

11;12

## Поведение предпробойных эмиссионных центров при воздействии на вакуумный промежуток 200-kV 100-ns импульсов

© Е.В. Нефедцев, С.А. Онищенко, Д.И. Проскуровский, А.В. Батраков

Институт сильноточной электроники СО РАН,  
634055, Томск, Россия  
e-mail: nev@lve.hcei.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 13 декабря 2011 г.)

С использованием прозрачного для электронов анода (титановая фольга) исследовано поведение предпробойных эмиссионных центров на катоде из нержавеющей стали 12Х18Н10Т при воздействии на вакуумный промежуток импульсов напряжения амплитудой 200 kV и длительностью 100 ns. Для достижения рабочих электрических полей 1 MV/cm и более электроды предварительно обрабатывались низкоэнергетическим сильноточным электронным пучком в режиме поверхностного плавления. Обнаружено существование предпробойных эмиссионных центров двух типов — стабильных и нестабильных. Стабильные эмиссионные центры возникают при напряженности поля 0.4–0.6 MV/cm и ведут себя с повышающейся активностью с ростом напряжения вплоть до пробоя. По мере увеличения рабочих электрических полей наблюдается возникновение новых, нестабильных эмиссионных центров в местах, не соответствующих местам локализации эмиссионных центров, наблюдавшихся при предшествующем импульсе напряжения. Обсуждены возможные причины появления нестабильных эмиссионных центров.

### Введение

Исследования вакуумного пробоя между электродами большой площади в наносекундном диапазоне длительностей импульсов, направленные на увеличение рабочих электрических полей, важны для снижения габаритов и повышения надежности работы мощных высоковольтных вакуумных устройств [1–4]. Для понимания процессов, ограничивающих увеличение рабочих электрических полей в этом диапазоне длительностей импульсов, необходимо исследовать закономерности появления и функционирования предпробойных эмиссионных центров, а также провести наблюдение корреляции местоположения этих центров и мест инициирования пробоя.

Из литературы известно несколько методов визуализации расположения предпробойных эмиссионных центров на катоде. Существенным недостатком метода, основанного на использовании люминесцентного покрытия на аноде [5,6], является то, что такой анод сам становится источником интенсивного загрязнения катода. Используемая в [7] система визуализации, основанная на регистрации переходного излучения, возникающего при бомбардировке анода в виде стеклянной подложки, покрытой полупроводниковой пленкой оксида цинка, имеет те же принципиальные недостатки. Автор [8] регистрировал переходное излучение, возникающее при бомбардировке металлического анода предпробойными токами с коэффициентом усиления яркости этого излучения  $\sim 10^6$ . Поскольку переходное излучение анода как источник света обладает чрезвычайно низкой интенсивностью, этот метод непригоден для регистрации поведения эмиссионных центров при использовании наносекундных импульсов напряжения. Лазам [9] предложил использовать для наблюдения предпробойных эмиссионных центров свечение сцинтиллятора, возбуждаемого рентгеновским излучением в металлическом аноде,

толщина которого достаточна для поглощения ускоренных в вакуумном промежутке электронов. Однако интенсивность генерируемого при этом рентгеновского излучения также невелика в силу низкой эффективности преобразования энергии электронов в рентгеновское излучение, что также ограничивает возможности регистрации поведения эмиссионных центров при воздействии коротких импульсов.

Ситуация может кардинально улучшиться, если эксперименты проводить при напряжениях, при которых электроны проникают через фольговый анод и непосредственно воздействуют на сцинтиллятор. Действительно, доля энергии ускоренных электронов, конвертируемая в световую энергию, в сцинтилляторах кристаллического типа составляет 6–10% [10], т.е. намного превышает этот показатель при конвертировании энергии электронного пучка в энергию переходного или рентгеновского излучения. Время высвечивания сцинтилляторов составляет десятки–сотни наносекунд, что позволяет использовать их в экспериментах с импульсами высокого напряжения наносекундного диапазона длительностей.

В настоящей работе представлены результаты наблюдения поведения предпробойных эмиссионных центров в условиях высоких электрических полей (0.5–1.4 MV/cm), создаваемых между планарными металлическими электродами (массивный катод–фольговый анод) при приложении к ним импульсов напряжения 200 kV,  $100 \pm 50$  ns. Для повышения рабочих электрических полей поверхность электродов предварительно сглаживалась и очищалась посредством обработки импульсным низкоэнергетическим сильноточным электронным пучком (НСЭП). Определен диапазон электрических полей, при которых становятся видимыми первые эмиссионные центры на катоде. Проведены исследования корреляции мест расположения эмисси-

онных центров и мест инициирования пробоя. Установлено, что при напряженности электрического поля более  $\sim 0.55 \text{ MV/cm}$  возникают эмиссионные центры, которые ведут себя нестабильно. При напряженности поля свыше  $\sim 1 \text{ MV/cm}$  эмиссионная картина становится сильно изменяющейся от импульса к импульсу. Приводятся качественные соображения о возможной природе возникновения нестабильных эмиссионных центров.

## 1. Аппаратура и методика исследований

На рис. 1 показана схема экспериментального стенда. Катод *1* представлял собой диск из стали 12Х18Н10Т диаметром 30 мм и толщиной 12 мм, скругленный по периметру так, что диаметр плоской части катода составлял 18 мм. Анод *2* представлял собой титановую фольгу толщиной 50 мкм, натянутую и зафиксированную в специальной оправке. Диаметр фольги составлял 56 мм, т.е. значительно превышал диаметр плоской части катода. Расчет напряженности электрического поля показал, что при длине межэлектродного промежутка  $d = 2 \text{ mm}$  в точке перехода плоскости в радиус скругления катода превышение напряженности поля над напряженностью в центре вакуумного промежутка составляет около 9%.

Электродная система размещалась в цилиндрической вакуумной камере *3* с внутренним диаметром 160 мм,

изготовленной из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Катод был закреплен неподвижно, тогда как анод мог перемещаться относительно катода при помощи сифонного драйвера *4*. Регулировка длины межэлектродного промежутка и параллельности электродов осуществлялась тремя микрометрическими винтами.

Импульсы высокого напряжения отрицательной полярности поступали на катод от генератора *5*, собранного по схеме Маркса, через ограничительный резистор сопротивлением 250 Ом. В генератор был встроены срезной разрядник, формирующий задний фронт импульса и обеспечивающий регулировку длительности импульса в пределах 50–150 нс. Для ввода импульса высокого напряжения в вакуумную камеру использовался керамический изолятор *6*. Амплитуда импульса напряжения, вырабатываемого генератором, была неизменной и составляла 200 кВ. Регулировка напряженности электрического поля посредством регулировки зазора при постоянном напряжении обеспечивала постоянство коэффициента прозрачности фольги для электронов.

Наш опыт показал, что для обеспечения термомеханической и эрозионной устойчивости анодной фольги при обработке НСЭП и пробоях ее толщина должна быть не менее 50 мкм. При энергии электронов 200 кВ доля электронов, прошедших фольгу толщиной 50 мкм из нержавеющей стали, составляет менее 10% [11]. В случае же фольги из титана это значение составляет не менее 40%. Поэтому в качестве материала фольги в наших экспериментах использовался титан.

Электроны, ускоренные в вакуумном промежутке и прошедшие сквозь фольгу, бомбардировали поверхность сцинтиллятора *7* (кристалл NaI:Тl), расположенного непосредственно за фольгой. Оценки диаметра светового пятна, возбуждаемого в сцинтиляторе, с учетом расходимости электронного пучка, эмитируемого одиночным эмиссионным центром и его углового рассеяния в фольге, дают значение 0.5–0.7 мм. В искровой стадии пробоя, когда эмиссия электронов происходит из расширяющейся катодной плазмы, диаметр электронного пучка на аноде  $\sim 2d$  [1], и в нашем случае должен составлять 3–5 мм. При этом в силу большого тока электронного пучка в искровой стадии пробоя, интенсивность свечения сцинтиллятора оказывается несравненно выше по отношению к ситуации в предпробойной стадии.

Световые вспышки сцинтиллятора *7* через окно *8* с помощью зеркала *9* передавались на вход 4-канальной камеры HSFC-рго *10*. После преобразования изображения вспышек в цифровой код информация передавалась на компьютер *11*. Для регистрации свечения предпробойных эмиссионных центров использовались два канала камеры с максимальным усилением яркости изображения. Длительность экспозиции микроканальных пластин этих двух каналов составляла 500 нс, что соответствовало времени высвечивания сцинтиллятора. Использование параллельной работы двух каналов позволяло выделить свечение слабоинтенсивных эмиссионных центров (их изображения повторяются на обоих

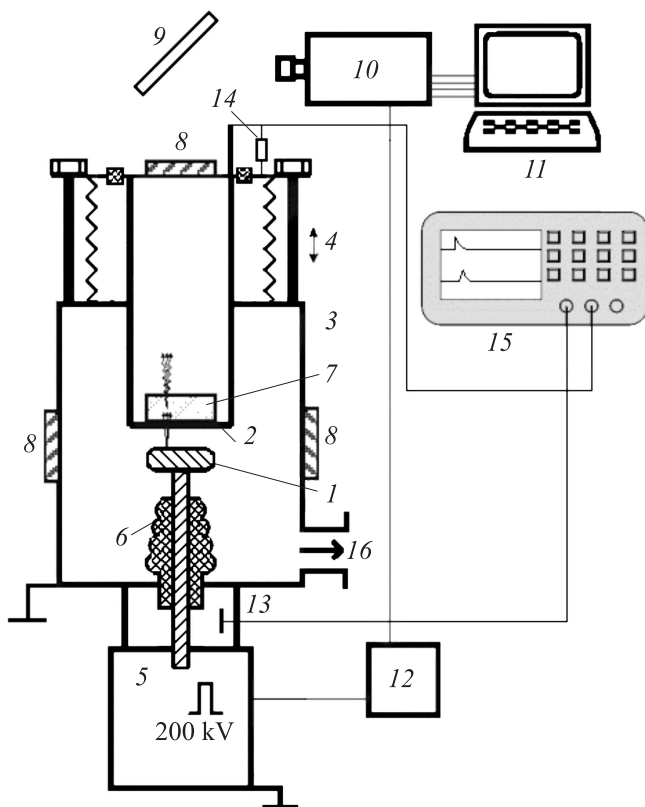


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

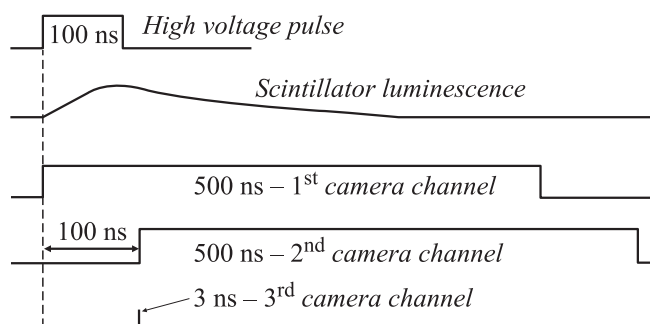


Рис. 2. Временная последовательность экспозиции каналов камеры.

каналах) на фоне шумовых светящихся точек (их изображения не совпадают, поскольку возникают случайным образом). Для регистрации свечения, возбуждаемого в искровой стадии пробоя, микроканальная пластина третьего канала работала в режиме, обеспечивающем минимальное усиление яркости и минимальное время экспозиции (3 ns). Временная последовательность включения каналов представлена на рис. 2.

Синхронизацию работы генератора импульсов напряжения и камеры обеспечивал блок запуска 12. Частота подачи импульсов на вакуумный промежуток при проведении испытаний составляла в среднем 1 pulse/min.

Параллельно с получением изображений регистрировались осциллограммы импульсов напряжения на вакуумном промежутке и тока пробоя. С этой целью сигналы, вырабатываемые емкостным делителем напряжения 13 и малоиндуктивным резистивным шунтом 14, поступали на вход осциллографа Tektronix TDS-220 15.

Катод перед каждой серией экспериментов проходил несколько этапов обработки. Вначале производилось механическое удаление поверхностного слоя толщиной 0.2 mm, после чего следовали кратковременная электрохимическая обработка в ортофосфорной кислоте и ультразвуковая промывка в чистой воде. Затем проводилась обработка поверхности катода НСЭП (5–8 J/cm<sup>2</sup>, 3 μs, 100 импульсов). В процессе воздействия импульсного электронного пучка происходит расплавление и частичное испарение поверхностного слоя материала электрода, при этом испаряется или растворяется значительная часть содержащихся в нем инородных включений. В процессе последующего быстрого застывания расплавленного слоя формируется довольно однородная мелкокристаллическая структура, происходит сглаживание обработанной поверхности [12–14]. Как показано ранее [13], такая обработка электродов из нержавеющей стали 316L площадью 50–110 cm<sup>2</sup> позволяла достичь напряженности электрические поля первого пробоя ~ 1 MV/cm и выше при работе с импульсами напряжения 150–260 kV, 50–160 ns. Подобная же обработка стали 12X18H10T дает менее стабильное повышение напряженности электрические поля первого пробоя. Это связано с наличием в такой стали существенно большего количества инородных включений, чем в стали 316L, от влияния которых

полностью не удается избавиться. Тем не менее тренировка пробоями обычно позволяет достичь пробивных электрических полей, сравнимых с достигаемыми при тренировке электродов из стали 316L.

В каждой серии экспериментов использовалась новая анодная фольга, которая обрабатывалась НСЭП в режиме плавления поверхностного слоя. Предварительно фольга растягивалась в оправке с целью обеспечения ее плоскостности.

Перед установкой в вакуумную камеру катод и анод протирали чистым ацетоном с помощью безворсовых салфеток.

Вакуумная камера через патрубок 16 соединена с системой откачки, состоящей из форвакуумного насоса, снабженного фильтром, и турбомолекулярного насоса. Давление остаточных газов в вакуумной камере не превышало  $2 \cdot 10^{-4}$  Pa.

Начальный межэлектродный промежуток устанавливался длиной 10 mm. Затем анод приближался к катоду с шагом, размер которого уменьшался по мере уменьшения длины промежутка. При длине промежутка  $d < 3$  mm шаг составлял 50 μm.

## 2. Результаты

Нами была исследована эволюция предпробойной эмиссионной картины при испытании 9 электродных пар. Последовательность испытаний каждой пары электродов была следующей. Вначале исследовалось поведение предпробойных эмиссионных центров по мере сближения электродов вплоть до первого пробоя. Результаты таких исследований обобщены как 1-я серия наблюдений. Затем анод отводился на исходное расстояние 10 mm, и процедура сближения электродов повторялась вплоть до второго пробоя. Результаты таких исследований тех же 9 пар обобщены как 2-я серия наблюдений. Сравнение второй серии наблюдений с первой давало дополнительную информацию о влиянии первого пробоя на изменение эмиссионной картины катода относительно исходной поверхности.

Если второй пробой оказывался не фатальным, эксперимент продолжался, однако при этом электроды не разводились и оставались в той же позиции. Если в результате кондиционирования пробой прекращались, то промежуток снова сокращался до возникновения пробоя, и процедура повторялась. Эта (3-я) серия наблюдений позволила получить представление об эволюции эмиссионной картины в ходе кондиционирования промежутка пробоями.

Отметим, что основные трудности в обнаружении предпробойных эмиссионных центров по свечению сцинтиллятора возникали на начальной стадии их появления вследствие низкой интенсивности свечения центров, сравнимой с уровнем шума. Выделить положения эмиссионных центров помогало сравнение изображений двух параллельно работающих каналов регистрации

Условие совпадения мест пробоя и одного из обнаруженных на предшествующем импульсе эмиссионных центров (+/-), их количество,  $N$  и соответствующие средние значения

Условие совпадения	$N$	$E_{el}$ , MV/cm	$E_{ebr}$ , MV/cm	$E_{br}$ , MV/cm
+	10	$0.45 \pm 0.12$	$0.51 \pm 0.18$	$0.72 \pm 0.12$
-	8	$0.72 \pm 0.22$	-	$0.88 \pm 0.18$

(см. разд. 1). По мере повышения напряженности поля в промежутке интенсивность свечения эмиссионных центров увеличивалась, и проблемы их выявления снижались. Заметим также, что нам не удалось избежать влияния краевого эффекта на локализацию мест предпочтительного появления предпробойных эмиссионных центров и мест пробоя. Однако в целом это не повлияло на возможность получения достоверной информации о поведении эмиссионных центров.

Как правило, эмиссионная активность исходной катодной поверхности проявляется в виде появления одного или двух эмиссионных центров. Возникновение пробоя приводило к появлению новых эмиссионных центров в непосредственной близости от места пробоя.

Для 1-й серии наблюдений появлению первого эмиссионного центра соответствовала напряженность электрического поля на катоде в среднем  $0.68 \pm 0.25$  MV/cm (здесь и далее указано среднеквадратичное отклонение по всей выборке). Для 2-й серии наблюдений напряженность электрического поля начала эмиссии составила  $0.45 \pm 0.12$  MV/cm. Из этих данных следует, что первый пробой приводит к формированию более активных эмиссионных центров по сравнению с эмиссионными центрами, существующими на исходной поверхности. Эти данные коррелируют с данными по пробивной напряженности электрического поля для первого и второго пробоев. Так, для первого пробоя эта напряженность составляет  $0.83 \pm 0.20$  MV/cm, тогда как для второго пробоя она несколько ниже —  $0.76 \pm 0.12$  MV/cm.

Все экспериментальные данные обеих серий измерений были проанализированы с точки зрения корреляции места появления предпробойного эмиссионного центра и места локализации последующего пробоя. Соответствующие данные представлены в таблице. Знак „+“ означает совпадение, а знак „-“ отсутствие совпадения локализации какого-либо из наблюдаемых эмиссионных центров и места последующего пробоя. Из анализа результатов наблюдений вытекают следующие заключения.

1. Почти в половине случаев место пробоя совпадало с местом локализации одного из эмиссионных центров, который вел себя наиболее активно в последних выстрелах перед пробоем. При этом оказывалось, что этот активный центр не обязательно был первым на стадии появления эмиссии с катода. Иногда оказывалось так, что эмиссионный центр, появившийся при существенно большей напряженности поля, чем напряженность поля появления первого центра, определял место инициирования пробоя на катоде.

2. Почти в половине случаев пробой происходил в месте, которое не проявляло эмиссионной активности при приложении предшествующего импульса напряжения. Дважды в экспериментах даже наблюдалась ситуация, когда пробой происходил при полном отсутствии какой-либо предпробойной активности. В таблице наряду с критерием совпадения места локализации эмиссионного центра и места пробоя представлены следующие значения:  $E_{el}$  — напряженность электрического поля, при которой обнаружен первый эмиссионный центр,  $E_{ebr}$  — напряженность электрического поля, при которой обнаружен эмиссионный центр, ответственный за пробой;  $E_{br}$  — напряженность электрического поля, при которой произошел пробой.

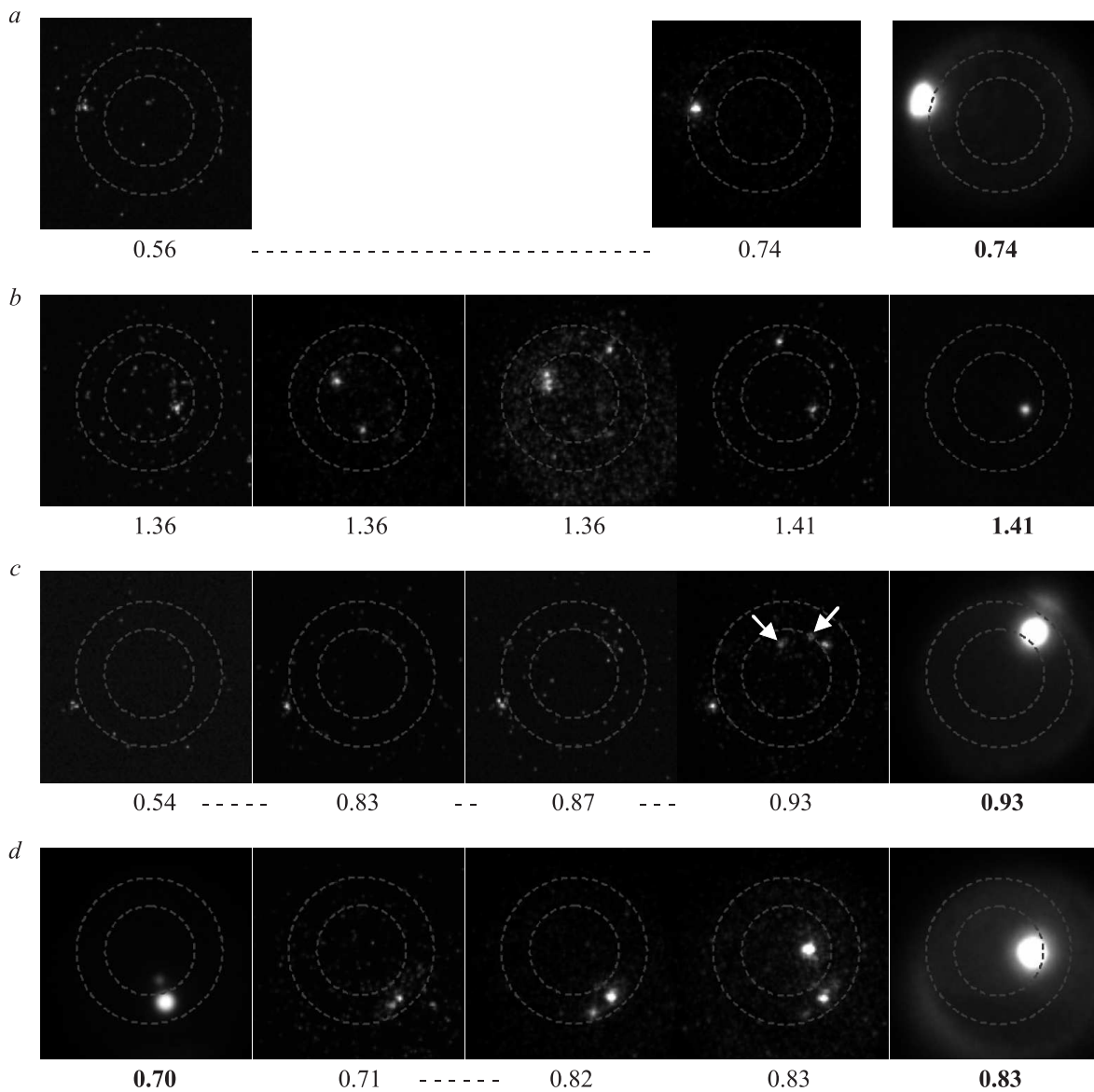
Данные таблицы свидетельствуют об определенной корреляции между критерием совпадения и величиной поля  $E_{el}$ . Анализ показывает, что напряженность поля  $0.55-0.6$  MV/cm можно рассматривать как граничную ( $E_c$ ), относительно которой все случаи, соответствующие критериям совпадения (несовпадения), могут быть разделены на две группы. А именно, если эмиссионный центр появлялся при  $E_{el} < E_c$ , то с большой вероятностью он и становился причиной пробоя. Поэтому величины  $E_{el}$  и  $E_{ebr}$  близки друг к другу в случае, когда критерий совпадения обозначен знаком „+“. Если же эмиссионные центры появлялись при  $E_{el} > E_c$ , то часто место локализации пробоя не совпадало с местом локализации ни одного из эмиссионных центров, наблюдавшихся во время предшествующего импульса, и критерий совпадения обозначен знаком „-“.

3. Эмиссионные центры могут быть разделены на две группы в отношении их стабильности. Однажды возникнув, стабильные эмиссионные центры сохраняют свою активность. Нестабильные эмиссионные центры могут возникать, менять интенсивность и спонтанно исчезать от выстрела к выстрелу даже при неизменной величине напряженности поля. В результате эмиссионная картина может меняться. Особенно сильные изменения эмиссионной картины возникают в случаях, когда напряженность электрического поля достигает  $\sim 1$  MV/cm и выше.

На рис. 3 показаны выборки из последовательностей кадров, связанных с различными образцами. Выбранные примеры характеризуют различные сочетания активности стабильных и нестабильных эмиссионных центров до первого пробоя.

На рис. 3,а показан наиболее простой сценарий развития пробойных явлений. В этом случае первый и единственный эмиссионный центр был выявлен на краевой части электрода при напряженности электрического поля  $0.56$  MV/cm. Как видно из рисунка, этот эмиссионный центр явился причиной пробоя при напряженности поля  $0.74$  MV/cm. При этом нестабильных центров не наблюдалось.

На рис. 3,б показан противоположный случай отсутствия стабильных эмиссионных центров и, как следствие, отсутствия всякой эмиссионной активности



**Рис. 3.** Эволюция эмиссионной активности на примере некоторых электродных пар до возникновения первого пробоя (*a, b, c*) и после возникновения пробоя (*d*): *a* — с участием только стабильных эмиссионных центров, *b* — с участием только нестабильных эмиссионных центров, *c* — с участием обоих типов эмиссионных центров. Числа соответствуют значению напряженности электрического поля (в MV/cm). Числа, отмеченные жирным шрифтом, соответствуют снимку пробоя. Количество прочерков соответствует количеству импульсов, не представленных на рисунке (в силу отсутствия существенных изменений в эмиссионной картине). Слабые эмиссионные центры отмечены стрелками. Периметр катода и периметр плоской части катода показаны пунктирными окружностями.

вплоть до напряженности поля 1.24 MV/cm, при которой появились первые нестабильные эмиссионные центры. Из множества кадров показаны последние кадры до возникновения первого пробоя. Как видно из рисунка, эмиссионная картина изменялась от импульса к импульсу даже при неизменной напряженности поля 1.36 MV/cm. Эмиссионная картина непосредственно перед пробоем зафиксирована при напряженности поля 1.41 MV/cm. Пробой произошел при повторном импульсе при той же напряженности поля. В данном случае место пробоя совпало с местом функционирования одного из двух

нестабильных эмиссионных центров, зафиксированных при воздействии предыдущего импульса (часто эти места не совпадают, см. выше).

На рис. 3, *c* в показан пример сосуществования стабильных и нестабильных эмиссионных центров. В данном случае первый стабильный центр появился на эмиссионной картине при 0.54 MV/cm. Аналогично случаю, показанному на рис. 3, *a*, этот единственный центр составлял общую эмиссионную картину на протяжении многих импульсов. Однако при 0.93 MV/cm внезапно появились нестабильные эмиссионные центры, и один из



них спровоцировал пробой при той же напряженности поля.

Рис. 3, *d* иллюстрирует пример влияния кондиционирующих пробоев на эмиссионную картину. Самый первый стабильный эмиссионный центр появился при  $0.67 \text{ MV/cm}$  (на рисунке не показан). На его месте произошел первый пробой при  $0.70 \text{ MV/cm}$  (1-й кадр слева). При этом вакуумный промежуток восстановил изолирующие свойства, и на месте пробоя начали действовать два центра. Один из них, стабильный, по положению совпадал с местом пробоя. Другой, проявляющий вначале себя как стабильный, при повышении амплитуды до  $0.82 \text{ MV/cm}$  немного изменил свое положение. Пробой произошел при  $0.83 \text{ MV/cm}$  на месте центра, зафиксированного на предшествующем кадре и появившегося вдали от действующих центров.

### 3. Обсуждение результатов

Согласно современным представлениям [1–7], на поверхности металлического катода большой площади основными источниками предпробойной электронной эмиссии являются локальные несовершенства поверхности, в основном в виде микроострий (микровыступов) и инородных (диэлектрических и/или полупроводниковых) микровключений. Как установлено в [15], после электронно-пучковой обработки электродов из стали 1218Н10Т обнаруженные на поверхности катода эмиссионные центры, как правило, „привязываются“ к остаткам инородных включений или к микропорам, возникающим в результате бурного испарения микропримесей при обработке НСЭП. Косвенные признаки также указывали на возможное влияние на предпробойную эмиссию сверхмелких слабосвязанных микрочастиц, возникающих в процессе электронно-пучковой обработки и часто оказывающихся в микропорах [15]. Что касается эмиссионных центров в виде микроострий, то в силу сглаженности исходной поверхности такие центры возникают после первого пробоя, когда микроострия формируются из жидкого металла, вытесняемого из области функционирования взрывоэмиссионных центров [1]. Как результат, происходят снижение и стабилизация напряженности электрического поля появления первого эмиссионного центра  $E_{el}$  и пробивной напряженности электрического поля  $E_{br}$ .

Итак, положим, что после электронно-пучковой обработки, а также после пробоев, на поверхности катода могут функционировать эмиссионные центры разной природы. При этом стабильная предпробойная эмиссия электронов при относительно невысоких электрических полях ( $E < E_c$ ) обеспечивается эмиссионными центрами в виде остатков инородных микровключений и микропор. В области электрических полей ( $E > E_c$ ) по мере роста их абсолютных значений все нагляднее выявляются эмиссионные центры, не имеющие стабильной привязки к локальным участкам поверхности катода при последовательных импульсах напряжения.

Это свидетельствует о том, что в таких условиях на появление эмиссионных центров на конкретных участках поверхности катода начинают оказывать сильное влияние процессы, проявляющие заметную активность только при высоких ( $\sim 1 \text{ MV/cm}$ ) электрических полях. Рассмотрим возможные причины нарушения стабильности появления эмиссионных центров различной природы на локальных участках поверхности катода в сильных электрических полях.

#### 3.1. Эмиссионные центры в виде диэлектрических (полупроводниковых) микровключений

Возможные механизмы эмиссии электронов из таких включений обобщены в [7]. Важно отметить, что при напряженности поля в тонких диэлектрических пленках, приближающейся к  $1 \text{ MV/cm}$ , становится значительной плотность тока „горячих“ электронов, фактически определяющих предпробойную проводимость пленки в сильных электрических полях. Ограниченность длительности импульсов высокого напряжения в нашем случае, по видимому, позволяет останавливать необратимые процессы (формирование в диэлектрике тонких каналов высокой проводимости) на любой стадии, модифицируя свойства эмиссионных центров. Существует также возможность у микровключения потерять (временно) эмиссионную активность в связи с дополнительной адсорбцией остаточных газов на нем при импульсной десорбции газа с анода под действием сильного электрического поля. На это косвенно указывает тот факт, что при работе на постоянном напряжении повышение давления остаточных газов до  $\sim 4 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}$  приводит к прекращению эмиссии электронов из диэлектрических включений [16]. Кроме того, следует ожидать усиленной эмиссии электронов из металлической кромки в области „тройных точек“, где происходит резкое увеличение напряженности электрического поля [17].

#### 3.2. Эмиссионные центры в виде микропор

Экспериментально установлено [18,19], что при наличии на поверхности катода неглубоких микропор в высоком вакууме при полях  $5 \cdot 10^4 \text{ V/cm}$  и выше можно в течение многих часов проводить отбор электронов с катода с плотностью тока  $\sim 10^{-4} \text{ A/cm}^2$  вследствие зажигания в микропорах газового разряда низкого давления (эффект полого катода). Применительно к нашей ситуации необходимо учесть следующее обстоятельство. Вряд ли в высоком вакууме такой разряд может загореться за время наносекундного импульса напряжения. Однако если учесть наличие интенсивной импульсной десорбции газа с катода, то исключать возможность участия „пороэмиссии“ в формировании предпробойного тока нельзя. Если же учесть принципиальную ограниченность поступления газа к микропорам, то эффекты нестабильности эмиссионных центров в сильных полях можно связать с попеременной активностью таких эмиссионных центров.

### 3.3. Эмиссионные центры в виде микроострий

Как известно, наличие слоя адсорбированных газов на автоэмиссионном катоде резко снижает стабильность автоэлектронной эмиссии [20,21]. При остаточном давлении  $\sim 10^{-3}$  Па временной масштаб нестабильности составляет  $\sim 10^{-2}$  с, нестабильность вызвана периодическим „срывом“ с вершины эмиттера кластеров адсорбированных газов, диффундирующих к вершине из-за высокого градиента электрического поля [21]. В нашем случае нестабильность эмиссии будет определяться сочетанием интенсивной десорбции газа с вершины эмиттера с высокой плотностью тока электронов, приводящих к ионизации газового облачка. С ростом напряженности электрического поля на вершине эмиттера будет увеличиваться как плотность электронного тока, так и интенсивность десорбции газа, и, следовательно, концентрация образующихся у вершины положительных ионов [22–24]. Этот процесс может завершиться неким кратковременным ( $\sim 10^{-7}$  с) микрозарядом, не разрушающим микроострие, но очищающим его от слоев адсорбированных атомов и молекул (как это наблюдалось при импульсах длительностью в доли секунды [21] и при постоянном напряжении [25]). Это, очевидно, приведет к изменению эмиссионных параметров микроострия. При циклическом приложении импульсов высокого напряжения такая ситуация будет возникать периодически. Таким образом, существование нестабильных эмиссионных центров может быть связано с влиянием на эмиссионную активность катода конкурирующих явлений адсорбции и десорбции остаточных газов.

Заметим, что предельной в данном случае будет ситуация, при которой концентрация ионов, частично компенсирующих объемный заряд электронов, приведет к повышению напряженности электрического поля у вершины и, соответственно, плотности тока автоэлектронной эмиссии до величины, достаточной для взрыва микроострия [23,24] и возникновения пробоя.

### 3.4. Эмиссионные центры в виде микро(нано)частиц

Такие эмиссионные центры многократно наблюдались при исследованиях пробоя на постоянном напряжении даже в самых „чистых“ условиях, причем авторы зачастую считали загадочным их происхождение [7,26,27]. Обычно такие частицы оказываются частицами оксидов, их поведение как эмиссионных центров не отличается от поведения эмиссионных центров в виде изолирующих микровключений. Установлено, что число обнаруживаемых эмиссионных центров такого типа увеличивается с ростом напряженности приложенного электрического поля [26]. В нашем случае многоатомные частицы могут оказаться на исходной поверхности электродов в процессе электронно-пучковой обработки и остаться на ней после протирки электродов безворсовыми салфетками. Другим источником таких частиц могут служить стенки вакуумной камеры, облучаемые импульсными потоками

заряженных частиц при пробоях. Следует также обратить внимание на результаты экспериментов [15,28], в которых обнаружено, что нанесение нанопорошков на поверхность анода приводит к снижению электрической прочности вакуумных промежутков при  $\sim 100$  ns импульсах напряжения столь же заметно, как и нанесение подобных порошков на катод.

Рассмотрим две возможности участия многоатомных частиц в появлении эмиссионных центров на новых участках катода.

а) инициирование эмиссии электронов при ударе о катод многоатомной частицы, оторвавшейся от анода и ускоренной внешним электрическим полем в промежутке. Анализ такой возможности [15,28] натолкнулся на ряд принципиальных трудностей ее реализации. Они касаются несоответствия реальных экспериментальных условий (расстояние между электродами, амплитуда и длительность импульса напряжения) и необходимых параметров многоатомных частиц (масса, заряд, энергия), которые в совокупности могли бы обеспечить инициирование эмиссии как результат удара ускоренных частиц о поверхность катода;

б) инициирование эмиссии электронов при отрыве многоатомной частицы от катода. Обратим внимание на идеи, сформулированные в работе [29], где показано, что эмиссионные токи с катода неизбежны уже на стадии отделения частицы от электрода при условии резкого увеличения напряженности электрического поля, т.е. на фронте импульса напряжения. В [29] представлены обоснования возможности инициирования пробоя при наличии такой эмиссии. Однако для более адекватного рассмотрения такого механизма применительно к нашим условиям эксперимента требуется дополнительный анализ процессов, происходящих при отрыве многоатомных частиц.

Очевидно, что реальная картина процессов, определяющих появление нестабильных эмиссионных центров в сильных электрических полях, может оказаться намного сложнее в силу одновременного влияния ряда факторов и процессов. В частности, как уже упоминалось, значительное влияние на предпробойные явления может оказывать импульсная десорбция газа с электродов в сильных электрических полях. В [30] экспериментально установлено, что подача на вакуумный промежуток одиночных высоковольтных импульсов напряжения в условиях пренебрежимо малых предпробойных токов ведет к значительной десорбции газа с электродов. Количество десорбируемого газа растет с укорочением длительности фронта импульса напряжения. Такую интенсивную десорбцию газа авторы [30] связывают с уменьшением силы связи адсорбированных атомов с металлом электродов в сильных ( $\sim 1$  MV/cm) электрических полях, что приводит к активации миграционных и десорбционных процессов. Именно при таком уровне электрических полей и наблюдается нестабильность „привязки“ эмиссионных центров к локальным участкам поверхности катода.

Оценки также показывают, что в условиях наших экспериментов появление нестабильных эмиссионных центров и инициирование пробоя не связано с активизацией вторичных процессов на локальном участке поверхности анода, находящемся напротив эмиссионного центра. Для оценок „сверху“ примем, что эмиссионный центр представляет собой микроострие с характерной площадью эмитирующей вершины  $S_e = 10^{-12} - 10^{-10} \text{ cm}^2$  и плотностью тока  $j_e = 1 \cdot 10^7 \text{ A/cm}^2$  [1]. Это дает диапазон возможных токов электронов  $10^{-5} - 10^{-3} \text{ A}$ . Принимая площадь бомбардируемого участка анода  $S_a = 10^{-2} \text{ cm}^2$ , получаем плотность тока на аноде  $j_a = 10^{-3} - 10^{-1} \text{ A/cm}^2$ . Нетрудно подсчитать, что при таких условиях бомбардировка анодной фольги ускоренными в промежутке электронами приведет к повышению температуры анодной фольги к концу импульса не более чем на  $1^\circ$ . Если даже полагать, что каждый влетающий в фольгу электрон приведет к появлению на аноде одного иона, то на эмиссионную площадку площадью  $10^{-10} \text{ cm}^2$  за время импульса сможет прилететь лишь  $\sim 0.1$  иона. Действительно, как это следует из данных работы [31], ионные токи с анода при наносекундных вакуумных разрядах чрезвычайно малы, хотя при воздействии постоянного напряжения процесс электронно-ионного обмена может явиться причиной возникновения микроразрядов [32].

## Заключение

Предложена и испытана методика наблюдения предпробойных эмиссионных центров при работе с напряжениями в сотни киловольт и более, основанная на использовании прозрачного для электронов анода (фольга), сцинтиллятора с малым временем высвечивания и чувствительной аппаратуры для регистрации изображений.

С использованием 200 кВ наносекундных импульсов напряжения установлено, что при приближении к рабочим электрическим полям  $\sim 1 \text{ MV/cm}$  все больше проявляется нестабильность „привязки“ эмиссионных центров к локальным участкам поверхности катода. В той степени, в которой непредсказуемо положение эмиссионных центров перед подачей очередного импульса напряжения, в той же степени непредсказуемо место инициирования взрывной электронной эмиссии и пробоя.

Высказан ряд соображений о возможных причинах появления нестабильных эмиссионных центров. Для достижения большей определенности в понимании природы нестабильного поведения эмиссионных центров в сильных электрических полях необходимо проведение экспериментов с лучшим контролем состояния поверхности электродов и регистрацией динамики предпробойной эмиссии катода.

Исследования выполнены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 11-08-00938-а).

## Список литературы

- [1] *Месяц Г.А., Проскуровский Д.И.* Импульсный электрический разряд в вакууме. Новосибирск: Наука, 1984. 256 с.
- [2] *Сливков И.Н.* Процессы при высоком напряжении в вакууме. М.: Энергоатомиздат, 1986. 256 с.
- [3] *Cuneo M.E.* // IEEE T. Dielect. El. In. 1999. Vol. 6. N 4, P. 469–485.
- [4] *Месяц Г.А.* Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. 704 с.
- [5] *Little R.P., Whitney W.T.* // J. Appl. Phys., 1963. Vol. 34. P. 2430–2432.
- [6] *Farrall G.A., Owens M.* // J. Appl. Phys., 1972. Vol. 43, N 3. P. 938–943.
- [7] High-Voltage Vacuum Insulation. Basic Concepts and Technological Practice / Ed. by R. Latham. London: Academic Press, 1995. 568 p.
- [8] *Young R.W.* // Vacuum. 1973. Vol. 24. P. 167–175.
- [9] *Latham R.* High Vacuum Insulation. A new perspective. Bloomington: AuthorHouse, 2006. P. 65.
- [10] Физическая энциклопедия / Под ред. А.М. Прохорова. М.: Большая Российская Энциклопедия. 1998. Т. 5. С. 39.
- [11] *Абрамян Е.А.* Промышленные ускорители электронов. М.: Энергоатомиздат, 1986. 249 с.
- [12] *Proskurovsky D.I., Batrakov A.V.* // Proc. of the 19<sup>th</sup> Intern. Symp. on Discharges and Electr. Insul. in Vacuum. Xi'an. China, 2000. P. 9–16.
- [13] *Proskurovsky D.I., Batrakov A.V., Rotshtein V.P., Karlik K.V., Johnson D.J.* // Proc. of the 14<sup>th</sup> IEEE Intern. Pulsed Power Conf. Dallas. Texas. USA, 2003. P. 297–300.
- [14] *Rotshtein V.P., Ivanov Yu.I., Proskurovsky D.I., Karlik K.V., Shulepov I.A., Markov A.B.* // Surf. Coat. Tech. 2004. Vol. 180–181. P. 377–381.
- [15] *Batrakov A.V., Onischenko S.A., Proskurovsky D.I., Johnson D.J.* // IEEE T. Dielect. El. In. 2006. Vol. 13. N 1. P. 41–51.
- [16] *Hurley R.E.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1979. Vol. 12. N 12. P. 2229–2245.
- [17] *Afanas'ev V.P., Kostin A.A., Kuptsov V.A.* // Proc. of the 21<sup>th</sup> Intern. Symp. on Discharges and Electr. Insul. in Vacuum. Yalta. Crimea, 2004. P. 675–677.
- [18] *Tatarinova N.V., Grigoriev Yu.V.* // Proc. 16<sup>th</sup> Intern. Symp. on Discharges and Electr. Insul. in Vacuum. Moscow-St. Petersburg. Russia, 1994. P. 49–52.
- [19] *Татаринова Н.В., Новиков Н.Е., Соколов В.С., Волков Н.В., Воробьев В.Л.* // Изв. РАН. Сер. физ. 1992. Т. 56. № 7. С. 64–66.
- [20] *Елинсон М.И., Васильев Г.В.* Автоэлектронная эмиссия. М.: ГИФМЛ, 1958. 272 с.
- [21] *Фурсей Г.Н., Карцев Г.К.* // ЖТФ. 1970. Т. 40. Вып. 2. С. 310–319.
- [22] *Лобов С.И., Павловская Н.Г.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1980. Т. 23. Вып. 11. С. 1373–1377.
- [23] *Бабич Л.П., Тарасов М.Д.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1980. Т. 23. Вып. 11. С. 1365–1372.
- [24] *Лутвинов Е.А., Месяц Г.А., Проскуровский Д.И.* // УФН. 1983. Т. 139. Вып. 2. С. 265–302.
- [25] *Rohrbeck W., Juttner B., Wolff H.* // Proc. of the 5<sup>th</sup> Intern. Symp. on Discharges and Electr. Insul. in Vacuum. Poznan. Poland, 1972. P. 59–64.
- [26] *Pupeter N., Göhl A., Habermann T., Kirschner A., Mahner E., Müller G., Piel H.* // Proc. of the 7<sup>th</sup> Workshop on RF Superconductivity. Gif-sur-Yvette. France, 1995. P. 67–77.



- [27] *Neidermann Ph., Renner C.H., Kent A.D., Fischer F.* // J.Vac. Sci. Technol. A. 1990. Vol. 8. P. 594–597.
- [28] *Johnson D.J., Savage M.E., Sharpe R.A., Batrakov A.V., Proskurovsky D.I.* // IEEE T. Dielect. El. In. 2006. Vol. 13. N 1. P. 52–64.
- [29] *Пошехонов П.В., Соловьев В.И.* // Радиотехника и электроника. 1971. Т. 16. Вып. 9. С. 1705–1711.
- [30] *Tarasova L.V., Khudiakova L.N.* // Proc. of the 3<sup>rd</sup> Intern. Symp. on Discharges and Electr. Insul. in Vacuum. Paris. France, 1968. P. 62–70.
- [31] *Panitz J.A.* // Proc. of the 5<sup>th</sup> Intern. Symp. on Discharges and Electr. Insul. in Vacuum. Poznan. Poland, 1972. P. 75–79.
- [32] *Wolff H., Juttner B., Rohrbeck W.* // Proc. of the 5<sup>th</sup> Intern. Symp. on Discharges and Electr. Insul. in Vacuum. Poznan. Poland, 1972. P. 165–169.