

G. A. Mesyats, Extens in rule of three points, *Dokl. Akad. Nauk*, 1994,
Volume 336, Number 5, 610–612

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these
terms of use

<http://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.9.175

February 15, 2025, 23:59:12



УДК 537.52

ЭКТОНЫ В ТРОЙНЫХ ТОЧКАХ

© 1994 г. Академик Г. А. Месяц

Поступило 19.01.94 г.

Эктон – это кратковременная порция электронов, испускаемых катодом в результате микроскопического взрыва на его поверхности из-за большой концентрации энергии в микрообъеме катода [1]. Если ток, испускаемый в эктоне, выше порогового, то имеет место процесс самоподдержания эктонов. Характерные параметры этого процесса таковы: число электронов в эктоне 10^{10} - 10^{12} ; длительность эктонного цикла 10^{-8} - 10^{-10} с; пороговый ток в зависимости от сорта металла и состояния его поверхности составляет от долей до нескольких ампер; энергия, необходимая для возбуждения одного эктона, порядка 10^{-8} Дж. Эктон является фундаментальным процессом взрывной электронной эмиссии [2], а также целого ряда электрических разрядов. Наиболее простым способом реализации микровзрыва является разогрев микроскопических выступов током автоэлектронной эмиссии, в результате чего, в частности, инициируется вакуумный разряд [3, 4]. Этот процесс долго считался основным, если не единственным для возбуждения взрывной эмиссии. Мы покажем, что существует простой и очень эффективный способ возбуждения эктона в так называемой тройной точке (ТТ).

Что такое тройная точка? Это контакт металла, диэлектрика и среды. В качестве среды может быть вакуум, газ или жидкость. Если металлический электрод контактирует с диэлектриком, то из-за шероховатости поверхности диэлектрика и металла контакт этот происходит в отдельных точках. Схема, объясняющая природу контакта и ТТ, приведена на рис. 1. Эффект появления эктонов в ТТ рассмотрим вначале на примере вакуума.

Для исследования появления эктонов в ТТ проводился следующий эксперимент. На одну сторону керамического диска толщиной δ вжигали слой серебра, а к другой прижимали иглу из вольфрама, которая заземлялась и была катодом для диода; анод находился на расстоянии d от иглы (рис. 2). Использовали различные типы керамик: титанат бария, стеатит, фостерит. Появление эктона фиксировалось по появлению электронного тока взрывной эмиссии. Эктоны появлялись в

экспериментах с определенным набором параметров. Наиболее интересные результаты получены на керамике из титана бария с диэлектрической проницаемостью $\epsilon \geq 10^3$. При $\delta = 2$ мм и $d = 1$ мм к такой керамике прикладывался импульс напряжения $U_0 = 0.4 - 4$ кВ с длительностью 2, 4, 20, 50 нс. Одновременно регистрировались напряжение и ток через керамику, ток эмиссии электронов из острия, а также фотографировалось свечение разряда. На анод подавался импульс напряжения длительностью 25 нс с амплитудой до 30 кВ. Разряд в окрестности иглы возникал при превышении некоторого порогового напряжения. Через некоторое время после этого появлялся электронный ток в диоде. Свечение разряда имело форму круга и расширялось со скоростью $v = AU_0$, где при положительной полярности острия $A = 5 \cdot 10^2$ см s^{-1} В $^{-1}$, а при отрицательной $2 \cdot 10^3$ см s^{-1} В $^{-1}$.

На рис. 3 показана зависимость тока разряда от напряжения на диэлектрике U_0 . При определенной величине тока разряда появлялся ток взрывной эмиссии электронов, что говорит о появлении эктонов в ТТ [1].

Итак, в вакуумной среде в ТТ возникают эктоны. Если катод, контактирующий с диэлектриком, имеет достаточно большую поверхность (рис. 1), то возникает много ТТ на кромке электрода. Чтобы происходило инициирование разряда в районе ТТ, должны соблюдаться два условия: 1) появляться заряженные частицы; 2) существовать

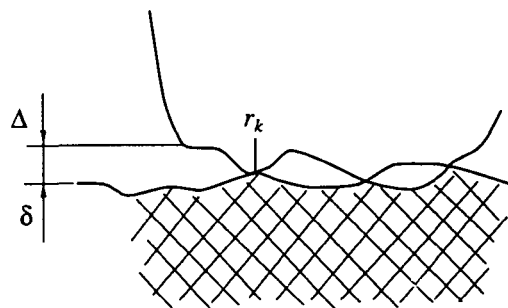


Рис. 1. Схема контакта металл-диэлектрик; Δ – усредненная толщина зазора между металлом и диэлектриком, δ – толщина диэлектрика, r_k – радиус выступа, образующего тройную точку.

тангенциальная компонента электрического поля на диэлектрике E_t .

Заряженные частицы появляются из-за высокого электрического поля на поверхности металла E_m . Из-за неровных краев электрода и керамики поле

$$E_m \approx \beta U_0 \epsilon / \delta$$

при $\delta \gg \epsilon \Delta$, где Δ – эффективный зазор в контакте металл–диэлектрик (рис. 2); β – коэффициент усиления поля из-за субмикростростей; δ, ϵ – толщина и относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика. Так как $U_0 / \delta \approx 10^4$ В/см, $\epsilon = 10^3$, а $\beta \approx 1 - 10$, то поле E_m может приближаться к $10^7 - 10^8$ В/см. Такое поле в зависимости от полярности исследуемого электрода приводит к эмиссии электронов или положительных ионов, которые инициируют разряд.

Тангенциальное поле E_t обусловлено, во-первых, неоднородностью электрического поля на металлическом микровыступе в ТТ. Это принципиально важно для начала разряда на поверхности. Во-вторых, когда плазма разряда появляется, это поле обусловлено наличием поверхностных и объемных емкостей, что необходимо для дальнейшего поддержания разряда. Если для длины разряда x справедливо соотношение $r \gg x \ll l$, где r – радиус электрода, l – длина диэлектрика, то

$$E_t = U_0 \gamma / th \gamma l, \quad (1)$$

где $\gamma \approx (\epsilon / \epsilon_c k \delta)^{1/2}$, ϵ_c – относительная диэлектрическая проницаемость среды (для вакуума $\epsilon_c = 1$), k – величина, зависящая от свойств поверхности диэлектрика [5].

Если разряд распространяется в районе ТТ во все стороны однородно, то для времени $t \ll \delta / v$ динамическая емкость, образуемая плазмой,

$$C = 4\epsilon_0 \epsilon v t, \quad (2)$$

а ток смещения

$$i = 4\epsilon_0 \epsilon v U_0. \quad (3)$$

Этот ток будет протекать по контакту металл–диэлектрик через площадку с радиусом r_k . Его плотность будет равна

$$j_k = 4\epsilon_0 \epsilon v U_0 / \pi r_k^2. \quad (4)$$

Взрыв металлического выступа в области контакта произойдет при условии

$$\int_0^{t_b} j_k dt = \bar{h}, \quad (5)$$

где t_b – время до взрыва, \bar{h} – удельное действие, которое для многих металлов составляет величину порядка 10^9 А² · см⁻⁴ · с. Если плотность тока j_k не зависит от времени, то время до появления микровзрыва металла и появления эктона определится из соотношения

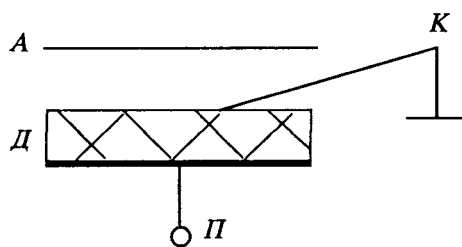


Рис. 2. Схема расположения электродов по иницированию эктонов в тройной точке. А – анод, К – острый катод, Д – диэлектрическая пластина, П – пустой электрод (серебро, вожженное в диэлектрик).

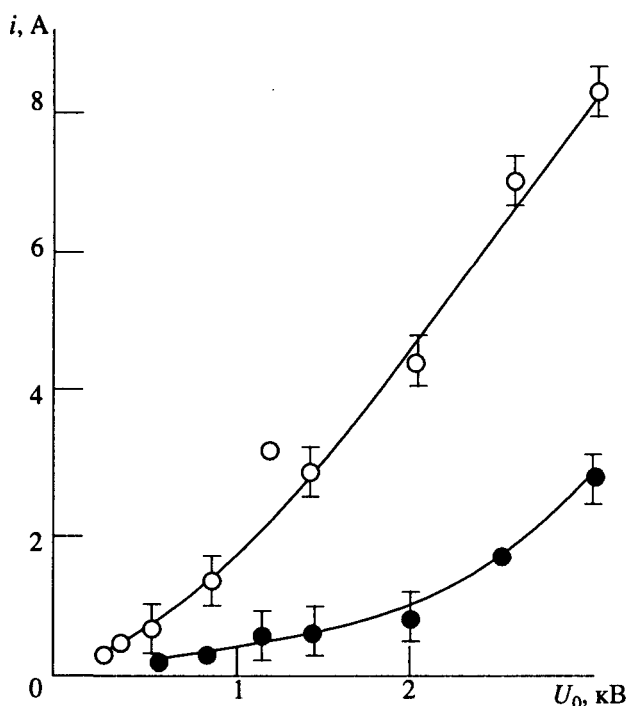


Рис. 3. Зависимость тока смещения через диэлектрик при разряде по его поверхности. Верхняя кривая – при отрицательном остром электроде, нижняя – при положительном.

$$t_b \approx \pi^2 \bar{h} r_k^4 / 16 \epsilon_0^2 \epsilon^2 A^2 U_0^4. \quad (6)$$

Для разряда по поверхности диэлектрика в вакууме, рассмотренного выше, $\epsilon \approx 10^3$, $U_0 = 10^3$ В, $A = 2 \cdot 10^3$ см · с⁻¹ В⁻¹, поэтому время t_b будет порядка 10^{-9} с при радиусе r_k порядка 10^{-5} см.

В формуле (6) среда представлена только коэффициентом А. Как мы уже показали в нашем эксперименте, в вакуумной среде скорость развития разряда $v \approx AU_0$. Даже в простейшей геометрии (рис. 2) коэффициент А зависит от толщины диэлектрика, величины ϵ и сорта диэлектрика. Если для других сред (жидкость, газ) зависимость скорости от напряжения тоже можно представить как линейную, то формула (6) может быть

использована для оценок времени появления эктона и в других средах.

Таким образом, в тройной точке металл-диэлектрик-среда (вакуум, газ, жидкость) в присутствии электрического поля инициируется эктон. Этот эффект является вредным с точки зрения работы высоковольтных проходных изоляторов, так как появление эктона в ТТ может означать нарушение электрической прочности изолятора и выход из строя установки. Однако этот эффект является полезным для создания высокоэффективных металлодиэлектрических катодов, которые широко используются в сильноточной электронике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Месяц Г.А.* // Письма в ЖЭТФ. 1993. Т. 57. В. 2. С. 88 - 90.
2. *Месяц Г.А., Проскуровский Д.И.* // Там же. 1971. Т. 13. В. 7.
3. *Alpert D.I., Lee D.A. et al.* // J. Vacuum Sci. and Technol. 1964. V. 1. № 2. P. 35 - 42.
4. *Елинсон М.И., Васильев Г.Ф.* Автоэлектронная эмиссия. М.: ГИФМЛ, 1958.
5. *Бугаев С.П., Месяц Г.А.* // ЖТФ. 1967. Т. 37. В. 10. С. 1861 - 1867.