

ЭКТОНЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДАХ

Г.А.Месяц

*Институт электрофизики Уральского отделения РАН
620219 Екатеринбург, Россия*

Поступила в редакцию 11 декабря 1992 г.

После переработки 22 декабря 1992 г.

Показано, что существует много способов концентрирования энергии в микрообъемах катода до 10^4 Дж/г, которые приводят к микровзрывам с испусканием электронов, плазмы, жидкых капель металла и его паров. Этот эффект был назван эктонами. Если ток из участка микровзрыва выше критического, начинается процесс самоподдержания эктонов. Эктоны играют фундаментальную роль в большом числе электрических разрядов.

В работах ¹⁻³ показано, что при микровзрывах на катоде происходит интенсивная эмиссия электронов, сопровождаемая испусканием плазмы, паров и микрокапель металла. Это явление получило название взрывной эмиссии электронов (ВЭЭ) ^{3,4}. Полагалось, что существует только один механизм микровзрыва – разогрев микровыступов на катоде током автоэлектронной эмиссии (АЭЭ) ⁵ и что ВЭЭ играет фундаментальную роль только в вакуумном разряде ². Цель настоящей статьи – показать, что, во-первых, имеется много механизмов появления микровзрыва, а АЭЭ только одна из немногих возможностей их инициирования и, во-вторых, микровзрывы на электродах являются фундаментальным процессом для большого количества типов разряда.

Напомним, как возникает и функционирует ВЭЭ. При плотности тока $j > 10^8$ А/см² микроострие на поверхности катода получает энергию $\sim 10^4$ Дж/г и взрывается в течение времени t_3 , которое для многих металлов определяется из соотношения

$$j^2 t_3 \approx 10^9 \text{ А}^2 \cdot \text{см}^{-4} \cdot \text{с.} \quad (1)$$

После взрыва появляется ток ВЭЭ, а на катоде появляется микрократер. Если ток ВЭЭ превышает некоторую критическую величину i_c (порядка нескольких ампер), то ток от первого микровзрыва прекращается (за время порядка 10^{-9} – 10^{-8} с) и появляется один или несколько новых микровзрывов и микрократеров. Следовательно, процесс становится самоподдерживающимся, а каждый новый микровзрыв качественно ведет себя подобно вторичным электронам, которые появляются на катоде под действием ионов, фотонов, электронов, метастабилей и так далее. Это явление было названо эктоном, так как в отечественной и зарубежной литературе зону функционирования ВЭЭ часто называют взрывной центр (Explosive Center) или эмиссионный центр (Emissive Center). Слово эктон (ecton) происходит от начальных букв этих английских слов.

Итак, чтобы появился первый эктон, необходимо иметь достаточную удельную концентрацию энергии в микрообъеме катода ($\sim 10^4$ Дж/г) и, чтобы первый эктон инициировал один или несколько вторичных эктонов, необходимо, чтобы его ток был выше критического. Это, по-существу, два основных условия возникновения и самоподдержания эктонов. Но не трудно показать,

что эти два условия могут быть обеспечены не только автоэлектронной эмиссией и не только в вакууме.

Концентрацию энергии микрообъему катода, достаточную для взрыва, можно обеспечить мощным потоком лазерного излучения, плазмы, ионов, ударом быстрой микрочастицы, разрядом по поверхности диэлектрика в месте его контакта с острием, наличием металлических мостиков между катодом и анодом и так далее. Причем необязательно эти процессы должны приводить к микровзрывам непосредственно. Есть сопутствующие эффекты, которые возникают при сравнительно слабых потоках энергии, а затем способствуют концентрированию энергии в микрообъемах катода. Один из них – взаимодействие поверхности катода и плазмы. Эта плазма возникает, в частности, при испарении микроповерхности катода или десорбции газа под действием высокой температуры и последующей ионизации газа и паров металла под действием электрического поля.

Экспериментально установлено, что потоки плазмы инициируют микровзрывы на катоде². Это обусловлено наличием диэлектрических пленок и загрязнений на катоде. Если на такую пленку набегает плазма, то пленка заряжается током ионов.

Для получения электрического поля $E \geq 10^6 \text{ В/см}$, при котором происходит пробой пленки за время $t \leq 10^{-8} \text{ с}$, необходимо, чтобы соблюдалось соотношение

$$nv \geq 10^{22} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (2)$$

где v – скорость ионов, n – концентрация. Если $v \approx 10^6 \text{ см/с}$, то при $n \leq 10^{16} \text{ см}^{-3}$ можно ожидать появления эктонов под действием набегающей плазмы.

При отсутствии диэлектрических пленок и загрязнений эктоны появляются за счет усиления плотности тока на микровыступах. Пусть поверхность микровыступа равна s , а место его стыка с катодом имеет форму круга с радиусом r . Тогда ток ионов $j_s s$, который попадает на поверхность микровыступа будет иметь в месте стыка плотность $j_s s / \pi r^2$. То есть усиление плотности тока будет равно

$$\beta_j = s / \pi r^2. \quad (3)$$

Например, для цилиндра на плоскости это будет $2h/r$, где h – высота цилиндра; для конуса – l/r , где l – длина образующей конуса; для сферы – $4R^2/r^2$, где R – радиус сферы. Величина h/r для цилиндрического микровыступа хорошо измерена, так как она характеризует также коэффициент усиления электрического поля и составляет обычно 10^2 и более⁶. Для сферического микровыступа β_j может быть 10^3 и более. Этот эффект усиливает плотность потока ионов плазмы на катод, что может привести к появлению эктонов. По-видимому, этот эффект имел место в работе⁷.

На примере ВЭЭ покажем, почему эктон существует короткое время ($\sim 10^{-9} - 10^{-8} \text{ с}$), а потом исчезает и дает начало новым эктонам. Это обусловлено тем, что кратер, образующийся за счет джоулева разогрева катода током ВЭЭ, увеличивает свой радиус, испаряет атомы и выбрасывает жидкий нагретый металл. Все это ведет к охлаждению кратера и прекращению эмиссии. Экспериментально наблюдается два типа эктонов³: 1) когда кратеры геометрически не касаются друг друга; 2) когда вторичные кратеры

возникают на месте первичных или на их периферии. Первый тип эктонов обусловлен распространением плазмы вдоль поверхности катода, зарядкой диэлектрических пленок и загрязнений и их пробоем, о чем мы говорили выше. Второй – концентрированием энергии на катоде при взаимодействии жидкой фазы металла с плазмой ². По нашему мнению, наиболее эффективным механизмом появления вторичных эктонов может быть взрыв перетяжки жидкого металла при обрыве капли. В этом случае плотность тока ионов на сферическую каплю может достигать $> 10^6 \text{ A/cm}^2$. Учитывая, что в этом случае $\beta_j = 4R^2/r^2 \geq 10^3$ ⁸, взрыв перетяжки согласно (1) будет происходить за время $t_2 < 10^{-9} \text{ с}$. В вакуумных дугах ⁹ и при ВЭЭ ³ количество микрокапель для различных металлов составляет $j = (1 - 5)10^7 \text{ Кл}^{-1}$. Тогда, предполагая, что критический ток i_c , необходимый для самоподдержания эктонов, равен току, при котором за время цикла τ_u появится хотя бы одна капля, получим критерий самоподдержания эктонов в виде:

$$\gamma \tau_u i_c \geq 1. \quad (4)$$

При указанном значении γ и $\tau_u \approx 10^{-8} \text{ с}$ ¹⁰ ток i_c должен составлять несколько ампер, что согласуется с экспериментом для ВЭЭ ³ и вакуумных дуг ¹¹.

Итак, эктоны возникают за счет большой плотности мощности на поверхности металла. Однако одним из наиболее распространенных способов создания такой ситуации является джоулев разогрев микроучастков катода. Количество металла, уносимого при этом с катода составляет $10^{-11} - 10^{-12} \text{ г}$, характерный размер кратера $< 10^{-4} \text{ см}$, а удельный унос массы $10^{-5} - 10^{-4} \text{ г/Кл}$ ². Это означает, что количество энергии, необходимое для микровзрыва не превышает $10^{-8} - 10^{-7} \text{ Дж}$.

Назовем электрические разряды, где эктоны могут иметь место. Это взрывная эмиссия электронов, вакуумный разряд, вакуумная дуга, некоторые типы дуг в газе, разряд в микропромежутках в газе, разряд в дальней левой и правой ветвях кривой Пашена, псевдоискры, униполярные дуги, некоторые типы разрядов в жидкостях, переход от тлеющего разряда в дуговой, контракция разряда в газовых лазерах высокого давления, электрические контакты, электроискровая обработка металлов и так далее. Таким образом, эктоны – это не экзотический эффект, а одно из самых распространенных явлений электрических разрядов.

1. Г.А.Месяц, Исследования по генерированию мощных наносекундных импульсов. Док. дис., Томск, ТПИ, 1966.
2. Г.А.Месяц, Д.И.Прокуровский, Импульсный электрический разряд в вакууме. Новосибирск: Наука, 1984.
3. Г.А.Месяц, Д.И.Прокуровский, Письма в ЖЭТФ **13**, 7 (1971).
4. G.A.Mesyats, Proc. X-th Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases. Oxford, 1971, v.2, Inv. paper, p.333.
5. Г.Н.Фурсей, П.Н.Воронцов-Вельяминов, ЖТФ **37**, 1870 (1967).
6. И.Н.Сливков. Процессы при высоком напряжении в вакууме. М.: Энергоатомиздат, 1986.
7. V.F.Puchkarev and M.B.Bochkarev. Proc. XY-th Intern. Symp. on Dischar. and Electrical Insul. in vacuum, Darmstadt, 1992, p.359.
8. Г.А.Месяц, Письма в ЖТФ **9**, 891 (1988).
9. T.Utsumi and I.H.English, J. Appl. Phys. **46**, 126 (1975).
10. Г.А.Месяц, Письма в ЖТФ **10**, 593 (1984).
11. И.Г.Кесаев. Катодные процессы электрической дуги. М.: Наука, 1968.