

О ВРЕМЕНИ ЗАПАЗДЫВАНИЯ ПРОБОЯ ПРЕССОВАННОГО АЗИДА СВИНЦА

В. В. Стеньгач

(Москва)

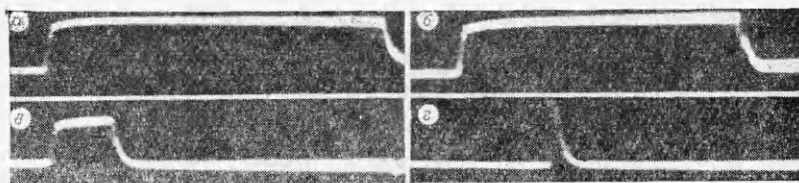
Получены данные о времени запаздывания пробоя и электрической прочности твердого пористого диэлектрика с пористостью 0,4 (прессованный азид свинца) при различных длительностях прямоугольного импульса напряжения от 10^{-8} до $2 \cdot 10^{-6}$ с.

Важными характеристиками импульсного пробоя диэлектриков являются время запаздывания пробоя и электрическая прочность. Запаздывание пробоя наблюдается как для газов, так и для твердых диэлектриков. Оно состоит из статистического запаздывания и времени формирования разряда. В газах наблюдалось запаздывание пробоя 10^{-4} с и более [1-3]. В твердых диэлектриках запаздывание пробоя значительно меньше $(1-8) \times 10^{-8}$ с [4,5]. При таких малых экспозициях в твердых диэлектриках наблюдалось увеличение электрической прочности [6]. Если в газах значительную часть времени запаздывания пробоя составляет статистическое запаздывание и лишь при обеспечении мощной ионизации искрового промежутка время запаздывания будет состоять только из времени формирования разряда, то в твердых телах время запаздывания состоит в основном из времени формирования разряда.

Представляют интерес данные по времени запаздывания двухфазных диэлектриков, состоящих из твердого тела и газа. Представителем такого диэлектрика является прессованный азид свинца, состоящий из кристаллов азид свинца и воздуха, который исследуется в данной работе. Изучение пробоя азид свинца и выяснение его механизма представляет интерес и для изучения чувствительности его к электрической искре.

Методика эксперимента. Порошкообразный азид свинца с величиной кристаллов 1-3 мк запрессовывался между полусферическими стальными электродами до плотности 2,8 г/см³. При этом в твердом диэлектрике создавалась пористость 0,4 (40% объема занимал воздух). В образцах радиус закругления электродов был значительно больше расстояния между электродами, так что в наиболее тонком месте искрового промежутка создавалось поле, близкое к однородному.

Пробой образцов осуществлялся на импульсах прямоугольной формы различной длительности. Напряжение на образце поднималось ступенями. На фиг. 1 приведены типичные осциллограммы: *a* — импульс напряжения длительностью $7 \cdot 10^{-7}$ с; *b*, *в*, *г* — пробой с запаздыванием $5,9 \cdot 10^{-7}$; $1,3 \cdot 10^{-7}$; 10^{-8} с.



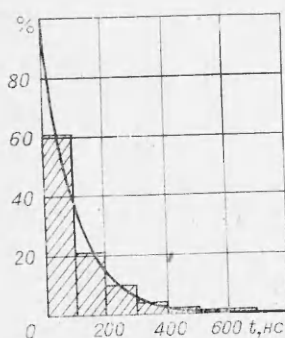
Ф и г. 1

Электрическая прочность E определялась для различных длительностей прямоугольного импульса по значениям пробивного напряжения и расстояния между электродами. При каждой длительности импульса величина E определялась как среднее арифметическое из 10 опытов, причем каждый образец пробивался только один раз, так как повторные пробои происходят при более низких напряжениях.

Время запаздывания пробоя t определялось временным интервалом от момента, когда напряжение на электродах образца достигает значения статического пробивного напряжения, до момента фактического пробоя, фиксируемого началом резкого спада напряжения на осциллограмме.

Результаты опытов. С увеличением длительности прямоугольного импульса напряжения в интервале 10^{-8} — $2 \cdot 10^{-6}$ с увеличивается среднее арифметическое и максимально наблюдаемое в опытах время запаздывания пробоя прессованного азида свинца с пористостью 0,4. Максимальное значение времени запаздывания пробоя может достигать почти полной длительности импульса (фиг. 2, где приведена зависимость времени запаздывания пробоя t от длительности импульса t_0 , 1 — максимальные значения, 2 — средние значения). Среднее арифметическое значение времени запаздывания пробоя меньше половины длительности импульса. Зависимость электрической прочности прессованного азида свинца E от длительности прямоугольного импульса t_0 представлена на фиг. 3. При уменьшении длительности прямоугольного импульса напряжения сначала происходит незначительное увеличение E . Начиная с длительности импульса напряжения 2 — $3 \cdot 10^{-8}$ с, при дальнейшем уменьшении длительности импульса происходит быстрый рост E .

На фиг. 4 представлена гистограмма распределения времени запаздывания пробоя при определенной длительности импульса ($7 \cdot 10^{-7}$ с) и напряженности поля 300 кВ/см при вероятности пробоя 90%. Сплошной линией изображена экспоненциальная кривая

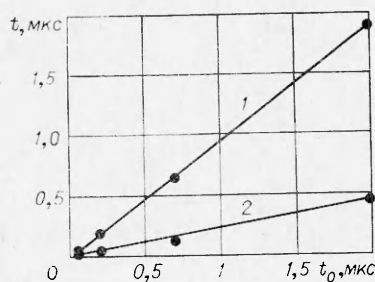


Фиг. 4

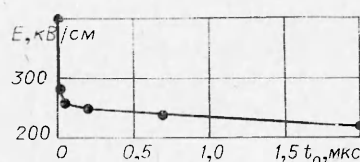
$$(1) \quad f(t) = n_0 \exp(-k^* t),$$

где $n_0 = 100\%$; t — время запаздывания; $k^* = -1/t^*$; t^* — среднее арифметическое время запаздывания (из обработки осциллограмм пробоя 200 образцов, $t^* = 1,1 \cdot 10^{-7}$). Из сравнения гистограммы распределения и экспоненциальной кривой видно, что при определенной длительности прямоугольного импульса напряжения распределение времени запаздывания описывается экспоненциальным законом.

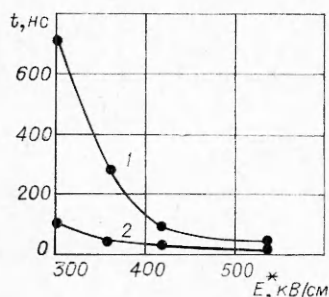
На фиг. 5 приведена зависимость времени запаздывания пробоя прессованного азида свинца от величины предпробивной напряженности



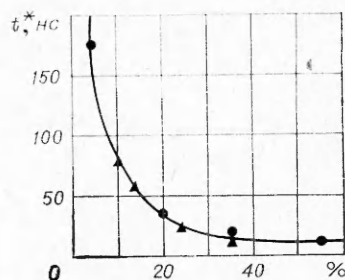
Фиг. 2



Фиг. 3



Ф и г. 5



Ф и г. 6

электрического поля при длительности импульса напряжения $7 \cdot 10^{-7}$ с (1 — максимально наблюдавшиеся значения, 2 — средние арифметические значения). Увеличение напряженности поля в импульсе приводит к тому, что среднее и максимально наблюдаемое время запаздывания уменьшается. Зависимости $t=f(E)$ имеют вид экспоненты.

Зависимость среднего арифметического времени запаздывания пробоя t^* (нс) от перенапряжения (%) представлена на фиг. 6. Треугольники соответствуют длительности импульса $2 \cdot 10^{-7}$ с, а кружки — $7 \cdot 10^{-7}$ с. Среднее арифметическое время запаздывания пробоя уменьшается с увеличением перенапряжения (или напряженности электрического поля). Точки для указанных двух длительностей импульса ложатся на одну кривую.

Обсуждение результатов. Пористый диэлектрик, в котором большая часть объема занята твердым телом (прессованный азид свинца с пористостью 0,4), по величине времени запаздывания ($2 \cdot 10^{-6}$ с) и по закону распределения времени запаздывания (экспонента) подобен воздуху [7]. В твердом диэлектрике время запаздывания пробоя значительно меньше [4].

Распределение времени запаздывания пробоя, которое состоит из статистического времени запаздывания и времени формирования пробоя, подчиняется экспоненциальному закону (1), что указывает на то, что время запаздывания пробоя при длительности импульса напряжения $7 \cdot 10^{-7}$ с состоит из статистического времени запаздывания.

Экспоненциальный закон распределения времени запаздывания пробоя вытекает из того, что появление электрона где-либо около катода в воздушной поре, необходимого для начала пробоя, представляет собой случайное явление. Вероятность $w(t)$ того, что пробой наступит не ранее, чем через данный промежуток времени t , выражается экспоненциальной функцией [7]

$$w(t) = \exp(-k^*t),$$

где k^* — константа, равная обратной величине среднего времени запаздывания пробоя. Количество образцов n , пробившихся с запаздыванием в интервале от t_1 до t_2 , из общего количества испытанных образцов N имеет вид

$$n = N[\exp(-k^*t_1) - \exp(-k^*t_2)].$$

О времени формирования разряда можно судить по зависимости электрической прочности E от длительности действия электрического поля, если принять, как это делается для жидких диэлектриков [8],

что резкий рост E начинается тогда, когда время запаздывания пробоя примерно равно времени формирования разряда. Из фиг. 3 можно принять, что время формирования прессованного азида свинца толщиной 0,2 мм примерно $2 \cdot 10^{-8}$ с.

Уменьшение времени запаздывания (максимального и среднего) при увеличении напряженности электрического поля (см. фиг. 5) связано с уменьшением статистического времени запаздывания. Время формирования разряда тоже, конечно, уменьшается, но его доля в общем времени запаздывания пробоя небольшая. Сокращение статистического времени запаздывания с увеличением напряженности поля в импульсе E^* происходит, по-видимому, потому что при увеличении E^* увеличивается вероятность появления родоначального электрона в нужном месте (например, за счет увеличения тока автоэлектронной эмиссии).

При определенной напряженности поля среднее время запаздывания не зависит от продолжительности его действия, если оно больше времени формирования разряда, что видно на фиг. 6, где точки с длительностью импульса $2 \cdot 10^{-7}$ и $7 \cdot 10^{-7}$ с ложатся на одну кривую.

Оценка средней скорости распространения разряда по формуле $v = d/t_{\phi}$ (d — расстояние между электродами, t_{ϕ} — время формирования разряда) дает величину $v = 10^6$ см/с. Эта величина скорости значительно меньше скорости распространения лавины электронов или стримера в условиях опыта [$9, 10$]. Она примерно равна скорости распространения положительных ионов в воздушных порах вещества.

Приведенные экспериментальные данные и оценка скорости распространения разряда дают основание полагать, что пробой пористого диэлектрика с открытой пористостью начинается с появления электрона у катода и завершается тогда, когда положительные ионы, образованные в воздушных порах у анода ударной ионизацией, достигнут катода и завершат образование плазменного шнура.

Поступила 18 IV 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. Сканиви Г. И. Физика диэлектриков (область сильных полей). М., Физматгиз, 1958.
2. Мик Д., Крэгс Д. Электрический пробой в газах. М., ИЛ, 1960.
3. Капцов Н. А. Электроника. М., ГИТТЛ, 1954.
4. Воробьев А. А., Воробьев Г. А. Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков. М., «Высш. школа», 1966.
5. Воробьев А. А., Сончик К. К. Некоторые закономерности запаздывания разряда в твердых диэлектриках. — В кн.: Физика диэлектриков. М., Изд. АН СССР, 1960.
6. Мельников М. А. Исследование импульсного пробоя некоторых полимеров и слюды. — В кн.: Физика диэлектриков. М., Изд. АН СССР, 1960.
7. Капцов Н. А. Электрические явления в газах и вакууме. М.—Л., ГИТТЛ, 1950.
8. Балыгин И. Е. Электрическая прочность жидких диэлектриков. М.—Л., «Энергия», 1964.
9. Стеньгач В. В. Об электрической прочности прессованного азид свинца. — ПМТФ, 1972, № 1.
10. Эфендиев А. З. Исследование импульсного пробоя газов и скорости развития электронных лавин. — ЖТФ, 1957, № 5.