

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии наук  
(УФИЦ РАН)

Институт физики молекул и кристаллов - обособленное структурное  
подразделение Федерального государственного бюджетного научного  
учреждения Уфимского федерального исследовательского центра  
Российской академии наук (ИФМК УФИЦ РАН)

На правах рукописи

**Алтыншина Гузель Рафкатовна**

**Электрофизические свойства отдельных пленок и области вдоль  
границы раздела между двумя пленками с использованием  
полиметилметакрилата**

04.06.01 – Химические науки

02.00.03 – Органическая химия

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД**

Уфа 2022

**Работа выполнена в Институте физики молекул и кристаллов – обособленном структурном подразделении Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского Федерального исследовательского центра Российской академии наук**

**Научный руководитель:** – **Лачинов Алексей Николаевич**  
доктор физико-математических наук  
главный научный сотрудник

**Рецензенты:**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В настоящее время ведется активный поиск и исследование материалов с высокой подвижностью носителей заряда. Это обусловлено с одной стороны традиционным направлением развития микро- и наноэлектроники, связанным с постоянным повышением тактовой частоты процессоров, перспективой создания твердотельной терагерцовой электроники. Кроме того, возникли дополнительные требования к электронным материалам, которые должны помимо улучшения экономических характеристик обладать особыми механическими свойствами, обеспечивая реальную гибкость устройств. В связи с этим проводится большой объем работ в направлении синтетических органических материалов (полимеров) и принципиально новых электронных структур, например, функциональных диэлектриков, границы раздела которых способны к локализации электронного газа.

### **Цель работы:**

- Исследование электрофизических свойств пленок полиметилметакрилата и структур на их основе.

В соответствии с целью были поставлены следующие задачи:

1. *Исследование влияния толщин полимерных пленок полиметилметакрилата на параметры носителей заряда (подвижность и концентрация) и на высоту потенциального барьера на границе раздела металл-полимер;*
2. *Изучение влияния внешних воздействий и допантов на электрофизические параметры пленок.*
3. *Исследование электрофизических свойств области вдоль границы раздела двух пленок полиметилметакрилата (ПММА).*
4. *Изучение влияния дипольных эффектов на свойства границы раздела ПММА/ПММА.*
5. *Исследовать сенсорные свойства двухслойных структур.*

**Научная новизна и практическая значимость.** Новизна работы заключается в том, что интересные эффекты, обнаруженные на экзотических полимерах, будут исследованы на пленках известных полимеров. В отличие от традиционных органических диэлектриков, которые широко применяются в электронике, эти полимеры имеют несопряженные связи, т.е. нет чередования одиночных и двойных связей. Обнаружение в коммерческих полимерах электронных эффектов откроет широкие перспективы для их применения в качестве электроактивных пленочных элементов в электронике и наноэлектронике.

**Апробация работы.** Результаты исследований представлены в следующих конференциях:

- a. Комплексный анализ, математическая физика и нелинейные уравнения. Оз. Банное, 10-14 марта 2020 года;
- b. Уфимская осенняя математическая школа-2020 – спутник международной научной конференции. Уфа, 11-14 ноября 2020 года.
- c. Теоретические и экспериментальные исследования нелинейных процессов в конденсированных средах. Уфа, 22 апреля 2020 года.
- d. Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества. Суздаль, 05-09 октября 2020 года
- e. Двадцать шестая всероссийская научная конференция студентов физиков и молодых ученых. ВЕКСФ-26 – Уфа, 2020 года.
- f. I коршаковская всероссийская с международным участием конференция «поликонденсационные процессы и полимеры». Москва, 18-20 февраля 2019 года.
- g. I Всероссийской молодежной школы-конференции «Современные физика, математика, цифровые и нанотехнологии в науке и образовании (ФМЦН\_22)», посвященной 100-летию со дня рождения А.Д. Сахарова (г. Уфа, 25-27 апреля 2022 г.)

**Публикации.** По материалам НКР опубликованы 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ, тезисы докладов 7 докладов на международных и всероссийских конференциях.

**Личный вклад** автора состоит в проведении экспериментальных исследований, интерпретации, анализе полученных результатов, написании публикаций.

**Структура и объем НКР.** НКР состоит из введения, литературного обзора, описания методов исследования, экспериментальной части, выводов и списка цитируемой литературы. Объем работы составляет 121 страниц компьютерного набора, которая включает 18 таблиц, 72 рисунка. Список цитируемой литературы состоит из 109 наименований.

# ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

## 1. Исследование объемных свойств пленок ПММА

### 1.1. Исследование влияния толщины пленок на электрофизические параметры

В работе были исследованы вольт-амперные характеристики отдельных полимерных пленок в структуре типа сэндвич – Cu/полимер/In в зависимости от их толщины. На рис. 1 представлены соответствующие зависимости.

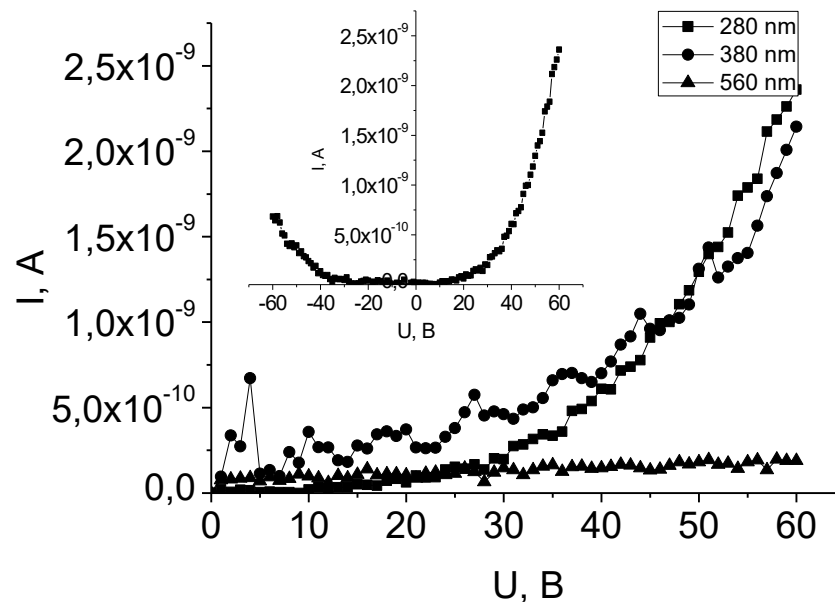


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики структуры Cu/ПММА/In. а) ВАХ при разных толщинах полимерной пленки:  $280 \pm 20$  нм,  $380 \pm 20$  нм,  $560 \pm 20$  нм). На вставке представлена ВАХ пленки толщиной 280 нм при двух направлениях тока.

Анализ представленных на рис. 1 вольт-амперных характеристик позволил оценить подвижность и концентрацию носителей заряда. Пленки толщины  $280 \pm 20$  нм имеют подвижность равную  $1,7 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2/\text{Вс}$  при концентрации носителей заряда  $1,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . А подвижность и концентрация в пленках толщиной  $380 \pm 20$  нм была равна  $4,5 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2/\text{Вс}$  и  $2,9 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , соответственно. Но для пленок толщиной  $600 \pm 20$  нм, отлитых из 10% раствора полимера, этим методом параметры носителей заряда оценить не удалось из-за малой величины проводимости и большой погрешности результатов оценок.

Таким образом, уменьшение толщины пленки ПММА приводит к некоторому увеличению подвижности носителей заряда. Концентрация носителей заряда мала и изменяется с толщиной слабо. Последнее можно объяснить тем, что этим методом оценивается концентрация собственных носителей заряда.

### ***1.2. Исследование вольт-фарадных характеристик тонких пленок ПММА***

Для исследования были изготовлены тонкопленочные структуры Al / PMMA /p-Si. Концентрация ПММА в ЦГН составляла 7%. Структура образца представлена на рисунке 2б (глава 2).

Исследования проводились методом ВФХ на зондовой станции MPI TS50 с использованием измерителя LCR Keysight E4980A. Напряжение смещения подавалось при помощи источника измерителя Keysight B2961A.

Для того, чтобы исследовать влияние отжига на диэлектрические и ВФХ ПММА, были проведены исследования при различных температурах отжига (в диапазоне 70°C до 150°C). Было установлено, что пленки, которые подвергались отжигу при 100 С показывают наилучшие диэлектрические и ВФХ характеристики.

На рисунке 2 показана зависимость измеренных ВФХ в координатах  $C-V$  экспериментальной структуры Al/PMMA/p-Si, для частот 20, 200, 500 кГц при комнатной температуре. Напряжение смещения было изменено с -20 В, до +20 В постоянного тока для всех образцов. Как показано на рисунке 2 кривая  $C-V$  имеют три режима, в виде областей накопления-истощения-инверсии. Значения емкости зависят от ряда параметров, таких как толщина и формирование оксидного слоя, последовательного сопротивления и распределения энергии или плотности интерфейсных состояний. Обычно, влияние плотности интерфейсных состояний могут быть исключены, когда кривая  $C-V$  измеряются на достаточно высокой частоте ( $f \geq 500$  Гц) [92,93], поскольку заряды в интерфейсных состояниях не могут следовать за сигналом переменного тока [94]. В этом случае интерфейсное состояние находится в равновесии с полупроводником.

Как можно видеть, графики  $C^{-2}-V$  дают прямую линию в широком диапазоне приложенных напряжений смещения. Наклон соответствует локализованной концентрации легирования.

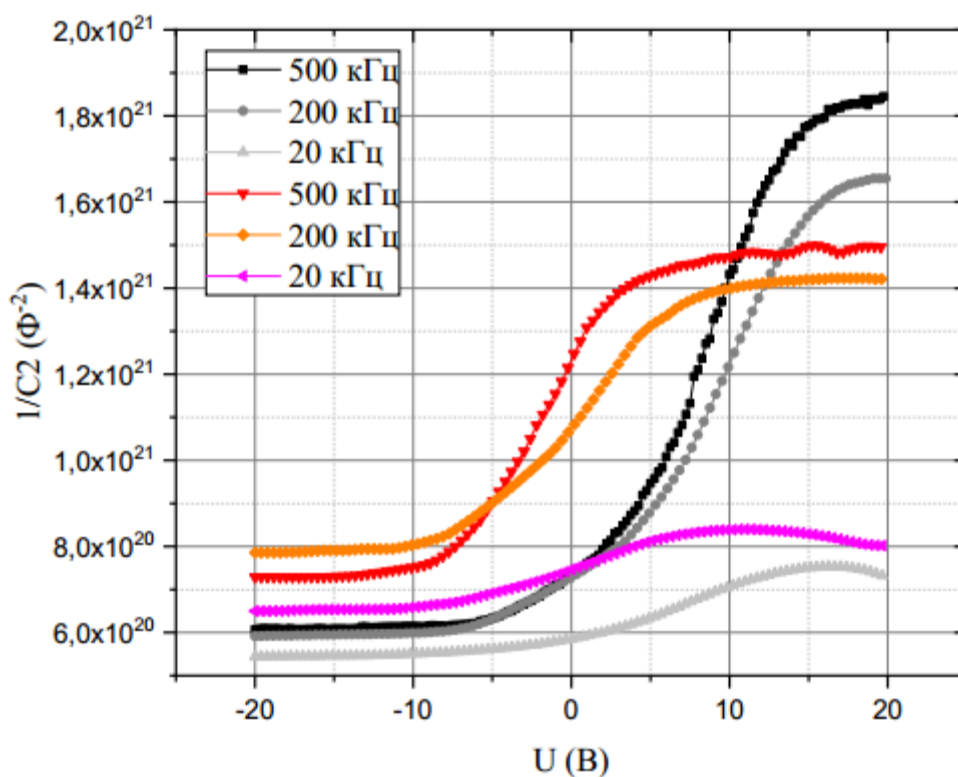


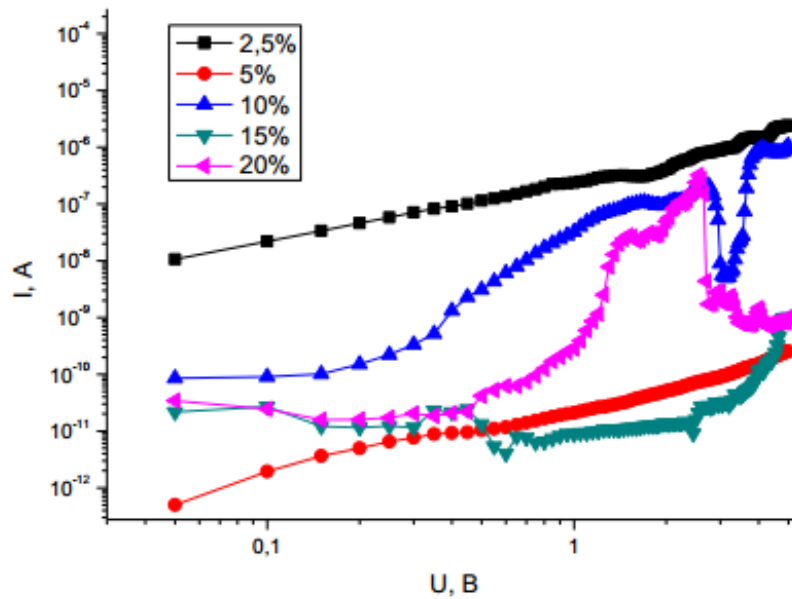
Рис. 3.6. Вольт-фарадные характеристики структуры Al / PMMA / p-Si в координатах  $C^{-2}-V$  при комнатной температуре.

### 1.3. Исследование влияния добавок на свойства пленок ПММА

Для проведения данных исследований были изготовлены растворы пмма с добавками фенолфталиена различной весовой концентрации 0, 2.5, 5, 10, 15, 20 вес.%. Структура образцов представляли собой сэндвич структуру.

На рисунке 3 представлены вольтамперные характеристики структур с различной концентрацией допантов в логарифмических координатах.





**Рис.3. Вольтамперные характеристики Cu/PMMA+(2.5; 5; 10; 15; 20)%Dop/Al/Ni в логарифмических координатах.**

Как видно из графика наличие допанта приводит к изменению формы кривой, с увеличением массовой доли допанта, график все больше искривляется. Исходя из этого можно сделать вывод, что чем больше концентрация допанта, тем больше влияние у него на проводимость полимера.

В рамках теории ТОПЗ были рассчитаны подвижность и концентрация НЗ.

Из полученных данных, следует, что при увеличении концентрации допанта в структуре Cu/PMMA+N%Dop/Al/Ni, концентрация НЗ уменьшается. Подвижность увеличивается при высоких концентрациях допирующей примеси из-за сильного перекрытия кулоновских ловушек, которое сглаживает случайный потенциальный ландшафт, и увеличения плотности носителей заряда, которые заполняют все большее число оставшихся глубоких ловушек. Подвижность неуклонно растет с увеличением концентрации допирующей примеси в материалах с высоким внутренним энергетическим беспорядком, поскольку носители, освобожденные из кулоновских ловушек, могут заполнять даже более глубокие внутренние состояния, что приводит к смещению вверх уровня Ферми и увеличению скорости скачка носителей [98].

#### 1.4. Свойства структуры металл/полиметилметакрилат/металл в зависимости от одноосного давления

Для исследования влияния одноосного давления на вид ВАХ пленок ПММА были изготовлены образцы типа сэндвич Me / ПММА/ Me. Результаты представлены на рисунке 4. Давление  $p(1)$  соответствует минимальному значению, а  $p(5)$  – максимальному. Из рисунка ясно видно, что увеличение величины одноосного давления приводит к росту проводимости образца и форма ВАХ изменяется. Также видим, что напряжение в точке перехода из линейной зависимости в степенную, при котором концентрация термически генерируемых равновесных свободных зарядов становится сравнимой с концентрацией инжектируемых зарядов, с ростом приложенного одноосного давления уменьшается. Полученные ВАХи были проанализированы в рамках инжекционной модели токов ограниченных объемным зарядом, что позволило нам рассчитать параметры носителей заряда и высоту потенциального барьера. Результаты представлены в таблице 1.

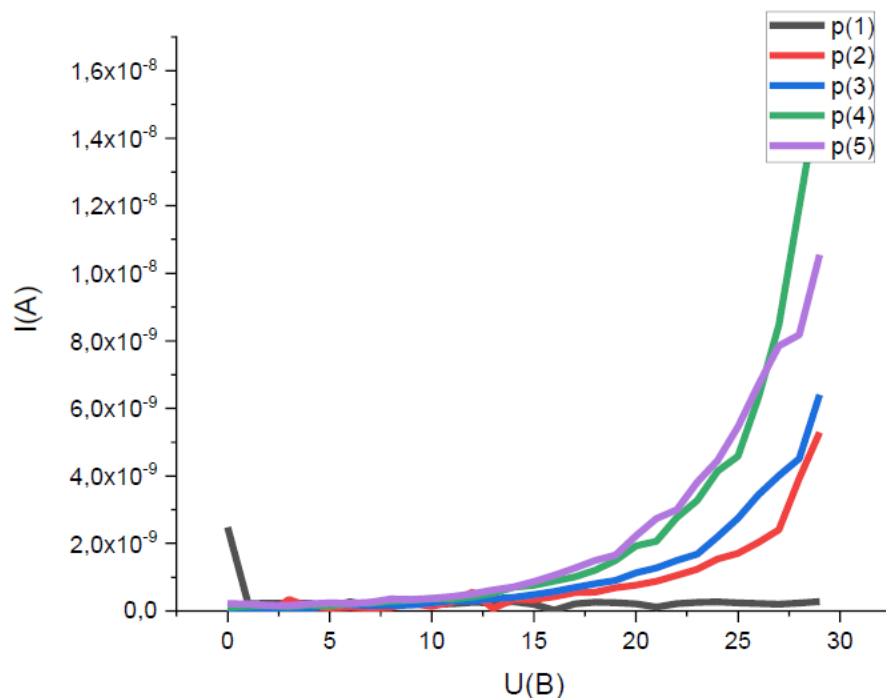


Рис. 4. ВАХ пленок пмма в зависимости от приложенного одноосного давления.

Таблица 1

### Вычисленные параметры образцов

Приложенное давление, $p$ , Па	Подвижность носителей заряда, $\mu$ , $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	Концентрация носителей заряда, $n_0$ , $\text{м}^{-3}$	Высота потенциального барьера, $\varphi_{B0}$ , эВ
$2.3 \cdot 10^7$	$2.8 \cdot 10^{-7}$	$5.6 \cdot 10^{17}$	0.43
$4.59 \cdot 10^7$	$3.5 \cdot 10^{-7}$	$4.9 \cdot 10^{17}$	0.37
$5.3 \cdot 10^7$	$4.1 \cdot 10^{-7}$	$4.5 \cdot 10^{17}$	0.33
$7.6 \cdot 10^7$	$8.1 \cdot 10^{-7}$	$3.3 \cdot 10^{17}$	0.33
$8.6 \cdot 10^7$	$1.8 \cdot 10^{-6}$	$2.1 \cdot 10^{17}$	0.29

Полученные результаты позволили установить, что под действием внешнего механического одноосного давления на пленочные образцы ПММА дрейфовая подвижность носителей заряда увеличивается, а концентрация и высота потенциального барьера уменьшаются.

Ранее аналогичные результаты наблюдались на пленках ПДФ. Приложение одноосного давления вызвало в пленках ПДФ трансформацию ВАХ при давлениях меньших порогового, которому соответствует переход в ВПС.

#### **1.5. Влияние дефектов в стали на вид ВАХ в структуре**

##### ***Me/ПММА/Me***

Для исследования влияния дефектов в стали на вид ВАХ были подготовлены многослойные структуры типа Fe/ПММА/In. В качестве подложки была использована пластина из сплава железа, вырезанная из стенки газотранспортной трубы диаметром 1800 мм вдоль оси трубы. Размер поверхности этого образца составлял - 30\*83 мм, а толщина - 0,5 мм. Пленки были получены методом Ленгмюра-Блоджетт. Толщина полимерной пленки была равна ~ 1,24 мкм. Верхний электрод был прижимным.

Измерения полей напряжений при одноосном растяжении трубной стали проводили системой VIC 3D. Система VIC 3D позволяет получить точную информацию о локальном и общем распределении деформаций. Испытания на одноосное растяжение проводились на установке Inston 8801 при комнатной

температуре и скоростью деформации 1 мм/мин. На участке визуального измерительного контроля была проведена окраска поверхности образцов в белый цвет, после чего на предварительно окрашенную поверхность наносился «крупчатый» рисунок в виде легкого распыления черной краски. Во время деформации VIC 3D отслеживала изменения полученного узора.

Вольтамперные характеристики измеряли на различном расстоянии от места разрыва. На рисунке 5 представлена ВАХ структуры Fe/ПММА/In.

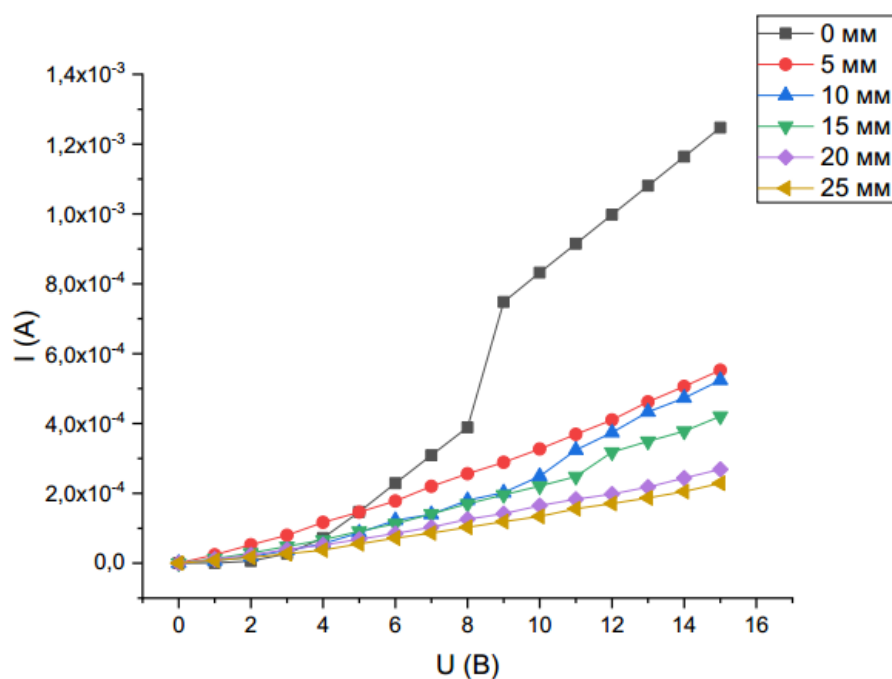


Рис. 5. Вольтамперная характеристика ПММА.

На месте разрыва хорошо замечен один участок ПЗЛ. Из полученных результатов видно, что при отдалении от места разрыва проводимость тока уменьшается.

Анализ вольтамперных характеристик в рамках инжекционной модели позволил рассчитать параметры носителей заряда и оценить высоту потенциального барьера.

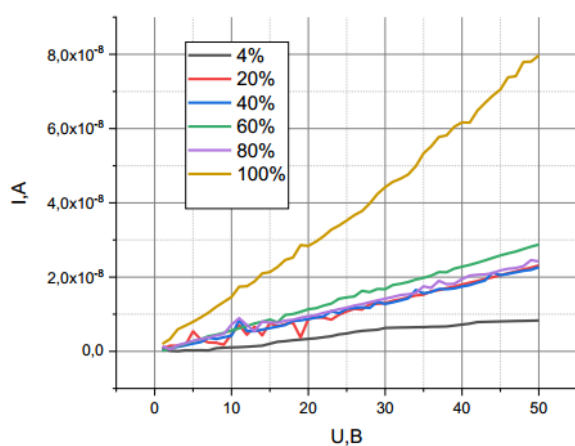
Из полученных результатов следует, что подвижность и концентрация носителей заряда по мере отдаления от места разрыва начинают увеличиваться в показаниях, а высота потенциального барьера уменьшается. Из этого следует, что в точке разрыва работа выхода электрона больше, также в работе смогли увидеть предельное заполнение ловушек.

В работе выявлена зависимость того, что сила тока минимальна в точке деформации и по мере отдаления от места разрыва ток начинает возрастать, а сопротивление, наоборот, в месте разрыва больше.

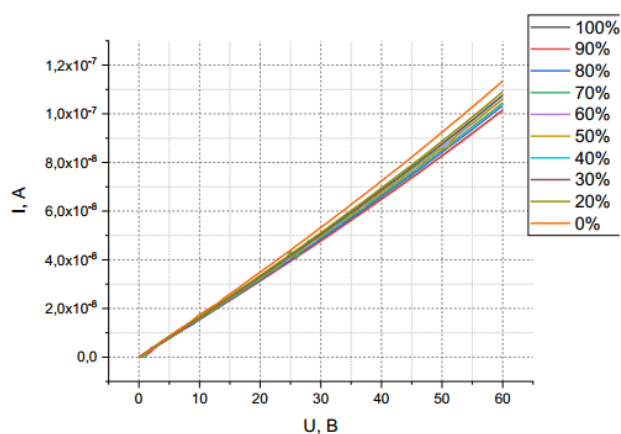
### ***1.6. Влияние состава атмосферы на вольтамперные характеристики структуры металл/ПММА/металл***

В данном разделе представлены результаты исследования электрофизических свойств тонких пленок ПММА в зависимости от состава газов атмосферы окружающей среды.

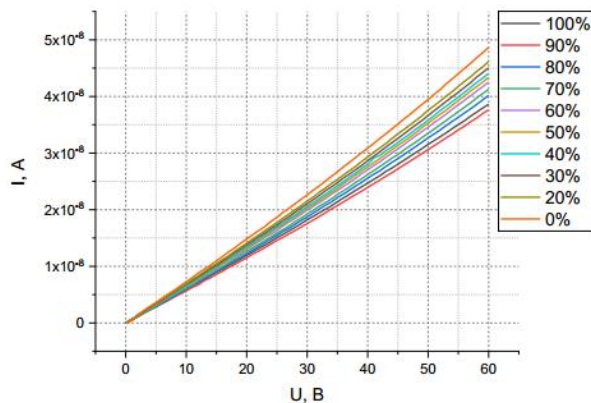
Были изготовлены образцы вида Me/ПММА/Me. Использовали растворы ПММА в толуоле различной концентрации - 5, 7, и 10%. На рисунке представлены ВАХи пленок из 7% раствора ПММА в зависимости от влажности и содержания различных газов в камере.



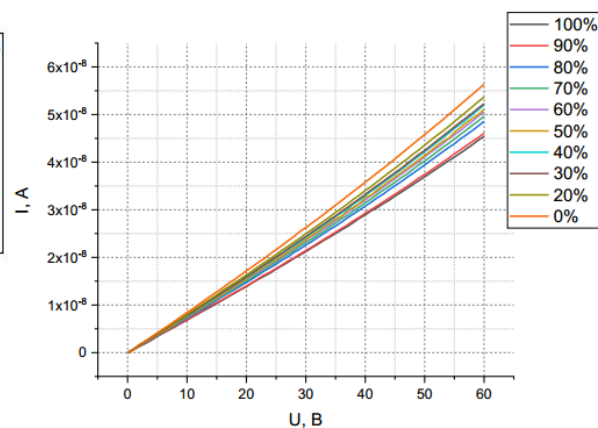
а)



б)



в)



г)

**Рис. 6. ВАХи 7% ПММА в зависимости а) от влажности; б) от содержания кислорода в камере в) от аргона, г) от пропан-бутановой смеси.**

Представленные графики (б) показывают, что увеличение влажности приводит к увеличению проводимости каждого из образцов. Наибольшие значения проводимости наблюдаются 5% пленке ПММА, а наименьшие – в 10% ПММА.

Исследования показали, что увеличение влажности приводит к увеличению проводимости пленок ПММА, в то время как увеличение содержания газов ухудшает проводимость пленок. Увеличение влажности приводит к росту подвижности и снижению концентрации НЗ, а высота потенциального барьера уменьшается. Результаты исследования влияния концентрации таких газов как кислород, аргон, пропан-бутановая смесь показали, что увеличение содержания этих газов приводит к уменьшению подвижности и росту концентраций НЗ. Высота потенциального барьера в этом случае тоже падает.

### ***1.7. Исследование проводимости структуры Ме/ПММА/Ме в области фазового перехода в первого рода одного из металла***

Для проведения измерения вольт-амперных характеристик и измерения температурных зависимостей использовались образцы типа «сэндвич» структуры металл-полимер-металл.

Переключение образцов в высокопроводящее состояние происходит при достижении температуры определенной пороговой величины. На рис. 7 представлены вольт-амперные характеристики (ВАХ) структуры (сплав Вуда)/полимер/медь при различных значениях температуры ниже температуры плавления сплава Вуда.

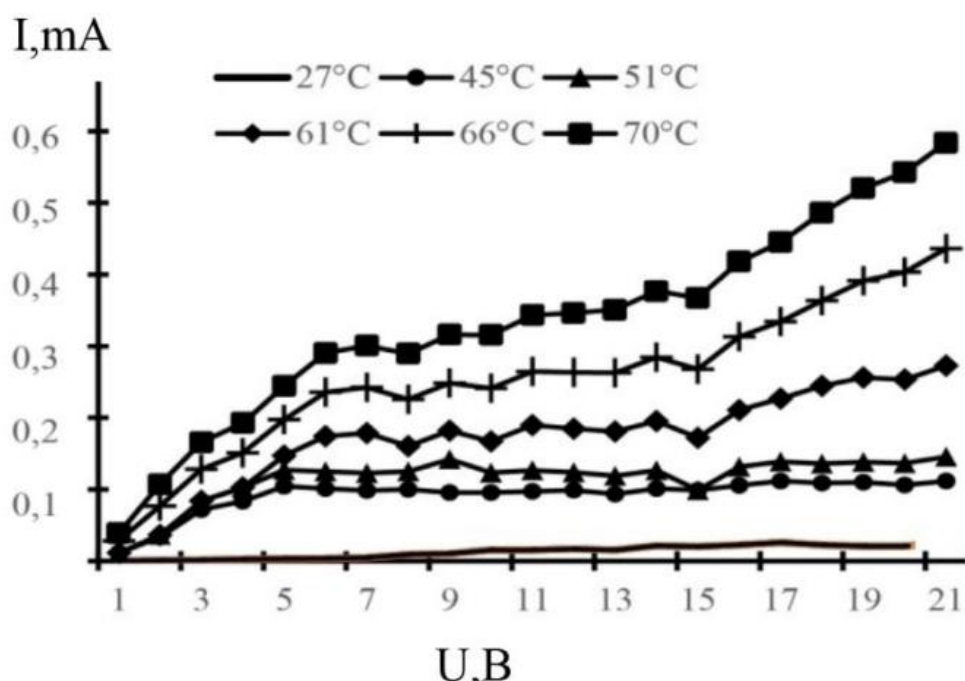


Рис. 7. ВАХ экспериментальных образцов в зависимости от температуры.

Интерпретация полученных результатов проводилась в рамках модели инжекционных токов ограниченных объемным зарядом. Полученные параметры представлены в таблице 2.

Таблица 2

T, C	27.6	31	37	43	47	50	58
$U_1$ В	3,9	3,92	4,02	4,05	4,4	4,8	4,88
$N \cdot 10^{20}$ , $m^{-3}$	1,21	1,22	1,25	1,26	1,37	1,49	1,52
$\mu \cdot 10^{11}$ , $m^2/Vc$	7,23	1,22	1,46	1,89	2,41	2,75E	3,58

Данные, приведенные в табл., свидетельствуют о том, что в предпереходной области происходит увеличение концентрации собственных носителей заряда и их подвижностей. Очевидно, что одним из процессов, приводящих к подобным изменениям, является уменьшение потенциального барьера на границе раздела ПДФ/сплав Вуда. Это изменение обусловлено смещением квазиуровня Ферми, связанным не только с повышением температуры образца, но и изменением структуры сплава вблизи критической температуры плавления. Смещение УПЗЛ на участке температур 27–37°C в область более высоких напряжений может свидетельствовать о том, что концентрация глубоких ловушечных состояний растет. При этом происходит перераспределение плотности состояний в пределах данного энергетического

интервала. В связи с этим наблюдается смещение квазиуровня Ферми в область более высоких напряжений. Увеличение температуры приводит к изменению инъекции носителей заряда в полимерную пленку. Возможно, этот процесс происходит в результате, например, разрушения соответствующих поверхностных электронных состояний, что приводит к повышению уровня инъекции. Величина инжектированного заряда также повышается с увеличением приложенного к образцу электрического поля, в результате удельная проводимость в высокопроводящем состоянии возрастает.

### 1.8. Исследование электронной структуры

#### Полиметилметакрилата

В данном параграфе представлены результаты исследования электронных свойств ПММА.

Начальная оптимизация геометрии ПММА проводилась при использовании полуэмпирического метода AM1. Далее в работе использовался метод теории функционала плотности в приближении B3LYP с базисным набором 6-31+G(d) для полной оптимизации геометрии и расчета энергий молекул. Было принято решение использовать значения базисного набора 6-31+G(d), так как предположительно дают более точные результаты близкие к экспериментальным.

В Табл. 3. ниже представлены результаты вычислений для нейтральной молекулы ПММА.

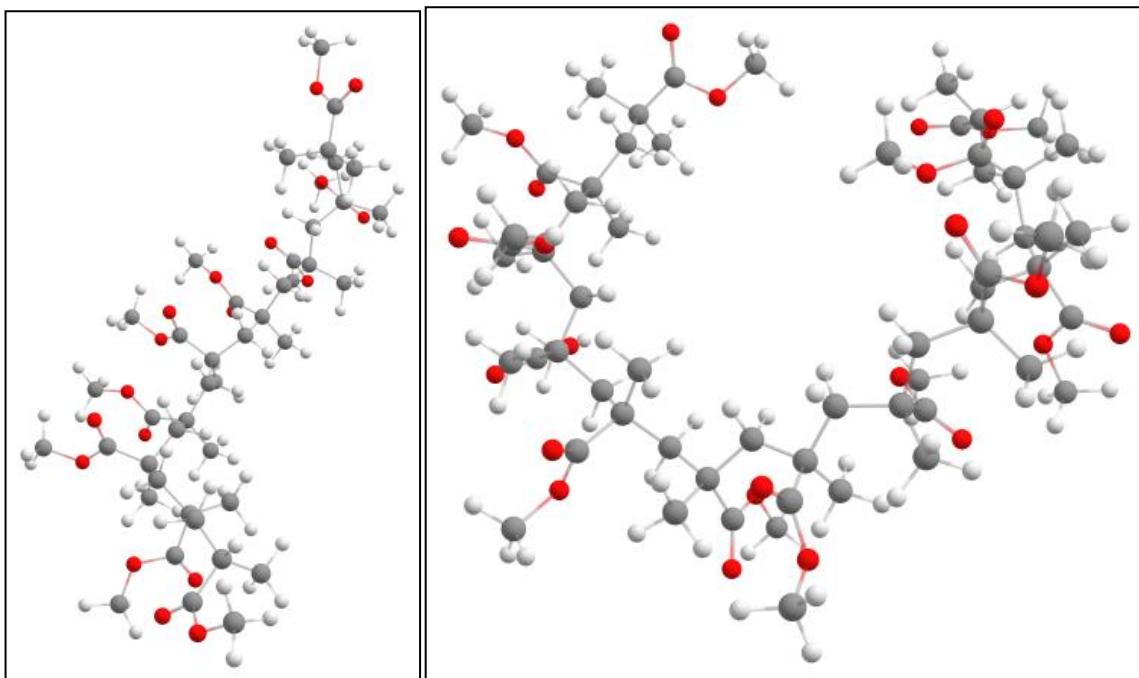
Таблица 3

#### Энергетические параметры для нейтральной молекулы ПММА

Мономер	$E_{total}$ , кДж/моль	$E_{HOMO}$ , эВ	$E_{LUMO}$ , эВ	Ширина запрещённой зоны, эВ	Дипольный момент, D
C5H8O2	$-0,9 \cdot 10^6$	-7,3	-1,1	6,2	1.7691

Квантово-химические расчеты позволили установить, что энергетически наиболее выгодными конфигурациями ПММА являются линейная синдиотактическая (а) и спиральная синдиотактическая (рис. 8 б).



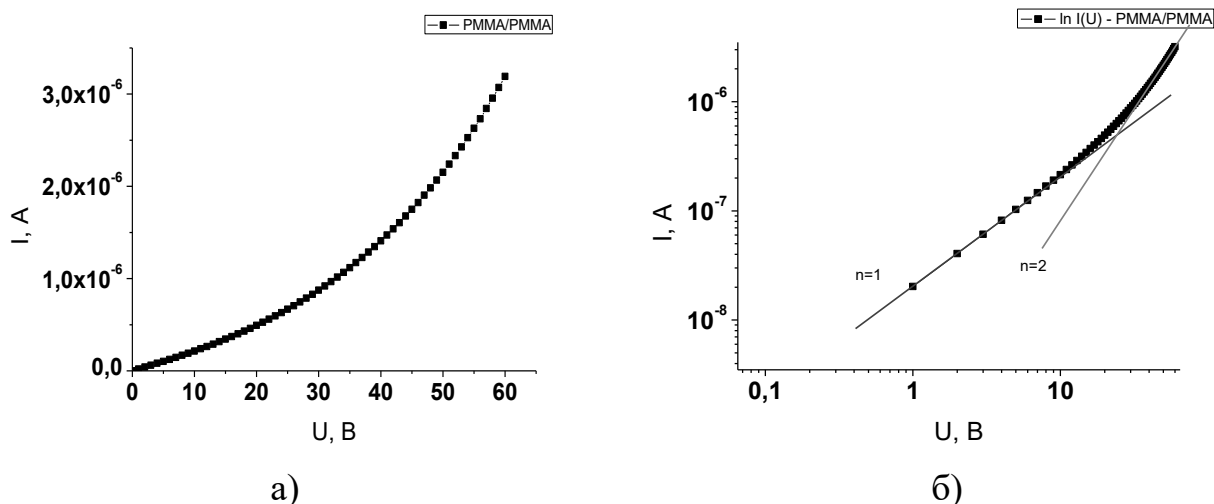


**Рис. 8.** Линейная синдиотактическая из 9 MMA(а) и Спиральная синдиотактическая из 12 MMA (б).

## **2. Исследование электрофизических свойств структур ПММА/ПММА**

### ***2.1. Электрофизические свойства области вдоль границы раздела двух пленок полиметилметакрилата***

В данном разделе продемонстрированы результаты исследования свойств области вдоль границы раздела. Исследования проводились классическим методом вольт-амперных характеристик. На рис. 4 представлены ВАХ, измеренные вдоль границы раздела ПММА/ПММА на образцах полимер-металл-полимер. В измеряемом интервале напряжений ВАХ имеет нелинейный вид. Очевидно, что при двух электродном методе измерений существенный вклад в проводимость границы раздела будут вносить контактные сопротивления, ограничивая протекающий ток. Однако надо отметить, что данные контакты могут давать нетривиальный вклад в проводимость образцов, так как они представляют собой область перехода из трехмерного металла в квазидвумерную область. В связи с этим важно провести оценку параметров носителей заряда. С учетом нелинейности ВАХ в данной работе был применен формализм модели инжекционных токов.



**Рис. 9. Типичная вольт-амперная характеристика, измеренная вдоль границы раздела ПММА/ПММА – а), б) – ВАХ в логарифмических координатах.**

Полученные значения подвижности носителей заряда вдоль границы раздела ПММА/ПММА (рис.9) оказались значительно выше, параметров объемного переноса в поперечном направлении пленочных образцов (рис. 3.1). Например, подвижность носителей заряда составляет в среднем  $140 \text{ см}^2/\text{Вс}$ , при низкой концентрации носителей заряда  $5,45 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . Низкая концентрация носителей заряда, полученная согласно формуле (4 – 3.11) обусловлена тем, что она должна соответствовать равновесной концентрации, которая в ПММА ожидаемо низка.

Полученные результаты указывают на возможность привлечения двумерной модели формирования нового электронного состояния, вдоль границы раздела двух диэлектрических полимерных пленок ПММА для объяснения аномальной подвижности носителей заряда и, как следствие высокой проводимости системы. До сих пор подобные свойства наблюдались в довольно экзотических полимерных структурах.

## ***2.2. Дипольные эффекты области вдоль границы раздела ПММА / ПММА***

Данный раздел посвящен экспериментальному исследованию влияния концентрации дипольных моментов на проводимость системы полимер/полимер. Влияние дипольных моментов на электрофизические свойства области вдоль границы раздела пленок ПММА исследовали путем введения в полимерную матрицу низкомолекулярного соединения с большим

дипольным моментом. В качестве допанта использовали 3,3-дифенилфталид-4',4''-дикарбоновую кислоту (ДДК).

Для измерения были подготовлены образцы вида: полимер – металл – полимер.

В данной работе нами были рассмотрены три случая: в первых двух из них были допированы ДДК нижний и верхний слои, соответственно, а в третьем – оба слоя полимерной пленки, при этом концентрация ДДК в обоих слоях была одинакова. Концентрация низкомолекулярного допанта варьировалась от 7,5% до 30 %. Концентрация ПММА в циклогексаноне (ЦГН) была равна 7 %.

Исследование электронных свойств проводили классическим двухзондовым методом измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) при комнатных условиях с помощью источника-измерителя Keithley 2400.

Для образцов были получены ВАХи, представленные на рис. 10.

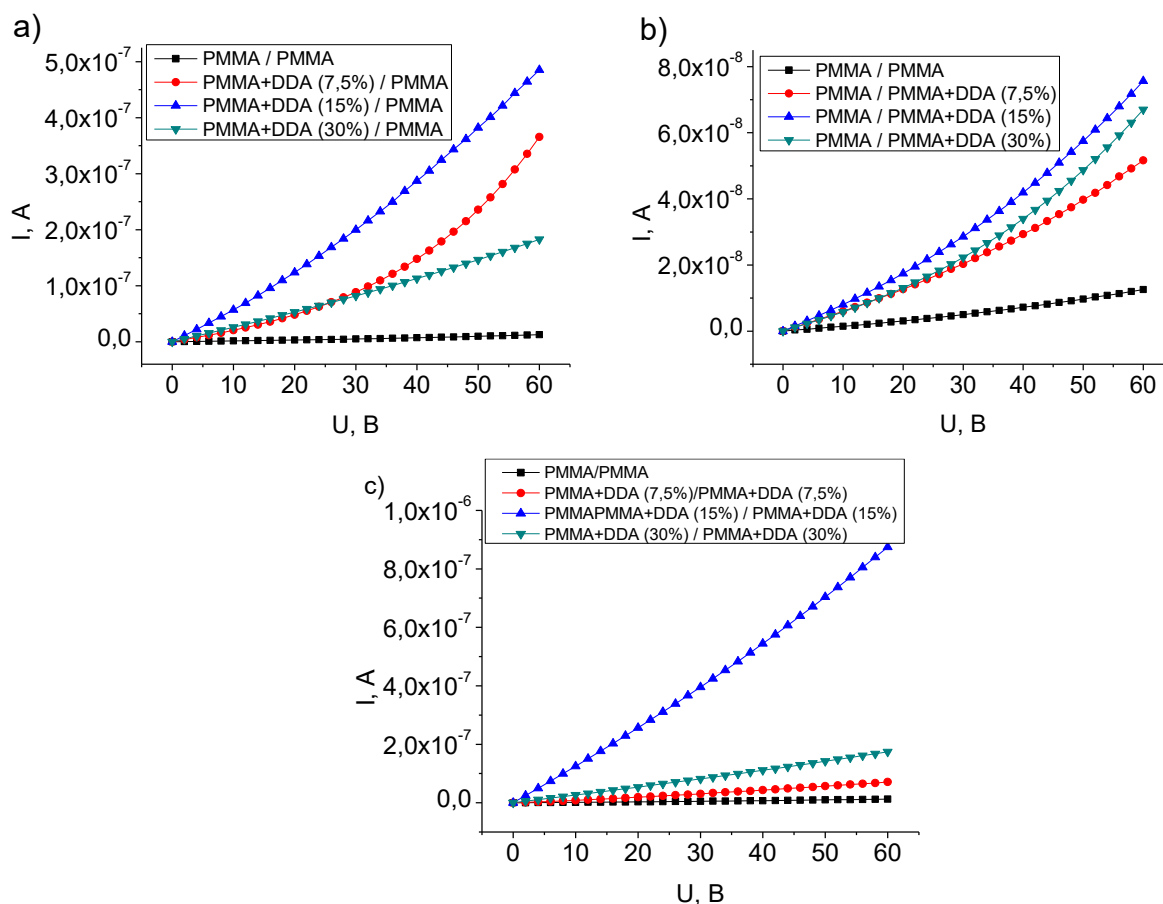


Рис. 10. Вольт-амперные характеристики образцов: а) ПММА+ДДК / ПММА, б) ПММА / ПММА+ДДК, в) ПММА+ДДК / ПММА+ДДК.

Представленные на рис. 10 результаты измерений свидетельствуют о том, что допирование пленок ПММА органическим соединением ДДК приводит к существенному увеличению проводимости вдоль границы раздела двух полимерных пленок. Однако во всех конфигурациях увеличение концентрации допанта выше 15wt% приводит к заметному снижению электропроводности на интерфейсе. Наивысшая проводимость достигается, когда допирование осуществляется в обоих полимерных слоях. Интересно то, что допирование верхнего слоя приводит к увеличению проводимости относительно недопированного образца, но всегда к меньшему значению по сравнению с вариантом допированного нижнего слоя.

Оценки подвижностей носителей заряда, проведенные в рамках инжекционной модели, показали аномально большие значения этого параметра для такого типа материала в интервале  $10^{-1} - 50 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ .

Концентрация носителей заряда изменяются незначительно. Это означает что изменение проводимости при введении молекулярного допанта не связано с увеличением концентрации носителей заряда. Изменение проводимости обусловлено в основном увеличением подвижности носителей заряда вдоль границы раздела полимер/полимер. Значительное увеличение проводимости вдоль границы раздела ПММА/ПММА при допировании слоев органическим соединением ДДК по-видимому связано с увеличением плотности дипольных группировок вдоль поверхностей полимерных пленок, образующих границу раздела. Молекула ДДК имеет в своем составе фталидную группировку с относительно большим дипольным моментом ( $\sim 4 \text{ D}$ ). Очевидно, что часть молекул расположенная вблизи поверхности пленки будет ориентирована относительно поверхности так, чтобы дипольная группа была направлена по нормали к поверхности. Тем самым дополнительно увеличивая плотность дипольно поляризованных групп на поверхности. Это приводит согласно модели, рассмотренной в [109] к увеличению поверхностной поляризации  $\Delta = (4\pi/\epsilon)nP_0\cos(\phi)$ , где  $n$  – поверхностная концентрация диполей,  $P_0$  – дипольный момент,  $\phi$  – угол направления

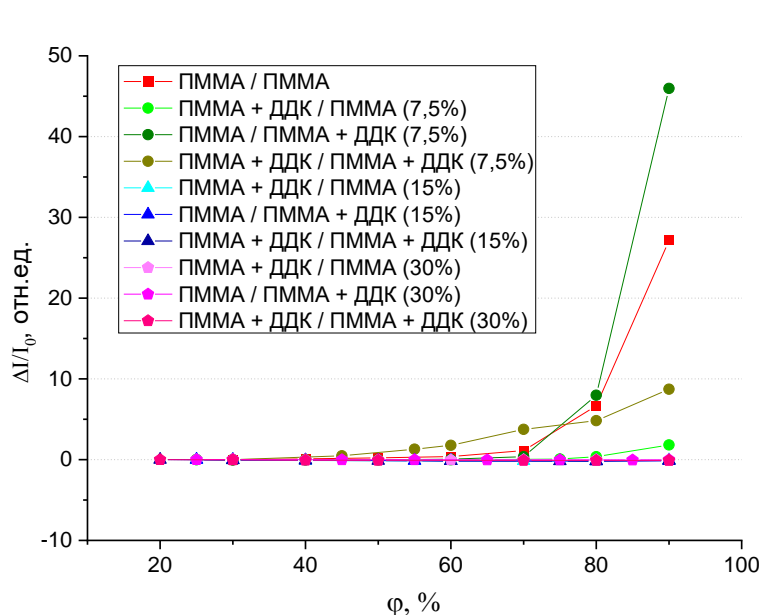
дипольного момента относительно нормали к поверхности,  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость. Очевидно, что  $\Delta$  зависит не только от величины дипольного момента, но его ориентации относительно плоскости поверхности и плотности диполей на поверхности.

### 3.2.3. Сенсорные свойства интерфейса структуры полимер/полимер с использованием полиметилметакрилата

Известно, что влажность влияет на проводимость границы раздела полимер-полимер на примере интерфейса ПДФ/ПДФ. В связи с этим важно изучить аналогичное влияние влажности на проводимость изучаемой структуры. С этой целью мы рассмотрели влияние влажности на проводимость следующих структур:

- ПММА/ПММА
- ПММА+ДДК /ПММА
- ПММА/ПММА+ДДК
- ПММА+ДДК/ПММА+ДДК.

Исследование сенсорных свойств проводили методом измерения вольт-амперных характеристик при различных значения влажности окружающей среды. Сначала измерения проводились двухзондовым методом. Результаты представлены ниже.



**Рис. 11: Графики зависимости относительного изменения тока сенсора в зависимости от относительной влажности атмосферы, при напряжении подаваемой на сенсор 40В.**

На рис. 11 представлены зависимости относительного изменения тока протекающего вдоль интерфейса исследуемых структур от влажности. Анализ результатов представленных на этом рисунке показал, что максимальное относительное изменение тока происходит при концентрации добавки 7,5%. Увеличение концентрации добавки не приводит к увеличению чувствительности. Кроме того, при концентрациях 30% влияние влажности на проводимость интерфейса отсутствует. А при концентрации добавки 15% увеличение влажности приводит к уменьшению проводимости вдоль интерфейса (рис. 11)

Также были исследовано влияние влажности воздуха на проводимость границы раздела ПММА/ПММА без добавок четырехзондовым методом измерения сопротивления Ван дер Пау.

Далее четырехзондовым методом были определены удельные сопротивления для ПММА. Полученные значения приведены в таблице 4.

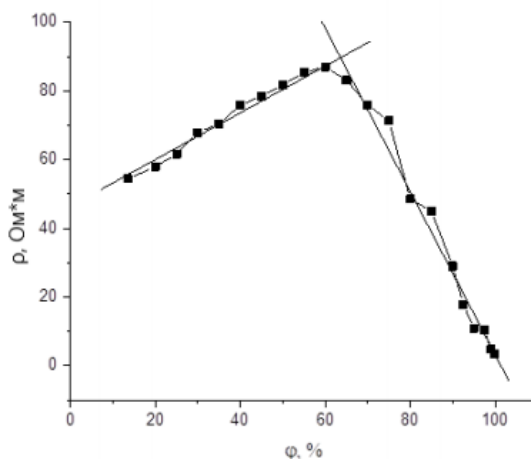
Таблица 4

**Значения удельного сопротивления**

Образец	I, А	$\rho_{1234}$ Ом*м	$R_{2341}$ Ом*м	$\rho$ Ом*м
ПДФ	$4.2 \cdot 10^{-9}$	470.0	368.3	419.1
ПММА	$4.2 \cdot 10^{-9}$	30.6	70.28	51.7

Зависимость удельного сопротивления области вдоль границы раздела пленок ПММА от относительной влажности воздуха представлен на рисунке 12. На графике выделено два участка. При увеличении относительной влажности воздуха от 10 до 60%, удельное сопротивление образца линейно

растет, увеличиваясь более чем в 1,5 раза. При дальнейшем увеличении влажности воздуха, сопротивление образца линейно уменьшается. Относительное уменьшение от максимального значения, при этом составляет более 25 раз.



**Рис. 12.** Зависимость удельного сопротивления области границы раздела пленок ПММА от относительной влажности воздуха.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были исследованы электронные свойства однослойных структур, так и двухслойных, содержащих границу раздела. Полученные результаты показали, что объемные электронные свойства сильно отличаются от свойств границы раздела.

Основные выводы:

- пленках ПММА обнаружены размерные эффекты: увеличение толщин пленок приводит к ухудшению электропроводности.

- переход пленок в высокопроводящее состояние можно инициировать малыми внешними воздействиями такими, как давление, физическое поле и температура.

- установлено сильное влияние атмосферы. Увеличение влажности улучшает электрофизические параметры, в то время как увеличение концентрации таких газов как кислород, аргон, пропан-бутановая смесь – ухудшает.

- граница раздела двух пленок ПММА обладает аномально высокой электропроводностью. Высокая проводимость обусловлена высокой подвижностью носителей заряда. Полученные результаты и анализ аналогичных исследований позволяет нам предположить, что на границе раздела двух диэлектрических пленок ПММА формируется квазидвумерный электронный газ.

- возникновение высокопроводящей области на границе раздела, обусловлено слоем упорядоченных боковых групп на поверхности границы раздела. Увеличение концентрации дипольных групп на границе раздела путем введения низкомолекулярной добавки значительно увеличивает электропроводность. Введение допантов также значительно повышает объемную проводимость отдельных пленок.

- электропроводность границы раздела ПММА/ПММА значительно выше электропроводности отдельных пленок.



Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:

1. Лачинов А. Н. и др. Электрофизические свойства вдоль границы раздела двух полимерных пленок полиметилметакрилата //Физика твердого тела. – 2021. – Т. 63. – №. 4. – С. 554-558.
2. Лачинов А.Н. и др. Дипольные эффекты области вдоль границы раздела пмма/пмма//Известия УНЦ РАН – 2022. - №1. – С. 15-20.
3. Бунаков и др. Электронные свойства гетероструктуры металл/пмма/металл вблизи фазового перехода первого рода в металле////Известия УНЦ РАН – 2022. - №1. – С. 25-29.