

11;12

## О катодном инициировании вакуумного пробоя в импульсном режиме

© А.А. Емельянов, Е.А. Емельянова, Т.Н. Сафонова

Орловский государственный технический университет  
E-mail: emel@ostu.ru

Поступило в Редакцию 8 января 2004 г.  
В окончательной редакции 12 мая 2004 г.

На основании джоулева разогрева эмиттера термоавтоэлектронным током предложены критерии и методы оценки катодного инициирования вакуумного пробоя в импульсном режиме, применимые для катодов произвольной формы. Экспериментальная проверка на коаксиальных медных электродах ( $d = 0.2 \text{ mm}$ ,  $S = 2500 \text{ mm}^2$ ) в наносекундном диапазоне длительностей подтвердила справедливость предложенных критериев и методов.

Катодный механизм пробоя в вакууме связан с разрушением эмиттера протекающим через него током и в стационарном режиме соответствует достижению микронапряженностью электрического поля некоторого критического значения, определяемого физическими свойствами материала эмиттера [1]:

$$E = E_{cr}. \quad (1)$$

Критерий (1) справедлив не только в режиме постоянного тока, но и при достаточно больших длительностях высоковольтных импульсов  $t_p > 10^{-6} \text{ s}$ . Уменьшение длительности приводит к возрастанию микронапряженности, инициирующей пробой, и при  $t_p \leq 10^{-6} \text{ s}$  критерий инициирования связан с плотностью тока  $j$  и временем запаздывания  $t_d$  пробоя [2]

$$j^2 t_d = \text{const}. \quad (2)$$

В [3] высказано предположение, что накопление определяющих пробой факторов до критической величины  $G$  инициирует пробой, т.е.

критерием инициирования в импульсном режиме является

$$\int_0^{t_d} f(U) dt = G, \quad (3)$$

где  $f(U)$  — скорость накопления факторов, определяющих возникновение пробоя.

В случае катодного инициирования определяющим пробой фактором является энергия, выделяемая в эмиттере протекающим током. При выделении энергии, равной энергии разрушения эмиттера, иницируется пробой. С увеличением амплитуды импульса напряжения растет мощность, выделяемая в эмиттере, и уменьшается время запаздывания пробоя. При катодном инициировании критерий (3) принимает вид [4]

$$\int_0^{t_d} j^2 dt = \text{const}. \quad (4)$$

Практическое применение критерия (4) возможно только в случае классического эмиттера известной геометрии, позволяющего определять плотность тока. В случае катода с достаточно большой рабочей поверхностью геометрия микроэмиттера остается неизвестной и критерием (4) нельзя воспользоваться.

С целью разработки новых критериев и методов оценки катодного инициирования вакуумного пробоя, применимых для электродов произвольной геометрии, исследовано влияние высоковольтного кондиционирования импульсами длительностью, равной времени запаздывания пробоя, на качество поверхности катода и импульсную электрическую прочность изоляции.

Качество катодной поверхности характеризует коэффициент усиления поля  $\beta$  на ее микронеоднородностях. Обработка катода импульсами длительностью  $t_p = t_d$ , равной времени запаздывания пробоя, является оптимальным режимом кондиционирования и формирует поверхность, качество которой определяется мощностью кондиционирующих импульсов. Мощность импульсов оптимального режима задается макронапряженностью  $E_0$ , иницирующей пробой, при этом коэффициент  $\beta$ , характеризующий качество поверхности в результате обработки импульсами

$t_p = t_d$ , оказывается функцией пробивной напряженности [5]

$$\beta = \left( \frac{E_{cr}}{E_0} \right)^{0.9} \Big|_{t_p=t_d}, \quad (5)$$

где  $E_{cr} = 1.32 \cdot 10^{10}$  V/m — критическая напряженность, кондиционирование при которой дает идеальную поверхность с коэффициентом усиления  $\beta = 1$ , когда напряженности  $E$  на вершине и  $E_0$  у основания микровыступа оказываются равными  $E = E_0 = E_{cr}$ .

Используя зависимость (5), можно связать относительные изменения параметра  $\beta$  и импульсной электрической прочности  $E_0$ , достигаемые в результате кондиционирования импульсами  $t_p = t_d$ , и получить новую формулу критерия катодного иницирования, применимую для электродов с развитой рабочей поверхностью любой геометрии.

Поверхность катода, обработанную импульсами разной длительности  $t_{p1} = t_{d1}$  и  $t_{p2} = t_{d2}$ , характеризуют установившиеся и разные значения коэффициента усиления  $\beta_1$  и  $\beta_2$ . При катодном иницировании поверхности с параметрами  $\beta_1$  и  $\beta_2$  будут, в свою очередь, соответствовать разные значения электрической прочности  $E_{01}$  и  $E_{02}$  и напряжения импульсного пробоя  $U_1$  и  $U_2$ .

Введя в рассмотрение коэффициенты относительного изменения качества поверхности

$$K_\beta = \frac{\beta_1}{\beta_2} \quad (6)$$

и электрической прочности

$$K_U = \frac{U_2}{U_1}, \quad (7)$$

получим на основании (5), что в случае катодного иницирования для катода, обработанного импульсами  $t_p = t_d$ , выполняется условие

$$\frac{K_\beta}{K_U^{0.9}} \Big|_{t_p=t_d} = 1. \quad (8)$$

Выражение (8) представляет собой новую форму критерия катодного иницирования пробоя в импульсном режиме. Критерий связывает относительные изменения качества поверхности катода и импульсной электрической прочности в результате перехода при оптимальном

режиме кондиционирования от импульсов одной длительности  $t_{p1} = t_{d1}$  к импульсам другой длительности  $t_{p2} = t_{d2}$ .

Малые изменения поверхности характеризуют малые изменения параметров  $\beta$ , тогда его конечное значение  $\beta_2$ , достигаемое в результате кондиционирования импульсами  $t_{p2} = t_{d2}$ , можно представить через начальное значение  $\beta_1$  и малое приращение

$$\beta_2 = \beta_1 + \Delta\beta. \quad (9)$$

При катодном иницировании малому изменению параметра соответствует малое изменение электрической прочности и напряжения импульсного пробоя

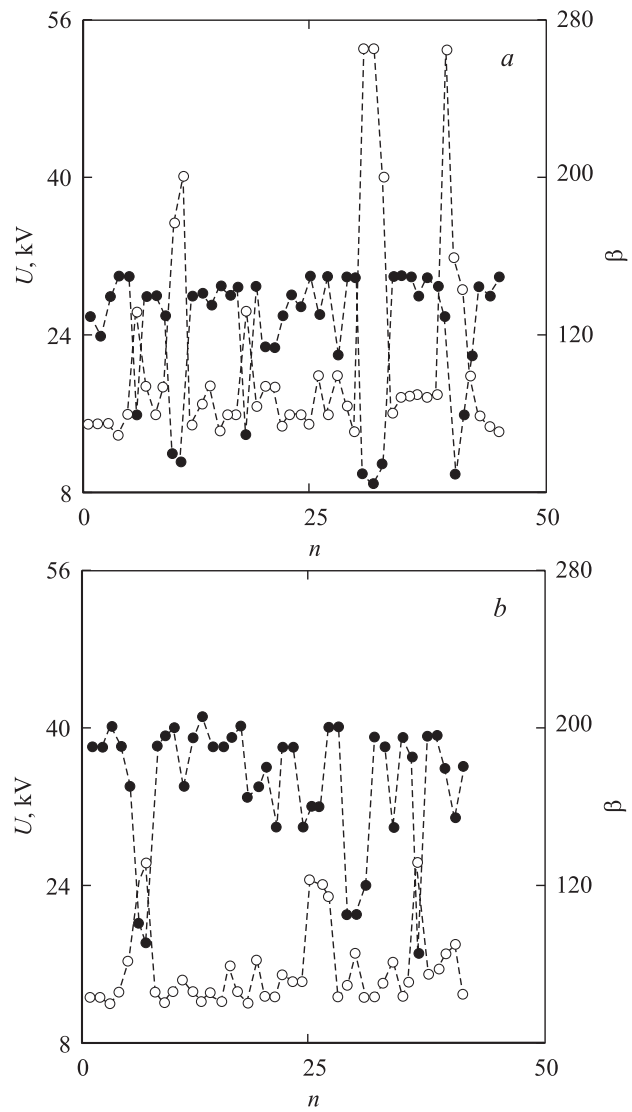
$$U_2 = U_1 + \Delta U. \quad (10)$$

В пренебрежении величиной второго порядка малости критерий (8) принимает вид

$$\frac{\Delta\beta}{\beta_1} = -0.9 \frac{\Delta U}{U_1} \Big|_{t_p=t_d}. \quad (11)$$

Согласно (11), относительному уменьшению коэффициента  $\beta$  ( $\Delta\beta < 0$ ) соответствует относительное повышение напряжения импульсного пробоя ( $\Delta U > 0$ ), а относительному ухудшению качества катодной поверхности ( $\Delta\beta > 0$ ) соответствует относительное ухудшение электрической прочности ( $\Delta U < 0$ ).

Проверка предложенных критериев (8) и (11) осуществлена на коаксиальных медных электродах площадью  $S = 2500 \text{ mm}^2$  при величине межэлектродного зазора  $d = 0.2 \text{ mm}$  и остаточном давлении  $P \approx 10^{-5} \text{ Pa}$ . В экспериментах использованы высоковольтные импульсы длительностью  $t_{p1} = 200 \text{ ns}$  и  $t_{p2} = 50 \text{ ns}$ . Перед каждым импульсным воздействием в режиме постоянного тока снималась вольт-амперная характеристика, по крутизне которой в координатах Фаулера–Нордгейма определялся коэффициент усиления  $\beta$ . После измерений на постоянном токе и оценки параметра  $\beta$  на промежуток подавали импульсы, амплитуду которых последовательно повышали до возникновения при минимальном перенапряжении первого пробоя. Перед началом измерений на каждой длительности осуществлено кондиционирование импульсами  $t_p \approx t_d$  до достижения установившихся значений коэффициента усиления и импульсной электрической прочности.



Изменение напряжения первого пробоя и коэффициента усиления поля с числом импульсов длительностью  $t_p = t_d$  в установившемся режиме:  $a$  —  $t_p = 200$  ns;  $b$  —  $t_p = 50$  ns;  $\bullet$  —  $U$ ;  $\circ$  —  $\beta$ .

На рисунке приведены графики изменения коэффициента усиления поля и определяемого им напряжения первого импульсного пробоя, соответствующие установившемуся режиму, с числом импульсов длительностью  $t_{p1} = 200$  ns и  $t_{p2} = 50$  ns.

Из сопоставления при  $t_p = \text{const}$  кривых  $\beta(n)$  и  $U(n)$  следует, что состояние поверхности коррелирует с электрической прочностью. Ухудшение качества поверхности (скачок  $\beta$  в сторону увеличения) приводит к снижению прочности (скачок  $U$  в сторону уменьшения) и, наоборот, улучшение качества поверхности (скачок  $\beta$  в меньшую сторону) сопровождается повышением прочности (скачок  $U$  в большую сторону). Корреляция изменений  $U$  и  $\beta$  подтверждает ответственность катодных процессов за инициирование импульсного пробоя.

В результате оптимальных режимов кондиционирования импульсами  $t_{p1} = 200$  ns средние значения коэффициента усиления и пробивного напряжения составили  $\bar{\beta}_1 = 107$  и  $\bar{U}_1 = 24.6$  kV при относительных разбросах  $\sigma_{\beta 1}/\bar{\beta}_1 = 0.46$  и  $\sigma_{U 1}/\bar{U}_1 = 0.27$ . Кондиционирование импульсами  $t_{p2} = 50$  ns повысило качество поверхности катода  $\bar{\beta}_2 = 77$  и увеличило прочность  $\bar{U}_2 = 34$  kV при уменьшении относительных разбросов  $\sigma_{\beta 2}/\bar{\beta}_2 = 0.3$  и  $\sigma_{U 2}/\bar{U}_2 = 0.19$ .

Использование критерия катодного инициирования импульсного пробоя (8) позволяет на основании относительных изменений качества поверхности  $K_\beta$  и импульсной электрической прочности  $K_U$  утверждать об ответственности катодного инициирования за нарушение прочности изоляции на импульсах  $t_p = 200$  ns и  $t_p = 50$  ns. Погрешность оценки составила  $\sim 3\%$ . Четырехкратное изменение длительности при переходе от импульсов  $t_p = 200$  ns к импульсам  $t_p = 50$  ns и обратно сопровождается  $\sim 40\%$  изменением качества поверхности и соответствующим  $\sim 40\%$  изменением электрической прочности. Относительный разброс величин  $\beta$  и  $U$  также изменяется на  $\sim 40\%$ . Критерий (11) подтвердил ответственность катодного механизма инициирования на импульсах  $t_p = 200$  ns и  $t_p = 50$  ns с погрешностью  $\sim 11\%$ .

Таким образом, предложены новые критерии и методы оценки катодного инициирования вакуумного пробоя в импульсном режиме, подтвержденные экспериментально на электродах с развитой рабочей поверхностью. Предложенные критерии могут быть использованы для оценки катодного механизма инициирования в вакуумных промежутках с произвольной геометрией электродов.

## Список литературы

- [1] *Alpert D., Lee D.A., Lyman F.M. et al. // J. Vac. Sci. Tech. 1964. V. 1. N 2. P. 35–50.*
- [2] *Карцев Г.К., Месяц Г.А., Проскуровский Д.И. и др. // Докл. АН СССР. 1970. Т. 129. № 2. С. 309–312.*
- [3] *Олендзкая Н.Ф., Сальман М.А. // ЖТФ. 1970. Т. 40. В. 2. С. 333–337.*
- [4] *Емельянов А.А., Кассиров Г.М. // Изв. вузов. Физика. 1976. В. 9. С. 105–110.*
- [5] *Емельянов А.А. // ПТЭ. 1997. № 5. С. 68–71.*