

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СГУСТКА СУБНАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

© В.Г.Шпак, С.А.Шунайлов, М.Р.Ульмаскулов,
М.И.Яландин, И.В.Пегель

Субнаносекундные сильноточные электронные ускорители необходимы для создания источников мощных широкополосных импульсов с СВЧ-заполнением и исследования коротких переходных процессов релятивистских сильноточных СВЧ-приборов в условиях, когда влияние паразитных отражений и обратной связи несущественно. Для анализа механизмов взаимодействия короткого мощного пучка с СВЧ-полями необходимо изучение динамики пространственно-энергетической структуры электронного сгустка. Субнаносекундный пучок в силу специфики своего формирования в магнитоизолированном коаксиальном диоде с холодным катодом на основе взрывной эмиссии представляет объект, сложный для аналитического описания. Вместе с тем возможно численное моделирование нестационарных процессов формирования и транспортировки короткого пучка, а современные диагностические устройства и существующая осциллографическая техника уже позволяют экспериментально исследовать динамику одиночного электронного сгустка в реальном масштабе времени. Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование трансформации формы токового импульса и энергии электронов при транспортировке замагниченного сильноточного субнаносекундного сгустка в дрейфовой камере, длина которой существенно превышала пространственную длину пучка, а также сравнение экспериментальных данных с результатами численного моделирования.

В экспериментах использовался субнаносекундный ускоритель на основе компактного генератора РАДАН-303Б [1], обострителя импульсов [2] и коаксиального вакуумного диода с магнитной изоляцией. Модулятор формировал субнаносекундный импульс (~ 300 пс на полувысоте), который через неоднородную ступенчатую линию поступал на катод вакуумного диода, обеспечивая ускоряющее напряжение с амплитудой до 250 кВ. Обычно фронт ускоряющего импульса в 2-3 раза превышал его срез по длительности [2]. Взрывоэмиссионный трубчатый графитовый катод

диаметром 4 мм находился в области однородного магнитного поля (12 кЭ) импульсного соленоида. В поле этого же соленоида была расположена дрейфовая камера, представлявшая собой круглый волновод диаметром 10 мм и длиной 30 см и отделенная от катода анодным блоком с круглым коллиматором. Сменные коллиматоры имели длину, большую характерного циклотронного шага замагниченных электронов пучка, и позволяли уменьшать максимальный ток пучка более чем на порядок. Остаточное давление в дрейфовой камере составляло $(1-0.5) \cdot 10^{-2}$ Тор. Электронный ток в канале дрейфовой камеры измерялся цилиндром Фарадея, установленным на конце 6-омной коаксиальной линии, состыкованной на выходе с полосковой линией. Такой датчик позволял наблюдать импульс тока в "чистом виде", поскольку неизбежные в таких системах отражения были сдвинуты от фронта полезного сигнала более чем на 1.5 нс, что существенно больше длительности исследуемого интервала. Временное разрешение было ограничено на уровне 150–200 пс полосой пропускания линии задержки осциллографа С7-19. Поперечная структура субнаносекундного электронного пучка фиксировалась за один импульс по отпечаткам на дозиметрической пленке ЦДП-Ф2-2, которая устанавливалась на подвижном коллекторе в различных точках дрейфовой камеры. Пакет из нескольких пленок позволял оценивать максимальную энергию электронов по глубине прострела.

Ускоряющий импульс имел резко неоднородную форму без выраженной плоской вершины, в результате чего пространственный заряд быстрых электронов, эмитированных при максимальном ускоряющем напряжении, уже на входе в дрейфовую камеру ускорял лидировавшую низкоэнергетичную фракцию. Как следствие, в этом месте должна возникать область кросовера, где амплитуда импульса тока электронного сгустка максимальна, а фронт импульса тока короче фронта импульса ускоряющего напряжения. Кросовер был экспериментально зарегистрирован (рис. 1, а) как максимум пикового тока пучка вблизи входа в дрейфовую камеру. При увеличении длины транспортировки сгустка отмечалось падение амплитуды импульса тока, сопровождавшееся расплыванием сгустка по длительности (рис. 1, б). Расчетные токовые осциллограммы показали удовлетворительное соответствие с экспериментально наблюдавшейся динамикой падения тока сгустка. Для численного моделирования использовалась осесимметричная версия 2.5- и 3-мерного полностью электромагнитного кода КАРАТ [3].

Как в эксперименте, так и в численном моделировании было показано, что сильно редуцированный коллиматором (в 5–10 раз) ток субнаносекундного пучка приобретал дву-

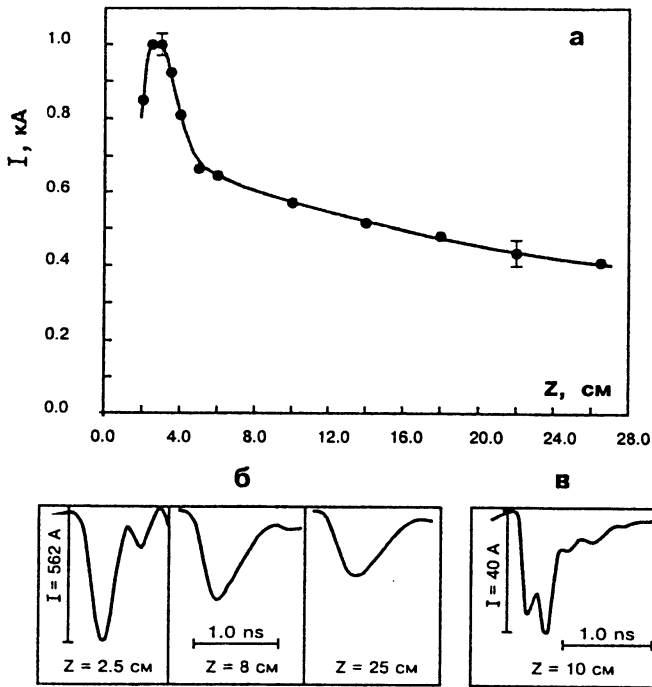


Рис. 1. *a* — изменение амплитуды импульса тока субнаносекундного электронного пучка при транспортировке в дрейфовой камере длиной 30 см; *б* — типичное уширение импульса тока пучка при увеличении длины транспортировки; *в* — двугорбый импульс тока сильно коллимированного пучка. Длительность ускоряющего импульса во всех случаях: 300 пс на полувысоте.

горбую форму (рис. 1, *в*). Причиной этого было коллиммирование электронов, эмитированных с цилиндрической поверхности трубчатого катода при ускоряющих потенциалах, превышавших некоторое значение. Таким образом, в дрейфовую камеру попадали электроны с малыми радиусами циклотронных орбит, эмитированные преимущественно на фронте и на спаде субнаносекундного ускоряющего импульса, а средняя высокоэнергетичная часть импульса в основном отсекалась.

Результаты анализа глубины прострела пакетов дозиметрических пленок показали, что при транспортировке пучка с током ~ 1 кА и плотностью тока $j \sim 10^4$ А/см² на предельное расстояние ~ 25 –30 см происходило значительное (в 1.5 раза) доускорение некоторой части электронов (рис. 2). Механизмом этого ускорения могло быть автоускорение части электронов в поле волны пространственного заряда, возбуждаемой в плотном электронном потоке. Численное моделирование подтвердило эти результаты и

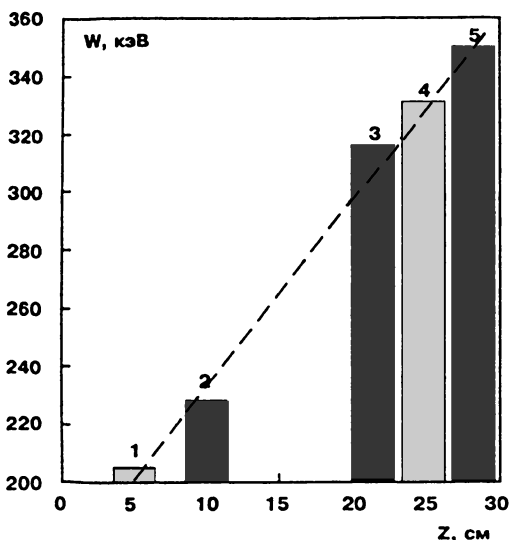


Рис. 2. Прирост максимальной энергии электронов (автоускорение) при транспортировке сильноточного электронного пучка субнаносекундной длительности в продольном магнитном поле. Ток инъекции пучка в дрейфовую камеру 1 кА при длительности 300 пс. 1, 4 — эксперимент; 2, 3, 5 — численное моделирование [3].

показало, что Z -компоненты электрического поля волны могут достигать значений в десятки кВ/см, а наиболее высокоэнергетичная (ускоренная) фракция электронов сосредоточена на переднем фронте пучка. Эксперимент и численное моделирование также показали, что прирост энергии доускоренных электронов зависит от величины тока пучка на входе дрейфовой камеры (тока инъекции). В частности, изменение тока инъекции с 1 кА до 250 А приводило к снижению максимальной энергии доускоренных электронов приблизительно на 100 кэВ при неизменном напряжении на катоде.

Таким образом, в численном моделировании и экспериментально, в реальном масштабе времени, исследована динамика прямолинейного замагниченного сильноточного электронного пучка субнаносекундной длительности. Эксперимент и моделирование дали хорошее соответствие результатов и показали, что при транспортировке субнаносекундного сгустка в дрейфовой камере имеет место значительное доускорение (автоускорение) части электронов. Степень ускорения зависит от тока пучка. Сильное коллиммирование короткого замагниченного трубчатого пучка, эмитированного взрывоэмиссионным катодом, приводит к трансформации формы импульса тока и существенно изменяет его энергетическую структуру.

Список литературы

- [1] Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И. и др. // ПТЭ. 1993. № 1. С. 149–155.
- [2] Месяц Г.А., Шпак В.Г., Шунайлов С.А. и др. // Труды Международного симпозиума SPIE “Интенсивные СВЧ-импульсы”. Лос-Анжелес, США, 1994. Т. 2154. С. 262–268.
- [3] Тараканов В.П. Инструкция пользователя кода КАРАТ. Беркли Ресеч Ассошиэйтс, Инк., Вирджиния, США, 1992.

Институт электрофизики
УрО РАН
Институт сильноточной
электроники СО РАН
Екатеринбург

Поступило в Редакцию
5 января 1996 г.