

09;10

Временная эволюция длинноимпульсного электронного пучка высокой плотности

© А.В. Архипов, Г.Г. Соминский

Санкт-Петербургский государственный технический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 12 июля 1996 г.)

Исследована временная эволюция длинноимпульсного электронного пучка высокой плотности в мощной лампе бегущей волны с магнитно-периодической фокусирующей системой. Показана связь изменения характеристик электронного пучка с ионизацией остаточного газа и частиц, десорбированных с поверхности электродов. Выявлено сильное влияние на динамику пучка формирования коллекторной плазмы и потока ионов с ее поверхности. Изучено воздействие на характеристики пучка в процессе его эволюции СВЧ полей в канале транспортировки.

Введение

Длинноимпульсные плотные пучки электронов (ЭП) сравнительно небольшой энергии (≤ 50 keV) находят применение в СВЧ электронике, для решения технологических задач [1,2], при моделировании процессов у стенки токамака [3] и т.п. На формирование таких пучков оказывают существенное воздействие вторичные явления, связанные с ионизацией остаточного газа и с бомбардировкой ограничивающих электронный поток электродов, с развитием колебаний пространственного заряда [4–9]. Такие явления затрудняют теоретический анализ происходящих в ЭП процессов и определяют необходимость проведения специальных экспериментов.

В опубликованных нами недавно работах [4–6] выявлены временные изменения пространственных и энергетических характеристик электронного потока в коллекторной области мощной экспериментальной лампы бегущей волны (ЛБВ). Изучались процессы в электронном пучке, удерживаемом с помощью магнитно-периодической фокусирующей системы, которая чаще всего используется при транспортировке протяженных электронных потоков большой длительности. Как показали уже полученные данные, ЛБВ — удачный объект для исследования, так как позволяет обнаружить влияние на формирование и транспортировку ЭП не только статических, но и СВЧ полей. В работе [4] освещены вопросы, представляющие особый интерес для отыскания способов совершенствования коллекторной системы ЛБВ, однако не определены механизмы временной эволюции характеристик ЭП. В данной же работе приведены дополнительные данные о закономерностях этого явления и анализируются возможные его причины.

Результаты измерений и их обсуждение

Как и в [4], для определения характеристик электронного потока в ЛБВ использовался специальный анализатор с малым входным отверстием диаметром 0.5 мм (рис. 1), помещаемый вместо стандартного коллектора у

выхода пучка из канала транспортировки (КТ). Входное отверстие можно было перемещать на расстояния до 100 мм вдоль оси z и приблизительно до ± 15 мм в поперечном направлении. В ходе экспериментов измерялось поперечное распределение плотности тока $j(r)$ в различных вдоль оси z сечениях пучка на участке дрейфа электронов, вылетающих из канала транспортировки. Поля пространственного заряда здесь невелики, и движение электронов определяется в основном их скоростями на выходе из КТ.

Измерения выполнены при энергиях электронов $11 \leq eU \leq 15$ keV и токах пучка $200 \leq I \leq 500$ mA в разовых импульсах длительностью $\tau \leq 1$ ms. Определялись характеристики пучка в статическом и в динамическом режимах работы, отличающихся тем, что в динамическом режиме на ЛБВ подается входная мощность P_{in} , а в статическом $P_{in} = 0$. В динамическом режиме выходная мощность P_o увеличивалась с током и при $I = 500$ mA достигала значений ~ 1.5 kW. Сравнение данных, полученных в статическом и в динамическом

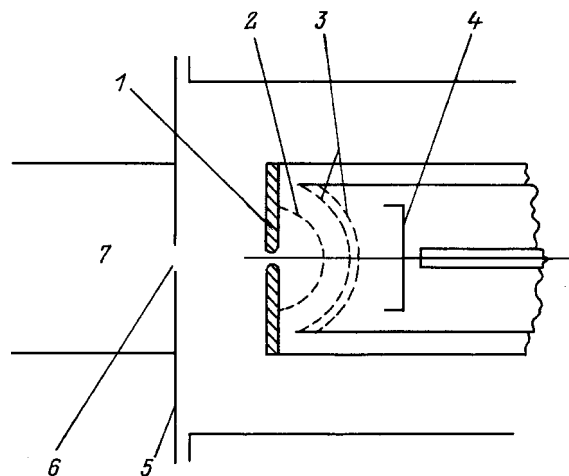


Рис. 1. Анализатор параметров электронного тока. 1 — диафрагма с отверстием $\varnothing 0.5$ мм; 2, 3 — сетки; 4 — коллектор анализатора; 5 — коллекторный фланец ЛБВ; 6 — выход канала транспортировки ЛБВ; 7 — ЛБВ.

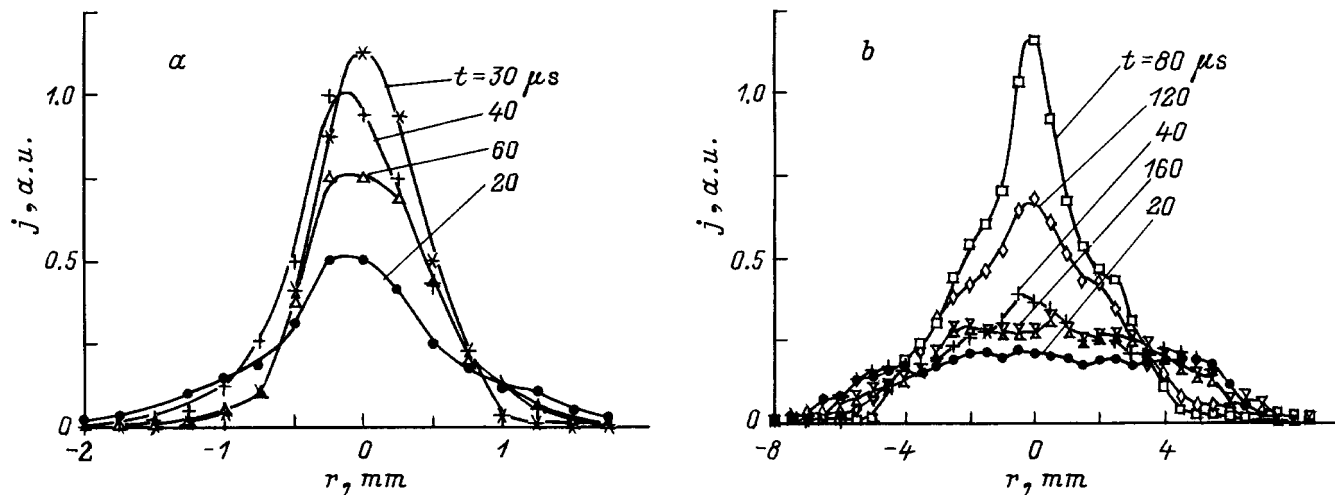


Рис. 2. Радиальные профили плотности тока на различных расстояниях от выхода КТ. $U = 13$ кВ; I , мА: a — 700, b — 500.

режимах, позволяло выявить воздействие СВЧ полей на характеристики электронного потока. Измерения в динамическом режиме выполнены при фиксированной частоте входного сигнала $f = 6$ GHz.

Использовалась дифференциальная откачка из коллекторной и пушечной областей прибора. Такая система откачки позволяла, с одной стороны, обеспечить достаточно низкое давление $p \leq 10^{-7}$ Торр в работающем приборе. С другой стороны, регулируя скорости откачки, можно было менять соотношение давлений на разных его участках. Так, при выключенной откачке из коллекторного объема и давлении $p \sim 10^{-7}$ Торр в пушечной области удавалось примерно на порядок увеличить давление вблизи коллектора и в примыкающем к нему участке канала.

Рассмотрим сначала характеристики электронного пучка в отсутствие входного сигнала. На рис. 2 показаны зависимости $j(r)$, полученные на расстояниях $z = 14$ (рис. 2, a) и 55 мм (рис. 2, b) от выхода КТ в различные относительно начала импульса тока моменты времени.

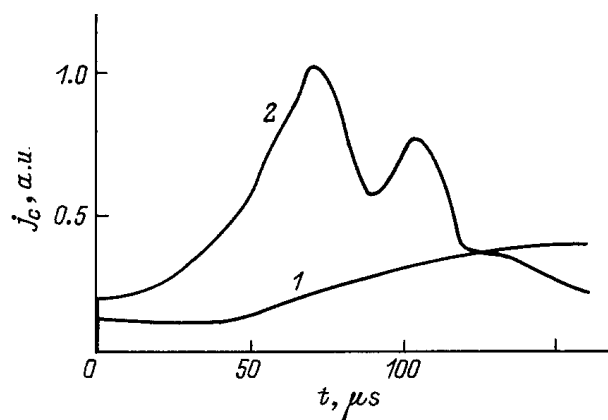


Рис. 3. Временные зависимости плотности тока в центре пространственного распределения. $U = 13$ кВ, $z = 55$ мм; I , мА: 1 — 200, 2 — 500.

Было установлено, что в удаленных от КТ сечениях пространственное распределение плотности тока существенно изменяется во времени (рис. 2, b), тогда как вблизи его выхода такие изменения существенно меньше (рис. 2, a), т. е. наблюдаемая в коллекторной области эволюция характеристик $j(r)$ вызвана в основном изменением углового распределения электронов пучка на выходе КТ. Типична эволюция, в процессе которой угловая расходимость электронов пучка сначала уменьшается, затем снова увеличивается и только после этого стабилизируется. В течение всего времени наблюдений распределение остается приблизительно аксиально симметричным и плотность тока в его центре j_c достигает наибольшей величины в условиях максимальной фокусировки пучка. Характерные изменения $j_c(t)$, зафиксированные при двух значениях тока пучка, показаны на рис. 3.

Учитывая медленный темп развития этого явления, фокусировку пучка естественно связать с ионизационными процессами. Действие магнитно-периодической фокусирующей системы в рассматриваемой нами электронно-пучковой системе создает неоднородности полей пространственного заряда, формируя таким образом своеобразные ловушки для ионов, возникающих в канале транспортировки.¹ Накопление ионов способно привести к уменьшению угловой расходимости потока электронов, вылетающих из канала транспортировки. В пользу такого объяснения говорят данные о влиянии на процесс фокусировки давления в приборе и величины тока пучка. Сравнение распределений плотности тока в сечении пучка, измеренных при разных давлениях, свидетельствует, что во всяком случае при повышенных давлениях ($p \geq 10^{-6}$ Торр) и малом токе пучка ионизация остаточного газа является основным поставщиком ионов. Это следует из ускорения процесса фокусировки пучка при отключении откачки из канала транспортировки

¹ Возникающие при ионизации вторичные электроны выталкиваются полем ЭП на стенки канала транспортировки и не удерживаются в ловушке.

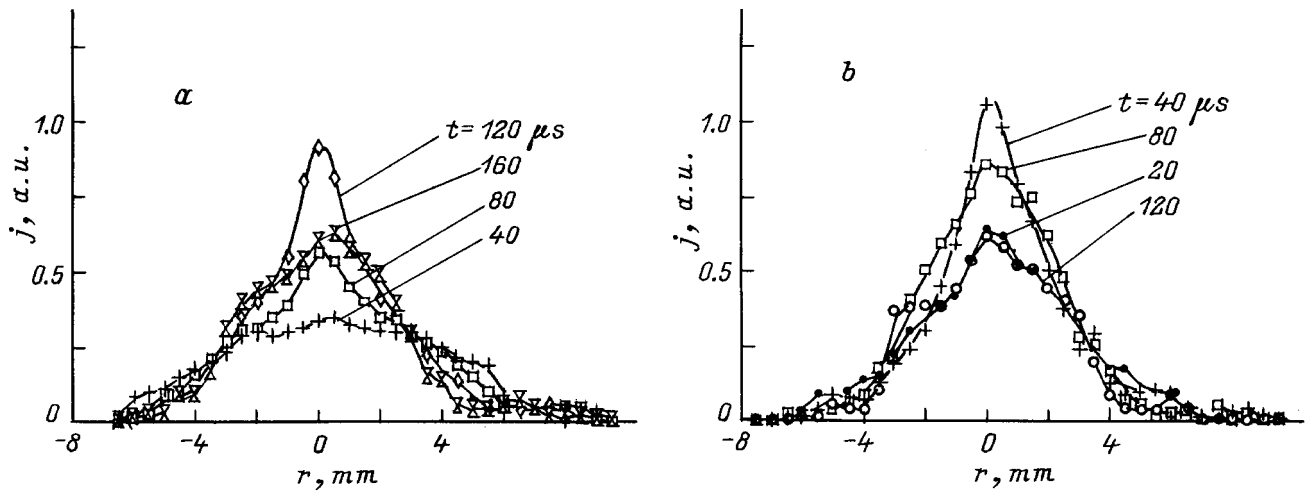


Рис. 4. Влияние вакуумных условий в коллекторной области на профиль пучка и на временную эволюцию этого профиля. $U = 13$ кВ, $I = 200$ мА. Откачка из коллекторной области включена (а) и отключена (б). Масштабы графиков одинаковы.

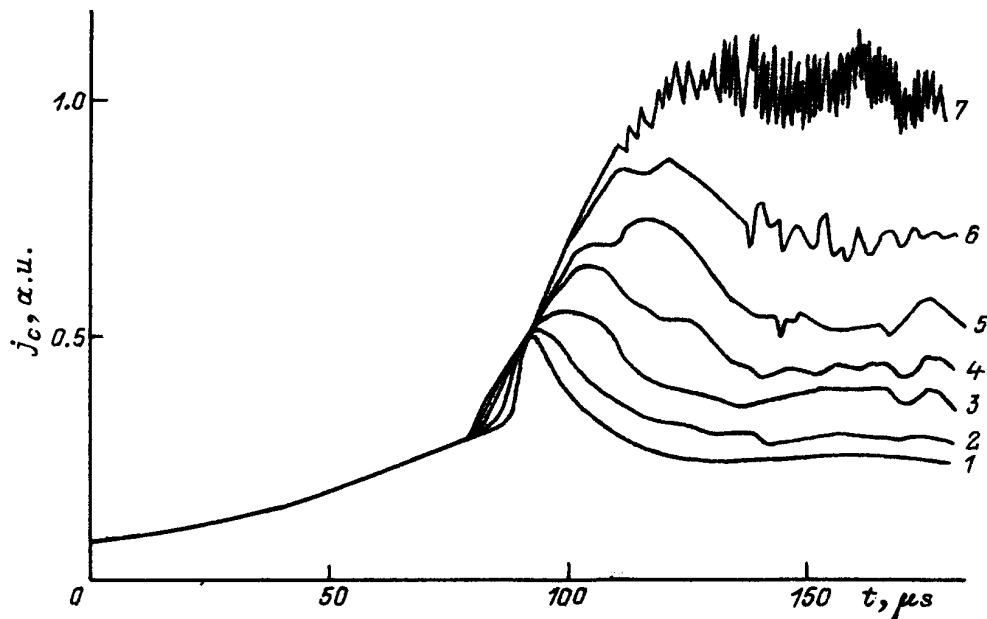


Рис. 5. Временные зависимости плотности тока в центре пространственного распределения при различных электрических смещениях U_d на диафрагме анализатора. $U = 11$ кВ, $I = 640$ мА, $z = 55$ мм; U_d , В: 1 — 0, -25, -50; 2 — -75; 3 — -100; 4 — -125; 5 — -150; 6 — -175; 7 — -200, -225, -240.

(рис. 4). С другой стороны, обнаруженное при давлениях $p \leq 10^{-7}$ Торг повышение темпа фокусировки с ростом тока пучка (рис. 3) говорит об определяющей роли при низких давлениях десорбции и последующей ионизации атомарных частиц с электродов, подвергающихся электронной бомбардировке.

Преращение ионной фокусировки пучка и переход к его дефокусировке происходят в разные моменты времени, зависящие от величины тока в пучке (рис. 3). Временная задержка Δt уменьшается с током. Оценки показывают, что при разных токах к моменту времени, соответствующему максимуму зависимости $j_c(t)$, на диафрагме I , выполняющей роль своеобразного коллекто-

ра электронов, выделяется приблизительно одинаковая удельная энергия, достигающая значений $\sim 1-2$ Дж/см². Имеющиеся в литературе данные [10] свидетельствуют, что столь большое энерговыделение на поверхности твердотельной мишени вызывает рождение плотной коллекторной плазмы. Одновременно с этим появляется новый интенсивный источник ионов, поступающих в пучок под действием поля пучка у границы плазмы. Совпадение начала дефокусировки с выделением пороговых энергий на бомбардируемом электроде свидетельствует, как нам кажется, о том, что процесс расширения пучка электронов в коллекторной области связан с воздействием потока ионов с ее границы.

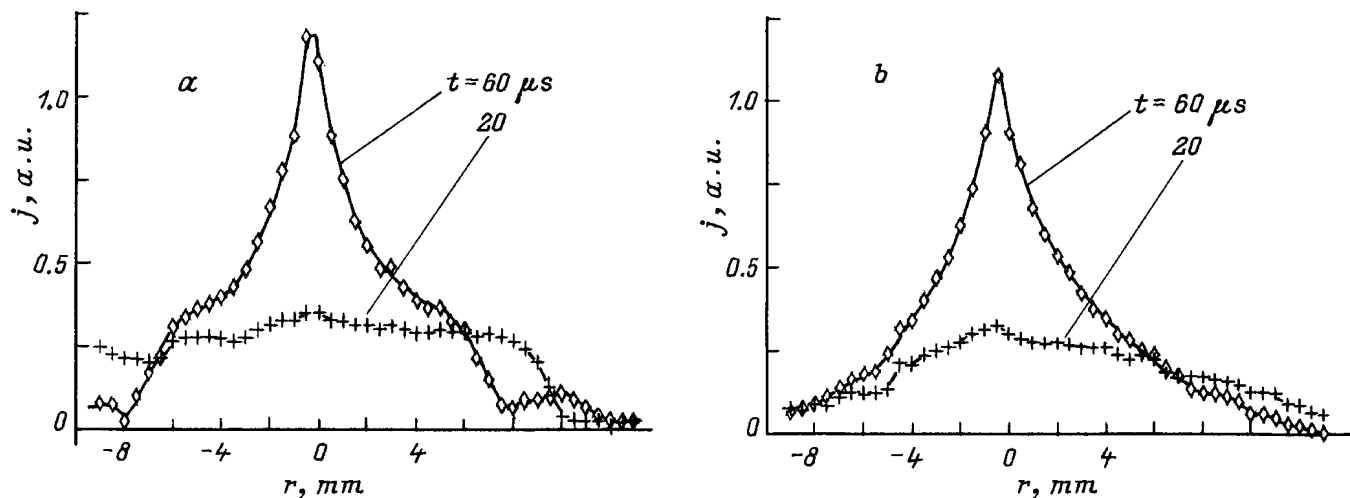


Рис. 6. Влияние СВЧ мощности на профили плотности тока пучка. $U = 12 \text{ kV}$, $I = 500 \text{ mA}$, $z = 55 \text{ mm}$; *a* — статический режим $P_{\text{in}} = 0$; *b* — режим с максимальной выходной мощностью.

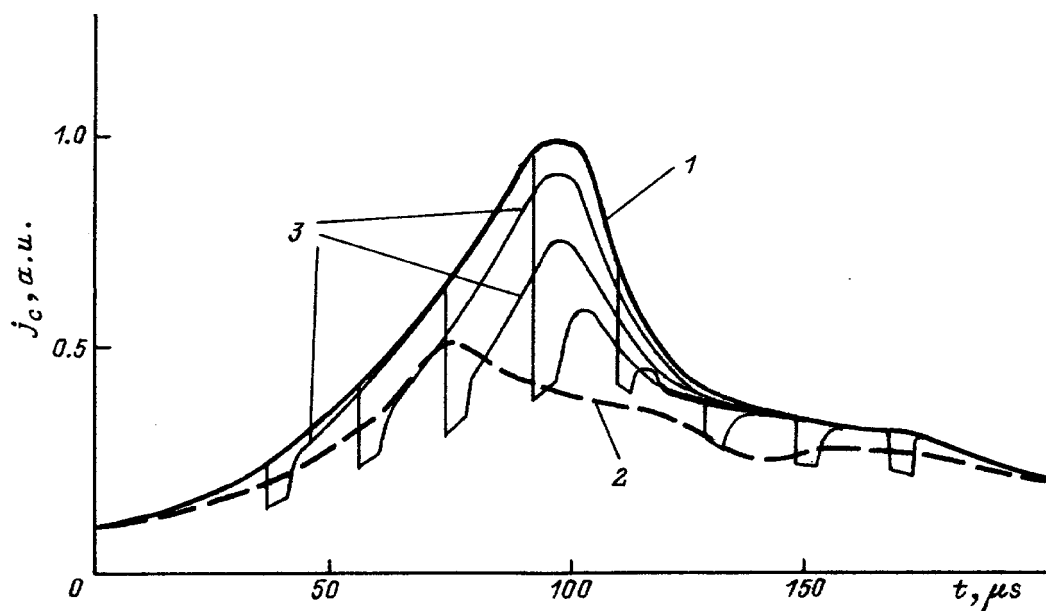


Рис. 7. Временные зависимости плотности тока в центре пространственного распределения. $U = 12 \text{ kV}$, $I = 500 \text{ mA}$, $z = 55 \text{ mm}$; 1 — статический режим $P_{\text{in}} = 0$, 2 — режим с постоянной входной мощностью P_{in} , 3 — режим разовых импульсов P_{in} длительностью $5 \mu\text{s}$ с различной задержкой относительно фронта импульса тока.

Подтверждает эту гипотезу и выявленное в работе влияние на эволюцию структуры пучка электрических полей, создаваемых в зазоре между выходом канала транспортировки и диафрагмой 1 анализатора. Было испытано воздействие на вид зависимостей $j(r)$ и $j_c(t)$ напряжения U_d , прикладываемого к диафрагме относительно заземленного канала. Напряжение менялось в пределах $-250 \leq U_d \leq +250 \text{ V}$. Введение отрицательного напряжения, если оно по амплитуде превышало приблизительно 50 V , продлевало период нарастания плотности тока j_c (рис. 5) и уменьшало ее спад после максимума $j_c(t)$, т. е. достигалась лучшая фокусировка пучка,

а дефокусировка была не столь значительна. Эффект воздействия отрицательного напряжения усиливался с ростом амплитуды U_d вплоть приблизительно до 200 V , после чего заметно не менялся. Введение отрицательных напряжений амплитудой до 50 V , а также любых положительных напряжений до 250 V практически не сказывалось на ходе зависимостей $j_c(t)$ и степени фокусировки пучка во всем исследованном временном интервале. Таким образом, как и следовало ожидать, электрические поля, препятствующие попаданию положительных ионов со стороны коллектора в канал транспортировки, ослабляли дефокусировку пучка. Не противоречит данному

объяснению и пороговый характер воздействия отрицательных напряжений. Оно должно быть ощутимым, когда напряжение U_d приближается по величине к перепаду потенциала ΔU между пучком и КТ. По нашим оценкам, в исследованном интервале токов величина ΔU должна быть ~ 100 В.

Хотелось бы обратить внимание на возможность существования ионных потоков и с других электродов, ограничивающих пучок и подвергающихся электронной бомбардировке, например со стенок канала транспортировки. Однако поля в коллекторной области вряд ли сильно влияют на такие потоки. Поэтому в описанных экспериментах, видимо, именно ионный поток с плазмы, образующейся на поверхности диафрагмы анализатора, оказывает наибольшее влияние на движение пучка.

Влияют на изменения профиля электронного потока в коллекторной области и СВЧ поля в канале транспортировки. Подача на ЛБВ непрерывной входной мощности, хотя и не меняет качественно по сравнению со статическим режимом эволюции пучка во времени, на каждом этапе приводит к его уширению (рис. 6, 7). При этом время достижения пучком состояния с наименьшей расходимостью уменьшается по сравнению со статическим режимом (следует из сопоставления кривых 1 и 2 на рис. 7). Если же на вход ЛБВ подавать импульсную СВЧ мощность (кривая 3 на рис. 7), то характер ее воздействия зависит от временного расположения импульса входного сигнала относительно максимума $t = t_m$ статической характеристики $j_c(t)$. Как и в случае постоянного входного СВЧ сигнала, во время действия импульса P_{in} уменьшаются значения j_c (т.е. пучок уширяется). В интервалы времени $t < t_m$ воздействие импульсного СВЧ сигнала необратимо. После его окончания плотность тока j_c увеличивается, но не достигает соответствующего значения на "статической" кривой 1. Отлично от описанного воздействия короткого импульса входной мощности в интервалы времени $t > t_m$. На этом этапе после окончания импульса P_{in} невозмущенные значения j_c практически восстанавливаются. Таким образом, ясно, что и воздействие СВЧ полей на движение электронов пучка зависит от протекания ионных процессов в канале транспортировки и в коллекторной области ЛБВ.

Заключение

Подводя итоги работы, выделим важнейшие ее результаты.

Исследована временная эволюция длинноимпульсного электронного пучка высокой плотности в мощной ЛБВ с магнитно-периодической фокусирующей системой.

Обнаружены немонотонные изменения структуры пучка в коллекторной области, проявляющиеся в длительной его фокусировке и дефокусировке.

Показана связь изменения характеристик электронного пучка с ионизацией остаточного газа и частиц, десорбированных с поверхности электродов, бомбардируемых

электронами. Выявлено сильное влияние на динамику пучка формирования коллекторной плазмы и потока ионов с ее поверхности.

Изучено воздействие на характеристики пучка СВЧ полей в канале его транспортировки. Выявлены изменения закономерностей воздействия на разных стадиях эволюции пучка, связанные с протеканием ионных процессов в нем.

Авторы благодарны А.В. Комашко и Г.В. Рувинскому за содействие в создании и наладке экспериментального макета ЛБВ.

Список литературы

- [1] Шиллер З., Гайзиг И., Панцер З. Электронно-лучевая технология. М.: Энергия, 1980. 540 с.
- [2] Proskurovsky D.I., Rotshtein V.P., Ozur G.E. // 11th Intern. Conf. on High Power Particle Beams (BEAMS'96). Book of Abstracts. Prague: Institute of Plasma Physics, 1996. Rep. N 0-7-3. Pogrebnyak A.D., Proskurovskiy D.I. // Ibid. Rep. N 0-7-4. Muller G., Engelko V., Andreev A. et al. // Ibid., Rep. N 0-7-6.
- [3] Bazylev B., Landman L., Wurz H. // Матер. Междунар. конф. "Физика и техника плазмы". Т. 2. Минск: Ин-т молекулярной и атомной физики АНБ, 1994. С. 451–452.
- [4] Архипов А.В., Комашко А.В., Соминский Г.Г. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1996. № 1. С. 40–46.
- [5] Архипов А.В., Богданов Л.Ю., Воскресенский С.В. и др. // Лекции по СВЧ электронике и радиофизике. 10-я зимняя школа-семинар. Кн. 2. Саратов: Изд. ГОСУНЦ "Колледж", 1996. С. 3–34.
- [6] Arkhipov A.V., Sominski G.G. // 11th Intern. Conf. on High Power Particle Beams (BEAMS'96). Book of Abstracts. Prague: Institute of Plasma Physics, 1996. Rep. N P-1-27.
- [7] Архипов А.В., Соминский Г.Г. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. Вып. 11. С. 6–10.
- [8] Лукаш О.И., Соминский Г.Г. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 2. С. 198–202.
- [9] Богданов Л.Ю., Соминский Г.Г. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 12. С. 77–84.
- [10] Зайцев Н.И., Кораблев Г.С., Шемякин Б.П. // ФП. 1981. Т. 7. С. 560–563.