

Исследование зависимости удельного сопротивления от напряженности электрического поля и температуры тонких слоев полимеров.

Ванданов Сергей Александрович

Физический факультет. Электромагнитный практикум. Курсовая работа.

Группа № 18345, 3 семестр, 2019 год.

Научный руководитель: к. ф.-м.н. **Микерин Сергей Львович**

Аннотация

Цель данной работы - исследование зависимости удельного сопротивления от напряженности и температуры тонких слоев полимеров, применяемых в интегрально-оптических устройствах. В экспериментах использовались оригинальный полиимид с ковалентно присоединенными молекулами красителя DR-13, и УФ-отверждаемая смола NOA-61.

Исследуемый полимерный материал нанесён на стеклянную подложку между проводящими электродами. Источником питания на электроды подавались различные значения напряжений в диапазонах от 200 до 2300 В и при различных значениях температур образцов в диапазонах от 60°C до 185°C, микроамперметром фиксировался ток протекающий через полимерную пленку.

В результате проведенных исследований было установлено, что удельное сопротивление повышалось с уменьшением температуры при некотором постоянном значении напряженности поля. Характер этой зависимости не зависел от изменения напряженности, но увеличение напряженности, в том числе при постоянной одинаковой температуре образца, приводило к общему уменьшению удельного сопротивления. Значение удельного сопротивления для полимеров получено с точностью до 13%. Отсюда в ходе исследований была найдена энергия активации с точностью до 15%.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке интегрально-оптических схем.

Ключевые слова: электропроводность, интегрально-оптические устройства, закон Аррениуса, поляризуемость, пространственная упорядоченность, энергия активации, дипольный момент, удельное сопротивление, проводимость.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Ванданов Сергей Александрович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Исследование зависимости удельного сопротивления от напряженности
электрического поля и температуры тонких слоев полимеров.**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа № 18345

Научный руководитель:

к.ф-м.н., зав.лаб. Микерин С.Л.

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

к.ф-м.н., Симонов А.А.

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. Астрелин В.Т.

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск, 2019 г.

Аннотация

Цель данной работы - исследование зависимости удельного сопротивления от напряженности и температуры тонких слоев полимеров, применяемых в интегрально-оптических устройствах. В экспериментах использовались оригинальный полиимид с ковалентно присоединенными молекулами красителя DR-13, и УФ-отверждаемая смола NOA-61.

Исследуемый полимерный материал нанесён на стеклянную подложку между проводящими электродами. Источником питания на электроды подавались различные значения напряжений в диапазонах от 200 до 2300 В и при различных значениях температур образцов в диапазонах от 60°C до 185°C, микроамперметром фиксировался ток протекающий через полимерную пленку.

В результате проведенных исследований было установлено, что удельное сопротивление повышалось с уменьшением температуры при некотором постоянном значении напряженности поля. Характер этой зависимости не зависел от изменения напряженности, но увеличение напряженности, в том числе при постоянной одинаковой температуре образца, приводило к общему уменьшению удельного сопротивления. Значение удельного сопротивления для полимеров получено с точностью до 13%. Отсюда в ходе исследований была найдена энергия активации с точностью до 15%. В ходе работы автор познакомился с элементами технологии создания полимерных слоев, нанесения простых топологических рисунков металлических проводников с помощью маски и магнетронного распыления. Были закреплены навыки проведения измерений, выполнены обработка и анализ данных.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке интегрально-оптических схем.

Ключевые слова: электропроводность, интегрально-оптические устройства, закон Аррениуса, поляризуемость, пространственная упорядоченность, энергия активации, дипольный момент, удельное сопротивление, проводимость.

Оглавление

Введение.....	3
1. Теоретическая часть.....	4
1.1 Различные механизмы возникновения токов в полимерах.	4
1.2 Зависимость электропроводности от температуры и напряженности.....	5
2. Экспериментальная часть.....	6
2.1 Изготовление образцов для проведения исследований.....	6
2.2 Описание установки и методика проводимых измерений.....	7
2.3 Результаты измерений. Нахождение энергии активации.....	8
2.3.1 Образец полиимида.....	8
2.3.2 Образец NOA-61.....	10
3. Анализ результатов. Оценка погрешностей.....	12
Заключение	14
Список используемой литературы	15

Введение

В настоящее время, с развитием информационных технологий, возникает необходимость увеличения скорости передачи данных. Существующие технологии передачи имеют физические ограничения, поэтому возникает необходимость в разработке иных способов передачи. Одним из новых методов является использование интегрально-оптических устройств.

Применение полимеров имеет широкие перспективы в развитии интегрально-оптических устройств. Значительный интерес представляют полимерные системы, состоящие из несущего полимера и добавок в виде молекул красителей (хромофоров).

Одной из ключевых проблем, возникающих при изготовлении интегрально-оптических устройств, является достижение высокой степени пространственной упорядоченности хромофоров в материале сердцевины волновода. Поскольку упорядоченность достигается в условиях приложенного электрического поля, то на процесс упорядочивания накладываются эффекты перераспределения электрического поля в полимерных слоях. В связи с этим, данные об удельном сопротивлении (удельной проводимости) используемых полимеров при высоких температурах востребованы при разработке интегрально-оптических устройств на основе полимеров.

Таким образом, можно выделить следующие задачи(1-4) и цель (5):

- 1) Подготовка образцов к проведению измерений.
- 2) Измерение удельной проводимости полимера NOA-61 и полимера полиимида, на заданном диапазоне температур, при различных значениях напряженности электрического поля.
- 3) Оценка влияния возникающих погрешностей на результаты измерений.
- 4) Сравнение полученных результатов с теоретическим представлением.
- 5) Анализ возможности применения полимеров в интегрально-оптических устройствах

1. Теоретическая часть

1. Различные механизмы возникновения токов в полимерах.

Диэлектрик – вещество, относительно плохо проводящее электрический ток. При нанесении на поверхность образца диэлектрика проводящих электродов и пропускании между ними постоянного напряжения, можно, с помощью мультиметра, зафиксировать малый ток I . По закону Ома для участка цепи:

$$I = \frac{U}{R} \quad (1)$$

где R –сопротивление диэлектрика, U –напряжение, I –ток.

В формуле (1) ток I можно представить в виде суммы двух составляющих: $I = I_{\text{скв}} + I_{\text{абс}}$, где $I_{\text{абс}}$ - ток абсорбции, протекающих в начальный момент после включения напряжения и постепенно убывающий со временем, так как природа его возникновения связана с процессами поляризации. $I_{\text{скв}}$ - сквозной ток, обусловленный направленным движением носителей заряда, который с течением времени остается неизменным.

Проводимость токов в диэлектриках определяется электронной и ионной электропроводностью. Электронная электропроводность вносит малый вклад в проводимость диэлектрика при температурах меньших 120 °С, ввиду того, что концентрация свободных электронов при этих температурах мала. Однако при наличии большей концентрации примесей или больших температурах ее вклад становится существенней. Ионная электропроводность – вносит основной вклад в проводимость диэлектрика. Она обусловлена перемещением ионов основного вещества или ионов примесей под действием электрического поля, приложенного к диэлектрику.

Как известно, в большинстве случаев, полимеры являются диэлектриками, а значит все вышесказанное применимо и для полимеров.

В производимом исследовании, теоретически, для оригинального полиимида с ковалентно присоединенными молекулами красителя DR-13 должно наблюдаться наличие двух механизмов, ввиду его полярности и наличия у него примесей.

Для полимера из УФ-отверждаемой смолы NOA-61 теоретически должна наблюдаться только собственная проводимость.

2. Зависимость электропроводности от температуры и напряженности

Для большинства полимеров преобладает механизм проводимости ионного тока. Удельное сопротивление в полимерах высокое, за счет относительно низкой концентрации носителей зарядов, тем не менее, удельное сопротивление полимеров можно изменить на несколько порядков с помощью их нагревания или прикладывания внешнего электрического поля. Известно, что удельное сопротивление зависит от заряда носителей тока, скорости их упорядоченного движения и от их концентрации. В диэлектриках с ростом температуры концентрация носителей увеличивается, а значит и удельное сопротивление уменьшается. Температурная зависимость удельного сопротивления в диэлектриках выражается законом Аррениуса:

$$\rho = \rho_0 \cdot \exp\left(\frac{U_A}{kT}\right) \quad (2)$$

где ρ — удельное сопротивление, ρ_0 — некоторая константа, U_A — энергия активации, $k = 1.38 \cdot 10^{23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ — постоянная Больцмана, T — температура.

Из закона Ома (1), а также по определению удельного сопротивления:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad (3)$$

где $l = h$ — длина (толщина) проводника, S — его площадь, σ — проводимость.

Из формулы (3) можно получить:

$$\rho = \frac{S \cdot U}{h \cdot I} = \frac{1}{\sigma} \quad (4)$$

Таким образом, зная площадь поверхности диэлектрика, его толщину, прикладываемое внешнее электрическое поле, и проходящий через него ток, можно найти удельное сопротивление полимера, которое при различной температуре (согласно (2)) и при разной напряженности электрического поля $E = U/h$, будет разное. Также, используя (1) можно найти энергию активации на 1 моль, умножив ее значение на число Авогадро $N_a = 6.02 \cdot 10^{23} \cdot \text{моль}^{-1}$.

2. Экспериментальная часть.

1. Изготовление образцов для проведения исследований

В ходе проведения эксперимента были использованы два образца: первый - с нанесенным полимером полиимида с ковалентно присоединенными молекулами красителя DR-13 (рис. 1, приложение 6) и другой, с нанесенным полимером смолы отверждаемой ультрафиолетом NOA-61 (рис. 2, прил. 6).

Последовательность изготовления заключалась в следующем: в качестве основания для образца использовалась стеклянная подложка, с предварительно нанесенным на нее проводящим слоем из смешанного оксида индия-олова(ИТО), который впоследствии использовался как нижний электрод измерительной электрической цепи. После чего производилось очищение подложки в нагретом до 80 °С универсальном обезжиривателе, для удаления возможных силиконовых загрязнений с ее поверхности. Затем производилось очищение подложки в нагретом до 100 °С изопропиловом спирте, для удаления остатков органических загрязнений, в том числе загрязненного обезжиривателя.

В дальнейшем выполнялось нанесение полимеров на образцы методом центрифугирования. Для этого, некоторое количество раствора полимера, или мономеров смолы наносилось на поверхность подложки с помощью пипетки и затем подложка раскручивалась в плоскости ее поверхности. Режим нанесения составлял 4000 об/мин для первого образца в течение 20 секунд и 3000 об/мин в течение 30 секунд для второго. Полимеры равномерно покрывали нижний электрод. Время застывания полимера на первом образце составляло 5 минут, второй помещался под ультрафиолетовый источник света на 3 минуты для отверждения полимера.

После этого наносилась защитная маска на полимер в те места, где золотой электрод не должен был быть нанесен (красная область рисунка 1 для первого образца приложения 6), по контуру для второго образца. С помощью установки магнетронного распыления были нанесены золотые верхние электроды толщиной около 200 нм (рис. 1, приложение 6).

Для определения значения напряженности электрического поля в полимере, необходимо знать его толщину. Для этого, вне зоны золотого электрода были сняты слои полимеров до нижнего электрода и с помощью оптического профилометра WLI Lab измерена толщина слоев полимеров.

Используя микроскоп, с измерительной шкалой в окуляре, была определена цена деления шкалы с помощью линейки, а затем с помощью этих данных определены размеры золотых электродов и получены их площади. К электродам с помощью проводящего углеродного клея были закреплены соединительные провода. На этом изготовление образцов закончилось.

2. Описание установки и методика проводимых измерений

Оборудование и материалы: термостол Магистр Ц20-Т12.0, 2 стеклянных подложки с нанесенными на них исследуемыми полимерами, источник напряжения Б5-24А, источник напряжения НУ30002Е, мультиметр AmProb 37XR-A, вакуумный распылитель SputterCoater 108, микроскоп МБС-10, оптический профилометр WLI Lab, эмалированные медные провода.

В представленной курсовой работе использовалась установка для измерения удельного сопротивления, представленная на рисунке 3:

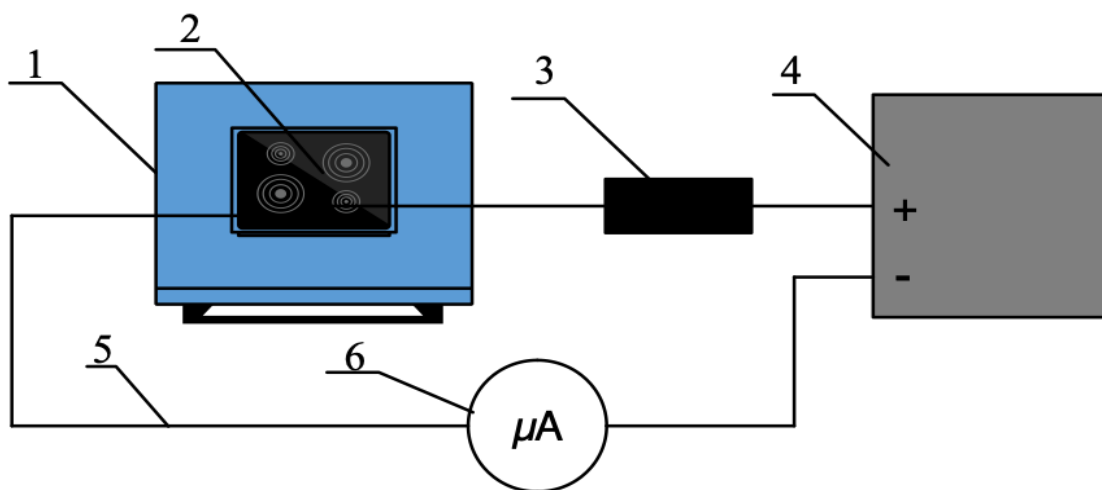


Рис. 3. Установка для определения удельного сопротивления.

- 1 – термостол, 2 – исследуемый образец, 3 – сопротивление – $R=1 \text{ МОм}$,
4 – источник постоянного напряжения, 5 – соединительные провода,
6 – мультиметр в режиме работы микроамперметра.

Изготовленный образец (2) помещался на термостол (1), для лучшего обеспечения контакта под образцом помещался кусочек фольги, а сверху, для того, чтобы температура образца была равна температуре термостола, образец накрывался чашкой Петри. Для лучшей изоляции, в местах соприкосновения проводов с термостолом, и, стекла с проводами, помещались листочки плотной бумаги. После этого провод (5) с верхнего (золотого) электрода через токоограничивающее сопротивление (3), подключался к «плюсу» источника питания (4), провод с нижнего электрода (5), через мультиметр в режиме микроамперметра (6) подключался к «минусу» источника питания (4).

Так как при остывании температура термостола, а, следовательно, и температура образца, определяется точнее, чем при нагревании, была выбрана методика проведения измерений при остывании образца.

Для предотвращения пробоев и возникновения большого тока через полимер, мною была разработана методика попеременного изменения параметров температуры и напряженности. Исследуемый образец нагревался до 120 °С, данная температура выдерживалась около 10 минут для полного удаления паров воды с образца. Затем, устанавливалась напряженность порядка 10 В/мкм и после этого температура, и напряженность увеличивались в определенной пропорции. При достижении 175°С и 20 В/мкм с интервалом изменения 5 °С температура уменьшалась до 60 °С. При этом мультиметром в режиме микроамперметра фиксировались значения протекающих токов через полимер. Аналогичные измерения повторялись при напряженности поля 30 В/мкм.

Полимер NOA-61 нагревался в диапазоне от 130 °С до 185 °С, так как меньше – не было смысла так как ток, ввиду большой толщины полимера, был меньше, чем точность измерения мультиметра. Измерения токов проводились при напряженностях поля 11, 37.5 и 59.5 В/мкм.

3. Результаты измерений. Нахождение энергии активации

1. Образец полиимида.

На основании вышеизложенного материала, используя формулу (4) произведем расчет удельного сопротивления образца полиимида. Методом

измерения площади, было установлено, что площадь его электродов равна $S = 0.003 \text{ см}^2$. Толщина полимерной пленки, измеренная оптическим профилометром, составила $h = (8.70 \pm 0.05) \cdot 10^{-6} \text{ м}$.

На основании измерений построим график зависимости $\rho (1/T)$, поместив на него полученные зависимости при 20 и 30 В/мкм (график 1, приложение 5). В диапазоне температур от 130°C до 178°C отчетливо наблюдается проявление двух механизмов, которые согласуются с теоретической частью. При расчете удельного сопротивления учитывалось, что напряжение на образце зависело от тока из-за наличия в цепи токоограничивающего резистора. Так, напряжение, подаваемое на образец, увеличивалось, при уменьшении температуры.

При напряженности 50 В/мкм произошел пробой диэлектрика, вероятно, это было связано с быстрым изменением напряжения, так как для достижения 50 В/мкм была необходима смена источника питания на Б5-24А, у которого отсутствовало плавное переключение напряжения. Для устранения этой проблемы, в следующий раз необходимо выбрать источник питания с плавным переключением напряжения.

Для нахождения энергии активации, построим график зависимости $\ln\rho(\frac{1}{T})$:

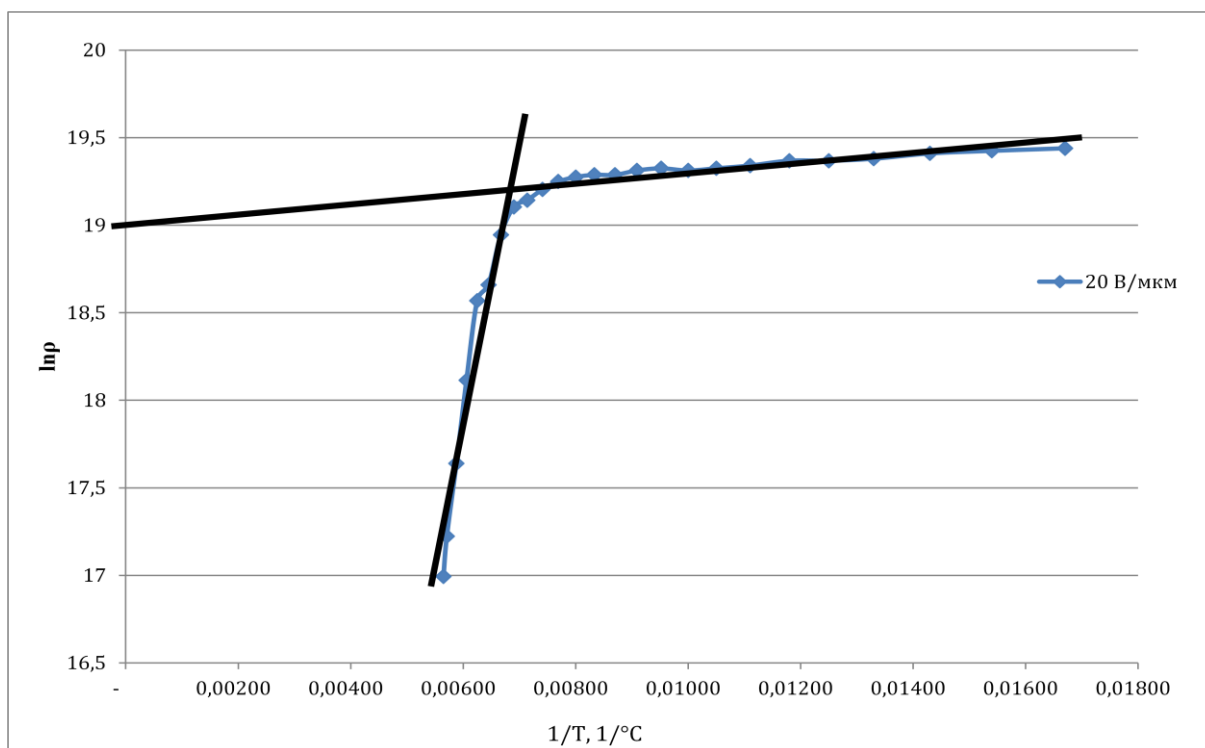


График зависимости $\ln\rho(\frac{1}{T})$ с аппроксимирующими прямыми для полиимида.

По коэффициенту угла наклона, полученного аппроксимацией методом наименьших квадратов умножив его на постоянную Больцмана k , а затем на число Авогадро, определим энергию активации при напряженности 20 В/мкм.

Энергия активации только при ионном механизме: $U_a = 16300 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$. При наличии электронного и ионного: $U_a = 250 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$. Погрешность рассчитанная используя формулу (2) и формулы для относительной погрешности составила $\Delta U_a = \pm 40 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$.

2. Образец NOA-61.

Площадь золотого электрода второго образца равна $S = 0.81 \text{ см}^2$. Толщина полимерной пленки составила $h = (26.69 \pm 0.05) \cdot 10^{-6} \text{ м}$.

В приложениях 1 и 2 приведены таблицы с результатами измерений и расчетами удельного сопротивления от различных температур при напряженностях 11, 37.5, 59.5 В/мкм соответственно.

При напряженности поля около 87 В/мкм произошел пробой. Предположительно, он вызван слабой изоляцией положительного электрода от отрицательного. Необходимо повторить измерения при лучшей изоляции.

По результатам измерений построим график зависимости $\rho(1/T)$ и поместим на него полученные зависимости при 11, 37.5, 59.3 В/мкм. График представлен в приложении 5, график 2. Наблюдается наличие лишь одного механизма проводимости, что согласуется с теорией.

Энергию активации найдем аналогично первому образцу. Построив график зависимости $\ln \rho(\frac{1}{T})$ с аппроксимирующими методом наименьших квадратов прямыми для изучаемого образца, при различных значениях напряженности.

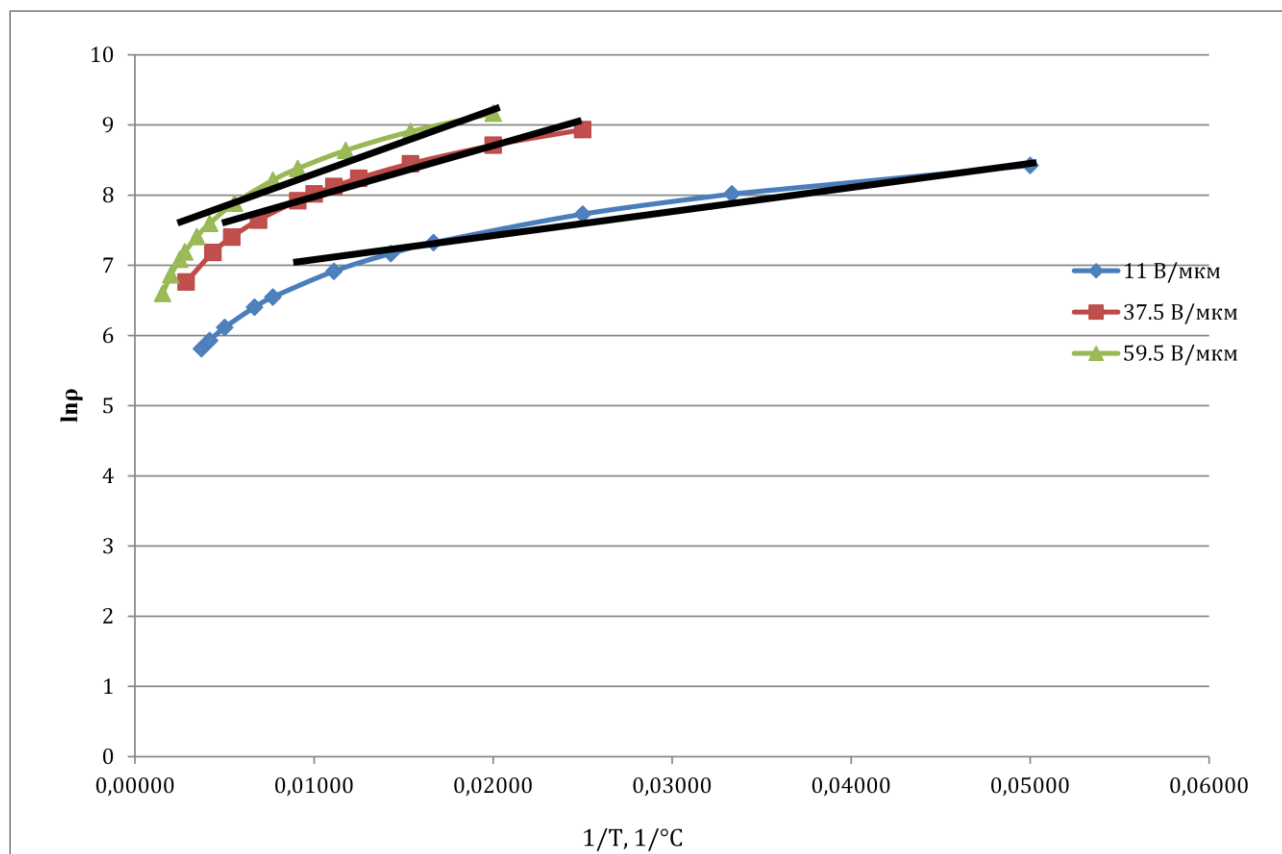


График зависимости $\ln p(\frac{1}{T})$ с аппроксимирующими прямыми для NOA-61.

Здесь наблюдается только ионный механизм. Энергия активации при напряженности 11 В/мкм $U_a = 290 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$. При напряженности поля 37.5 В/мкм $U_a = 600 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$, при напряженности 59.5 В/мкм $U_a = 630 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$

3. Анализ результатов. Оценка погрешностей.

При проведении измерений необходимо принять во внимание инструментальную систематическую погрешность, связанную с невозможностью достоверного определения температуры образца, из-за малой скорости распространения кондуктивного потока. В качестве приближения, считалось, что температура образца совпадает с температурой термостола, для чего производился тепловой контакт в течение некоторого времени $t \approx 5$ мин. Погрешность показания температуры термостола, а, следовательно, и температуры образца, согласно паспорту составляет $\Delta T = \pm 2^\circ\text{C}$.

Инструментальная систематическая погрешность присутствовала и при измерении тока микроамперметром, и, согласно паспорту устройства составляла $\Delta I = \pm 0.03 \cdot 10^{-6}\text{A}$. Погрешность источника напряжения Б5-24А составляла $\Delta U = \pm 0.1\text{ В}$, так как его показания перед проведением измерений предварительно измерялись мультиметром в режиме постоянного напряжения.

Погрешность оптического профилометра WLI Lab согласно техническим характеристикам составляет 10 нм, однако, ввиду неоднородности поверхности электрода, итоговая погрешность в измерении толщины $\Delta h \approx \pm 0.5 \cdot 10^{-9}\text{м}$.

Погрешность измерения площади покрытия золотым электродом поверхности полимера, учитывая, что погрешность измерения его сторон составила 1/39 мм, по формуле для относительной погрешности составила:

$$\Delta S = \Delta a \cdot b + \Delta b \cdot a \quad (5)$$

где a, b - стороны полимеров.

Таким образом, $\Delta S = \pm 2.75 \cdot 10^{-7}\text{м}$ - для первого образца, и

$\Delta S = \pm 4.5 \cdot 10^{-6}\text{м}$ - для второго образца.

Было замечено, что полимер NOA-61 при повторном его нагревании и проведении измерений, показывал меньший ток, чем первоначально. Предположительно, это связано с отвердеванием полимера.

Учитывая все вышесказанное и формулу (4) выведем формулу для относительной погрешности удельного сопротивления:

$$\Delta\rho = \frac{U \cdot S \cdot (\Delta I \cdot h + \Delta h \cdot I) + I \cdot h \cdot (\Delta U \cdot S + \Delta S \cdot U)}{(I \cdot h)^2} \quad (6)$$

По формуле (6) произведем расчет погрешностей. На их основании заполним таблицу. Для первого образца таблица с погрешностями приведена в приложении 3. Аналогично таблица измерений погрешностей для второго образца приведена в приложении 4.

Проанализировав данные результаты, можно заметить, что чем выше температура, тем погрешность меньше и составляет в среднем 3% для первого образца при напряженности поля 30 В/мкм и около 12% при напряженности поля 20 В/мкм.

Для второго образца в среднем погрешность составила 13% при напряженности поля 11 В/мкм, 9% при напряженности поля 37.5 В/мкм и около 7% при напряженности поля 59.5 В/мкм.

Таким образом, при увеличении напряженности, погрешность уменьшалась, и при максимальной температуре погрешность была минимальна.

Заключение

Целью данной работы являлось исследование и реализация метода измерения удельного сопротивления различных материалов.

В ходе выполнения данной курсовой работы были получены следующие результаты:

- 1) Предложен собственный метод установления температуры и внешнего напряжения при измерении удельного сопротивления, направленный на уменьшение вероятности пробоев.
- 2) Произведены расчеты и измерения электропроводности NOA-61 и полиимида с погрешностью до 13%.
- 3) Найдена энергия активации для исследуемых образцов при различных механизмах проводимости с точность до 15%.
- 4) С помощью аппроксимации экспериментальных данных, было показано существование двух механизмов проводимости в полимерах, что согласуется с теоретическим представлением.
- 5) Экспериментально показано, что в целом данные полимеры можно применять в интегрально-оптических устройствах, при определенных условиях.
- 6) Установлено, что удельное сопротивление повышалось с уменьшением температуры при некотором постоянном значении напряженности поля. Характер этой зависимости не зависел от изменения напряженности, но увеличение напряженности, в том числе при постоянной одинаковой температуре образца, приводило к общему уменьшению удельного сопротивления.

Список используемой литературы

1. DESIGN AND ANALYSIS OF A POLED-POLYMER ELECTRO-OPTIC MODULATOR WITH A STRIP-LOADED WAVEGUIDE STRUCTURE, Antonio Davis, PhD dissertation, 50-75 стр.,изд-во. 2010 год,Dayton,Ohio
2. Байбородин Ю. В. Основы лазерной техники, глава 17. Киев, Издательство Выща школа, изд-во. 1988 год

Приложение 1.

Таблица результатов измерений удельного сопротивления УФ-отверждаемой смолы NOA-61 при напряженности электрического поля 11 В/мкм и при различных значениях температур.

I/100, мкА	T, °C	U, В	U/h, В/мкм	$\rho \cdot 10^6$, м·Ом	$10^{-4}/T$, 1/°C
270	185	297,	11,2	334,2	37,0
240	180	297,6	11,2	376,3	41,6
200	175	298,0	11,2	452,1	50,0
150	170	298,5	11,2	603,9	66,6
130	165	298,7	11,2	697,3	76,9
90	160	299,1	11,2	1 008,5	111,1
70	155	299,3	11,3	1 297,6	142,8
60	150	299,4	11,3	1 514,3	166,6
40	145	299,6	11,3	2 273,1	250,0
30	140	299,7	11,3	3 031,8	333,3
30	135	299,7	11,3	3 031,8	333,3
20	130	299,8	11,3	4 549,2	500,0

Приложение 2. Сводная таблица результатов измерений удельного сопротивления УФ-отверждаемой смолы при напряженностях электрического поля 37.5, 59.5, 86 В/мкм при различных значениях температур.

I/100, мкА	T, °C	U, В	U/h, В/мкм	$\rho \cdot 10^6$, м·Ом	$10^{-4}/T$, 1/°C
350	180	996,5	37,5	864,0	28,5
230	175	997,7	37,5	1 316,4	43,4
185	170	998,1	37,5	1 637,4	54,0
145	165	998,5	37,5	2 089,9	68,9
110	160	998,9	37,6	2 755,9	90,9
100	155	999,0	37,6	3 031,8	100,0
90	150	999,1	37,6	3 369,0	111,1
80	145	999,2	37,6	3 790,5	125,0
65	140	999,3	37,6	4 665,9	153,8
50	135	999,5	37,6	6 066,6	200,0
40	130	999,6	37,6	7 584,0	250,0
650	180	1573,5	59,2	734,6	15,3
500	175	1575,0	59,2	955,9	20,0
400	170	1576,0	59,2	1 195,7	25,0
360	165	1576,4	59,3	1 328,9	27,7
290	160	1577,1	59,3	1 650,4	34,4
240	155	1577,6	59,3	1 994,9	41,6
180	150	1578,2	59,3	2 660,8	55,5
130	145	1578,7	59,3	3 685,4	76,9
110	140	1578,9	59,4	4 356,1	90,9
85	135	1579,15	59,4	5 638,2	117,6
65	130	1579,35	59,4	7 373,9	153,8
50	125	1579,5	59,4	9 587,0	200,0
900	170	2311,0	86,9	779,2	11,1

Приложение 3. Сводная таблица погрешностей полиимида.

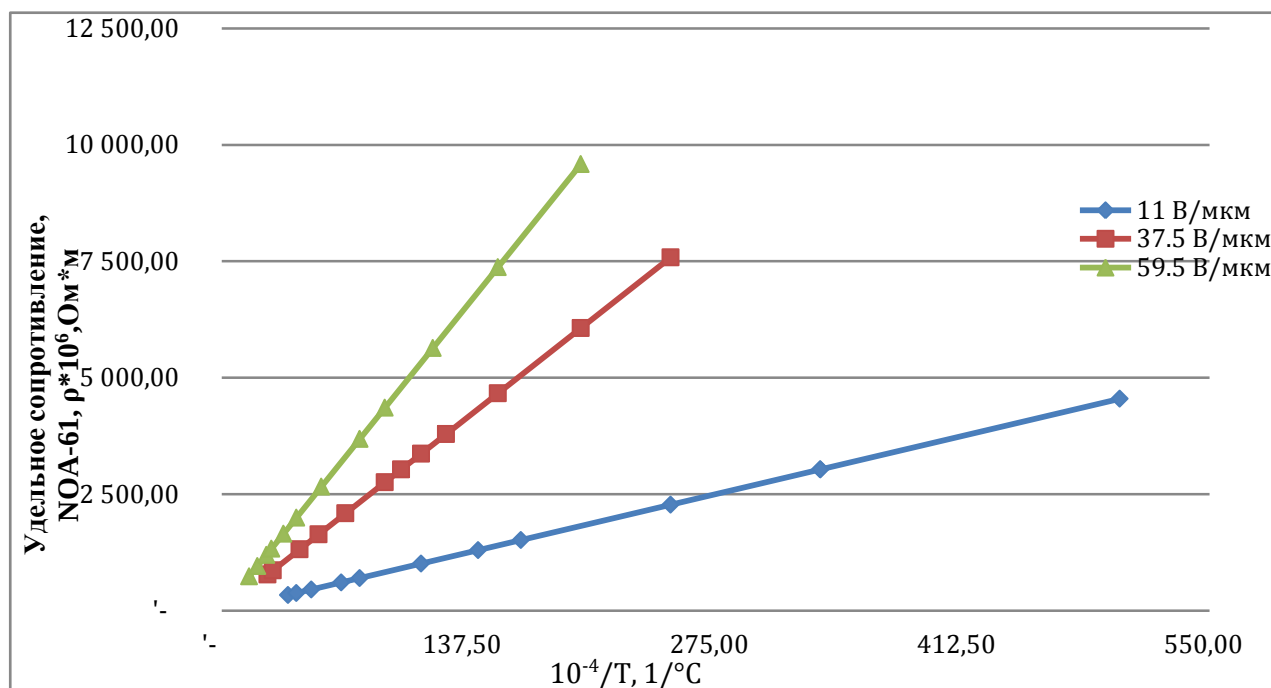
T, °C	U/h, В/мкм	$\Delta\rho$, м·Ом	$\Delta\rho/\rho$	U/h, В/мкм	$\Delta\rho$, Ом	$\Delta\rho/\rho$
178	30.2	170000	1.5%	19.8	1000000	4%
175	30.3	210000	1.5%	20.0	1400000	5%
170	30.5	370000	1.8%	20.2	2500000	5%
165	30.7	660000	2.1%	20.4	5000000	7%
160	30.7	1010000	2.5%	20.5	11300000	8%
155	30.8	1310000	2.7%	20.5	12600000	9%
150	30.8	1540000	2.9%	20.5	21000000	11%
145	30.9	1730000	3.0%	20.6	25000000	13%
140	30.9	1820000	3.0%	20.6	30000000	13%
135	30.9	1840000	3.1%	20.6	33000000	14%
130	30.9	1960000	3.1%	20.6	34000000	14%
125	30.9	2020000	3.2%	20.6	35000000	15%
120	30.9	2060000	3.2%	20.6	35000000	15%
115	30.9	2110000	3.2%	20.6	36000000	15%
110	30.9	2150000	3.2%	20.6	37000000	15%
105	30.9	2180000	3.3 %	20.6	38000000	15%
100	30.9	2240000	3.3%	20.6	39000000	15%
95	30.9	2260000	3.3%	20.6	40000000	15%
90	30.9	2290000	3.3%	20.6	41000000	15%
85	30.9	2340000	3.4%	20.6	42000000	16%
80	30.9	2370000	3.4%	20.6	43000000	16%
75	30.9	2390000	3.4%	20.6	43000000	16%
70	30.9	2400000	3.4%	20.6	44000000	16%
65	30.9	2450000	3.5%	20.6	45000000	17%
60	30.9	2520000	3.5%	20.6	45000000	17%

Приложение 4. Сводная таблица погрешностей образца NOA-61, при различных значениях напряженности поля и при различной температуре.

T, °C	U/h, В/мкМ	$\Delta\rho$, м·Ом	$\Delta\rho/\rho$	U/h, В/мкМ	$\Delta\rho$, м·Ом	$\Delta\rho/\rho$	U/h, В/мкМ	$\Delta\rho$, м·Ом	$\Delta\rho/\rho$
185	11,1	220000000	7%	-	Нет данных	-	59,1	-	-
180	11,1	250000000	7%	37,5	560000000	6%	59,2	440000000	6%
175	11,2	320000000	7%	37,5	900000000	7%	59,2	590000000	6%
170	11,2	460000000	8%	37,5	1200000000	7%	59,2	750000000	6%
165	11,2	550000000	8%	37,5	1600000000	8%	59,2	850000000	6%
160	11,2	900000000	9%	37,5	2300000000	8%	59,3	1090000000	6 %
155	11,2	1300000000	10%	37,5	2600000000	9%	59,3	1360000000	6%
150	11,2	1600000000	10%	37,5	3000000000	8%	59,3	1930000000	7%
145	11,2	3000000000	13%	37,5	3500000000	9%	59,3	2910000000	8%
140	11,3	4700000000	15%	37,5	4800000000	10%	59,3	3620000000	8%
135	11,3	4700000000	16%	37,5	7800000000	12%	59,3	5140000000	9%
130	11,3	9400000000	21%	37,4	9900000000	13%	59,3	7500000000	10%

Приложение 5. Графики зависимости $\rho(\frac{1}{T})$.

График 1.



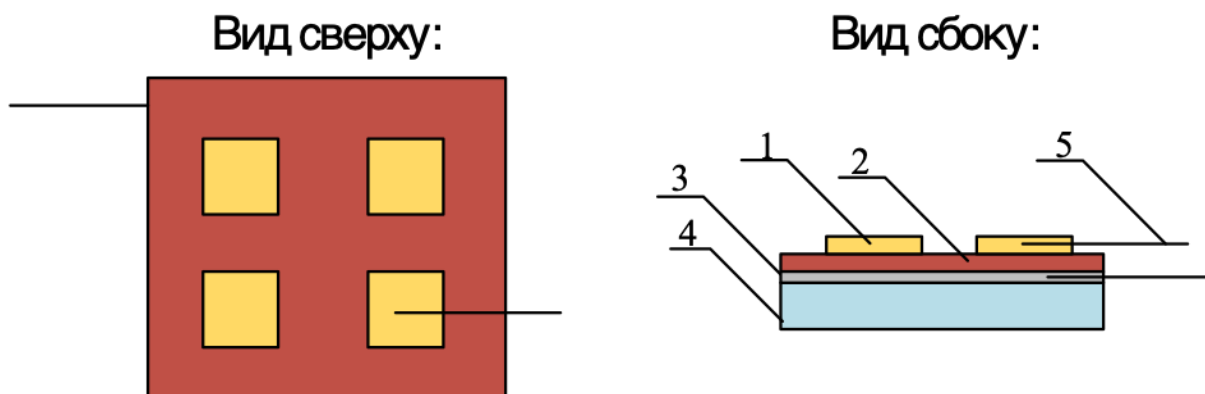


Рис. 1.Исследуемый образец полиимида.

1 – золотой электрод, 2 – исследуемый полимер, 3 – электрод,
4 – стеклянная подложка, 5 – соединительные провода.

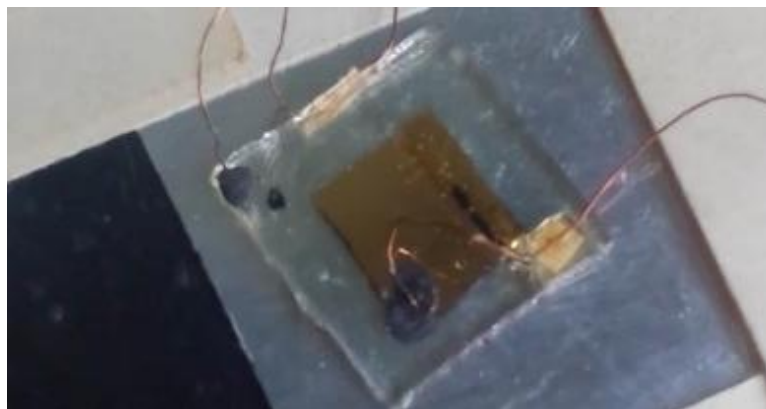


Рис. 2.Исследуемый образец NOA-61.