

10;12

О моменте инжекции убегающих электронов на фронте ускоряющего импульса в атмосферном диоде с неоднородным полем: от нестабильности к определенности

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

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург
E-mail: yalandin@ier.uran.ru
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва
E-mail: mesyats@pran.ru

Поступило в Редакцию 17 апреля 2010 г.

Представлена простая методика оценки момента инжекции пучка убегающих электронов в воздушном диоде с резко неоднородным полем по отношению к субнаносекундному фронту высоковольтного ускоряющего импульса, подаваемого на катод. Определение момента инжекции пучка состоит в поиске минимума дисперсии временной задержки между варьируемой точкой запуска осциллографа на нестабильном фронте ускоряющего напряжения и регистрируемым фронтом импульса электронного тока.

Определение временного интервала инжекции пикосекундного пучка убегающих электронов (УЭ) [1–3] по отношению к фронту ускоряющего импульса на катоде атмосферного промежутка с резко неоднородным полем — принципиальная задача. Если этот вопрос в эксперименте не решен, то не определено и напряжение инжекции УЭ. В результате

общепринятые подходы и факты из области исследований инициирования, динамики и энергетических характеристик потоков УЭ, их роль в развитии импульсного пробоя и т.п. (см., например, [4,5] и цитированное там) могут ставиться под сомнение. Действительно, для субнаносекундных фронтов ускоряющего напряжения при $dV/dt \sim 10^{15}$ V/s цена неопределенности времени инжекции УЭ на уровне регистрируемой длительности пучка (от десятков до сотни пикосекунд) составляет сто—двести киловольт и более.

Казалось бы, наиболее очевидное решение проблемы отыскания порога инжекции УЭ можно обеспечить вариацией параметров ускоряющего импульса таким образом, чтобы при неизменной крутизне фронта от импульса к импульсу снижалась амплитуда полки напряжения. Уменьшение амплитуды, когда импульс срезается закорачивающим разрядником уже на фронте, к сожалению, неприменимо. При этом уменьшается длительность импульса и крутизна фронта [6], а на спадающем заднем фронте условия непрерывного ускорения могут не выполняться. Между тем требуемое плавное изменение амплитуды полки ускоряющего импульса при неизменной крутизне фронта — непростая задача для существующих высоковольтных субнаносекундных генераторов.

Судя по всему, не удастся получить корректные данные о привязке регистрируемого тока УЭ к напряжению на субнаносекундном фронте в многочисленных опытах, где в совокупности применяются коллекторный датчик тока с субнаносекундным разрешением [7] и емкостные делители напряжения, даже при условии детальной калибровки задержек регистрационных трактов. Дело в том, что при этом не учитываются динамическое сжатие пучка УЭ в процессе ускорения и возможные обгоны частиц на участке дрейфа от анода до токового коллектора (эффект „гонки с гандикапом“ [8]). Такие особенности требуют численного моделирования динамики ускорения и дрейфа, а это имеет смысл, если известна энергия УЭ на коллекторе токового датчика. В последнем аспекте уместно напомнить, что из-за чрезвычайно высокой амплитудной нестабильности токовых импульсов УЭ методом прострела фольговых фильтров-отсечек можно сделать оценку только верхней границы энергии — и не более. Еще одна сложность заключается в том, что для импульсов с пикосекундными фронтами непросто решается вопрос определения реальных параметров ускоряющего напряжения на кромке катода. Действительно, емкостный

делитель напряжения не является точечным датчиком и не может располагаться в непосредственной близости от катода. Поэтому требуется применять численные методы (например, [9]), чтобы рассчитать трансформацию формы фронта и амплитуды импульса при его доставке к кромке катода от удаленного неискажающего делителя. Делитель должен быть установлен на однородном участке длинной передающей линии до проходного изолятора электродного промежутка. Такую процедуру мы использовали, например, при реализации времяпролетных измерений энергии УЭ, что позволяло в конечном итоге оценить момент инжекции пучка [2,3]. Однако этот метод весьма сложен, так как предполагал измерение тока УЭ на вакуумном участке дрейфа за анодной фольгой (сетчатый анод уже неприменим) и при наложении продольного магнитного поля. Кроме того, по известной энергии частиц на фронте токового импульса решалась обратная задача привязки к моменту инжекции. Для этого методом крупных частиц в вакуумном приближении моделировалась динамика ускорения и дрейфа [9] с учетом параметров реального фронта напряжения на катоде, точной геометрии электродов и положения токового датчика [10].

В данной работе излагается суть и анализируется применимость более простого способа оценки момента формирования пучка УЭ по отношению к фронту ускоряющего импульса, который фактически представляет собой метод прямого измерения. В основу положен факт, что при инициировании пучка УЭ за счет автоэлектронной эмиссии (АЭЭ) [11] часть первичных автоэмиссионных электронов с катода и вторичные электроны с границы ионизованного вблизи катода газа будут уходить в режим непрерывного ускорения, если электрическое поле превысит критическое значение [4]. Такое поле создается, когда на ускоряющем промежутке в некоторый момент времени достигается определенное напряжение на фронте импульса. Из общих соображений понятно, что по отношению к данному моменту временная стабильность инжекции пучка УЭ будет определяться совокупностью физических процессов: предысторией автоэмиссионного инициирования и последующей ионизации за счет развития лавин в прикатодной области [4] в относительно слабом поле: например, на предимпульсе напряжения [1] и на начальном участке фронта. Заметим, что диапазон такой временной („физической“) стабильности — единицы пикосекунд. Это нами было показано в экспериментах [12], где расщепленный ускоряющий импульс подавался на катоды двух идентичных газовых

промежутков и типичная временная дисперсия независимых пучков УЭ не превышала ~ 5 ps.

В реальном эксперименте всегда имеется практически неустранимая нестабильность параметров ускоряющего импульса, типичная для любого высоковольтного субнаносекундного генератора с искровыми разрядниками (см., например [13]). При этом от импульса к импульсу заметно меняются длительность фронта и амплитуда. В таком случае при запуске развертки осциллографа от произвольного уровня напряжения на фронте ускоряющего импульса (датчик расположен вне зоны формирования пучка) временная нестабильность регистрации тока УЭ будет превышать физическую. Для пояснения представим, что запуск производился по фиксированному напряжению, составляющему 0.01 максимальной амплитуды, а УЭ возникают в достаточно узком диапазоне по времени, вблизи уровня 0.99. Тогда, например, любое изменение длительности фронта напряжения при неизменной его амплитуде приведет к запаздыванию регистрируемого токового импульса УЭ строго в соответствии с увеличением длительности фронта. Обратим внимание на то, что в данном примере речь идет об ускорении уже на полке напряжения, в результате чего динамика этого процесса не зависит от длительности фронта. Если область напряжений инжекции короткого пучка УЭ на нестабильном фронте расположена произвольно, но запуск осциллографа осуществляется на этом же уровне напряжения, то разброс регистрируемой задержки минимален и будет близок к физической нестабильности, дополненной некоторой вариацией времени ускорения из-за изменений крутизны фронта. Последним эффектом (составляющим единицы пикосекунд), как правило, можно пренебречь в силу релятивистской динамики электронов. Это может быть показано методом PIC-моделирования в вакуумном приближении [9] для характерных параметров ранее использовавшихся импульсов и ускоряющих промежутков [1–3]. Так как в экспериментах критическое поле достигается при существенном резерве напряжения, то определение момента инжекции УЭ состоит в поиске минимума дисперсии временной задержки между варьируемой точкой запуска на нестабильном фронте ускоряющего импульса и фронтом тока пучка УЭ. Поскольку при регистрации сигналы с емкостного делителя напряжения и датчика тока пучка могут быть произвольно сдвинуты из-за различных длин кабельных трактов, то речь идет об абсолютном значении дисперсии.

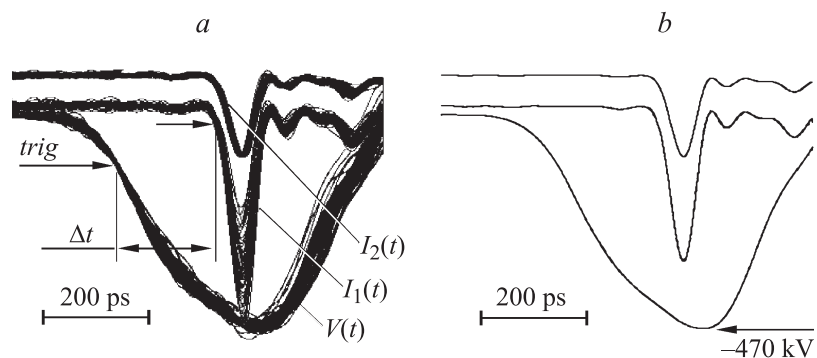


Рис. 1. *a* — осциллограммы в режиме накопления 50 импульсов на частоте повторения 10 Hz. $V(t)$ — сигнал ускоряющего напряжения с емкостного делителя, расположенного в 45-Ω передающей линии; $I_1(t)$ — ток пучка убегающих электронов с амплитудой до 1 А; $I_2(t)$ — автонормировка сигнала $I_1(t)$. Сигналы $V(t)$ и $I(t)$ — без относительной привязки по времени. Стрелками обозначены варьируемый уровень запуска осциллографа на фронте ускоряющего импульса „trig“ и фиксированный уровень на фронте токового импульса $I_1(t)$ — для измерения временного разброса задержки Δt ; *b* — те же сигналы, что и в случае (*a*), но в режиме усреднения. Амплитуда напряжения -470 kV пересчитана для кромки катода.

В обсуждаемых экспериментах использовался электродный промежуток с резко неоднородным полем, образованный трубчатым графитовым катодом и плоским сетчатым анодом. Геометрия диода соответствовала одному из двух идентичных каналов в эксперименте [12]. Диаметр катода составлял 6 mm, радиальная толщина кромки 0.4 mm. Зазор промежутка мог варьироваться. На катод подавались импульсы от субнаносекундного генератора РАДАН [14], использовавшегося ранее в экспериментах [1–3,12]. На рис. 1, *a* приведены типичные осциллограммы в режиме накопления, полученные на экране цифрового осциллографа с полосой регистрации 15 GHz и частотой дискретизации 40 Gs/s. Для регистрации тока УЭ использовался коллекторный датчик тока [10] с переходной характеристикой ~ 20 ps, что не хуже, чем у осциллографа. Осциллограмма сигнала с делителя напряжения $V(t)$ дает представление о нестабильности амплитуды и длительности фронта ускоряющего импульса, а также об уровне шумов регистра-

ции, которые представлены хаотической модуляцией и принципиально неустраиваемы при измерениях. Другая особенность — амплитудная нестабильность импульса тока УЭ $I_1(t)$. Она связана со случайным характером инициирования ионизации газа за счет АЭЭ с дискретных микронеоднородностей катода и также не может быть ликвидирована полностью. Как отмечалось выше, для нетренированного катода разброс амплитуд тока УЭ велик: более чем десятикратный. Поэтому эксперименты проводились после предварительной тренировки эмиссионной кромки (2–3 тысячи импульсов), когда контрольные осциллограммы тока (рис. 1, *b*) в режиме усреднения по сериям из 50 включений воспроизводились с амплитудным отклонением не более $\pm 3\%$. При этом типичная амплитудная дисперсия в каждом пакете оставалась достаточно существенной и составляла 10–20%. Из этого факта понятна особенность измерения задержки инжекции УЭ относительно фронта ускоряющего импульса. Речь идет о выборе уровня измерения по фронту тока. Интересно, что применение автонормирования импульсов тока УЭ не решает проблемы. Тем не менее в данном режиме регистрации было показано, что вне зависимости от амплитудного значения $I_1(t)$ огибающие $I_2(t)$ оказываются идентичными по форме (рис. 1, *a*). Это подтверждает предположение [2,3], что мы действительно имеем дело с токовым импульсом УЭ, длительность которого существенно меньше, чем регистрируемые 45–50 ps на полувысоте. То есть проводить измерения задержки по уровню фронта „0.5“, в том числе и в условиях автонормировки импульса, смысла не имеет из-за ограниченной полосы регистратора и существенной амплитудной нестабильности, которая неизбежно трансформируется в неадекватный разброс по времени. Наиболее оправданным было выбрать фиксированное значение тока УЭ на минимальном уровне фронта токового сигнала. В экспериментах этот уровень лишь вдвое превышал амплитуду шумовой модуляции линии токового импульса.

Данные измерений для промежутка с зазором 8 mm при вариации уровня запуска осциллографа представлены на рис. 2, *a*. Уровень запуска (горизонтальная шкала) пересчитан [9] в напряжение на фронте ускоряющего импульса (на рисунке рис. 2 показан модуль этой величины), доставляемого на кромку катода с учетом режима холостого хода и трансформации волны напряжения в неоднородном коаксиальном тракте между емкостным делителем и катодом. Представлены значения полного разброса (δt) измеряемого интервала времени Δt и дисперсии

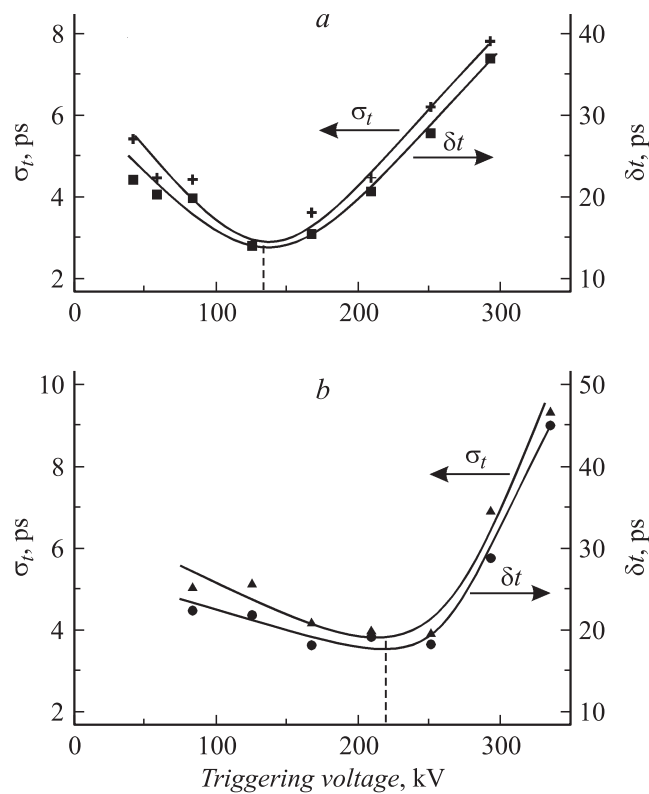


Рис. 2. Абсолютные значения дисперсии (σ_t) и полного разброса (δt) времени задержки между точкой варьируемого уровня запуска осциллографа на фронт ускоряющего напряжения (приведено значение по модулю и в пересчете на кромку катода) и фиксированным уровнем сигнала на фронте тока пучка убегающих электронов. Зазор катод–анод: 8 mm (a) и 20 mm (b).

этой величины (σ_t), усредненные для каждого значения напряжения по пяти пакетам из пятидесяти импульсов каждый. Достаточно большое количество включений в пакете потребовалось для минимизации влияния хаотической девиации измеряемого Δt из-за шумовой модуляции фронта ускоряющего импульса. Обе зависимости имеют выраженные минимумы при напряжении ~ 130 kV.

Если полученные на рис. 2, *a* минимумы соответствуют области напряжения (и временному интервалу) инжекции УЭ, то при неизменной геометрии катодной кромки с увеличением зазора до анода их положение должно смещаться в область более высоких напряжений по фронту импульса. Это обеспечит прежний уровень электрических полей на эмиссионной поверхности¹. Действительно, при увеличенном зазоре катод–анод (с 8 до 20 мм) минимум смещается до ~ 220 кV (рис. 2, *b*), хотя со стороны малых напряжений спад выражен менее отчетливо. Наиболее простое объяснение данному факту может быть связано с тем, что начальный участок субнаносекундного фронта ускоряющего импульса более стабилен. Это неоднократно демонстрировалось при формировании устойчивых по форме пиков напряжения уменьшенной амплитуды и длительности с помощью срезающих разрядников [13]. В другом варианте следует принять во внимание более продолжительное развитие ионизации слоя газа в прикатодной области за время воздействия низковольтного (10–20 кV) предимпульса напряжения [1] и на начальном участке фронта. Так как процесс „накачки“ эмиттера идет дольше, то это может сделать эмиссионную кромку более однородной и стабилизировать регистрируемый разброс со стороны малых напряжений. Напротив, быстрый рост нестабильности регистрации с увеличением напряжения от полученных минимумов может свидетельствовать о том, что здесь происходит уже не инжекция УЭ, а реализуется процесс выключения эмиссии пучка УЭ.

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 08-02-00183; 10-08-00081.

Список литературы

- [1] Месяц Г.А., Коровин С.Д., Шарыпов К.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 1. С.35–44.
- [2] Месяц Г.А., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 4. С. 71–80.

¹ Вопрос, что из себя представляет эмиссионная поверхность — торец катода с микрорельефом или границу плазменного слоя, — заслуживает отдельного рассмотрения, включая специальные методы моделирования [15].

- [3] *Mesyats G.A., Yalandin M.I., Sharyпов K.A.* et al. // IEEE Trans. on Plasma Science. 2008. V. 36. N 5. P. 2497–2504.
- [4] *Королев Ю.Д., Месяц Г.А.* Физика импульсного пробоя газов. М.: Наука, 1991. 224 с.
- [5] *Бабич Л.П., Лойко Т.В., Цукерман В.А.* // УФН. 1990. Т. 160. С. 49–82.
- [6] *Yalandin M.I., Lyubutin S.K., Oulmascoulov M.R.* et al. // IEEE Trans. on Plasma Science. 2002. V. 30. N 5. P. 1700–1704.
- [7] *Бакут Е.Х., Балзовский Е.В., Климов А.И.* и др. // ПТЭ. 2007. В. 6. С. 100–103.
- [8] *Mesyats G.A., Yalandin M.I.* // IEEE Trans. on Plasma Science. 2009. V. 37. N 6. P. 785–789.
- [9] *Tarakanov V.P.* User's Manual for Code KARAT. Springfield: Berkeley Research Associates, Inc., 1992.
- [10] *Yalandin M.I., Reutova A.G., Sharyпов K.A.* et al. // Digest of Techn. Papers of the 17-th IEEE Int. Pulsed Power Conf. Washington D.C., 2009. P. 971–974.
- [11] *Месяц Г.А.* // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 85. В. 2. С. 119–122.
- [12] *Яландин М.И., Реутова А.Г., Ульмаскулов М.Р.* и др. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 17. С. 41–49.
- [13] *Яландин М.И., Шпак В.Г.* // ПТЭ. 2001. В. 3. С. 5–31.
- [14] *Shunailov S.A., Reutova A.G., Shpak V.G., Yalandin M.I.* // Proc. of 15th Int. Sym. in High Current Electronics. Tomsk, 2008. P. 115–118.
- [15] *Беломытцев С.Я., Романченко И.В., Рыжов В.В., Шкляев В.А.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 9. С. 10–16.