

ДИНАМИКА ОРЕОЛА СИЛЬНО ЗАМАГНИЧЕННОГО РЭП

*Н. И. Зайцев, Е. В. Иляков, Г. С. Кораблев,
И. С. Кулагин, В. Н. Мануилов, Ю. П. Яшин*

В периферийных слоях РЭП, сформированного в коаксиальном диоде с магнитной изоляцией, обнаружена сильная неустойчивость, приводящая к расширению ореола пучка на несколько десятков ларморовских радиусов при длинах транспортировки 20–30 см. Показано, что отсечение внешних азимутально неоднородных слоев, содержащих не более 10 % тока, стабилизирует внешнюю границу пучка. Исследована зависимость обратного потока релятивистских электронов в канале транспортировки от конфигурации магнитного поля в области коллектора. Основные результаты исследований были доложены на VI Всесоюзном семинаре по релятивистской высокочастотной электронике (Свердловск, май 1989 г.).

Введение

В экспериментах с релятивистским карсинотроном [1] было обнаружено, что небольшая несоосность электронного пучка (РЭП) на выходе из рабочего пространства генератора (автограф пучка на мишени вписывался в апертуру канала) приводила к более чем двукратному уменьшению длительности высокочастотного импульса. Наблюдаемое явление можно объяснить появлением у электронного пучка ореола, не оставляющего отпечатка на мишени, но имеющего достаточную для инициации СВЧ пробоя интенсивность. Однако такое объяснение плохо соответствует следующим фактам. Электронный пучок, сформированный в магнитоизолированном диоде с кромочным катодом, коллимировался специальной диафрагмой, в «тени» которой и располагалась замедляющая система генератора. При этом, согласно оценкам, выполненным на основании [2], диокотронная неустойчивость в условиях [1] не могла приводить к расширению РЭП, достаточному для касания стенок замедляющей системы (необходимое радиальное смещение $\approx 0.2 \dots 0.3$ см на длине 20 \dots 30 см). К аналогичному выводу приводили оценки расширения пучка в скрещенных квазистатическом магнитном и высокочастотном электрическом полях, сделанные на основании [3].

С учетом важности решения проблемы увеличения длительности СВЧ импульса для выяснения возможности электронной бомбардировки стенок СВЧ генератора были проведены специальные эксперименты. Предметом исследований стало расширение периферийных потоков электронов, движущихся как со стороны катода, так и со стороны коллектора (поток со стороны коллектора составляют электроны, отраженные от его поверхности, а также от области сильно неоднородных магнитных полей).

Схема и условия эксперимента

Эксперименты проводились с пучком, имевшим энергию электронов 250 кэВ, ток 500 А и длительность несколько мкс. Электронный пучок (рис. 1) компрессировался магнитным полем до диаметра $D_0 \approx 1.5$ см (диаметр катода

$\approx 2.1D_0$), коллимировался диафрагмой 7 с диаметром отверстия $D_1 \approx 1.33D_0$, транспортировался однородным магнитным полем $B \approx 2.0$ Тл в канале диаметром $D_2 \approx 3D_0$ и длиной ≈ 75 см, а затем осаждался на цилиндрическом коллекторе 11 диаметром $D_3 \approx 6.4D_0$ или $D'_3 \approx 20D_0$. В экспериментах с коллектором диаметром D'_3 для уменьшения длины коллектора использовалось встречное магнитное поле, создаваемое соленоидом 6. Все металлические элементы вакуумного объема, откачиваемого до давления $2 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст., были выполнены из нержавеющей стали.

Коллимирующая диафрагма 7 устанавливалась на расстоянии $L_1 \approx 30$ см от катода в начале однородного участка магнитного поля. Расширение электронного пучка фиксировалось по току на цилиндрический электрод 9, рас-

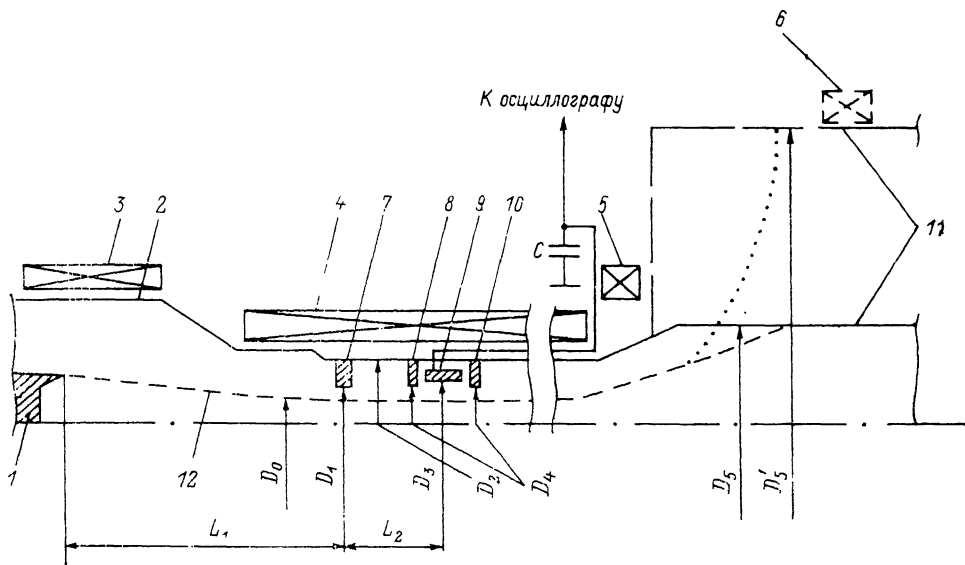


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — катод; 2 — анод; 3—6 — соленоиды; 7 — коллимирующая диафрагма; 8, 10 — защитные диафрагмы; 9 — электрод емкостного делителя; 11 — коллектор; 12 — РЭИ.

полагавшийся на расстоянии L_2 от коллимирующей диафрагмы в однородном магнитном поле. Измерительный электрод подключался к регистрирующей аппаратуре по схеме емкостного датчика (делителя) [4]. Сигнал, соответствующий току заряженных частиц на измерительный электрод, при этом интегрируется, что необходимо учитывать при обработке экспериментальных результатов. Однако указанное неудобство компенсируется возможностью измерения электростатического поля электронного пучка и регистрации прихода в объем датчика ионов из плазмы, неизбежно образующейся в режиме микросекундных импульсов на коллимирующей диафрагме. Измерительная система с учетом имеющегося уровня наводок позволяла регистрировать ток на электрод делителя не менее 10^{-2} А. Разделение прямого и отраженного от коллектора потоков электронов осуществлялось диафрагмами 8 и 10, защищавшими измерительный электрод от воздействия соответствующего потока. В большей части экспериментов использовался электрод с внутренним диаметром $D_3 \approx 2.2D_0$ и длиной 1.5 см. Защитные диафрагмы толщиной 0.5 см имели диаметр отверстия $D_4 \approx 1.9D_0$ и располагались на расстоянии 1 см от измерительного электрода.

В контрольном эксперименте с обеими защитными диафрагмами сигнал с делителя (рис. 2, б) соответствовал кулоновскому полю электронного пучка в течение 2...4 мкс от начала высоковольтного импульса (рис. 2, а), а затем соответствие нарушалось вследствие прихода в область электрода плазмы, образовавшейся на коллимирующей диафрагме (при увеличении диаметра коллимирующей диафрагмы до $D_1 \approx 1.9D_0$ приход плазмы регистрировался

через 4...5 мкс после начала импульса РЭП). При перемещении системы диафрагма 7—измерительный электрод вдоль однородного участка магнитного поля характер осциллограмм не менялся.

Расширение прямого потока электронов

Исследование прямого потока электронов производилось без защитной диафрагмы 8 перед измерительным электродом. При установке электрода непосредственно вблизи коллимирующей диафрагмы сигналы с делителя повторяли сигналы, полученные в контрольном эксперименте (с той лишь разницей, что приход плазмы в область электрода регистрировался несколько раньше — через 1...2 мкс). Смещение электрода (вместе с диафрагмой 10) на расстояние $L_2=16$ см от коллимирующей диафрагмы приводило к появлению на вершине импульса с емкостного делителя дополнительного сигнала отрицательной полярности, соответствующего электронному току на измерительный электрод до $3 \cdot 10^{-1}$ А.

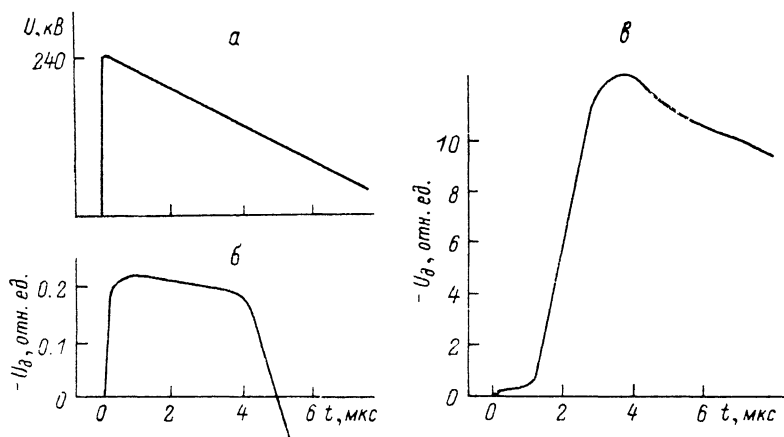


Рис. 2.

Осциллограммы ускоряющего напряжения U (а) и сигналов с емкостного делителя U_d : контрольный эксперимент (б), защитная диафрагма со стороны катода отсутствует (в) (ордината графиков б и в проградуирована в одних и тех же отн. ед.).

При увеличении расстояния L_2 до 31 см электронный ток увеличивался в среднем до 1.5 А, причем его величина изменялась от импульса к импульсу в несколько раз при фиксированных напряжении на диоде и магнитном поле. В широких пределах от 0.1 до 1.2 мкс изменялось и время запаздывания переднего фронта электронного тока относительно импульса напряжения (рис. 2, в).

Электронный ток на измерительный электрод емкостного делителя не регистрировался, если исходный диаметр РЭП за счет небольшого изменения магнитной компрессии увеличивался до 1.8 см. При этом токооседание на коллимирующей диафрагме (диаметром 2.0 см), регистрировавшееся с помощью рп-диоода по рентгеновскому излучению, не превышало 5...10 % от полного тока РЭП. Таким образом, бомбардировка измерительного электрода прямым потоком электронов могла быть существенно уменьшена (до значений ниже минимально регистрируемого уровня) путем отсечения внешних слоев РЭП, содержащих не более 10 % тока.

Расширение потока электронов из области коллектора

Расширение отраженного потока электронов исследовалось при наличии диафрагмы 8, защищавшей электрод 9 от прямого потока электронов ($L_2 \approx 16$ см), и при отсутствии диафрагмы 10. Вначале для осаждения пучка ис-

пользовался коллектор диаметром $D_5 \approx 6.4D_0$. В этих условиях бомбардировка электрода 9 диаметром $D_3 \approx 2.2D_0$ не регистрировалась. Однако при уменьшении диаметра электрода до $\approx 1.6D_0$ (диаметр защитной диафрагмы 8 также был уменьшен до $\approx 1.5D_0$) регистрировался электронный ток $2 \dots 5 \times 10^{-1}$ А.

При увеличенном диаметре коллектора $D'_5 \approx 20D_0$ и отключенном соленоиде 6 интенсивность бомбардировки практически не изменилась. При включении соленоида 6 по мере роста магнитной индукции встречного направления электронный ток бомбардировки увеличивался и достигал величины ~ 10 А, т. е. возрастал на порядок. Напомним, что в контрольном эксперименте (при наличии диафрагмы 10, установленной вплотную к электроду) бомбардировка измерительного электрода не регистрировалась. Однако при смещении диафрагмы 10 (диаметром $\approx 1.5D_0$) на расстояние 16 см от электрода вновь наблюдалась бомбардировка на уровне ~ 1 А, что свидетельствует о расширении потока электронов, движущихся со стороны коллектора, аналогичном расширению прямого потока. Характер осциллограмм был таким же, как при бомбардировке прямым потоком электронов (рис. 2).

Следует отметить, что суммарная величина обратного потока электронов невелика по сравнению с током РЭП, поскольку пространственный заряд суммарного электронного потока при изменении условий на коллекторе в пределах точности измерений (5...10 %) не менялся.

Согласно оценкам, с ростом встречного магнитного поля изменение угла падения электрона на коллектор может приводить в наших условиях к росту обратного потока электронов в канале транспортировки не более чем в два раза. Оценки были сделаны с учетом отсева электронов из обратного потока при прохождении ими области неоднородных электрического и магнитного полей [5], а также диаграммы направленности отраженных электронов при косом падении на коллектор [6]. Возрастание обратного потока на порядок при включении соленоида с встречным магнитным полем можно объяснить отражением электронов от области, в которой нарушается условие адиабатичности изменения магнитного поля

$$\frac{\hbar}{B_{\text{рол}}} \frac{dB_{\text{рол}}}{d\tau} \ll 1,$$

где \hbar — ларморовский шаг; τ — криволинейная координата, направленная вдоль траектории ведущего центра; $B_{\text{рол}}(\tau)$ — индукция магнитного поля в области коллектора.

Траекторный анализ движения электронов в области коллектора, проведенный численным методом по программе «ЭПОС» [7-9], подтвердил правомочность такого объяснения. В условиях наших экспериментов при нарушении адиабатичности изменения магнитного поля вдоль траектории часть электронов сходит со своих силовых линий и приобретает дополнительную поперечную энергию, которая увеличивается по мере приближения к поверхности коллектора, где происходит сгущение силовых линий магнитного поля. Значительная часть электронов при этом полностью теряет продольную энергию, не дойдя до поверхности коллектора. Такие электроны совершают периодическое движение в магнитной ловушке между соленоидами 4, 5 и 6. Для электронов, захваченных в ловушку, возможно и обратное преобразование энергии с уходом на коллектор или в канал транспортировки. При этом электроны, совершившие многократные колебания в ловушке, оказываются на новых силовых линиях, что может привести к утолщению обратного потока электронов.

Обсуждение результатов

Таким образом, экспериментально обнаружено расширение периферийных слоев как прямого, так и отраженного от коллектора потоков сильно замагниченных электронов. Диаметр ореола пучка увеличивался вдоль канала транспортировки, так что на длинах 20...30 см расширение достигало нескольких мм (в отличие от работ [10, 11], где наблюдалось аномально быстрое расширение

основного РЭП). Согласно [12], периферийным слоям пучка, сформированного в магнитоизолированном диоде с кромочным взрывоэмиссионным катодом, присуща сильная азимутальная неоднородность. По-видимому, эта неоднородность и приводит к дрейфу электронов поперек магнитного поля. Во всяком случае срезание периферийных слоев (на уровне $\sim 10\%$ от полного тока пучка) стабилизирует внешнюю границу электронного потока. Расширение обратного потока происходит, вероятно, по той же причине.

Возможность бомбардировки стенок канала дрейфа РЭП релятивистскими электронами, движущимися как со стороны катода, так и со стороны коллектора, необходимо учитывать при создании релятивистских СВЧ приборов (как вероятную причину срыва генерации в приборе). Интенсивность отраженного потока электронов определяется в основном конфигурацией магнитного поля в коллекторной области. Последний результат может сыграть определяющую роль при создании коллекторов с развитой поверхностью и, в частности, при конструировании систем, обеспечивающих вывод СВЧ излучения без облучения рабочей поверхности коллектора.

Список литературы

- [1] Зайцев Н. И., Ковалев Н. Ф., Кораблев Г. С. и др. // Письма в ЖТФ. 1981. Т. 7. Вып. 14. С. 879—882.
- [2] Нечаев В. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 1982. Т. 25. № 9. С. 1067—1074.
- [3] Александров А. Ф., Галузо С. Ю., Гришаев А. А. и др. // Тез. докл. VI Всесоюз. симпозиума по сильноточной электронике. Ч. 3. Томск, 1986. С. 65—67.
- [4] Зайцев Н. И., Кораблев Г. С., Шемякин Б. П. // Физика плазмы. 1981. Т. 7. № 3. С. 560—563.
- [5] Зайцев Н. И., Кораблев Г. С., Кулагин И. С., Нечаев В. Е. // Физика плазмы. 1982. Т. 8. № 5. С. 918—924.
- [6] Kanter H. // Ann. Phys. 1957. Vol. 20. N 6. P. 144—158.
- [7] Мануилов В. Н., Цимринг Ш. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 1981. Т. 24. № 4. С. 491—497.
- [8] Мануилов В. Н., Цимринг Ш. Е. // ЖТФ. 1981. Т. 26. Вып. 12. С. 2483—2490.
- [9] Лыгин В. К., Мануилов В. Н., Цимринг Ш. Е. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1987. № 7. С. 36—38.
- [10] Воронков С. Н., Лоза О. Т., Раваев А. А. и др. // Физика плазмы. 1988. Т. 14. № 10. С. 1259—1262.
- [11] Бугаев С. П., Канавец В. И., Климов А. И. и др. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. Вып. 22. С. 1385—1389.
- [12] Зайцев Н. И., Иляков Е. В., Кораблев Г. С. и др. // Тез. докл. VII Всесоюз. симпозиума по сильноточной электронике. Ч. 1. Томск, 1988. С. 58—60.

Институт прикладной физики
Нижний Новгород

Поступило в Редакцию
26 марта 1990 г.
В окончательной редакции
15 апреля 1991 г.