

НАБЛЮДЕНИЕ ПРЕДВЗРЫВНОГО СОСТОЯНИЯ И НАЧАЛЬНОГО МОМЕНТА ВЗРЫВА АВТОЭМИССИОННОГО ЦЕНТРА В ЭЛЕКТРОННОМ ПРОЕКТОРЕ

А.В.Батраков¹⁾, С.А.Попов, Д.И.Проскуровский

Институт сильноточной электроники СО РАН

634055 Томск, Россия

Поступила в редакцию 9 января 1998 г.

С использованием проектора Мюллера и высоковольтных импульсов напряжения коротких длительностей (~ 2 нс) удалось зафиксировать не наблюдавшиеся ранее эмиссионные изображения, соответствующие переходу от интенсивной автоэлектронной эмиссии к взрывной электронной эмиссии. Яркость таких изображений намного выше яркости обычных автоэмиссионных изображений. Более того, изображения имеют характерную разнояркостную структуру с кольцевым обрамлением областей разной яркости. Анализ экспериментальных данных указывает на автоэмиссионную природу этих изображений. Появление таких эмиссионных изображений в работе объясняется эмиссией из жидкой фазы, возникающей непосредственно перед взрывом микроэмиттера.

PACS: 79.70.+q

Исследованию перехода от автоэлектронной эмиссии (АЭЭ) к взрывной электронной эмиссии (ВЭЭ) или, как считалось ранее, к «вакуумной дуге» посвящено значительное число работ. Измерены критические плотности автоэмиссионного тока и электрические поля на катоде, приводящие к переходу к «дуге» [1, 2], обнаружено в «предпробной фазе» появление яркого кольца, обрамляющего обычное эмиссионное изображение [1, 2], измерены зависимости времени запаздывания взрыва эмиттера от величины плотности тока автоэмиссии [3, 4], проведены расчеты как нагрева автоэмиттера в предвзрывной стадии [5, 6], так и непосредственно процесса взрыва микроострия протекающим автоэмиссионным током [5, 7].

Тем не менее, вряд ли можно полагать, что вся последовательность предвзрывных явлений на автоэмиттере изучена достаточно досконально. В частности, поскольку взрывному процессу разрушения эмиттера может предшествовать появление жидкой фазы на его вершине [8], вполне естественно предположить, что развитие электрогидродинамических явлений должно усложнить сценарий перехода к взрыву. Однако к настоящему времени существует довольно ограниченное число надежных экспериментальных данных о динамике предвзрывных процессов непосредственно перед взрывом. Переход от АЭЭ высоких плотностей тока к взрыву автоэмиттера происходит настолько быстро, что до сих пор не удавалось выделить отдельные фазы данного процесса. Поэтому при анализе экспериментов этот переход считается мгновенным. Теория же пытается описать этот процесс.

В настоящей работе была предпринята попытка с использованием проектора Мюллера зарегистрировать эмиссию, соответствующую переходному состоянию между АЭЭ и ВЭЭ. Насколько нам известно, наблюдения непосредственно перехода от АЭЭ к ВЭЭ в проекторе Мюллера ранее не проводились. По-видимому, это связано с большой интенсивностью засветки люминесцентного экрана и его длительным послесвечением, что «хоронит» информацию о происходящих в эмиссионной зоне процессах.

¹⁾ e-mail: bat@hcei.tomsk.su

Однако при использовании коротких импульсов напряжения длительностью $\sim 10^{-9}$ с можно попытаться получить информацию о структуре зоны эмиссии непосредственно перед взрывом микроэммитера.

Схематическое изображение используемых в экспериментах проекторов представлено на рис. 1. Катодом служила игла из W с радиусом кривизны вершины ~ 5 мкм. В качестве анода проектора использовалась металлическая полусфера радиусом 2.7 см, покрытая люминофором с внутренней стороны. Эксперименты проводились в безмасляном вакууме $10^{-6} \div 10^{-5}$ Па. Импульсы напряжения с регулируемой длительностью (2–10 нс) и амплитудой до 50 кВ подавались на катод. Предварительно поверхность катода очищалась длительным кондиционированием пробоями с использованием импульсов 10 нс, 50 кВ.

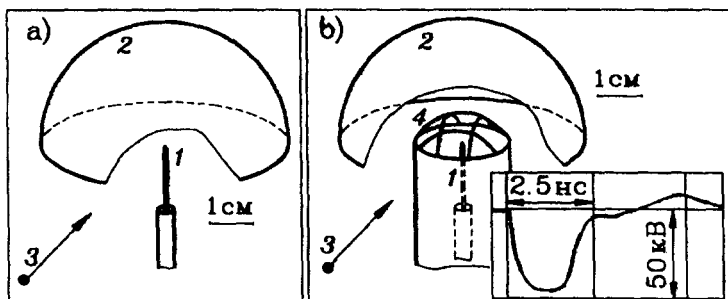


Рис.1. Двухэлектродная (а) и трехэлектродная (б) конструкции проекторов Мюллера, используемых в экспериментах, и типичная осциллограмма импульса напряжения минимальной длительности, подаваемого на катод: 1 – игольчатый катод, 2 – люминесцентный экран, 3 – точка наблюдения изображений, 4 – сетка из четырех проволочек

Затем на катод подавались импульсы напряжения 2 нс с постепенным увеличением амплитуды от импульса к импульсу. При некотором напряжении (~ 40 кВ) появлялись эмиссионные изображения, характерные для автоэмиссии из микроэммитеров, образующихся на вершине катода после вакуумных пробоев [9–11]. Эти изображения имели низкую яркость и хорошо воспроизводились от импульса к импульсу (рис.2а). Условно назовем их изображениями первого типа.

Незначительное повышение амплитуды импульсов напряжения (на 1–2 кВ) привело к радикальному изменению характера эмиссионных изображений. Они уже представляли собой яркие пятна, засветка которых имела ступенчатый концентрический характер с кольцевым обрамлением областей разной яркости (рис.2б – е) (эмиссионные изображения второго типа). Однако в отличие от наблюдавшихся ранее изображений с кольцами [1, 2], в данном случае кольцевые структуры возникали не только на периферии, но и внутри изображений (рис.2б, д).

Эмиссионные изображения второго типа от импульса к импульсу не воспроизводились. Причем, после каждого появления эмиссионного изображения второго типа эмиссионные изображения первого типа радикально изменялись, что свидетельствует об изменении микрогеометрии поверхности вершины катода. Отметим также, что по мере увеличения амплитуды импульсов напряжения переход от эмиссионных изображений первого типа к эмиссионным изображениям второго типа происходит очень резко, без возникновения изображений с промежуточной формой и интенсив-

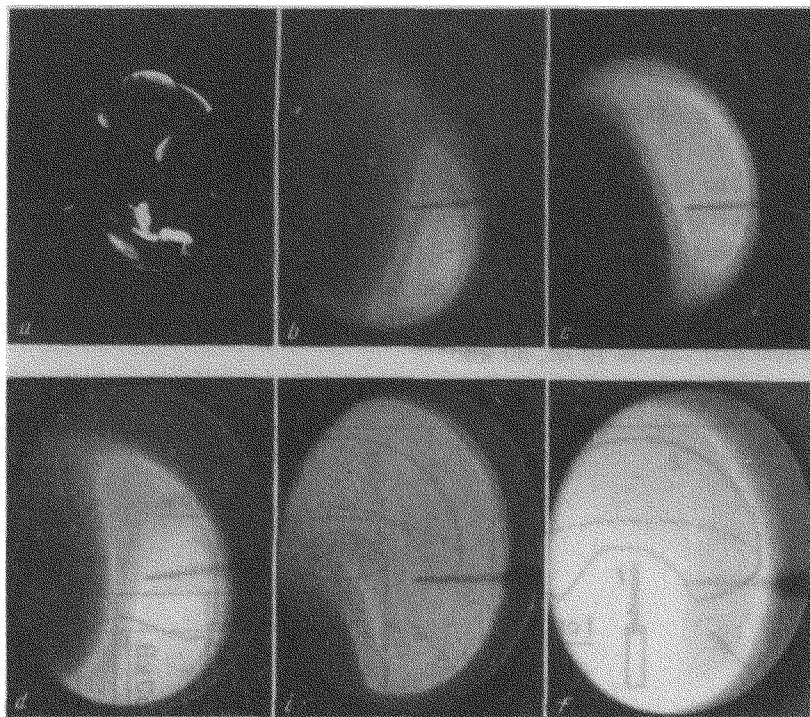


Рис.2. Типичное изображение первого типа (а), полученное при экспозиции 50-ти импульсов автоэмиссионного тока, и типичные одиночные изображения второго (b – e) и третьего (f) типов

ностью свечения. При увеличении длительности импульсов напряжения свыше 5–7 нс изображения второго типа наблюдать не удавалось (в том числе и при меньших напряжениях) из-за интенсивной засветки большей части экрана током инициированной ВЭЭ (изображения третьего типа, рис.2f). Изображения третьего типа появлялись и при коротких (<5 нс) длительностях импульсов, но при несколько большей амплитуде импульсов напряжения.

Для изображений второго типа характерна интенсивная, близкая к случаю изображений третьего типа, засветка люминофора экрана. При этом форма и размеры изображений второго типа от импульса к импульсу менялись в значительных пределах. При постепенном повышении амплитуды импульсов угловые размеры этих изображений, в целом, увеличивались, постепенно приближаясь к размерам изображений третьего типа. При этом на изображениях второго типа постепенно исчезали характерные разнояркостные кольцевые структуры.

Плавный переход от изображений второго типа к изображениям третьего типа, а также необходимость использования коротких импульсов для регистрации изображений второго типа указывают на то, что изображения второго типа отображают переходное состояние между АЭЭ и ВЭЭ. Это обстоятельство делает затруднительным идентификацию типа эмиссии, соответствующего этому состоянию.

Для выяснения природы изображений второго типа были выполнены эксперименты в проекторе второй конструкции (рис.1), в котором между катодом и экраном располагалась сетка из четырех проволочек 100 мкм, находящаяся под потенциалом

экрана. На рис.3 приведены фотографии типичных изображений второго и третьего типов в проекторе второй конструкции. Хорошо видно, что на изображениях второго типа проволоочки дают тень, тогда как на изображениях третьего типа область тени становится светлой.

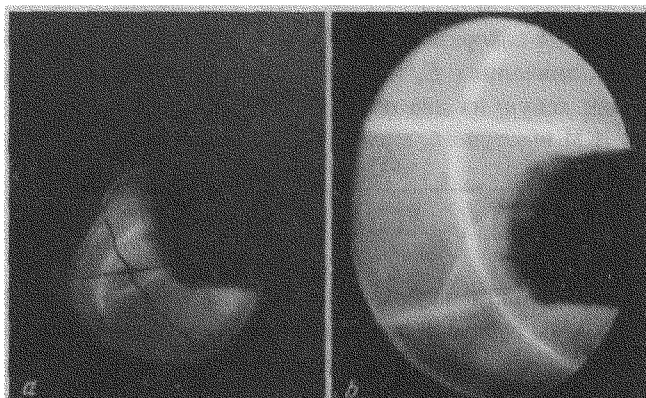


Рис.3. Полученные последовательно в проекторе второй конструкции одиночные изображения второго (а) и третьего (b) типов

С целью выяснения причины смены темной проекции проволоочек на светлую моделировался поток электронов в проекторе с использованием программы «SuperSAM» [12], учитывающей пространственный заряд электронов. В результате моделирования была получена зависимость между радиусом эмиссионной границы и расстоянием от проволоочки до области схождения электронных траекторий. Оказалось, что при радиусе эмиссионной границы 5 мкм электронные траектории сходятся на расстоянии ~ 10 см, что значительно превышает расстояние от проволоочек до экрана (1.5 см). Это обеспечивает тень от проволоочек. Область тени превращается в светлую область, если траектории собираются в пространстве между проволоочками и экраном. Это происходит в том случае, когда радиус зоны эмиссии становится больше радиуса проволоочки (в нашем случае 100 мкм), то есть возникает катодная плазма. Этот результат однозначно указывает на то, что изображения второго типа соответствуют АЭЭ, а изображения третьего типа – ВЭЭ. Поскольку время существования ВЭЭ не может превышать длительности импульса напряжения (2 нс), получаем, что скорость разлета плазмы в начальный момент взрыва автоэммиттера составляет не менее $5 \cdot 10^4$ м/с, что хорошо согласуется с результатами других исследований [13].

Подводя итог анализу изображений второго типа, можно утверждать, что они соответствуют АЭЭ. В то же время, появление изображения второго типа необратимо изменяет микрорельеф поверхности вершины эмиттера. Эти два фактора, с нашей точки зрения, могут быть объяснены появлением жидкой фазы на вершине катода к концу импульса напряжения. Зона расплава, по-видимому, образуется в местах скопления эффективно эмиттирующих микровыступов. Поскольку при кондиционировании короткими импульсами ВЭЭ высота таких микровыступов невелика [14] и они способны эффективно отводить тепло, то область расплава может охватывать все скопление. Это объясняет относительно большие размеры эмиссионных изображений второго типа.

Такой подход позволяет объяснить, почему возникают трудности с регистрацией изображений второго типа при увеличении длительности импульса напряжения.

Известно, что при выполнении условия

$$2\gamma/r \leq \epsilon_0 E_0^2/2 \quad (1)$$

(γ – коэффициент поверхностного натяжения, r – характерный радиус начальной кривизны поверхности жидкого металла (ЖМ), ϵ_0 – электрическая постоянная, E_0 – напряженность электрического поля на поверхности ЖМ) происходит формирование ЖМ выступа [15]. При оценочных значениях $E_0 = 5 \cdot 10^9$ В/м и $r = 5$ мкм правая часть неравенства (1) превосходит левую на два порядка величины. При этом характерное время формирования ЖМ выступа t_0 может быть оценено, согласно [16], следующим образом:

$$t_0 = \frac{2\gamma}{E_0^3} \sqrt{\frac{\rho}{\epsilon_0^3} \ln \left(\frac{2\gamma}{\xi_0 \epsilon_0 E_0^2} \right)}, \quad (2)$$

где ξ_0 – амплитуда начальных возмущений поверхности ЖМ. Принимая $\xi_0 = 0.2r$ [17], из (2) получаем $t_0 \sim 0.1$ нс. Таким образом, появление зоны расплава на вершине катода приводит за очень короткое время к формированию острого ЖМ выступа, дополнительному усилению электрического поля и ускорению взрывного процесса. Очевидно, что чем больше длительность высоковольтного импульса, тем труднее зафиксировать данную ситуацию. Если же нам это удалось и расплав появился в конце импульса напряжения так, что взрыв не произошел, то можно ожидать, что ЖМ выступ успеет частично или полностью распасться прежде, чем произойдет его кристаллизация. В этом случае по мере проведения экспериментов должна происходить полировка вершины острия и будет повышаться напряжение, при котором появляется расплав на вершине эмиттера. Это мы действительно наблюдали, и для продолжения экспериментов в доступном диапазоне напряжений периодически приходилось подвергать катод воздействию током ВЭЭ, инициируемой «длинными» (10 нс) импульсами напряжения 50 кВ. Такое воздействие приводило к понижению напряжения появления изображений второго типа, что легко объясняется регенерацией микровыступов на вершине катода при таких длительностях импульсов [14].

Таким образом, появление жидкой фазы непосредственно перед инициированием ВЭЭ достаточно хорошо объясняет появление и некоторые характерные особенности изображений второго типа. Однако остается без объяснения высокая яркость изображений второго типа, свидетельствующая о скачке плотности автоэмиссионного тока при появлении зоны расплава. Также требует своего объяснения природа ступенчатого характера засветки люминофора на этих изображениях, равно как и кольцевого обрамления областей разной яркости.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 97-02-17208).

1. W.P.Dyke, J.K.Trolan, E.E.Mastin, and J.P.Varbour, Phys. Rev. **91**, 1043 (1953).
2. И.Л.Сокольская, Г.Н.Фурсей, РиЭ **7**, 1474 (1962).
3. Г.К.Карцев, Г.А.Месяц, Д.И.Проскуровский и др., ДАН СССР **192**, 309 (1970).
4. В.М.Жуков, М.С.Аксенов, Г.Н.Фурсей и др., Изв. АН СССР, сер. физ. **43**, 1310 (1982).
5. Е.А.Литвинов, Г.А.Месяц, Д.И.Проскуровский, УФН **139**, 265 (1983).
6. Д.В.Глазанов, Л.М.Баскин, Г.Н.Фурсей, ЖТФ **59**, 60 (1989).
7. А.В.Бушман, С.Л.Лешкевич, Г.А.Месяц и др., ДАН СССР **312**, 1368 (1990).
8. Г.Н.Фурсей, А.А.Антонов, Б.Ф.Гулин, Вестник Лен. университета №10, 71 (1971).

9. А.П.Комар, В.П.Савченко, В.Н.Шредник, ДАН СССР **129**, 540 (1959).
10. А.П.Комар, Н.Н.Сюткин, ДАН СССР **158**, 821, (1964).
11. В.Jüttner and W.Rohrbeck, Preprint ZIE 76-3, Berlin, 1976.
12. D.G.Myakishev, M.A.Tiunov, and V.P.Yakovlev, Int. J. Mod. Phys. A (Proc. Suppl.) 2B **2**, 915 (1993).
13. Г.П.Баженов, О.Б.Ладыженский, Е.А.Литвинов и др., ЖТФ **47**, 2086 (1977).
14. Г.А.Месяц, Д.И.Проскуровский, *Импульсный электрический разряд в вакууме*, Новосибирск: Наука, 1984.
15. L.Tonks, Phys. Rev. **48**, 562 (1935).
16. Л.М.Баскин, *Динамика полевых эмиссионных процессов в статических и СВЧ полях*, Дисс. на степень док. физ.-мат. наук, Томск, 1990.
17. А.В.Батраков, С.А.Попов, Д.И.Проскуровский, Письма в ЖТФ **19**, 66 (1993).