

## ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО АССИСТИРОВАНИЯ НА ПРОЦЕССЫ ГЕНЕРАЦИИ ЛЕТУЧИХ ПРОДУКТОВ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МИШЕНЕЙ НА ОСНОВЕ ПЭ И ИХ РЕАКЦИОННУЮ АКТИВНОСТЬ

М.А. Ярмоленко<sup>1</sup>, А.В. Рогачев<sup>1</sup>, А.С. Руденков<sup>1</sup>,  
В.А. Емельянов<sup>2</sup>, С.А. Фролов<sup>1</sup>, А.М. Михалко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины  
<sup>2</sup>ОАО «Интеграл», Минск

## INFLUENCE OF LASER ASSISTANCE ON THE PROCESSES OF VOLATILE PRODUCTS DISPERSION GENERATION OF COMPOSITE TARGETS BASED ON POLYETHYLENE AND THEIR REACTIVITY

M.A. Yarmolenko<sup>1</sup>, A.V. Rogachev<sup>1</sup>, A.S. Rudenkov<sup>1</sup>,  
V.A. Emelyanov<sup>2</sup>, S.A. Frolov<sup>1</sup>, A.M. Mikhalko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Francisk Skorina Gomel State University  
<sup>2</sup>JSC "INTEGRAL", Minsk

**Аннотация.** Определены закономерности влияния лазерного УФ излучения на процессы генерации, реакционную активность летучих продуктов электронно-лучевого диспергирования полиэтилена при введении в состав мишени наночастиц оксида цинка, меди. Показано, что при лазерном ассистирующем воздействии на композиционные мишени снижаются скорость роста покрытия, давление в вакуумной камере, возрастает реакционная активность генерируемых летучих фрагментов. При этом структура макромолекул покрытий характеризуется более низким содержанием транс-виниленовых связей, а их морфология – меньшей дисперсностью структурных образований, и, в случае диспергирования мишеней на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена, более высокой дефектностью.

**Ключевые слова:** электронно-лучевое диспергирование, лазерное ассистирование, полиэтилен, молекулярная структура, оксид цинка, медь.

**Для цитирования:** Влияние лазерного ассистирования на процессы генерации летучих продуктов диспергирования композиционных мишеней на основе ПЭ и их реакционную активность / М.А. Ярмоленко, А.В. Рогачев, А.С. Руденков, В.А. Емельянов, С.А. Фролов, А.М. Михалко // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 4 (53). – С. 64–72. – DOI: [https://doi.org/10.54341/20778708\\_2022\\_4\\_53\\_64](https://doi.org/10.54341/20778708_2022_4_53_64). – EDN: QVDUKL

**Abstract.** The regularities of the laser UV radiation influence on the generation processes and the reactivity of volatile products of electron-beam dispersion of polyethylene, when zinc oxide and copper nanoparticles are introduced into the target, are determined. Under laser assisting action, the coating growth rate and the pressure in the vacuum chamber decrease, while the reactive activity of the generated volatile fragments increases. The coatings are characterized by a lower content of trans-vinylene bonds, the morphology – by less dispersion of structural formations. The coatings based on polyethylene of ultra-high molecular weight are characterized by higher defectiveness.

**Keywords:** electron beam dispersion, laser assistance, polyethylene, molecular structure, zinc oxide, copper.

**For citation:** Influence of laser assistance on the processes of volatile products dispersion generation of composite targets based on polyethylene and their reactivity / M.A. Yarmolenko, A.V. Rogachev, A.S. Rudenkov, V.A. Emelyanov, S.A. Frolov, A.M. Mikhalko // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2022. – № 4 (53). – P. 64–72. – DOI: [https://doi.org/10.54341/20778708\\_2022\\_4\\_53\\_64](https://doi.org/10.54341/20778708_2022_4_53_64) (in Russian). – EDN: QVDUKL

### Введение

Реализация высокой скорости осаждения нано- и микроразмерных покрытий из активной газовой фазы, генерируемой электронно-лучевым воздействием на полимерную мишень, возможна только при генерации летучих молекулярных фрагментов с высокой реакционной активностью. Определение условий и режимов генерации активных продуктов электронно-лучевого разрушения высокомолекулярных соединений представляет научный и практический интерес [1], [2].

В числе наиболее эффективных технологических приемов активного воздействия на процесс генерации летучих продуктов электронно-лучевого диспергирования является введение в состав полимерной мишени низкомолекулярных соединений, оказывающих каталитическое влияние на процессы деструкции макромолекул, лазерное ассистирование процесса диспергирования, создание плазменного разряда в генерируемых летучих продуктах деструкции мишени [3]. В [4] аргументирована высокая перспективность обработки коротковолновым лазерным излучением полимерной мишени, диспергируемой

потоком низкоэнергетических электронов. Под действием лазерного излучения возможна реализация фотоиницируемой электронной эмиссии, а также процессов фотохимической и фототермической активации, генерируемых летучих продуктов диспергирования. Дополнительная электронная эмиссия, имеющая место при обработке поверхности полимерной мишени электромагнитным излучением, снижает плотность адсорбированных мишенью электронов. Это снижает напряженность возникающего тормозящего электрического поля и, соответственно, повышает энергию электронов, действующих на мишень при ее диспергировании. Природа и кинетика процессов, протекающих при комплексном воздействии на мишень лазерного излучения и потока низкоэнергетических электронов, в значительной степени зависит от состава мишени [4]. Установление оптимального состава материала мишени с целью повышения реакционной активности генерируемых летучих продуктов диспергирования, реализация высоких скоростей осаждения покрытий с заданной молекулярной структурой и свойствами является важной практической задачей.

Целью настоящей работы является установление закономерностей влияния лазерного УФ излучения на процессы генерации летучих продуктов электронно-лучевого диспергирования полиэтилена при введении в состав мишени наночастиц оксида цинка, меди, определение влияния состава мишени на реакционную активность газовой фазы, молекулярную структуру и морфологию осаждаемых покрытий.

### 1 Методика эксперимента

Электронно-лучевое диспергирование полимерных мишеней в условиях лазерного ассистирования воздействия проводили по методике, представленной в [5]. Генерация летучих продуктов диспергирования осуществлялась при обработке мишени потоком электронов с энергией 800 – 1600 эВ и плотностью 0,01 – 0,03 А/см<sup>2</sup>. Процесс производился при начальном давлении остаточных газов в вакуумной камере не более  $4 \cdot 10^{-3}$  Па.

Одновременно с потоком электронов мишень подвергалась воздействию наносекундного лазерного излучения с  $\lambda = 266$  нм. В качестве источника излучения был выбран лазер L-2137U+HG-5. Длительность импульса накачки в режиме модулированной добротности составляла 6 нс. Энергия лазерного импульса в системе генератор-усилитель в режиме модулированной добротности – 117 мДж. Диаметр пятна лазерного излучения – 7 мм. При осаждении покрытий в условиях лазерного ассистирования воздействия использовали мишени, площадь которых соответствовала площади пятна лазерного излучения. Выбор значения длины волны был произведен с целью возможного инициирования фотохимических реакций при воздействии на составную ми-

шень. При этом воздействие на мишень в вакууме лазерного излучения не вызывало образования летучих продуктов диспергирования.

Диспергированию подвергались мишени, представляющие механические смеси порошков высокомолекулярных соединений (полиэтилен (ПЭ) (марка 16803 – 070), сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) (CESTILENE HD 1000, Quadrant EPP;  $5 \cdot 10^6$  г/моль)) с наночастицами оксида цинка (ZnO,  $(30 \pm 10)$  нм (Aladdin Chemistry Co. Ltd)) или частицами меди (14 – 25 мкм, 99%; Aldrich). Массовое соотношение компонентов в смеси ПЭ + ZnO и СВМПЭ + ZnO изменялось в пределах от 1:0 до 1:1. Выбор ZnO в качестве наполнителя обусловлен тем, что энергия выхода электрона из таких частиц близка к энергии фотона лазерного излучения, что определяет возможность электронной эмиссии, которая снижает зарядку поверхностного слоя. Присутствие меди в поверхностном слое мишени повышает его электрическую проводимость, что также препятствует значительной зарядке полимерной мишени под действием потока электронов. Сравнительному анализу в работе подвергались покрытия с одинаковым значением эффективной толщины (в перерасчете по плотности исходного высокомолекулярного соединения толщина составляла 1 мкм).

Подложками при осаждении слоев служили пластины NaCl и пленки металлизированного лавсана (при регистрации ИК-спектров), пластины монокристалла кремния (при проведении микроскопических исследований).

Исследование морфологии покрытий осуществляли с использованием сканирующего зондового микроскопа Solver P47 PRO. В качестве зондов использовали кремниевые кантилеверы серии NSG11S с типичной силовой константой 5,5 Н/м и резонансной частотой 220 кГц.

ИК-спектроскопические исследования проводили с помощью ИК-Фурье спектрофотометра Vertex-70 (Bruker) и стандартной приставки на пропускание и приставки МНПВО (многократное нарушенное полное внутреннее отражение). В качестве отражающей призмы применяли кристалл KRS-5 (угол при основании – 45°). В случае проведения ИК МНПВО исследований порошков, вещество непосредственно насыпали на поверхность кристалла и прижимали резиновой прокладкой, имеющей со стороны кристалла отражающий алюминиевый слой. Для покрытий на основе полиэтилена в качестве внутреннего стандарта использовали полосу поглощения при  $1465 \text{ см}^{-1}$  ( $\delta(\text{CH}_2)$ ) [6]. Для снижения влияния ориентационных процессов на определение упорядоченности сформированного полимерного слоя данный параметр оценивали по значению соотношения оптических плотностей полос поглощения при  $1470$  и  $1465 \text{ см}^{-1}$  [7].

Реакционную способность продуктов диспергирования оценивали по значению отношения  $R = V_p / P_n$ , где  $V_p$  – скорость осаждения;  $P_n$  – давление в вакуумной камере при диспергировании.

## 2 Результаты и их обсуждение

Установлено, что введение в состав мишеней из ПЭ наночастиц ZnO оказывает неоднозначное влияние на параметры процесса генерации летучих продуктов (давление в камере, скорость роста осажденных слоев) (рисунок 2.1).

При диспергировании композиционных мишеней с высоким массовым содержанием оксида цинка (ПЭ : ZnO – 1:1, 3:1) на ее поверхности

регистрируется образование черного карбонизированного слоя. Длительное воздействие потока электронов на образующийся карбонизированный слой приводит к снижению содержания в нем полимера, сопровождается его красным свечением, указывающим на высокую температуру в зоне воздействия. Экранирующее действие наночастиц ZnO является причиной резкого снижения скорости роста покрытия. При соотношении компонентов 1:1 – фиксируется рост давления в вакуумной камере (таблица 2.1), что свидетельствует о генерации более низкомолекулярных летучих продуктов диспергирования, характеризующихся низкой реакционной активностью.

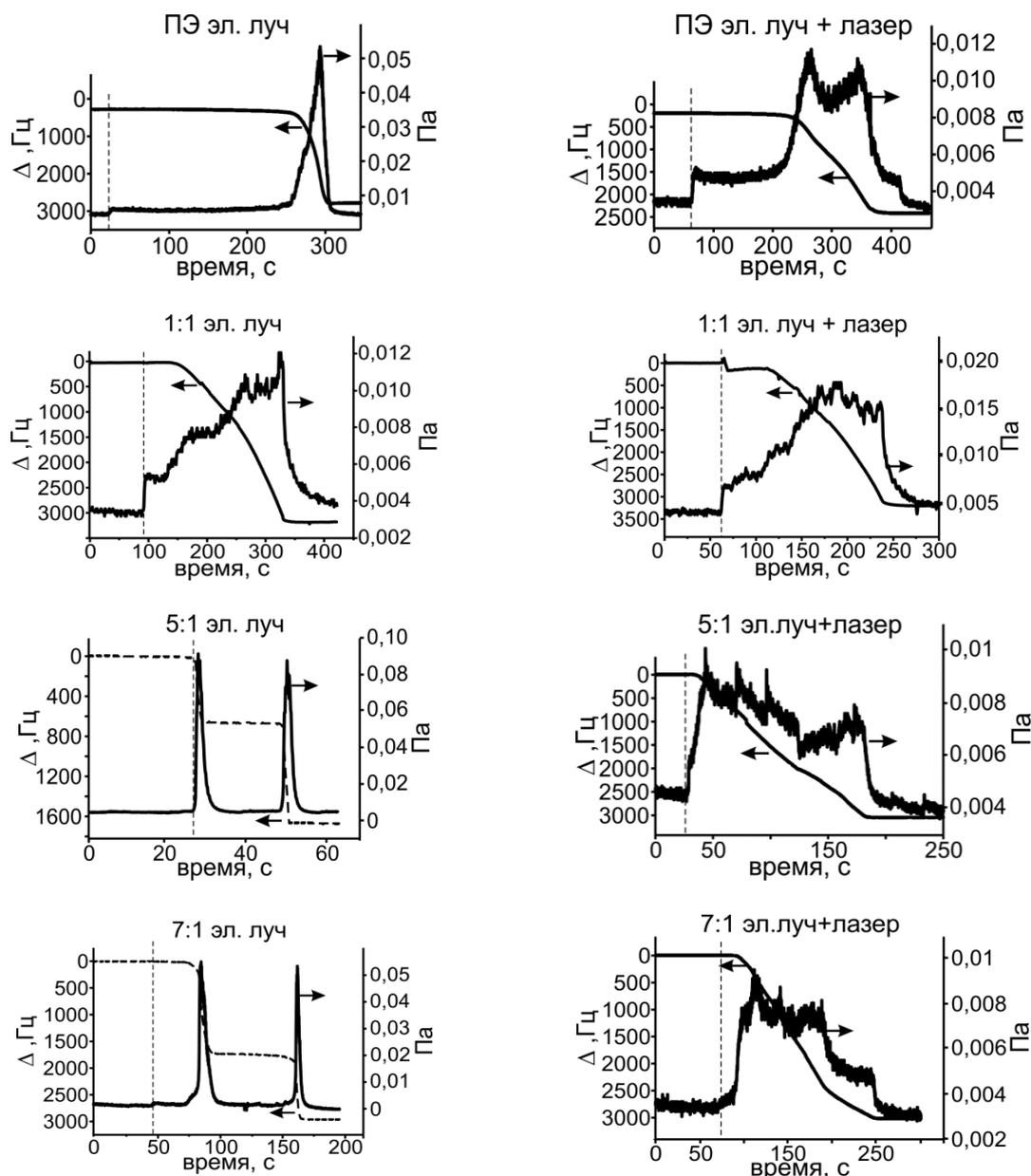


Рисунок 2.1 – Кинетические зависимости параметров процесса электронно-лучевого диспергирования композиционных мишеней в условиях лазерного ассилирующего воздействия ( $\lambda = 266$  нм) и в условиях его отсутствия (пунктирной линией отмечено начало включения системы диспергирования)

Таблица 2.1 – Кинетические параметры электронно-лучевого диспергирования

Вид покрытия	Параметры нанесения		
	$V_p$ , Гц/с	$P_n$ , Па	$R=V_p/P_n$
ПЭ / СВМПЭ	60,1 / 169	0,052 / 0,029	1154 / 5827
ПЭ* / СВМПЭ*	<b>14,0 / 113</b>	<b>0,010 / 0,026</b>	<b>1400 / 4346</b>
ПЭ+ZnO (1:1) / СВМПЭ+ZnO (1:1)	17,0 / 57,5	0,091 / 0,044	187 / 1307
ПЭ+ZnO (1:1)* / СВМПЭ+ZnO (1:1)*	<b>24,2 / 48</b>	<b>0,015 / 0,057</b>	<b>1613 / 842</b>
ПЭ+ZnO (3:1) / СВМПЭ+ZnO (3:1)	19,2 / 31,5	0,010 / 0,025	1920 / 1260
ПЭ+ZnO (3:1)* / СВМПЭ+ZnO (3:1)*	<b>15,1 / 94,2</b>	<b>0,007 / 0,027</b>	<b>2157 / 3488</b>
ПЭ+ZnO (5:1) / СВМПЭ+ZnO (5:1)	449 / 71,3	0,084 / 0,033	5345 / 2160
ПЭ+ZnO (5:1)* / СВМПЭ+ZnO (5:1)*	<b>19,2 / 127</b>	<b>0,008 / 0,034</b>	<b>2400 / 3735</b>
ПЭ+ZnO (7:1) / СВМПЭ+ZnO (7:1)	111,0 / 106	0,054 / 0,043	2055 / 2465
ПЭ+ZnO (7:1)* / СВМПЭ+ZnO (7:1)*	<b>20,4 / 142</b>	<b>0,007 / 0,036</b>	<b>2914 / 3944</b>
ПЭ+ZnO (9:1) / СВМПЭ+ZnO (9:1)	201 / 145	0,031 / 0,040	6483 / 3850
ПЭ+ZnO (9:1)* / СВМПЭ+ZnO (9:1)*	<b>271 / 135</b>	<b>0,063 / 0,043</b>	<b>4301 / 3139</b>
ПЭ+Cu (4:1) / СВМПЭ+Cu (4:1)	76 / 223	0,058 / 0,044	1310 / 5048
ПЭ+Cu (4:1)* / СВМПЭ+Cu (4:1)*	<b>15 / 192</b>	<b>0,009 / 0,037</b>	<b>1666 / 5189</b>
ПЭ+Cu (2:1) / СВМПЭ+Cu (2:1)	56 / 243	0,024 / 0,046	2333 / 5282
ПЭ+Cu (2:1)* / СВМПЭ+Cu (2:1)*	<b>31 / 209</b>	<b>0,051 / 0,044</b>	<b>607 / 4650</b>

\*Покрытие сформировано в условиях лазерного ассистирующего воздействия

При снижении содержания оксида цинка в полиэтиленовой мишени процесс диспергирования становится более стационарным, значения скорости роста покрытия и давления в вакуумной камере практически не зависят от состава мишени при массовом соотношении компонентов 5:1 и 7:1. При диспергировании таких мишеней достигаются значительно более высокие значения скорости роста и почти в 2 раза большие значения реакционной активности  $R$  (таблица 2.1).

Для процесса электронно-лучевого диспергирования мишеней ПЭ + ZnO в условиях лазерного ассистирующего воздействия характерны более низкие значения времени индукционного периода, скорости роста покрытия и давления в вакуумной камере в сравнении с аналогичными параметрами процесса в отсутствие УФ обработки (рисунок 2.1). При лазерном ассистировании электронно-лучевого диспергирования мишеней ПЭ + ZnO реализуются более высокие значения скоростей осаждения, но они меньше значений, регистрируемых при диспергировании в отсутствие лазерного ассистирования (таблица 2.1).

Рассмотрены кинетические особенности электронно-лучевого диспергирования СВМПЭ (рисунок 2.2).

Отличия параметров кинетики электронно-лучевого диспергирования таких мишеней от процесса диспергирования мишеней на основе ПЭ заключаются в реализации значительно более высокой скорости осаждения тонкого слоя, снижении длительности индукционного периода. Воздействие лазерного УФ излучения на диспергируемую потоком электронов мишень на основе СВМПЭ, в отличие от аналогичной обработки мишени на основе ПЭ, не всегда сопровождается

снижением давления генерируемой газовой фазы (таблица 2.1).

Реакционная активность летучих продуктов диспергирования мишеней СВМПЭ + ZnO при массовом содержании оксида цинка менее 50%, как правило, более высокая при использовании лазерного ассистирования.

Введение в состав мишени меди уменьшает в 1,5 – 2,0 раза время индукционного периода, и в случае диспергирования мишени на основе СВМПЭ заметно увеличивает значение скорости осаждения (таблица 2.1). При относительно низком содержании меди в мишени (когда экранирование поверхности диспергирования медными частицами незначительно) летучие продукты характеризуются высокой реакционной активностью. Лазерное ассистирующее воздействие не снижает значения  $R$ , однако скорость осаждения, как и в случае мишеней, содержащих оксид цинка, значительно ниже.

Следует отметить, что при диспергировании полиметилметакрилата и полиэтилентерефталата в условиях лазерного ассистирования регистрируется повышение скорости осаждения и давления, что находит объяснение с позиций снижения зарядки поверхности мишени вследствие фотостимулированной электронной эмиссии и дополнительного термического инициирования деструкции макромолекул когерентным излучением [4].

Наиболее вероятной причиной установленных особенностей влияния лазерного ассистирования на диспергирование полиэтилена является изменение химического состава и структуры мишени при воздействии ультрафиолетового излучения. Протекающие процессы разрыва химических

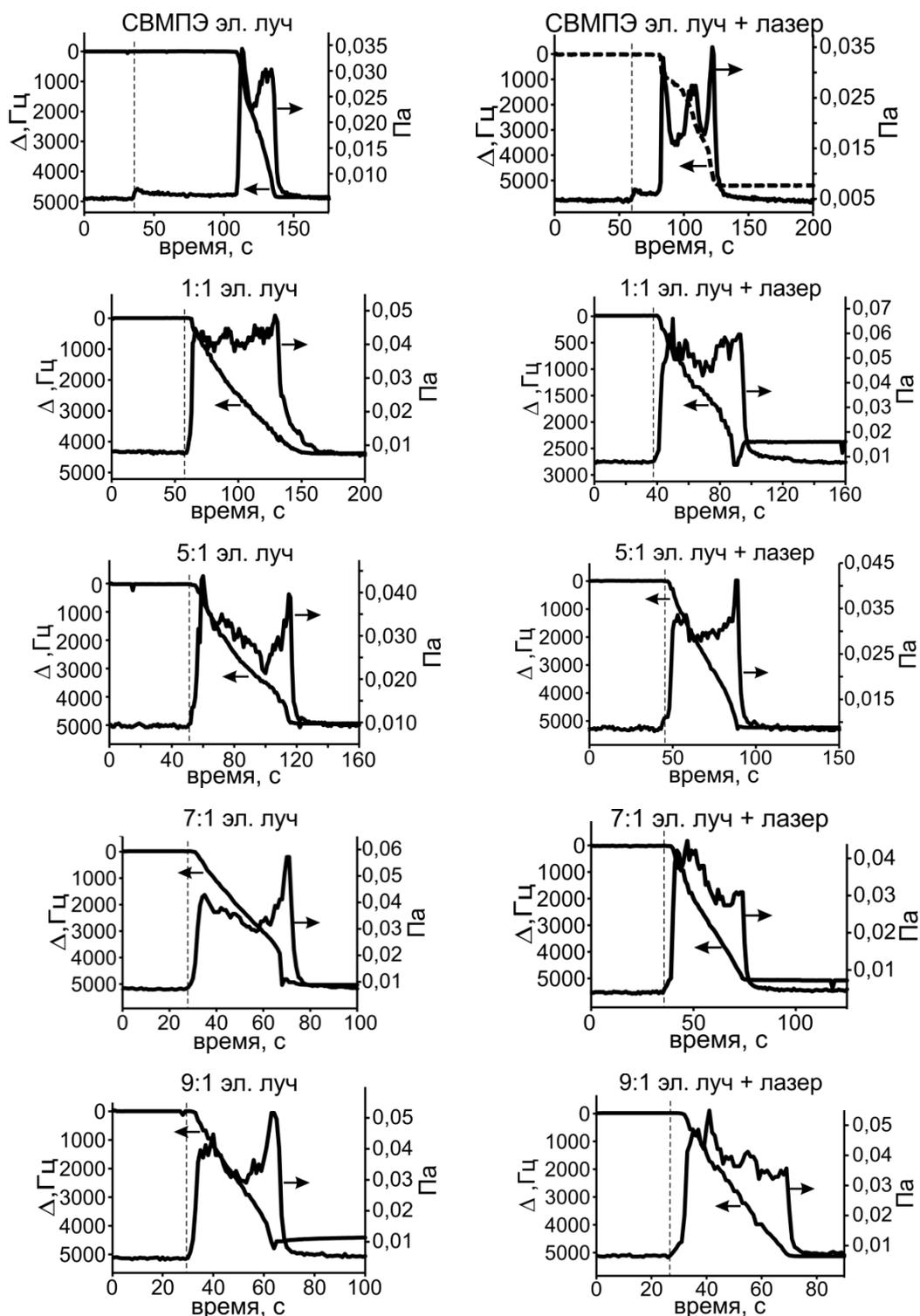


Рисунок 2.2 – Кинетические зависимости процесса электронно-лучевого диспергирования композиционных мишеней в условиях лазерного ассистирующего воздействия ( $\lambda = 266 \text{ нм}$ ) и в условиях его отсутствия

связей, радикальные реакции влияют на состав генерируемых летучих продуктов диспергирования. В результате изменяется стойкость полимера к воздействию электронов и молекулярная структура осаждаемых покрытий. Из представленных в таблице 2.2 результатов ИК-спектро-

скопических исследований следует, что влияние УФ лазерного излучения на молекулярную структуру осаждаемого покрытия в наибольшей степени проявляется в заметном снижении ненасыщенности, в частности *транс*-виниленовой. Образование подобного типа ненасыщенности

может быть инициировано обработкой растущего слоя потоком заряженных частиц, упруго отраженными электронами. В этой связи можно было предположить, что фиксируемые изменения в молекулярной структуре осаждаемого тонкого слоя в условиях лазерного ассистирующего воздействия, являются следствием снижения давления летучих продуктов диспергирования, образования молекулярных фрагментов с большей молекулярной массой. При этом молекулярная структура покрытий, осажденных из продуктов

диспергирования мишеней на основе СВМПЭ, практически не изменяется при использовании дополнительной лазерной обработки. Концентрация вводимых в мишень наночастиц ZnO, меди сказывается на содержании концевых двойных связей (особенно при диспергировании мишеней на основе ПЭ).

Особенности молекулярной структуры макромолекул проявляются в морфологии образующихся слоев (рисунки 2.3–2.6).

Таблица 2.2 – Параметры ИК-спектров сформированных покрытий

Вид покрытия	частота, см <sup>-1</sup>			
	1473 / 1465	1378 -CH <sub>3</sub>	965 -CH = CH-	908 -CH = CH <sub>2</sub>
ПЭ / СВМПЭ	0,78 / 0,72	0,098 / 0,095	0,075 / 0,075	0,079 / 0,069
ПЭ* / СВМПЭ*	<b>0,74 / 0,80</b>	<b>0,15 / 0,081</b>	<b>0,165 / 0,088</b>	<b>0,029 / 0,077</b>
ПЭ+ZnO (1:1) / СВМПЭ+ZnO (1:1)	0,59 / 0,62	0,27 / 0,105	0,186 / 0,138	0,102 / 0,032
ПЭ+ZnO (1:1)* / СВМПЭ+ZnO (1:1)*	<b>0,62 / 0,67</b>	<b>0,20 / 0,08</b>	<b>0,148 / 0,126</b>	<b>0,079 / 0,05</b>
ПЭ+ZnO (3:1) / СВМПЭ+ZnO (3:1)	0,56 / 0,47	0,37 / 0,138	0,107 / 0,146	0,137 / 0,029
ПЭ+ZnO (3:1)* / СВМПЭ+ZnO (3:1)*	<b>0,57 / 0,65</b>	<b>0,18 / 0,088</b>	<b>0,036 / 0,141</b>	<b>0,105 / 0,037</b>
ПЭ+ZnO (5:1) / СВМПЭ+ZnO (5:1)	0,70 / 0,69	0,16 / 0,087	0,097 / 0,114	0,171 / 0,047
ПЭ+ZnO (5:1)* / СВМПЭ+ZnO (5:1)*	<b>0,54 / 0,74</b>	<b>0,20 / 0,074</b>	<b>0,021 / 0,113</b>	<b>0,085 / 0,058</b>
ПЭ+ZnO (7:1) / СВМПЭ+ZnO (7:1)	0,63 / 0,73	0,24 / 0,086	0,077 / 0,093	0,165 / 0,083
ПЭ+ZnO (7:1)* / СВМПЭ+ZnO (7:1)*	<b>0,57 / 0,77</b>	<b>0,19 / 0,11</b>	<b>0,027 / 0,083</b>	<b>0,122 / 0,061</b>
ПЭ+ZnO (9:1) / СВМПЭ+ZnO (9:1)	0,46 / 0,73	0,31 / 0,078	0,137 / 0,102	0,075 / 0,075
ПЭ+ZnO (9:1)* / СВМПЭ+ZnO (9:1)*	<b>0,54 / 0,72</b>	<b>0,23 / 0,098</b>	<b>0,038 / 0,088</b>	<b>0,119 / 0,071</b>
ПЭ+Cu (4:1) / СВМПЭ+ Cu (4:1)	0,79 / 0,83	0,137 / 0,076	0,146 / 0,091	0,036 / 0,078
ПЭ+Cu (4:1)* / СВМПЭ+ Cu (4:1)*	<b>0,80 / 0,94</b>	<b>0,121 / 0,084</b>	<b>0,123 / 0,091</b>	<b>0,044 / 0,086</b>
ПЭ+Cu (2:1) / СВМПЭ+ Cu (2:1)	0,76 / 0,90	0,102 / 0,087	0,105 / 0,074	0,06 / 0,089
ПЭ+Cu (2:1)* / СВМПЭ+ Cu (2:1)*	<b>0,78 / 0,88</b>	<b>0,106 / 0,108</b>	<b>0,100 / 0,08</b>	<b>0,082 / 0,075</b>

\*Покрытие сформировано в условиях лазерного ассистирующего воздействия

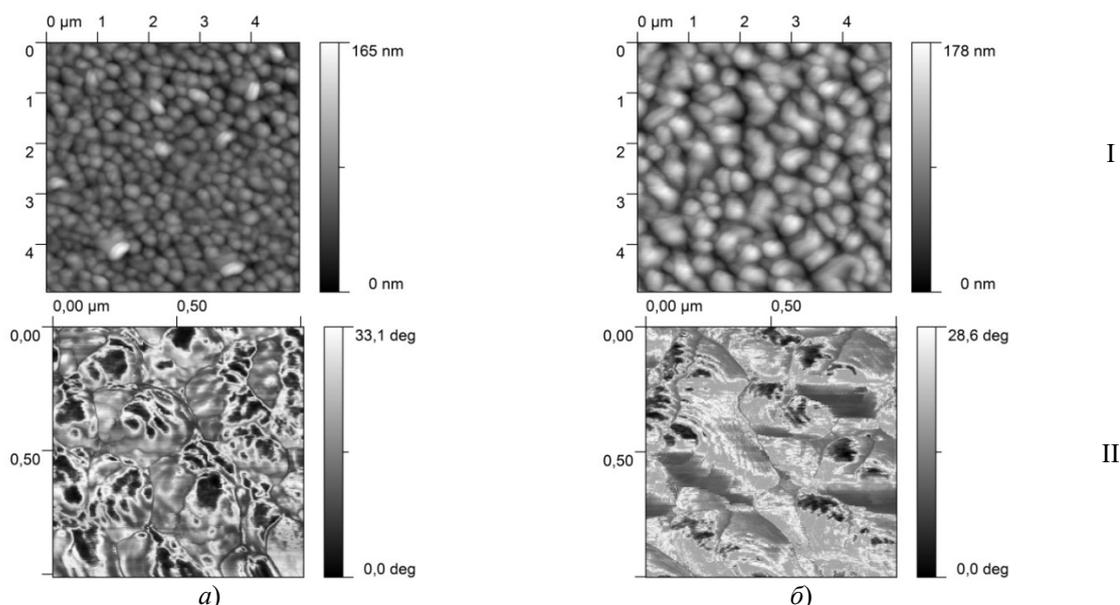


Рисунок 2.3 – Изображения АСМ покрытия ПЭ, сформированного в отсутствии (а) и в условиях лазерного ассистирования (б):

I – топография (5×5 мкм); II – фазовый контраст (1×1 мкм)

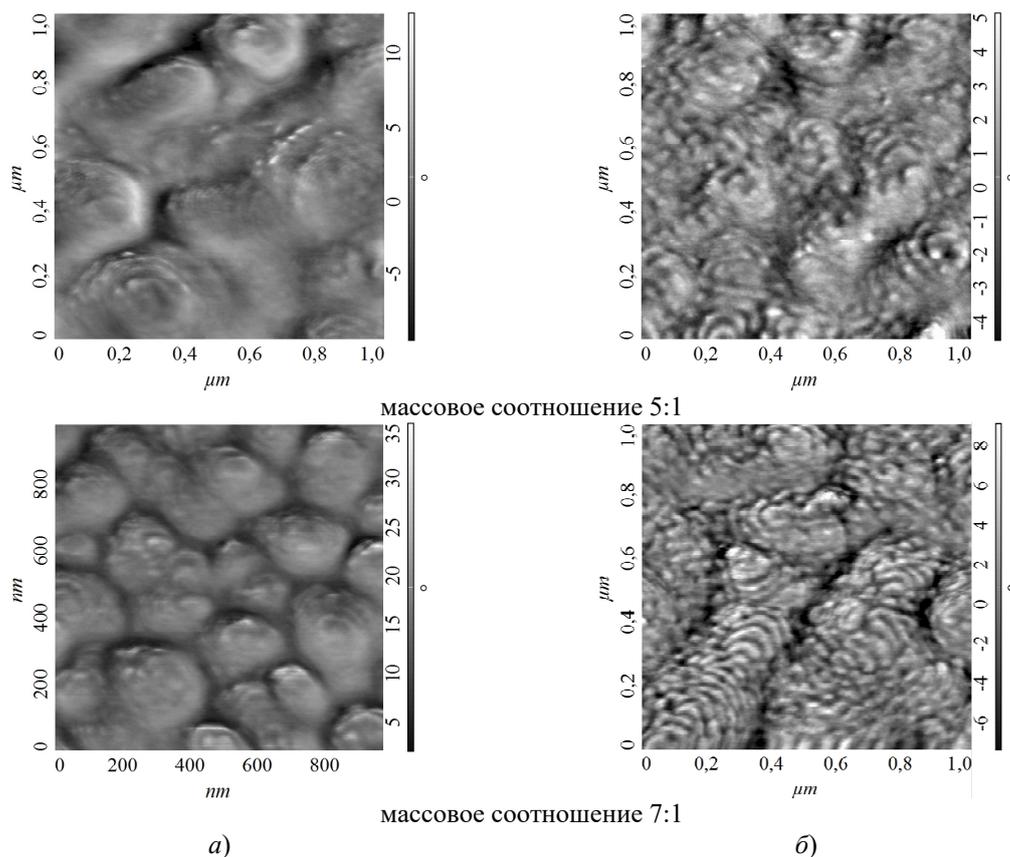


Рисунок 2.4 – Влияние массового соотношения ПЭ + ZnO в мишени на АСМ изображения покрытий (фазовый контраст), сформированных без (а) и в условиях лазерного ассистирования (б)

Лазерное УФ ассистирующее воздействие на диспергируемый потоком электронов порошок ПЭ сопровождается увеличением размера поверхностных образований, формирующих покрытие. Регистрируемые структуры являются составными, образованными из более мелких, средний размер которых  $\approx 200$  нм. На фазовом контрасте (рисунок 2.3, II) отчетливо видна структура подобных мелких образований, схожая со структурой пластинчатых кристаллов [8]. Для тонких слоев, осажденных в отсутствие лазерного ассистирующего воздействия на диспергируемую мишень, подобная слоистая структура поверхностных образований не является столь выраженной.

На АСМ изображениях покрытий, сформированных при диспергировании мишеней ПЭ + ZnO, такие слоистые структуры, возникающие в процессе складывания углеводородных фрагментов, хорошо заметны, что возможно лишь при определенной их длине [8]. Наиболее выраженные складчатые образования характерны для тонких слоев, осажденных в условиях лазерного ассистирующего воздействия с использованием смесей порошков полимера и оксида цинка с массовым соотношением 5:1 и 7:1.

Морфология покрытий, сформированных с использованием порошка СВМПЭ, имеет ряд существенных отличий от морфологии покрытий на основе ПЭ. Прежде всего, следует отметить отсутствие у них складчатых структур (рисунок 2.5). Структурирование тонкого слоя сопровождается появлением в объеме покрытия большого количества пор. Введение наночастиц оксида цинка в порошок СВМПЭ позволяет регулировать их размер и плотность. Влияние лазерного ассистирующего воздействия на морфологию покрытия не является выраженным, заметно проявляется только в снижении порообразования.

Морфология покрытий, полученных при использовании в качестве наполнителя материала мишени порошка меди, также имеет особенности (рисунок 2.6).

Покрытие имеет относительно более упорядоченную структуру, образованную мелкими сфероподобными элементами. Лазерное ассистирующее воздействие на стадии диспергирования вызывает незначительное повышение ее дисперсности. Для покрытий на основе СВМПЭ влияние меди не приводит к заметным изменениям морфологии в сравнении с влиянием наночастиц оксида цинка.

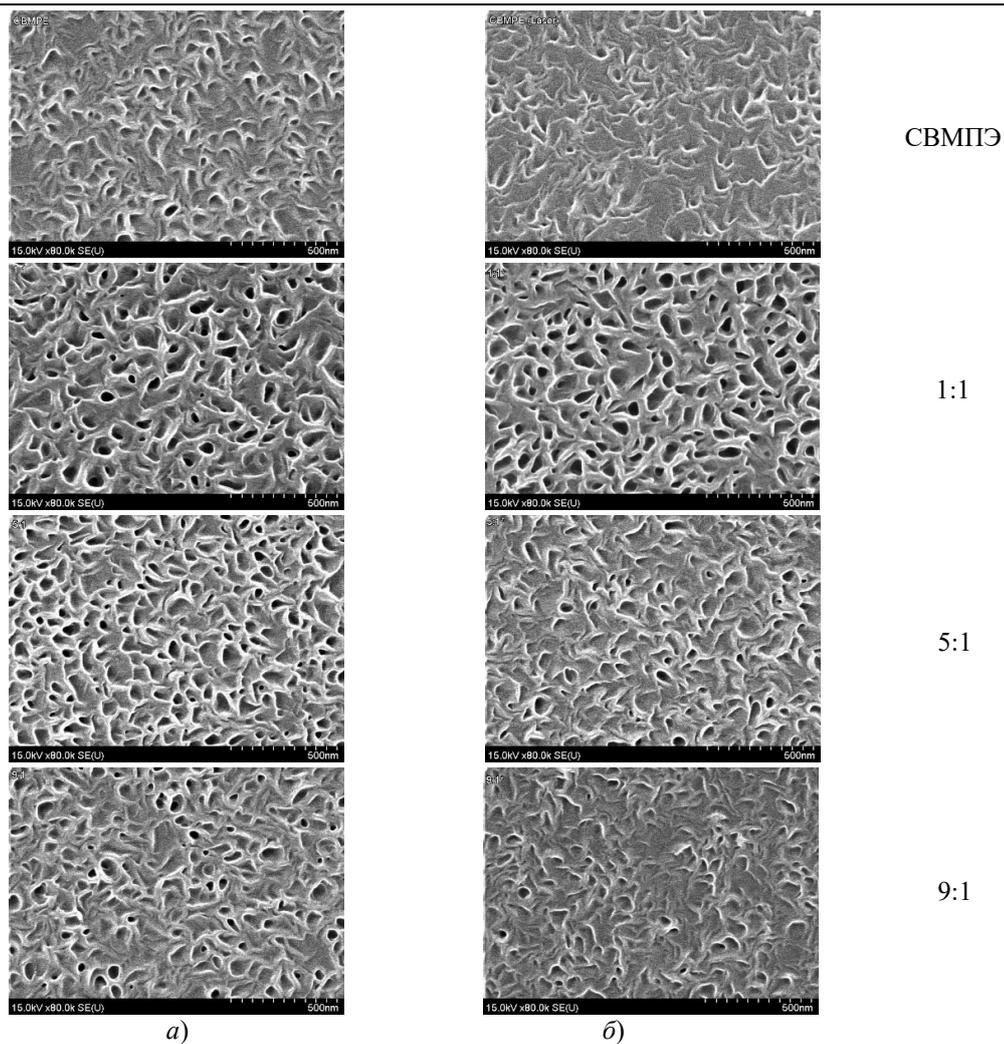


Рисунок 2.5 – РЭМ изображения покрытий, сформированных при диспергировании мишени СВМПЭ + ZnO при различном массовом соотношении при отсутствии (а) и в условиях лазерного ассистирующего воздействия (б)

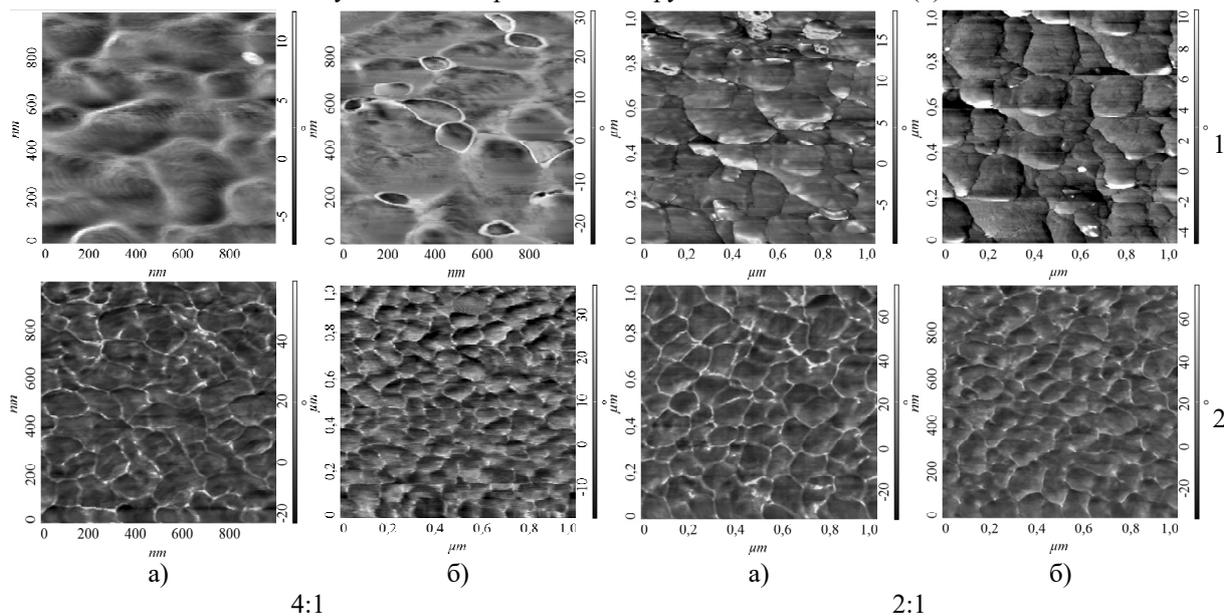


Рисунок 2.6 – Изображения АСМ (фазовый контраст) покрытия, сформированного диспергированием мишени ПЭ+Cu с различным составом компонент при отсутствии (а) и в условиях лазерного ассистирования (б)

### Заключение

Определено влияние состава мишеней на основе ПЭ и СВМПЭ на параметры генерации, реакционную активность летучих продуктов электроннолучевого диспергирования в условиях лазерного ассистирования. Показано, что при введении в состав мишени 10–20 масс. % ZnO процесс диспергирования становится более стационарным, при этом достигаются значительно более высокие значения скорости роста и почти в 2 раза большие значения реакционной активности. Лазерное УФ ассистирование процесса диспергирования приводит к снижению скорости давления летучих продуктов, скорости роста покрытия, что объясняется изменением химического состава и структуры полимерной мишени при воздействии ультрафиолетового излучения. Влияние УФ лазерного излучения на молекулярную структуру, морфологию осаждаемого покрытия проявляется в заметном снижении *транс*-виниленовой ненасыщенности, увеличении размера поверхностных образований, формировании слоистых структур. При диспергировании мишеней СВМПЭ + ZnO в условиях лазерного ассистирования и его отсутствии складчатые структуры не формируются, в объеме покрытия регистрируются ячеистые образования, размер и дефектность которых зависит от содержания оксида цинка.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Микро- и нанокмпозиционные полимерные покрытия, осаждаемые из активной газовой фазы* / М.А. Ярмоленко, А.А. Рогачев, П.А. Лучников, А.В. Рогачев, Джанг Сянь Хун; под ред. А.В. Рогачева. – Москва: Радиотехника, 2016. – 424 с.
2. *Красовский, А.М.* Получение тонких пленок распылением полимеров в вакууме / А.М. Красовский, Е.М. Толстопятов. – Минск: Наука и техника, 1989. – 181 с.
3. *Ярмоленко, М.А.* Влияние технологических режимов формирования на структуру и свойства покрытий на основе полимеров, осаждаемых из активной газовой фазы (обзор). 1. Влияние условий и режимов генерации активной газовой фазы / М.А. Ярмоленко, А.А. Рогачев, А.В. Рогачев // *Проблемы физики, математики и техники.* – 2016. – № 2 (27). – С. 29–38.
4. *Особенности кинетики электронно-лучевого диспергирования полимеров в условиях*

*лазерного ассистирования* / М.А. Ярмоленко, А.В. Рогачев, А.С. Руденков, А.М. Михалко // *Проблемы физики, математики и техники.* – 2022. – № 3 (52). – С. 61–66.

5. *Ярмоленко, М.А.* Особенности электронно-лучевого диспергирования бромида серебра в условиях лазерного ассистирования, состав и морфология осаждаемых покрытий / М.А. Ярмоленко, А.А. Рогачев, А.В. Рогачев // *Наноматериалы и наноструктуры – XXI век.* – 2017. – Т. 8. – С. 32–38.

6. *Князев, В.К.* Кристаллические полиолефины. Строение и свойства / В.К. Князев. – Москва: Химия, 1970. – 472 с.

7. *Поляков, А.В.* Полиэтилен высокого давления. Научно-технические основы промышленного синтеза / А.В. Поляков, Ф.И. Дунтов, А.Э. Софиев. – Ленинград: Химия, 1988. – 200 с.

8. *Wunderlich, B.* *Macromolecular Physics: Crystal Structure, Morphology, Defects.* Front Cover / В. Wunderlich. – London: Academic Press, 1973. – 549 p.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь в рамках НИР «Разработка физико-химических основ радиационно-термо-электростатической активации процессов генерации летучих продуктов в технологии осаждения нанокмпозиционных полимер-органических покрытий», комплексное задание 2.2.04 «Разработка физико-химических основ радиационно-термо-электростатической активации процессов генерации летучих продуктов в технологии осаждения нанокмпозиционных полимер-органических покрытий» ГПНИ «Конвергенция-2025», подпрограмма «Микромир, плазма и Вселенная».*

Поступила в редакцию 22.09.2022.

### Информация об авторах

*Ярмоленко Максим Анатольевич* – д.т.н., доцент  
*Рогачев Александр Владимирович* – чл.-корр. НАН Беларуси, д.х.м., профессор  
*Руденков Александр Сергеевич* – к.т.н., доцент  
*Емельянов Виктор Андреевич* – чл.-корр. НАН Беларуси, д.т.н., профессор  
*Фролов Сергей Анатольевич* – стажер мл. науч. сотрудника  
*Михалко Алексей Михайлович* – аспирант