

О ПРИРОДЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ ИЗ ФЕРРОДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ

Г.А.Месяц

1. Введение

В последнее время появилось много работ об обнаружении и исследовании электронной эмиссии из ферродиэлектрической керамики, содержащей соединения PbZrO_3 , La_2O_3 и PbTiO_3 PLZT керамика, обзоры даны в [1,2], которая в зависимости от состава имеет $\varepsilon = 1 - 5 \cdot 10^3$ [3]. Конструкция катодов довольно проста. Пластина из керамики толщиной порядка $\delta \sim 1$ мм с одной стороны имеет много полос из серебра (сетка), а с другой — сплошной слой серебра (пусковой электрод, ПЭ). Толщина покрытий ~ 1 мкм. Параллельно сетке находится анод, к которому приложено ускоряющее напряжение. Сетка заземляется, а к ПЭ прикладывается пусковой импульс ($U < 2$ кВ, $t_{\text{и}} = 10^{-7}$ с). В таком диоде появляется электронный ток, который почти в 100 раз превосходит ток Чайльда-Ленгмюра. Появление этого тока имеет резко пороговый характер в зависимости от напряжения пускового импульса. Убедительной теории наблюдаемой эмиссии авторы [1,2 и др.] не дают, однако однозначно связывают ее с особыми свойствами PLZT керамики.

2. О металло-диэлектрических катодах

Эмиссия электронов из металлодиэлектрических катодов известна давно [4], обзоры даны в [5,6]. Устройства этих катодов абсолютно идентичны описанным в [1,2], только в качестве диэлектрика используется сегнетоэлектрик — титанат бария (BaTiO_3 $\varepsilon > 10^3$, ВТ керамика), а сетка изготовлена из тонких проводников, натянутых на керамику. Толщина керамики порядка $\delta \sim 1$ мм, амплитуда пускового импульса до 3 кВ при длительности 10^{-7} с. Таким образом, конструкции и параметры пускового импульса ВТ и PLZT катодов идентичны.

Исследования ВТ катодов [4-7] показали фундаментальную роль тройных точек (ТТ): металл-диэлектрик-вакуум,

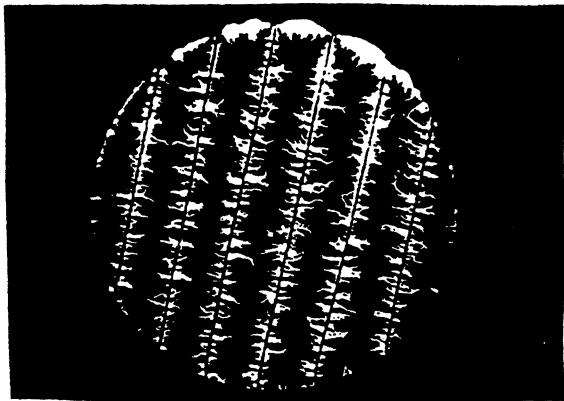


Рис. 1. Фотография разрядов по поверхности ВТ керамики, возникающих в точках контакта проволочной сетки с керамикой.

которые образуются в контакте металла сетки с диэлектриком. В этих точках инициируется микроразряд по поверхности диэлектрика, ток которого приводит к взрыву микроучастков сетки, контактирующих с диэлектриком. Это приводит к появлению хорошо изученной взрывной эмиссии электронов (ВВ) [6]. Пример разрядов на поверхности ВТ керамики дан на рис. 1. Ток электронов с таких катодов во много раз превосходил ток Чайльда-Ленгмюра [5].

Для исследования роли ТТ проводился специальный эксперимент. На одну сторону диска из ВТ керамики ($\delta = 2$ мм) вжигался слой серебра, а другой прижималась игла из вольфрама, которая заземлялась и была катодом диода. Анод находился на расстоянии $d \approx 1$ мм. К керамике прикладывался импульс напряжения $U_0 = 0.4 - 4$ кВ длительностью 2,4, 20, 50 нс. Регистрировались напряжение и ток через керамику, ток эмиссии электронов из острия, а также свечение разряда по поверхности диэлектрика. Импульс ускоряющего напряжения ($U = 25$ кВ, $t_{и} = 25$ нс) прикладывался между анодом и иглой. Разряд в окрестности иглы возникал при превышении порогового напряжения на диэлектрике. Через некоторое время появлялся электронный ток в диоде. Свечение вокруг иглы на поверхности диэлектрика имело форму круга и расширялось со скоростью $v = AU_0$, где $A = 5 \cdot 10^2 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{В}^{-1}$ при положительной полярности острия, и $A = 2 \cdot 10^3 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{В}^{-1}$ при отрицательной. С ростом напряжения U_0 от 1.8 до 3.1 кВ электронный ток с острия увеличивался от 5 до 13 А.

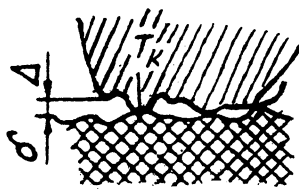


Рис. 2. Схематическое изображение контакта сетки с диэлектриком. δ — толщина диэлектрика, Δ — усредненная высота зазора металл-диэлектрик, r_k — средний радиус контакта.

3. Эмиссия электронов из PLZT катодов

Эти результаты позволяют понять эмиссию электронов как из ВТ, так и PLZT катодов. Сетка на поверхности керамики имеет много ТТ на краях из серебра. Разряд по диэлектрику инициируется заряженными частицами, которые появляются из-за высокого электрического поля E_m на поверхности в области ТТ. Это поле при $\delta \gg \epsilon \Delta$ (рис. 2) равно $E \approx U_0 \epsilon / \delta$. Так как $U_0 / \delta \approx 10^4$ В/см, а $\epsilon > 10^3$, то $E_m > 10^7$ В/см. Это поле в зависимости от полярности сетки в области ТТ приводит к эмиссии положительных или отрицательных частиц, инициирующих разряд по поверхности диэлектрика.

Ток смещения в области ТТ $i = U_0 dc/dt$, где c — динамическая емкость, образуемая плазмой разряда и ПЭ. Если $v_{gt} \ll \delta$, то $c = 4\epsilon_0 \epsilon v_{gt}$ [6]. Следовательно, $i = 4\epsilon_0 \epsilon A U_0^2$, где ϵ_0 — диэлектрическая константа. Этот ток будет протекать по контакту металл-диэлектрик через площадку $S_k = \pi r_k^2$, где r_k — радиус контактной зоны. Плотность тока будет равна $j_k = 4\epsilon_0 \epsilon A U_0^2 / \pi r_k^2$. Взрыв металлического контакта произойдет при условии $j_k^2 t_B = h$, где t_B — время взрыва, h — удельное действие, которое для серебра составляет $0.8 \cdot 10^9$ А² · см⁻⁴ · с. Время t_B определится из соотношения

$$t_B = \pi^2 h r_k^4 / 16 \epsilon_0^2 \epsilon^2 A^2 U_0^4. \quad (1)$$

Для получения однородного пучка нужно, чтобы для большого числа ТТ было $t_B \gg t_n$, т.е.

$$r_k \gg (16 \epsilon_0^2 \epsilon^2 A^2 U_0^4 t_n / \pi^2 h)^{1/4}. \quad (2)$$

Если длительность импульса $t_n = 10^{-7}$ с, $\epsilon = 10^3$, $U_0 = 10^3$ В, $A = 5 \cdot 10^2$ см · с⁻¹ · В⁻¹, то $r_k \gg 2 \cdot 10^{-5}$ см. То есть во всех ТТ с $r_k < 10^{-5}$ см в течение времени t_n произойдут микровзрывы металла и начнется ВВЭ.

Эти оценки объясняют некоторые факты функционирования PLZT катодов [1,2]. Например, высокая критичность появления эмиссии к напряжению U_0 следует из формулы (1), так как $t_b \sim U_0^{-4}$. Наличие кратковременных всплесков электронного тока следует из характера ВВЭ [6]. Увеличение тока электронов выше тока Чайльда-Ленгмюра объясняется предварительным заполнением диода катодной плазмой.

В заключение отметим, что, конечно, эти оценки приближенны. Однако идея появления взрывной эмиссии в тройных точках для объяснения эмиссии из ферродиэлектрических катодов представляется нам очень перспективной. Совершенно очевидно, что наблюдаемая эмиссия имеет место не только у PLZT керамик, но и у ВТ керамики и других диэлектриков в зависимости от параметров импульсов в пусковой цепи.

Список литературы

- [1] Schachter L., Ivers J.D., Nation J.A. // J. Appl. Phys. 1993. V. 73. N 12. P. 8097.
- [2] Gundel H. // Integrated Ferroelectrics. 1992. V. 2. P. 207.
- [3] Hench L.L., West J.K. Principles of Electronic Ceramics. 1991.
- [4] Бугаев С.П., Загулов Ф.Я., Ковальчук Б.М., Месяц Г.А. Импульсный источник больших электронных токов. Изв. вузов СССР. Физика. В. 1. С. 145. 1968.
- [5] Месяц Г.А. Управляемые источники электронов. В кн.: Ненакаливаемые катоды. М.: Сов. радио, 1974. С. 287.
- [6] Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Сов. радио, 1974. С. 256.
- [7] Бугаев С.П., Месяц Г.А. ДАН СССР. Т. 196. № 2. 1971. С. 324.

Институт электрофизики
УрО РАН
Екатеринбург

Поступило в Редакцию
16 ноября 1993 г.