание механизма накопления пространственного заряда и развития колебаний указанных типов для магнетронных систем с холодными катодами можно найти в существующей литературе (см., например, [5,6]). Точное определение частот колебаний в описанном магнетронном диоде затруднено. Однако оценки, выполненные с помощью приведенных в работе [6] соотношений, свидетельствуют, что характерные частоты $\sim 100\text{--}300\ \text{MHz}$ могут быть реализованы на первых модах ($n_\varphi = 1\text{--}3$) азимутальных и(или) на более высоких модах аксиальных колебаний.

Важные для понимания природы колебаний пространственного заряда данные были получены при исследовании влияния на них локальных неоднородностей магнитного поля в коллекторной области КДМИ-2, создаваемых катушкой $C5$ (рис. 1). Уменьшая ориентировочно до нуля магнитное поле вблизи этой катушки (создавая с ее помощью поле обратной полярности по сравнению с полем основного соленоида), мы практически не влияли на характеристики коллективных процессов в РЭП в интервале времен $\tau > 1.0\text{--}1.2\ \mu\text{s}$. Но в начале импульса, ускоряющего электроны напряжения ($\tau < 1.0\ \mu\text{s}$), воздействие указанной неоднородности магнитного поля приводило к весьма заметному уменьшению скорости нарастания НЧ и ВЧ колебаний.

Отмеченное влияние на ВЧ колебания, казалось бы, свидетельствует против того, что они локализованы преимущественно в описанном выше магнетронном диоде. Действительно, локальное возмущение магнитного поля от короткой ($\sim 15\ \text{cm}$) катушки на большом ($\sim 100\ \text{cm}$) расстоянии от катода не могло непосредственно воздействовать на движение электронов в области рассматриваемого магнетронного диода. Однако опосредованное влияние указанной неоднородности на развитие коллективных процессов у катода все же могло существовать. Его можно связать, например, с изменением эффективной длины РЭП. Действительно, вводя „размагничивающее“ магнитное поле, удавалось осадить пучок на поверхность канала транспортировки ближе к катоду, сократив при этом ориентировочно на 30% эффективную его длину. Влияние указанного фактора на характеристики НЧ колебаний у катода можно объяснить, учитывая поток быстрых вторичных электронов с коллектора, возникающий при его бомбардировке. Если в потоке электронов, движущихся сначала в сторону коллектора, под действием колебаний вблизи катода формируются сгустки пространственного заряда, то возвращающийся к катоду поток отраженных от коллектора (или от поверхности канала транспортировки) электронов также будет промодулирован по плотности. Промодулированный возвращающийся к катоду поток электронов формирует обратную связь, влияние которой на НЧ колебания в магнетронном диоде должно зависеть от фазы попадания электронных сгустков в прикатодную область, а следовательно, и от длины проходимого ими пути. Если модуляция возвращающегося к катоду электронного потока невелика, влияние этой обратной связи должно быть наиболее сильным на начальном этапе нарастания амплитуды НЧ колебаний, как это и было зарегистрировано в эксперименте.

Аналогичным образом (созданием отрицательной обратной связи) можно объяснить и отмеченное в экспериментах падение скорости нарастания ВЧ колебаний пространственного заряда в начале импульса U при введении описанной неоднородности магнитного поля у коллектора.

Завершая анализ полученных результатов, рассмотрим влияние на коллективные процессы в РЭП компрессии пучка у катода. На рис. 4 показаны зависимости

Таблица 2.

Зонд	P1			P2			P3		
	1	2	4	1	2	4	1	2	4
C	0.6	1.5	1.0	0.2	2	—	115	10	1.3

максимальной амплитуды A_m колебаний пространственного заряда от времени τ их регистрации, измеренные не только в отсутствие компрессии ($C = 1$), но и при уровнях компрессии $C = 2$ и 4 . Так как влияние компрессии на характеристики колебаний зондов 1 и 2 оказалось качественно подобным, мы ограничились изображением зависимостей $A_m(\tau)$ НЧ и ВЧ составляющих спектра только для зонда P1 (соответственно рис. 4, *a* и *b*). Для зонда P3 приведены изменения только основной НЧ составляющей спектра (рис. 4, *c*). Влияние компрессии оказалось чрезвычайно сильным. Увеличение компрессии сопровождалось резким падением амплитуды колебаний. Одновременно с этим менялись положение максимума характеристик $A_m(\tau)$ и соотношение максимальных амплитуд A_{LFm}/A_{HFm} (табл. 2). Типичные соотношения максимальных амплитуд НЧ и ВЧ колебаний (A_{LFm}/A_{HFm}) для всех зондов, определенные в эксперименте при разных значениях компрессии C , указаны в табл. 2. Наибольшие амплитуды колебаний достигались позже при больших уровнях компрессии. Задержка в развитии колебаний объясняется, как нам кажется, воздействием создаваемой неоднородности магнитного поля на движение катодной плазмы. Действительно, увеличение компрессии уменьшает скорость движения катодной плазмы вдоль оси прибора. Это неизбежно должно привести к уменьшению скорости нарастания ВЧ колебаний, если верно предложенное ранее [4] объяснение механизма усиления этих колебаний в связи с продвижением катодной плазмы в сторону анода. Падение скорости нарастания НЧ колебаний, видимо, происходит из-за „сжатия“ плазменного эмиттера в нарастающем в направлении коллектора магнитном поле и ухудшения в связи с этим условий попадания электронов с его обратной стороны в рассмотренный выше магнетронный диод — источник НЧ колебаний.

Заключение

Подводя итоги проведенной работы, отметим важнейшие ее результаты.

Продемонстрирована общность процессов, определяющих закономерности коллективных процессов в длинноимпульсных РЭП разной геометрии и в широком интервале изменения удерживающих пучок магнитных полей.

Выявлена значительная роль коллективных процессов в скрещенных полях магнетронного диода, образованного катодной системой и оболочкой прибора, в формировании НЧ колебаний пространственного заряда в КДМИ.

Получены данные, свидетельствующие о связи ВЧ колебаний пространственного заряда с развитием двухпоточковой неустойчивости на участке транспортировки РЭП.

Обнаружена возможность подавления колебаний пространственного заряда с помощью компрессии РЭП в прикатодной области и объяснен механизм воздействия неоднородных магнитных полей в этой области с учетом их влияния на движение катодной плазмы.

Авторы благодарны А.В. Архипову за помощь в проведении эксперимента и за участие в обсуждении результатов работы.

Данная работа выполнялась при поддержке грантом РФФИ (№ 01-02-17081).

Список литературы

- [1] Бугаев С.П., Канавец В.И., Кошелев В.И., Черепенин В.А. Релятивистские многоволновые СВЧ генераторы. Новосибирск: Наука СО, 1991. 296 с.
- [2] Богданов Л.Ю., Соминский Г.Г. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 12. С. 77–84.
- [3] Богданов Л.Ю., Дворецкая Н.В., Соминский Г.Г., Фабировский А.Я. // ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 8. С. 83–88.
- [4] Богданов Л.Ю., Соминский Г.Г., Фабировский А.Я. // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып. 1. С. 102–106.
- [5] Гельвич Э.А., Соминский Г.Г. // Электронная пром-сть. 1981. № 7–8. С. 20–25.
- [6] Соминский Г.Г. // Лекции по электронике СВЧ (4-я зимняя школа-семинар инженеров). Саратов: Изд-во СГУ, 1978. С. 119–138.