

Исследование неполного пробоя диэлектриков и стекла

Ю.В. Зайцев, Д.М. Кустов, М.Е. Кустов

Исследования электрического пробоя твердых диэлектриков в резко неоднородных полях привело к установлению ряда интересных явлений для неполного и последовательного пробоев. В статье проанализированы свойства неполного пробоя диэлектриков. Неполный пробой зависит от величины приложенного напряжения, времени, толщины, скорости роста длины трещин.

В электрическом поле на поверхности воздушных включений появляются заряды. Когда напряженность поля, вызванная этими поверхностными зарядами, достигнет напряжения пробоя воздушных включений, начинается ионизация воздуха. Ионизация будет происходить до тех пор, пока ионы воздуха не нейтрализуют поверхностные заряды. После этого цикл повторяется. Соотношение сил электромагнитного поля притяжения и отталкивания при сближении атомов определяет стабильное существование твердого тела и его механические характеристики, адгезию, поверхностное натяжение. В работе получены формулы для расчета энергии адгезии, приведены данные расчета. Теоретические значения этих величин могут быть использованы при проведении сравнительного анализа изменения энергии адгезии для различных твердых материалов.

Проведено исследование электрического пробоя стекла, покрытого электропроводящей пленкой. Часть пленки (2...3 мм шириной) удалялась лазером, и создавались изоляционные «отсечки». В электрическом поле наличие отсечек на поверхности стекла, покрытого проводящей пленкой, вызывает неоднородности распределения электрического поля. Эти неоднородности концентрируются по периметру изоляционных «отсечек» и в углах. Для исследования электрического пробоя стекла были приготовлены образцы стекла с различными типами форматирования: линейные отсечки, отсечки с периметром квадрата или прямоугольника. На нижнем электроде пробивной установки пластина стекла лежала чистой стороной, верхний электрод устанавливался на пленку, окруженную отсечками или изолированными полосами без пленки. Исследование электрического пробоя проводилось на переменном токе, пробой возникал по периферии пленки на границе с отсечками.

В эксперименте выявлено, что при пробое наблюдаются многочисленные разряды по границе пленки и изоляционной полосы, а на поверхности стекла в местах ионизации воздуха возникает оплавление стекла.

Приведены экспериментальные данные неполного пробоя стекла с различной конфигурацией, с отсечками / без отсечек, покрытыми пленками с одной стороны. Показано, что в стекле неполные пробой встречаются при напряженности поля меньше, чем настоящие пробой, что характерно для газовой среды, в котором происходит пробой.

Ключевые слова: пробой, разряд, пробивное напряжение, диэлектрик, неполный пробой, пробой стекла, электрический рифтинг.

A Study of Incomplete Breakdown in Dielectrics and Glass

Yu.V. Zaitsev, D.M. Kustov, M.E. Kustov

Works aimed at studying electrical breakdown of solid dielectrics placed in sharply nonuniform fields have revealed a number of interesting phenomena for partial and sequential breakdown cases. The article analyzes the properties pertinent to partial breakdown of dielectrics. Partial breakdown depends on the applied voltage level, time, thickness, and crack length growth rate.

When a dielectric is placed in electric field, charges appear on the surface of its air inclusions. Once the field strength caused by these surface charges reaches the breakdown voltage of air inclusions, air ionization processes are initiated. The ionization will take place until air ions have neutralized the surface charges. After that, the cycle is repeated. The ratio between the electromagnetic field attraction and repulsion forces that arise when the atoms approach each other determines the stable existence of a solid body and its mechanical properties, adhesion, and surface tension. Formulas for calculating the adhesion energy are obtained, and the calculation results are presented. The theoretical values of these quantities can be used in performing a comparative analysis of adhesion energy variations for different solid materials.

The electrical breakdown of glass coated with an electrically conducting film was investigated. A 2...3 mm wide part of the film was removed by means of a laser to form insulating cut-offs. Such cut-offs on the surface of glass coated with a conducting film and placed in electric field give rise to nonuniformities in electric field distribution. These nonuniformities concentrate over the perimeter of insulation cut-offs and at the corners. To investigate the electrical breakdown of glass, its samples were prepared with various types of cutoff shapes: linear cut-offs and cut-offs with the perimeter of a square or rectangle. The glass plate was laid with its non-coated side facing the breakdown

installation's lower electrode, whereas the upper electrode was placed on the film surrounded by cut-offs or insulated strips without film. The electrical breakdown phenomena were investigated by applying AC voltage. The breakdown occurred over the film periphery at the boundary with cut-offs.

It has been found from the experiment that numerous discharges are observed over the boundary between the film and insulating strip during the breakdown. It has also been found that glass melting occurs on the glass surface at the air ionization spots.

Experimental data on partial breakdown of glass having different configurations, with and without cut-offs, for glass samples with film coated on one side are presented. It is shown that partial breakdowns in glass occur at field strengths less than those causing the real breakdown, which is characteristic of the gas medium in which the breakdown occurs.

Key words: breakdown, discharge, breakdown voltage, dielectric, partial breakdown, glass breakdown, electrical rifting.

Введение

В результате электрического пробоя твердых диэлектриков происходит разрушение материала. Можно рассмотреть три фазы динамики электрического пробоя: 1) начало ионизации воздушных включений в диэлектрике; 2) увеличение степени ионизации воздушных включений и возрастание тока; 3) полная ионизация воздушных включений, по которым происходит электрический пробой диэлектрика. Однако во многих случаях процесс останавливается на второй фазе электрического пробоя, когда происходит интенсивная ионизация воздушных включений, большое возрастание тока, а электрического пробоя не происходит вследствие ограничения тока от источника электрического питания. Такое состояние называется неполным электрическим пробоем (НП). Особенно проявление неполного электрического пробоя наблюдается в стеклах. Этот процесс является причиной разрушения иллюминаторов летательных аппаратов (ЛА) при полетах в тропических широтах и воздействии грозных разрядов. Поэтому исследование характеристик неполного пробоя стекла является актуальным для повышения безопасности полетов ЛА со стеклянными иллюминаторами.

Материал и методика исследований

Явление неполного электрического пробоя впервые наблюдалось Вальтером и Инге [1]. Исследование электрического пробоя стекла в неоднородных электрических полях приведено в монографии [2], а исследование неполного пробоя стекла — в работах [3] и [4].

Исследование электрического пробоя твердых диэлектриков в резко неоднородных полях привело к установлению ряда интересных явлений для неполного пробоя и последовательного пробоя.

Так, при малой длительности приложенного напряжения увеличение пробивного напряжения пропорционально толщине пробиваемого слоя. На рис. 1 приведены зависимости пробивного напряжения стекла от толщины при краевом пробое на импульсах длительностью $2 \cdot 10^{-7}$ с (кривая 1) в сравнении с зависимостью пробивного напряжения от толщины при частоте 50 Гц (кривая 2).

При кратковременном воздействии импульса напряжения, амплитуда которого равна амплитуде про-

бивного напряжения при частоте 50 Гц или при нулевой частоте, полный пробой диэлектрика не успевает произойти при условии, что поле резко неоднородно. Это объясняется сравнительно большим временем раз-
вития пробоя в неоднородном поле.

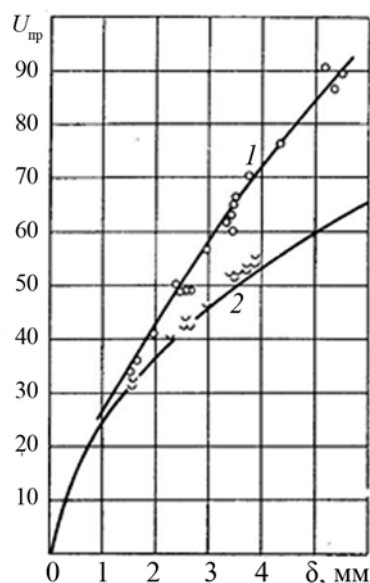


Рис. 1. Зависимость пробивного напряжения для стекла при краевом пробое от толщины:

1 — пробивное напряжение на импульсах длительностью $2 \cdot 10^{-7}$ с; 2 — пробивное напряжение при частоте 50 Гц

При повышении амплитуды импульса, превышающей минимальное пробивное напряжение в неоднородном поле при длительном воздействии или при частоте 50 Гц, в прозрачной пластине (стекло, кристалл, канифоль, целлулоид) с поверхности, где начинаются разряды в масле, внутрь диэлектрика прорастают светящиеся разряды. На рис. 2 напряжения возникновения таких разрядов представлены кривыми 1 и 2. С повышением амплитуды импульса длина разрядов возрастает, и при некотором достаточно высоком напряжении разряды прорастают сквозь толщу диэлектрика. Чем больше толщина пластины, тем более отчетливо видны светящиеся разряды.

Неполный пробой характеризуется тем, что шнур пробоя прорастает сквозь толщу стекла до противоположного электрода, но не происходит разрушения стекла, которое является основным определяющим

признаком электрического пробоя. Явление неполного пробоя сопровождается появлением в местах неоднородности электрического поля точек светящихся разрядов, размеры которых увеличиваются с увеличением напряженности электрического поля. Разряды НП локализируются вдоль силовых линий неоднородного электрического поля, и в этих местах происходит локальное механическое разрушение стекла в виде выкрашивания осколков стекла на поверхность диэлектрика.

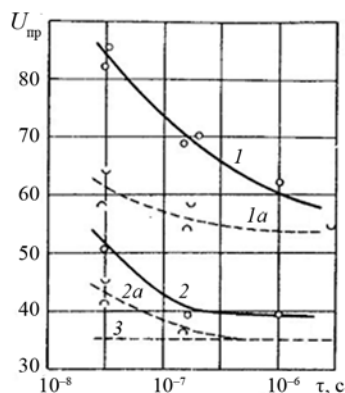


Рис. 2. Зависимость пробивного напряжения $U_{пр}$ и напряжения неполного пробоя стекла разной толщины δ от длительности импульса при краевом пробое:

1 — $U_{пр}$, $\delta = 4$ мм; 1а — напряжение неполного пробоя, $\delta = 4$ мм; 2 — $U_{пр}$, $\delta = 2$ мм; 2а — напряжение неполного пробоя, $\delta = 2$ мм; 3 — уровень пробивного напряжения при частоте 50 Гц, $\delta = 2$ мм

С дальнейшим увеличением напряжения электрического поля количество разрядов возрастает, их размеры увеличиваются и растет глубина проникновения разрядов в толщу стекла. Проращение разрядов на всю толщину стекла приводит к короткому замыканию источника напряжения и уменьшению напряжения или к отключению источника электропитания. При повторных испытаниях НП может прорасти в этом же месте или переместиться в другое место. Можно заключить, что напряжение возникновения НП увеличивается с увеличением толщины стекла. Скорость роста длины трещин и разрядов опережает соответствующее возрастание амплитуды напряжения электрического поля. При высоких частотах длина разрядов пропорциональна длительности импульса и обратно пропорциональна его крутизне. При повторении импульсов напряжения НП возникает в новом месте и не повторяет предыдущий маршрут.

Полный пробой (ПП) стекла возникает, когда приложенное напряжение будет больше напряжения неполного пробоя, мощность станет достаточной, чтобы обеспечить большой ток в режиме короткого замыкания неполного пробоя.

Разряды при НП возникают в воздушных включениях и носят дискретный характер. Чем меньше размеры включений, тем большие поля вызывают разряды.

Можно считать, что пробивная напряженность в воздушных включениях равна 3,3 кВ/мм [2].

В электрическом поле на поверхности включений появляются заряды. Когда напряженность поля, вызванное этими поверхностными зарядами, достигнет напряжения пробоя воздушных включений, начинается ионизация воздуха. Последняя будет происходить до тех пор, пока ионы воздуха не нейтрализуют поверхностные заряды, при этом напряжение, приложенное к включению, уменьшается. Продолжительность пробоя воздуха равна 10^{-10} с. После того как напряжение на включении падает, примерно за 10^{-6} с ионизация прекращается. После этого начинается новая зарядка емкости газового включения, и за время 2...3 с восстанавливаются поверхностные заряды. После этого цикл разряда повторяется.

Динамика микроразрушения в электрических полях

Реальная $P_{реал}$ прочность твердых тел, Н/м², определяется уравнением Гриффитса:

$$P_{реал} = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi l}}, \quad (1)$$

где E — модуль Юнга; γ — поверхностное натяжение; l — длина зародышевой трещины, которая при напряжении $P_{реал}$ начинает самопроизвольно расти.

Во всех этих теориях используется произведение модуля Юнга E на поверхностное натяжение γ . Можно использовать формулы модуля упругости и поверхностного натяжения [5—7], тогда

$$E\gamma = 5,31 \cdot 10^{-57} N_V^{7/3} \frac{n-1}{2n} \left((n+1)n^{n-1} - 2n^{n-1} \right). \quad (2)$$

Реальную прочность твердых тел можно вычислить по следующей формуле:

$$P_{реал} = 7,29 \cdot 10^{-29} N_V^{7/6} \sqrt{\frac{n-1}{n} \left((n+1)n^{n-1} - 2n^{n-1} \right)} \frac{1}{\pi l}. \quad (3)$$

Можно упростить: $\pi l = l' N_V^{-1/3}$, где l' — длина трещины в относительных единицах расстояния между атомами. Внося это упрощение в формулу реальной прочности, получим окончательно, Па (или Н/м²),

$$P = 7,29 \cdot 10^{-29} N_V^{4/3} f(n) \sqrt{\frac{1}{l'}}, \quad (4)$$

где $f(n) = \sqrt{\frac{n-1}{n} \left((n+1)n^{n-1} - 2n^{n-1} \right)}$, n — параметр материала.

При механических напряжениях P , начиная с критической длины трещины l' происходит неконтролируемый рост трещин и разрушение материала.

Если материал находится в электрическом поле с напряженностью $E_{\text{пр}}$, то условие потери механической прочности за счет прорастания трещин можно определить следующим образом: $P = qE_{\text{пр}}$, где q — плотность зарядов на поверхности трещины. Тогда напряженность электромеханического пробоя — разрушения (ЭМПР) будет $E_{\text{пр}} = P/q$ (В/М). Поверхностную плотность зарядов можно представить как $q = eN_s = eN_V^{2/3}$, и напряженность ЭМПР будет

$$E_{\text{пр}} = 4,56 \cdot 10^{-10} N_V^{2/3} f(n) \sqrt{\frac{1}{l}}, \text{ или} \\ E_{\text{пр}} \sqrt{l} = 4,56 \cdot 10^{-10} N_V^{2/3} f(n). \quad (5)$$

Объемная плотность атомов $N_V = \rho/Mm$, где ρ — плотность вещества (кг/м³); M — вес молекулы; $m = 1,66 \cdot 10^{-27}$ кг. Тогда формулы пробивной напряженности ЭМПР с использованием плотности диэлектрика будут иметь следующий вид:

$$E_{\text{пр}} = 4,56 \cdot 10^{-10} \left(\frac{\rho}{Mm} \right)^{2/3} f(n) \sqrt{\frac{1}{l}}, \text{ или} \\ E_{\text{пр}} \sqrt{l} = 4,56 \cdot 10^{-10} \left(\frac{\rho}{Mm} \right)^{2/3} f(n). \quad (6)$$

Критерии электромеханического разрушения ЭМПР $E_{\text{пр}} \sqrt{l}$ некоторых материалов, рассчитанные по формуле (5), приведены в табл. 1.

Таблица 1

Критерий ЭМПР некоторых веществ

Материал	$E_{\text{пр}} \sqrt{l}$, МВ/м ^{1/2}	Материал	$E_{\text{пр}} \sqrt{l}$, МВ/м ^{1/2}
CuCl	10274	AlSb	8658
CuBr	9436	GaP	10948
CuI	8808	GaAs	10203
AgI	7679	GaSb	8735
BeS	13685	InP	9428
MnS	11776	InAs	8861
MnSe	11008	InSb	7739
ZnS	11100	BP	15486
ZnSe	10306	SiC	17072
ZnTe	9428	SiO2	15034
CdTe	7735	Al2O3	43605
HgS	9499	BeO	50172
HgSe	8791	MgO	57072
HgTe	7785	ZrO2	63533
AlP	11001	ThO2	40561
AlAs	10078	Стекло: кварцевое непрозрачное кварцевое прозрачное электровакуумное электроизоляционное крон флинт	87
Стекло 1	10		
Стекло 2	10		
Стекло 3	11		
Стекло 4	11		
Стекло 5	143		
Стекло 6	114		

Критерий электромеханического пробоя $E_{\text{пр}} \sqrt{l}$ и оценка критической длины трещин по характеристикам ЭМПР некоторых кристаллов с кристаллической решеткой типа NaCl приведены в табл. 2.

Таблица 2

Критерий ЭМПР и оценка длины трещин некоторых кристаллов с кристаллической решеткой типа NaCl

Кристалл	a , нМ	$E_{\text{пр}} \sqrt{l}$, МВ/м ^{1/2}	$E_{\text{пр}}(\text{exp})$, МВ/м	\sqrt{l}	l , нМ
LiF	0,40	18431	3100	5,95	14,2
LiCl	0,51	11324	—	—	—
LiBr	0,55	9885	—	—	—
LiI	0,60	8244	—	—	—
NaF	0,46	13906	2400	5,79	15,5
NaCl	0,56	9419	1500	6,28	22,2
NaBr	0,60	8398	1000	8,40	42,1
NaI	0,65	7141	800	8,93	51,5
KF	0,54	10353	1800	5,75	17,7
KCl	0,63	7571	1000	7,57	36,1
KBr	0,66	6892	700	9,85	64,0
KI	0,71	5992	600	9,99	70,5
RbF	0,56	8910	—	—	—
RbCl	0,66	6820	800	8,53	47,8
RbBr	0,69	6314	600	10,52	75,9
RbI	0,73	5541	500	11,10	90,2
CsF	0,60	7871	—	—	—
AgF	0,49	10900	—	—	—
AgCl	0,56	9714	—	—	—
AgBr	0,58	8974	—	—	—
MgO	0,42	14893	—	—	—
MgS	0,52	12762	—	—	—
MgSe	0,55	0	—	—	—
CaO	0,48	13005	—	—	—

Электрический пробой стекла с проводящей пленкой, форматированной изоляционными отсечками

Проведено исследование электрического пробоя стекла, покрытого электропроводящей пленкой. Часть пленки (2...3 мм шириной) удалялась лазером и создавались изоляционные отсечки. В электрическом поле наличие отсечек на поверхности стекла, покрытого проводящей пленкой, вызывает неоднородности распределения электрического поля. Эти неоднородности концентрируются по периметру изоляционных отсечек и в углах. Для исследования электрического пробоя стекла были приготовлены образцы стекла с различными типами форматирования: линейные отсечки,

отсечки с периметром квадрата или прямоугольника. На нижнем электроде пробивной установки пластина стекла лежала чистой стороной, верхний электрод устанавливался на пленку, окруженную отсечками или изолированными полосами без пленки.

Стекла, пленка на которых была форматирована отсечками, характеризуются сравнительно низкими значениями пробивной напряженности. При пробое наблюдаются многочисленные разряды по границе пленки и изоляционной полосы. Пробой происходит в виде трещины стекла длиной 5 мм, вдоль границы отсечки, около или вдали от верхнего электрода. Низкие напряженности электрического поля пробоя по сравнению с электрической прочностью стекла можно объяснить явлением ЭМПР, которое можно назвать также электрическим рифтинг-пробоем: образование трещины в электрическом поле за счет электромеханического пробоя – разрушения и электрического пробоя по поверхности трещины. Электрическое поле уменьшает предел прочности стекла за счет развития трещин, индуцированного электрическим полем. Электрический рифтинг-пробой можно представить следующим образом. В местах неоднородностей электрического поля, которые наблюдаются в углах пленки между отсечками или неровностями электродов, напряженность электрического поля E возрастает и может достичь величины критического напряжения, при котором возникает неконтролируемый рост трещин и ЭМПР. В этих точках начинает развиваться трещина в направлении вектора напряженности электрического поля. Заполняющий эти трещины воздух ионизируется и возникают разряды. Таким образом, вдоль границы пленки и отсечки возникают многочисленные разряды в местах неоднородностей электрического поля. Когда трещины пройдут толщину стекла сквозным образом по силовым линиям напряженности электрического поля, мо-

жет возникнуть электрический пробой по воздуху или поверхности трещин. При пробое напряженность электрического поля уменьшается, и трещины срастаются, практически восстанавливая исходную структуру.

Для исследования ЭМПР стекла, пленка на котором форматирована изоляционными полосами или отсечками, были приготовлены образцы стекла с различными типами форматирования: линейные отсечки, отсечки с периметром квадрата или прямоугольника. Исследование электрического пробоя проводилось на переменном токе, на нижнем электроде лежала пластина стекла чистой стороной, верхний электрод устанавливался на пленку, окруженную отсечками или изолированными полосами без пленки. Пробой возникал по периферии пленки на границе с отсечками.

Стекла, пленка на которых была форматирована отсечками, характеризуется сравнительно низкими значениями пробивной напряженности — около 4 кВ/мм. При пробое наблюдаются многочисленные разряды по границе пленки и изоляционной полосы. Пробой происходит в виде трещины стекла длиной 5 мм, вдоль границы отсечки, около или вдали от верхнего электрода (рис. 3).

На стекле типа ТСК 033.8 с материалом резистивной пленки SnO₂ лазером были сделаны отсечки в виде кругов различного расположения. При испытании нижний электрод имел диаметр 120 мм. Верхний электрод диаметром 25 мм помещался на пленку в центре стекла. Размер образцов принят 60×60 см, так что поверхностное перекрытие стекла между верхним и нижним электродами исключалось. На рис. 4 показаны следы неполных пробоев, происходящих в областях отсечек проводящей пленки. При этом на поверхности стекла в местах ионизации воздуха возникает оплавление стекла как на верхней (рис. 5, а), так и на нижней поверхности образца (рис. 5, б).

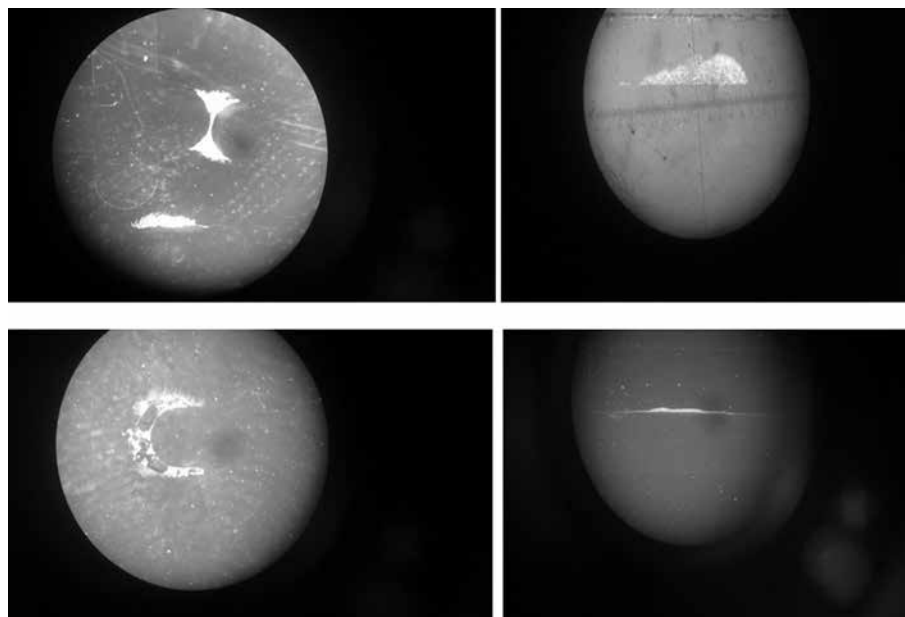


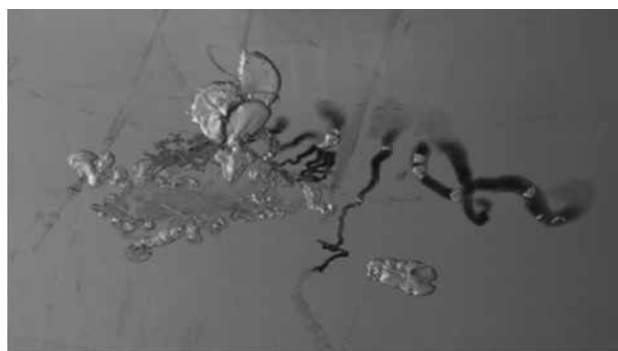
Рис. 3. Фотографии разрядов на границе отсечки и резистивной пленки



Рис. 4. Фотография разряда стекла на границе отсечки и в устье двух отсечек



а



б

Рис. 5. Микрофотографии следов неполных пробоев на поверхности стекла

Влияние магнитного поля на электрическую прочность материалов

В магнитном поле B , перпендикулярном напряженности электрического поля E , траектория движения заряженных частиц будет представлять собой участок циклоиды длиной l (длина свободного пробега), и за время свободного пробега между двумя столкновениями вдоль поля E частица пройдет путь меньший l , а именно

$$l_B = l \left(1 - \frac{\mu^2 B^2}{2} \right), \quad (7)$$

где μ — подвижность носителей заряда в электрическом поле.

Тогда концентрация ионизированных зарядов будет меньше, поскольку ионизация происходит за счет ускорения электронов в электрическом поле, а сила, действующая от магнитного поля, мала для ионизации.

Магнитное поле изменяет траекторию движения электронов вдоль электрического поля, поэтому накопление энергии носителей зарядов и степень ионизации будет меньше:

$$dn = \alpha n \left(1 - \frac{\mu^2 B^2}{2} \right) dx. \quad (8)$$

Решение этого уравнения приводит к следующему результату:

$$n = n_0 e^{\alpha \left(1 - \frac{\mu^2 B^2}{2} \right) x}.$$

Плотность тока при ударной ионизации газовых включений размером δ будет составлять

$$j = en = e n_0 e^{\alpha \left(1 - \frac{\mu^2 B^2}{2} \right) \delta} = j_0 e^{\alpha \left(1 - \frac{\mu^2 B^2}{2} \right) \delta}.$$

Таким образом, наличие магнитного поля уменьшает ток ударной ионизации и увеличивает электрическую прочность. Влияние магнитного поля зависит от подвижности носителей заряда, поэтому электрическое упрочнение должно наблюдаться в материалах с большой подвижностью носителей заряда.

Заключение

В электрическом поле наличие отсечек на поверхности стекла, покрытого проводящей пленкой, вызывает неоднородности распределения электрического поля, которые концентрируются по периметру изоляционных отсечек и в узлах, где происходит неполный пробой, а при увеличенных напряженностях — и полный электрический пробой. Это является основной причиной разрушения авиационных стекол во время полета в грозовых разрядах.

Введено понятие электрического рифтинг-пробоя: образование трещины в электрическом поле за счет электромеханического разрушения и электрического пробоя по поверхности трещины.

Стекла, пленка на которых была форматирована отсечками, характеризуются сравнительно низкими пробивными напряженностями порядка 4 кВ/мм.

Наличие магнитного поля уменьшает ток ударной ионизации и увеличивает электрическую прочность.

Литература

1. Александров А.П., Вальтер А.Ф., Вул Б.М. и др. Физика диэлектриков /А.Ф. Вальтер, ред. М.-Л., 1932.
2. Сканапи Г.И. Физика диэлектриков (область сильных полей). М.: Физматлит, 1958.
3. Кустов Е.Ф., Серебрянников С.В., Кустов М.Е. Потери на ионизацию газовых включений и неполный

пробой диэлектриков на основе стекла // *Электричество*. 2016. № 2. С. 5—7.

4. **Кустов М.Е.** Исследование электроизоляционных свойств стекла с электрообогревающими пленками для технологии производства изделий конструкционной оптики: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М., 2016.

5. **Кустов М.Е., Кустов Е.Ф., Мирошниченко А. Ю., Шеметова В. К.** Упругость твердых тел в модели двойного слоя // *Вестник МЭИ*. 2013. № 6. С. 162—169.

6. **Кустов Е.Ф., Кустов М.Е.** Поверхностное натяжение расплавов неорганических веществ // *Вестник МЭИ*. 2013. № 4. С. 216—226.

7. **Кустов М.Е.** Поверхностное натяжение и адгезия неорганических веществ // *Известия Академии инженерных наук им. А. М. Прохорова*. 2013. № 3. С. 93—105.

References

1. **Aleksandrov A.P., Val'ter A.F., Vul B.M. i dr.** *Fizika Dielektrikov* /A.F. Val'ter, red. M.-L., 1932. (in Russian).

2. **Skanavi G.I.** *Fizika Dielektrikov (oblast' Sil'nykh Poley)*. M.: Fizmatlit, 1958. (in Russian).

3. **Kustov E.F., Serebryannikov S.V., Kustov M.E.** Poteri na Ionizatsiyu Gazovykh Vklyucheniy i Nepolnyy Proboy Dielektrikov na Osnove Stekla // *Elektrichestvo*. 2016;2:5—7. (in Russian).

4. **Kustov M.E.** Issledovanie Elektroizolyatsionnykh Svoystv Stekla s Elektroobogrevayushchimi Plenkami dlya Tekhnologii Proizvodstva Izdeliy Konstruktsionnoy Optiki: Avtoref. Diss. ... Kand. Tekhn. Nauk. M., 2016. (in Russian).

5. **Kustov M.E., Kustov E.F., Miroshnichenko A. Yu., Shemetova V. K.** Uprugost' Tverdykh Tel v Modeli

Dvoynogo Sloya // *Vestnik MPEI*. 2013;6:162—169. (in Russian).

6. **Kustov E.F., Kustov M.E.** Poverkhnostnoe Natyazhenie Rasplavov Neorganicheskikh Veshchestv // *Vestnik MPEI*. 2013;4:216—226. (in Russian).

7. **Kustov M.E.** Poverkhnostnoe Natyazhenie i Adgeziya Neorganicheskikh Veshchestv // *Izvestiya Akademii Inzhenernykh Nauk im. A. M. Prokhorova*. 2013;3:93—105. (in Russian).

Сведения об авторах

Зайцев Юлий Владимирович — доктор технических наук, профессор кафедры физики и технологии электро-технических материалов и компонентов НИУ «МЭИ», e-mail: zzz6452zz@yandex.ru

Кустов Даниил Максимович — студент НИУ «МЭИ», e-mail: KustovDM@bk.ru

Кустов Максим Евгеньевич — старший инженер АО «Научно-исследовательский институт технического стекла», e-mail: gigaset2009@gmail.com

Information about authors

Zaitsev Yuliy V. — Dr.Sci. (Techn.), professor of Physics and Technologies of Electrical Materials and Components Dept., NRU MPEI, e-mail: zzz6452zz@yandex.ru

Kustov Daniil M. — Student of NRU MPEI, e-mail: KustovDM@bk.ru

Kustov Maksim E. — senior engineer of JSC «Scientific Research Institute of Technical Glass», e-mail: gigaset2009@gmail.com

Статья поступила в редакцию 16.10.2016