

10

## Пикосекундная стабильность инъекции параллельных сильноточных электронных пучков

© М.И. Яландин, А.Г. Реутова, М.Р. Ульмаскулов, К.А. Шарыпов,  
В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, А.И. Климов, В.В. Ростов, Г.А. Месяц

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург

E-mail: yalandin@ier.uran.ru

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

E-mail: rostov@ife,hcei.tsc.ru

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

E-mail: mesyats@pran.ru

Поступило в Редакцию 12 марта 2009 г.

Исследовалась стабильность эмиссии параллельных взрывоэмиссионных катодов, на которые подавался расщепленный высоковольтный ускоряющий импульс с субнаносекундным фронтом. Показано, что при тренировке графитовых катодов в вакууме до  $\sim 10^4$  импульсов токовые фронты инжектируемых сильноточных электронных пучков имеют взаимную дисперсию по времени не более десяти пикосекунд. Изучены динамика этой характеристики по мере тренировки, а также вариация абсолютного разброса и нарастание относительной задержки моментов инъекции пучков.

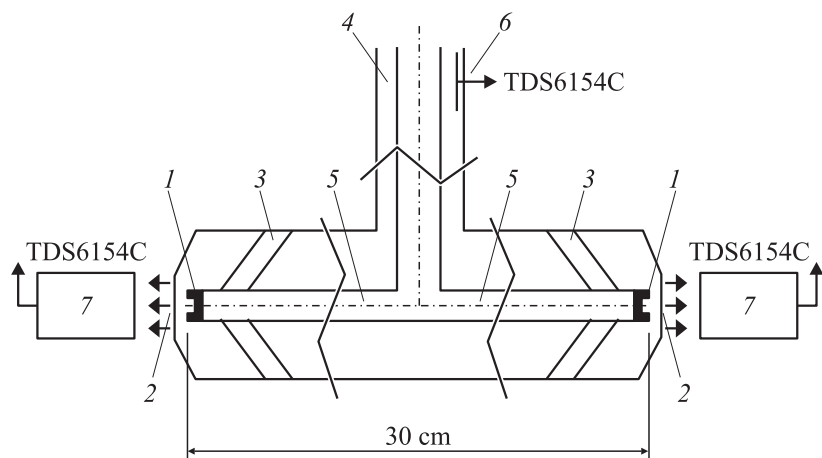
PACS: 52.25.Tx

В работе исследуются аспекты создания многоканальных генераторов мощных СВЧ-импульсов сантиметрового диапазона на основе релятивистских сильноточных электронных пучков с высокой степенью когерентности излучения между каналами. В общем случае важна не только идентичность фазовой структуры возбуждаемых микроволновых импульсов, например в режиме черенковского сверхизлучения, но также представляет интерес и разработка способов коррекции этой структуры в отдельно взятых каналах. При отсутствии высокочастотной связи между двумя или несколькими релятивистскими СВЧ-генераторами такое, по-видимому, возможно при условии, что в каждом из каналов обеспечиваются практически одинаковые импульсы высоковольтного питания

и пикосекундная стабилизация фронтов токовых импульсов электронных пучков. То есть будем предполагать, что флуктуации параметров задающего источника импульсов напряжения, включая длительность фронта, достаточно малы во всей последовательности импульсов; после деления импульса по каналам возможна индивидуальная коррекция фронта; обратная связь по напряжению между каналами отсутствует. В такой постановке задачи актуальным является излучение условий, при которых возможна существенная стабилизация работы каждого взрывоэмиссионного инжектора электронов. Предпосылками исследований послужили результаты работ [1,2], в которых источники наносекундных импульсов сверхизлучения с центральными частотами 3.7 и 10 GHz обеспечивали в импульсно-периодическом режиме стабильную от импульса к импульсу фазовую картину высокочастотного заполнения. Демонстрация этого эффекта заключалась в использовании такой опции цифрового широкополосного осциллографа, как накопление импульсов и их наложение друг на друга в режиме запуска развертки по фронту ускоряющего импульса. Было показано, что смещение высокочастотной фазы от импульса к импульсу сравнимо с девиацией длительности фронта высоковольтного импульса напряжения на катоде и могло быть значительно меньше периода СВЧ-колебаний [2].

Дополнительным заданием в решении задачи был эксперимент [3], в котором удалось показать возможность прецизионного внешнего запуска наносекундного высоковольтного генератора. В этом эксперименте ускоряющие импульсы могли подаваться на катод с полным разбросом по времени относительно запуска порядка 25 ps. Коммутация газового разрядника высоковольтного генератора при этом осуществлялась в режиме полного управления внешним электронным пучком, генерируемым отдельным ускорителем. Что касается возможности дополнительной коррекции фронта сформированного ускоряющего импульса напряжения, авторы связывают ее с использованием передающих линий, частично заполненных ферритом [1]. Таким образом, предыдущие исследования сделали целесообразным следующий этап, связанный с выяснением стабильности инжекции пучков параллельными катодами, работающими в режиме взрывной электронной эмиссии (ВЭЭ).

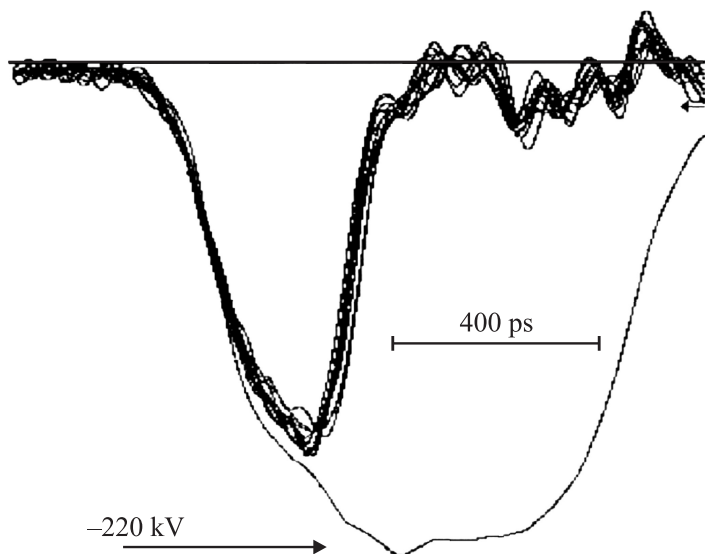
Эксперименты выполнялись на установке (рис. 1), в которой 5-наносекундный импульс высоковольтного генератора РАДАН-303 [4] трансформировался в субнаносекундный ( $\sim 0.3-0.7$  ns) преобразователем с обостряющим и срезающим газовыми разрядниками. Сформиро-



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки с двухканальной катодной системой: 1 — трубчатые холодные катоды (графит или сталь); 2 — плоский анод (фольга или сетка); 3 — проходные изоляторы; 4 — коаксиальная передающая линия  $45 \Omega$ ; 5 — коаксиальные фидеры  $37.5 \Omega$ , 6 — емкостной делитель напряжения; 7 — коллекторные датчики тока пучка.

ванный импульс показан на рис. 2. По коаксиальному маслonaполненному тракту с волновым сопротивлением  $45 \Omega$  он подавался на T-образное разветвление линии с идентичными волновыми сопротивлениями двух фидеров по  $37.5 \Omega$ . Их длина до точки подключения катодов обеспечивала развязку электронных инжекторов по времени  $\sim 2$  ns. Таким образом, на катоды в режиме бегущей волны поступали идентичные импульсы с длительностью менее 1 ns и амплитудой до  $-190$  kV.

В качестве катодов использовались кромки тонкостенных трубок диаметром 6 mm из графита (МПП-6) или нержавеющей стали. Плоским анодом являлась фольга из псевдосплава Al-Be толщиной  $40 \mu\text{m}$  или сетка из нержавеющей стали с ячейкой 0.4 mm и геометрической прозрачностью 75%. Сетка использовалась в том случае, когда при атмосферном давлении регистрировалась инжекция пучков убегающих электронов (УЭ) с длительностью не более 50 ps [5,6]. Интерес к этому эффекту в данном исследовании связан со следующим. В упомянутых работах было показано, что в определенных условиях для нетрени-



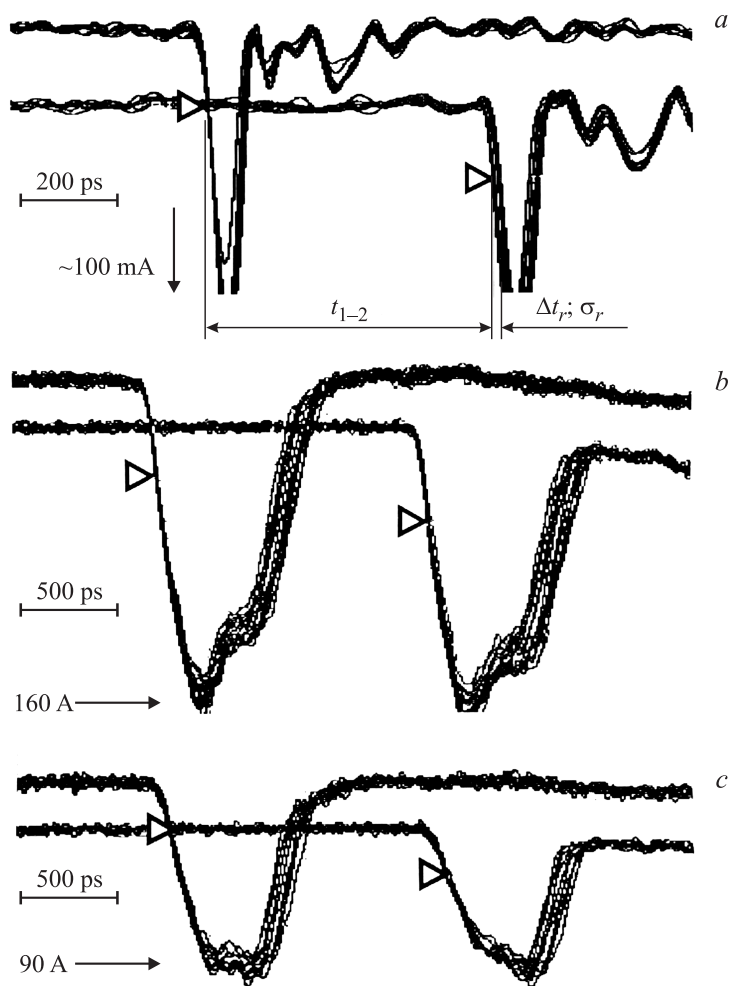
**Рис. 2.** Импульс напряжения максимальной амплитуды в передающей линии  $45 \Omega$  (однократный режим записи) и его укороченный вариант при срабатывании срезающего разрядника высоковольтного генератора (накопление 10 импульсов).

рованного катода момент инжекции УЭ в атмосферном промежутке и начало инжекции взрывоэмиссионного тока при вакуумировании этого же промежутка могут совпадать с точностью измерений. То есть наблюдение пучков УЭ в воздухе позволяет с пикосекундной точностью судить о моментах инициирования автоэлектронной эмиссии (АЭЭ), которая затем переходит во взрывную, если условия для такого перехода выполняются. Как и в работах [5,6], для регистрации использовались цифровой осциллограф реального времени с полосой регистрации 15 GHz (Tektronix TDS6154C, 40 Gs/s) и специальные коллекторные датчики тока пучка, позволявшие регистрировать фронты не хуже 30 ps [7]. Методика измерений в целом соответствовала описанной в [5], за исключением того, что магнитная изоляция электронных диодов в данном случае не применялась, а токовые датчики регистрировали пучок, инжектируемый через фольгу или сетку в воздух.

На рис. 3, *a* показаны типичные осциллограммы токов УЭ, полученные в воздухе для нетренированных графитовых катодов с толщиной эмитирующей кромки  $200 \pm 5 \mu\text{m}$ . Зазор катод–анод (сетка) составлял  $\sim 6 \text{ mm}$ . Согласно выводам работ [5,6], АЭЭ возникает, когда макроскопическое электрическое поле на кромке катода составляет  $\sim 1500 \text{ kV/cm}$ . Как следовало из электростатических расчетов [8], это реализовалось при определенном запасе напряжения по фронту ускоряющего импульса (рис. 2). Напомним, что амплитуда импульса напряжения при инъекции малых (амперных) токов УЭ удваивается, как в режиме холостого хода, а пробой воздуха запаздывает [9]. Амплитуда полного тока УЭ варьируется из-за изменения условий инициирования АЭЭ, что связано с некоторой нестабильностью длительности фронта и амплитуды высоковольтного импульса. Физически это определяется резкой зависимостью тока АЭЭ ( $j_f$ ) от приложенного электрического поля ( $E$ ). Поэтому в экспериментах для измерения взаимной дисперсии токовых фронтов УЭ использовались контрольные точки на уровне  $\sim 0.2$  от среднего значения амплитуды, т.е. близкие к основанию фронтов. Уровень отсчета задержки между фронтами для обоих импульсов выбирался одинаковым, а для „ведущего“ импульса был близким к уровню запуска цифрового осциллографа. Разумеется, такие измерения в условиях вариации амплитуды тока от импульса к импульсу дают оценку дисперсии „сверху“.

Из представленной на рис. 3, *a* осциллограммы следует, что процесс инициирования АЭЭ для параллельных катодов характеризовался малым среднеквадратичным разбросом:  $\sigma_r = 5 \pm 0.3 \text{ ps}$ . Полный разброс не превышал  $\Delta t_r = 16 \div 20 \text{ ps}$  и не возрастал при десятках включений. С точностью  $\Delta t_{1-2} = \pm 1 \text{ ps}$  оставались стабильными среднестатистические взаимные моменты инъекции токов УЭ, измеренные по нескольким пакетам из  $N = 10$  импульсов. Заметим, что задержка между импульсами ( $t_{1-2}$ ) на осциллограммах введена искусственно, для визуального разрешения импульсов на экране. Эту величину на рис. 3, *a* также не следует сравнивать с аналогичными на рис. 3, *b, c*, где представлены результаты измерений стабильности эмиссии вакуумированных ( $5 \cdot 10^{-3} \text{ Torr}$ ) диодов с идентичной геометрией и фольговым анодом. Данные измерений при начальных амплитудах регистрируемых токов взрывной электронной эмиссии  $I_E \geq 160 \text{ A}$  представлены в таблице.

Из анализа этих результатов следует, что при суммарной наработке до  $N = 500$  фронты сильноточных вакуумных пучков оставались взаим-



**Рис. 3.** *a* — токовые импульсы пучков убегающих электронов за сетчатыми анодами воздушных диодов (нетренированные графитовые катоды, накопление 10 импульсов); *b* — последующая тренировка графитовых катодов в вакууме (записано 20 последних импульсов пакета из  $N = 100$  включений); *c* — 20 последних импульсов при тренировке в вакууме до  $N = 11\,600$ . Треугольными маркерами показаны контрольные точки на фронтах токовых импульсов, по которым измерялись относительные разбросы и задержки по времени.

Стабильность эмиссии параллельных графитовых катодов в режиме ВЭЭ

Количество импульсов, $N$	Частота повторения, Hz	$\sigma_r$ , ps	$\Delta t_r$ , ps	$t_{1-2}$ , ps
10	1	2.46	8	1412
90	1	3.13	14	1412
500	5	2.95	20	1416
1000	10	3.87	45*	1421
10000	10	7.71	26	1441

\* За счет единичного выброса в серии десяти последних импульсов из тысячи.

но стабильными, как и фронты потоков УЭ до тренировки. Более того, среднеквадратичный разброс в вакуумном режиме даже уменьшился, поскольку отсчет производился в момент, когда большое количество АЭЭ центров уже перешло в режим ВЭЭ и работало условие статистического усреднения параметров эмиссии по всей кромке катода. В дальнейшем, при  $N > 500$  начинал проявляться известный эффект полировки катода [10], сопровождаемый сглаживанием микрорельефа эмиттеров, задержкой эмиссии по отношению к фронту ускоряющего импульса и падением амплитуды вакуумного пучка (рис. 3, *c*). Эти явления детально исследовались нами ранее при работе магнитоизолированных взрывоэмиссионных инжекторов на частотах повторения вплоть до 100–3000 Hz и наработке до  $N = 10^4 - 10^8$  импульсов [11,12]. В данном же случае, в диапазоне  $N = 10^3 - 10^4$  импульсов, был отмечен рост дисперсии  $\sigma_r$  (с  $\sim 3$  до  $\sim 8$  ps) и изменение связанного с ней параметра  $\Delta t_r$  (с 8 до  $\sim 26$  ps). Такой разброс  $\Delta t_r$ , не превышающий четверти периода микроволнового излучения диапазона 10 GHz, еще можно считать приемлемым в аспекте задачи „синфазной“ СВЧ-генерации.

Что более существенно — это монотонное нарастание абсолютного значения задержки между токовыми импульсами ( $t_{1-2}$ ). Причина этого явления вполне очевидна. Согласно современным представлениям, на стадии перехода АЭЭ в ВЭЭ выполняется условие:  $j_f^2 t_d \approx \text{const}$ , где  $t_d$  — задержка до микровзрыва эмиттера после достижения некоторой критической плотности автоэмиссионного тока. Постепенная полировка поверхности в вакууме смещает точку инициирования АЭЭ на фронте ускоряющего импульса в сторону больших напряжений. Тем самым,

на сглаженном эмиттере снова достигаются поля, обеспечивающие требуемую  $j_f$ . Учитывая сильную зависимость  $j_f(E)$ , следует отметить, что даже небольшое различие геометрии электронных инжекторов (толщина кромки катода, величина зазора до анода, чистота механической обработки и т.п.) делает даже изначально „идентичные“ вакуумные диоды неэквивалентными по мере длительной тренировки. При этом у каждого катода скорость роста  $t_d$  будет разной. В этом случае соответственно наблюдается и рост  $t_{1-2}$ . Понятно также, что рост  $t_d$  не может не сопровождаться увеличением статистического разброса ( $\sigma_r$ ). В частности, предельный случай наблюдался для трубчатых катодов из нержавеющей стали (толщина кромки 0.5 mm) в вакууме, когда уже при  $N \approx 100$  с одного из катодов эмиссия полностью прекращалась.

Итак, описанные эффекты существенно усложняют задачу стабилизации сильноточной инжекции параллельных катодов в процессе продолжительной работы. Однако наряду с явлением полировки микрорельефа холодных катодов известен механизм регенерации эмиссионных центров при увеличении длительности импульсов [10]. Кроме того, важным моментом может стать применение магнитной изоляции электронных инжекторов, поскольку сильное магнитное поле обеспечивает более равномерную эмиссию пучка по кромке катода в режиме ВЭЭ [13]. Как известно [11], применение совокупности отмеченных методик обеспечивало работу графитового взрывоэмиссионного катода в релятивистском СВЧ-генераторе при количестве включений до  $N = 10^8$ . При этом деградация эмиссионной способности катода проявлялась в изменении тока пучка по амплитуде и длительности, т.е. задержка тока нарастала в течение  $10^5 - 10^6$  импульсов и далее стабилизировалась на уровне нескольких наносекунд. Предполагается продолжить работы в этих направлениях, однако на данный момент можно считать установленным факт, что эмиссия вакуумных сильноточных пучков с параллельно работающих катодов при ограниченном ресурсе может осуществляться с взаимной стабильностью фронтов в единицы пикосекунд.

Работа выполнена в соответствии с разделом программы президиума РАН „Проблемы физической электроники, пучков заряженных частиц и генерации электромагнитного излучения в системах большой мощности“ и при поддержке РФФИ, гранты 07-08-12037; 08-02-00183; 08-02-12019.



## Список литературы

- [1] *Афанасьев К.В.* и др. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 21. С. 23–28.
- [2] *Гришин Д.М.* и др. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 19. С. 14–20.
- [3] *Месяц Г.А.* и др. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 19. С. 6–13.
- [4] *Яландин М.И., Шнак В.Г.* // ПТЭ. 2001. № 3. С. 5–31.
- [5] *Месяц Г.А.* и др. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 4. С. 71–80.
- [6] *Mesyats G.A.* et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2008. V. 36. N 5. P. 2497–2504.
- [7] *Reutova A.G.* et al. // Proc. of 15th Int. Symp. on High Current Electronics. 2008. Tomsk, Russia. P. 111–114.
- [8] *Тиунов М.А.* и др. SAM-Интерактивная программа для расчета электронных пушек на мини-ЭВМ. Новосибирск: ИЯФ СО АН СССР. № 89–159, 1989.
- [9] *Месяц Г.А.* и др. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 1. С. 35–44.
- [10] *Месяц Г.А.* и др. // ДАН. 1976. Т. 227. № 6. С. 1335–1337.
- [11] *Гунин А.В.* и др. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 22. С. 84–94.
- [12] *Коровин С.Д.* и др. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 19. С. 30–39.
- [13] *Беломытцев С.Я.* и др. // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6. В. 18. С. 1089–1092.