

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

09;10;12

Журнал технической физики, т. 65, в. 2, 1995

© 1995 г.

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЛЕКТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ  
В ВИНТОВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКАХ  
СИСТЕМ ГИРОТРОННОГО ТИПА***О.И.Лукиша, Г.Г.Соминский*

Санкт-Петербургский государственный технический университет,  
195251, Санкт-Петербург, Россия  
(Поступило в Редакцию 11 июля 1994 г.)

**Введение**

Коллективные процессы в пространственном заряде винтовых электронных пучков (ВЭП) играют важную роль в работе устройств гиротронного типа. Система формирования ВЭП включает обычно магнетронно-инжекторную пушку (МИП), по выходе из которой пучок электронов сжимается в нарастающем магнитном поле, далее на участке дрейфа движется в постоянном магнитном поле и оседает на коллекторе в области спада магнитного поля. Ранее в результате экспериментального исследования были выявлены колебания объемного заряда на частотах, много меньших циклотронной, в том числе аксиальные колебания в ловушке между катодом МИП и пробкой магнитного поля, а также на участке дрейфа ВЭП [1,2]. В работах [1,2] была определена связь характеристик колебаний с током пучка  $I$ , магнитным полем  $B$  и ускоряющим электроны напряжением  $U$ , а также с распределением тока в поперечном сечении пучка. Однако отсутствие данных об особенностях пространственной структуры коллективных процессов и их изменения во времени затрудняли интерпретацию полученных результатов. В настоящей работе предпринята попытка выяснить пространственно-временные характеристики колебаний объемного заряда ВЭП.

Исследования проведены в экспериментальном приборе, описанном в работе [2]. Для регистрации колебаний использовались широкополосные зонды, установленные за малым отверстием в стенке трубы дрейфа. С помощью зондов фиксировались наведенные сигналы из

ближней зоны ВЭП. Кроме зондов  $P_1$  и  $P_2$ , расположенных соответственно в конце области магнитной компрессии и на участке спадающего магнитного поля [2], дополнительно в области однородного магнитного поля был введен зонд ЗЗ, который можно было перемещать вдоль оси  $z$  на расстоянии 15 мм от начального положения ( $z = 0$ ) в сторону коллектора и обратно. Начальное положение было выбрано на расстоянии 60 мм от зонда  $P_1$ . В отсутствие ВЭП "развязка" между зондами по мощности была не менее 70 дБ в интервале частот  $10 \leq f \leq 1500$  МГц.

Сигналы с зондов регистрировались спектр-анализатором типа С4-60 или с помощью широкополосного осциллографа С7-19. Выполненный по разработанной ранее методике [3] фурье-анализ разовых временных реализаций сигналов с экрана осциллографа давал информацию о "мгновенном" спектре колебаний. Наблюдение реализаций разной длительности и на разных участках импульса тока пучка позволило выявить временные изменения коллективных процессов в ВЭП.

Как и в работах [1,2], была предусмотрена возможность измерения азимутального распределения плотности тока эмиссии катода  $j_e(\theta)$  и плотности тока на коллектор  $j_k(\theta)$ . Зависимости  $j_e(\theta)$  и  $j_k(\theta)$  измерялись при повороте катода. Сравнение сигналов зондов при разных азимутальных положениях катода давало информацию о влиянии азимутальных неоднородностей пучка на характеристики колебаний.

## Результаты измерений

Измерения выполнены в экспериментальном приборе с металлопористым катодом в интервале изменения магнитного поля  $1.8 \leq B \leq 3.5$  Тл и тока пучка  $0 \leq I \leq 14$  А при фиксированных энергии электронов  $eU = 8$  кэВ и длительности тока пучка  $\tau = 10$  мкс. Был реализован режим ограничения тока с катода его эмиссионной способностью. Ток пучка регулировался изменением температуры катода.

Амплитуды зарегистрированных колебаний объемного заряда увеличивались с ростом питч-фактора  $g_0$  и тока  $I$ , что согласуется с результатами предыдущих измерений [1,2].

Подробные исследования, сочетающие наблюдение спектров с помощью спектр-анализатора и регистрацию временных реализаций, позволили уточнить амплитудно-частотные характеристики автоколебаний электронного облака. В спектре колебаний, регистрируемых с помощью спектр-анализатора, а следовательно, усредненных по большой серии импульсов с суммарным временем наблюдения  $\sim 10$  с при токах  $I > 1-2$  А, выявлены дискретные пики на приблизительно кратных частотах в области  $f \leq 50$  МГц, а также сравнимые по амплитуде, но менее упорядоченные по спектральному составу колебания в диапазоне частот  $50 \leq f \leq 150$  МГц (рис. 1). Низкочастотные колебания регистрируются в сигналах всех зондов, но их амплитуда  $A$  сильно меняется вдоль оси системы. Наиболее показательны изменения, зафиксированные зондом  $P_3$  при его смещении. Так, для колебаний на частотах  $f \leq 50$  МГц характерно монотонное уменьшение амплитуды при удалении зонда  $P_3$  от катода МИП (кривая 1 на рис. 2, а). Колебания на частотах  $50 \leq f \leq 150$  МГц достигают максимальной амплитуды на некотором расстоянии  $z \sim 7.5$  мм (кривая 2 на рис. 2, а), однако далее также уменьшают свою амплитуду при удалении от катода.

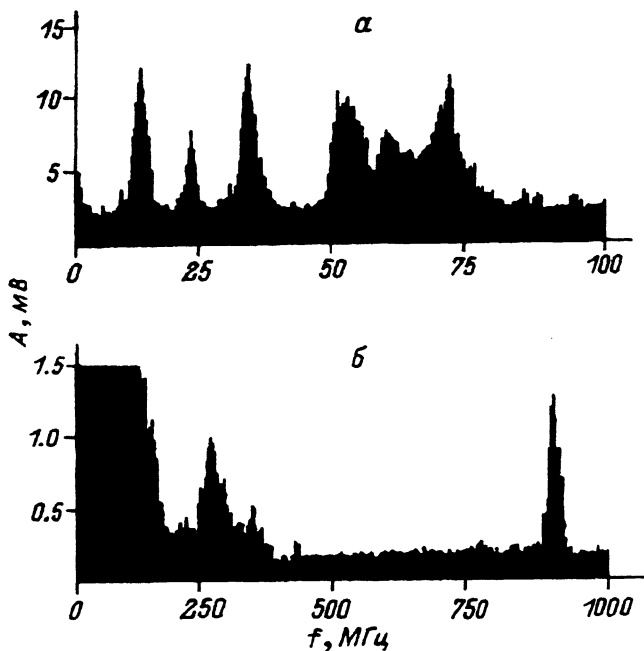


Рис. 1. Спектры сигналов с зонда  $P_3$  в диапазонах частот 0-100 (а) и 0-1000 МГц (б).

Ускоряющее напряжение  $U = 8$  кВ, магнитное поле  $B = 2.3$  Тл, ток пучка  $I = 8$  А.

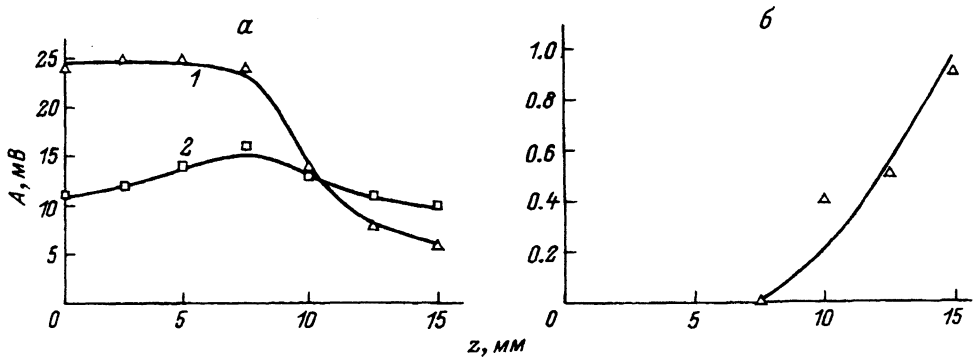


Рис. 2. Зависимости амплитуды низкочастотных (а) и высокочастотных (б) колебаний от аксиального положения зонда  $P_3$ .

1 — пик спектра с наибольшей амплитудой в полосе частот 0-50 МГц, 2 — в полосе частот 50-150 МГц.  $U = 8$  кВ,  $B = 2.05$  Тл,  $I = 7$  А.

В отличие от описанных низкочастотных колебаний на частоте  $\sim 900$  МГц, возникающим при превышении тока пучка над пороговым значением  $I \sim 6-8$  А, свойственно быстрое увеличение амплитуды при смещении зонда в сторону коллектора (рис. 2, б).

Таким образом, "пространственные" измерения свидетельствуют о связи низкочастотных колебаний с коллективным движением объемного заряда в ловушке между катодом и магнитной пробкой, что согласуется с выводами работ [1,2]. Одновременно они подтверждают и связь

указанных выше высокочастотных колебаний с усилением волн пространственного заряда в дрейфующем к коллектору пучке электронов, т. е. конвективную их природу.

Наряду с упомянутыми выше низкочастотными и высокочастотными колебаниями в настоящей работе выявлены сигналы в области промежуточных частот 300–800 МГц, а также на частотах  $\sim 1350$  –  $1400$  МГц. Природу этих колебаний пока трудно определить однозначно.

На рис. 3 показаны типичные временные реализации сигналов длительностью  $\tau_p \sim 13$  нс и полученные в результате их обработки мгновенные спектры, соответствующие двум различным значениям времени задержки  $\Delta t$  относительно переднего фронта импульса тока, равным 0.5 (рис. 3, а, б) и 6 мкс (рис. 3, в, г).

Обработка указанных реализаций дает информацию лишь о спектре частот в области  $f > 1\tau_p$  [4]. Поэтому для выявления особенностей спектра низкочастотных колебаний проводилось также наблюдение реализаций большей длительности 100 и 500 нс. На рис. 4 приве-

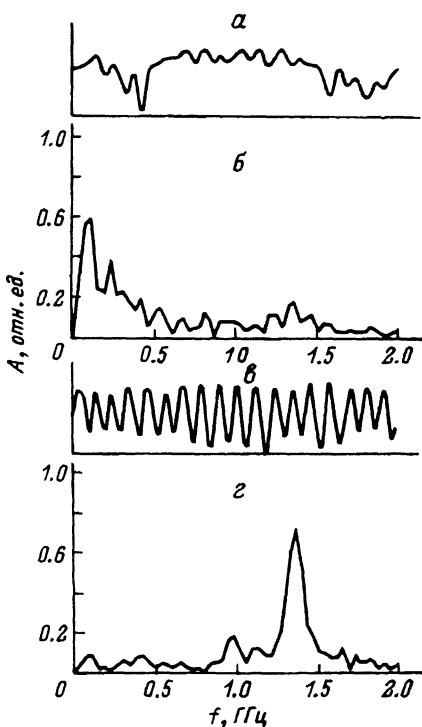


Рис. 3. Осциллограммы сигналов с зонда  $P_3$  длительностью развертки 13 нс (а, в) и соответствующие мгновенные спектры (б, г), полученные с задержкой относительно переднего фронта импульса тока в 0.5 (а, б) и 6 мкс (в, г).

Масштаб изменения амплитуды для приведенных спектров одинаков.  $U = 8$  кВ,  $B = 2.3$  Тл,  $I = 8$  А.

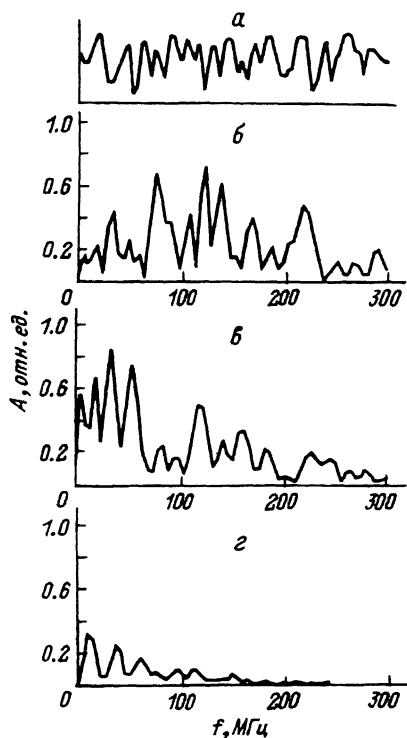


Рис. 4. Типичная осциллограмма сигнала длительностью развертки 100 нс (а) и мгновенные спектры в низкочастотной области (б–г), полученные с зонда  $P_3$  при разном времени задержки относительно переднего фронта импульса тока. Масштаб изменения амплитуды для проведенных спектров одинаков.

$U = 8$  кВ,  $B = 2.3$  Тл,  $I = 8$  А, время задержки  $\Delta t$  — 0.5 (а, б), 1 (в), 6 мкс (г).

дены типичная осциллограмма длительностью 100 нс (а), а также характерные мгновенные спектры низкочастотных колебаний для разных участков импульса тока, построенные на основе обработки реализаций с  $\tau_p \sim 100$  нс (б-г).

Анализ реализаций сигналов и мгновенных спектров свидетельствует, что в течение импульса падает амплитуда низкочастотных ( $f \leq 150$  МГц) и возрастает амплитуда высокочастотных ( $f \sim 800-1400$  МГц) колебаний (рис. 3, 4). Меняется одновременно и распределение мощности по спектру колебаний (рис. 4, б-г). Отмеченное быстрое затухание низкочастотных сигналов свидетельствует, возможно, о существенном влиянии на развитие и поддержание колебаний пространственного заряда в ловушке изменений электрического поля и тока пучка на фронте импульса ускоряющего электроны напряжения.

Описанные выше пространственно-временные характеристики колебаний объемного заряда получены при фиксированном азимутальном положении катода МИП. Сравнение сигналов зондов  $P_1-P_3$  в разных положениях катода и их сопоставление с видом зависимостей  $j_e(\theta)$  и  $j_k(\theta)$  свидетельствуют, что характеристики колебаний зависят как от величины плотности тока пучка в ближней от регистрирующего зонда зоне, так и от малых изменений неоднородных полей в системе формирования и транспортировки ВЭП. Возможно, именно с малым неконтролируемым изменением юстировки прибора или эмиссионных характеристик поверхности катода связаны некоторые отличия спектра зарегистрированных в настоящей работе колебаний пространственного заряда по сравнению с описанным в работе [2].

### Заключение

Подводя итоги работы, отметим основные ее результаты.

Разработана методика исследования пространственно-временных характеристик коллективных процессов в пространственном заряде ВЭП.

Определены изменения амплитудно-частотных характеристик колебаний в течение импульса тока пучка и в аксиальном направлении.

Установлено, что колебания, обусловленные коллективным движением электронов в ловушке между катодом и пробкой магнитного поля, быстро затухают во времени и в пространстве транспортировки при удалении от катода МИП. Одновременно с этим увеличиваются по амплитуде высокочастотные колебания, связанные с конвективным усилением волн пространственного заряда на участке дрейфа ВЭП. Поэтому можно предположить, что зарегистрированные высокочастотные колебания оказывают большее влияние на работу длинноимпульсных устройств.

### Список литературы

- [1] Лукша О.И., Цыбин О.Ю. Лекции по СВЧ электронике и радиофизике. Саратов, 1993. С. 20-29.
- [2] Лукша О.И., Соминский Г.Г. // ЖТФ. 1994. Т. 64. Вып. 11. С. 000.
- [3] Воскресенский С.В., Левчук С.А., Соминский Г.Г. Лекции по электронике СВЧ и радиофизике. Саратов, 1989. Кн. 4. С. 24-32.
- [4] Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. М.: Мир, 1971. 408 с.