

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ МОНОКРИСТАЛЛОВ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ ЩЕЛОЧНО-ГАЛОИДНЫХ СОЛЕЙ С ЗАМЕЩЕННЫМ ГАЛОИДОМ

А. М. ТРУБИЦЫН

Повышение электрической прочности твердых диэлектриков имеет большое значение для современной практической электротехники. Известно, что механическую прочность металлов можно увеличить введением определенных присадок. Наука располагает рядом теоретических и экспериментальных исследований, посвященных изучению возможности применения этого метода для электрического упрочнения твердых диэлектриков.

На основании своей теории электрического пробоя твердых диэлектриков Фрелих [1, 2] произвел количественный расчет изменения электрической прочности ионных кристаллов в результате введения примесей в их структуру. При этом Фрелих исходил из предположения, что в твердых диэлектриках поведение электронов, участвующих в электрическом пробое, можно рассматривать аналогично поведению электронов в металлах, и воспользовался разработанным Моттом методом расчета дополнительного рассеяния электронов инородными атомами в металлах. Укорочение длины свободного пробега электронов из-за дополнительного рассеяния затрудняет накопление электроном энергии, достаточной для ионизации. Таким образом, по Фрелиху, при введении примесей должно наблюдаться увеличение электрической прочности ионных кристаллов.

С точки зрения квантовых теорий электрического пробоя твердых диэлектриков примеси и другие нарушения структуры твердого диэлектрика изменяют энергетический спектр кристаллической решетки, вызывают возникновение дискретных уровней в запретной зоне. Наличие дозволенных энергетических уровней, расположенных близко к зоне проводимости, может облегчить переход электронов в эту зону и тем самым привести к пробое при меньшем приложенном напряжении.

Согласно теории А. А. Воробьева и Е. К. Завадовской, кроме этих двух явлений, имеющих место в диэлектрике одновременно, необходимо учитывать изменение взаимодействия между узлами кристаллической решетки. Если введение примеси сопровождается ослаблением связи частиц в твердом диэлектрике, то есть если энергия решетки уменьшается, можно ожидать уменьшения электрической прочности твердого диэлектрика. Если же примеси усиливают взаимодействие частиц в твердом диэлектрике, то есть увеличивают энергию решетки, можно ожидать электрического упрочнения диэлектрика.

Таким образом, теории электрического пробоя, по-разному учитывая влияние примесей, приходят к противоречивым результатам.

Результаты экспериментальных исследований также противоречивы. По данным Хиппеля и его сотрудников [3, 4], добавка примерно пяти молекулярных процентов AgCl приводит к увеличению электрической прочности NaCl от $1,7 \cdot 10^6$ до $2,8 \cdot 10^6$ в/см; у системы твердых растворов KCl—RbCl изменение электрической прочности с химическим составом

выражается кривой с максимумом в области 20—30 мол% RbCl; добавки KCl к KBr и KBr к KCl заметно увеличивают электрическую прочность относительно чистых кристаллов.

Исследования Н. Б. Богдановой [5] показывают, что у системы твердых растворов KJ—KBr график зависимости электрической прочности химического состава имеет вид кривой с минимумом при средних процентных содер-

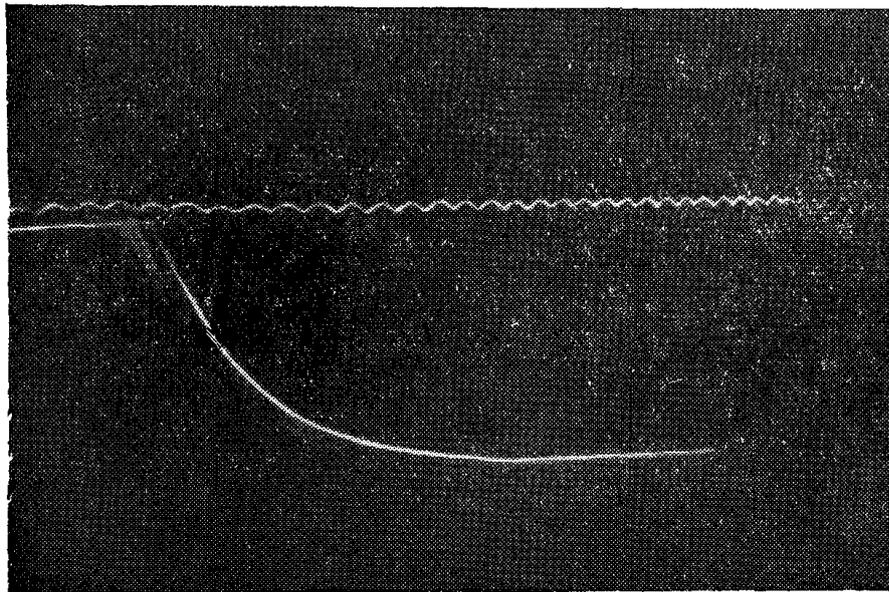


Рис. 1. Осциллограмма импульса высокого напряжения.

жаниях. Систематическое уменьшение электрической прочности KJ наблюдалось Н. Б. Богдановой при введении в KJ до 40 мол% NaJ.

У нас сложилось впечатление, что противоречивость экспериментальных данных обусловлена несовершенством ранее применявшейся методики

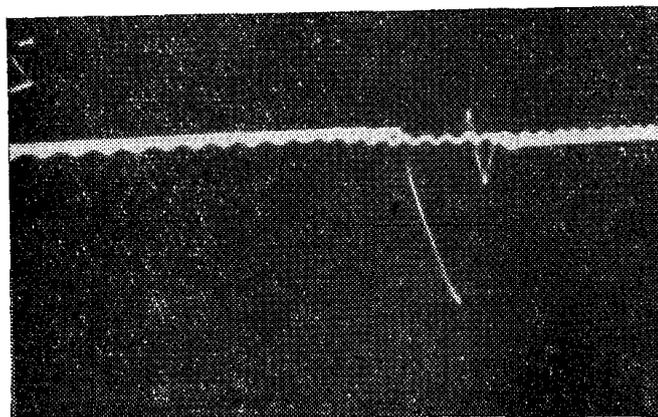


Рис. 2. Осциллограмма напряжения при пробое образца.

измерения электрической прочности. Анализируя возможность влияния вторичных эффектов на электрическую прочность монокристаллов, мы выбрали такие условия опытов, в которых эти влияния отсутствуют или сведены к минимуму.

Образцы пробивались на фронте одиночного импульса высокого напряжения. Время повышения напряжения до пробивного не превышало 4,3 мксек. Образцы с лункой диаметром 10 мм против плоскости изготавливались из монокристаллов, выращенных из расплава солей с помощью охлаждаемой затравки. Электроды наносились испарением металла в вакууме. Испытания производились в трансформаторном масле при комнатной температуре. Применение осциллографической техники с фотозаписью осциллограмм пробоя позволило увеличить точность измерения напряжения и ввести объективную оценку качества экспериментов. На рис. 1 представлена осциллограмма импульса высокого напряжения, на рис. 2—типичная осциллограмма пробоя образца.

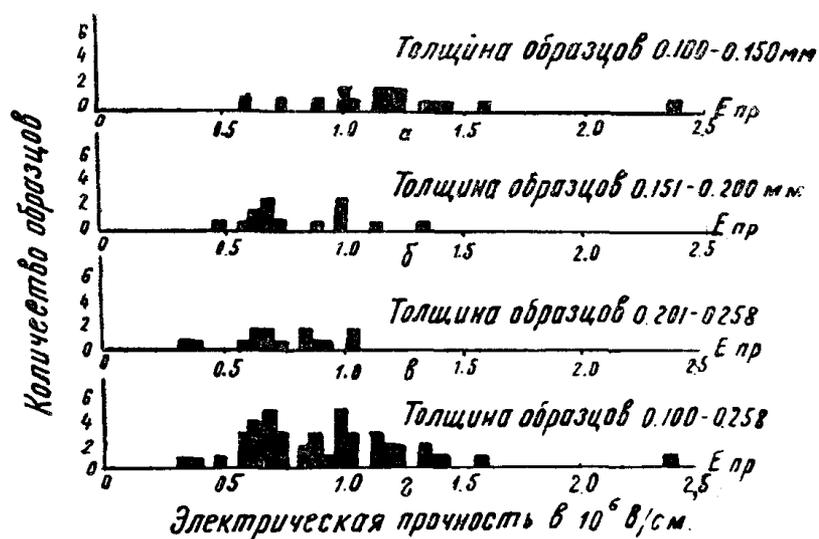


Рис. 3. Распределение образцов из монокристаллов NaCl по их электрическим прочностям.

В результате экспериментов мы получили такие же диаграммы распределения образцов по их электрическим прочностям (рис. 3), как и при измерении механической прочности на разрыв по данным других авторов [6].

Измеренные значения электрической прочности монокристаллов чистых солей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Материал образца	Электрическая прочность в 10^6 в/см		Толщина образца в мм, имеющего максимальную прочность
	средняя	максимальная	
NaCl	0,93	2,4	0,104
NaBr	0,74	1,29	0,138
KCl	0,75	1,99	0,111
KBr	0,86	1,68	0,143
KJ	0,48	0,89	0,183

Результаты измерения электрической прочности на отожженных и неотожженных образцах находятся в одной и той же области разброса.

На рис. 4, 5 и 6 представлены полученные нами графики изменения электрической прочности с химическим составом монокристаллов твердых растворов систем NaCl—NaBr, KCl—KBr и KJ—KBr. Из графиков следует, что у всех трех исследованных нами систем твердых растворов:

а) зависимость электрической прочности от химического состава, построенная по максимальным и средним значениям измеренной электрической прочности, выражается кривыми с минимумом в области средних молекулярных процентных содержаний компонентов;

б) нижней границей измеренных значений электрической прочности являются прямые, параллельные оси абсцисс и расположенные в области 300—400 кв/см.

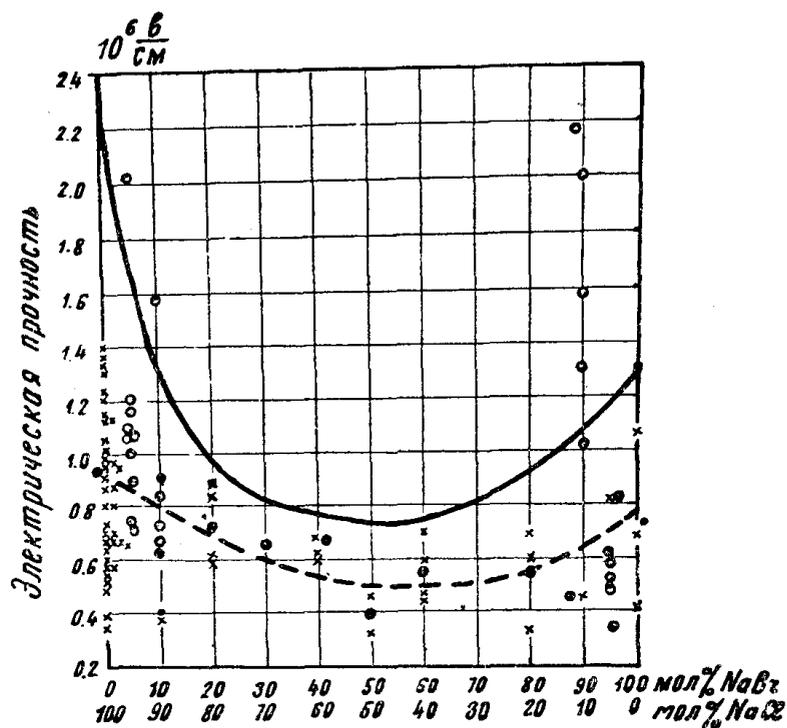


Рис. 4. Зависимость электрической прочности от состава для монокристаллов системы NaCl—NaBr.

Отступления от указанного положения наблюдаются только у системы KBr—KJ. В области малых процентных содержаний KBr в KJ среднее значение электрической прочности возрастает с увеличением количества примеси KBr.

Измерения производились в течение 3—5 суток после выращивания монокристаллов. Указанное время образцы хранились в эксикаторах. Монокристаллы NaBr и NaCl—NaBr в присутствии влаги покрываются белым налетом. Для устранения этого явления образцы хранились и обрабатывались в сухом трансформаторном масле. При испытаниях на постоянном напряжении образцов, поверхность которых была покрыта белым налетом, поверхностное перекрытие образца наблюдалось раньше, чем достигалось пробивное напряжение. На импульсах с длиной фронта порядка 10^{-6} сек это явление отсутствовало, а электрическая прочность в некоторых случаях была выше, чем у прозрачных образцов. В системе KJ—KBr некоторые выращенные кристаллы имели мутнобелый оттенок. Измеренная электрическая прочность таких кристаллов хорошо укладывалась в общую закономерность.

Результаты наших измерений электрической прочности твердых растворов хорошо согласуются с экспериментами Н. Б. Богдановой (система $KJ-KBr$) и не подтверждают данные Хиппеля и Бюэля (система $KCl-KBr$). Электрическая прочность твердых растворов системы $NaCl-NaBr$ измерена впервые нами.

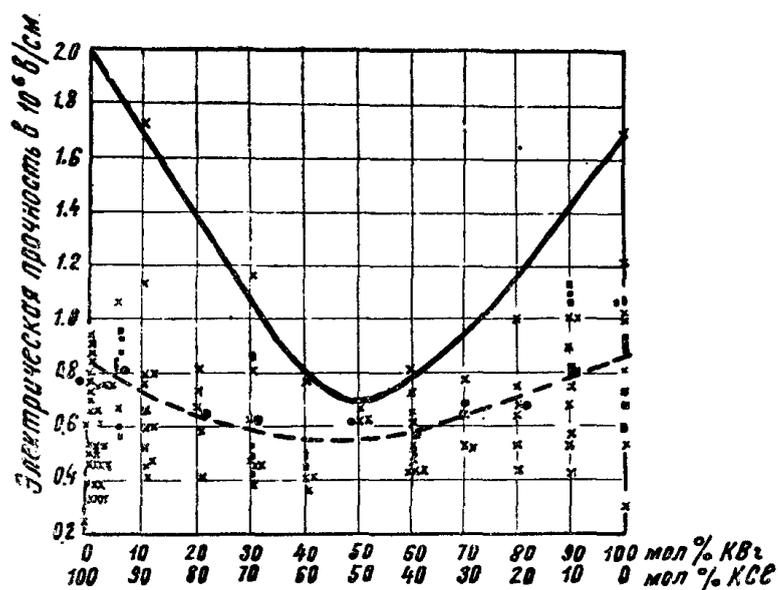


Рис. 5. Зависимость электрической прочности от состава для монокристаллов системы $KCl-KBr$.

На основании результатов измерений наших и Н. Б. Богдановой мы пришли к следующему заключению:

1. Введение примесей с образованием твердых растворов щелочно-галогенидных солей типа замещения галоида сопровождается уменьшением

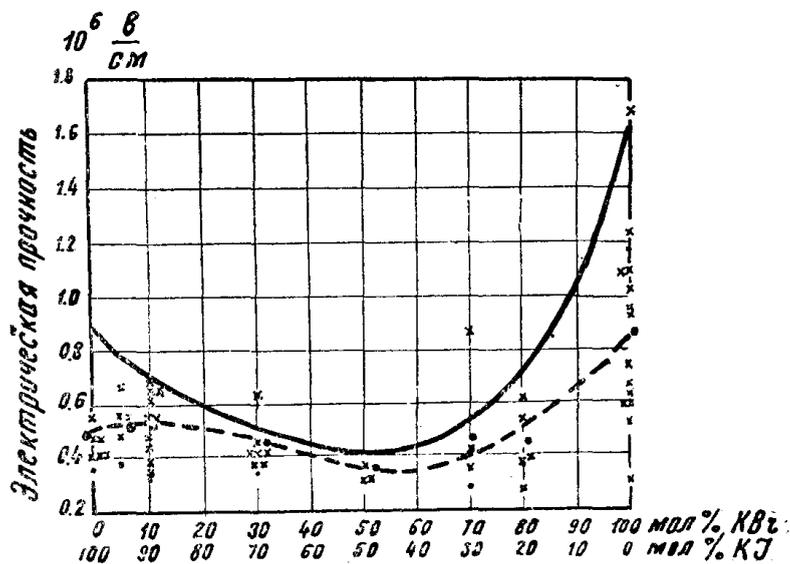


Рис. 6. Зависимость электрической прочности от состава для монокристаллов системы $KJ-KBr$.

электрической прочности монокристаллов в сравнении с чистыми исходными солями. Минимальную электрическую прочность имеют монокристаллы твердых растворов со средними молекулярными процентными содержаниями компонентов.

2. Теория Фрелиха, подсказывая только упрочнение ионных кристаллов при введении в их структуру примесей, не отображает полностью действительные закономерности, имеющие место при электрическом пробое. Нельзя проводить аналогию между процессами, приводящими к электрическому пробое твердых диэлектриков, и электропроводностью металлических сплавов.

ЛИТЕРАТУРА

1. H. Fröhlich, Proc. Roy. Soc. A., vol. 172, 94, 1939.
2. H. Fröhlich, Proc. Roy. Soc. A., vol. 178, 493, 1941.
3. A. von Hippel and C. M. Lee, Phys. Rev. vol. 59, 824, 1941.
4. R. C. Buehl, A. von Hippel, Phys. Rev., vol. 56, 941, 1939.
5. Н. Б. Богданова. ЖЭТФ, т. 4, 30, 1944.
6. В. Д. Кузнецов. Физика твердого тела, т. 2, г. Томск. 1941.

Томский политехнический
институт

ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать
5	15 сверху	Зинерман	Зингерман
9	2 снизу	пробивкой напряженности	пробивной напряженностью
13	4 сверху	$\varepsilon_m \cong 4 \frac{h}{2\pi}$	$\varepsilon \cong 4 \frac{h}{2\pi} \omega$
24	подпись под рисунком	рис.	рис. 9.
50	14 сверху	$\frac{1}{M_L^{ак}} = \left\{ \frac{1}{M} \right.$	$\frac{1}{M_L^{ак}} = \left\{ \frac{1}{M_-} \right.$
53	10 сверху	$\frac{df^{1/2}}{d\varepsilon}$	$\frac{df^{1/2}}{d\varepsilon}$
57	5 сверху	$\left(1 - \sqrt{1 - \frac{1}{1,3\varepsilon}} e^{-\frac{q}{E}(\varepsilon - I)^2} \right)$	$\left(1 - \sqrt{1 - \frac{1}{1,3\varepsilon}} \right) e^{-\frac{q}{E}(\varepsilon - I)^2}$
64	Уравнение (87)	$l_2(\varepsilon_2, \varepsilon_1) = l_1 e^{-\frac{1}{l_0}}$	$l_2(\varepsilon_2, \varepsilon_1) = l_1 e^{-\frac{l_1}{l_0}}$
65	18 снизу	$I \div 2\varepsilon_p$	$I + 2\varepsilon_p$
85	7 снизу	$10^{14} \cdot \frac{\pi \cdot 0,52 \cdot 10^{-2}}{4} \cdot 10^{-}$	$10^{14} \cdot \frac{\pi \cdot 0,52 \cdot 10^{-2}}{4} \cdot 10^{-2}$
111	2 сверху	производимости	проводимости
111	8 и 10 сверху	активизации	активации
120	5 сверху	прочности химического	прочности от химического
135	литерат. 6	стр. . .	стр. 113
147	11 снизу	$\varepsilon \cong 1000$	$\varepsilon \approx 1000$
148	подпись к рис. 4.	<i>Иразр. Ипроб.</i>	<i>Иразр. / Ипроб.</i>
204	рис. 1	KbBr	RbBr
253	подпись к рис. 6	$2 - f = 4 \cdot 10^3 \text{ гц}; 3 - f = 10^2 \text{ гц}$	$2 - f = 4 \cdot 10^2 \text{ гц}; 3 - f = 10^3 \text{ гц}$
273	7 сверху	KCl	KCl
290	подпись к рис. 4	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$
294	1 снизу	от 10	от 10^{-4} при $f = 2 \cdot 10^7$ до 6 10
282		таблица	таблица 2
324	3 сверху	стр. 269	стр. 251
336	16 снизу	[3,4]	[3]
337	10 сверху	[5]	[4]
337	4 снизу	[6]	[5]
337	1 снизу	[7]	—
338	2 сверху	[8]	[6]
338	4 и 5 сверху	[9,10]	[7,8]
339	8 снизу	[11,12]	[9,10]
340	14 сверху	[13]	[11]
347	23 снизу	[14]	[12]
347	3,4 снизу	[15]	—
348	17 снизу	[16]	[13]
350	4 сверху	$\psi_{\varphi} [M] x = \text{Const}$	$\psi_{\varphi} [M] x = \text{Const}$
451	1 снизу	механический	технический