

УДК 537.533.7:621.793.18:678.746.47

DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2022_3_52_61
EDN: FXEIMS

ОСОБЕННОСТИ КИНЕТИКИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРОВ В УСЛОВИЯХ ЛАЗЕРНОГО АССИСТИРОВАНИЯ

М.А. Ярмоленко, Д.Л. Горбачёв, А.В. Рогачев, А.С. Руденков, А.М. Михалко

Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

FEATURES OF THE KINETICS OF POLYMERS ELECTRON-BEAM DISPERSION UNDER LASER ASSISTED CONDITIONS

M.A. Yarmolenko, D.L. Gorbachev, A.V. Rogachev, A.S. Rudenkov, A.M. Mikhalko

Francisk Skorina Gomel State University

Аннотация. Проведено аналитическое описание зарядки поверхности полимерной мишени при электронно-лучевом диспергировании в условиях лазерного ассистирования, результаты которого использованы при интерпретации кинетических закономерностей диспергирования ПММА, ПЭТ, ПТФЭ при ассистировании излучением с $\lambda = 532$ нм и $\lambda = 266$ нм. Для данных полимеров определен характер влияния длины волны ассистирующего излучения на кинетические параметры диспергирования. Сделано заключение о доминирующем воздействии фотоиницируемой электронной эмиссии, вызванной лазерным излучением, при электронно-лучевом диспергировании ПММА. При диспергировании ПТФЭ основное влияние излучения заключается в дополнительном фотохимическом воздействии. Зависимость кинетических параметров диспергирования ПЭТ от длины волны ассистирующего излучения объясняется различным характером воздействия; основным влиянием фотоэлектронной эмиссии при воздействии излучения с $\lambda = 266$ нм и фотохимическими изменениями под действием излучения с $\lambda = 532$ нм.

Ключевые слова: полимеры, электронно-лучевое диспергирование, лазерное ассистирование, зарядка поверхности, фотостимулированная электронная эмиссия.

Для цитирования: Особенности кинетики электронно-лучевого диспергирования полимеров в условиях лазерного ассистирования / М.А. Ярмоленко, Д.Л. Горбачёв, А.В. Рогачев, А.С. Руденков, А.М. Михалко // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 3 (52). – С. 61–66. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2022_3_52_61. – EDN: FXEIMS

Abstract. Analytical description of the process of charging the polymer target surface by electron beam influence under laser assisted conditions is presented. The results were used to interpret the kinetic dependences of the electron beam dispersion of PMMA, PET, PTFE under laser assist influence $\lambda = 532$ nm and $\lambda = 266$ nm. The effect of the assist radiation wavelength on the kinetic parameters of dispersion was determined. The conclusion is made about the dominant effect of the photoinitiated electron emission caused by laser radiation influence during the electron beam dispersion of PMMA. The main effect of laser radiation during the electron beam dispersing of PTFE is an additional photochemical effect. The effect of the assist radiation wavelength on the PET dispersion kinetics is explained by the different nature of the effect; the main influence of photoelectron emission under the influence of radiation with $\lambda = 266$ nm and photochemical changes under the action of radiation with $\lambda = 532$ nm.

Keywords: polymers, electron beam dispersion, laser assistance, surface charging, photostimulated electron emission.

For citation: Features of the kinetics of polymers electron-beam dispersion under laser assisted conditions / M.A. Yarmolenko, D.L. Gorbachev, A.V. Rogachev, A.S. Rudenkov, A.M. Mikhalko // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2022. – № 3 (52). – P. 61–66. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2022_3_52_61 (in Russian). – EDN: FXEIMS

Введение

Воздействие лазерного излучения является эффективным методом инициирования различных химических реакций в том числе и при осаждении покрытий [1], [2]. В зависимости от природы обрабатываемого материала, длины волны и мощности излучения возможна реализация двух основных разновидностей реакций: фотохимической, при которой электромагнитная энергия расходуется только на разрыв связей в исходных реагентах и не переходит в тепловую энергию, и фототермической, при которой происходит сначала разогрев реагента, а затем его термохимическое превращение. Более сложные

физико-химические процессы протекают при реализации комбинированных методов обработки, нагреве, воздействии на реагент электронов, ионов в условиях лазерного ассистирования. При воздействии потока заряженных частиц (ионов, электронов) на поверхность полимерного материала с целью генерации активной газовой фазы протекают сложные физико-химические процессы, характер и кинетика которых определяется, прежде всего, энергией частиц, природой полимера, что, в конечном счете, влияет на состав летучих продуктов диспергирования, их реакционную активность и, соответственно, на структуру и свойства осаждающихся слоев [3]. При

дополнительном воздействии на зону диспергирования электромагнитного излучения можно ожидать, что механизм и кинетика этих процессов существенно изменятся. Так, в работе [4] показано, что при формировании композиционных покрытий из газовой фазы, образованной электронно-лучевым диспергированием в условиях лазерного ассистирующего воздействия, снижается скорость роста покрытий. Использование лазерного ассистирования при электронно-лучевом диспергировании позволяет формировать покрытия ПММА-Ag, ПММА-ZnO, имеющие слоистую структуру и в которых проявляется плазмонный эффект [5], [6]. Данные свойства и структурные особенности не регистрируются при осаждении покрытий без лазерного ассистирования.

Установлено, что наиболее значимыми при электронно-лучевом диспергировании полимеров являются процессы деструкции макромолекул, химические реакции с участием образовавшихся молекулярных фрагментов, зарядка поверхностных слоев [6], [7]. При этом влияние ассистирующего излучения является более комплексным и заключается не только в фотохимической и фототермической активации материала мишени, но и в воздействии на образовавшиеся летучие продукты диспергирования, повышении их реакционной способности. Электромагнитное излучение может вызвать также фотоэлектронную эмиссию, которая снижает величину адсорбированного при обработке электронами электрического заряда и, соответственно, определяет уменьшение напряженности вызванного им тормозящего электрического поля. Это, в свою очередь, повышает энергию первичного электронного потока и влияет на характер и кинетику протекающих при диспергировании процессов.

Основной целью настоящей работы является определение закономерностей процессов зарядопереноса при электроннолучевом диспергировании полимерных материалов, оценка влияния лазерного ассистирования на кинетические параметры генерации летучих продуктов с учетом природы полимерных материалов. Реализацию данной цели предлагается осуществить путем аналитического описания особенностей зарядки поверхности мишени при диспергировании, экспериментального определения влияния природы полимеров, длины волны ассистирующего излучения на кинетические параметры диспергирования.

1 Методика эксперимента

Покрытия осаждали из активной газовой фазы, генерируемой воздействием на мишень потока электронов с энергией 800–1600 эВ и плотностью 0,01–0,03 А/см². В качестве материала диспергируемой мишени использовали полиметилметакрилат (ПММА), полиэтилентерефталат (ПЭТ), полистирол (ПС), полиэтилен (ПЭ),

политетрафторэтилен (ПТФЭ). Лазерное ассистирующее воздействие в процессе электронно-лучевого диспергирования мишени осуществляли с помощью устройства, схема которого представлена в [4]. С целью оценки степени влияния ассистирующего лазерного воздействия на параметры диспергирования обработка мишени излучением производилась периодически. При этом регистрировались значения давления в вакуумной камере и скорость роста покрытия.

Контроль скорости роста (толщины) осаждаемых слоев осуществлялся с помощью кварцевого измерителя толщины АЧ-03-001. Толщина всех формируемых покрытий составляла 500 Гц (разность частот кварцевого измерителя толщины). Расстояние от электронной пушки до мишени составляло 150 мм, а от мишени до подложки – 120 мм. Процесс осаждения покрытий производился при начальном давлении остаточных газов в вакуумной камере $\approx 4 \cdot 10^{-3}$ Па.

В качестве источника лазерного излучения использовался лазер L-2137U+HG-5, позволяющий генерировать излучение с длиной волны $\lambda_1 = 532$ нм, $\lambda_2 = 266$ нм. Длительность импульса накачки в режиме модулированной добротности – 6 нс. Максимальная энергия лазерного импульса в системе генератор-усилитель в режиме модулированной добротности составляет для $\lambda_1 - 448$ мДж, $\lambda_2 - 120$ мДж. Расходимость лазерного излучения составляет 0,8 мРад. Лазерное излучение указанных гармоник является линейно-поляризованным. Значения плотности мощности лазерного излучения на различных длинах волн, при осаждении покрытий, стремились сделать близкими.

2 Результаты и их обсуждение

Как уже отмечалось, при воздействии на поверхность диэлектрической мишени потока электронов происходит ее зарядка, обусловленная внедрением частиц в полимер закреплением их на ловушках в поверхностном слое. Анализ электрофизических процессов, протекающих при диспергировании полимеров, показывает, что величина электростатического заряда на поверхности определяется, прежде всего, электрической проводимостью мишени и, при ее невысоких значениях, плотностью электронов j , коэффициентом вторичной электронной эмиссии α , а при образовании летучих фрагментов макромолекул – их коэффициентом ионизации β . Отметим, что коэффициент вторичной эмиссии α существенно зависит от энергии бомбардирующих поверхность частиц W . При достаточно низких значениях W он имеет, как правило, величину, превышающую единицу. Известно, например, что при облучении потоком электронов поверхности ПТФЭ ее зарядка наблюдается при энергии $W_e > 1,5$ кэВ [8]. При $W < 1,5$ кэВ коэффициент вторичной электронной эмиссии α больше единицы и зарядка поверхности не происходит.

При воздействии на зону электроннолучевого диспергирования коротковолнового электромагнитного излучения с энергией фотонов $\epsilon = h\nu > A_e$ (A_e – энергия электронов в адсорбированном состоянии) происходит эмиссия электронов, плотность потока которой $J_\phi = j_\phi / h\nu$ (j_ϕ – плотность потока энергии электромагнитного излучения).

Учитывая указанные факторы, изменение со временем поверхностной плотности заряда q можно описать следующим дифференциальным уравнением

$$\frac{dq}{dt} = j - \alpha j + \beta \frac{dm}{dt} - eJ_\phi - \sigma \Delta\phi, \quad (2.1)$$

где m – масса полимерной мишени, β – степень ионизации летучих продуктов диспергирования, e – заряд электрона, σ – проводимость материала мишени, $\Delta\phi$ – возникающий на поверхности потенциал.

При этом учтем, что, в соответствии с экспериментальными данными [9], скорость генерации летучих продуктов (скорость диспергирования V_d) прямо пропорциональна мощности энергетического воздействия на мишень

$$\frac{dm}{dt} = -kUj. \quad (2.2)$$

Здесь $U = W/e$ – эффективное ускоряющее напряжение электронов, воздействующих на полимерную мишень; W – энергия электронов.

Как уже отмечалось, коэффициент вторичной электронной эмиссии зависит от энергии электрона (или ускоряющего напряжения U) и в линейном приближении, правомочность которого отмечается в [10], можно вычислить из соотношения

$$\alpha = \alpha_0 - d_3 U. \quad (2.3)$$

Здесь α_0 и d_3 – постоянные для данного полимера величины.

Появление на поверхности заряда обуславливает образование на поверхности мишени потенциала $\Delta\phi$, электрического поля, тормозящего падающие электроны. Тогда эффективное ускоряющее напряжение

$$U = U_y - \frac{g}{C}, \quad (2.4)$$

где U_y – ускоряющее напряжение источника электронов; C – емкость заряженного полимерного слоя.

Тогда уравнение (2.1) с учетом соотношений (2.2)–(2.4) примет вид

$$\frac{dq}{dt} = j(1 - \alpha_0 + d_3 U_y - k\beta U_y) - eI_\phi + \frac{q}{c}(d_3 j + k\beta j - \sigma). \quad (2.5)$$

После интегрирования (2.5) при начальном условии $q(t=0) = 0$ получим

$$q = \frac{c \left[j(1 - \alpha_0 + d_3 U_y - k\beta U_y) - eI_\phi \right]}{\sigma - d_3 j + k\beta j} \times$$

$$\times \left(1 - \exp \left[-\frac{t}{c} (\sigma - d_3 j - k\beta j) \right] \right). \quad (2.6)$$

В соответствии с (2.4) соответствующим образом и изменяется энергия электронов в процессе диспергирования. В установившемся режиме энергия электронов

$$E = e \left[U_y - \frac{j(1 - \alpha_0 + d_3 U_y - k\beta U_y) - eI_\phi}{\sigma - d_3 j + k\beta j} \right]. \quad (2.7)$$

Анализ (2.7) показывает, что при мощности светового потока

$$J_\phi = \frac{j}{e} [1 - U_y (d_3 + \beta k) - \alpha_0] \quad (2.8)$$

зарядка отсутствует и реализуется стационарный режим диспергирования и если интенсивность электромагнитного излучения больше этого значения, то вследствие фотоэлектронной эмиссии на поверхности возникает положительный заряд и наведенное электрическое поле является ускоряющим.

Линейную скорость диспергирования получим из (2.2) с учетом (2.4) и (2.6)

$$U_d = \frac{k}{\rho} j \left[\frac{j(1 - \alpha_0 + d_3 U_y - k\beta U_y) - eI_\phi}{\sigma - d_3 j + k\beta j} \right] \times \left(1 - \exp \left[-\frac{t}{c} (\sigma - d_3 j - k\beta j) \right] \right), \quad (2.9)$$

где ρ – плотность материала мишени.

Значительное влияние на энергию поступающих на поверхность электронов и, соответственно, интенсивность диспергирования оказывает и проводимость полимерной мишени, которая значительно возрастает при повышении температуры, переходе полимера в вязко-текучее состояние [11].

В стационарном режиме скорость диспергирования при ассистировании электромагнитным излучением линейно возрастает с увеличением его плотности. При этом разность скоростей диспергирования при наличии ассистирования и его отсутствии вычислится по формуле:

$$\Delta V_{d,0} = \frac{k}{\rho} \frac{jeJ_\phi}{\sigma - dj - \beta kj}. \quad (2.10)$$

Отметим, что при сохранении высоких диэлектрических свойств полимера в зоне диспергирования ($\sigma = 0$) разность скоростей не зависит от плотности потока электронов и определяется только интенсивностью ассистирующего электромагнитного излучения.

Полученные аналитические выражения использованы при интерпретации результатов экспериментального изучения влияния лазерного ассистирования на кинетические параметры генерации летучих продуктов полимеров при их электроннолучевом диспергировании. Так, на рисунках 2.1 и 2.2 представлены кинетические зависимости процесса электронно-лучевого

диспергирования полиметилметакрилата в условиях периодического воздействия на зону диспергирования лазерного излучения с различной длиной волны.

Видно, что при периодическом воздействии потока электромагнитного излучения на зону электроннолучевого диспергирования наблюдаются симбатные изменения давления в камере. При этом характер изменений давления зависит от длины волны: при воздействии излучения с $\lambda = 532$ нм амплитуда колебаний возрастает в процессе диспергирования, а при обработке УФ излучением она практически постоянна. Такие изменения давления объясняются различным поглощением излучения полимером. Излучение с $\lambda_1 = 532$ нм имеет более высокую мощность и активно поглощается поверхностными слоями полимерной мишени, что приводит к повышению температуры и, соответственно, к возрастанию давления. ПММА является средой прозрачной для УФ излучения, но при этом энергия фотонов $\epsilon = 7,4$ эВ достаточна для проявления интенсивной фотостимулированной электронной

эмиссии. В результате такой обработки снижается напряженность тормозящего электроны электрического поля и, как следствие этого, повышается давление и скорость роста покрытия. Правомочность такого утверждения подтверждается периодичностью изменения давления. При проявлении, например, теплового механизма влияния ассистирующего излучения на кинетические характеристики диспергирования в силу низкой теплопроводности материала мишени периодичность нарушается.

Отметим, что при воздействии на ПММА потока электронов с относительно низкой плотностью мощности лазерное ассистирование ($\lambda_1 = 532$ нм) вызывает периодическое изменение давления. При этом рост давления не приводит к увеличению скорости осаждения покрытия (рисунок 2.1, с), что свидетельствует о доминировании процесса тепловой деполимеризации при такой обработке, так как в соответствии с [12] термическая деструкция ПММА в интервале температур 150–500°С сопровождается почти 100% выходом мономера.

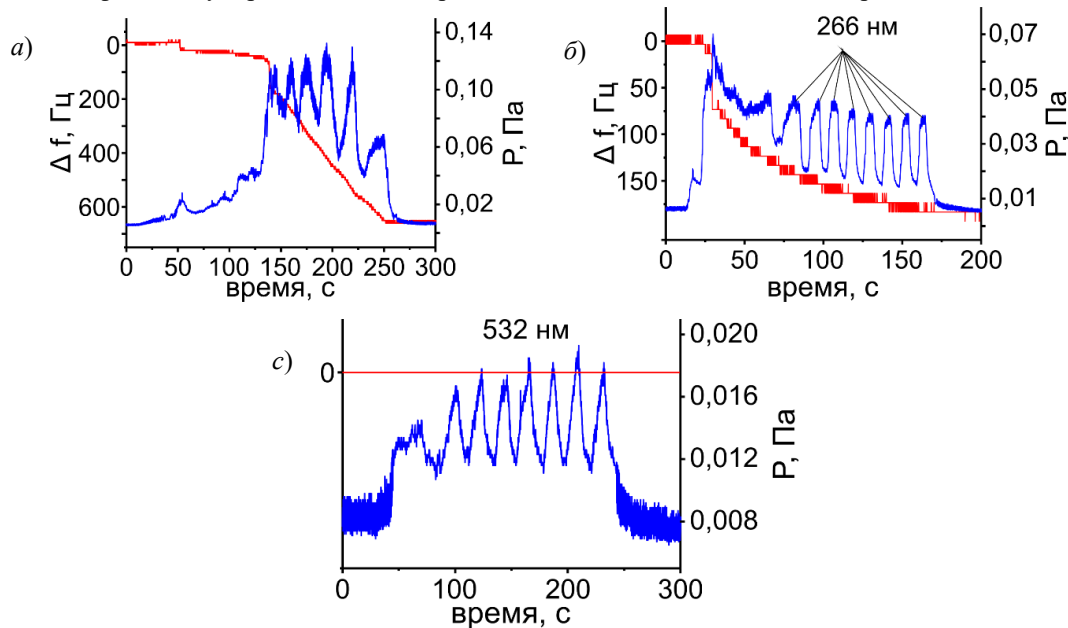


Рисунок 2.1 – Кинетические зависимости электронно-лучевого диспергирования ПММА в условиях ассистирования лазерным излучением с $\lambda_1 = 532$ нм (а, с) и $\lambda_2 = 266$ нм (b). Плотность мощности излучения с $\lambda = 532$ нм – $2,64 \cdot 10^{12}$ Вт/м² (а, с); $\lambda = 266$ нм – $0,71 \cdot 10^{12}$ Вт/м² (b). Плотность мощности электронного потока $4,8 \cdot 10^5$ Вт/м² (а, b), $1,8 \cdot 10^5$ Вт/м² (с)

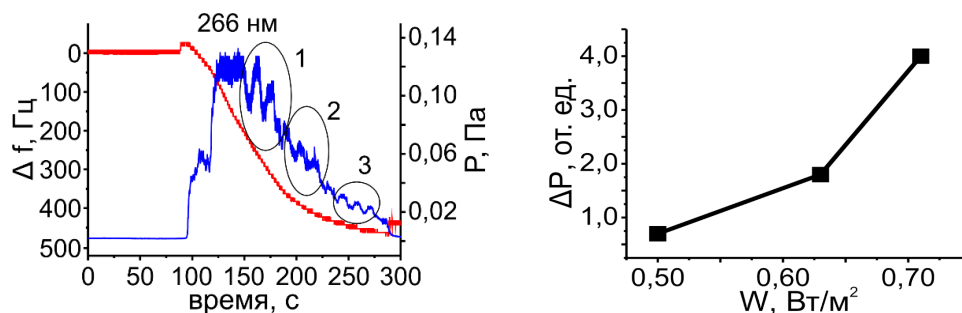


Рисунок 2.2 – Влияние плотности потока мощности излучения с $\lambda = 266$ нм на параметры диспергирования ПММА. Плотность мощности излучения – $0,71 \cdot 10^{12}$ Вт/м² (1), $0,63 \cdot 10^{12}$ Вт/м² (2), $0,55 \cdot 10^{12}$ Вт/м² (3)

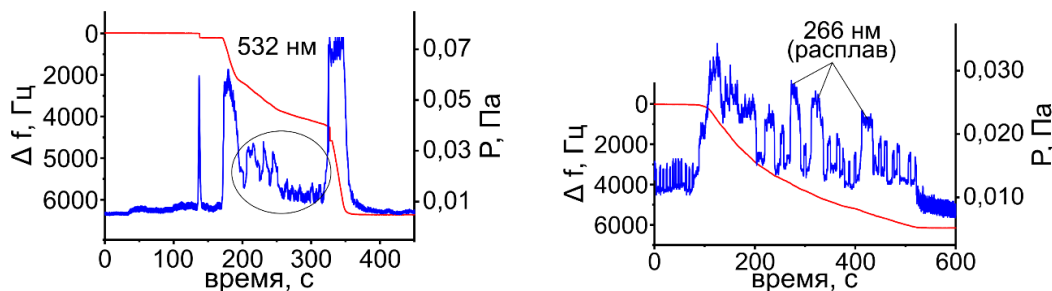


Рисунок 2.3 – Кинетические зависимости электронно-лучевого диспергирования ПЭТ в условиях лазерного ассистирования

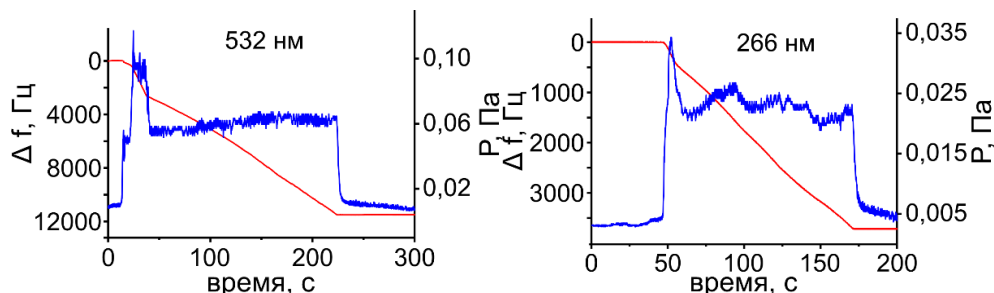


Рисунок 2.4 – Кинетические зависимости электронно-лучевого диспергирования ПТФЭ в условиях лазерного ассистирования

Воздействие УФ лазерного излучения на мишень ПММА и вызванное этим повышение энергии потока электронов сопровождается более высоким ростом давления в вакуумной камере. Относительный рост величины давления $\Delta P = P_\lambda - P$ превышает более чем в 3 раза аналогичный параметр при ассистировании лазерным излучением с $\lambda_1 = 532$ нм. При этом плотность мощности оптического излучения более чем в 3,7 раза превышает плотность мощности УФ излучения. Повышение плотности мощности излучения вызывает практически линейное возрастание давления, что согласуется с выводами предложенной модели (соотношением (2.10)) и является подтверждением вывода об определяющем влиянии УФ ассистирования на зарядовое состояние зоны электроннолучевого диспергирования.

При электронно-лучевом диспергировании полиэтилентерефталата, политетрафторэтилена в условиях лазерного ассистирования проявляется ряд особенностей, обусловленных их оптическими и теплофизическими свойствами. Так, на кинетической зависимости параметров диспергирования ПЭТ при ассистировании излучением с $\lambda_1 = 532$ нм периодические изменения давления летучих продуктов диспергирования не являются выраженными, и на поздней стадии регистрируется резкое ее повышение (рисунок 2.3).

При ассистировании УФ излучением периодические изменения давления проявляются, при этом их амплитуда не одинакова. Данный результат подтверждает сделанный ранее вывод о характере влияния лазерного ассистирования. Для ПЭТ характерно относительно высокое значение $A_e = 5,6$ эВ [13] и при воздействии излучения с $\lambda_1 = 532$ нм (энергия фотонов 3,53 эВ)

фотоэлектронная эмиссия отсутствует и основным инициированным процессом является тепловое воздействие. На поздней стадии диспергирования происходит образование расплава полимера, резко повышается проводимость. Величина адсорбированного на поверхности мишени заряда снижается, эффективная энергия диспергирующего электронов возрастает, что приводит к резкому повышению давления и скорости роста покрытия. Ассистирование излучением с $\lambda_1 = 266$ нм (энергия фотонов 7,40 эВ) приводит к снижению поверхностной зарядки зоны диспергирования вследствие фотоэффекта и, соответственно, к периодическому изменению давления. На стадии плавления материала мишени амплитуда изменения давления возрастает из-за стекания поверхностного заряда.

Для подтверждения вывода о влиянии УФ ассистирования на активацию фотохимических процессов деструкции полимера были определены особенности диспергирования политетрафторэтилена. Электронно-лучевое диспергирование ПТФЭ не сопровождается образованием расплава полимера, и при его ассистировании не регистрируются периодические изменения давления летучих продуктов (рисунок 2.4).

Данные особенности объясняются отсутствием при диспергировании излучением с $\lambda_1 = 532$ нм и $\lambda_1 = 266$ нм фотоэлектронной эмиссии (для ПТФЭ $A_e = 7,6$ эВ [13]). Регистрируемые изменения давления и скорости роста при использовании излучений с различной длиной волны обусловлены различным характером протекающих под действием излучения и электронов процессов деструкции, радикальных реакций [14].

Заключение

Предложена модель аналитического описания особенностей зарядки поверхности полимерной мишени при электроннолучевом диспергировании в условиях лазерного ассистирования с учетом вторичной электронной эмиссии, фотоэмиссии, проводимости зоны диспергирования. Результаты моделирования использованы при интерпретации кинетических закономерностей диспергирования ПММА, ПЭТ, ПТФЭ при ассистировании излучением с $\lambda_1 = 532$ нм и $\lambda_2 = 266$ нм. Установлено, что при диспергировании ПММА при таких условиях основным процессом, определяющим более интенсивное выделение летучих продуктов, является снижающая зарядку зоны диспергирования фотоэлектронная эмиссия. При диспергировании ПТФЭ основное влияние излучения заключается в дополнительном фотохимическом воздействии. Кинетические параметры электроннолучевого диспергирования ПЭТ зависят от длины волны ассистирующего излучения, интенсивности теплового воздействия. При ассистировании излучением с $\lambda_2 = 266$ нм проявляется доминирующее влияние снижения зарядки вследствие фотоэлектронной эмиссии, при ассистировании излучением с $\lambda_1 = 532$ нм повышение плотности летучих продуктов диспергирования наряду с фотохимическим воздействием обусловлено плавлением полимера и, как следствие, снижением зарядки поверхности вследствие высокой проводимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Review on the laser-induced performance of photothermal materials for ignition application* / H. Deng [et al.] // *Energetic Materials Frontiers*. – 2021. – Vol. 2. – P. 201–217.
2. *An overview of surface-enhanced Raman scattering substrates by pulsed laser deposition technique: fundamentals and applications* / Y. Jing [et al.] // *Advanced Composites and Hybrid Materials*. – 2021. – Vol. 4. – P. 885–905.
3. *Low-energy electron beam deposition of coatings based on lignin and quercetin, their structure and properties* / Y. Liu [et al.] // *Vacuum*. – 2022. – Vol. 205. – P. 111416.
4. 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.
5. *Плазмохимический синтез нанокмпозиционных плазмонных покрытий* / А.В. Рогачев, М.А. Ярмоленко, А.А. Рогачев, Д.Л. Горбачев // *Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины*. – 2011. – № 6 (69). – С. 110–117.

6. *Микро- и нанокмпозиционные полимерные покрытия, осаждаемые из активной газовой фазы* / М.А. Ярмоленко [и др.]; под ред. А.В. Рогачева. – Москва: Радиотехника, 2016. – 424 с.

7. *Gritsenko, K.P. Thin-Film Deposition of Polymers by Vacuum Degradation* / K.P. Gritsenko, A.M. Krasovsky // *Chem. Rev.* – 2003. – Vol. 103, № 9. – P. 3607–3649.

8. *Борисова, М.Э. Изменения в полимерных телах под действием заряженных частиц невысокой энергии: автореф. дисс. на соискание уч. ст. канд. физ.-мат. наук: 01.04.19* / М.Э. Борисова. – Л., 1974. – 20 с.

9. *Рогачев, А.А. Физико-химия полимерных покрытий, осаждаемых из активной газовой фазы* / А.А. Рогачев. – Москва: Научный мир, 2014. – 287 с.

10. *Электронные и ионные столкновения: пер. с англ.* / Г. Месса, Е. Бархоп; ред. С. М. Осовец. – Москва: Иностр. лит., 1958. – 604 с.

11. *Сажин, Б.И. Электрические свойства полимеров* / Б.И. Сажин. – Л.: Химия, 2086. – 224 с.

12. *Мадорский, С. Термическое разложение органических полимеров* / С. Мадорский. – Москва: Мир, 1967. – 328 с.

13. *Рогачев, А.В. Исследование процессов формирования металлических пленок на поверхностях полимеров в вакууме: автореф. дисс. на соискание уч. ст. канд. тех. наук: 01.04.19* / А.В. Рогачев. – Рига, ИМП АН. Латв. ССР, 1979. – 20 с.

14. *Гиллет, Дж. Фотофизика и фотохимия полимеров. Введение в изучение фотопроцессов в макромолекулах* / Дж. Гиллет. – Москва: Мир, 1988. – 435 с.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь в рамках НИР «Разработка методов регулирования структурой и свойств покрытий медицинского назначения путем изменения состава и плотности потока летучих продуктов диспергирования органических соединений с использованием электростатических и фотохимических эффектов», комплексное задание 1.12 «Синтез нанокмпозиционных пленочных структур, формирование материалов с высокими функциональными свойствами с использованием электронно-лучевых, ионных, лазерных методов обработки» ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций», подпрограмма «Фотоника и ее применения».

Поступила в редакцию 11.07.2022.

Информация об авторах

Ярмоленко Максим Анатольевич – д.т.н., доцент
Горбачев Дмитрий Леонидович – мл. научный сотрудник
Рогачёв Александр Владимирович – чл.-корр. НАН Беларуси, д.х.м., профессор
Руденков Александр Сергеевич – к.т.н., доцент
Михалко Алексей Михайлович – аспирант