

10

## О динамике формирования субнаносекундного электронного пучка в газовом и вакуумном диоде

© Г.А. Месяц, С.Д. Коровин, К.А. Шарыпов, В.Г. Шпак,  
С.А. Шунайлов, М.И. Яландин

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург

E-mail: yalandin@ier.uran.ru

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

E-mail: korovin@hcei.tsc.ru

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

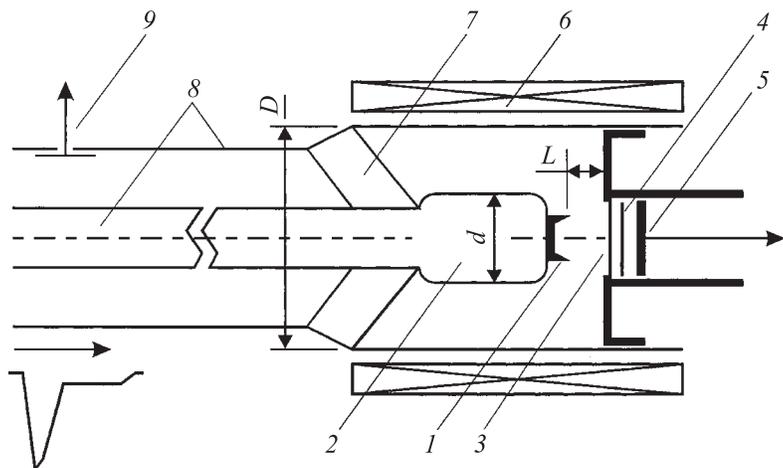
E-mail: mesyats@pran.ru

Поступило в Редакцию 17 августа 2005 г.

С временным разрешением  $\sim 10^{-11}$  с исследованы динамические характеристики формирования электронного пучка в условиях газового заполнения или вакуумирования ускоряющего промежутка диода. Показано, что при атмосферном заполнении ток пучка с амплитудой в единицы ампер формируется диодом до сотни пикосекунд раньше момента формирования сильноточного пучка в вакуумных условиях, а его зарегистрированная длительность  $\sim 10^{-10}$  s близка к времени пролета электроном диодного промежутка в режиме непрерывного ускорения. Показана роль наносекундного предымпульса в инициирование эмиссии электронов, ускоряемых в дальнейшем высоковольтным импульсом с субнаносекундным фронтом.

PACS: 52.80.Vp

Принято считать, что импульсный пробой перенапряженных высоковольтных разрядных промежутков вне зависимости от типа изолирующей среды обычно начинается с инжекции электронов с катодного электрода. Многоэлектронное инициирование за счет автоэлектронной эмиссии (АЭЭ) позволяет достигать времени коммутации  $< 10^{-10}$  s в газовых разрядниках [1]. Если создаются условия для перехода АЭЭ в стадию взрывной электронной эмиссии (ВЭЭ), то в вакуумном диоде могут генерироваться сильноточные электронные пучки даже при длительности ускоряющего импульса  $\sim 10^{-10}$  s [2,3]. Последнее



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1, 2 — графитовый катод и катодный электрод; 3 — анодная фольга (Al,  $15\ \mu\text{m}$ ); 4 — сегментная диафрагма вакуумного тока; 5 — коллекторный датчик тока пучка; 6 — импульсный соленоид; 7 — проходной изолятор „масло–вакуум (газ)“; 8 — электроды передающей линии; 9 — емкостной делитель напряжения.  $D = 47\ \text{mm}$ ;  $d = 17\ \text{mm}$ ;  $L = (0 - 20)\ \text{mm}$ .

облегчено, когда в пикосекундных вакуумных электронных инжекторах АЭЭ-инициирование начинается при воздействии опережающего наносекундного предимпульса [3,4]. Мы предположили, что до момента перекрытия межэлектродного зазора разрядом аналогичные эффекты должны иметь место и в газонаполненных диодах, которые в последнее время вызывают повышенный интерес (см., в частности, [5] и цитированную там литературу). В представленных ниже экспериментах с разрешением в десятки пикосекунд сравнивались динамические эмиссионные характеристики электронного диода с ненакаливаемым катодом в условиях вакуумной изоляции и газового заполнения.

В экспериментальной установке (рис. 1) использовалась коаксиальная передающая линия (ПЛ) с диодным промежутком между торцом центрального электрода, где устанавливался графитовый катод, и анодом из алюминиевой фольги ( $15\ \mu\text{m}$ ). В экспериментах было показано, что при амплитуде субнаносекундного ускоряющего импульса  $-160\ \text{kV}$

ток пучка ослаблялся анодной фольгой приблизительно на 40%. За фольгой устанавливались датчики электронного тока. Первый вариант датчика представлял цилиндр Фарадея с низкоомной ( $6 \Omega$ ) передающей коаксиальной линией, согласованной с нагрузочной полосковой, где при помощи линии-делителя напряжения снимался сигнал на осциллограф Tektronix TDS 6604 (6 GHz; 20 Gs/s). Переходная характеристика датчика (150–200) ps [6]. Датчик предусматривал функционирование как в атмосферной среде, так и при вакуумировании коллектора пучка. С его помощью было установлено, что воздушное заполнение в области коллектора электронов при длительности ускоряющих импульсов (150–200) ps снижает амплитудное показание измеряемого тока пучка не более чем на 20%, и это мало зависит от величины тока в диапазоне от единиц до сотен ампер. Используемый в большинстве экспериментов второй вариант датчика был выполнен в виде дискового токового коллектора диаметром 10 mm, нагруженного на кабель РК50-4-13. Этот датчик работал только в атмосферной среде и имел переходную характеристику  $\sim 70$  ps.

Вся инжекционно-измерительная система располагалась по оси импульсного соленоида с магнитным полем 1.5 Т, которое было необходимо для полного сброса электронного тока диода на коллектор широкополосного датчика даже после прохождения пучком рассеивающей анодной фольги. Численное моделирование [7] показало, что спиральный характер движения замагниченных электронов незначительно увеличивает длину траектории и время их пролета через ускоряющий зазор диода.

На катод через ПЛ подавались высоковольтные импульсы от субнаносекундного генератора РАДАН [8]. В различных сочетаниях могли варьироваться амплитуда (до 150 kV в бегущей волне), полная длительность (0.15–3 ns), длительность фронта ( $\geq 100$  ps), а также характеристики предимпульса (до 3 ns;  $\leq 10$  kV). Параметры импульсов контролировались на входном участке ПЛ с помощью емкостного делителя напряжения с переходной характеристикой  $\sim 100$  ps. Сигнал с делителя позволял получать рефлектограммы после отражения исходного импульса напряжения от нагрузки (диода), по которым можно было судить о режимах работы диода и временах их реализации. По сигналу с делителя, учитывая реальную геометрию ПЛ, с помощью пакетов программ SAM и KAPAT [7,9] рассчитывались амплитуда импульса напряжения и электрические поля на катодном электроде

диода и собственно на эмиссионной кромке катода. Ниже по тексту приводятся амплитуды напряжения, соответствующие удвоению исходного импульса на катодном электроде в режиме холостого хода. Поскольку волновое сопротивление генератора составляло  $45 \Omega$ , а коаксиальной ПЛ вблизи катода  $60 \Omega$ , то очевидно, что близкий к холостому ходу режим реализовывался даже при эмиссии пучков с наибольшими измерившимися вакуумными токами (100–200) А.

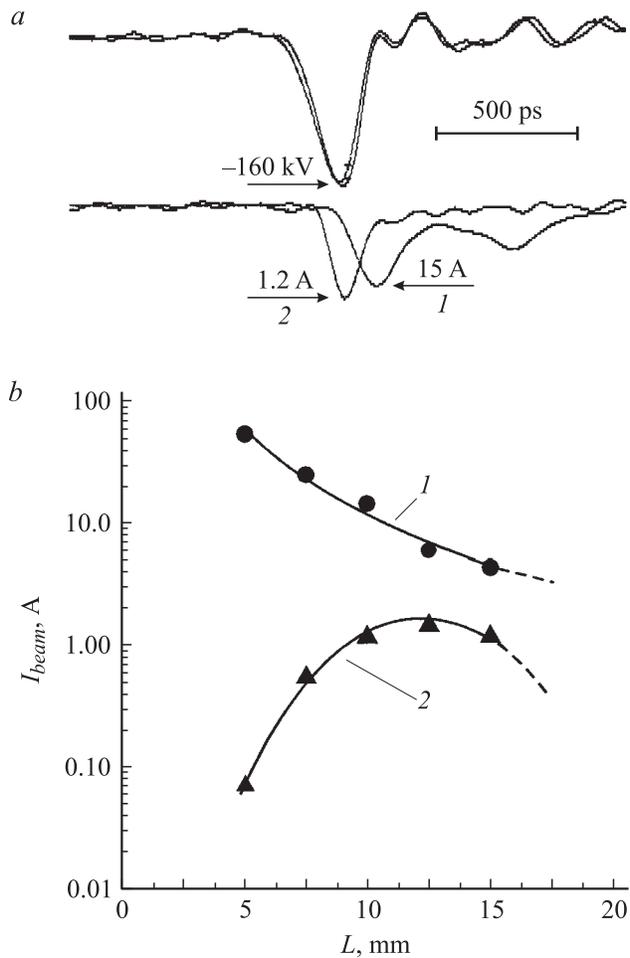
В экспериментах было установлено, что пробой воздушного промежутка в радиальном зазоре между электродами с диаметрами  $d$  и  $D$  (рис. 1) не проявлялся при амплитуде импульса до  $-(135-140)$  кВ. Он возникал при амплитудах более  $-150$  кВ, что не противоречило результатам измерений в работах [1,3,10]. Отмечено, что в условиях возникновения такого радиального пробоя воздуха рефлектограмма импульса напряжения оставалась практически идентичной с полученной в режиме гарантированного холостого хода (т.е. без пробоя при вакуумной изоляции диода). Таким образом, сопротивление радиального разряда при атмосферном давлении было достаточно высоко и он, судя по всему, мало влиял на амплитуду импульса напряжения, доставляемого к графитовому катоду в описываемых ниже экспериментах.

Рефлектограммы после отражения импульсов напряжения (амплитуда  $-160$  кВ, длительность  $\sim 150$  ps; фронт  $\sim 100$  ps) от диода с графитовым трубчатым катодом (диаметр 6 мм) показали, что в случае вакуумной изоляции отражение было униполярным, типа холостого хода. Для воздушного заполнения отраженный сигнал инвертировался после замыкания зазора „катод–анод“ разрядом. При зазоре  $L = 5$  мм пик такого отражения был задержан относительно униполярного на  $\sim 80$  ns. При  $L = 10$  мм задержка возросла до  $\sim 110$  ps, а при  $L = 15$  мм инвертированное отражение исчезло. Последнее связано с ограниченной длительностью исходного импульса. Наблюдавшееся время задержки инвертированных отражений (формирования разряда) для воздушных зазоров оказалось несколько большим по сравнению с временем пролета электроном вакуумных промежутков, если бы он инжектировался и ускорялся при максимальном напряжении импульса ( $-160$  кВ). Численный расчет времени пролета [7] дал значения  $\sim 40$  и  $70$  ps для  $L = 5$  мм и  $L = 10$  мм соответственно. В таком случае, если для потенциалов катода выше некоторых реализуется согласованный с темпом ускорения рост длины свободного пробега инжектированного электрона, то еще до момента перекрытия зазора разрядом часть

электронов может ускоряться в воздушном промежутке в непрерывном режиме и формировать пучок. Важной особенностью при этом должно быть обострение фронта токового импульса пучка в сравнении с фронтом ускоряющего напряжения. Это ясно из сопоставимости времени ускорения с длительностью фронта высоковольтного импульса, т.е. в связи с наличием более быстрых электронов, „догоняющих“ инжектированные в зазор ранее. Такие эффекты наблюдались и обсуждались в работах [4,6] при изучении динамики субнаносекундных вакуумных электронных пучков.

На рис. 2, *a* представлены осциллограммы ускоряющих импульсов с амплитудой на катоде  $-160\text{ kV}$  и соответствующие им импульсы токов электронного пучка за анодной фольгой вакуумного диода с амплитудой  $\sim 15\text{ A}$  и при воздушном заполнении — с амплитудой  $\sim 1.2\text{ A}$ . Относительной привязки по времени между ускоряющими и токовыми импульсами на осциллограмме нет, но положение импульсов токов пучка в газе и вакууме взаимно фиксировано, поскольку пространственное положение датчика тока не изменялось. Обращает на себя внимание опережение тока газонаполненного диода по сравнению с вакуумным приблизительно на  $100\text{ ps}$  по основанию, что меньше длительности фронта ускоряющего импульса, составлявшей  $\sim 150\text{ ps}$ . Здесь, приводя аппаратно-регистрируемые временные характеристики для редкоповторяющихся импульсов, уместно напомнить, что дискретизация использованного в экспериментах цифрового осциллографа составляла  $50\text{ ps}$ . Это означает, например, что определение параметров импульса с характерной длительностью на полувисоте  $\sim 100\text{ ps}$  могло производиться не более чем по трем точкам. Очевидно, могло иметь место существенное занижение амплитуд импульсов. Математическая интерполяция огибающей (соотношение длительностей фронта и спада и т.п.) выглядит весьма условной и не может использоваться для физической интерпретации. Тем не менее опережение тока газонаполненного диода по сравнению с вакуумным было обнаружено для любых из рассмотренных значений зазоров в диапазоне  $5\text{--}15\text{ mm}$ , когда амплитуды токовых импульсов изменялись более чем на порядок (рис. 2, *b*).

Увеличение амплитуды ускоряющего импульса на катоде до  $-270\text{ kV}$  и его длительности до  $250\text{ ps}$  при неизменных крутизне фронта и зазоре ускоряющего диода  $L = 12.5\text{ mm}$  позволило существенно увеличить вакуумный ток пучка за анодной фольгой (с  $6$  до  $150\text{ A}$ ), а



**Рис. 2.** *a* — осциллограммы двух ускоряющих импульсов (верхний луч) и соответствующий им ток пучков при вакуумной изоляции (*1*) и при воздушном заполнении (*2*) диода. Зазор катод-анод  $L = 10$  мм; фокусирующее магнитное поле 1.5 Т. *b* — изменение амплитуд импульсов тока пучка вакуумного и газонаполненного диодов при вариации ускоряющего зазора  $L$ . *c* — осциллограммы тока пучка диода в случае вакуума (*1*), воздушного (*2*) и водородного (*3*) заполнения при давлении 760 Торр. Зазор  $L = 12.5$  мм. Фокусирующее магнитное поле 1.5 Т.

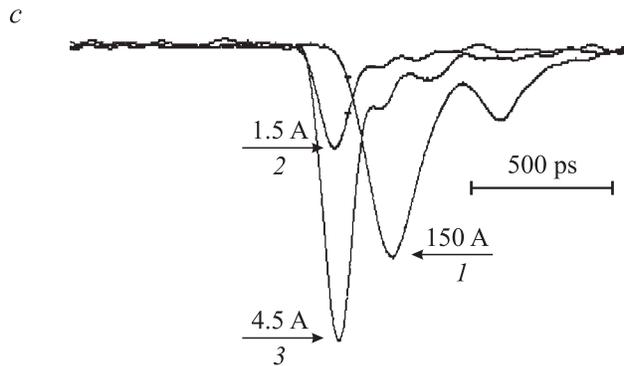
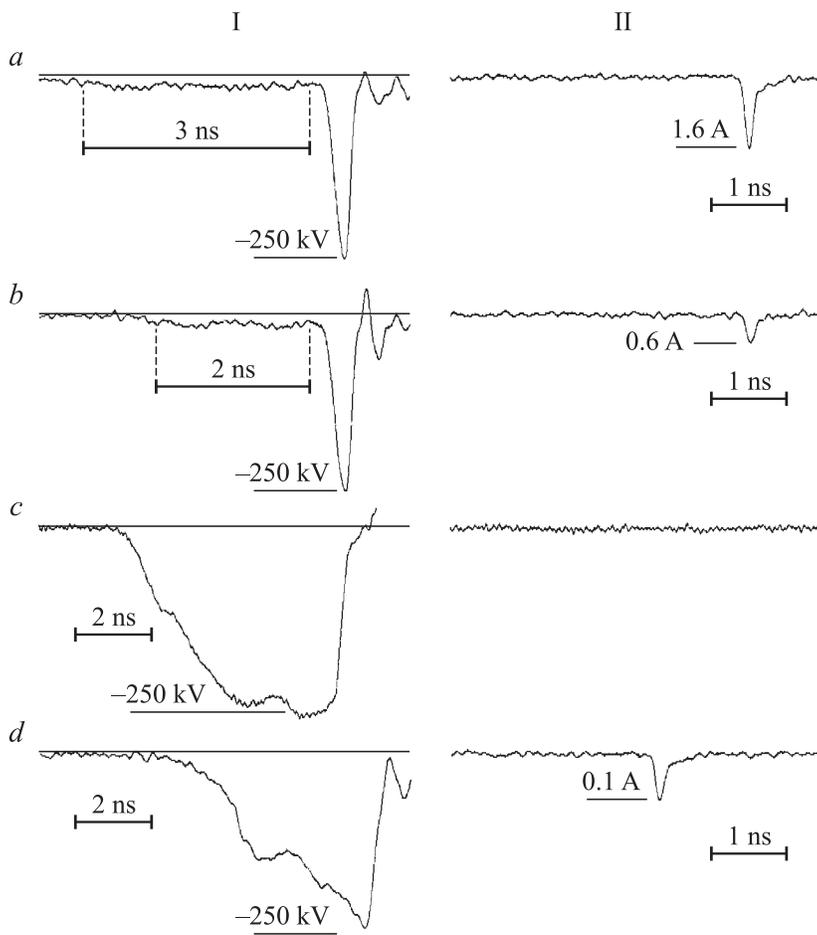


Рис. 2 (продолжение).

его длительность возросла до  $\sim (200-220)$  ps, в то время как ток пучка при воздушном заполнении практически не изменился как по амплитуде ( $1.35 \text{ A} \rightarrow 1.5 \text{ A}$ ), так и по длительности ( $120 \text{ ps} \rightarrow 130 \text{ ps}$ ). Как видно из рис. 2, с, сохранилась и относительная временная привязка импульсов тока при воздушном заполнении и вакууме в диоде. На рис. 2, с также показана осциллограмма тока пучка при замене воздуха водородом под давлением 760 Torr, когда ток пучка возрос в три раза: до  $\sim 4.5 \text{ A}$ , что не могло быть отнесено к ошибке оцифровки. В случае заполнения диода элегазом ( $\text{SF}_6$ ) при атмосферном давлении ток на выходе диода полностью отсутствовал.

Заметим, что в большинстве высоковольтных генераторов нано- и субнаносекундного диапазонов основному импульсу напряжения предшествуют гораздо более протяженные по времени предимпульсы или затянутые начальные участки фронта. Это, в частности, в полной мере относится к экспериментальным системам, использованным в многочисленных опытах по генерации электронных пучков в газонаполненных диодах [5]. Как и в работе [4], где нами исследовался сильноточный субнаносекундный вакуумный электронный диод, в настоящих исследованиях специально изучалось влияние параметров предимпульса на характеристики пучка, инжектируемого при воздушном заполнении ускоряющего зазора. В используемом субнаносекундном генераторе [8] предимпульс обусловлен наличием проходной емкости обостряющего разрядника. Из осциллограмм на рис. 3, а, b следовало, что при амплитуде предимпульса  $\sim -10 \text{ kV}$  его укорочение с 3 до 2 ns определяло



**Рис. 3.** *a, b* — изменение амплитуды импульса тока пучка (II) за фольгой диода с воздушным заполнением при вариации длительности предимпульса с амплитудой  $-10\text{ kV}$  и при неизменном субнаносекундном ускоряющем импульсе (I). *c* — отсутствие тока воздушного диода при плавном наносекундном ускоряющем фронте и появление тока пучка при формировании ступенчатого скачка на затянутом фронте (*d*).

падение амплитуды тока пучка с 1.5 до 0.6 А. Если же предымпульс устранялся совсем (обостряющий разрядник при этом замыкался) и на катод подавался плавный фронт с нарастанием напряжения за 2 ns вместо 200 ps, ток на выходе диода не регистрировался вообще (рис. 3, с). В то же время отмечалось, что появление на плавном фронте с некоторой задержкой ступенчатого скачка с субнаносекундным перепадом напряжения уже вызывало генерацию пучка (рис. 2, d).

Систематизируя результаты представленных экспериментов, можно сделать следующие выводы.

Для формирования электронного пучка в газовом диоде достаточно длительности ускоряющего импульса, сравнимой с временем ускорения электрона в вакуумном диодном промежутке. В этом случае концепция газоразрядного механизма формирования сильноточных лавинных электронных пучков, представленная в обзоре [5], для интерпретации результатов настоящих измерений и для аналогичных экспериментальных условий неприменима. Есть основание полагать, что газовый пробой может быть фактором, только ограничивающим длительность инжектируемого пикосекундного пучка в газонаполненном диоде.

В режиме непрерывного ускорения в газонаполненном диоде может оказываться часть электронов, эмитированных предварительно, за время воздействия предымпульса относительно малой амплитуды.

Возникновение электронного тока газового диода раньше момента генерации вакуумного показывает, что эмиссия электронов происходит на ранней стадии перехода АЭЭ в ВЭЭ или еще до начала этого перехода.

Представляется, что при прочих равных условиях увеличить ток газонаполненного диода можно с ростом площади катода. Другие варианты могут быть связаны с увеличением искажения поля на катоде, крутизны фронта ускоряющего импульса и давления газа, а также с сочетанием указанных факторов.

В заключение отметим, что генерация электронных пучков с характерным током в единицы ампер и длительностью  $\sim 100$  ps наблюдалась нами не только в условиях магнитной изоляции коаксиального диода специальной конструкции, но и без применения магнитной фокусировки, в частности, в воздушном промежутке, имитировавшем электродную систему серийной вакуумной электронной трубки ИМАЗ-150Э. При питании такого диода (2–4)-ns импульсами с амплитудой  $-(150-180)$  kV и фронтами 0.4–1 ns отмеченные в настоящей работе

особенности генерации пикосекундных электронных пучков в воздушной среде оказались справедливыми.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 04–02–16576; 05–02–08016; 05–02–08240.

## Список литературы

- [1] *Королев Ю.Д., Месяц Г.А.* Физика импульсного пробоя газов. М.: Наука, 1991.
- [2] *Ковальчук Б.М., Месяц Г.А., Шпак В.Г.* // ПТЭ. 1976. № 6. С. 73–75.
- [3] *Месяц Г.А., Яландин М.И.* // УФН. 2005. Т. 175. № 3. С. 225–246.
- [4] *Shpak V.G. et al.* // Proc. of the 11th IEEE Int. Pulsed Power Conf. Baltimore, 1997. V. 2. P. 1586–1591.
- [5] *Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И.* // УФН. 2004. Т. 174. № 9. С. 953–971.
- [6] *Шпак В.Г.* и др. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 7. С. 65–69.
- [7] *Тиунов М.А., Фомель Б.М., Яковлев В.П.* SAM-интерактивная программа для расчета электронных пушек на мини-ЭВМ. Новосибирск: ИЯФ СО АН СССР, 1989. № 89–159.
- [8] *Яландин М.И., Шпак В.Г.* // ПТЭ. 2001. № 3. С. 5–31.
- [9] *Tarakanov V.P.* User's Manual for Code KARAT. Springfield: BRA, 1992.
- [10] *Felsenthal P., Proud J.M.* // Phys. Rev. 1965. V. 139. N 6A. P. 1796–1804.