

## ГАЗОФАЗНЫЙ СИНТЕЗ, МОЛЕКУЛЯРНАЯ СТРУКТУРА МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИПИРРОЛА

М.А. Ярмоленко<sup>1</sup>, А.В. Рогачёв<sup>1</sup>, А.А. Рогачёв<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

<sup>2</sup>Институт химии новых материалов НАН Беларусь, Минск

## GAS-PHASE SYNTHESIS, MOLECULAR STRUCTURE OF MULTILAYER COATINGS BASED ON POLYPYRROLE

M.A. Yarmolenko<sup>1</sup>, A.V. Rogachev<sup>1</sup>, A.A. Rogachev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Francisk Skorina Gomel State University

<sup>2</sup>Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk

**Аннотация.** Определены молекулярная структура, морфология и электрическая проводимость покрытий полипиррола, нанесенных на подслой хлорида железа. Установлены изменения молекулярной структуры и электрической проводимости при термообработке сформированных слоев полипиррола. С целью эффективного снижения разрушения покрытий полипиррола при нагреве предложено формирование на их поверхности сульфатного или фосфатного слоя. Снижение проводимости при термообработке и повышение порогового значения напряжения, при превышении которого регистрируется возрастание проводимости, при хранении и является следствием химического взаимодействия медного электрода с хлоридом железа.

**Ключевые слова:** покрытия полипиррол, молекулярная структура, электрическая проводимость, морфология, термообработка.

**Для цитирования:** Ярмоленко, М.А. Газофазный синтез, молекулярная структура многослойных покрытий на основе полипиррола / М.А. Ярмоленко, А.В. Рогачёв, А.А. Рогачёв // Проблемы физики, математики и техники. – 2025. – № 4 (65). – С. 56–61. – DOI: [https://doi.org/10.54341/20778708\\_2025\\_4\\_65\\_56](https://doi.org/10.54341/20778708_2025_4_65_56). – EDN: DFVRRQ

**Abstract.** The molecular structure, morphology, and electrical conductivity of polypyrrole coatings deposited on an iron chloride sublayer were determined. The changes in the molecular structure and electrical conductivity during heat treatment of the synthesized polypyrrole layers were established. To effectively mitigate the degradation of polypyrrole coatings during heating, the formation of a sulfate or phosphate passivation layer on their surface was proposed. The decrease in conductivity during heat treatment and the increase in the threshold voltage, above which a conductivity increase is observed, during storage are attributed to the chemical interaction between the copper electrode and iron chloride.

**Keywords:** polypyrrole coatings, molecular structure, electrical conductivity, morphology, heat treatment.

**For citation:** Yarmolenko, M.A. Gas-phase synthesis, molecular structure of multilayer coatings based on polypyrrole / M.A. Yarmolenko, A.V. Rogachev, A.A. Rogachev // Problems of Physics, Mathematics and Technologies. – 2025. – № 4 (65). – P. 56–61. – DOI: [https://doi.org/10.54341/20778708\\_2025\\_4\\_65\\_56](https://doi.org/10.54341/20778708_2025_4_65_56) (in Russian). – EDN: DFVRRQ

### Введение

Проводящие полимерные покрытия находят эффективное применение при решении широкого круга технических задач. Так, покрытия полипиррола обладают антистатическими и антикоррозионными свойствами [1], перспективны при создании радиопоглощающих элементов [2]. Модифицирование электродных материалов нанесением на их поверхность проводящих слоев полипиррола является основными направлениями повышения эксплуатационных характеристик литий-ионных аккумуляторов за счет снижения электрического сопротивления электродов, степени их деградации при эксплуатации.

В числе проводящих полисопряженных полимеров полипиррол является наиболее изученным, для него характерна высокая электрическая проводимость. Однако значительные перспективы

его применения существенно ограничены, так как он является сплошным и неплавким полимером, что исключает использование при его переработке характерных для полимеров технологических методов. Наиболее часто синтез таких покрытий осуществляется электрохимическим способом, который заключается в электроокислении растворенного мономера на поверхности электрода с формированием полимерной пленки. Успешная реализация этого метода, достижение достаточной адгезии и приемлемых механических свойств получаемых покрытий возможно при строгом контроле условий проведения процесса. Отметим также, что использование растворных технологий весьма ограничено, так как этим методом невозможно формирование сплошных наноразмерных слоев и их легирование затруднено.

Недостатком покрытий полипиррола является их низкая стойкость к химическому и термическому окислению [3]. Одним из методов ее повышения является формирование на поверхности покрытий наноразмерных экранирующих слоев и определение их оптимального состава, условий и режима осаждения является актуальной задачей.

Основной целью настоящей работы является изучение особенностей синтеза композиционных покрытий на основе полипиррола из газовой фазы с повышенной стойкостью к окислению, определение их молекулярной структуры, морфологии.

## 1 Методика нанесения покрытий и их исследования

Осаждение покрытий полипиррола проводили путем полимеризации паров пиррола на подложке, содержащей тонкий слой хлористого железа (III) ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6 \text{ H}_2\text{O}$ ) или хлорида меди (II) ( $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).

Покрытия хлоридов металла формировали из активной газовой фазы, генерирование которой осуществлялось в результате воздействия на однородный порошок или механическую смесь порошков потока электронов с энергией 800–1600 эВ и плотностью 0,01–0,03 А/см<sup>2</sup>. Процесс осаждения покрытий производился при начальном давлении остаточных газов в вакуумной камере  $\approx 4 \cdot 10^{-2}$  Па.

В качестве материала диспергируемой мишени использовали порошки хлорида железа (III), хлорида меди (II),  $\text{P}_2\text{O}_5$  (Sigma-Aldrich), а также серную кислоту (ХЧ).

Подложками при осаждении слоев служили пластины  $\text{NaCl}$  (для ИК-спектроскопических исследований), кварцевые резонаторы для определения адсорбционной активности покрытия полипиррола.

Спектроскопические исследования проводили на ИК-Фурье спектрофотометре Vertex-70 (Bruker) и УФ-вид спектрофотометре Cary-50 (Varian) с использованием стандартной термоячейки, установленной в кюветное отделение прибора. Скорость нагрева и охлаждения составляла 10° С/мин.

Адсорбционную активность тонкого слоя полипиррола определяли с помощью кварцевого измерителя толщины. Для этого на поверхности кварцевых резонаторов осаждали слой полипиррола. В дальнейшем измеритель толщины с различными кварцевыми резонаторами (чистый и с покрытием полипиррола), помещали в емкость с насыщенными парами кислоты. Датчик в парах кислоты находился в течение 1 минуты, после на 1 минуту извлекался на атмосферу воздуха. Процедура повторялась 5 раз. В ходе эксперимента фиксировали изменение частоты кварцевого резонатора.

Для построения ВАХ проводящих покрытий на основе пиррола были изготовлены встречно-штыревые электроды, состоящие из двух чередующихся полосок меди на диэлектрической подложке (стеклотекстолит). Первоначально на встречно-штыревые электроды осаждали покрытие на основе хлористого железа. После электроды с подслоем  $\text{FeCl}_3$  помещали в пары пиррола. Для всех образцов толщина подслоя хлористого железа и время выдержки электродов в парах пиррола являлись одинаковыми. Построение ВАХ осуществляли с использованием измерителя имmittанса (RLC) E7-20.

## 2 Результаты экспериментов и их обсуждение

ИК-спектры покрытия полипиррола до и после нагрева до 190° С представлены на рисунке 2.1.

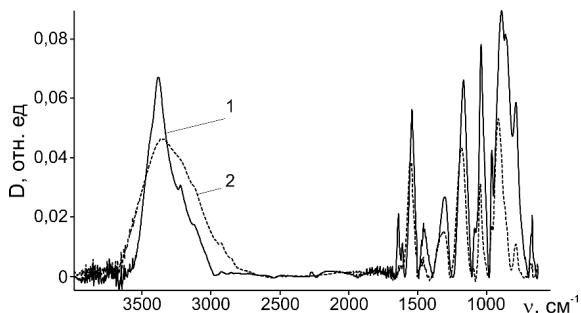


Рисунок 2.1 – ИК-спектры покрытия

полипиррола (подслой  $\text{FeCl}_3$ ):

1 – до нагрева; 2 – после нагрева до 190° С

При анализе представленного ИК-спектра следует учитывать возможное наложение полос поглощения хлорида железа на ИК-спектр покрытия полипиррола. Для ИК-спектра двухслойной системы  $\text{FeCl}_3 + \text{полипиррол}$  характерно интенсивное поглощение в области волновых чисел (3600–3000) см<sup>-1</sup>. В отмеченной области проявляются валентные колебания OH-групп и N – H связей [4], [5]. При этом валентные колебания OH-групп фиксируются в виде широкой полосы. По этой причине наличие узких полос поглощения в области (3600–3000) см<sup>-1</sup> обусловлено валентными колебаниями N – H связей вторичных аминов. Полосу при 3223 см<sup>-1</sup> можно соотнести с комбинированными валентными колебаниями N – H и O – H связей в условиях возникновения водородного взаимодействия [6]. Положение полосы N – H связи определяется уровнем межмолекулярного взаимодействия [6]. Полосу при 3440 см<sup>-1</sup> можно соотнести с колебаниями N – H связей, свободных от межмолекулярного взаимодействия. Полосы при 3390 см<sup>-1</sup> и 3150 см<sup>-1</sup> – валентные колебания вторичного амина в условиях межмолекулярного взаимодействия [4], [5], [7].

Следует отметить, что наличие интенсивной полосы поглощения при 3390 см<sup>-1</sup> характерно

для ИК-спектра слоя  $\text{FeCl}_3$ . Поглощение обусловлено способностью соли железа сорбировать различные соединения из атмосферы воздуха, в том числе и содержащие азот. В целом, согласно данным ИК-спектроскопии, в двухслойной системе существует выраженное межмолекулярное взаимодействием между полярными группами. Поглощение в области ( $3200\text{--}3000$ )  $\text{cm}^{-1}$  может быть соотнесено с валентными колебаниями С – Н связей гетероатомного каркаса, адсорбированными солью из атмосферы воздуха углеводородными фрагментами [7]. В ИК-спектре покрытия присутствуют слабоинтенсивные полосы поглощения при  $2270 \text{ cm}^{-1}$  и в области валентных чисел ( $2200\text{--}2100$ )  $\text{cm}^{-1}$ . Отмеченные полосы поглощения указывают на присутствие в молекулярной структуре покрытия  $\text{NH}^+$  групп. Деформационные колебания молекул воды проявляются в виде полосы поглощения при  $1640 \text{ cm}^{-1}$ . Поглощение при  $1612 \text{ cm}^{-1}$  характерно для ИК-спектра слоя  $\text{FeCl}_3$ . Ранее было сделано предположение, что данная полоса может быть обусловлена присутствием в составе с хлоридом железа углеводородных и азотсодержащих фрагментов. Данные соединения поглощаются из атмосферы воздуха при длительном хранении соли железа. Полосы поглощения при  $1545$ ,  $1460$ ,  $1340 \text{ cm}^{-1}$  могут быть соотнесены с валентными колебаниями  $\text{C} = \text{C/C} - \text{C/C} - \text{N}$ , при  $1170$  и  $1040 \text{ cm}^{-1}$  – с плоскостными деформационными колебаниями С – Н в кольце, при  $914$ ,  $860$ ,  $790 \text{ cm}^{-1}$  – внеплоскостные деформационные колебания С – Н связей [8], [9]. Полосу поглощения при  $965 \text{ cm}^{-1}$  соотносят не только с деформационными колебаниями С – Н связей, но и с валентными колебаниями  $\text{C} = \text{N}^+ - \text{C}$  [10]. Таким образом, двухслойная система представлена хлоридом железа, пирролом и адсорбированными из атмосферы воздуха низкомолекулярными соединениями (вода, углеводородные и азотсодержащие фрагменты).

Нагрев покрытия сопровождается снижением оптической плотности полос поглощения в области ( $3600\text{--}3000$ )  $\text{cm}^{-1}$  и при  $1640 \text{ cm}^{-1}$ . Это обусловлено процессом десорбции молекул воды. Снижение поглощения в области ( $3600\text{--}3000$ )  $\text{cm}^{-1}$  не сопровождается появлением выраженных узких полос поглощения. Подобное изменение ИК-спектра указывало бы на структурирование тонкого слоя с возникновением сильно-го межмолекулярного взаимодействия. Таким образом, сформированный тонкий слой полипиррола характеризуется относительно низкой сегментальной подвижностью. Термообработка не приводит к исчезновению заряженных  $\text{NH}^+$  групп, она проявляется в заметном уменьшении оптической плотности всех полос поглощения. Наиболее заметное уменьшение оптической плотности характерно для полос, соотносимых с деформационными колебаниями С – Н связей

( $900\text{--}700$ )  $\text{cm}^{-1}$ . Термообработка не сопровождается появлением новых полос поглощения. Изменение ИК-спектра указывает на постепенное снижение количества материала покрытия при его нагреве. Снижение оптической плотности может являться следствием интенсивной десорбции низкомолекулярных фрагментов полипиррола.

Согласно данным ИК-спектроскопии, кратковременное повышение температуры не приводит к заметному окислению тонкого слоя. В ИК-спектре не фиксируется появление кислородсодержащих групп. Отсутствие окисленных углеводородных фрагментов может являться следствием интенсивной десорбции низкомолекулярных фрагментов в атмосферу воздуха. Для подтверждения данного предположения покрытие подвергалось длительному низкотемпературному ( $120^\circ \text{ C}$ ) отжигу на атмосфере воздуха. Относительно низкая температура нагрева снижает интенсивную десорбцию низкомолекулярных фрагментов покрытия. ИК-спектры покрытий при таком нагреве представлены на рисунке 2.2.

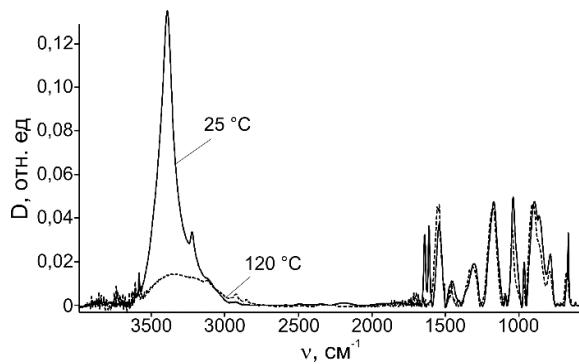


Рисунок 2.2 – ИК-спектры двухслойной системы  $\text{FeCl}_3 + \text{полипиррол}$  до и после отжига при  $120^\circ \text{ C}$  (2 ч)

Отжиг в течение 2 ч не сопровождался заметным окислением тонкого покрытия. На термоокисление полимерного слоя в ИК-спектре указывает появление только малоинтенсивного поглощения при  $1700 \text{ cm}^{-1}$  (валентные колебания  $\text{C} = \text{O}$  связей). В ИК-спектре после отжига фиксируется снижение оптической плотности полос поглощения в области ( $3600\text{--}3000$ )  $\text{cm}^{-1}$ , исчезновение полос поглощения при  $1640$  и  $1612 \text{ cm}^{-1}$ . Таким образом, при термообработке в первую очередь происходит десорбция молекул, адсорбированных покрытием влаги и низкомолекулярных соединений. Снижение величины оптической плотности полос при  $3390$  и  $1612 \text{ cm}^{-1}$  подтверждает правильность их соотнесения с адсорбированным слоем хлорида железа низкомолекулярными соединениями. Важным является то, что продолжительная низкотемпературная обработка не приводит к заметному снижению

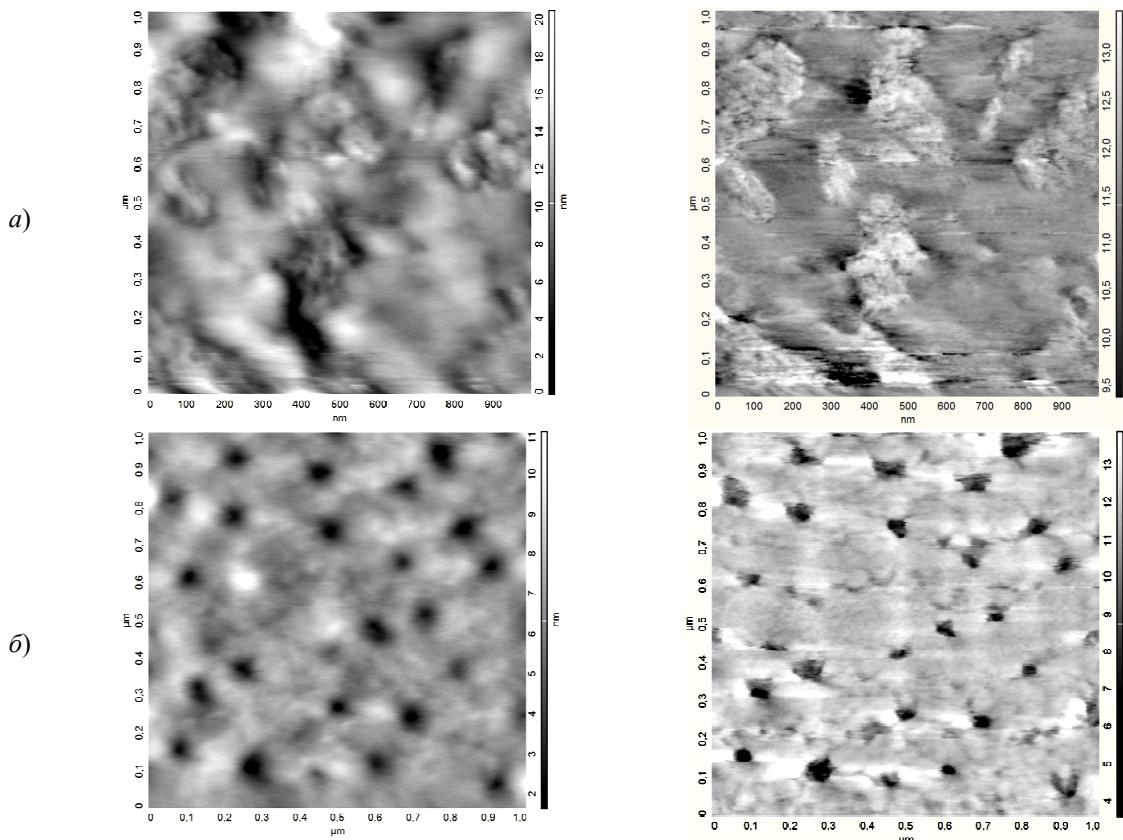


Рисунок 2.3 – ACM изображения покрытий  $\text{FeCl}_3$  (а) и  $\text{FeCl}_3 + \text{полипиррол}$  (б), осажденных при  $250^\circ\text{C}$

оптической плотности полос деформационных колебаний С – Н связей ( $(900\text{--}700)\text{ cm}^{-1}$ ). Таким образом, формируемый на поверхности полимерный слой интенсивно разрушается при температурах выше  $120^\circ\text{C}$ .

Результаты ACM, представленные на рисунке 2.3, показывают, что покрытие полипиррола содержит достаточно равномерно расположенные по поверхности поры и его морфология в значительной степени определяется геометрическими параметрами подслоя. Возникновение пор может являться следствием присутствия на поверхности хлорида железа молекул воды.

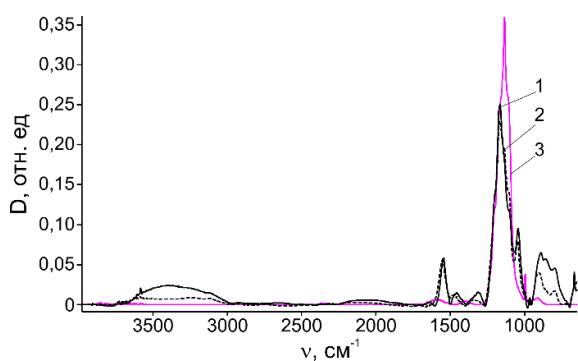


Рисунок 2.4 – ИК-спектры трехслойных систем:  
1 –  $\text{FeCl}_3 + \text{полипиррол} + \text{H}_2\text{SO}_4$  (до нагрева);  
2 –  $\text{FeCl}_3 + \text{полипиррол} + \text{H}_2\text{SO}_4$   
(после нагрева  $190^\circ\text{C}$ ); 3 – покрытие  $\text{H}_2\text{SO}_4$

Методом ИК-спектроскопии оценены изменения молекулярной структуры покрытий при нагреве в присутствии окислителя (рисунок 2.4).

Нанесение верхнего слоя на основе серной кислоты снижает способность трехслойной системы к поглощению влаги из атмосферы воздуха. Высокотемпературный нагрев ( $190^\circ\text{C}$ ) приводит к снижению оптической плотности всех полос поглощения. Наибольшие изменения фиксируются в области волновых чисел области ( $3600\text{--}3000$ ) и ( $900\text{--}700)\text{ cm}^{-1}$ . Изменения ИК-спектра указывают на десорбцию адсорбированных молекул воды и разрушение/десорбцию колец пиррола. В ИК-спектре трехслойной системы полосы поглощения, характерные для серной кислоты, не накладываются на полосы поглощения полипиррола в области ( $900\text{--}700)\text{ cm}^{-1}$ . Это позволяет определить влияние отжига на изменение значения оптической плотности полос в отмеченной области (таблица 2.1).

Согласно ИК-спектроскопии, нанесение серосодержащего слоя снижает величину соотношения оптических плотностей полос поглощения в области ( $900\text{--}700)\text{ cm}^{-1}$  до и после нагрева. Как ранее было отмечено, нанесение серосодержащего слоя уменьшает способность тонкослойной системы сорбировать влагу. Это означает, что на достоверность полученного результата не оказывает влияние присутствие в рассматриваемой частотной области поглощения OH-групп.

Таблица 2.1 – Значения оптической плотности полос до и после нагрева покрытия на атмосфере воздуха

Покрытие (температура нагрева)	Полоса поглощения		
	914 см <sup>-1</sup>	860 см <sup>-1</sup>	790 см <sup>-1</sup>
FeCl <sub>3</sub> + полипиррол (190° С)	1,5	3,7	3,9
FeCl <sub>3</sub> + полипиррол (120° С, 2 ч)	1	1,5	1,6
FeCl <sub>3</sub> + полипиррол + H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (190° С)	1,5	3,1	2,3
FeCl <sub>3</sub> + полипиррол + P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (190° С)	0,8	1,3	2,1

Следует отметить, что продолжительный низкотемпературный отжиг слоя FeCl<sub>3</sub> + полипиррол в наименьшей степени сказывается на изменении оптической плотности полос деформационных колебаний С – Н связей. Таким образом, верхний слой способен препятствовать высокотемпературной десорбции низкомолекулярных фрагментов полипиррола. Для подтверждения данного предположения в качестве третьего слоя было сформировано покрытие на основе P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. В ИК-спектре фосфорсодержащего слоя полосы поглощения при 900 и 888 см<sup>-1</sup> соотносятся с колебаниями Р – OH связей. В работе [11] показано, что высокотемпературный (190° С) нагрев слоя на основе P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> не приводит к заметному изменению оптической плотности полос в области (900–700) см<sup>-1</sup>. Изменения оптической плотности полос в области (900–700) см<sup>-1</sup> для трехслойной системы FeCl<sub>3</sub> + полипиррол + P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> после высокотемпературного отжига заметно ниже, чем для системы FeCl<sub>3</sub> + полипиррол + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Таким образом, нанесение на поверхность двухслойной системы FeCl<sub>3</sub> + полипиррол верхнего химически активного слоя является эффективным приемом повышения стойкости проводящего слоя к термодеструкции. Результаты исследования позволяют сделать предположение об отсутствии интенсивной деструкции проводящего слоя полипиррола в окислительных средах (электролитах).

Проведена оценка адсорбционной активности тонкого слоя полипиррола к насыщенным парам азотной кислоты (рисунок 2.5).

При помещении кварцевого резонатора в насыщенный пар азотной кислоты ее молекулы адсорбируются на поверхности металлического слоя (никель). Это приводит к увеличению частоты колебаний резонатора. Количество адсорбированных молекул кислоты непрерывно увеличивается с увеличением числа циклов нахождения резонатора в парах кислоты. Подобное может являться следствием химического взаимодействия кислоты с металлом. Нанесение тонкого покрытия пиррола позволяет повысить

стойкость металлического слоя к воздействию паров кислоты. В каждом цикле поверхность кварцевого резонатора сорбируется приблизительно одно и тоже количество молекул кислоты. Косвенно это может являться следствием низкой химической активности полипиррола по отношению к азотной кислоте.

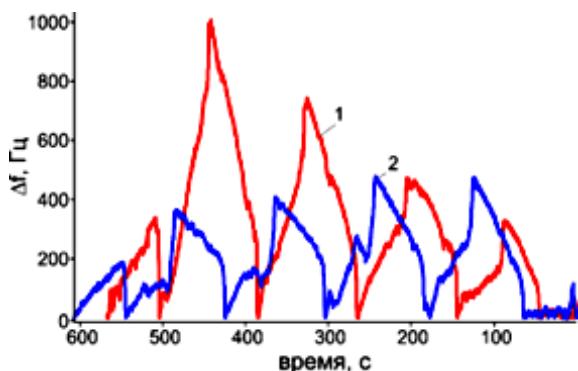


Рисунок 2.5 – Изменение частоты кварцевого резонатора без покрытия (1) и с покрытием полипиррола (2) от времени при периодическом нахождении в парах HNO<sub>3</sub>

Определение ВАХ покрытий полипиррола показало, что они являются проводящими (рисунок 2.6).

При этом электрическая проводимость в значительной степени зависит от времени хранения сформированной двухслойной системы и химического состава подслоя. Повышение порогового значения напряжения, при превышении которого регистрируется повышение проводимости, при хранении и снижение проводимости при термообработке является следствием химического взаимодействия медного электрода с хлоридом железа. При нанесении покрытий полипиррола на подслой CuCl<sub>2</sub> снижение проводимости связано с образованием более тонкого слоя из-за его низкой поимеразационной эффективности, а повышение электрического сопротивления в процессе хранения может являться следствием окисления металла.

## Выводы

Определена молекулярная структура, морфология и электрическая проводимость покрытий полипиррола, нанесенных на подслой хлорида железа. Установлено, что термообработка сформированного тонкого слоя полипиррола сопровождается процессами его термоокислительной деструкции и десорбцией образующихся низкомолекулярных соединений. Формирование на поверхности покрытий полипиррола сульфатного или фосфатного слоя препятствуют разрушению слоя полипиррола при нагреве.

Электрическая проводимость покрытий полипиррола на подслое хлоридов зависит от времени хранения сформированной двухслойной

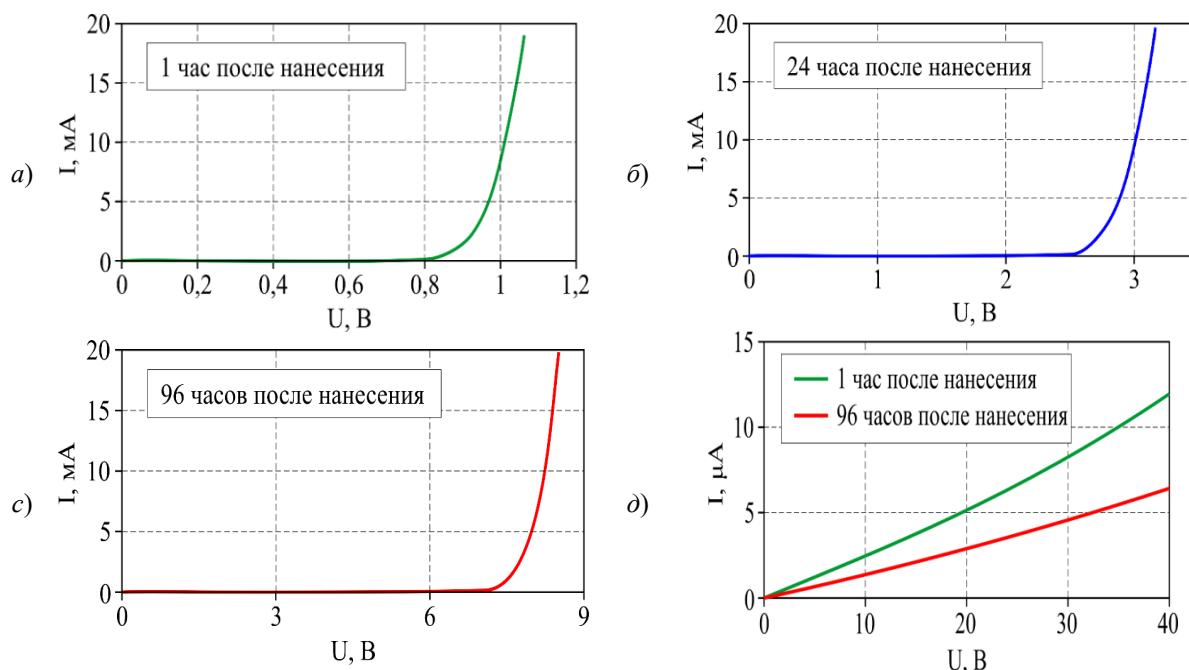


Рисунок 2.6 – ВАХ покрытий FeCl<sub>3</sub> + полипиррол после хранения 1 час (а), 24 часа (б), 96 часов(с) и покрытий CuCl<sub>2</sub> + полипиррол (д)

системы и химического состава подслоя. Повышение порогового значения напряжения, при превышении которого регистрируется повышение проводимости, при хранении является следствием химического взаимодействия медного электрода с хлоридом железа.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Межуев, Я.О. Применение полианилина и полипиррола в электронике / Я.О. Межуев, М.И. Штильман, Ю.В. Коршак // Пластические массы. – 2020. – № 7–8. – С. 28–31.
  2. Щербаков, А.Е. Особенности радиопоглощения и экранирования электромагнитного излучения тканями, модифицированными полипирролом и магнетитом, в диапазоне частот от 3,9 до 8 ГГц / А.Е. Щербаков // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2024. – Т. 27 (6). – С. 68–79.
  3. Кожемова, К.Р. Синтез новых нирролсодержащих мономеров и полимеров реакцией (поли)гетероциклизации: автореф. дис. ... канд. хим. наук: 02.00.06 / К.Р. Кожемова; Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова. – Нальчик, 2015. – 22 с.
  4. Bellamy, L.J. The Infra-red Spectra of Complex Molecules / L.J. Bellamy. – Methuen, 1954. – 323 p.
  5. Nakanishi, K. Infrared Absorption Spectroscopy / K. Nakanishi. – Holden-Day Inc., San Francisco, 1962. – 233 p.
  6. Lee, S. Polypyrrole wool composite with electrical heating properties fabricated via layer-by-layer method / S. Lee // Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14. – Article 3883.
7. Investigation of polypyrrole based composite material for lithium sulfur batteries / V. Niscakova [et al.] // Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14. – Article 22928.
8. Vibrational spectroscopy of polypyrrole, theoretical study / R. Kostic [et al.] // The Journal of Chemical Physics. – 1995. – Vol. 102. – P. 3104–3109.
9. Davidson, R.G. An IR spectroscopic study of the electrochemical reduction of polypyrrole doped with dodecylsulfate anion / R.G. Davidson, T.G. Turner // Synthetic Metals. – 1995. – Vol. 72. – P. 121–128.
10. Preparation and characterization of hybrid polypyrrole nanoparticles as a conducting polymer with controllable size / J. Mahmood [et al.] // Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14. – Article 11653.
11. The structure and properties of bioactive multilayer coatings applied by a low-energy electron beam on the implant surface / Y. Liu [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2019. – Vol. 378. – Article 124969.

*Материалы статьи подготовлены при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № Т25КИ-056 от 06.02.2025 г.)*

*Поступила в редакцию 19.09.2025.*

#### Информация об авторах

Ярмоленко Максим Анатольевич – д.т.н., профессор  
Рогачёв Александр Владимирович – чл.-корр. НАН Беларуси, д.х.н., профессор  
Рогачёв Александр Александрович – чл.-корр. НАН Беларуси, д.т.н., профессор