

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-3-219-229>

УДК 539.2:678.07-416



Оригинальная статья

Д. Л. Горбачев¹, М. А. Ярмоленко¹, А. А. Рогачев^{2*}

¹Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины,
ул. Советская, 104, 246028, Гомель, Республика Беларусь

²Институт химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси,
ул. Ф. Скорины, 36, 220084, Минск, Республика Беларусь

СТРУКТУРНО-МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОДНОКОМПОНЕНТНЫХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНА, ОСАЖДЕННЫХ ИЗ АКТИВНОЙ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

Аннотация. Методом атомно-силовой, инфракрасной спектроскопии определены морфология и молекулярная структура наноразмерных покрытий, осажденных из летучих продуктов электронно-лучевого диспергирования полиэтилена и его смеси с хлоридом алюминия в условиях лазерного ассистирования и без него. Покрытия осаждались на подложки кремния, модифицированные с целью изменения поверхностной энергии. Установлено, что при диспергировании однокомпонентной мишени полиэтилена снижение поверхностной энергии сопровождается монотонным уменьшением шероховатости, среднего размера зерна, повышением фрактальной размерности структурных образований. Покрытия, осажденные из продуктов диспергирования полиэтилена и хлорида алюминия, характеризуются значительно меньшей шероховатостью, меньшим объемом зерна в сравнении с покрытиями, осажденными при диспергировании однокомпонентной мишени, и их структурно-морфологические параметры не коррелируют с изменением поверхностной энергии. Установлено, что лазерное ассистирование электронно-лучевого диспергирования незначительно влияет на молекулярную структуру покрытий. Использование данных слоев в силу их антифрикционных и гидрофобных свойств перспективно в устройствах микроэлектроники и микрофлюидики.

Ключевые слова: электронно-лучевое диспергирование, лазерное ассистирование, покрытия полиэтилена, морфология, атомно-силовая микроскопия

Благодарности: работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биоорхимия» на 2021–2025 годы, подпрограмма «Лесохимия-2» комплексного задания 2.4.2.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Горбачев Дмитрий Леонидович – научный сотрудник научно-исследовательского сектора Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины. E-mail: gorbachyov@gsu.by; Ярмоленко Максим Анатольевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник научно-исследовательского сектора Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины. E-mail: simmak79@mail.ru; Рогачев Александр Александрович – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, директор Института химии новых материалов. <https://orcid.org/0000-0003-4993-0519>. E-mail: rogachev@ichnm.by

Вклад авторов: Горбачев Дмитрий Леонидович – проведение экспериментов, обработка и анализ экспериментальных данных, установление зависимостей, оформление и редактирование текста рукописи, обсуждение результатов и выводов; Ярмоленко Максим Анатольевич – сбор, анализ экспериментальных и литературных данных, обсуждение результатов и выводов; Рогачев Александр Александрович – анализ литературных и экспериментальных данных, обсуждение результатов и выводов.

Для цитирования: Горбачев, Д. Л. Структурно-морфологические особенности однокомпонентных и композиционных покрытий на основе полиэтилена, осажденных из активной газовой фазы / Д. Л. Горбачев, М. А. Ярмоленко, А. А. Рогачев // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2025. – Т. 70, № 3. – С. 219–229. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-3-219-229>

Поступила в редакцию: 08.08.2025

Утверждена к публикации: 09.09.2025

Подписана в печать: 18.09.2025

Original articleDmitry L. Gorbachev¹, Maxim A. Yarmolenko¹, Alexander A. Rogachev^{2*}¹Francisk Skorina Gomel State University,
104, Sovetskaya St., 246028, Gomel, Republic of Belarus²Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus,
36, F. Skaryna St., 220084, Minsk, Republic of Belarus**STRUCTURAL AND MORPHOLOGICAL FEATURES OF SINGLE-COMPONENT
AND COMPOSITE POLYETHYLENE-BASED COATINGS DEPOSITED
FROM ACTIVE GAS PHASE**

Abstract. Atomic force microscopy and infrared spectroscopy were used to investigate the morphology and molecular structure of nanoscale coatings deposited from volatile products of electron-beam dispersion (EBD) of polyethylene (PE) and its mixture with aluminum chloride, both with and without laser assistance. The coatings were deposited onto silicon substrates modified to vary surface energy. It was found that in the case of single-component PE targets, decreasing surface energy leads to a monotonic reduction in surface roughness and average grain size, as well as an increase in the fractal dimension of structural formations. Coatings obtained from the dispersion products of PE + AlCl₃ mixtures exhibit significantly lower roughness and smaller grain volumes compared to those formed from single-component targets. However, their structural and morphological parameters do not correlate with the substrate's surface energy. Laser stimulation during electron-beam dispersion has a minor effect on the molecular structure of the coatings. Using of these layers due to their antifriction and hydrophobic properties is promising in microelectronics and microfluidics devices.

Keywords: electron-beam dispersion, laser assistance, polyethylene coatings, morphology, atomic force microscopy

Acknowledgements: this work was carried out within the framework of the State Scientific Research Program “Chemical Processes, Reagents and Technologies, Bioregulators and Bioorganic Chemistry” for 2021–2025, subprograms “Forest Chemistry-2” of the complex task 2.4.2.

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Information about the authors: Dmitry L. Gorbachev – Researcher, Research Department at Francisk Skorina Gomel State University. E-mail: gorbachyov@gsu.by; Maxim A. Yarmolenko – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Chief Researcher of the Research Department at Francisk Skorina Gomel State University. E-mail: simmak79@mail.ru; Alexander A. Rogachev – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Director at Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0000-0003-4993-0519>. E-mail: rogachev78@mail.ru

Contribution of the authors: Dmitry L. Gorbachev – conducting of the experiments, processing and analyzing of the experimental data, establishing of dependencies, formatting and editing the text of the manuscript, discussing of the results and conclusions; Maxim A. Yarmolenko – collection, analysis of experimental and literary data, discussion of results and conclusions; Alexander A. Rogachev – literature review and analysis, discussion of results and conclusions.

For citation: Gorbachev D. L., Yarmolenko M. A., Rogachev A. A. Structural and morphological features of single-component and composite polyethylene-based coatings deposited from active gas phase. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-tekhnichnykh navuk* = *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2025, vol. 70, no. 3, pp. 219–229 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-3-219-229>

Received: 15.08.2025

Approved for publication: 09.09.2025

Signed to the press: 18.09.2025

Введение. Разработка методов синтеза, исследования структуры и свойств наноразмерных полимерных покрытий представляет большой интерес в связи с их уникальными характеристиками и широкими возможностями при решении практических задач поверхностного модифицирования различных материалов с целью повышения их адсорбционных, защитных, электрофизических, антифрикционных свойств. Также актуальным является использование полимерных покрытий в качестве активных функциональных элементов различных устройств сенсорики, микроэлектроники, оптоэлектроники, микрофлюидики [1–3].

В настоящее время для осаждения таких покрытий активно разрабатываются и находят эффективное применение методы, в основе которых лежат процессы осаждения из активной газовой фазы с использованием при ее генерации воздействия на полимерсодержащую мишень плазменных, электронно-лучевых, лазерных потоков [3–5]. При этом молекулярная структура, морфология осаждаемых слоев определяются не только условиями и режимами диспергирования, но и особенностями протекания процессов межфазного взаимодействия, поверхностной полимеризации и структурообразования. Данная особенность наиболее активно проявляется при

генерации активной газовой фазы электронно-лучевым диспергированием [5]. Возникающие при этом летучие продукты представляют собой поток нейтральных и возбужденных заряженных молекулярных фрагментов, сохраняющих свою активность как непосредственно в газовой фазе, так и в адсорбированных слоях при воздействии на них первичных и эмитируемых из зоны диспергирования вторичных электронов.

Анализ известных результатов показывает, что осаждение полимерных покрытий из активной газовой фазы следует рассматривать как сложный физико-химический процесс, результатами которого являются изменение относительно материала мишени не только фазовой и надмолекулярной структуры, но и химического состава, а также образование радикалов, двойных связей, сшивок, новых функциональных групп.

В [3, 5] показано, что наиболее однородные по химическому составу, морфологии и молекулярной структуре покрытия осаждаются при реализации адсорбционно-полимеризационного механизма, включающего в качестве основных стадий адсорбцию летучих продуктов диспергирования на поверхности и их вторичную полимеризацию. При диспергировании мишеней сложного состава, содержащих органические [5, 6] или неорганические соединения [7], состав и реакционная активность летучих продуктов значительно изменяется и формирование композиционного слоя протекает в условиях возможного химического взаимодействия адсорбированных частиц. Поэтому такие системы обладают специфическими составом и свойствами, и применение данного метода в сочетании с дополнительным энергетическим воздействием на стадии диспергирования и осаждения покрытия, например лазерного излучения, открывает дополнительные возможности активного управления процессами синтеза.

Следует отметить, что в отличие от хорошо разработанных методов формирования наноразмерных полимерных слоев при осаждении из активной газовой фазы процессы полимеризации адсорбированных молекулярных фрагментов и структурообразования взаимосвязаны, протекают одновременно. Эта особенность обуславливает значительное влияние на морфологию, молекулярную структуру наноразмерных покрытий процессов адсорбции, диффузии молекулярных фрагментов, параметры которых определяются в значительной степени поверхностной энергией материала подложки. Правомочно предположить, что, изменяя адсорбционную активность поверхности подложки, диффузионную подвижность адсорбированных фрагментов при осаждении на подложки с различной поверхностной энергией, можно активно влиять на процессы вторичной полимеризации, образования надмолекулярных структур и, соответственно, свойства покрытий. Однако систематическая информация о механизмах и природе протекающих процессов в таких системах практически отсутствует, а известные представления из-за специфики процессов роста покрытий из активной газовой фазы нуждаются в существенном уточнении.

Основной *целью настоящей работы* стал анализ структурно-морфологических параметров однокомпонентных и содержащих алюминий покрытий полиэтилена, осажженных методом электронно-лучевого диспергирования в условиях лазерного ассистирования и без него; определение влияния поверхностной энергии подложки на морфологию и молекулярную структуру указанных покрытий.

Методика проведения эксперимента. Полимерные покрытия осаждались из активной газовой фазы, генерируемой электронно-лучевым диспергированием (ЭЛД) или ЭЛД с одновременной лазерной стимуляцией процесса (рис. 1). В качестве источника электронов использовался электронно-лучевой испаритель с катодом прямого накала, позволяющий формировать пучки с плотностью тока $I = 50 \div 500 \text{ А/м}^2$, энергией частиц $E = 0,1 \div 2,5 \text{ кэВ}$, площадью пятна $S = (1 \div 5) \text{ см}^2$.

В качестве источника лазерного излучения использовался Nd:YAG-лазер LS-2137U с генератором гармоник HG-5 (LOTIS ТП, Япония), длины волн лазерного излучения были равны $\lambda = 532$ и 266 нм . Длительность импульса накачки в режиме модулированной добротности составляла 6 нс . Энергия лазерного импульса в системе генератор–усилитель в режиме модулированной добротности составляла 350 мДж для $\lambda = 532 \text{ нм}$ и 117 мДж – для $\lambda = 266 \text{ нм}$. Диаметр пятна лазерного излучения был равен 7 мм . Необходимо отметить, что энергии лазерного излучения недостаточно для разрушения полимера.

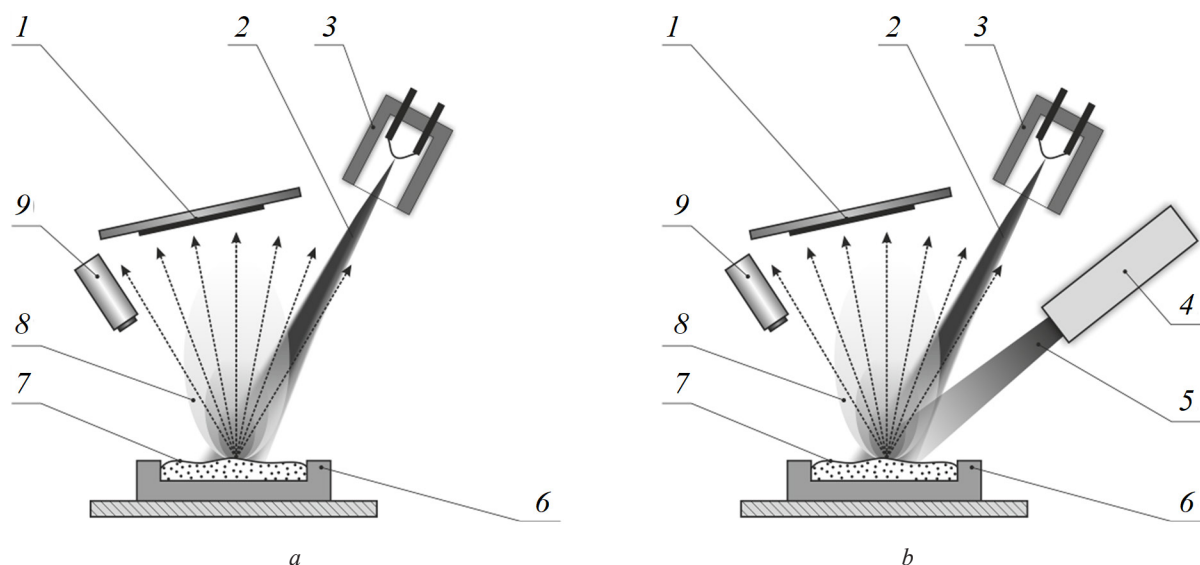


Рис. 1. Схемы нанесения покрытий методами ЭЛД (а) и ЭЛД с лазерным ассистированием (б):
1 – подложка; 2 – электронный луч; 3 – электронно-лучевой испаритель; 4 – лазер; 5 – лазерный луч;
6 – тигель; 7 – исходный полимер; 8 – газовая фаза; 9 – кварцевый измеритель толщины
Fig. 1. Schematics of coating deposition by electron-beam dispersion (EBD) (a) and EBD with laser
assistance (EBD + laser) (b): 1 – substrate; 2 – electron beam; 3 – electron-beam evaporator; 4 – laser;
5 – laser beam; 6 – crucible; 7 – initial polymer; 8 – gas phase; 9 – quartz thickness monitor

Диспергированию подвергался порошок полиэтилена высокого давления (ПЭ, марка 16803-070), а также механические смеси порошка полиэтилена с соединениями металлов (хлоридом алюминия (AlCl_3), формиатом меди, карбонилем молибдена и карбонилем железа). Композиционные мишени готовили тщательным перемешиванием исходных порошков в вибромельнице в течение 5 мин. Покрытия осаждали на чистые, обезжиренные растворителем пластины из монокристаллического кремния КДБ 100; кремниевые пластины, обработанные с помощью торцевого холловского ускорителя потоком ионов (время обработки – 10 мин, рабочий газ – аргон (Ar^+), ток ионного пучка – 1А), а также кремниевые пластины с нанесенным тонким слоем политетрафторэтилена (ПТФЭ) толщиной 0,1 мкм. Обработка осуществлялась с целью изменения поверхностной энергии (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Поверхностная энергия кремния
Table 1. Surface energy of silicon

Составляющая поверхностной энергии, мДж/м ² The component of surface energy, mJ/m ²	Вид обработки Type of processing		
	обработка растворителем solvent treatment	обработка N ⁺ processing N ⁺	с покрытием политетрафторэтиленом coated with polytetrafluoroethylene
Дисперсионная Dispersive	19,9	27,6	1,5
Полярная Polar	43,6	67,6	–
Полная энергия Full energy	63,5	95,2	1,5

Изучение поверхностной морфологии покрытий проводилось методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) в режимах измерения топографии и фазового контраста с помощью прибора Solver P47 PRO (NT-MDT, Россия). Анализ данных, полученных в ходе проведения АСМ-исследований поверхности покрытий, осуществлялся с помощью модульной программы анализа данных СЗМ Gwyddion¹.

¹ Klapetek P., Nečas D., Anderson C. Руководство пользователя Gwyddion / пер. с англ. Д. Браташова. URL: <https://gwyddion.net/download/user-guide/gwyddion-user-guide-ru.pdf>

Молекулярная структура осаждаемых покрытий исследовалась методом ИК-спектроскопии на ИК-Фурье спектрометре VERTEX-70 (Bruker Optik GmbH, Германия) с применением стандартной приставки многократного нарушенного полного внутреннего отражения (МНПВО). Кристалличность полимерных слоев оценивали по соотношению значений оптических плотностей полос при 1470 и 1465 см^{-1} (деформационные колебания $-\text{CH}_2-$ групп), разветвленность по полосе при 1378 см^{-1} (деформационные колебания $\text{C}-\text{CH}_3$), ненасыщенность по полосам поглощения транс-виниленовых (965 см^{-1}), винильных (908 см^{-1}) и винилиденовых (889 см^{-1}) групп [8].

Результаты и их обсуждение. При нанесении покрытий на основе полимера установлено, что лазерное ассистирующее воздействие не приводит к заметному изменению скорости осаждения, что может быть обусловлено доминирующим влиянием на процессы генерации летучих продуктов ЭЛД. При диспергировании механической смеси порошков полиэтилена (ПЭ) и хлорида алюминия вследствие экранирования поверхности мишени скорость осаждения значительно снижается – почти в 7 раз.

Методами АСМ, ИК-спектроскопии определены морфологические особенности покрытий, их молекулярная структура при различных условиях осаждения. Так, установлены заметные изменения геометрических параметров поверхности покрытий ПЭ, сформированных без лазерного ассистирования и с его применением на поверхностях, отличающихся адсорбционной активностью (рис. 2).

Анализ результатов статистической обработки полученных изображений, представленных в табл. 2, показывает, что при снижении поверхностной энергии имеет место монотонное изменение параметров морфологии осажденных покрытий: заметно снижаются среднее значение по Z , шероховатость (R_a), средний размер зерна, повышается фрактальная размерность структурных образований. При этом наиболее заметные изменения регистрируются при осаждении покрытий в условиях лазерного ассистирования.

Данная корреляция нарушается при диспергировании составной мишени ПЭ + AlCl_3 (табл. 3), что может быть обусловлено изменением химической активности летучих продуктов, их молекулярной структуры. Покрытия, осажденные из продуктов диспергирования ПЭ + AlCl_3 , характеризуются значительно меньшей шероховатостью, меньшим объемом зерна при таком же, как и при диспергировании однокомпонентной мишени, среднем их латеральном размере. Данные морфологические особенности проявляются в большей степени при диспергировании в условиях лазерного ассистирования.

При этом, как показали результаты ИК-спектроскопических исследований (рис. 3), воздействие лазерного излучения не оказывает заметного влияния на степень разветвленности формируемого полимерного слоя. Кристалличность полимера определяется наличием короткоцепной или длинноцепной разветвленности, препятствующей упорядоченному складыванию цепей в процессе структурирования.

Поэтому отсутствие влияния лазерного излучения на степень разветвленности осаждаемого покрытия должно найти свое отражение в отсутствии видимых изменений в значениях кристалличности полимерных слоев, сформированных как с лазерным ассистированием, так и в его отсутствие. Однако во всех случаях формирования покрытий полиэтилена, как с использованием хлористого алюминия, так и без его использования, лазерное ассистирующее влияние сказывается на увеличении степени кристалличности полимерного слоя. Подобное наблюдаемое явление, по-видимому, может быть связано с влиянием лазерного ассистирующего воздействия на молекулярную массу продуктов диспергирования, формирующих полимерный слой. Значение молекулярной массы продуктов диспергирования определяет подвижность углеводородных фрагментов, осаждающихся на подложке, а соответственно, и морфологию полимерного слоя.

Следует отметить, что молекулярную массу слоев полиэтилена, сформированных из активной газовой фазы, прямыми способами определить методически достаточно сложно. На основании результатов работ [9, 10] можно заключить, что с увеличением температуры диспергирования при лазерном ассистировании наблюдается уменьшение молекулярной массы летучих фрагментов, а также изменяется их молекулярная структура, особенно выход насыщенных и ненасыщенных углеводородов. Из данных, представленных в табл. 3, следует, что при лазерном

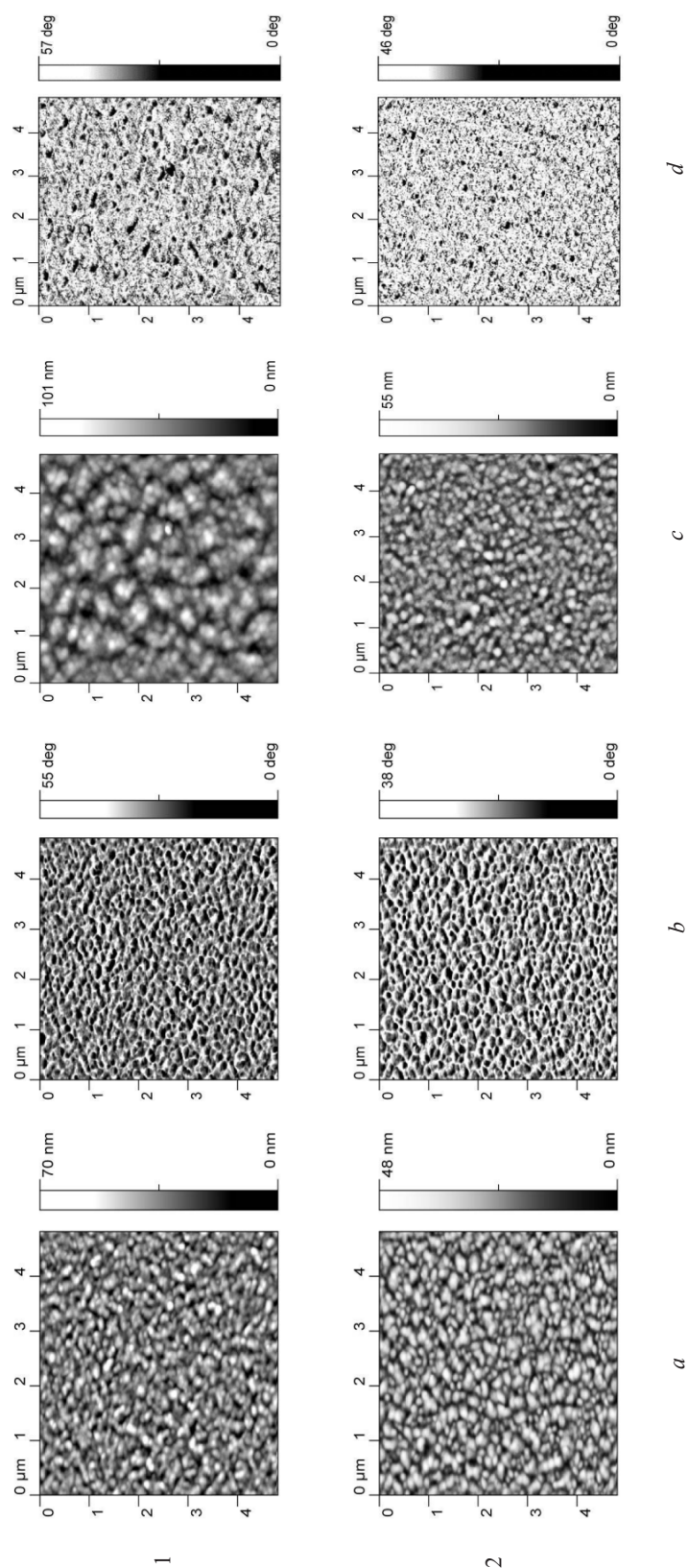


Рис. 2. Морфология покрытий ПЭ, сформированных ЭЛД (1) и сформированных ЭЛД в условиях лазерного ассистирования (2) на поверхности кремния, обработанной потоком ионов (a, b) и с подслоем ПТФЭ (c, d); a, c – топография поверхности; b, d – фазовый контраст

Fig. 2. Morphology of PE coatings formed by EBD (1) and by EBD with laser assistance (2) on silicon surfaces treated with an ion beam (a, b) and with a PTFE sublayer (c, d); a, c – surface topography; b, d – phase contrast

Т а б л и ц а 2. Статистические морфологические параметры покрытий ПЭ
T a b l e 2. Statistical morphological parameters of PE coatings

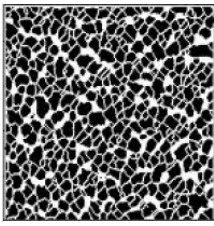
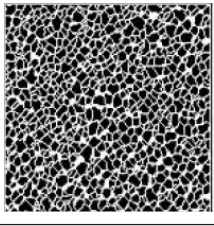
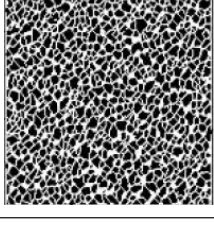
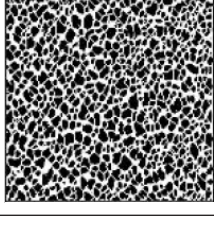
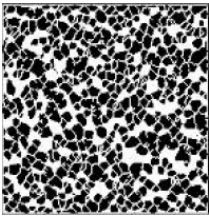
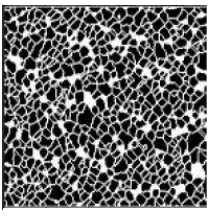
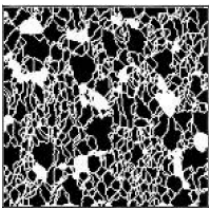
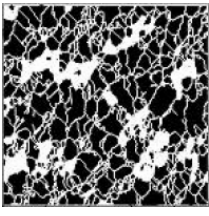
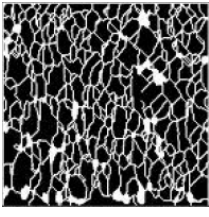
Статистическая величина Statistical value	ЭЛД + лазер EBD + laser				ЭЛД EBD	
	чистый кремний pure silicon	обработка N ⁺ processing N ⁺	подслой ПТФЭ PTFE sublayer	чистый кремний pure silicon	обработка N ⁺ processing N ⁺	подслой ПТФЭ PTFE sublayer
Среднее значение по Z, нм The average value of Z, nm	37,0	44,0	20,80	28,3	33,61	23,08
Шероховатость R _a , нм Roughness R _a , nm	7,75	11,3	4,63	7,03	7,1	5,91
Средний размер зерна, нм Average grain size, nm	143	144	109	112	106	112
Общий объем зерна, мкм ³ Total grain volume, μm ³	0,18	0,24	0,11	0,13	0,14	0,10
Фрактальная размерность Fractal dimension	2,4	2,37	2,43	2,5	2,48	2,52
Изображение маркировки зерен на поверхности 5×5 мкм Image of grain markings on the surface 5×5 μm						

Таблица 3. Статистические морфологические параметры покрытий $\text{PE} + \text{AlCl}_3$
Table 3. Statistical morphological parameters of $\text{PE} + \text{AlCl}_3$ coatings

Статистическая величина Statistical value	ЭЛД + лазер EBD + laser				ЭЛД EBD	
	чистый кремний pure silicon	обработка N^+ processing N^+	подслой ПТФЭ PTFE sublayer	чистый кремний pure silicon	обработка N^+ processing N^+	подслой ПТФЭ PTFE sublayer
Среднее значение по Z , нм The average value of Z , nm	6,95	11,24	10,48	6,98	12,35	9,64
Шероховатость R_a , нм Roughness R_a , nm	122	125	110	87	99	159
Средний размер зерна, нм Average grain size, nm	1,84	2,35	2,31	2,00	2,98	1,54
Общий объем зерна, мкм^3 Total grain volume, μm^3	0,031	0,055	0,041	0,043	0,057	0,044
Фрактальная размерность Fractal dimension	2,44	2,39	2,42	2,26	2,25	2,28
Изображение маркировки зерен на поверхности 5×5 мкм Image of grain markings on the surface 5×5 μm						

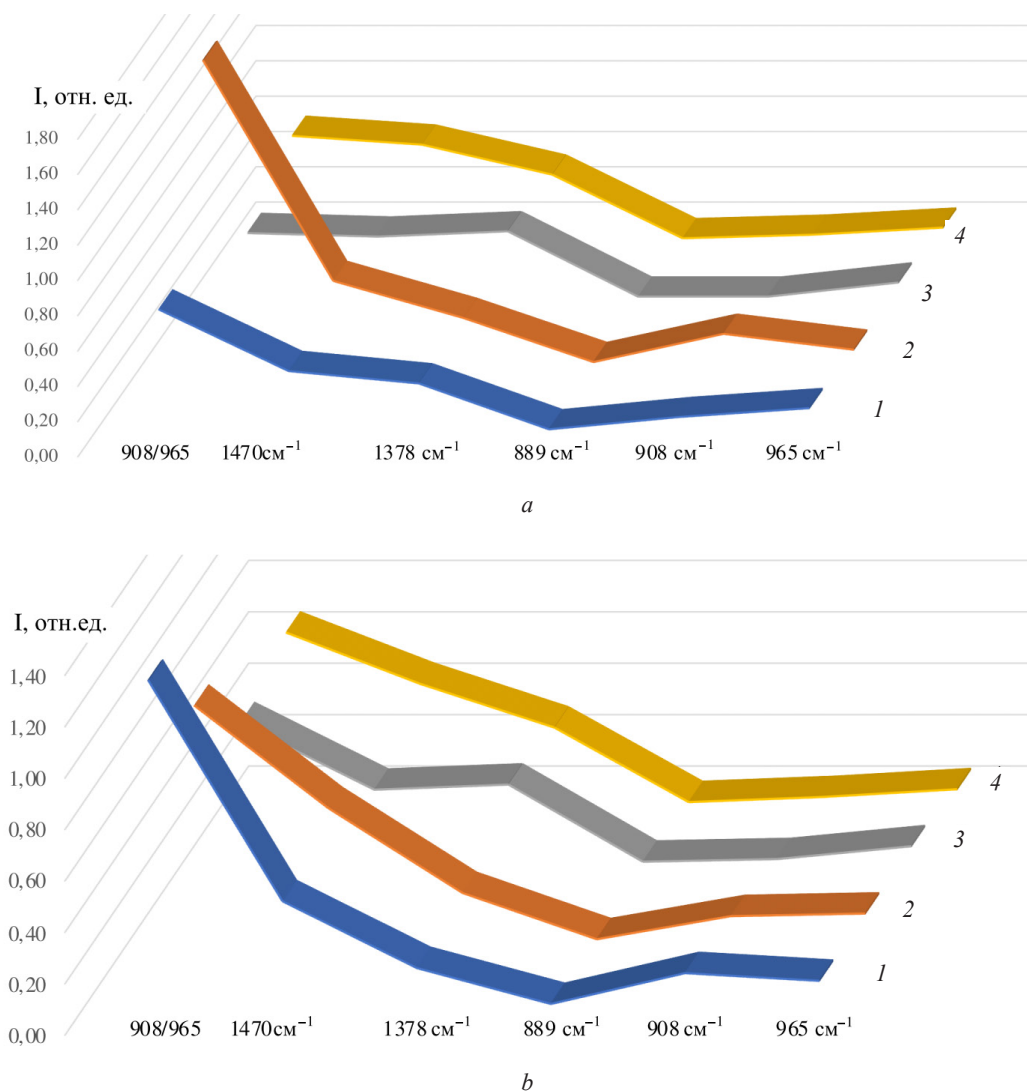


Рис. 3. Относительные оптические плотности полос ИК-спектра покрытий ПЭ (полоса внутреннего стандарта 1465 см^{-1}) на обработанном растворителем кремнии (а), на подслое ПТФЭ (b); кривая 1 – ПЭ, кривая 2 – ПЭ + лазер, кривая 3 – ПЭ + AlCl_3 , кривая 4 – ПЭ + AlCl_3 + лазер
 Fig. 3. Relative optical densities of bands of the IR spectrum of PE coatings (band of the internal standard 1465 cm^{-1}) on solvent-treated silicon (a), on the PTFE sublayer (b); curve 1 – PE, curve 2 – PE + laser, curve 3 – PE + AlCl_3 , curve 4 – PE + AlCl_3 + laser

ассистировании значительно возрастает содержание винильных (908 см^{-1}) групп в сравнении с транс-виниленовыми (965 см^{-1}), что подтверждает заключение о снижении молекулярной массы фрагментов.

Введенный в состав мишени хлористый алюминий инициирует образование карбокатионов, влияя на механизм роста полимерного слоя, формируемого из активной газовой фазы [11]. При этом влияние хлористого алюминия проявляется не только в инициировании образования разветвленных структур, но и в заметном снижении молекулярной массы [12]. Как следствие этого регистрируется более высокая степень кристалличности покрытий, сформированных с использованием хлористого алюминия, в условиях лазерного ассистирования, в сравнении с покрытиями, сформированными в результате электронно-лучевого диспергирования полиэтилена с лазерным ассистирующим воздействием (см. рис. 2).

Полученные данные о влиянии природы материала подложки на процессы роста покрытия, его молекулярную структуру в полной мере согласуются с представлениями адсорбционно-полимеризационного механизма, включающего в качестве основных стадий адсорбцию летучих продуктов диспергирования на поверхности и их вторичную полимеризацию.

Регистрируемые морфологические параметры покрытий определяются в значительной степени плотностью образующихся на поверхности на начальной стадии осаждения центров вторичной полимеризации, рост которых осуществляется в результате присоединения адсорбированных молекулярных фрагментов. При осаждении на поверхность с низкой энергией реализуется высокая диффузионная подвижность молекулярных фрагментов, и, что особенно важно, из-за относительно более низкого адсорбционного взаимодействия активных фрагментов с поверхностью сохраняется их реакционная активность, что приводит к повышению плотности центров полимеризации.

При осаждении на подложку с высокой поверхностной энергией снижение плотности центров полимеризации определяет формирование более плоских структур с большей шероховатостью. Морфология покрытий ПЭВД + AlCl_3 сильно зависит от типа подложки. Снимки фазового контраста позволяют сделать вывод о том, что покрытия формируются из плоских тонких образований. При диспергировании смеси ПЭ + AlCl_3 изменяется реакционная активность адсорбированных молекулярных фрагментов на процессы адсорбции, что сказывается на процессах диффузии и последующего присоединения их к полимерным частицам. При этом монотонные зависимости параметров морфологии от поверхностной энергии материала подложки не регистрируются. Изменение соотношения ненасыщенных связей имеет сложный характер, оно связано не только с особенностями диспергирования, но и с процессами внутримолекулярной сшивки.

Заключение. Определены морфология и молекулярная структура наноразмерных покрытий, осажденных из летучих продуктов ЭЛД полиэтилена и его смеси с хлоридом алюминия на подложки кремния, модифицированные с целью изменения поверхностной энергии. При диспергировании однокомпонентной мишени ПЭ снижение поверхностной энергии сопровождается монотонным уменьшением шероховатости, среднего размера зерна, повышением фрактальной размерности структурных образований. Данная корреляция более выражена при проведении лазерной стимуляции ЭЛЛ, что объясняется ее влиянием на молекулярную массу летучих продуктов диспергирования, формирующих полимерный слой.

При диспергировании составной мишени ПЭ + AlCl_3 влияние поверхностной энергии подложки не является однозначным, что обусловлено доминирующим влиянием на процессы диффузии и полимеризации химической активности летучих продуктов. Покрытия, осажденные из продуктов диспергирования ПЭ + AlCl_3 , характеризуются значительно меньшей шероховатостью, меньшим объемом зерна в сравнении с покрытиями, осажденными при диспергировании однокомпонентной мишени. Данные морфологические особенности проявляются в большей степени при диспергировании в условиях лазерного ассистирования.

Полученные результаты в полной мере согласуются с предложенным ранее в работе [3] адсорбционно-полимеризационным механизмом осаждения полимерных слоев из активной газовой фазы.

Список использованных источников

1. Кутепов, А. М. Вакуумно-плазменное и плазменно-растворное модифицирование полимерных материалов / А. М. Кутепов, А. Г. Захаров, А. И. Максимов; отв. ред. А. Ю. Цивадзе. – М.: Наука, 2004. – 496 с.
2. Gritsenko, K. P. Thin-film deposition of polymers by vacuum degradation / K. P. Gritsenko, A. M. Krasovsky // *Chemical Reviews*. – 2003. – Vol. 103, №. 9. – P. 3607–3650. <https://doi.org/10.1021/cr010449q>
3. Микро- и нанокомпозиционные полимерные покрытия, осаждаемые из активной газовой фазы / М. А. Ярмоленко, А. А. Рогачев, П. А. Лучников [и др.]; под ред. А. В. Рогачева. – М.: Радиотехника, 2016. – 424 с.
4. Herman, I. P. Laser-assisted deposition of thin films from gas-phase and surface-adsorbed molecules / I. P. Herman // *Chemical Reviews*. – 1989. – Vol. 89, №. 6. – P. 1323–1357.
5. Рогачев, А. А. Физико-химия полимерных покрытий, осаждаемых из активной газовой фазы / А. А. Рогачев. – М.: Научный мир, 2014. – 287 с.
6. Features of electron beam deposition of polymer coatings with the prolonged release of the drug component / Beibei Li, Yiming Liu, A. V. Rogachev [et al.] // *Materials Science and Engineering: C*. – 2020. – Vol. 110. – P. 110730–110742. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.110730>
7. Molecular structure, optical, electrical and sensing properties of PANI-based coatings with silver nanoparticles deposited from the active gas phase / A. A. Rogachev, M. A. Yarmolenko, Jiang Xiaohong [et al.] // *Applied Surface Science*. – 2015. – Vol. 351. – P. 811–818. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.06.008>

8. Pretsch, E. *Structure Determination of Organic Compounds: Tables of Spectral Data* / E. Pretsch, P. Bühlmann, C. Afolter. – 3rd ed. – Berlin: Springer, 2000. – XV, 421 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04201-4>
9. Beyler, C. L. Thermal decomposition of polymers / C. L. Beyler, M. M. Hirschler // *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* / ed. P. J. DiNenno [et al.]. – 3rd ed. – National Fire Protection Association, Society of Fire Protection Engineers, 2002. – P. 1-110–1-131.
10. Брук, М. А. Полимеризация на поверхности твердых тел / М. А. Брук, С. А. Павлов. – М.: Химия, 1990. – 184 с.
11. Liu, Z. Electron-Beam Deposition of Polyethylene Composite Coatings at Various Initiators and Inhibitors Polymer / Z. Liu, A. V. Rogachev, B. Zhou [et al.] // *Polymer Engineering and Science*. – 2012. – Vol. 52, iss. 10. – P. 2134–2139. <https://doi.org/10.1002/pen.23167>
12. *Handbook of Industrial Polyethylene and Technology: Definitive Guide to Manufacturing, Properties, Processing, Applications and Markets Set* / eds.: M. A. Spalding, A. Chatterjee. – John Wiley & Sons, 2017. – 1382 p. <http://doi.org/10.1002/9781119159797>

References

1. Kutepov A. M., Zakharov A. G., Maksimov A. I. *Vacuum-Plasma and Plasma-Solution Modification of Polymeric Materials*. Moscow, Nauka Publ., 2004. 496 p. (in Russian).
2. Gritsenko K. P., Krasovsky A. M. Thin-film deposition of polymers by vacuum degradation. *Chemical Reviews*, 2003, vol. 103, no. 9, pp. 3607–3650. <https://doi.org/10.1021/cr010449q>
3. Yarmolenko M. A., Rogachev A. A., Luchnikov P. A., Rogachev A. V., Khun D. S. *Micro- and Nanocomposite Polymeric Coatings Deposited from the Active Gas Phase*. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2016. 424 p. (in Russian).
4. Herman I. P. Laser-assisted deposition of thin films from gas-phase and surface-adsorbed molecules. *Chemical Reviews*, 1989, vol. 89, no. 6, pp. 1323–1357.
5. Rogachev A. A. *Physicochemistry of Polymeric Coatings Deposited from the Active Gas Phase*. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2014. 287 p. (in Russian).
6. Li B., Liu Y., Rogachev A. V., Rogachev A. A., Jiang X., Yarmolenko M. A., Yarmolenko V. A. Features of electron beam deposition of polymer coatings with the prolonged release of the drug component. *Materials Science and Engineering: C*, 2020, vol. 110, art. ID 110730. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.110730>
7. Ragachev A. A., Yarmolenko M. A., Xiaohong Jiang, Shen Ruiqi, Luchnikov P. A., Rogachev A. V. Molecular structure, optical, electrical and sensing properties of PANI-based coatings with silver nanoparticles deposited from the active gas phase. *Applied Surface Science*, 2015, vol. 351, pp. 811–818. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.06.008>
8. Pretsch E., Bühlmann P., Afolter C. *Structure Determination of Organic Compounds: Tables of Spectral Data*. 3rd ed. Berlin, Springer, 2000. XV, 421 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04201-4>
9. Beyler C. L., Hirschler M. M. Thermal decomposition of polymers. DiNenno P. J. (ed.). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 3rd ed. National Fire Protection Association, Society of Fire Protection Engineers, 2002, pp. 1-110–1-131.
10. Брук М. А., Павлов С. А. *Polymerization on the Surface of Solids*. Moscow, Khimiya Publ., 1990. 184 p. (in Russian).
11. Liu Z., Rogachev A. V., Zhou B., Yarmolenko M. A., Rogachev A. A., Gorbachev D. L., Jiang X. Electron-beam deposition of polyethylene composite coatings at various initiators and inhibitors polymer. *Polymer Engineering and Science*, 2012, vol. 52, iss. 10, pp. 2134–2139. <https://doi.org/10.1002/pen.23167>
12. Spalding M. A., Chatterjee A. (eds.). *Handbook of Industrial Polyethylene and Technology: Definitive Guide to Manufacturing, Properties, Processing, Applications and Markets Set*. John Wiley & Sons, 2017. 1382 p. <http://doi.org/10.1002/9781119159797>