

УДК 538.9

DOI: 10.31040/2222-8349-2023-0-2-20-27

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ПЕРЕМЕННОГО ПОЛЯ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК

© В.М. Корнилов, Д.Д. Карамов, Т.Р. Хусаинов, А.Н. Абакумов, А.Р. Юсупов

Представлены результаты экспериментального исследования частотных зависимостей импеданса сэндвич-структур металл/полимер/металл для разных толщин полимерного слоя. Измерены вольтамперные характеристики образцов в различных частотных диапазонах. Общий вид графиков амплитудно-частотных характеристик для всех толщин пленок хорошо описывается теоретической моделью последовательной RC-цепи. На всех графиках можно заметить наличие частоты среза, которую можно интерпретировать как начало работы RC-фильтра. Однако наблюдаются также существенные отклонения от теоретических характеристик. Установлено, что при толщине полимерного слоя 80 нм в диапазоне частот 10–40 Гц наблюдается аномальное уменьшение импеданса, соответствующее увеличению тока на вольтамперных характеристиках. Возникающая зарядовая неустойчивость рассматривается как следствие объемно-зарядной поляризации, которая в свою очередь обусловлена спецификой полимер-полимерных интерфейсов, возникающих при формировании надмолекулярной структуры полимера. Результаты работы интерпретируются в рамках модели резистивного переключения, которая предполагает, что в случае субмикронных полимерных пленок, используемых в системе металл/полимер/металл, резистивное переключение возможно в результате последовательной трансформации энергетической электронной подсистемы полимерной пленки под действием инжекции зарядов из электродов.

Ключевые слова: тонкие полимерные пленки, частотная зависимость импеданса, надмолекулярная структура, поляризация диэлектриков.

Введение. Развитие современной микро- и нанoeлектроники во многом обусловлено потребностями современных информационных технологий, которые требуют разработки все более емких и быстродействующих устройств для записи и хранения информации с возможностью перезаписи и энергонезависимости. Наряду с традиционными типами запоминающих устройств (динамической, статической и флеш-памяти) большое внимание уделяется резистивной памяти, которая сочетает достоинства быстрой оперативной памяти с энергонезависимостью программируемой памяти. В основе этого типа памяти лежит структура металл/изолятор/металл, в которой может быть реализовано

обратимое и резкое изменение проводимости диэлектрического слоя – эффект резистивного переключения. Описанные эффекты были обнаружены и исследованы в большом количестве классов соединений, включающих в себя неорганические [1–4] и полимерные слои субмикронной толщины [5, 6].

В обзоре [7] представлены результаты исследования эффектов резистивного переключения в субмикронных пленках полигетероариленов, индуцированных не только электрическим полем, но и одноосным давлением, термоионизацией ловушек, электронным или ионным облучением, магнитным полем, изменением граничных условий на поверхности раздела

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

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

ХУСАИНОВ Тимур Русланович, Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы, e-mail: priorator105@yandex.ru

АБАКУМОВ Андрей Николаевич, Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы, e-mail: bspulolhi@mail.ru

ЮСУПОВ Азат Равилевич – к.ф.-м.н., Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы, e-mail: azat.yusupov@bk.ru

металл/полимер. Очевидна перспективность использования в электронике таких тонкопленочных элементов, электропроводящим состоянием которых можно управлять с помощью небольшого внешнего воздействия. Анализ современного состояния проблемы показывает, что в литературе описывается только резистивное переключение (переход в высокопроводящее состояние), вызванное постоянным электрическим напряжением.

Стандартная экспериментальная конфигурация для регистрации и исследования резистивного переключения – это структура типа «сэндвич» (металл/диэлектрик/металл), при этом для большинства объектов слой диэлектрика должен иметь субмикронную толщину. Вполне очевидно, что вопрос о механизме резистивного переключения в диэлектрических (полимерных) пленках напрямую связан, во-первых, с качеством и внутренней структурой пленки, а во-вторых, – с инжекционно-контактными явлениями на интерфейсах электрод-полимер. 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.

Указанные явления в полимерных пленках можно использовать для создания различных сенсоров, например, для неразрушающего контроля металлических изделий. Так как полимерный материал является крайне чувствительным к различным малым внешним воздействиям, а также фазовым и структурным изменениям в металлических электродах, актуальным является задача повышения селективности сенсоров и их помехоустойчивости. Так как небольшие локальные изменения в металлических электродах могут приводить к существенным изменениям электрофизических характеристик пленок полимерных пленок, вплоть до электронного переключения в состояние с высокой проводимостью, актуальной остается задача поиска методов и схем измерения полезного сигнала. Одним из способов, позволяющих приблизиться к решению этих задач, является измерение полезного сигнала в переменном электрическом поле, что позволяет успешно исследовать электрически неоднородные структуры [8].

Объекты и методы исследования. В данной работе в качестве объекта исследований был выбран наиболее изученный с электрофизической стороны полимер из класса полигетероариленов – полидифениленфталид (ПДФ). С точки зрения технического применения, ПДФ рассматривается как перспективный полимерный диэлектрик, пригодный для эксплуатации в экстремальных условиях. Действительно, он обладает хорошими пленкообразующими свойствами и характеризуется высокой термостойкостью. Температуры стеклования и разложения на воздухе ПДФ равны 693 и 713 К [9]. В энергетическом спектре молекул ПДФ ширина щели запрещенных энергий E_g составляет 4.2 эВ, первый потенциал ионизации I равен 6.2 эВ, поэтому свободные носители зарядов в этом полимере отсутствуют. Наличие в мономерном звене ПДФ фталидной группы, обладающей значительным дипольным моментом $\sim 5.6 D$, позволяет классифицировать ПДФ как полярный диэлектрик.

Недавно [10] было установлено, что надмолекулярное упорядочение в тонких пленках полидифениленфталида изменяется при изменении толщины пленки. В работе [11] было показано, что в переходной области толщин происходит изменение некоторых электронных свойств тонких пленок. Это, в принципе, не противоречит общим представлениям о взаимосвязи структуры и свойств полимерных материалов. Например, в работе [12] исследования процессов релаксации в пленках полиимида R-BAPS показали, что на энергию активации центров захвата носителей заряда влияет не только химическое строение полимера, но и надмолекулярная структура исследуемых объектов.

Образцы представляли собой многослойную структуру (металл/полимер/металл). В качестве подложки использовалось предварительно очищенное предметное стекло, размеры которого составляли 10×10 мм. Очистка подложки осуществлялась в 3 этапа в ультразвуковой ванночке, причем после каждого этапа подложка помещалась в сушильный шкаф на 5 минут ($T = 170^\circ\text{C}$). Первым этапом была очистка в чистом ацетоне, после в этиловом спирте 95%, а затем в петролейном эфире.

Следующим этапом создания образцов являлось нанесение на поверхность подложки нижнего металлического электрода, роль которого выполнял алюминий, методом термиче-

ского испарения в вакууме. В качестве второго (верхнего) электрода использовался индий, нанесенный методом наплавки.

Для получения полимерных пленок был использован метод центрифугирования из раствора. На подложку с нижним электродом наносилась капля раствора и под действием центробежных сил раствор равномерно распределялся по поверхности подложки. Растворитель испаряется, а полимерная пленка остается на подложке благодаря адгезии. Образцы отличались концентрацией полимера (0.75, 1.25, и 2.5%) для того, чтобы выяснить влияние толщины полимерной пленки на эффект переключения.

После того, как полимерные слои были сформированы, образцы выдерживались 40 мин на воздухе, затем 40 мин в сушильном шкафу ($T = 150^{\circ}\text{C}$). Толщина пленок контролировалась с помощью атомно-силового микроскопа. Для образцов, изготовленных из растворов концентрацией 0.75, 1.25, и 2.5%, толщина составляла соответственно 80, 150 и 270 нм.

Схема измерений, представленная на рис. 1, соответствовала стандартной схеме работы емкостного датчика, включенного по схеме последовательной RC-цепи, с измерением падения напряжения на активном сопротивлении. Особенность исследуемого конденсатора (структуры металл/полимер/металл) в том, что он может переходить в состояние короткого замыкания при реализации резистивного переключения (например, если металл подвергается таким изменениям как плавление, изменение структуры металла, изменение его магнитных характеристик и другие).

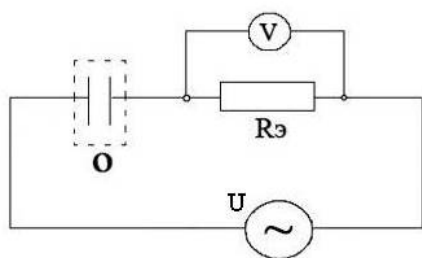


Рис. 1. Схема измерения: O – образец; U – генератор низкочастотных колебаний; $R_{\text{э}}$ – эталонное сопротивление 100 кОм; V – мультиметр в режиме переменного напряжения

Эксперимент. Так как электрофизические явления, наблюдаемые в пленках ПДФ, в частности, эффект электронного переключения из

диэлектрического состояния в состояние с высокой проводимостью исключали возможность измерения частотных характеристик по схеме с параллельным включением эталонного сопротивления, зависимость импеданса от частоты была построена по расчетам, проведенным по экспериментально измеренным выходным характеристикам структуры последовательной RC-цепи.

На рис. 2, а представлена зависимость величины импеданса структуры металл/полимер/металл от частоты переменного поля при толщине полимерного слоя 270 нм. Зависимости построены для двух значений напряжения: 0.8 и 8 В. Полученные графики можно условно разбить на четыре участка. На участке 1 импеданс слабо зависит от частоты переменного сигнала. Видно, что сопротивление полимерной пленки незначительно и монотонно убывает с ростом частоты при напряжении 0.8 В. В то же время сопротивление пленки при большем напряжении (8 В) уменьшается значительно в пределах того же диапазона частот. Следует отметить, что сопротивление полимерной пленки при низком значении приложенного напряжения (0.8 В) меньше примерно в три раза, чем сопротивление при высоком напряжении (8 В).

Участок 2 показывает резкое уменьшение импеданса с ростом частоты. Сопротивления полимерной пленки на данном участке при разных напряжениях близки по значению.

На участке 3 импеданс слабо зависит от частоты переменного напряжения. При разных напряжениях и частотах значения импеданса близки и равны приблизительно 1.5 МОм.

На участке 4 импеданс при напряжении 0.8 В резко возрастает с ростом частоты. Импеданс при напряжении 8 В начинает монотонно убывать при росте частоты.

На рис. 2, б представлен график зависимости импеданса от частоты при толщине полимерного слоя 150 нм. При этом характер зависимости импеданса от частоты для образцов толщиной 150 и 270 нм отличается незначительно. Отметим только небольшое скачкообразное увеличение сопротивления при частоте поля порядка 10 Гц.

Импеданс образца с более тонкой пленкой ожидаемо меньше, чем для толстой пленки, так как емкость структуры металл/полимер/металл в этом случае будет больше, а активное сопротивление образца меньше.

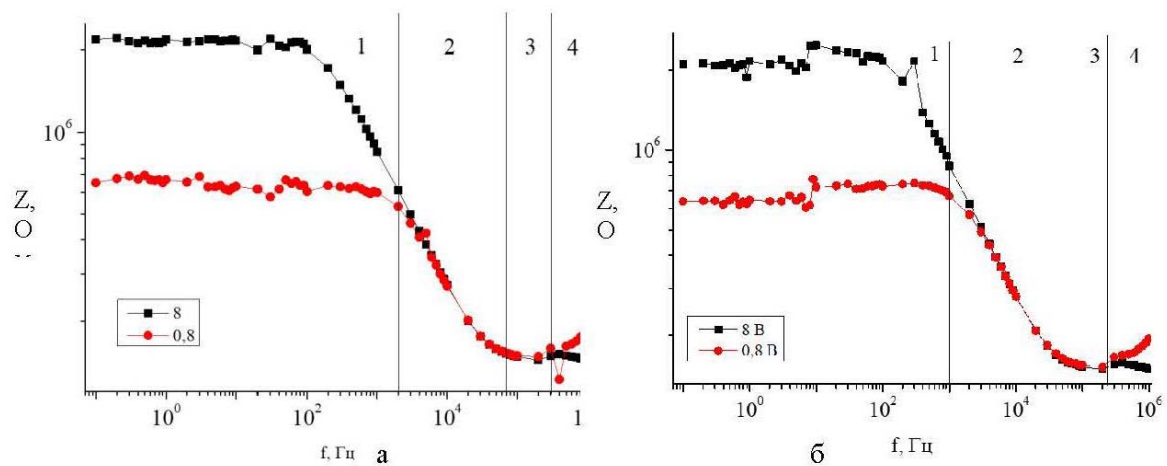


Рис. 2. Зависимость импеданса структуры металл/полимер/металл от частоты переменного поля при фиксированных значениях напряжения, толщина пленки 270 нм (а) и 150 нм (б)

Совершенно иная зависимость была получена для образца с пленкой толщиной 80 нм. В этом случае на графике зависимости импеданса от частоты (рис. 3) можно выделить четыре участка.

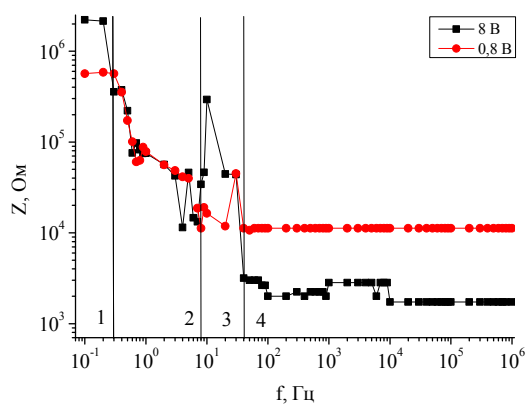


Рис. 3. Зависимость импеданса структуры металл/полимер/металл от частоты переменного поля при фиксированных значениях напряжения, толщина пленки 80 нм

Импеданс на участке 1, как и в рассмотренных выше случаях, изменяется слабо. Однако диапазон частот, в пределах которого происходит выравнивание сопротивлений и переход к участку 2, значительно сокращается. Уже при частотах выше 0.3 Гц сопротивление начинает резко падать. Падение сопротивления продолжается в диапазоне от 0.3 до 10 Гц, что соответствует участку 2. Далее, на участке 3, сопротивление испытывает значительные флуктуации. На участке 4 сопротивление достигает минимума и практически не зависит от частоты. Сопротивле-

ние полимерной пленки как при напряжении 0.8, так и 8 В, в таком состоянии минимально.

На рис. 4 представлены вольтамперные характеристики (ВАХ) для всех толщин полимерных пленок на различных участках зависимости импеданса от частоты внешнего поля. Видно, что ВАХ пленки толщиной 80 нм резко отличается от ВАХ пленок толщиной 150 и 270 нм как общей тенденцией к увеличению измеряемого тока, так и крупномасштабными флуктуациями тока.

Обсуждение результатов. Вид графиков амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) для всех толщин пленок хорошо описывается теоретической моделью последовательной RC-цепи. На всех графиках можно заметить наличие частоты среза, которую можно интерпретировать как начало работы RC-фильтра. Исходя из имеющихся данных по пленкам ПДФ, можно было бы применить теоретические модели АЧХ, принимая ПДФ как идеальный диэлектрик. Однако наблюдаются существенные отклонения от работы идеальной RC-цепи. В реальном эксперименте необходимо учитывать наличие собственной проводимости полимерных пленок, и, что наиболее важно, инжекционные токи, оказывающие сильное влияние на общую проводимость структуры металл/полимер/металл.

Таким образом, можно рассмотреть эквивалентную цепь, в которой кроме сопротивления эталонного резистора и реактивного сопротивления структуры металл/полимер/металл учтено конечное сопротивление полимерной пленки, которое сильно может изменяться в зависимости от толщины полимерной пленки, амплитуды подаваемого переменного напряжения и его частоты.

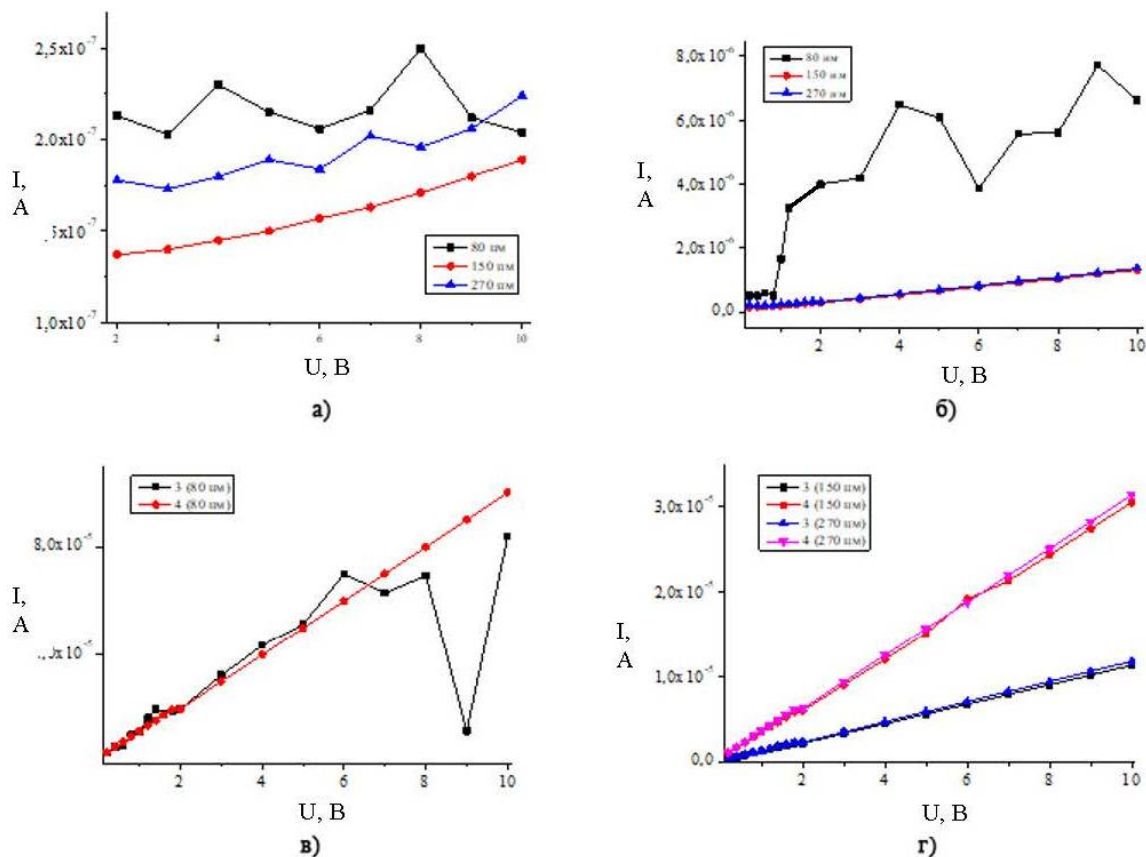


Рис. 4. ВАХ для разных участков графиков зависимости импеданса от частоты: *a* – 1 участок для образцов толщиной 80, 150 и 270 нм; *б* – 2 участок для образцов толщиной 80, 150 и 270 нм; *в* – 3 и 4 участок для образца толщиной 80 нм; *г* – 3 и 4 участок для образцов толщиной 150 и 270 нм

Влияние напряжения хорошо видно на участках 1 для каждой из толщин. Было установлено, что сопротивление полимерной пленки при высоких напряжениях больше, чем при низких. Такое поведение системы может наблюдаться в том случае, если цепочка состоит из параллельно соединенных R и C. Так как диэлектрическая проницаемость пленки, а следовательно, и емкость структуры металл/полимер/металл не должна напрямую зависеть от величины электрического поля, следует предположить, что изменяется активная составляющая сопротивления.

В таком случае импеданс системы будет определяться следующей формулой:

$$Z_{RC} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R^2}\right)^2 + (2\pi fC)^2}}$$

Из этой формулы видно, что импеданс системы при фиксированной частоте будет расти в том случае, когда будет уменьшаться емкость, либо при увеличении активного сопротивления. Так как предполагается, что емкость системы не

зависит от величины напряжения, то за параметр, от которого зависит изменение импеданса, берется активное параллельное сопротивление. Природа возникновения этого сопротивления в общем случае, например, для конденсаторов, определяется проводимостью диэлектрической прослойки и токами утечки. В случае использования пленки ПДФ ситуация будет намного сложнее, так как проводимость пленок ПДФ зависит от большого количества факторов, таких как: толщина полимерной пленки, напряжения, прикладываемого к структуре металл/полимер/металл. В данном случае, так как пленки относительно тонкие, активное сопротивление полимерной пленки может изменяться в широких пределах, от десятков ГОм, до перехода в состояние с высокой проводимостью, то есть режима короткого замыкания.

В работах [10, 13] было показано, что при гладкой и ровной поверхности полимерная пленка ПДФ внутренне структурирована, причем внутреннее строение (надмолекулярная структура) пленок обусловлено ассоциацией

макромолекул в исходном растворе. Ранее методами математического моделирования было установлено, что энергетически наиболее выгодными конфигурациями макромолекул ПДФ являются линейная синдиотактическая и спиральная изотактическая. Полимерные молекулы со спиральной структурой в исходном растворе объединяются в ассоциаты с преимущественной ориентацией боковых фрагментов на поверхности ассоциата. В частности, для полидифенилфталаида боковым является фталидный фрагмент, одна из связей которого может поляризоваться при захвате низкоэнергетического электрона. При формировании пленки из раствора при быстром испарении растворителя ассоциатная структура фиксируется, причем границы между ассоциатами являются интерфейсами между полимерными поверхностями с преимущественной ориентацией дипольных моментов.

Ранее [14] была предложена модель резистивного переключения в системе металл/полимер/металл, которая показывает, что в случае тонких (субмикронных) пленок ПДФ переход из низкопроводящего состояния в высокопроводящее возможен в результате последовательной трансформации энергетической электронной подсистемы полимерной пленки под действием инжекции зарядов из электродов или объема пленки. Этот процесс включает в себя несколько стадий, в том числе формирование электронной подзоны вблизи уровня Ферми через создание локализованных состояний, обеспечивающих прыжковый перенос заряда на начальных этапах к когерентному переносу заряда на конечных в результате, например, перекрытия волновых функций соответствующих электронных состояний.

Отметим, что зависимости импеданса от частоты аналогичны для толщин полимерных пленок 270 и 150 нм. Представляется важным небольшое скачкообразное увеличение сопротивления при частоте поля порядка 10 Гц (пленка толщиной 150 нм, рис. 2, б). Именно начиная с этой частоты (диапазон 10–40 Гц) начинают регистрироваться крупномасштабные флуктуации импеданса (пленка толщиной 80 нм, рис. 3). Такого рода процессы характерны для предпереходной области резистивного переключения. Начальной стадией известных видов резистивного переключения (например, [15, 16]), является зарядовая неустойчивость. По-видимому, в нашей работе наблюдаются

аналогичные эффекты (флуктуации импеданса и тока для полимерных пленок толщиной 80 нм). Результаты измерения ВАХ (рис. 5, б, в) свидетельствуют о том, что токи, измеренные в пределах участков 2 и 3, отличаются не более, чем на порядок. Известно, что резистивное переключение характеризуется резким (на несколько порядков) увеличением измеряемого тока. В нашем случае это означает, что полного переключения не наблюдается. По-видимому, это связано с тем, что переменное поле активизирует релаксационные процессы в конкретной области частот, но препятствует установлению сквозного тока как результата резистивного переключения.

Из физики диэлектриков [17] известно, что наиболее масштабное перемещение связанных зарядов происходит в случае миграционной поляризации, обычной для неоднородных диэлектриков. Накопление электрических зарядов на границах неоднородностей (слоев, пор, включений) приводит к объемно-зарядной поляризации. Объемный заряд существенно повышает электрическую емкость конденсатора, содержащего неоднородный диэлектрик. Миграционная поляризация, однако, уже не может быть отнесена к микроскопическим механизмам появления электрического момента. В диэлектриках, содержащих большие дипольные группы, в электрическом поле происходит переориентация или пограничная перезарядка таких областей – макродиполей. Очевидно, что как величина смещения зарядов, так и время релаксации для миграционной поляризации максимальны. Процессы установления и снятия миграционной поляризации сравнительно медленны и могут продолжаться секунды, минуты и даже часы. Поляризация этого вида обычно возможна лишь на низких частотах.

Можно предположить, что именно описанный выше интерфейс между элементами надмолекулярной структуры полимерной пленки является той средой, в которой возникает зарядовая неустойчивость при воздействии переменного электрического поля. Таким образом, появляется возможность исследовать полимер в предпереходной стадии резистивного переключения, то есть детализировать и конкретизировать процесс, приводящий полимерный слой к переходу в высокопроводящее состояние.

Заключение. В работе было исследовано влияние частоты переменного электрического

поля на проводимость структуры металл/полимер/металл. Были измерены и проанализированы зависимости импеданса сэндвич-структур МПМ от частоты и измерены вольт-амперные характеристики для различных диапазонов импедансного спектра. Общий вид графиков АЧХ для всех толщин пленок хорошо описывается теоретической моделью последовательной RC-цепи. Однако наблюдаются также существенные отклонения от теоретической модели. Было установлено, что для пленок толщиной 80 нм характерны значительные флуктуации импеданса в области частот 10–40 Гц, чему соответствует тенденция к увеличению тока на вольт-амперных характеристиках. Такие результаты позволили предположить, что в указанном диапазоне частот реализуется один из механизмов поляризации диэлектриков: объемно-зарядная (миграционная) поляризация. Следствием этих процессов является зарядовая неустойчивость, ранее описанная как процесс, непосредственно предшествующий резистивному переключению. На основе имеющихся данных по АСМ-исследованиям и математическому моделированию делается вывод о том, что средой, в которой реализуется объемно-зарядная поляризация, является сетка полимер-полимерных интерфейсов, образованных элементами надмолекулярной структуры.

Работа выполнялась при поддержке проекта «Зеркальные лаборатории» Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», а также проекта «Создание и исследование полимер-полимерных интерфейсов» Башкирского государственного педагогического университета им. М. Акмуллы.

Литература

1. Jeong D.S., Thomas R., Katiyar R.S., Scott J.F., Kohlstedt H., Petraru A., Hwang C.S. Emerging memories: resistive switching mechanisms and current status // Rep. Progr. Phys. 2012. V. 75. 076502 p.
2. Jae Sung Lee, Shinbuhm Lee, and Tae Won Noh. Resistive switching phenomena: A review of statistical physics approaches // Applied Physics Reviews. 2015. V. 2. P. 031303.
3. Slesazek S., Mikolajick T. Nanoscale resistive switching memory devices: a review // Nanotechnology. 2019. V. 30. 352003 p.
4. Meiran Zhao, Bin Gao, Jianshi Tang, He Qian, and Huaqiang Wu. Reliability of analog resistive switching memory for neuromorphic computing // Appl. Phys. 2020. Rev. 7. P. 011301.

5. Ling Q.-D., Liaw D.-J., Zhu C., Chan D.S.H., Kang E.T., Neoh K.G. Polymer electronic memories: Materials, devices and mechanisms // Progr. Polymer Sci. 2008. V. 33. 917 p.
6. Wen-Peng Lin, Shu-Juan Liu, Tao Gong, Qiang Zhao, and Wei Huang. Polymer-Based Resistive Memory Materials and Devices // Adv. Mater. 2014. V. 26. P. 570–606.
7. Лачинов А.Н., Воробьева Н.В. Электроника тонких слоев широкозонных полимеров // УФН. 2006. Т. 176. 1249 с.
8. Челидзе Т.Л., Деревянко А.И., Куриленко О.Д. Электрическая спектроскопия гетерогенных систем. Киев: Наукова думка, 1977.
9. Виноградова С.В., Васнев В.А., Выгодский Я.С. Кардовые полигетероарилены. Синтез, свойства и своеобразии // Успехи химии. 1996. Т. 65. 266 с.
10. Корнилов В.М., Лачинов А.Н., Карамов Д.Д., Набиуллин И.Р., Кульвеллис Ю.В. Надмолекулярная структура тонких пленок электроактивного полимера // ФТТ. 2016. Т. 58. С. 1030–1035.
11. Gadiev R.M., Lachinov A.N., Salikhov R.B., Rakhmiev R.G., Kornilov V.M., Yusupov A.R. // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 98. P. 173305.
12. Borisova M. E. Effect of Crystallinity on Relaxation Losses in Polyimide R-BAPS Films // Polymer Science. Series A. 2018. V. 60. № 6. P. 751–756.
13. Карамов Д.Д., Корнилов В.М., Лачинов А.Н., Крайкин В.А., Ионова И.А. Атомно-силовая микроскопия субмикронных пленок электроактивного полимера // ЖТФ. 2016. Т. 86. С. 124–129.
14. Лачинов А.Н., Корнилов В.М., Загуренко Т.Г., Жеребов А.Ю. К вопросу о высокой проводимости несопряженных полимеров // ЖЭТФ. 2006. Т. 129. Вып. 4. С. 728–734.
15. Скалдин О.А., Жеребов А.Ю., Делев В.В., Лачинов А.Н., Чувывров А.Н. Зарядовая неустойчивость в тонких пленках органических полупроводников // Письма в ЖЭТФ. 1990. Т. 51. 141 с.
16. Корнилов В.М., Лачинов А.Н. Электропроводность в системе металл/полимер/металл: роль граничных условий // ЖЭТФ. 1997. Т. 111. 1513 с.
17. Рез И.С., Поплавко Ю.М. Диэлектрики. Основные свойства и применения в электронике. М.: Радио и связь, 1989. 288 с.

References

1. Jeong D.S., Thomas R., Katiyar R.S., Scott J.F., Kohlstedt H., Petraru A., Hwang C.S. Emerging memories: resistive switching mechanisms and current status// Rep. Progr. Phys., 2012, vol. 75, 076502 p.
2. Jae Sung Lee, Shinbuhm Lee, and Tae Won Noh. Resistive switching phenomena: A review of statistical physics approaches // Applied Physics Reviews., 2015, vol. 2, 031303 p.

3. Slesazek S., Mikolajick T. Nanoscale resistive switching memory devices: a review // *Nanotechnology*, 2019, vol. 30, 352003 p.
4. Meiran Zhao, Bin Gao, Jianshi Tang, He Qian, and Huaqiang Wu. Reliability of resistive switching memory for neuromorphic computing // *Appl. Phys. Rev.*, 2020, vol. 7, 011301 p.
5. Ling Q.-D., Liaw D.-J., Zhu C., Chan D.S.H., Kang E.T., Neoh K.G. Polymer electronic memories: Materials, devices and mechanisms // *Progr. Polymer Sci.*, 2008, vol. 33, 917 p.
6. Wen-Peng Lin, Shu-Juan Liu, Tao Gong, Qiang Zhao, and Wei Huang. Polymer-Based Resistive Memory Materials and Devices // *Adv. mater.*, 2014, vol. 26, pp. 570-606.
7. Lachinov A.N., Vorobieva N.V. Electronics of thin layers of wide-gap polymers // *UFN*, 2006, vol. 176, 1249 p.
8. Chelidze T.L., Derevianko A.I., Kurylenko O.D. Electrical spectroscopy of heterogeneous systems. Kyiv: Naukova Dumka, 1977.
9. Vinogradova S.V., Vasnev V.A., Vygodskii Ya.S. Carded polyheteroarylenes. Synthesis, properties and originality // *Advances in Chemistry*, 1996, vol. 65, 266 p.
10. Kornilov V.M., Lachinov A.N., Karamov D.D., Nabiullin I.R., Kulvelis Yu.V. Supramolecular structure of thin films of an electroactive polymer // *FTT*, 2016, vol. 58, pp. 1030-1035.
11. Gadiev R.M., Lachinov A.N., Salikhov R.B., Rakhmiev R.G., Kornilov V.M., and Yusupov A.R. // *Appl. Phys. Lett*, 2011, vol. 98, 173305 p.
12. Borisova M. E. Effect of Crystallinity on Relaxation Losses in Polyimide R-BAPS Films // *Polymer Science. Series A.*, 2018, vol. 60, no. 6, pp. 751-756.
13. Karamov D.D., Kornilov V.M., Lachinov A.N., Kraikin V.A., Ionova I.A. Atomic force microscopy of submicron films of an electroactive polymer // *JTF*, 2016, vol. 86, pp. 124-129.
14. Lachinov A.N., Kornilov V.M., Zagurenko T.G., Zherebov A.Yu. On the issue of high conductivity of non-conjugated polymers // *ZhETF*, 2006, vol. 129, iss. 4, pp. 728-734.
15. Skaldin O.A., Zherebov A.Yu., Delev V.V., Lachinov A.N., Chuvyrov A.N. Charge instability in thin films of organic semiconductors // *JETP Letters*, 1990, vol. 51, 141 p.
16. Kornilov V.M., Lachinov A.N. Electrical conductivity in the metal-polymer-metal system: the role of boundary conditions // *ZhETF*, 1997, vol. 111, 1513 p.
17. Rez I.S., Poplavko Yu.M. Dielectrics. Basic properties and applications in electronics. Moscow: Radio and communication, 1989. 288 p.

INFLUENCE OF THE ALTERNATING FIELD FREQUENCY ON THE ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF POLYMER FILMS

© V.M. Kornilov¹, D.D. Karamov², T.R. Khusainov¹, A.N. Abakumov¹, A.R. Yusupov¹

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

² Institute 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 frequency dependences of the impedance of metal-polymer-metal sandwich structures for different thicknesses of the polymer layer are presented. The voltage characteristics of the samples in various frequency ranges were measured. The general view of the amplitude-frequency characteristics graphs for all film thicknesses is well described by the theoretical model of the sequential RC circuit. On all graphs, you can notice the presence of a cutoff frequency, which can be interpreted as the beginning of the RC filter. However, there are also significant deviations from the theoretical characteristics. It is established that with a polymer layer thickness of 80 nm in the frequency range

At 10–40 Hz, an abnormal decrease in impedance is observed, corresponding to an increase in current at the volt-ampere characteristics. The resulting charge instability is considered as a consequence of the volume-charge polarization, which, in turn, is due to the specifics of polymer-polymer interfaces that arise during the formation of the supramolecular structure of the polymer. The results of the work are interpreted within the framework of the resistive switching model, which assumes that in the case of submicron polymer films used in the metal-polymer-metal system, resistive switching is possible as a result of the sequential transformation of the energy electronic subsystem of the polymer film under the action of charge injection from the electrodes.

Keywords: thin polymer films, frequency dependence of impedance, supramolecular structure, polarization of dielectrics.