

10;11

Об ограничении длительности пучка убегающих электронов в воздушном зазоре с неоднородным полем

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

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 1 декабря 2010 г.

Анализируются альтернативные причины ограничения длительности инжекции пикосекундных пучков убегающих электронов в атмосферном электродном промежутке. Экспериментальные данные о характеристиках таких пучков получены в условиях, когда варьировались эмиссионные свойства катода, время воздействия предимпульса напряжения и величина электрического поля в зоне инжекции электронов. На основании полученных данных высказано и обосновано предположение о том, что механизм ограничения длительности, обусловленный переходом автоэлектронной эмиссии с катода в микровзрыв неоднородностей, менее вероятен, чем ограничение тока, вызванное появлением над точечными эмиттерами экранирующего плазменного облака.

В работах [1,2] предложена интерпретация ряда экспериментов [3–5] по генерации пикосекундных пучков убегающих электронов (УЭ) в атмосферных промежутках с неоднородным электрическим полем. Основой наблюдаемых эффектов предполагалась автоэлектронная эмиссия (АЭЭ), инициирующая инжекцию УЭ [6] из прикатодной области. При этом были рассмотрены два механизма ограничения длительности пучка УЭ.

В первом случае считалось, что длительность пучка УЭ — это время от начала АЭЭ с катодных микровыступов до их взрыва [7]. Такой механизм (назовем его эмиссионным) предполагал, что УЭ — это в основном автоэмиссионные электроны с катода [6]. В частности, согласно времяпролетным измерениям энергии УЭ [4], расчетное элек-

трическое поле на кромке трубчатого катода толщиной 0.1 mm в период инжекции УЭ могло достигать 1.5 MV/cm и не менялось даже при пятикратной вариации зазора катод-анод. Усиливаясь на микровыступах, поле такой величины вполне достаточно для перехода АЭЭ в режим взрывной электронной эмиссии (ВЭЭ) за время ~ 50 ps [2], сравнимое с регистрируемой длительностью пучка УЭ.

Второй механизм (ионизационный) учитывал, что с появлением автоэмиссионных электронов начинается ударная ионизация газа. Малоподвижные положительные ионы вначале увеличивают электрическое поле на катоде, тем самым усиливая ток АЭЭ. Однако как раз над поверхностью точечных эмиттеров образуется проводящее облако плазмы. В результате происходит экранировка микровыступов и снятие с них электрического поля. Экспоненциальная зависимость тока АЭЭ от поля и его безынерционность делают такой процесс вполне вероятным. Близкий сценарий прекращения эмиссии УЭ был проанализирован ранее применительно к параметрам экспериментов [3,4] в численной модели [8].

Таким образом, в обоих случаях основой эффекта ограничения длительности считалась АЭЭ с микровыступов. Различие состояло лишь в механизме образования облака экранирующей плазмы. В первом варианте оно образуется за счет взрыва микроостий, аналогично тому как это происходит в вакуумном разряде, а во втором — за счет совместного действия автоэмиссионных и ионизационных процессов. Экспериментально доказать приоритет ионизационного механизма в газе, полностью исключив вероятность микровзрывов на катоде, весьма сложно. Однако существуют факторы, которые известным образом влияют на развитие ВЭЭ, и это позволяет более детально рассмотреть реальность механизма, альтернативного эмиссионному.

Рассмотрим расчетное распределение поля в зазоре с трубчатым катодом и плоским анодом (рис. 1, *a*) [9]. Из оценок напряжения инжекции УЭ ранее использованными методами [10] следует, что к моменту обрыва тока пучка поле на кромке катода (рис. 1, *b*) уже значительно превышает пороговую величину ~ 500 kV/cm классического критерия убегания низкоэнергетических электронов в воздухе [11]. При этом важно, что ток пучка УЭ относительно невелик, и его пространственный заряд не исказит распределение поля во всем зазоре, в отличие от случая вакуумной инжекции (см., например, [12]). Поэтому условия для перехода электронов в режим непрерывного ускорения выполняются

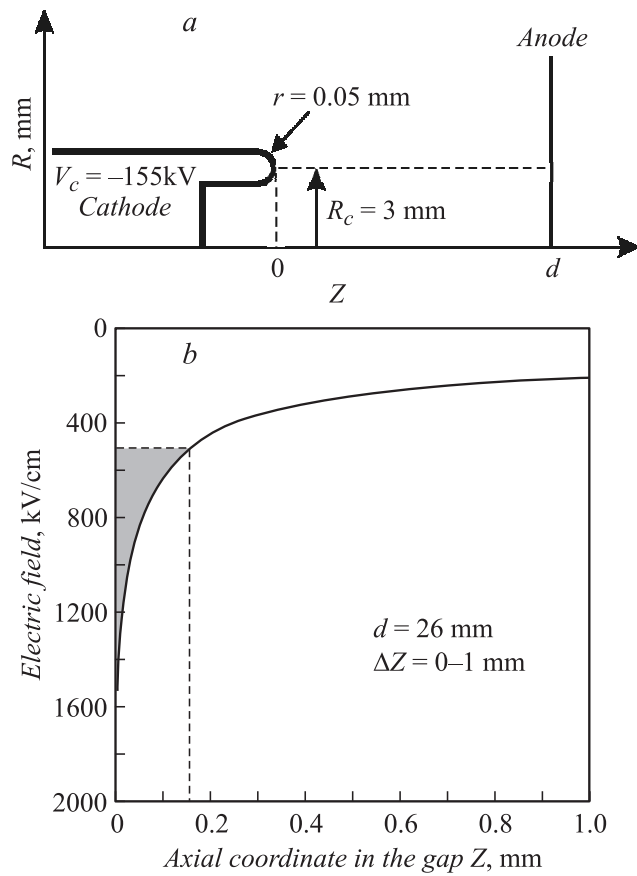


Рис. 1. Геометрия электродного промежутка с трубчатым катодом и плоским анодом (а) и резко неоднородным распределением электрического поля (б). Расчетное распределение поля показано на участке $0-1 \text{ mm}$ от кромки катода по направлению к аноду. Заштрихована область, где выполняется критерий убегания электронов с нулевой начальной энергией для азота атмосферного давления.

не только для автоэмиссионных частиц, находящихся вблизи микро-выступов на катоде, но и в прикатодной области ионизованного газа. Заметим, что процесс ионизации может начаться еще на предимпульсе

напряжения.¹ С последующим ростом интенсивности ударной ионизации на нарастающем субнаносекундном фронте проводимость плазмы быстро увеличивается и поэтому поле в этой зоне падает [8]. Однако критерий убегания все равно будет выполняться, по крайней мере для вторичных газовых электронов на границе ионизованной области. Таким образом, в момент выключения пучка УЭ граница зоны убегания отстоит от катода на некотором расстоянии. В частности, на рис. 1, *b*, как и в численной модели [8], величина его составляет доли миллиметра. С другой стороны, разлетающаяся взрывоэмиссионная плазма за характерное время инжекции пучка УЭ ~ 50 ps может заметно изменить поле лишь вблизи микроэммитеров, разогретых автоэмиссионным током до взрыва. Действительно, при известной скорости адиабатического разлета границы плазмы $2 \cdot 10^6$ cm/s [13] величина ее разлета составляет всего лишь $\sim 1 \mu\text{m}$. Поэтому взрывоэмиссионный факел за такое короткое время не приводит к заметному изменению электрического поля и не влияет на условия убегания электронов на внешней границе ионизованной области газа. Если опережающие микровзрывы на катоде и возможны, то их плазма станет лишь дополнительным и более интенсивным источником первичных электронов наравне с автоэмиссионными. Приведем ряд экспериментальных фактов, свидетельствующих не в пользу эмиссионного механизма ограничения длительности пучка УЭ.

Представляют интерес результаты экспериментов, где сравнивалась эмиссия УЭ в газе с вакуумным током. Известно [13], что момент инжекции взрывоэмиссионного пучка в вакууме зависит от состояния микрорельефа катода и от величины электрического поля. На осциллограмме (рис. 2, *a*) представлены экспериментальные результаты, полученные при малой длительности ускоряющего импульса и показывающие, что амплитуда вакуумного тока с катода в несколько раз меньше, чем ток УЭ в воздухе, а задержка его инжекции больше, чем вся длительность импульса тока УЭ на полувысоте. Снижение электрического поля за счет увеличения толщины кромки катода с 0.1 до 0.5 mm привело к тому, что вакуумный ток вообще не регистрировался рис. 2, *b*, т. е. задержка взрывной эмиссии в вакууме в этих условиях изначально превышает длительность ускоряющего импульса, в то время как пучок УЭ в воздухе регистрируется уверенно. Важно, что в вакууме в момент,

¹ Уже при амплитуде предимпульса — (10–15) kV макроскопическое электрическое поле на кромке катода достигает 10^5 V/cm и существенно усиливается на микронеоднородностях. Таким образом, АЭЭ становится вполне возможной.

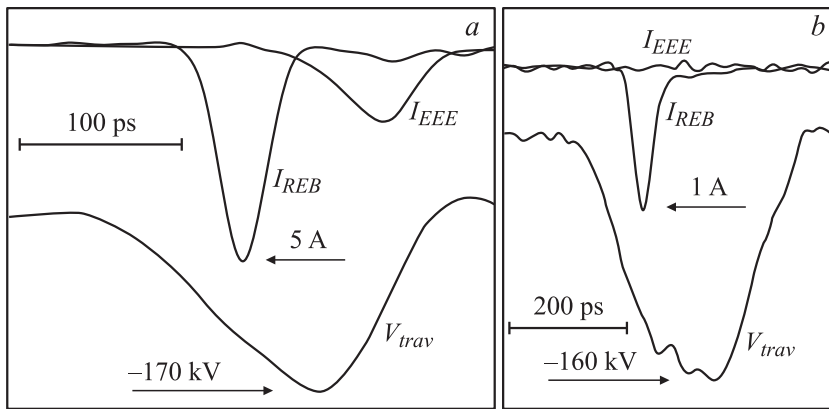


Рис. 2. Демонстрация задержки (а) или подавления (б) вакуумного тока ВЭЭ с катода (I_{EEE}) в сравнении с током пучка УЭ в воздухе (I_{REB}). Сигнал импульса ускоряющего напряжения (V_{trav}) с емкостного делителя показан в режиме бегущей волны. Использовался трубчатый стальной катод с толщиной кромки 0.1 mm (а) и 0.5 mm (б). Режимы записи осциллограмм: усреднение по десяти импульсам (а) и однократный (б). Сигналы I_{REB} и I_{EEE} имеют абсолютную привязку по времени. Привязка токовых импульсов к импульсу напряжения — произвольная.

когда в воздухе наблюдались убегающие электроны, отсутствовал не только сильноточный пучок, но и автоэмиссионный ток, несмотря на неизменную чувствительность регистрации. Это позволяет утверждать, что в одинаковых условиях ток автоэмиссионных электронов в вакууме значительно меньше, чем ток УЭ в газе.

Существуют экспериментальные данные, показывающие связь времяамплитудных характеристик пучков УЭ с эмиссионными свойствами катода. Во-первых, это время инициирования центров АЭЭ. Ранее мы обратили внимание на рост тока УЭ с катода при увеличении длительности низковольтного наносекундного предимпульса, предшествующего субнаносекундному фронту, где инжектируется и ускоряется пучок [3]. Для взрывоэмиссионного пучка в вакууме [14] есть простое объяснение аналогичного эффекта: на предимпульсе увеличенной длительности инициируется больше автоэмиссионных центров, поскольку процесс начинается раньше. По-видимому, ситуация аналогична и в газовом

Вариация амплитуды тока и задержки пучка УЭ с изменением длительности предымпульса напряжения на стальном катоде

Длительность предымпульса, ns	Ток пучка УЭ, а.у.	Задержка напряжение–ток, ps
2.4	3.77	84
2.1	3.69	82
1.9	3.36	86
1.7	2.71	82
1.5	1.85	85
1.1	1.44	82

диоде, где зоны эмиссии УЭ также дискретны и привязаны к областям микроэмиттеров (см., например, [15] и цитированное там). Другое дело, что при значительных вариациях длительности наносекундного предымпульса с точностью в единицы пикосекунд не меняются ни регистрируемая длительность пучка УЭ, ни момент (т.е. напряжение) его инжекции на ускоряющем субнаносекундном фронте (см. таблицу). Здесь момент инжекции отражен как задержка фронта тока пучка УЭ относительно некоторого фиксированного уровня на фронте ускоряющего импульса. При этом важно не абсолютное значение величины задержки, поскольку уровни установлены произвольно, а ее вариации. Консервативность этого параметра сложно объяснить эмиссионным механизмом обрыва тока УЭ, учитывая классическую связь $j_{fe}^2 \tau_d = \text{const}$ [13] между плотностью тока АЭЭ (j_{fe}) и задержкой (τ_d) до взрыва микроострия.

Во-вторых, не укладываются в рамки эмиссионного механизма ограничения результаты экспериментов, где эмиссионные характеристики катодов были различны изначально. Отмечено [16], что пучки УЭ с нетренированных катодов идентичной геометрии из графитов различной дисперсности, меди и стали стартуют с разницей лишь в единицы пикосекунд, т.е. практически одновременно, и не отличаются по длительности с точностью регистрации. Похожая картина имеет место и для воздушного промежутка с неизменным ускоряющим зазором, но при увеличении толщины кромки трубчатого катода. Следовательно, положение зоны эмиссии УЭ в упомянутых случаях одинаково. Такое возможно, только если эмиссионная граница образована не кромкой

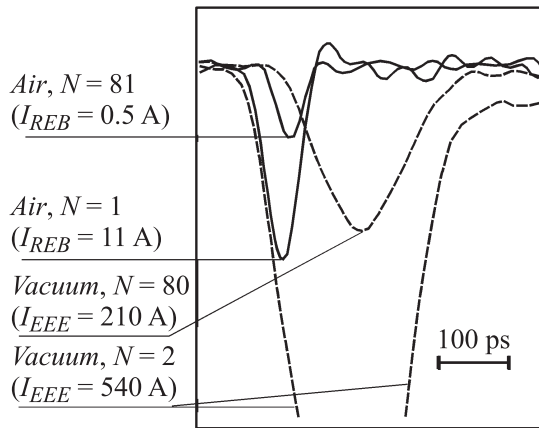


Рис. 3. Изменение задержки инжекции и амплитуды тока пучка УЭ в воздухе I_{REB} (импульсы под номерами $N = 1$ и $N = 81$) до и после промежуточной тренировки стального катода импульсами вакуумного тока (I_{EEE}) при количестве включений $N = (2-80)$.

катода, а ионизованным слоем газа. Это предположение не противоречит тому факту, что момент инжекции УЭ удается сдвинуть по фронту ускоряющего импульса [4,5,10] при неизменной конфигурации кромки катода регулировкой зазора анод-катод.

Наконец, третий момент связан с изменением эмиссионных свойств макроскопического катода после вакуумной тренировки [17,18]. Существуют способы получить абсолютную временную привязку вакуумного тока и тока УЭ в газе, даже при различии амплитуд сигналов с токового датчика до трех порядков [4,5,16]. Было показано, что вакуумная тренировка стального катода при десятках включений ($N = 80$) приводит к уменьшению тока УЭ в ~ 20 раз и росту задержки его инжекции на 20–30 ps (рис. 3). При полностью аналогичном режиме полировки [19] вакуумный ток запаздывал гораздо сильнее (40–60 ps). Близкую картину мы наблюдали и для графитового катода, но при большем количестве ($N = 10^3$) полирующих „вакуумных“ импульсов. Важно отметить, что вакуумная тренировка довольно незначительно повлияла на задержку пучка УЭ (< 5 ps), в то время как запаздывание ВЭЭ превысило длительность импульса тока УЭ.

Последние факты говорят о том, что изменение коэффициента усиления поля на микроскопических эмиттерах существенно влияет на характеристики пучка УЭ. В этом аспекте имело бы смысл детально отследить динамику изменений тока и момента инжекции УЭ при более плавной вариации свойств эмиссионной поверхности. Однако режим, когда чередуются циклы полировки и измерений тока УЭ в газе, оказался неприменимым. Дело в том, что после вакуумной тренировки даже единичный импульс пучка УЭ, сопровождаемый разрядом в газе с килоамперным током [20], неконтролируемым образом регенерирует микрорельеф катода. В результате вновь резко возрастает вакуумный ток и уменьшается его задержка [21], т.е. происходит „деполировка“ поверхности катода. Также выяснилось, что деполировка может проявляться в случае подачи на катод большого количества коротких импульсов напряжения только в вакууме. Дело в том, что при увеличении задержки и снижении тока ВЭЭ сопротивление разрядного промежутка нарастает. В этом случае из-за рассогласования нагрузки с высоковольтным генератором растет амплитуда серии отраженных импульсов напряжения, поступающих на катод с наносекундным запаздыванием. В экспериментах мы отмечали, что ток ВЭЭ на этих запаздывающих импульсах может превышать тот, что достигался на основном импульсе при нетренированном катоде. Поэтому в эксперименте, результат которого показан на рис. 3, количество тренировочных вакуумных импульсов было ограничено так, чтобы суммарный заряд пучков, инжектированных на последовательности ускоряющих импульсов, не превышал исходного значения для нетренированного катода.

Представленные экспериментальные данные были получены с предельно доступным разрешением по времени. На данный момент факты свидетельствуют о том, что пучок УЭ представлен в основном вторичными электронами из прикатодной области ионизованного газа. Автоэлектронная эмиссия инициирует процесс ионизации, поставляя начальные частицы. Механизм ограничения длительности токового импульса УЭ не определяется развитием ВЭЭ на катоде. Тем не менее влияния на параметры пучка УЭ перехода АЭЭ в ВЭЭ в газовой среде полностью исключить нельзя, не ответив на вопрос, достаточно ли ионное облако усиливает поле над автоэлектронным эмиттером для последующего развития ВЭЭ на катоде в газе в тот промежуток времени, когда в вакууме микровзрывов еще нет? Задача в такой постановке с разрешением в десятки пикосекунд пока не решалась.

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 и 11-08-00145.

Список литературы

- [1] Месяц Г.А., Яландин М.И. // ДАН. 2009. Т. 424. В. 6. С. 755–759.
- [2] Mesyats G.A., Yalandin M.I. // IEEE Trans. on Plasma Science. 2009. V. 37. N 6. P. 785–789.
- [3] Месяц Г.А., Коровин С.Д., Шарыпов К.А., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 1. С. 35–44.
- [4] Месяц Г.А., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 4. С. 71–80.
- [5] Mesyats G.A., Yalandin M.I., Sharyпов K.A., Shpak V.G., Shunailov S.A. // IEEE Trans. on Plasma Science. 2008. V. 36. N 5. P. 2497–2504.
- [6] Месяц Г.А. // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 85. В. 2. С. 119–122.
- [7] Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Атоэмиссионные и взрывные процессы в газовом разряде. Новосибирск: Наука, 1982. 256 с.
- [8] Беломытцев С.Я., Романченко И.В., Рыжов В.В., Шкляев В.А. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 9. С. 10–16.
- [9] Тиунов М.А., Фомель Б.М., Яковлев В.П. SAM-интерактивная программа для расчета электронных пушек на мини-ЭВМ. Препринт № 89-159. Новосибирск: ИЯФ СО АН СССР, 1989. 66 с.
- [10] Яландин М.И., Реутова А.Г., Шарыпов К.А., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Месяц Г.А. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 18. С. 1–9.
- [11] Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Физика импульсного пробоя газов. М.: Наука, 1991. 224 с.
- [12] Федосов А.И., Литвинов Е.А., Беломытцев С.Я., Бугаев С.П. // Изв. вузов. Физика. 1977. В. 10. С. 134–135.
- [13] Mesyats G.A. Explosive electron emission. Ekaterinburg: URO-Press, 1998. 248 p.
- [14] Shpak V.G., Shunailov S.A., Sokovnin S.U., Oulmascoulov M.R., Yalandin M.I., Phelps A.D.R., Cross A.W., Ronald K., He W. // Proc. of 11th IEEE Int. Pulsed Power Conf. V. 2. Baltimore, 1997. P. 1586–1591.
- [15] Бабич Л.П., Лойко Т.В., Цукерман В.А. // УФН. 1990. Т. 160. В. 7. С. 49–82.
- [16] Mesyats G.A., Shunaylov S.A., Sharyпов K.A., Shpak V.G., Yalandin M.I. // Proc. of 17th Int. Conf. on High-Power Particle Beams. Xi'an. 2008. P. 173.

- [17] Гунин А.В., Ландль В.Ф., Коровин С.Д., Месяц Г.А., Ростов В.В. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 22. С. 84–94.
- [18] Коровин С.Д., Литвинов Е.А., Месяц Г.А., Мурзакаев А.М., Ростов В.В., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 19. С. 30–39.
- [19] Месяц Г.А., Проскуровский Д.И., Янкевич Е.Б., Трегубов В.Ф. // ДАН. 1976. Т. 227. № 6. С. 1335–1337.
- [20] Sharypov K.A., Shpak V.G., Shunailov S.A., Yalandin M.I. // Proc. of 15th Int. Sym. on High Current Electronics. Tomsk: HCEI SB RAS, 2008. P. 360.
- [21] Reutova A.G., Mesyats G.A., Sharypov K.A., Shpak V.G., Shunailov S.A., Yalandin M.I. // Proc. of 16th Int. Sym. on High Current Electronics. Tomsk: HCEI SB RAS, 2010. P. 102.