



Изв.вузов «ПНД», т.3, № 4, 1995

УДК 537.5 + 533.9

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ОБЪЕМНОГО ЗАРЯДА И ФОРМИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СТРУКТУР В ЭЛЕКТРОННОМ ПОТОКЕ С МАГНИТНЫМ УДЕРЖАНИЕМ

Часть I

*А.В. Архипов, Л.Ю. Богданов, С.В. Воскресенский, С.А. Левчук,
О.И. Лукин, Г.Г. Соминский*

В разнообразных электронных потоках с магнитным удержанием экспериментально определены характеристики "мгновенных" спектров колебаний пространственного заряда. Выяснены закономерности и механизмы изменения степени упорядоченности коллективных процессов. Получена информация о пространственной структуре колебаний. Исследовано воздействие на коллективные процессы внешнего гармонического сигнала.

В связи с большим объемом статьи она разбита на две части. В первой части, представленной в настоящем номере журнала, излагается содержание 1 и 2 разделов. В части 2, которая будет опубликована в ближайшем номере журнала, будут представлены раздел 3 и Заключение.

Оглавление

Часть 1

Введение.

1. Объекты исследования.
2. Методы измерений и аппаратура.

Часть 2

3. Результаты измерений и их обсуждение.

- 3.1. Магнетронный усилитель.
- 3.2. Винтовой электронный пучок системы гиротронного типа.
- 3.3. Релятивистский электронный пучок.
- 3.4. Длинноимпульсный электронный пучок сплошного сечения.

Заключение.

Введение

Своеобразной активной средой большинства мощных СВЧ устройств является удерживаемый магнитным полем электронный поток (ЭП). Электронные потоки высокой плотности чувствительны к малым возмущениям и, как правило, неустойчивы. Развивающиеся автоколебания и волны определяют фундаментальные характеристики потоков, ограничивая компрессию и удержание, затрудняя их транспортировку, приводя к разбросу электронов по скоростям. В СВЧ устройствах они определяют уровень шумов и паразитных сигналов.

Колебания в потоках связаны с движением сгруппированного объемного заряда и могут отличаться не только частотами, но и пространственными характеристиками, особенностями движения сгустков заряда. Существование и конкуренция разных видов колебаний сильно усложняет картину коллективных процессов, делает их нестационарными, зачастую приводит к «хаотизации» колебаний (см., например, [1]), проявляющейся в формировании многочастотного, а в некоторых случаях и квазибелого спектра.

Теоретическое рассмотрение пространственно неоднородных и нестационарных потоков высокой плотности сталкивается с большими трудностями, что и не позволило до сих пор создать непротиворечивую и достаточно полную модель происходящих в них коллективных процессов. Для построения такой модели, да и в практической деятельности, необходимы экспериментальные данные о характеристиках коллективных процессов в электронных потоках высокой плотности. Однако, и экспериментальное определение этих характеристик затруднено, так как требует создания слабовозмущающих методов диагностики с высокими показателями пространственного и временного разрешения. Кроме того, такие исследования чрезвычайно трудоемки и, будучи выполнены в какой-либо конкретной электронной системе, как правило, не позволяют надежно определить степень общности получаемых результатов.

На кафедре физической электроники Санкт-Петербургского государственного технического университета уже длительное время ведется экспериментальное исследование распространенных в СВЧ электронике типов ЭП с магнитным удержанием. В настоящей работе излагаются наиболее важные и интересные результаты последних лет.

1. Объекты исследования

Исследования выполнены:

- в усилителе магнетронного типа - амплитроне (УМ) с вторично-эмиссионным катодом в пространстве взаимодействия;
- в винтовых электронных пучках (ВЭП) кольцевого сечения устройств гиротронного типа;
- в сильноточных релятивистских электронных пучках (РЭП) кольцевого сечения;
- в длинноимпульсных сплошных по сечению пучках (СП) с высоким уровнем компрессии и переносимой удельной энергии.

На рис. 1 - 4 схематически показано сечение исследованных электронных систем.

В процессе работы варьировались характерные размеры потоков, токи и энергия электронов, распределение удерживающих ЭП полей, эмиссионные характеристики ограничивающих потоки электродов и характеристики потоков вторичных частиц, изучено воздействие внешних гармонических сигналов. Сопоставление полученных данных в различных электронных устройствах и в различных условиях позволило, с одной стороны, определить наиболее общие закономерности коллективных процессов, а с другой, - выявить специфические для разных систем факторы, влияющие на эти процессы.

Исследованные нами импульсные УМ десятисантиметрового диапазона длин волн работали при напряжениях U_a до 20 кВ, магнитных полях $0.08 \leq B \leq 0.15$ Тл и анодных токах I_a до 30 А. Длительность импульсов τ_i варьировалась в пределах 3...10 мкс.

Специфика УМ (см. рис. 1) по сравнению с электронно-пучковыми системами состояла, прежде всего, в способе накопления и поддержания пространственного заряда за счет вторичной эмиссии с катода. Обычно принято отличать СВЧ устройства со скрещенными полями и направлением движения потока электронов, формирующего здесь своеобразный замкнутый вокруг катода

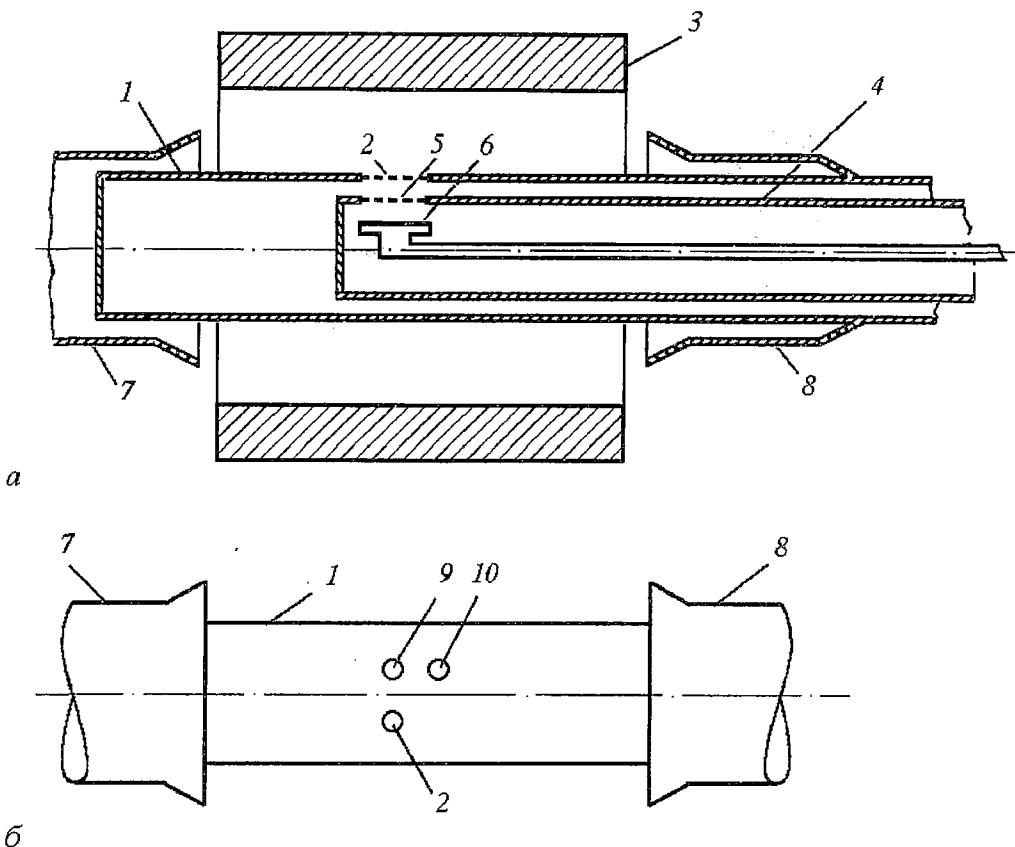


Рис. 1. Схематическое изображение сечения пространства взаимодействия (а) и катодной системы (б) усилителя магнетронного типа (УМ): 1 - катод с отверстием; 2,3 - анод; 4 - электрод зондовой системы с отверстием; 5,6 - коллектор; 7 и 8 - торцевые катодные экраны; 9 и 10 - входные отверстия зондовых систем. «Жирными» линиями (без штриховки) показано сечение тонкостенных электродов

резонатор. Азимутальное поперечное магнитному полю движение электронов действительно играет основную роль во взаимодействии с полями замедляющей системы на аноде. При анализе же автоколебаний электронного облака, как было установлено нами [2-4], необходимо учитывать и аксиальное движение вдоль магнитного поля, происходящее под действием краевых электрических полей. Отмеченное движение вдоль магнитного поля указывает на определенную общность потоков М- и О-типа. Общность особенно велика при сравнении с сильноточными электронными пучками, в которых, как и в устройствах со скрещенными полями, заметен азимутальный дрейф, происходящий под действием скрещенных магнитного поля и электрического поля пространственного заряда.

Принципиальной и важной для развития автоколебаний особенностью устройств М-типа с замкнутым электронным потоком является то, что в них в пространстве взаимодействия могут существовать долгоживущие электроны. Это увеличивает вероятность развития колебаний.

Изученные нами ВЭП (см.рис.2) формируются магнетронно-инжекторной пушкой (МИП). По выходе из МИП поток электронов кольцевого сечения попадает сначала в нарастающее магнитное поле пробочкой конфигурации, где происходит его сжатие, уменьшаются продольные ($v_{||}$) и увеличиваются поперечные (v_{\perp}) по отношению к силовым линиям магнитного поля скорости электронов. Далее ЭП дрейфует в постоянном магнитном поле, а затем в уменьшающемся магнитном поле расфокусируется и оседает на коллекторе. Распределение магнитного поля показано на рис.2.

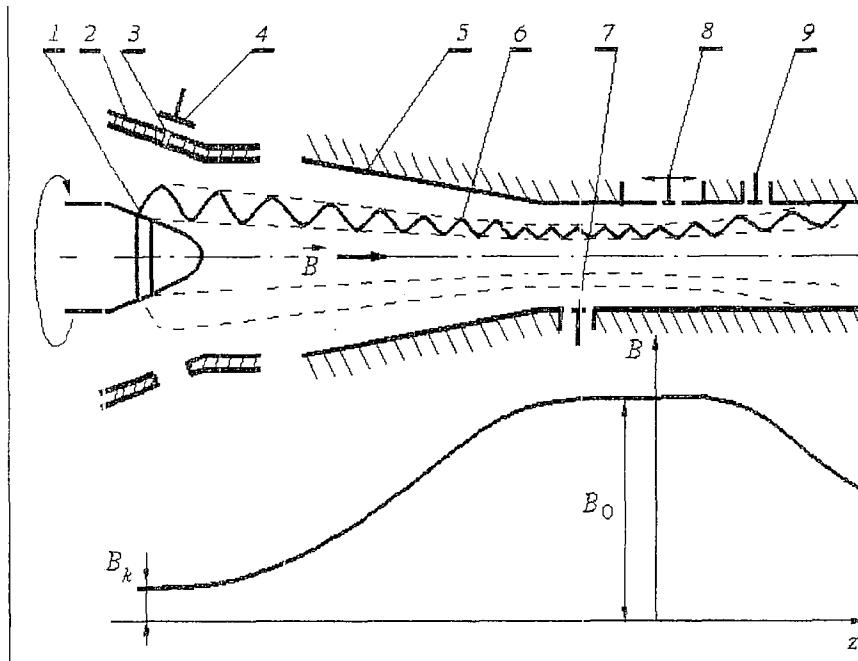


Рис. 2. Схематическое изображение сечения системы формирования винтового электронного пучка. Зависимость магнитного поля B от продольной координаты z : 1 - эмиттирующий поясок катода магнетронно-инжекторной пушки (МИП); 2 - анод МИП с отверстием; 3,4 - коллектор; 5 - труба дрейфа; 6 - траектория электрона, пунктиром обозначены огибающие траекторий электронов; 7,8,9 - зонды. B_k и B_0 - соответственно поле у катода и на полке магнитного поля. Стрелка отмечает возможность поворота катода МИП вокруг оси

Полная энергия электронов и ток пучка достигали соответственно значений 15 кВ и 20 А. Постоянное магнитное поле до 3.5 Тл формировалось сверхпроводящим соленоидом. Коэффициент перемагничивания между катодом и полкой магнитного поля (B_0) был: ~20...25, что и определяло сжатие пучка по площади. Максимальные значения питч-фактора $g_0 = v_{\perp}/v_{\parallel}$ достигали в экспериментах 1.5 - 1.7. Основные измерения выполнены в импульсном режиме. Расфокусировка ВЭП перед коллектором, работа при повышенных скважностях $Q \geq 10^3$ и длительностях импульсов тока пучка $\tau_i \leq 50$ мкс позволяли в этих исследованиях свести к минимуму влияние вторичных эффектов у коллектора, связанных с выделением энергии пучка на его поверхности.

В реализованном ВЭП поля пространственного заряда сравнительно невелики. Поэтому на участке однородного магнитного поля B_0 скорость азимутального дрейфа потока $v_d = E/B_0$ существенно меньше как поперечной (v_{\perp}), так и продольной (v_{\parallel}) скоростей электронов, что типично даже для мощных гиротронов.

В стандартных устройствах гиротронного типа на участке дрейфа (в области полки магнитного поля) располагается резонатор. В наших экспериментах резонатор отсутствовал, что позволило исследовать коллективные процессы в ВЭП в отсутствии интенсивных колебаний на циклотронной частоте. Однако, величина магнитного поля на полке (~2.0-3.5 Тл) и аксиальная протяженность участка дрейфа (~100 мм) были выбраны типичными для гиротронов миллиметрового диапазона.

Таким образом, особенности исследованных ВЭП связаны с движением электронов в существенно неоднородных магнитных полях и со сравнительно небольшой аксиальной протяженностью участка дрейфа.

При формировании ВЭП в МИП, как правило, реализуется режим ограничения тока с катода его эмиссионной способностью. Выбор такого режима

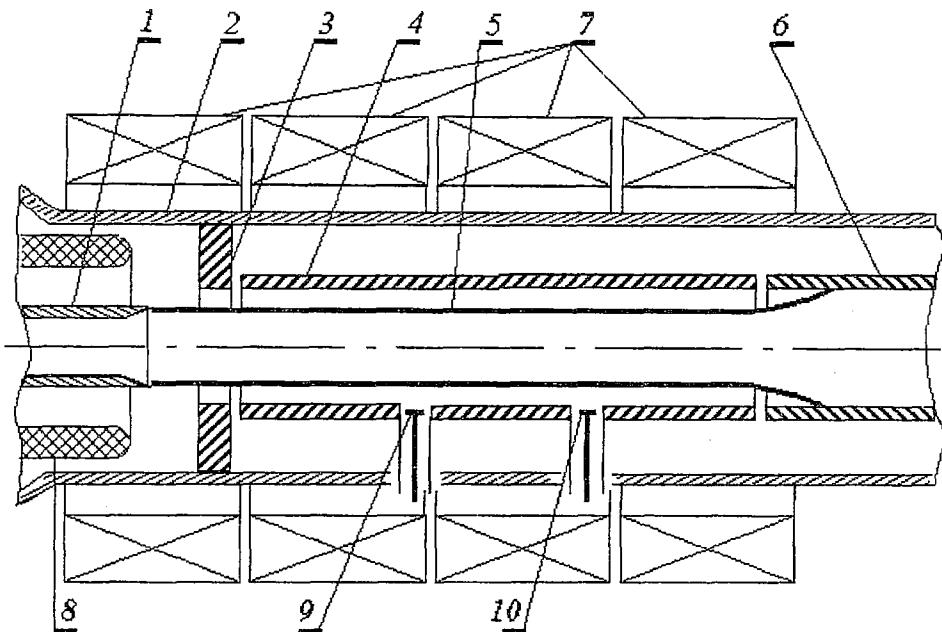


Рис. 3. Схематическое изображение сечения системы формирования РЭП: 1 - кромочный катод; 2 - корпус прибора; 3 - дисковый анод из углерода; 4 - канал транспортировки; 5 - электронный пучок; 6 - коллектор; 7 - соленоиды; 8 - охранный электрод; 9 и 10 - зонды

диктуется стремлением получить большие g_0 [5, 6]. Оборотной стороной такого выбора являются неоднородности ЭП, обусловленные даже малыми изменениями работы выхода или температуры по поверхности катода. В подавляющем числе устройств М- и О-типа обычно стремятся реализовать режим ограниченности тока с катода пространственным зарядом. Поэтому систему формирования ВЭП отличает не только характерное распределение магнитного поля, но и режим работы катода.

Исследования РЭП (см. рис.3) давали возможность определить специфику коллективных процессов в пучке кольцевого сечения при релятивистских скоростях электронов, больших полях пространственного заряда ($E \geq 10^5$ В/см) и высоких уровнях переносимой пучком энергии. Они позволяли, кроме того,

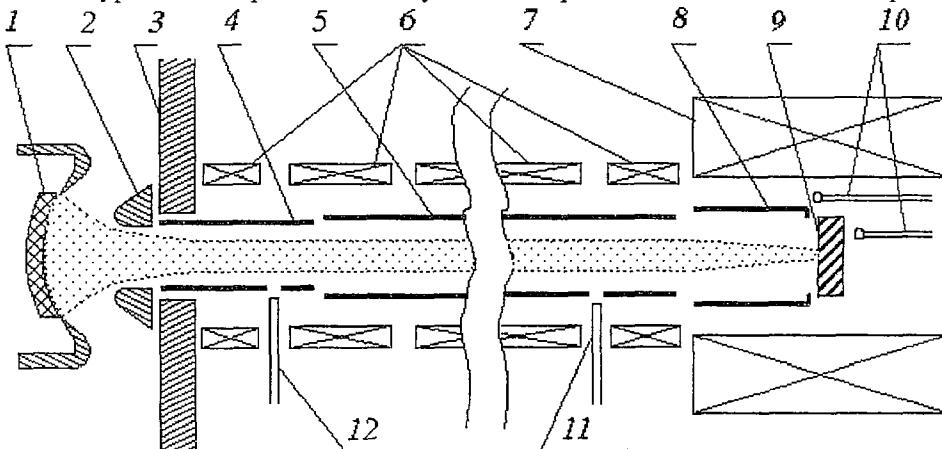


Рис. 4. Схематическое изображение системы формирования электронного пучка сплошного сечения (СП): 1 - термокатод; 2 - анод; 3 - магнитный экран; 4 - электрод (начальная секция канала транспортировки); 5 - канал транспортировки; 6 - соленоиды, создающие магнитное поле канала транспортировки B_t ; 7 - соленоид, создающий магнитное поле у коллектора B_k ; 8 - дополнительный электрод коллектора; 9 - мишень-коллектор; 10 - датчики рентгеновского излучения; 11 и 12 - датчики светового излучения

выявить влияние катодной и коллекторной плазмы, принципиально присущих релятивистским системам со взрыво-эмиссионными катодами [7, 8].

Особенностью исследованного РЭП является то, что время движения плазменных образований в канале транспортировки сравнимо по порядку величины с длительностью импульсов ($\tau_i \sim 1\ldots3$ мкс) [7, 8]. Это определяет нестационарность коллективных процессов и существенную их неоднородность в канале транспортировки.

РЭП формировался в диоде с магнитной изоляцией (см. рис.3). Электроны с взрывоэмиссионного кромочного катода 1 из нержавеющей стали ускорялись напряжением U , подаваемым на катод относительно заземленных корпуса прибора 2, графитового анода 3, и канала транспортировки 4. Пучок электронов 5 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 импульсными соосными соленоидами 7. Неоднородность магнитного поля B_t не превышала 10%.

Измерения выполнены в режиме разовых импульсов при фиксированном напряжении $U = 220$ кВ в широком интервале магнитных полей $0.15 \leq B_t \leq 1.0$ Тл. Импульсы магнитного поля имели длительность ~ 10 мс. Ток пучка 1 регулировался в пределах от 0.3 до 1.1 кА по методике, описанной в [9], осевым перемещением катода 1 относительно электрически соединенного с ним неподвижного охранных электрода 8.

В экспериментах с СП (см. рис.4) мы стремились выявить коллективные процессы, связанные с формированием плазменных образований и потоков вторичных частиц при взаимодействии пучка электронов умеренной по сравнению с РЭП энергии (приблизительно до 35 кэВ) с ограничивающими его электродами. Эффекты такого типа возможны в длинноимпульсных пучках с сильной компрессией. В созданной системе формирования производилась многоступенчатая компрессия. Первичное сжатие осуществлялось в магнитно-экранированной пушке Пирса с гексаборид-лантановым катодом 1. Поток электронов, прошедших через отверстие в аноде 2, сжимался далее в нарастающем магнитном поле соленоида 6 вблизи магнитного экрана 3, дрейфовал в приблизительно однородном магнитном поле B_t канала транспортировки 4, 5 и, в конце концов, оседал на коллекторе, состоящем из мишени 9 и дополнительного электрода 8. Перед коллектором можно было реализовать дополнительную компрессию ЭП в магнитном поле пробочной конфигурации соленоида 7. В этом случае пучок фокусировался на мишени. Максимальное магнитное поле B_k у коллектора достигало 2 Тл. При сопоставлении $B_t \sim 0.5$ Тл и $B_k \sim 2.0$ Тл получена компрессия ~ 1500 раз по площади.

Для изменения значений плотности энергии w , переносимой в пучке, измерения выполнены в широком интервале длительностей импульсов τ_i вплоть до 1 - 5 мс. Длительность импульсов магнитного поля при этом была 16 мс. Величину w можно было регулировать и меняя компрессию. Плотность энергии в пучке диаметра ~ 1 мм на торцевом коллекторе достигала значений $\sim 10^3\ldots10^4$ Дж/см за импульс.

В таблице указаны размеры основных элементов исследованных электронных систем.

2. Методы измерений и аппаратура

Для определения характеристик колебаний объемного заряда использовались слабо связанные с электронным потоком и поэтому практически не возмущающие его зондовые системы (ЗС). Сравнение сигналов из разных участков ЭП позволяло выявить пространственные изменения колебательных процессов.

Регистрировались усредненные во времени спектры и разовые временные реализации сигналов: первые - с помощью спектр-анализаторов типа С4-60,

Таблица

Размеры основных элементов исследованных электронных систем

Наименование	Характерный размер	Примечание
УМ	Диаметр анода $D_a = 28$ мм Диаметр катода $D_k = 18$ мм Длина эмиттирующей части катода $l_k = 40$ мм	
Система формирования ВЭП	Диаметр катода МИП $D_k = 83$ мм Диаметр анода МИП $D_a = 97$ мм Протяженность участка перемагничивания $l_m = 220 \dots 260$ мм Протяженность полки магнитного поля $l_n = 100$ мм Диаметр канала транспортировки $l_t = 22$ мм Средний диаметр пучка $D_n = 17 \dots 1$ мм Толщина стенки пучка $\Delta = 0.8$ мм	Указаны средний диаметр эмиттирующего пояска катода и диаметр анода в этом же сечении. Значения D_n и Δ приведены для участка дрейфа ВЭП. Величины l_m и D_k менялись перемещением соленоида относительно неподвижного прибора.
Система формирования РЭП	Диаметр кромки катода $D_k = 20$ мм Расстояние между катодом и анодом $l_{ka} = 2 \dots 5$ см Диаметр канала транспортировки $D_t = 36$ мм Длина канала транспортировки $l_t \sim 1$ м	Величина l_{ka} менялась перемещением катода.
Система формирования СП	Диаметр катода $D_k = 42$ мм Радиус поверхности катода $R_{nk} = 20$ мм Диаметр канала транспортировки $D_t = 26$ мм Диаметр пучка на коллекторе $D_{kp} = 1$ мм	Диаметр пучка указан при значениях магнитного поля $B_t = 0.5$ Тл, $B_k = 1.8$ Тл

усредняющих сигнал за время наблюдения $\tau_y \geq 1-10$ с, вторые - широкополосными осциллографами С7-19 для регистрации реализаций длительностью $5 \leq \tau_p \leq 600$ нс и осциллографами типа С1-74, С8-17 для наблюдения сигналов большей длительности.

Фурье-анализ временных реализаций позволял определить характеристики «мгновенного» спектра колебаний, усредненного за время реализации. Сопоставление фаз сигналов на разных зондах давало информацию об особенностях движения сгруппированного пространственного заряда, о дисперсионных его характеристиках.

Фурье-анализ временных реализаций осуществлялся с использованием персональных ЭВМ. Сигнал с экрана осциллографа считывался и вводился в ЭВМ с помощью специальной телевизионной аппаратуры.

В экспериментах использовались два основных типа ЗС, различные в устройствах со скрещенными полями и в электронно-пучковых системах (см.[10-14]).

Конструктивные особенности ЗС в УМ поясняет рис.1. С их помощью фиксировалась обусловленная ВЧ полями в пространстве взаимодействия модуляция потока электронов, бомбардирующих локальные участки поверхности катода. Электроны попадали внутрь катода 1 через малое (диаметром 1 мм) отверстие 2. Ускоренные электрическим полем в зазоре между катодом и электродом 4, они через отверстие 5 диаметром 1.5 мм в электроде 4 попадали на коллектор 6, сигнал с которого по коаксиальной линии подавался на регистрирующую аппаратуру.

Использование мелкоструктурных сеток с размером ячейки ~ 100 мкм, закрывающих отверстия 2 и 5, с одной стороны, существенно уменьшало влияние полей из области внутри катода на движение электронов в пространстве взаимодействия прибора, а с другой, - ослабляло связь коллектора с ВЧ полями из области между катодом и анодом. В измерениях использовалось 3 одинаковых зондовых системы с входными отверстиями, разнесеными в аксиальном и в азимутальном направлении на расстояние ~ 5 мм. На рис.1,а показана одна из них. Расположение отверстий указано на рис.1, б. Сравнение фаз сигналов зондовых систем, связанных с отверстиями 2 и 9, позволяло выявить азимутальное, а сопоставление сигналов систем, связанных с отверстиями 9, 10, - аксиальное движение сгустков пространственного заряда. Развязка по мощности между зондовыми системами была не менее 70 дБ.

Описанная методика обеспечивала высокое пространственное разрешение порядка единиц миллиметров, которое необходимо при исследовании коллективных процессов в УМ со сравнительно небольшими характеристическими размерами (см.таблицу).

При изучении ВЭП и РЭП были использованы более простые ЗС (см.рис.2 и 3), обеспечивающие достаточное (порядка единиц сантиметров) разрешение в аксиальном направлении. Зонды сообщались с исследуемым пространством через отверстие в стенке канала транспортировки (диаметром ~ 1 мм в случае ВЭП и диаметром ~ 2 мм для РЭП) и осуществляли связь с ближней зоной электронного пучка. Чтобы исключить попадание быстрых электронов с катода на зонды, они углублялись относительно внутренней поверхности канала транспортировки на расстояние до 2 мм. Согласно специальным контрольным измерениям, в исследованных сильно замагнченных ВЭП и РЭП регистрировались практически только сигналы, наведенные движущимися мимо зондов сгустками пространственного заряда [13, 14].

Расстояние вдоль оси между зондами во всех измерениях существенно превышало размеры ближней зоны. В системе гиротронного типа зонды располагались в конце области магнитной компрессии 7, приблизительно в середине полки 8 и на участке спадающего магнитного поля 9 (см.рис. 2). Зонд 8 можно было перемещать вдоль оси z на 15 мм от начального положения ($z = 0$) в сторону коллектора и обратно. Начальное его положение выбрано на расстоянии

60 мм от зонда 7, а конечное соответствовало приблизительно середине расстояния между зондами 7 и 9.

В системе формирования РЭП созданы две зондовые системы (см. рис.3), одна из которых 9 находится на расстоянии 40 см от катода, а вторая 10 удалена еще на 40 см в сторону коллектора. Развязка по мощности между зондами при исследовании ВЭП и РЭП была не менее 70 дБ.

Исследование коллективных процессов в ВЭП, РЭП и УМ выполнено в широком интервале частот $10 \leq f \leq 5 \cdot 10^3$ МГц. При изучении СП основное внимание пока уделено существенно более низкочастотным процессам ($f < 1$ МГц). Большая часть полученной в этой системе информации основана на измерении модуляции токов катода, коллектора и секций канала транспортировки. Сведения о движении плазменных образований получали, кроме того, наблюдая их свечение, а также рентгеновское излучение из разных участков канала транспортировки с помощью специальных датчиков 11, 12 и 10 (см. рис.4).

При изучении коллективных процессов были использованы полученные нами ранее данные о структуре электронных потоков в УМ [15, 16] и РЭП [12, 17]. Информацию о поперечной структуре потоков с высокой плотностью энергии мы получали, кроме того, по следам на твердотельных мишенях и по рентгеновскому излучению с тонкого коллектора. При изучении ВЭП для выявления неоднородностей пучка измерялось азимутальное распределение тока на коллектор $j_r(\theta)$ по методике, описанной в [18].

В процессе изучения колебаний пространственного заряда для контроля работы формирующих электронные потоки систем измерялись магнитные поля, напряжения и токи различных электродов. Для этого использовались преимущественно стандартные методы. Особого упоминания требует, видимо, лишь способ регистрации изменения во времени потока электронов на коллектор, примененный в исследованиях РЭП и СП. В этих электронно-пучковых системах, наряду с непосредственным измерением тока I_k на коллектор, фиксировалось изменение рентгеновского излучения с коллектора, обусловленного бомбардировкой его поверхности быстрыми электронами. При этом исключалось влияние на получаемые результаты потоков вторичных частиц (ионов и электронов), возникающих при взаимодействии пучка с ограничивающими его электродами.

Завершая данный раздел, поясним испытанные в работе способы воздействия на колебания пространственного заряда. Влияние внешнего гармонического сигнала исследовалось в УМ. Роль сигнала, вводимого в замедляющую систему, можно выявить, сопоставляя характеристики колебаний пространственного заряда в двух режимах, отличающихся времененным расположением импульсов входного СВЧ сигнала $P_{\text{вх}}$ и анодного напряжения U_a . В стандартном режиме (СР) мощность $P_{\text{вх}}$ подается в течение всего импульса U_a (рис. 5, а). В режиме же, который мы назвали автоколебательным (АР), входной сигнал подается на время ~ 0.5 мкс, существенно меньшее длительности импульса напряжения (рис. 5, б). За это время происходит накопление пространственного заряда. Далее бомбардировка катода, необходимая для вторично-эмиссионного поддержания электронного облака, осуществляется под действием ВЧ полей, связанных с автоколебаниями пространственного заряда.

В магнетронном усилителе изучена также возможность воздействия на коллективные процессы с помощью высокочастотного управляющего сигнала, подаваемого по специальной коаксиальной линии (см.рис.1) между торцевым экраном 7 и катодом 1. Использование перестраиваемого генератора позволяло регулировать мощность P_y и частоту f_y управляющего сигнала в пределах соответственно $0 < P_y \leq 350$ Вт, $100 \leq f_y \leq 600$ МГц. При выборе диапазона частот мы исходили из того, что эффект воздействия должен быть наименее силен, если частота управляющего сигнала близка к собственным частотам автоколебаний электронного облака. Судя по имеющимся у нас данным [2, 4, 19, 20], эти частоты лежат в диапазоне перестройки частоты генератора.

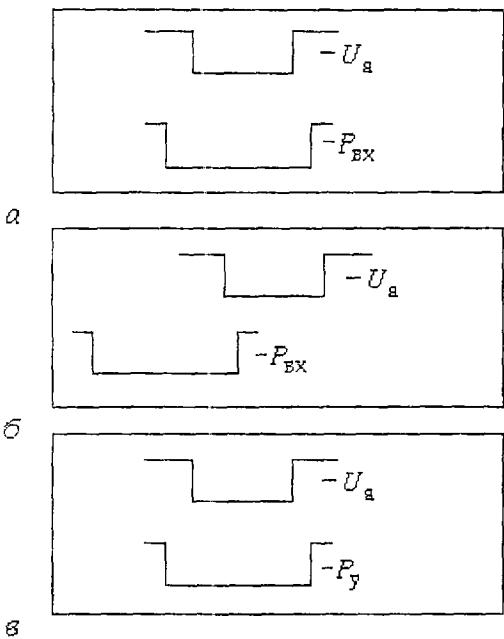


Рис. 5. Временное расположение импульсов: анодного напряжения U_a и входной мощности P_{bx} магнетронного усилителя в стандартном (a) и автоколебательном (b) режимах, импульсов U_a и управляющей мощности P_y (c)

коэффициента вторичной эмиссии определялось по отработанной ранее методике [21] на основании измерения максимального анодного тока I_{am} . Работа выхода рассчитывалась по формуле Ричардсона. Необходимые для этого значения плотности тока термоэмиссии I_s и температуры катода T измерялись в экспериментальном приборе. Была предусмотрена возможность определения вида распределения $e\phi$ и T по поверхности катода МИП. Для этого в отсутствие магнитного поля при напряжении между катодом и анодом $\sim 5-10$ кВ измерялся ток с центральной (вдоль оси) части эмиттирующего пояска катода, проникающий через отверстие 3 диаметром 0.5 мм в аноде на расположенный за ним коллектор 4 (см.рис.2). Фиксировались изменения тока, происходящие при повороте катода вокруг оси. Через специальное окно в аноде можно было при этом измерять с помощью пирометра и азимутальное распределение температуры $T(\theta)$.

Библиографический список

1. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. М.: Наука, 1984.
2. Бондарцов Г.И., Соминский Г.Г. // ЖТФ. 1975. № 8. С.1654.
3. Бондарцов Г.И., Соминский Г.Г., Фридрихов С.А. // Письма в ЖТФ. 1975. № 19. С.895.
4. Соминский Г.Г. // Лекции по электронике СВЧ (4-я зимняя школа-семинар инженеров). Кн.3. Саратов: Изд-во СГУ, 1978. С. 119.

¹ В качестве характеристики вторично-эмиссионной эффективности используется значение коэффициента вторичной эмиссии $\delta = \delta_m$, соответствующее максимуму зависимости δ от энергии первичных электронов

Управляющий генератор работал в импульсном режиме. С помощью системы синхронизации можно было менять длительность и относительное временное расположение импульсов P_y и U_a . Измерения проведены при относительном расположении импульсов P_y и U_a , указанном на рис. 5, c.

Влияние эмиссионных характеристик катода на коллективные явления в пространственном заряде было изучено в магнетронном усилителе и в гиротронной системе. Измерения в УМ выполнены с катодами из сплава Си-BeAl, у которых средний по поверхности коэффициент δ_m вторичной эмиссии менялся в пределах $1.8 \leq \delta_m \leq 3.0$.¹ В системе формирования ВЭП измерения проведены с металло-пористыми катодами, работа выхода которых менялась в диапазоне $2.1 \leq e\phi \leq 3.5$ эВ.

Эмиссионная эффективность катодов могла изменяться в процессе работы. Поэтому значения δ_m и $e\phi$ контролировались непосредственно в экспериментальном приборе. Изменение

5. Флягин В.А., Цимринг Ш.Е. // Проблемы физической электроники. Л.: Изд. ЛИЯФ, 1987. С. 122.
6. Цимринг Ш.Е. // Лекции по СВЧ электронике и радиофизике (9-я зимняя школа-семинар). Саратов: Изд-во СГУ, 1993. С. 11.
7. Релятивистская высокочастотная электроника / Отв.ред. А.В.Гапонов-Грехов. Горький: Изд-во ИПФ АН СССР, 1979.
8. Бугаев С.П., Канавец В.И., Кошелев В.И., Черепенин В.А. Релятивистские многоволновые СВЧ-генераторы. Новосибирск: Наука, СО, 1991.
9. Бондарь Ю.Ф., Заворотный С.И., Инатов А.Л. и др. // Физика плазмы. 1982. Т. 8, № 5. С. 941.
10. Левчук С.А., Соминский Г.Г., Воскресенский С.В. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14, № 13. С. 1194.
11. Архипов А.В., Богданов Л.Ю., Воскресенский С.В. и др. // Проблемы физической электроники. Л.: Изд-во ЛИЯФ АН СССР, 1989. С. 28.
12. Богданов Л.Ю., Воскресенский С.В., Соминский Г.Г. // Проблемы физической электроники. Л: Изд-во. ЛИЯФ АН СССР, 1991. С. 102.
13. Богданов Л.Ю., Соминский Г.Г. // ЖТФ. В печати. 1995.
14. Лукиша О.И., Соминский Г.Г. // ЖТФ. 1994. Т. 64, № 11. С. 160.
15. Малюгин В.И., Соминский Г.Г. // ЖТФ. 1974. Т. 44, № 7. С. 1511.
16. Соминский Г.Г. // ЖТФ. 1968. Т. 38, № 4. С. 663.
17. Болотов В.Е., Зайцев Н.И., Кораблев Г.С. и др. // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6, № 16. С. 1013.
18. Лукиша О.И., Цыбин О.Ю. // Лекции по СВЧ электронике и радиофизике (9-я зимняя школа-семинар). Саратов: Изд-во СГУ, 1993. С. 20.
19. Тычинский В.П., Деркач Ю.Т. // РЭ. 1956. Т. 1, № 2. С. 233; № 3. С. 344.
20. Кузнецов М.И., Бербасов В.А., Нечаев В.Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 1960. Т. 3, № 1. С. 102; № 2. С. 290.
21. Соминский Г.Г., Терехин Д.К., Фридрихов С.А. // ЖТФ. 1964. Т. 34, № 9. С. 1666.

Санкт-Петербургский
технический университет

Поступила в редакцию 4.10.94
после переработки 18.01.95

**INVESTIGATION OF SPACE CHARGE
OSCILLATIONS AND STRUCTURE FORMATION
IN MAGNETICALLY CONFINED ELECTRON BEAMS**

Part I

*A.V. Arhipov, L.Yu. Bogdanov, S.V. Voskresensky, S.A. Levchuk,
O.I. Louksha, G.G. Sominski*

In a number of very differnt systems with magnetically confined electron beams «momentary» spectra of space charge oscillations had been experimentally obtained, as well as certain information on spatial location and structure of these oscillations. Spectra with different degree of disorder were registered, and some factors responsible for alteration of this degree were found. Influence of an external signal upon electron collective behaviour has also been studied.



Архипов Александр Викторович - родился в 1963 году в Ленинграде, окончил Ленинградский политехнический институт (ЛПИ) в 1986 году. Сейчас - инженер Санкт-Петербургского технического университета (СПбГТУ), автор 9 научных работ. Область научных интересов - плотные электронные потоки и связанные с ними плазменные образования.



Богданов Леонид Юрьевич - родился в 1960 году в Ленинграде, окончил ЛПИ (1984). Инженер СПбГТУ, автор 9 научных работ. Область научных интересов - диагностика релятивистских электронных потоков.



Воскресенский Сергей Валерьевич - родился в 1965 году в г. Мурманске, окончил ЛПИ в 1988 г. Инженер СПбГТУ. Автор 5 печатных работ. Область научных интересов - экспериментальное исследование сильноточных электронных систем.



Левчук Сергей Анатольевич - родился в 1953 году. Окончил ЛПИ (1977), защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1989). Доцент СПбГТУ. Область научных интересов - диагностика электронных потоков, стохастические процессы.



Лукша Олег Игоревич - родился в 1961 году в Ленинграде, окончил ЛПИ (1984). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1992). Доцент СПбГТУ. Область научных интересов - динамика и структура пространственного заряда в сильноточных электронных устройствах. Автор 17 научных публикаций.



Соминский Геннадий Гришевич - родился в 1935 году в Ленинграде, окончил ЛПИ (1960), защитил кандидатскую диссертацию (1967) и докторскую (1984). Профессор СПбГТУ. Автор около 100 печатных работ. Область научных интересов: эмиссионная и СВЧ электроника, экспериментальное исследование потоков заряженных частиц и плазмы.