

02;11;12

О катодном инициировании пробоя в вакууме

© А.А. Емельянов, Е.А. Емельянова, И.О. Сериков

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

Поступило в Редакцию 24 ноября 2003 г.

Предложены новые методики и критерии оценки катодного инициирования вакуумного пробоя. Показано, что оптимальные режимы импульсного кондиционирования позволяют существенным образом улучшать состояние поверхности катода и при катодном инициировании дают основания для значительного повышения электрической прочности. Получено экспериментальное подтверждение предложенных методик в диапазоне $10 \leq t_p \leq 800$ ns.

При разработке технологических режимов, позволяющих получать высокие значения электрической прочности, важно знать механизм, ответственный за ее нарушение.

С целью разработки новых методов оценки механизма, инициирующего пробой в вакууме, рассмотрено катодное инициирование.

В стационарном режиме инициирование вакуумного пробоя происходит при достижении микронапряженностью электрического поля на катоде критического значения [1]

$$E = \beta E_0 = E_{cr}, \quad (1)$$

где β — коэффициент усиления напряженности электрического поля на микронеоднородностях катодной поверхности; E_0 — макронапряженность на катоде. Соотношение (1) является критерием катодного инициирования вакуумного пробоя в стационарном режиме.

Любое воздействие x на катодную поверхность, сопровождающееся изменением ее состояния, приводит к соответствующему изменению параметра β , характеризующего состояние этой поверхности, т.е. коэффициент усиления изменяется под влиянием воздействия $\beta(x)$. Изменение состояния поверхности сопровождается изменением электрической прочности и напряжения пробоя $E_0 \sim U \sim 1/\beta$. Напряжение первого после воздействия на поверхность пробоя является функцией воздействия и изменяется обратно пропорционально коэффициенту усиления $U(x) \sim \beta^{-1}(x)$, характеризующему состояние поверхности.

Эффективность воздействия x на поверхность катода отражает степень изменения ее состояния и может быть оценена относительной величиной

$$K_\beta = \frac{\beta_0}{\beta_x}, \quad (2)$$

где β_0, β_x — значения коэффициента усиления соответственно до и после воздействия x на катодную поверхность.

При $K_\beta > 1$ воздействие x сглаживает микронеоднородности, повышая качество поверхности. При $K_\beta < 1$ обработка катода завершается ростом микронеоднородностей на его поверхности, а качество самой поверхности ухудшается. При $K_\beta = 1$ воздействие x не влияет на поверхность катода.

Изменение состояния катодной поверхности отражается не только на величине параметра β , характеризующего ее качество, но и на величине напряжения первого по окончании воздействия пробоя. При катодном механизме инициирования напряжение пробоя обратно пропорционально параметру β , тогда эффективность воздействия x на поверхность катода вакуумного промежутка можно оценить и другой относительной величиной

$$K_U = \frac{U_x}{U_0}, \quad (3)$$

где U_x — напряжение первого пробоя по окончании воздействия x на поверхность катода; U_0 — установившееся значение пробивного напряжения до начала воздействия x .

При $K_U > 1$ воздействие x , сглаживая микронеоднородности поверхности, увеличивает напряжение первого пробоя. При $K_U < 1$ обработка катода, ухудшая его состояние, снижает электрическую прочность. При $K_U = 1$ воздействие не влияет на поверхность, а следовательно, и на электрическую прочность изоляции.

При катодном механизме инициирования относительные изменения коэффициента β и напряжения первого пробоя в результате одного и того же воздействия x отражают изменение состояния катодной поверхности и поэтому равны друг другу. Следовательно, критерий катодного инициирования вакуумного пробоя в стационарном режиме (1) можно представить в другом виде

$$\frac{K_\beta}{K_U} = 1. \quad (4)$$

В случае $K_\beta \neq K_U$ инициирование пробоя связано не с катодным, а с другим механизмом.

При малых изменениях поверхности и отражающих их изменениях коэффициента $\beta = \beta_0 + \Delta\beta$ ($\Delta\beta \ll \beta_0$) катодному инициированию будут соответствовать малые изменения напряжения первого пробоя $U = U_0 + \Delta U$ ($\Delta U \ll U_0$), тогда критерию катодного инициирования (4), в пренебрежении величиной второго порядка малости, соответствует выражение

$$\frac{\Delta U}{U_0} = -\frac{\Delta\beta}{\beta_0}. \quad (5)$$

Соотношение (5) является еще одной формой записи критерия катодного инициирования и справедливо при малых изменениях состояния поверхности катода. Относительному уменьшению коэффициента β ($\Delta\beta < 0$) должно быть равно относительное увеличение напряжения первого пробоя ($\Delta U > 0$), и наоборот, относительному ухудшению состояния катодной поверхности ($\Delta\beta > 0$) соответствует относительное снижение электрической прочности ($\Delta U < 0$).

Одним из способов воздействия на поверхность катода является его обработка высоковольтными импульсами, которая может завершиться инициированием вакуумного пробоя. При длительностях, меньших $1 \mu\text{s}$, катодное инициирование имеет место при выполнении условия [2]

$$\int_0^{t_d} j^2 dt = \text{const}, \quad (6)$$

где t_d — время запаздывания пробоя; j — плотность тока.

Согласно (6), для инициирования пробоя за время $t = t_d$ в микроэмиттере должна выделиться энергия, равная энергии его разрушения. Обработка катода импульсами длительностью $t_p = t_d$, равной времени

запаздывания, является оптимальным режимом, сглаживающим микро-неоднородности катодной поверхности и повышающим электрическую прочность изоляции [3]. Эффективность оптимальных режимов возрастает с уменьшением длительности импульсов при соответствующем увеличении их мощности. Увеличение мощности достигается повышением амплитуды импульсов, при этом напряженность электрического поля на катоде должна обеспечивать выполнение условия оптимальности $t_p = t_d$.

В субнаносекундном диапазоне напряженность достигает величины $E_0 \sim 10^{10}$ V/m. Создание такого силового воздействия осуществляют уменьшением межэлектродного промежутка до микронных размеров [4].

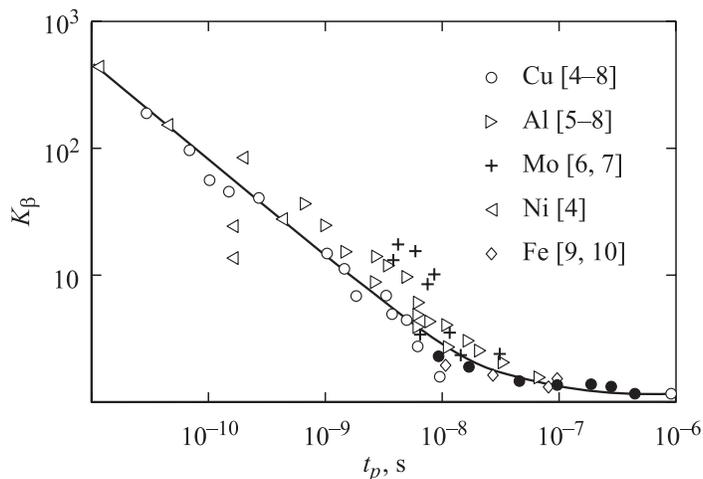
Оптимальные режимы импульсного кондиционирования являются инструментом воздействия на поверхность катода, позволяющим получать заданную величину коэффициента усиления вплоть до минимально возможной $\beta = 1$.

При экспериментальном определении времени запаздывания пробоя в вакууме электроды предварительно тренируют с минимальным пере-напряжением до получения стабильного напряжения пробоя, что соответствует реализации оптимального режима импульсного воздействия на катод. Анализ экспериментальных результатов по времени запаздывания на основании критерия катодного инициирования в нестационарном режиме (6) позволил построить для электродов из разных материалов зависимость $\beta = f(t_p)$ коэффициента усиления поля от длительности высоковольтных импульсов, соответствующих оптимальному режиму $t_p = t_d$ [3].

Из кривых $\beta = f(t_p)$, характеризующих изменение состояния поверхности катода в результате оптимальных режимов импульсного воздействия, легко оценить эффективность этих режимов.

Зависимость $K_\beta(t_n)$ эффективности оптимальных режимов импульсного воздействия на поверхность катода от длительности воздействия $t_p = t_d$, построенная в результате обработки известных экспериментальных данных по времени запаздывания [4–10], представлена рисунком.

Из приведенной кривой следует, что для обработки поверхности катода целесообразно использовать импульсы длительностью $t_p < 10^{-7}$ s. С уменьшением длительности эффективность импульсного воздействия возрастает и при длительностях $t_p \sim 10^{-10}$ s достигает величины, превышающей эффективность оптимальных режимов обработки в режиме постоянного тока более чем на два порядка.



Относительная эффективность импульсных режимов обработки катода как функция длительности кондиционирующих импульсов $t_p \approx t_d$; ● — результаты эксперимента авторов.

При реализации катодного механизма иницирования вакуумного пробоя относительное повышение электрической прочности $K_U(t_p)$, оцененное по изменению напряжения первого пробоя в стационарном режиме, с изменением длительности импульсов должно повторять кривую $K_\beta(t_p)$.

С целью проверки этого предположения измерено статическое напряжение пробоя до и после воздействия на катод высоковольтных импульсов $t_p \approx t_d$ в диапазоне от 800 до 10 ns. В экспериментах использовались вакуумные конденсаторы с коаксиальными медными электродами ($d = 0.2 \text{ mm}$; $S = 2500 \text{ mm}^2$; $C = 110 \text{ пФ}$) и вакуумные промежутки с электродами Роговского, выполненными из нержавеющей стали ($d = 0.12 \text{ mm}$; $S \approx 100 \text{ mm}^2$).

В использованном диапазоне $10 \leq t_p \leq 800 \text{ ns}$ экспериментальная кривая $K_U(t_p)$ точно совпадает с кривой $K_\beta(t_p)$, рассчитанной по времени запаздывания, что означает выполнение критериев (4) и (6) и подтверждает катодный механизм иницирования в режиме постоянного тока. Обработка поверхности катода импульсами $t_p = 10 \text{ ns}$ ($n = 50$), соответствовавшая эффективности $K_U = 1.8$, позволила достичь элек-

трической прочности $E_0 = 2.1 \cdot 10^8$ V/m, близкой к предельным результатам, полученным в результате многочасового прогрева (~ 18 h) и обработки тлеющим разрядом в аргоне в течение часа [11].

Как следует из приведенных результатов, применение оптимальных режимов импульсного кондиционирования позволяет существенным образом улучшать состояние катодной поверхности, уменьшая величину коэффициента β . При условии катодного инициирования это дает основания для существенного повышения электрической прочности. Использование предложенных методов целесообразно при выполнении исследований механизма инициирования пробоя при предельных значениях электрической прочности. Такие исследования позволят определить верхнюю границу применимости катодного механизма при предельно высокой электрической прочности и дать ответ на вопрос о достижимости электрической прочности, равной критической, $E_0 = E_{cr}$ в режиме постоянного тока.

Таким образом, предложены новые методы и критерии оценки катодного инициирования пробоя в вакууме на постоянном токе. Показано, что оптимальные режимы импульсного кондиционирования электродов позволяют достигать предельных значений электрической прочности вакуумной изоляции. Для оценки механизма инициирования пробоя при предельной электрической прочности в стационарном режиме целесообразно использовать предложенные методы и критерии.

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] *Емельянов А.А., Кассиров Г.М.* // Изв. вузов. Физика. 1976. № 9. С. 105–110.
- [3] *Емельянов А.А.* // ПТЭ. 1997. № 5. С. 68–71.
- [4] *Jüttner B., Rohrbeck W., Wolff H.* // Proc. IXth ICPIG. Bucharest, 1969. P. 140.
- [5] *Кассиров Г.М.* // ЖТФ. 1966. Т. 36. № 10. С. 1883–1885.
- [6] *Месяц Г.А., Бугаев С.П., Проскуровский Д.И. и др.* // Радиотехника и электроника. 1969. Т. 14. № 12. С. 2222–2230.
- [7] *Вавилов С.П., Месяц Г.А.* // Изв. вузов. Физика. 1970. № 8. С. 90–94.
- [8] *Каляцкий И.И., Кассиров Г.М., Смирнов Г.В. и др.* // ЖТФ. 1975. Т. 45. № 7. С. 1547–1550.
- [9] *Олендзская Н.Ф., Сальман М.А.* // ЖТФ. 1970. Т. 40. № 2. С. 333–337.
- [10] *Chalmers I.D., Phukan B.D.* // Vacuum. 1982. V. 32. N 3. P. 145–150.
- [11] *Чистяков П.Н., Радионовский А.Л., Татарина Н.В. и др.* // ЖТФ. 1969. Т. 39. № 6. С. 1075–1079.