

УДК 539.8

DOI: 10.31040/2222-8349-2026-0-2-33-40

**ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ УЛЬТРАТОНКИХ
ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК**

© В.М. Корнилов, Д.Д. Карамов, Ю.З. Валеев

Представлены результаты экспериментального исследования электрической прочности ультратонких полимерных пленок. Миниатюризация электронных устройств и накопителей энергии требует использования ультратонких полимерных пленок субмикронной толщины в качестве активных или пассивных материалов. Уменьшение толщины полимерных пленок может приводить к изменениям их механических, электрофизических, оптических и других свойств по сравнению с объемными аналогами. В качестве объекта исследования в данной работе был использован полимер класса полигетероариленов – полидифениленфталид (ПДФ). Полимеры этого класса обладают высокой тепло- и термостойкостью, а также хорошими пленкообразующими свойствами. Субмикронные пленки ПДФ интенсивно исследуются в связи с наблюдающимися в них эффектами резистивного переключения, в результате которого реализуется высокопроводящее состояние. В связи с этим представляется важным вопрос об электрической прочности субмикронных пленок ПДФ. В результате данной работы было установлено, что электрическая прочность ультратонких полимерных пленок полидифениленфталида увеличивается от 0.27 до 8.38 МВ/мм при уменьшении толщины пленок от 380 до 10 нм, то есть наблюдается эффект электрического упрочнения. Данные, полученные при анализе толщинной зависимости электрической прочности, были сопоставлены с результатами, полученными методами атомно-силовой микроскопии, малоуглового рассеяния нейтронов, вискозиметрии. Это позволило предложить модель электрического упрочнения в полимерных пленках, инициированного ориентационным упорядочением макромолекул на поверхности полимера при формировании пленки. Были сопоставлены результаты, полученные при исследовании электрического упрочнения и известные данные по резистивному переключению, рассмотрен возможный механизм потери электрической прочности в субмикронном полимерном слое.

Ключевые слова: электрическая прочность, электрическое упрочнение, ультратонкие полимерные пленки, надмолекулярная структура, ориентационное упорядочение макромолекул.

Введение. Изучение электрофизических свойств структур металл-диэлектрик-металл (МДМ) представляет большой научный и практический интерес. Общие тенденции развития микро- и нанoeлектроники обуславливают необходимость использования диэлектрических слоев, толщина которых составляет сотни нанометров и менее. При исследовании МДМ-структур возникают два методологических аспекта. Во-первых, такие структуры исследуются с точки зрения изолирующих свойств, при этом в сильных электрических полях проблемы электрической прочности ультратонких пленок приобретают первостепенное значение.

Во-вторых, в МДМ-структурах интенсивно исследуются эффекты резистивного переключения, при которых реализуются либо низкопроводящее, либо высокопроводящее состояние диэлектрического слоя.

Стандартная экспериментальная конфигурация для регистрации и исследования пробойных явлений и резистивного переключения – это структура типа «сэндвич» (металл-диэлектрик-металл), при этом в большинстве случаев слой диэлектрика должен иметь субмикронную толщину. Вполне очевидно, что вопрос о механизмах пробоя и резистивного переключения в диэлектрических слоях напрямую

КОРНИЛОВ Виктор Михайлович – д.ф.-м.н., Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы, e-mail: vict.korniloff2015@yandex.ru

КАРАМОВ Данфис Данисович – к.ф.-м.н., Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН, e-mail: karamov_danf@bk.ru

ВАЛЕЕВ Юнир Зульфорович, Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы, e-mail: yunir_valeev@mail.ru

связан, во-первых, с качеством и внутренней структурой слоя, а во-вторых, с инжекционно-контактными явлениями на интерфейсах электрод-диэлектрик. В таком случае трудно говорить об электрофизических свойствах собственно полимера. Можно предположить, что сэндвич-структура металл-полимер-металл при субмикронной толщине полимерного слоя представляет собой самостоятельный физический объект, одним из свойств которого является резистивное переключение.

Приложенное к диэлектрику минимальное электрическое напряжение, приводящее к пробоям, называется пробивным. Значение пробивного напряжения зависит от толщины диэлектрика и формы электрического поля, обусловленной конфигурацией электродов и однородностью самого диэлектрика. Для сравнения свойств различных материалов более удобной характеристикой является электрическая прочность.

По существующим представлениям, электрический пробой развивается во времени и делится на две стадии [1, 2].

1. Потеря электрической прочности, т.е. нарушение стационарного режима электропроводности, характерной для изолятора во внешнем электрическом поле.

2. Электрический разряд через диэлектрик с образованием проводящего канала, ярко светящегося во время пробоя и разрушающего твердые диэлектрики.

В физике диэлектриков, как правило, основное внимание уделяется исследованию первой стадии пробоя, для которой предполагаются различные микроскопические механизмы, приводящие к потере диэлектриком электрической прочности. На этом основании проводятся расчеты пробивной напряженности.

Предполагается, что электронный пробой в объемных образцах развивается по однолавному механизму, подобно стримерам в газах. Лавина создает объемный заряд у анода, вследствие чего развивается стример, прорастающий к катоду со скоростью около 10^4 м/с. Этим объясняется малое время пробоя, которое возрастает пропорционально толщине образца. Величина пробивной напряженности от толщины практически не зависит. В тонких слоях одна электронная лавина [3] не может создать у анода достаточно мощный положительный объемный заряд, который мог бы положить начало стримеру. Но такой объемный заряд могут вызвать

несколько последовательных лавин, развивающихся примерно в одной и той же области диэлектрической пленки. Характер пробоя становится, таким образом, многолавиным. Вследствие этого значительно возрастает время пробоя, так как между лавинами, попадающими в одну и ту же область анода, неизбежно происходят временные задержки (статистическое запаздывание). Чтобы электронные лавины в тонких слоях приобрели достаточную мощность, необходима большая напряженность электрического поля. Поэтому в пленках значительно возрастает электрическая прочность, при этом пробивная напряженность тонких пленок диэлектриков может превышать 10^{10} В/м. Эффект увеличения электрической прочности при уменьшении толщины диэлектрического слоя получил название электрического упрочнения.

В последнее время расширяется круг объектов исследования в связи с развитием тонкопленочных технологий и методов контроля и диагностики диэлектрических слоев толщиной до единиц нанометров. В работе [3] представлены результаты исследования электрического упрочнения монокристаллических слоев щелочно-галогенидных кристаллов толщиной до десятых долей микрометра. Было установлено, что с уменьшением толщины образца пробивная напряженность каменной соли резко возрастает. Подобная тенденция характерна и для полимерных диэлектриков. В работе [4] показано, что для ультратонких стеклообразных полимерных пленок толщиной менее микрометра электрическая прочность пленок увеличивается в обратной зависимости от толщины образца. Однако интерпретация результатов для полимеров осложняется влиянием технологических факторов: при формировании пленки могут возникать ориентированные поверхностные слои, изменяться надмолекулярная структура, что вносит вклад в наблюдаемую толщинную зависимость [4, 5].

В свете современных вызовов, связанных с разработкой новых термостойких и высокопрочных диэлектриков для гибкой электроники и энергетики, актуальной является задача комплексного исследования свойств новых полимерных пленок. В связи с этим в настоящей работе решаются две взаимосвязанные задачи. Первая заключается в экспериментальном исследовании электрической прочности субмикронных пленок полигетероариленов и сопоставлении полученных результатов с данными по

резистивному переключению, зарегистрированными в идентичной конфигурации «острие–плоскость» в близком диапазоне толщин. Вторая задача состоит в анализе корреляции толщинных зависимостей электрической прочности с характеристиками поверхностных свойств и надмолекулярной структуры полимерных слоев.

Объекты и методы исследования. В качестве объекта исследования был выбран полимер класса полигетероариленов – полидифениленфталид (ПДФ) [6]. Полимеры этого класса обладают высокой тепло- и термостойкостью, а также хорошими пленкообразующими свойствами. В обзоре [7] представлены результаты исследования эффектов электронного переключения в пленках ПДФ, инициированного различными внешними воздействиями: одноосным механическим давлением, изменением граничных условий, магнитным полем. Основные результаты исследования морфологических и структурных особенностей субмикронных пленок ПДФ представлены в работах [8, 9]. Ниже кратко изложены ключевые положения этих статей, необходимые для характеристики объектов исследования.

Было установлено, что методом центрифугирования могут быть получены сплошные и однородные пленки ПДФ вплоть до нескольких нанометров, соответствующих одному-двум мономолекулярным слоям. Обнаружено, что объем пленки структурирован при толщинах выше 100 нм, при этом шероховатость поверхности составляет 0.2–0.4 нм.

Для подготовки образца с целью выявления надмолекулярной структуры в объеме тонких пленок ПДФ использовалась методика «надрыва» полимерной пленки с помощью металлического микрорезака. В результате появлялась возможность наблюдать методом АСМ внутреннее строение пленки при отсутствии поверхностного слоя. На таких участках была обнаружена зеренная структура в виде вытянутых эллипсоидов. Статистический анализ изображений выявленных структур показал, что не менее 80% объектов имеют диаметр от 20 до 150 нм, а 40% объектов имеют диаметр от 50 до 100 нм. При исследовании пленок, изготовленных из раствора ПДФ с концентрацией менее 2%, обнаружить участки с подобной зеренной структурой не удалось. Эти результаты были подтверждены методом малоуглового рассеяния нейтронов [8].

Естественно предположить, что наблюдаемые разными методами структурные элементы возникают в процессе формирования пленок из раствора, причем их форма и размеры обусловлены свойствами раствора. Известно, что в области разбавленных растворов массоперенос осуществляется за счет трансляционного переноса всей макромолекулы как целого, а в области умеренно-концентрированных растворов – за счет рептакционных движений сегментов макромолекулы. Изменение свойств раствора при переходе от сильно разбавленных растворов к полуразбавленным через точку кроссовера должно отражаться и на свойствах пленок, получаемых из раствора. В частности, можно ожидать, что толщина пленок зависит от вязкости (концентрации) раствора ПДФ. На рис. 1 представлен график зависимости толщины полимерной пленки от концентрации полимера в растворе. Видно, что концентрационная зависимость может быть аппроксимирована двумя линейными участками. При концентрациях раствора 1.5–1.6% происходит переход от первого линейного участка ко второму. Данные результаты коррелируют с измерениями методом вискозиметрии концентрационной зависимости удельной вязкости растворов ПДФ при переходе от разбавленного к полуразбавленному раствору.

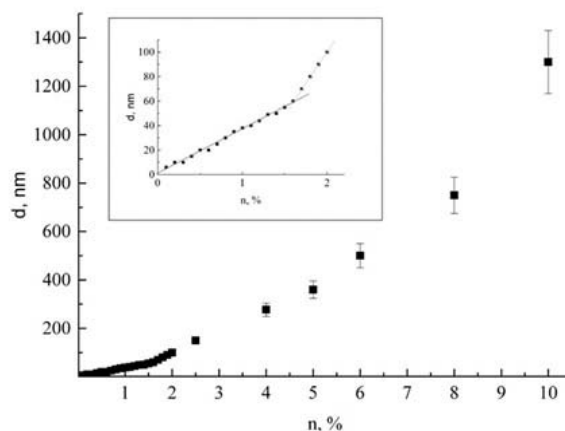


Рис. 1. Зависимость толщины полимерной пленки от концентрации раствора. На врезке представлен в увеличенном масштабе участок зависимости для диапазона концентраций 0.1–2% [9]

Для изготовления тонких пленок ПДФ на твердых подложках использовался метод центрифугирования из раствора в циклогексаноне. Капля раствора нужной концентрации наносилась на полированную медную подложку, закрепленную на держателе центрифуги. Далее вклю-

чали центрифугу на 1 минуту при скорости вращения 2000 об/мин. После этого подложку с полимером сушили при комнатной температуре в течение 30–40 минут, потом подложка помещалась в сушильный шкаф на 40–50 минут при температуре 150°C. Было изготовлено 5 образцов полимерных пленок из растворов с концентрацией полимера 5, 2.5, 1.25, 0.6, 0.3%. Толщины полимерных пленок, определенные по методике, описанной в работе [9], оказались равны соответственно 380, 170, 42, 21, 10 нм. На рис. 2 представлен общий вид пленки ПДФ толщиной 10 нм. Виден край ступеньки в пленке, образовавшийся в результате механической деформации. Профиль сечения поверхности вдоль измерительной линии позволяет определить толщину полимерной пленки.

Эксперимент. Для проведения исследования электрической прочности субмикронных полимерных пленок ПДФ была собрана экспериментальная ячейка для измерения напряжения пробоя полимерных пленок в экспериментальной конфигурации типа острие–плоскость. Локализация области исследования путем выбора экспериментальной конфигурации типа острие–плоскость позволяет свести к минимуму возможное влияние на результаты дефектов и неоднородностей в полимерном образце. Измерение напряжения пробоя производилось следующим образом: полированная медная подложка с нанесенной полимерной пленкой закреплялась в экспериментальной ячейке и использовалась в качестве одного из электродов. После этого на пленку осторожно опускалась

стальная игла, острие которой имело радиус кривизны порядка 0.3 мм. Игла контактировала с полимерной пленкой только под действием собственной тяжести и использовалась в качестве второго электрода. Методика проведения эксперимента была аналогична предложенной ранее для регистрации эффектов резистивного переключения [10]. Лабораторная экспериментальная установка предусматривала возможность плавного увеличения напряжения на образце и регистрацию напряжения пробоя.

Измерения для каждой подложки с полимерной пленкой проводились 10 раз в любом произвольном месте на пленке для разной полярности приложенного напряжения. Из полученных результатов отсеивались самые большие значения и самые малые значения напряжения пробоя и определялись усредненные значения напряжения пробоя для каждой пленки, по следующей формуле:

$$U_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n U_{np},$$

где U_{np} – напряжение пробоя, n – число измерений.

Далее была рассчитана напряженность пробоя полимерной пленки по следующей формуле:

$$E_{np} = \frac{U_{cp}}{d},$$

где U_{cp} – среднее напряжение пробоя, d – толщина пленки.

Результаты измерений среднего напряжения и напряженности пробоя при разной полярности для полимерных пленок разной толщины представлены в таблице.

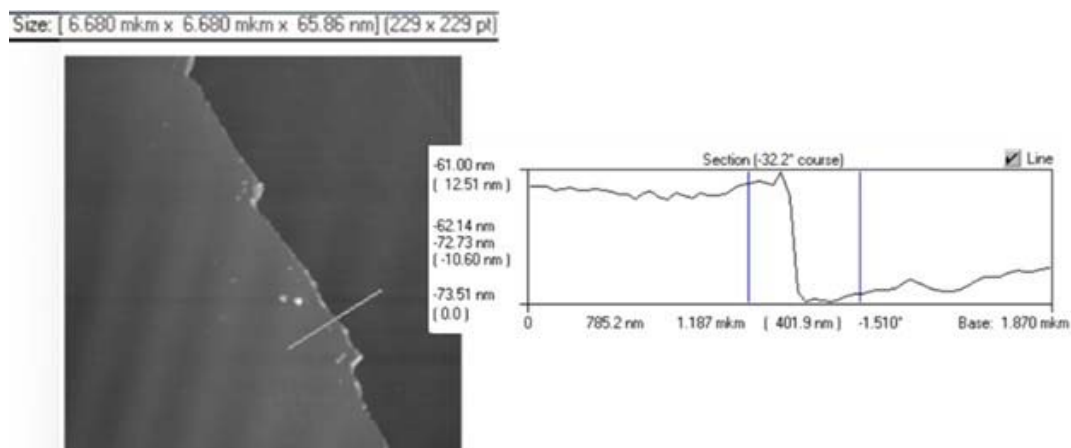


Рис. 2. АСМ-изображение края царапины в полимерной пленке и профиль сечения поверхности. Разница высот, определенная по профилю, соответствует толщине пленки (10.6 нм, число в скобках слева от профиля)

Результаты измерений электрической прочности пленок ПДФ

Концентрация ПДФ в растворе, %	5	2.5	1.25	0.6	0.3
d , нм	380	170	42	21	10
U_{cp} , В, прямая полярность	103.6	40.5	64.8	71.8	83.8
U_{cp} , В, обратная полярность	118.9	72.6	42.4	83.1	68.0
E_{np} , МВ/мм, прямая полярность	0.27	0.23	1.54	3.42	8.38
E_{np} , МВ/мм, обратная полярность	0.31	0.42	1.01	3.96	6.80

На рис. 3 приведены графики зависимостей средней напряженности пробоя от толщины пленки, а на рис. 4 – зависимости среднего напряжения пробоя от толщины полимерной пленки. И в том и в другом случае кривая 1 соответствует прямой полярности (подложка является катодом); кривая 2 соответствует обратной полярности. Исходя из характера зависимостей напряженности пробоя от толщины пленок, видно, что с уменьшением толщины пленок значительно увеличивается их электрическая прочность, т.е. регистрируется эффект электрического упрочнения. При этом значения электрической прочности близки по значению для разной полярности приложенных напряжений. На зависимости напряжения пробоя от толщины обнаруживается минимум в диапазоне толщин 150–200 нм при прямой полярности. Для зависимости, соответствующей обратной полярности, минимум напряжения пробоя регистрируется при толщине пленки порядка 40 нм, по общему характеру обе зависимости аналогичны. По литературным данным [3] такой вид зависимостей аналогичен кривым Пашена при пробое газов и является характерным при наблюдении эффекта электрического упрочнения.

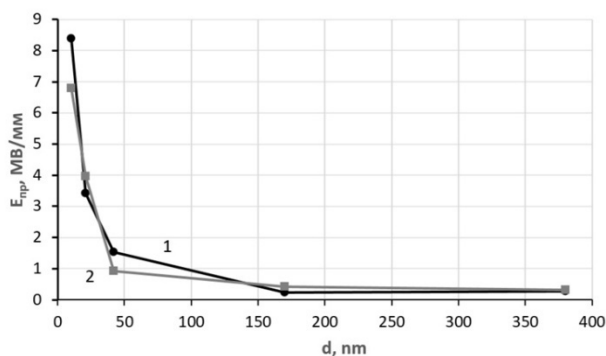


Рис. 3. График зависимости средней напряженности пробоя (электрической прочности) от толщины пленки

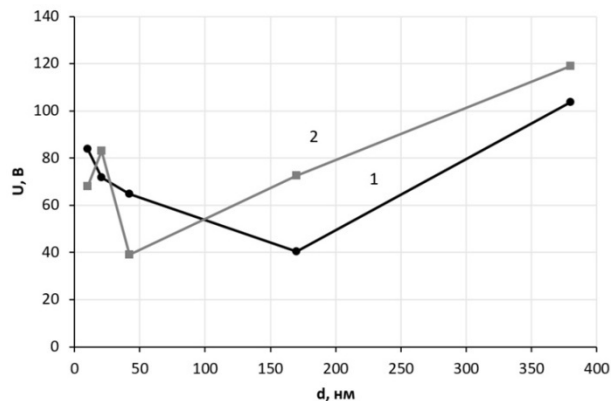


Рис. 4. График зависимости среднего напряжения пробоя от толщины пленки

Обсуждение результатов. В результате работы было установлено, что электрическая прочность ультратонких полимерных пленок ПДФ увеличивается от 0.27 до 8.38 МВ/мм при уменьшении толщины пленок от 380 до 10 нм, т.е. наблюдается эффект электрического упрочнения. В работе [3] по исследованию электрической прочности каменной соли сообщается, что электрическое упрочнение приводит к значениям пробойной напряженности порядка 10 МВ/мм при толщине диэлектрика 0.3 мкм, что почти в 50 раз выше, чем при толщине 100 мкм.

В работе [4] проведено детальное исследование электрической прочности ряда полимеров при субмикронной толщине пленок. В частности, установлено, что электрическая прочность пленок полиметилметакрилата возрастает от ~ 0.2 до ~ 2.5 МВ/мм при уменьшении толщины пленки от 2 мкм до 100 нм. Отметим, что методологически наша работа во многом аналогична работе [4], что весьма важно при сопоставлении результатов.

Ранее было установлено, что надмолекулярная структура пленок ПДФ обусловлена формированием ассоциатов макромолекул, которые существуют в полуразбавленных раство-

рах. При концентрации ПДФ в растворе порядка 1.5% происходит переход к разбавленному раствору и ассоциаты больше не наблюдаются (рис. 1). Сравнение соответствующих графиков позволяет обнаружить хорошую корреляцию между концентрационной зависимостью толщины пленки, обусловленной переходом от одного типа раствора к другому и зависимостью электрической прочности полимера от толщины пленки. Заметное увеличение электрической прочности регистрируется при толщине пленки 42 нм, что соответствует исходной концентрации ПДФ в растворе 1.25%.

Это позволяет предположить, что главный вклад в увеличение электрической прочности дает приповерхностный слой полимерной пленки, имеющий толщину порядка нескольких нанометров. При формировании пленки из раствора может образовываться ориентированный слой вблизи свободной границы формирующейся пленки. При этом ориентационный порядок поверхности является результатом как взаимодействия полимера с подложкой, так и создания необходимых кинетических условий [11].

В работе [12] представлены результаты экспериментального исследования локального резистивного переключения в полимерных пленках, происходящего при кратковременном воздействии ионного импульса в вакууме. На первой стадии эксперимента острый зонд опускался на поверхность полимерного образца и на зонд подавалось электрическое напряжение (не более 1 В). Ток в измерительной цепи отсутствовал, то есть образец находился в диэлектрическом состоянии. Затем производился микроразряд в вакууме путем соприкосновения острого зонда с анодом, находящимся под потенциалом +4...+6 кВ, в результате чего генерировался кратковременный ионный импульс длительностью 10–15 мкс, амплитудой порядка 10 мкА. При этом регистрировалось резкое увеличение тока в измерительной цепи, то есть в системе нижний электрод – образец – острый зонд происходило локальное резистивное переключение.

Высокая проводимость образца сохранялась от нескольких минут до нескольких часов, затем сопротивление образца скачкообразно изменялось из состояния с низким сопротивлением в высокоомное состояние. Было обнаружено, что на характеристики локального переключения микроразрядом в высокопроводящее состояние влияет толщина субмикронных пленок. При неоднократном воздействии микроразряда без изменения положения зондирующего электрода

циклы включения и выключения проводящего состояния хорошо воспроизводятся.

Участки полимерной пленки, в которых было зарегистрировано высокопроводящее состояние, исследовались методом атомно-силовой микроскопии с проводящим зондом. Было установлено, что в местах протекания тока полимерная пленка деформирована, причем степень деформации увеличивается при увеличении толщины пленки. Наиболее просто такой результат можно объяснить электрическим пробоем полимерной пленки. Однако в эксперименте наблюдаются многократные циклы переключения образца в высокопроводящее состояние с последующей релаксацией в низкопроводящее состояние при неизменном положении зондирующего электрода. Кроме того, на токовых изображениях регистрируются особенности в виде ярких точек, соответствующих местам протекания тока. Видно, что эти места расположены достаточно произвольно в пределах общей деформированной области и соответствуют деформированным участкам полимера.

Сравнивая результаты, полученные при исследовании электрической прочности и резистивного переключения, можно сделать следующие выводы. Во-первых, в том и другом случае эксперименты проводились на субмикронных пленках ПДФ, приготовленных одинаковым методом, в одной и той же конфигурации «острие-плоскость» при обязательном включении образца последовательно с ограничительным сопротивлением. Во-вторых, при исследовании электрической прочности фактором, приводившим к пробоем было электрическое напряжение, приложенное к образцу (максимальные значения 100–120 В). При исследовании резистивного переключения напряжение на образце (1В) использовалось для регистрации перехода образца в высокопроводящее состояние при воздействии ионного импульса. В-третьих, пробой в пленке ПДФ при достижении пробойного напряжения имел необратимый характер и приводил к формированию характерного графитизированного отверстия в пленке. Высокопроводящее состояние после резистивного переключения было обратимым и его характеристики зависели от толщины пленки.

Очевидно, что для изменения электропроводности, прежде всего должны измениться условия контактирования: либо уменьшиться высота межповерхностного барьера, либо уменьшиться его ширина, чтобы стать более прозрачным для носителей заряда (необходимо помнить, что в исходном состоянии концентрация

собственных носителей заряда ничтожно мала). Можно предположить, что именно дополнительное внешнее воздействие, которое необходимо для инициации резистивного переключения, приводит к потере электрической прочности, которая является первой стадией пробоя. При небольших напряжениях на образце (единицы вольт) и наличии ограничительного сопротивления реализуется резистивное переключение. Если дополнительные воздействия отсутствуют, подъем напряжения на образце происходит вплоть до развития пробоя в стандартном представлении. К настоящему времени недостаточно экспериментальных данных, чтобы предложить механизм потери полимером электрической прочности, учитывая то, что внешних воздействий, приводящих к резистивному переключению, достаточно много. Общим является тот факт, что в структуре металл-диэлектрик-металл при субмикронной толщине диэлектрика глубина проникновения приповерхностного объемного заряда сравнима с толщиной диэлектрика.

Подводя итог, можно сформулировать два взаимосвязанных вопроса для дальнейших исследований: каков механизм потери электрической прочности в субмикронных полимерных слоях при исследовании пробойных явлений в сверхсильных электрических полях и при реализации резистивного переключения, инициированного дополнительным внешним воздействием.

Заключение. В результате работы было установлено, что электрическая прочность субмикронных пленок полидифениленфталида возрастает при уменьшении толщины пленок до 10 нм, т.е. реализуется эффект электрического упрочнения. Локальность воздействия на ультратонкую пленку обеспечивает наилучшее приближение к исследованию материала как такового, сводя к минимуму влияние дефектов, примесей и неоднородностей.

Данные, полученные при анализе толщинной зависимости электрической прочности, были сопоставлены с результатами исследования качества поверхности, внутреннего строения и однородности по толщине. Это позволило предложить модель электрического упрочнения в полимерных пленках, инициируемого ориентационным упорядочением макромолекул на поверхности полимера при формировании пленки.

Проведено сопоставление результатов исследования электрического упрочнения с известными данными по резистивному переключению в субмикронных пленках ПДФ, полу-

ченными в аналогичной конфигурации острие-плоскость. Обсуждается возможный механизм потери электрической прочности в субмикронном полимерном слое.

Полученные данные важны для интерпретации результатов электрофизических измерений в субмикронных пленках полимера и позволяют целенаправленно влиять на состав и надмолекулярную структуру полимера при исследовании электрической прочности и резистивного переключения.

Работа выполнялась при поддержке проекта «Зеркальные лаборатории» Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики».

Литература

1. Блайт Э.Р., Блур Д. Электрические свойства полимеров. Пер. с англ. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 376 с.
2. Поплавко Ю.М. Физика диэлектриков: учеб. пособие для вузов. Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1980. 400 с.
3. Физика диэлектриков (область сильных полей): учеб. пособие. Г.А. Воробьев, Ю.П. Похолков, Ю.Д. Королев, В.И. Меркулов. Томск: Издательство ТПУ, 2003. 244 с.
4. Maninderjeet Singh, Saurabh K. Tiwary, Roushanak Nejat et al. Anomalous High Dielectric Strength and Capacitive Energy Density of Thin Entangled Glassy Polymer Films // Published as part of JACS Au special issue "Polymers for the Clean Energy Transition". JACS Au2025, 5, 121–135.
5. Mogbojuri G., Abtahi S., Hendeniya N., Chang B. The Effects of Chain Conformation and Nanostructure on the Dielectric Properties of Polymers // Materials (Basel). 2025 Jan 5; 18(1):198.
6. Виноградова С.В., Васнев В.А., Выгодский Я.С. Кардовые полигетероарилены. Синтез, свойства и своеобразие // Успехи химии. 1996. Т. 65. № 3. С. 266–295.
7. Лачинов А.Н., Воробьева Н.В. Электроника тонких слоев широкозонных полимеров // УФН. 176. 1249 (2006).
8. Корнилов В.М., Лачинов А.Н., Карамов Д.Д. и др. Надмолекулярная структура тонких пленок электроактивного полимера // ФТТ. 2016. Т. 58. В. 5. С. 1030–1035.
9. Карамов Д.Д., Корнилов В.М., Лачинов А.Н. и др. Атомно-силовая микроскопия субмикронных пленок электроактивного полимера // ЖТФ. 2016. Т. 86. В. 7. С. 124–129.
10. Корнилов В.М., Лачинов А.Н. Электропроводность в системе металл-полимер-металл: роль граничных условий // ЖЭТФ. 1997. Т. 111. № 4. С. 1513–1529.
11. Карамов Д.Д., Киселев Д.А., Малинкович М.Д. и др. Атомарно гладкая поверхность и по-

верхностная поляризация субмикронных пленок полидифениленфталита // Известия Уфимского научного центра РАН. 2017. № 4. С. 26–32.

12. Корнилов В.М., Карамов Д.Д. Исследование квазидномерных проводящих структур в полимерных слоях // Известия Российской академии наук. Сер. физ. 2025. Т. 89. № 3. С. 402–407.

References

1. Blajt Eh.R., Blur D. *Ehlektricheskie svoystva polimerov*. Per. s angl. M.: FIZMATLIT, 2008. 376 s.

2. Poplavko Yu.M. *Fizika dielektrikov: ucheb. posobie dlya vuzov*. Kiev: Vishcha shkola. Golovnoe izd-vo, 1980. 400 s.

3. *Fizika dielektrikov (oblast' sil'nyh polej): ucheb. posobie*. G.A. Vorob'ev, Yu.P. Pohlkov, Yu.D. Korolev, V.I. Merkulov. Tomsk: Izdatel'stvo TPU, 2003. 244 s.

4. Maninderjeet Singh, Saurabh Kr. Tiwary, Roushanak Nejat et al. Anomalous High Dielectric Strength and Capacitive Energy Density of Thin Entangled Glassy Polymer Films // Published as part of JACS Au special issue "Polymers for the Clean Energy Transition". JACS Au2025, 5, 121–135.

5. Mogbojuri G., Abtahi S., Hendeniya N., Chang B. The Effects of Chain Conformation and Nanostructure on the Dielectric Properties of Polymers // *Materials (Basel)*. 2025 Jan 5;18(1):198.

6. Vinogradova S.V., Vasnev V.A., Vygodskij Ya.S. Kardovye poligeteroarileny. Sintez, svoystva i svoeobrazie // *Uspehi himii*. 1996. T. 65. № 3. S. 266–295.

7. Lachinov A.N., Vorob'eva N.V. *Ehlektronika tonkih sloev širokozonnih polimerov* // UFN, 176, 1249 (2006).

8. Kornilov V.M., Lachinov A.N., Karamov D.D. i dr. Nadmolekulyarnaya struktura tonkih plenok ehlektroaktivnogo polimera // *FTT*. 2016. T. 58. V. 5. S. 1030–1035.

9. Karamov D.D., Kornilov V.M., Lachinov A.N. i dr. Atomno-silovaya mikroskopiya submikronnyh plenok ehlektroaktivnogo polimera // *ZHTF*. 2016. T. 86. V. 7. S. 124–129.

10. Kornilov V.M., Lachinov A.N. *Ehlektraprovdnost' v sisteme metall-polimer-metall: rol' granichnyh uslovij* // *ZHEHTF*. 1997. T. 111. № 4. S. 1513–1529.

11. Karamov D.D., Kiselev D.A., Malinkovich M.D. i dr. Atomarno gladkaya poverhnost' i poverhnostnaya polarizaciya submikronnyh plenok polidifenilfenitfalida // *Izvestiya Ufimskogo nauchnogo centra RAN*. 2017. № 4. S. 26–32.

12. Kornilov V.M., Karamov D.D. *Issledovanie kvazidnomernyh provodyashchih struktur v polimernyh sloyah* // *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Ser. fiz.* 2025. T. 89. № 3. S. 402–407.

ELECTRICAL STRENGTH OF ULTRATHIN POLYMER FILMS

© V.M. Kornilov¹, D.D. Karamov², Yu.Z. Valeev¹

¹Akmullah Bashkir State Pedagogical University,
3a, ulitsa Oktyabrskoy revolyutsii, 450008, Ufa, Russian Federation

²Institute of Molecule and Crystal Physics – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre
of the Russian Academy of Sciences,
151, prospekt Oktyabrya, 450075, Ufa, Russian Federation

The results of an experimental study of the electrical strength of ultra-thin polymer films are presented. The miniaturization of electronic devices and energy storage systems requires the use of ultra-thin polymer films with sub-micron thicknesses as active or passive materials. Reducing the thickness of polymer films can lead to changes in their mechanical, electrophysical, optical, and other properties compared to their bulk counterparts. In this study, a polymer of the polyheteroarylene class, polydiphenylene-phthalide (PDP), was used as the object of investigation. Polymers of this class have high heat and thermal resistance, as well as good film-forming properties. Submicron PDF films are being intensively studied due to the observed resistive switching effects, which result in a highly conductive state. In this regard, the question of the electrical strength of submicron PDF films is important. As a result of this work, it was found that the electrical strength of ultrathin polymer films of polydiphenylene phthalide increases from 0.27 to 8.38 MV/mm with a decrease in film thickness from 380 to 10 nm, that is, the effect of electrical hardening is observed. The data obtained from the analysis of the thickness dependence of electrical strength were compared with the results obtained using atomic force microscopy, small-angle neutron scattering, and viscometry. This allowed us to propose a model of electrical strengthening in polymer films initiated by the orientation ordering of macromolecules on the polymer surface during film formation. We compared the results obtained from the study of electrical strengthening with known data on resistive switching and discussed the possible mechanism of loss of electrical strength in a submicron polymer layer.

Keywords: electrical strength, electrical strengthening, ultra-thin polymer films, supramolecular structure, orientation ordering of macromolecules.