

07

К вопросу о нижней границе времени запаздывания пробоя в вакууме

© А.А. Емельянов, Е.А. Емельянова

Орловский государственный технический университет

E-mail: emel@ostu.ru

Поступило в Редакцию 4 мая 2006 г.

На основании джоулева механизма инициирования вакуумного пробоя рассчитана зависимость импульсной электрической прочности от длительности высоковольтного импульса с конечной скоростью нарастания напряженности электрического поля в промежутке. Результаты расчетов подтверждены известными экспериментальными данными в субнаносекундном диапазоне длительностей. Показано отсутствие нижней границы времени запаздывания при наблюдаемой в экспериментах электрической прочности до $\sim 3 \cdot 10^{10}$ V/m. Независимость времени запаздывания от напряженности электрического поля для длительностей, соизмеримых с длительностью фронта, объяснена конечной скоростью нарастания напряженности.

PACS: 51.50.+v

Достижению высокой электрической прочности вакуумной изоляции посвящено значительное количество работ, основные результаты которых обобщены в [1,2]. Экспериментальные данные получены при различных условиях как в стационарном, так и в импульсном режиме. Предельная электрическая прочность на постоянном токе в промежутке $d = 0.12$ mm с электродами из молибдена достигает величины $E_0 \sim 5 \cdot 10^8$ V/m [3].

В импульсном режиме электрическая прочность превышает прочность на постоянном токе, возрастая с уменьшением длительности импульсов. Максимальная электрическая прочность, достигнутая в [4] при исследовании запаздывания вакуумного пробоя в микронных зазорах на импульсах субнаносекундной длительности, на два порядка величины превышает прочность в стационарном режиме, составляя $E_0 \sim 3 \cdot 10^{10}$ V/m. В экспериментах напряженность электрического поля в промежутке между полусферическими электродами диаметром 1.4 mm регулировалась изменением межэлектродного расстояния в диапазоне

$3 \leq d \leq 200 \mu\text{m}$. К электродам прикладывались импульсы напряжения фиксированной амплитуды. Критическое состояние, приводящее к возникновению пробоя, достигалось изменением длительности импульсов. Полученные экспериментальные результаты для времени запаздывания аппроксимированы экспоненциальной зависимостью от напряженности электрического поля

$$t_d = t_0 \exp\{b/E_0\}, \quad (1)$$

где $t_0 \approx 10\text{--}100 \text{ ps}$, $b > 0$, $E_0 = U/d$.

По результатам работы авторами сделан вывод о невозможности снижения времени запаздывания пробоя ниже величины $t_0 \approx 10\text{--}100 \text{ ps}$. Наличие нижней границы запаздывания объяснено ограниченностью либо времени жизни дискретно расположенных эмиссионных центров, либо самой эмиссии с них. Полученные в [4] результаты по электрической прочности $E_0 \sim 3 \cdot 10^{10} \text{ V/m}$ не превзойдены к настоящему времени, а вывод о наличии нижней границы для времени запаздывания не обсуждался в научной литературе.

С целью выяснения причины, ограничивающей снизу время запаздывания пробоя, известные экспериментальные результаты, полученные в субнаносекундном диапазоне длительностей, проанализированы с позиций джоулева инициирования при учете конечной скорости нарастания напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке.

При измерении времени запаздывания приближение к критическому состоянию, инициирующему вакуумный пробой, происходило в [4] за счет увеличения длительности высоковольтного импульса, амплитуда которого оставалась постоянной. Обработка электродов импульсным разрядом осуществлялась в отсутствие или при минимальном перенапряжении на промежутке, когда длительность импульсов оказывалась равной времени запаздывания пробоя $t_p \approx t_d$. Воздействие импульсов $t_p \approx t_d$ соответствует оптимальному режиму кондиционирования. Оптимальный режим формирует вполне определенное состояние поверхности катода, характеризуемое коэффициентом усиления поля β . Качество катодной поверхности в результате оптимального режима обработки определяется напряженностью электрического поля, инициирующей пробой [5]

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

где $E_{cr} = 1.32 \cdot 10^{10} \text{ V/m}$.

Применение механизма джоулева инициирования к оптимальным режимам импульсного кондиционирования позволило представить время запаздывания пробоя в вакууме как функцию макронапряженности электрического поля и физических постоянных материала катода для импульсов напряжения разной формы [6]:

прямоугольный импульс с бесконечно коротким фронтом

$$t_d = 1.57 \cdot 10^{-25} \frac{a\rho c}{\kappa_0} \varphi^2 \exp\{-21.6\varphi^{-1/2}\} \frac{\exp\{10.3\varphi^{3/2}E_0^{-0.1}\}}{E_0^{0.4}}, \quad (2)$$

косоугольная волна

$$t_{d2} = 10.3 \frac{\varphi^{3/2}}{E_0^{0.1}} t_d, \quad (3)$$

прямоугольный импульс с конечным фронтом

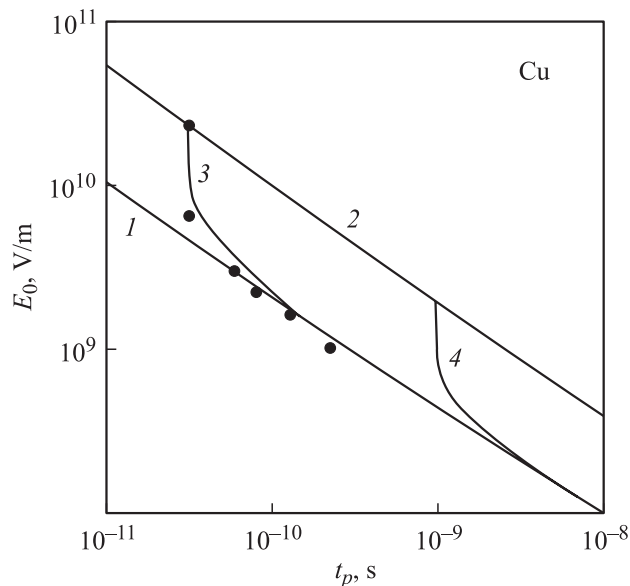
$$t_{d1} = t_d + t_f (1 - 0.097\varphi^{-3/2}E_0^{0.1}), \quad (4)$$

где a , ρ , c , κ_0 , φ — соответственно величина, определяемая критической температурой и медленно изменяющаяся с изменением напряженности электрического поля; плотность; удельная теплоемкость; коэффициент пропорциональности в зависимости удельного сопротивления от температуры; работа выхода материала эмиттера.

По выражениям (2)–(4) для медных электродов в субнаносекундном диапазоне были рассчитаны зависимости электрической прочности от длительности импульсов оптимального режима кондиционирования $E_0(t_p)$. При расчете использовались значения физических постоянных для меди [7]: $\rho = 8930 \text{ kg/m}^3$; $c = 386 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$; $\kappa_0 = 7 \cdot 10^{11} (\Omega \cdot \text{m})/\text{K}$; $\varphi = 4.4 \text{ eV}$; $T_f = 1083^\circ\text{C}$. Считая, что в эксперименте [4] максимальная электрическая прочность $E_0 \sim 3 \cdot 10^{10} \text{ V/m}$ и наименьшее время запаздывания $t_d = 3 \cdot 10^{-11} \text{ s}$ были получены на фронте прямоугольного импульса, длительность фронта была принята нами равной минимальной длительности $t_{le} = 3 \cdot 10^{-11} \text{ s}$.

Зависимости электрической прочности от длительности импульсов оптимального режима кондиционирования для медных электродов приведены на рисунке.

Из приведенных кривых $E_0(t_p)$ следует, что при $t_p = \text{const}$ электрическая прочность на идеальном прямоугольном импульсе с бесконечно



Электрическая прочность как функция длительности импульсов $t_p = t_{le}$ для прямоугольного импульса: 1 — $t_{le} = 0$; 2 — $t_{le} = 3 \cdot 10^{11}$ s, — и косоугольной волны напряжения: 3 — $dE/dt \sim 10^{21}$ V/(m · s); 4 — $dE/dt \sim 2 \cdot 10^{18}$ V/(m · s); ● — эксперимент [4].

коротким фронтом (кривая 1) меньше прочности на косоугольной волне напряжения (кривая 2) более чем в четыре раза. Прочность для прямоугольного импульса $t_p \sim t_{le}$, длительность которого соизмерима с длительностью фронта (кривая 3), выше прочности на идеальном прямоугольном импульсе, но ниже прочности для косоугольной волны. В диапазоне $3 \cdot 10^{10} \leq E_0 \leq 10^{10}$ V/m прочность для импульса с фронтом $t_{le} = 3 \cdot 10^{-11}$ s не зависит от длительности импульса и определяется скоростью нарастания напряженности электрического поля $dE/dt \sim 10^{21}$ V/(m · s). С уменьшением длительности t_p прочность для импульса с большей скоростью нарастания превосходит прочность для импульса с менее крутым фронтом $t_{le} = 10^{-9}$ s (кривая 4).

При неизменной электрической прочности $E_0 = \text{const}$ длительность импульса $t_p = t_{d2}$ для косоугольной волны напряжения превышает дли-

тельность $t_p = t_d$ для идеального прямоугольного импульса на порядок величины. В случае прямоугольного импульса с конечным фронтом длительность занимает промежуточное положение. При длительностях $t_{le} \leq t_p \leq 3t_{le}$, соизмеримых с длительностью фронта, влияние прямоугольной части импульса на электрическую прочность пренебрежимо мало по сравнению с фронтом, что создает эффект нижней границы запаздывания вакуумного пробоя (кривые 3, 4), когда время запаздывания волны не изменяется с изменением электрической прочности. Для косоугольной волны запаздывание обратно пропорционально скорости нарастания напряженности электрического поля $t_{d2} \sim (dE/dt)^{-1}$ и возрастает с ее уменьшением. Дальнейшее уменьшение времени запаздывания возможно в результате увеличения скорости нарастания напряженности в промежутке при работе как с прямоугольной частью (кривая 1), так и с фронтом (кривая 2) импульса.

Экспериментальные результаты, полученные в субнаносекундном диапазоне длительностей и соответствующие оптимальным режимам импульсного кондиционирования, подтверждают выполненные расчеты. Измерение времени запаздывания на импульсах, соизмеримых с длительностью фронта, указывает на независимость запаздывания от электрической прочности в диапазоне $3 \cdot 10^{10} \leq E_0 \leq 10^{10} \text{ V/cm}$.

Эффект нижней границы времени запаздывания определен конечностью скорости нарастания напряженности электрического поля, составлявшей $dE/dt \sim 10^{21} \text{ V/(m} \cdot \text{s)}$. Для снижения времени запаздывания пробоя ниже величины $t_0 \approx 10\text{--}100 \text{ ps}$ следует использовать высоковольтные импульсы с более крутым фронтом при скоростях нарастания напряженности $dE/dt \sim 10^{22} \text{ V/(m} \cdot \text{s)}$.

Таким образом, рассмотрен вопрос о нижней границе запаздывания вакуумного пробоя. С позиций джоулева механизма инициирования показано отсутствие такой границы в субнаносекундном диапазоне длительностей. Наблюдаемое в эксперименте постоянство времени запаздывания пробоя при изменении напряженности в диапазоне $3 \cdot 10^{10} \leq E_0 \leq 10^{10} \text{ V/m}$ объяснено конечностью скорости нарастания фронта импульса. Показано, что для получения времен запаздывания меньших $\sim (10\text{--}100) \text{ ps}$ следует использовать высоковольтные импульсы с более крутым фронтом при скоростях нарастания напряженности $\sim 10^{22} \text{ V/(m} \cdot \text{s)}$.

Список литературы

- [1] *Сливков И.Н.* Электроизоляция и разряд в вакууме. М.: Атомиздат, 1972. 304 с.
- [2] *Латам Р.* Вакуумная изоляция установок высокого напряжения / Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1985. 192 с.
- [3] *Chistyakov P.N., Dubinin N.P.* // Proc. VII IS DEIV. Novosibirsk, 1976. P. 463–466.
- [4] *Jüttner B., Rohrbeck W., Wolff H.* // Proc. IX IC FIG. Bucharest, 1969. P. 140.
- [5] *Емельянов А.А.* // ЖТФ. 2005. Т. 75. В. 5. С. 113–118.
- [6] *Емельянов А.А.* // ЖТФ. 2003. Т. 73. В. 9. С. 113–119.
- [7] *Физические величины: Справочник* / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.