

УДК 537.31:621.9.048.7:621.798:547.551.1:546.47-31 DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2022_1_50_37

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО СИНТЕЗА И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГИБРИДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИАНИЛИНА И ОКСИДА ЦИНКА

А.А. Рогачёв¹, А.М. Михалко², М.А. Ярмоленко², Джин Сюхуэй³,
Хонглианг Жанг³, Хонгтао Цао⁴, А.В. Рогачёв²

¹Институт химии новых материалов Национальной Академии Наук Беларуси, Минск

²Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

³Пекинский технологический институт

⁴Институт технологии материалов и инженерии Китайской академии наук, Нинбо

FEATURES OF ELECTRON-BEAM SYNTHESIS AND ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF HYBRID COATINGS BASED ON POLYANILINE AND ZINC OXIDE

A.A. Rogachev¹, A.M. Mikhalko², M.A. Yarmolenko², Jin Xuhui³,
Hongliang Zhang³, Hongtao Cao⁴, A.V. Rogachev²

¹Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk

²Francisk Skorina Gomel State University

³Beijing Institute of Technology

⁴Institute of Materials Technology & Engineering Chinese Academy of Sciences, Ningbo

Аннотация. Определены кинетические особенности осаждения и электрофизические свойства двухслойных покрытий на основе оксида цинка и полианилина (ПАНИ). Покрытия формировали путем последовательного воздействия в вакууме потока низкоэнергетических электронов на порошок ацетата цинка и механическую смесь порошков ПАНИ и оксида фосфора (V). Применение оксида фосфора приводит к возникновению линейных проводящих участков в структуре ПАНИ с высокой плотностью полярных, делокализованных структур. Методами регистрации вольтамперных характеристик и импедансной спектроскопии установлены значения удельной проводимости, энергии активации носителей заряда для покрытий ZnO – ПАНИ + P₂O₅ толщиной до 200 нм в диапазоне температур от 20 до 100° С.

Ключевые слова: гибридные покрытия, полианилин, оксид цинка, электрофизические свойства, электронно-лучевое диспергирование.

Для цитирования: Особенности электронно-лучевого синтеза и электрофизические свойства гибридных покрытий на основе полианилина и оксида цинка / А.А. Рогачёв, А.М. Михалко, М.А. Ярмоленко, Джин Сюхуэй, Хонглианг Жанг, Хонгтао Цао, А.В. Рогачёв // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 1 (50). – С. 37–43. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2022_1_50_37

Abstract. Kinetic features of deposition and electrophysical properties of two-layer coatings based on zinc oxide and polyaniline (PANI) are determined. The coatings were formed in vacuum by consistent influence of low-energy electrons stream on zinc acetate powder and a mechanical mixture of PANI and phosphorus (V) oxide powders. The application of phosphorus oxide leads to the appearance of linear conductive sections in the PANI structure with a high density of polaron, delocalized structures. For the ZnO – PANI + P₂O₅ coatings up to 200 nm thick in the temperature range from 20 to 100° C the values of specific conductivity, activation energy of charge carriers were determined.

Keywords: hybrid coatings, polyaniline, zinc oxide, electrophysical properties, electron beam deposition.

For citation: Features of electron-beam synthesis and electrophysical properties of hybrid coatings based on polyaniline and zinc oxide / A.A. Rogachev, A.M. Mikhalko, M.A. Yarmolenko, Jin Xuhui, Hongliang Zhang, Hongtao Cao, A.V. Rogachev // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2022. – № 1 (50). – P. 37–43. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2022_1_50_37 (in Russian)

Введение

В числе перспективных методов формирования полупроводниковых материалов с регулируемыми функциональными свойствами отмечают синтез гибридных материалов (ГМ) с контролируемой наноструктурой. Такие материалы представляют собой систему, состоящую по крайней мере из двух компонентов, различной

химической природы (органической и неорганической) [1], [2]. Выбор природы компонентов таких материалов, их фазового состава определяет в значительной степени свойства материала. Так, использование органических олигомеров или полимеров в качестве основной фазы ГМ позволяет наряду с особыми электрофизическими свойствами реализовать такие специфические

характеристики как высокие механические, защитные свойства, гидрофобность или гидрофильность, селективное поглощение, влияющее на параметры фотоактивности.

Особый интерес представляет формирование ГМ на основе полупроводников и проводящих полимеров, в частности, полианилина. Данное направление активно развивается и находится на этапе интенсивного накопления информации о новых полимерных материалах, их свойствах и способах применения. Осаждение покрытий ПАНИ + полупроводник, как правило, производится с использованием жидких сред. При этом основным недостатком растворных способов является многостадийность и длительность, необходимость непрерывного контроля технологических параметров, использование токсичных соединений. Относительно свободным от отмеченных недостатков является метод формирования покрытий из газовой фазы, генерируемой воздействием потока низкоэнергетических электронов на ПАНИ (основание эмеральдина). Метод позволяет осуществлять допирование и протонирование осаждаемых слоев непосредственно при нанесении покрытия [3]–[5]. Приведенные в работах [5]–[8] результаты свидетельствуют о возможности эффективного управления процессами структурообразования в таких системах и, соответственно, изменения в широких пределах электрофизических свойств покрытий. На примере покрытий, сформированных электронно-лучевым диспергированием механических смесей порошков ПАНИ и солей благородных металлов, показана высокая перспективность метода для формирования ГМ с повышенными электропроводящими, фотовольтаическими и каталитическими свойствами [9]. Покрытия, осаждаемые из газовой фазы, характеризуются стабильными свойствами, могут проявлять специфические спектральные зависимости электропроводности, избирательного поглощения, что позволит их эффективно использовать в различных оптоэлектронных устройствах.

Целью настоящей работы является установление особенностей формирования из активной газовой фазы двухслойных структур на основе ПАНИ и оксида цинка, исследование молекулярной структуры и электрофизических свойств таких покрытий.

1 Методика эксперимента

Объектом исследования явились двухслойные покрытия на основе оксида цинка и ПАНИ. Покрытия формировали путем последовательного воздействия в вакууме потока низкоэнергетических электронов на порошок ацетата цинка и механическую смесь порошков ПАНИ и оксида фосфора (V). На мишень направлялся поток электронов с энергией $900 \div 1500$ эВ и плотностью $0,01 \div 0,04$ А/см². Начальное давление

остаточных газов в вакуумной камере соответствовало 5–10 мПа. Схема осаждения гибридных покрытий представлена на рисунке 1.1. Для поворота электронного луча на 180° применялось постоянное магнитное поле, создаваемое электромагнитом. При послойном нанесении покрытия применялся поворотный столик с несколькими мишенями.

В качестве подложек для измерения электрофизических характеристик покрытий использовались диэлектрические пластины из керамики с проводящими графитовыми структурами в виде гребенчатого конденсатора встречно-штыревого типа, для спектроскопических исследований – кварцевые пластины, для регистрации спектров комбинационного рассеяния – кремниевые пластины, для проведения ИК-спектроскопических исследований – подложки NaCl.

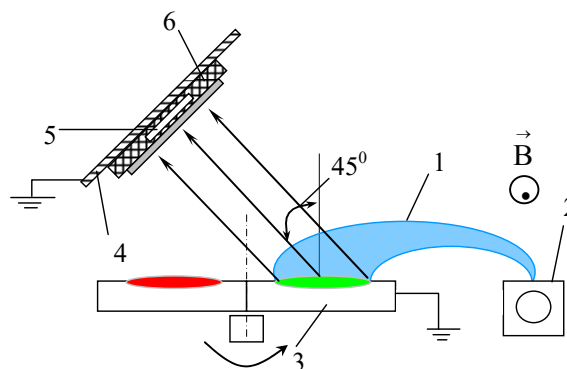


Рисунок 1.1 – Схема осаждения гибридных покрытий на основе полимеров и полупроводников из активной газовой фазы:

- 1 – электронный луч; 2 – электронно-лучевой испаритель с поворотом луча на 180°;
- 3 – столик с мишенями, 4 – подложкодержатель;
- 5 – кварцевый измеритель толщины; 6 – подложка

Термообработку покрытий ацетата цинка с целью получения оксида цинка проводили на воздухе при температуре 200°C в течение 60 минут.

Толщина формируемых слоев контролировалась непосредственно в процессе нанесения с помощью кварцевого измерителя толщины и не превышала 200 нм. При формировании композиционных слоев толщину покрытия определяли по плотности основного вводимого компонента, которая в случае ПАНИ принималась равной 1,36 г/см³.

Электрофизические свойства композиционных и двухслойных покрытий на основе полианилина и оксида цинка определяли путем построения вольтамперных характеристик (ВАХ) и методом импедансной спектроскопии.

2 Результаты и их обсуждение

Кинетика электронно-лучевого диспергирования ПАНИ, оксида фосфора и их смеси, оцениваемая по скорости роста покрытия, давления

в вакуумной камере имеет нестационарный характер, что характерно для процесса нанесения органических соединений [10] (рисунок 2.1). Для процесса электронно-лучевого диспергирования ПАНИ характерно наличие индукционного периода (72 секунды), по истечении которого фиксировалось начало роста покрытия (рисунок 2.1, а).

При электронно-лучевом диспергировании оксида фосфора (рисунок 2.1, б) установлено первоначальное повышение давления в вакуумной камере до 12 мПа. При этом процесс осаждения покрытия не фиксировался. Данный факт, по-видимому, обусловлен нагревом электронным лучом мишени с оксидом фосфора и выделением летучих адсорбированных компонентов, в частности, связанной воды. Через 45 секунд начинается рост покрытия, давление в вакуумной камере ступенчато падает до 5 мПа и наблюдается значительное возрастание скорости роста покрытия. После 180-и секунд диспергирования скорость роста покрытия снижается, давление несколько возрастает до 7 мПа и после 210-и секунд рост покрытия прекращается.

При воздействии электронного луча на механическую смесь порошков ПАНИ и P_2O_5 , кинетика диспергирования которого представлена на рисунке 2.1, в), было установлено начало роста покрытия после 40-й секунды. При этом наблюдался рост давления в вакуумной камере до 16 мПа при остаточном давлении 8 мПа. Данный факт связан, по-видимому, с образованием незначительного количества активных летучих фрагментов, имеющих высокую реакционную способность к пленкообразованию. При дальнейшем диспергировании имеет место практически

линейный рост покрытия со скоростью порядка 0,15 нм/с. Наблюдаемый экспериментальный факт, по-видимому, обусловлен сложными процессами взаимодействия ацетата цинка, P_2O_5 и ПАНИ в мишени при воздействии потока электронов. В результате формируется поток летучих компонентов, имеющих высокую реакционную способность к пленкообразованию.

При электронно-лучевом диспергировании ацетата цинка установлено начало роста покрытия после 64 секунды. При этом наблюдался рост давления в вакуумной камере до 26 мПа. Высокое давление обусловлено, прежде всего, наличием связанной воды в исходных кристаллах ацетата цинка.

Методом комбинационного рассеяния (КР-спектроскопия) оценены изменения молекулярной структуры ПАНИ при введении в покрытие оксида фосфора. В КР-спектре исходного порошка ПАНИ (рисунок 2.2) регистрируются три наиболее интенсивные полосы поглощения при 1586 см^{-1} , 1472 см^{-1} и 1160 см^{-1} , ответственные за валентные С - С колебания бензойных колец, валентные колебания групп $C=N$ хинойдных участков и деформационные колебания С - Н группы в бензойных и хинойдных кольцах соответственно [11], [12]. В спектре покрытия ПАНИ исчезает пик при 1472 см^{-1} , что свидетельствует, прежде всего, об изменении конформации макромолекулы из свернутой в вытянутую, а появление пика около 1600 см^{-1} , ответственного за валентные колебания $C=C$ групп хинойдного фрагмента и его протонирование, – до восстановленной полухинойдной структуры [13]. Полученные данные соответствуют результатам ранее

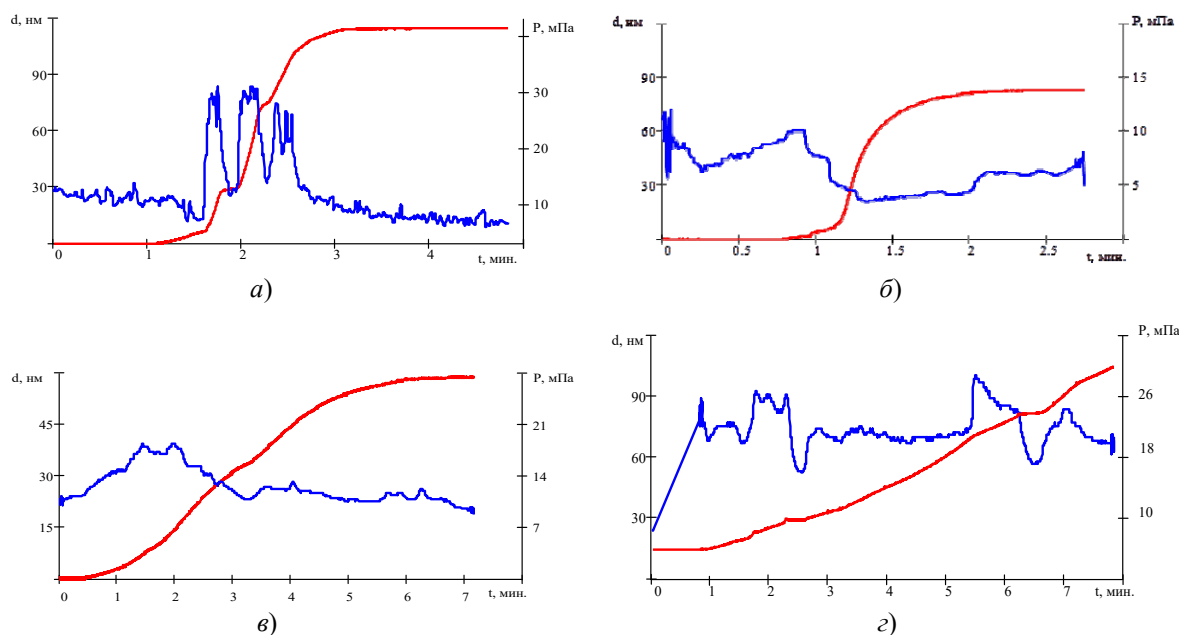


Рисунок 2.1 – Кинетические зависимости толщины покрытия (красная линия) и давления в камере (синяя линия) при электронно-лучевом диспергировании мишеней ПАНИ (а), P_2O_5 (б), ПАНИ+ P_2O_5 (в), ацетата цинка (г)

проведенных ИК-спектроскопических исследований, свидетельствующим об образовании более восстановленной структуры покрытий ПАНИ по сравнению с исходным блочным полимером [4], [5], [14].

Анализ КР-спектров покрытий, получаемых диспергированием ПАНИ и оксида фосфора, указывает на высокую степень допирования формируемых покрытий на основе ПАНИ и формирование проводящей структуры (рисунок 2.2). На это указывает широкий пик около 1600 см^{-1} , одновременное появление интенсивного пика при 1368 см^{-1} , подтверждающего формирование делокализованных поляронных структур [15], [16]. Отметим, что при нанесении только покрытия ПАНИ, образование делокализованных поляронных структур выявлено не было, а установлено только исчезновение пика при 1480 см^{-1} .

Результаты проведенных исследований указывают на формирование при электронно-лучевом диспергировании порошка ПАНИ плоских вытянутых цепей с высоким значением разброса их по длине, причем в процессе нанесения данные покрытия преимущественно восстанавливаются. При допировании покрытия оксидом фосфора образуются проводящие участки ПАНИ, линейная структура которых практически не нарушается межмолекулярной сшивкой, но имеющие высокую плотность поляронных, делокализованных структур. Данная особенность структурного состояния наносимых покрытий электронно-лучевым диспергированием свидетельствует о возможности осаждения плоских упорядоченных слоев ПАНИ, которые могут служить основой для формирования полисопряженной структуры с облегченным межцепочечным переносом заряда, что должно увеличить проводимость всей тонкопленочной системы.

Особенности электрофизических свойств двухслойных покрытий на основе полианилина и

оксида цинка исследовали путем построения вольтамперных характеристик (ВАХ) и методом импедансной спектроскопии. ВАХ однокомпонентного покрытия, формируемого электронно-лучевым диспергированием ацетата цинка и последующего отжига при температуре $T_{отж} = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, время отжига $t_{отж} = 1$ час при температуре от 20 до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ представлены на рисунке 2.3, а.

Установлено, что ВАХ покрытия ZnO имеет линейный характер при напряжении до 1,5 В, который нарушается при более высоких напряжениях, что может свидетельствовать, прежде всего, о достаточно сложном механизме проводимости данного покрытия, близком к полупроводниковому типу при данных условиях формирования покрытия. С ростом температуры до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ проводимость нанесенных слоев возрастает.

ВАХ двухслойного покрытия, формируемого электронно-лучевым диспергированием ацетата цинка и последующего отжига при температуре $T_{отж} = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, (время отжига $t_{отж} = 1$ час) и нанесения второго слоя путем электронно-лучевым диспергированием смеси ПАНИ+ P_2O_5 (покрытие маркируемое ZnO – ПАНИ + P_2O_5) при температуре от 20 до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ с толщинами 80 и 100 нм соответственно, имеет линейный характер до значений напряжения 2,5 В. С ростом температуры до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ проводимость нанесенных слоев изменяется достаточно сложно. При нагреве свыше $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдается резкий скачок проводимости данных тонкопленочных систем.

Электрофизические свойства нанокомпозиционных покрытий на основе оксида цинка и ПАНИ исследовали методом импедансной спектроскопии. Данные частотной зависимости полного (Z) и действительной части (Z') сопротивления покрытия ZnO толщиной 80 нм (рисунок 2.4, а, б) позволили установить, что на частотах от 25 до 10^4 Гц они имеют сопротивление порядка

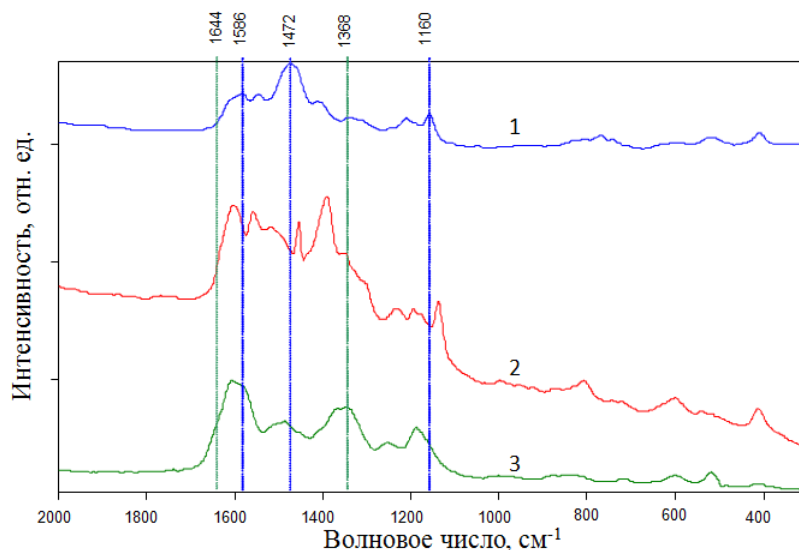


Рисунок 2.2 – КР-спектры покрытий на основе ПАНИ:
1 – исходный порошок ПАНИ; 2 – покрытие ПАНИ; 3 – покрытие ПАНИ+ P_2O_5

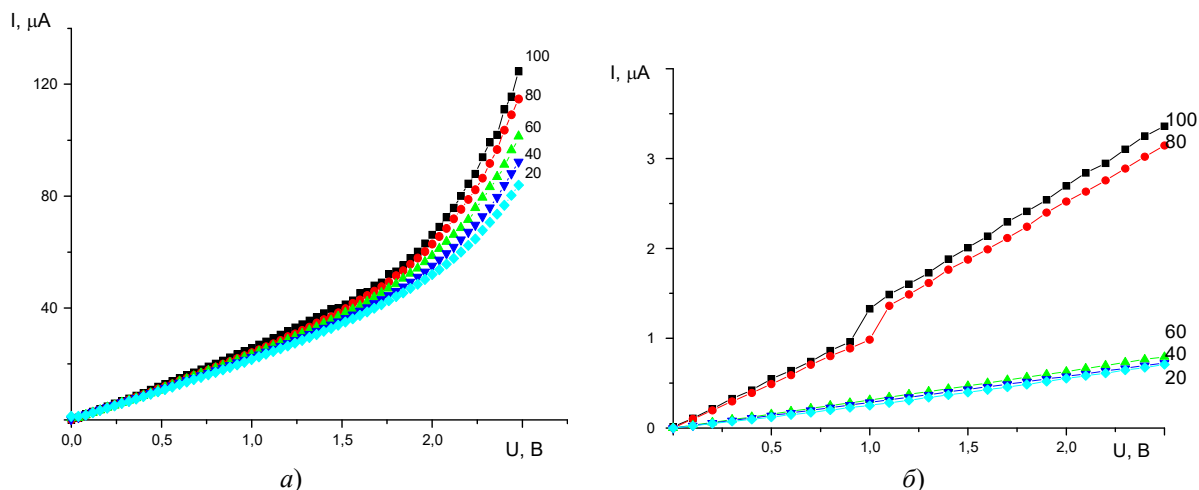


Рисунок 2.3 – ВАХ покрытия ZnO толщиной 80 нм (а) и ZnO – ПАНИ + P₂O₅ (б) с толщами 80 и 100 нм соответственно при температуре от 20 до 100 °С

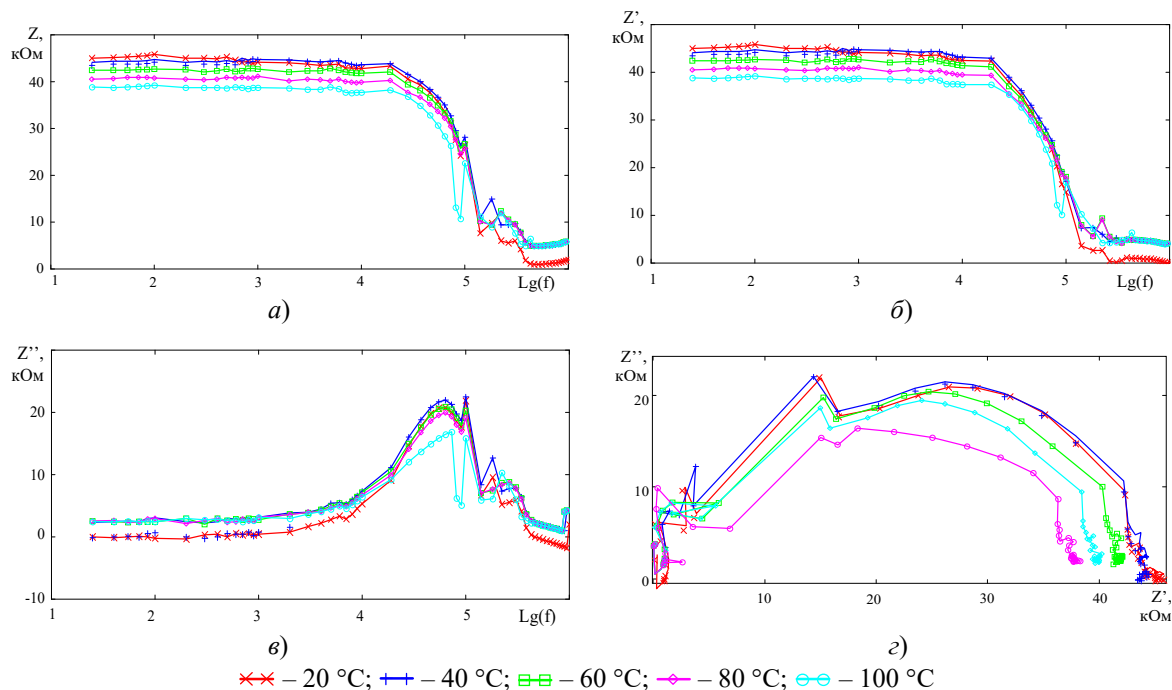


Рисунок 2.4 – Импедансная спектроскопия покрытия ZnO толщиной 80 нм при температуре от 20 до 100 °С: (а) – зависимость полного импеданса Z от логарифма частоты f ; (б) – зависимость действительной части импеданса Z' от логарифма частоты f ; (в) – зависимость мнимой части импеданса Z'' от логарифма частоты f ; (г) – годограф

37–45 кОм, причем с ростом температуры от 20 до 100 °С полное сопротивление снижается. Расчет удельной проводимости указывает на значения порядка 3,16–2,78 См / см, которые с ростом температуры растут. Сложная форма пиков на кривых частотной зависимости мнимой части сопротивления (рисунок 2.4, в) свидетельствует о наличии релаксационных процессов. Максимумы данных пиков лежат в высокочастотной области. Годограф данных слоев представлен на рисунке 2.4, г, представляет собой суперпозицию как минимум двух полуокружностей, что также свидетельствует о достаточно

сложной структуре формируемых тонкопленочных систем. С ростом температуры радиусы данных окружностей уменьшаются, но после 80 °С опять несколько увеличиваются.

Данные частотной зависимости полного (Z) и действительной части (Z') сопротивления двухслойного покрытия ZnO – ПАНИ + P₂O₅ с толщами 80 и 100 нм соответственно при температуре от 20 до 100 ° представлены на рисунке 2.5, а, б.

Установлено, что полученные слои на частотах от 25 до 10³ Гц имеют сопротивление порядка

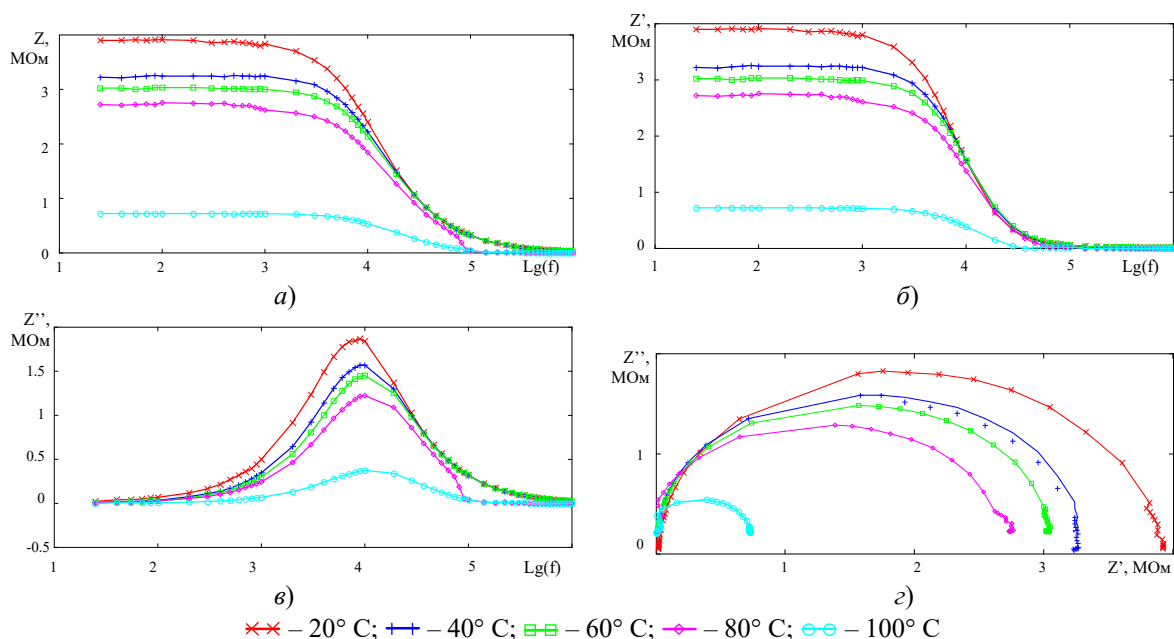


Рисунок 2.5 – Импедансная спектроскопия двухслойного покрытия ZnO – ПАНИ + P₂O₅ с толщами 80 и 100 нм соответственно при температуре от 20 до 100 °С: (а) – зависимость полного импеданса Z от логарифма частоты f ; (б) – зависимость действительной части импеданса Z' от логарифма частоты f ; (в) – зависимость мнимой части импеданса Z'' от логарифма частоты f ; (г) – годограф

0,8–4 МОм, и с ростом температуры от 20 до 100 °С полное сопротивление падает не равномерно. Расчет удельной проводимости указывает на значения порядка 61–100 мСм/см, которые с ростом температуры растут. Пики на кривых мнимой части сопротивления (рисунок 2.5, в) сдвинуты в область более низких значений частот. Годографы данных слоев, приведенные на рисунке 2.5, г, имеют форму, характерную для покрытий ZnO.

Более детальный анализ полученных температурных зависимостей импедансной спектроскопии показал, что температурная зависимость сопротивления при постоянном напряжении гибридных покрытий на основе ПАНИ и оксида цинка описываются выражением

$$1/Z_{dc} = 1/Z_{dc0} \cdot \exp(-E_{dc}/kT),$$

где Z_{dc0} – предэкспоненциальный множитель; E_{dc} – энергия активации носителей заряда постоянного тока; k – постоянная Больцмана.

Рассчитанная величина энергии активации носителей заряда постоянного тока покрытий ZnO составила $E_{dc} = 0,021$ эВ, что значительно ниже величины запрещенной зоны $E_{BG} = 3,34$ эВ, полученного для блочного ZnO [17], [18]. Данный факт, по-видимому, связан с неоднородной структурой полупроводника, создающей флуктуации потенциала, в которых происходит плавное искривление зон с образованием случайного потенциального рельефа. Электроны с энергией, превышающей некий критический уровень протекания, могут пройти над максимумами потенциального рельефа или обойти их [18].

Энергии активации носителей заряда постоянного тока покрытий ZnO – ПАНИ + P₂O₅ имеет значение $E_{dc} = 0,045$ эВ, что более чем в два раза больше ранее установленной величины для покрытия ZnO и опять же значительно ниже величины запрещенной зоны блочного ZnO. Отметим, что в этом случае экспоненциальный характер экспериментальных данных ВАХ менее выражен, чем в случае покрытий ZnO.

Выводы

Определены кинетические особенности осаждения из газовой фазы и электрофизические свойства двухслойных покрытий ZnO – ПАНИ + P₂O₅. Показано, что при диспергировании смеси ПАНИ и P₂O₅ кинетические зависимости давления и толщины покрытия имеют нестационарный характер, что может свидетельствовать о протекании в зоне диспергирования процессов химического взаимодействия. Методом КР-спектроскопии установлено, что допирование покрытий ПАНИ оксидом фосфора приводит к образованию линейных проводящих участков ПАНИ с высокой плотностью поляронных, делокализованных структур. Сделано заключение о возможности осаждения плоских упорядоченных слоев ПАНИ, которые могут служить основой для формирования полисопряженной структуры с облегченным межцепочечным переносом заряда, что должно увеличить проводимость всей тонкопленочной системы.

Методами регистрации вольтамперных характеристик и импедансной спектроскопии

определены значения удельной проводимости, энергии активации носителей заряда для двухслойного покрытия покрытий ZnO – ПАНИ + P₂O₅ с толщиной каждого из слоев равной 80 и 100 нм соответственно в диапазоне температуры от 20 до 100° С.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Hybrid materials based on conjugated polymers and inorganic semiconductors as photocatalysts: from environmental to energy applications* / M. Liras [et al.] // Chem. Soc. Rev. – 2019. – Vol. 48. – P. 5454–5487.
2. *Efficient Titanium Oxide/Conjugated Polymer Photovoltaics for Solar Energy Conversion* / Alexi C. Arango [et al.] // Adv. Mater. – 2000. – Vol. 12. – P. 1689–1692.
3. *Molecular structure, optical, electrical and sensing properties of PANI-based coatings with silver nanoparticles deposited from the active gas phase* / A.A. Rogachev [et al.] // Applied Surface Science. – 2015. – Vol. 351. – P. 811–818.
4. *Structure and properties of polyaniline nanocomposite coatings containing gold nanoparticles formed by low-energy electron beam deposition* / S. Wang [et al.] // Applied Surface Science. – 2018. – Vol. 428. – P. 1070–1078.
5. *Structure and electrical properties of polyaniline-based copperchloride or copper bromide coatings deposited via low-energy electron beam* / A.A. Rogachev [et al.] // Applied Surface Science. – 2019. – Vol. 483. – P. 19–25.
6. *Formation features, structure and properties of bioactive coatings based on phosphate-calcium layers, deposited by a low energy electron beam* / J. Xiao [et al.] // Surface & Coatings Technology. – 2019. – Vol. 359. – P. 6–15.
7. *Morphology and structure of antibacterial nanocomposite organic-polymer and metal-polymer coatings deposited from active gas phase* / A.V. Rogachev [et al.] // RSC Adv. – 2013. – Vol. 3. – P. 11226–11233.
8. *Heat treatment impact on molecular structure of polymer-based silver containing coatings deposited from the active gas phase* / A.A. Rogachev [et al.] // Progress in Organic Coatings. – 2015. – Vol. 81. – P. 80–86.
9. *Осаждение из газовой фазы легированных металлами покрытий полианилина, их молекулярная структура* / А.А. Рогачев [и др.] // Нанотехнологии: разработка, применение – XXI век. – 2021. – Т. 13, № 2. – С. 27–35.
10. *Микро- и наноконпозиционные полимерные покрытия, осаждаемые из активной газовой фазы* / М.А. Ярмоленко [и др.]; под. ред. А.В. Рогачева. – Москва: Радиотехника, 2016. – 424 с.
11. *Bernard, M.C. Goff Quantitative characterization of polyaniline films using Raman spectroscopy I: Polaron lattice and bipolaron* / M.C. Bernard, A. Hugot-Le // Electrochimica Acta. – 2006. – Vol. 52. – P. 595–603.
12. *Abnormally enhanced thermoelectric transport properties of SWNT / PANI hybrid films by the strengthened PANI molecular ordering* / Qin Yao [et al.] // Energy Environ. Sci. – 2014. – Vol. 7. – P. 3801–3807.
13. *Raman spectroscopy of polyaniline and oligoaniline thin films* / M. Trchová [et al.] // Electrochimica Acta. – 2014. – Vol. 122. – P. 28–38.
14. *Regularities of Fluoropolymer Coating Growth on Pretreated Surfaces from Active Gas Phase* / A.A. Rogachev [et al.] // Materials Science Forum. – 2019. – Vol. 970. – P. 55–62.
15. *Raman characterization of polyaniline induced conformational changes* / J.E. Pereira da Silva [et al.] // Synthetic Metals. – 1999. – Vol. 101. – P. 834–835.
16. *Chun-Guey, Wu. Conducting Polyaniline Filaments in a Mesoporous Channel Host* / Chun-Guey Wu, T. Bein // Science. – 1994. – Vol. 264. – P. 1757–1758.
17. *Synthesis and structure of antibacterial coatings formed by electron-beam dispersion of polyvinyl chloride in vacuum* / C. He [et al.] // Surface & Coatings Technology. – 2018. – Vol. 354. – P. 38–45.
18. *Воробьева, Н.А. Проводимость нанокристаллического ZnO (Ga)* / Н.А. Воробьева, М.Н. Румянцева, П.А. Форш, А.М. Гасков // Физика и техника полупроводников. – 2013. – Т. 47. – С. 637–641.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (БРФФИ), договор Х20ПТИ-011 «Формирование гибридных наноразмерных слоев неорганических полупроводников и сопряженных полимеров из активной газовой фазы для оптоэлектронных применений».

Поступила в редакцию 14.01.2022.

Информация об авторах

Рогачёв Александр Александрович – чл.-корр. НАН Беларуси, д.т.н., профессор
 Михалко Алексей Михайлович – аспирант
 Ярмоленко Максим Анатольевич – д.т.н., доцент
 Сюхуэй Джин – профессор
 Джанг Хонглианг – профессор
 Цао Хонгтао – профессор
 Рогачёв Александр Владимирович – чл.-корр. НАН Беларуси, д.х.м., профессор