

Оглавление

	Стр.
Глава 1. Методы формирования структур и моделирования	2
1.1 Методы формирования трехмерных микро- и наноструктур	2
1.1.1 Наноимпринтная литография	2
1.1.2 Двухфотонная лазерная литография	3
1.1.3 Интерференционная литография	4
1.1.4 Полутоновая литография	5
1.1.5 Сканирующая зондовая литография	6
1.2 Блок-сополимеры	8
1.3 Методы на основе цепной деполимеризации резиста	8
1.3.1 Моделирование слоя полимера	9
1.4 Моделирование электронно-стимулированных разрывов полимерных молекул	9
1.4.1 Моделирование термической деполимеризации резиста .	10
1.5 Моделирование оплавления резиста на основе аналитического подхода	16
1.6 Моделирование оплавления резиста на основе численного подхода	19
Список литературы	20

Глава 1. Методы формирования структур и моделирования

1.1 Методы формирования трехмерных микро- и наноструктур

1.1.1 Наноимпринтная литография

Наноимпринтная литография (НИЛ) – технология, предназначенная для переноса изображения наноструктуры или электронной схемы на полимерный материал путем прямого воздействия на него специальным штампом [1; 2]. Существуют два основных метода НИЛ – термическая и ультрафиолетовая (УФ). В термической НИЛ штамп вдавливается в полимер, нагретый до температур выше температуры стеклования, затем происходит его охлаждение и извлечение штампа. В ультрафиолетовой НИЛ штамп из материала, прозрачного в УФ области спектра, погружается в жидкий полимер, который отверждается под действием УФ излучения, после чего происходит извлечение штампа. Штамп обычно изготавливается из металла или кремния (для термической НИЛ) и полимеров или кварца (для УФ НИЛ) с помощью электронно-лучевой литографии. Учитывая прямой контакт штампа с основным материалом, а также масштаб печати 1:1, к штампу предъявляются повышенные требования по плоскопараллельности и бездефектности. Перед проведением процесса НИЛ штамп покрывается специальным антиадгезионным покрытием, что позволяет избежать прилипания полимера к штампу при его отделении. Также после печати неизбежно остаётся тонкий остаточный слой полимера, который удаляют с помощью плазменного травления. Преимуществами НИЛ являются простота процесса (при наличии штампа), высокая производительность и возможность достижения высокого разрешения (менее 100 нм). К недостаткам этого метода относятся трудоемкость и дороговизна процесса изготовления штампа надлежащего качества, необходимость частого его обслуживания (удаления остатков основного материала), а также сложность совмещения штампа с низлежащим слоем. Несмотря на то, что технология НИЛ изначально создавалась как альтернатива фотопечати, она нашла широкое применение в различных областях науки и техники.

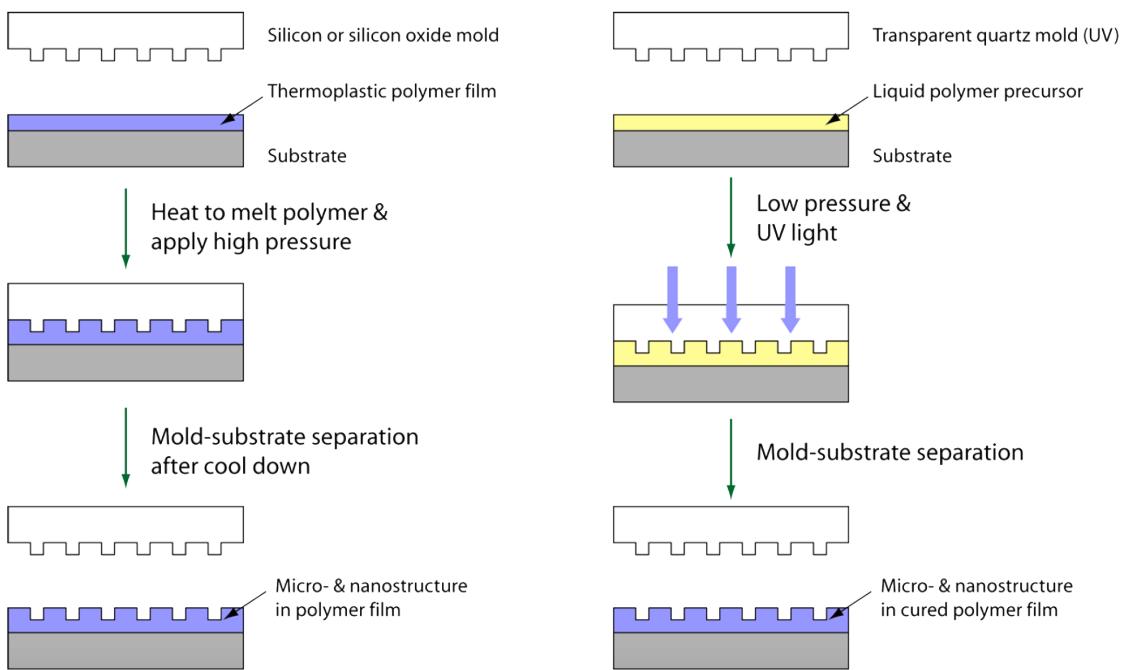


Рисунок 1.1 — Схематическое изображение процессов термической и УФ НИЛ.

и электронно-лучевой литографии, она может применяться для получения трехмерных микро- и наноструктур, таких как фотонные кристаллы [3], микрораканалы [4] и др. [5; 6]

1.1.2 Двухфотонная лазерная литография

Двухфотонная лазерная литография (ДЛЛ) — технология создания микро- и наноструктур, основанная на двухфотонном поглощении внутри фокального объема лазерного излучения [7; 8]. Фотовозбуждение компонент литографической смол приводящее к ее отверждению, происходит лишь в окрестности перетяжки сфокусированного лазерного излучения благодаря нелинейному характеру поглощения. Процесс отверждения имеет пороговый характер, что позволяет регулировать размер отверждаемого объема, изменяя дозу или плотность энергии поглощённого лазерного излучения. Последующее погружение смолы в растворитель приводит к удалению тех участков, которые не были подвергнуты воздействию излучения. В качестве источника излучения в ДЛЛ обычно используется фемтосекундный

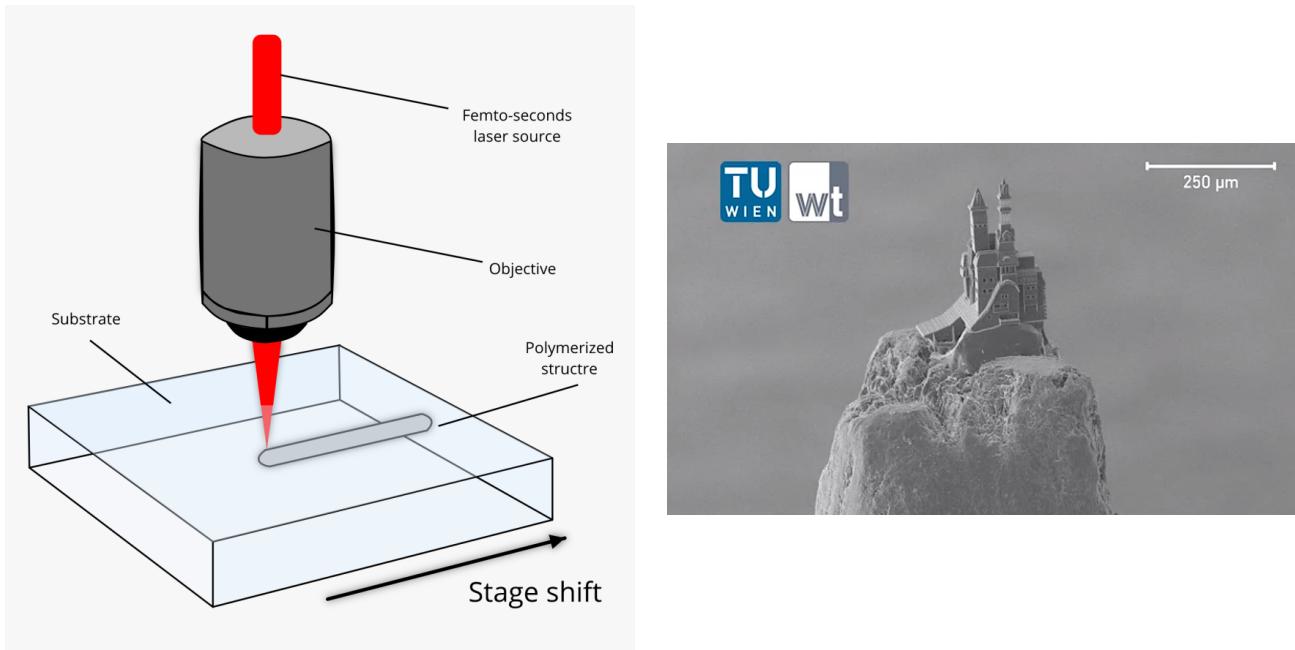


Рисунок 1.2 – Схематическое изображение процесса ДЛЛ и пример структуры.

лазер, работающий в инфракрасном диапазоне, в качестве литографической смолы – вещество, содержащее реакционно-способные олигомеры и фотоинициатор. При точной фокусировке ДЛЛ способна обеспечить разрешение менее 1 мкм. Поскольку в ДЛЛ положение центров отреждения может задаваться произвольно, эта технология нашла применение для формирования трехмерных во многих областях – микрофлюидике [9; 10], биологии и медицины [11; 12], оптике и нанофотонике [13; 14], и др. При этом, си-лу своей природы, данная технология обладает низкой производительностью, что является ее главным недостатком.

1.1.3 Интерференционная литография

Интерференционная литография (ИЛ) – метод формирования периодической структуры в резисте, основанный на экспонировании резиста пространственно упорядоченным стоячим электромагнитным полем, возникающим при интерференции двух и более когерентных монохроматических или квазимонохроматических пучков излучения [15]. Когерентность интерферирующих пучков обычно обеспечивается путем разделения исходного

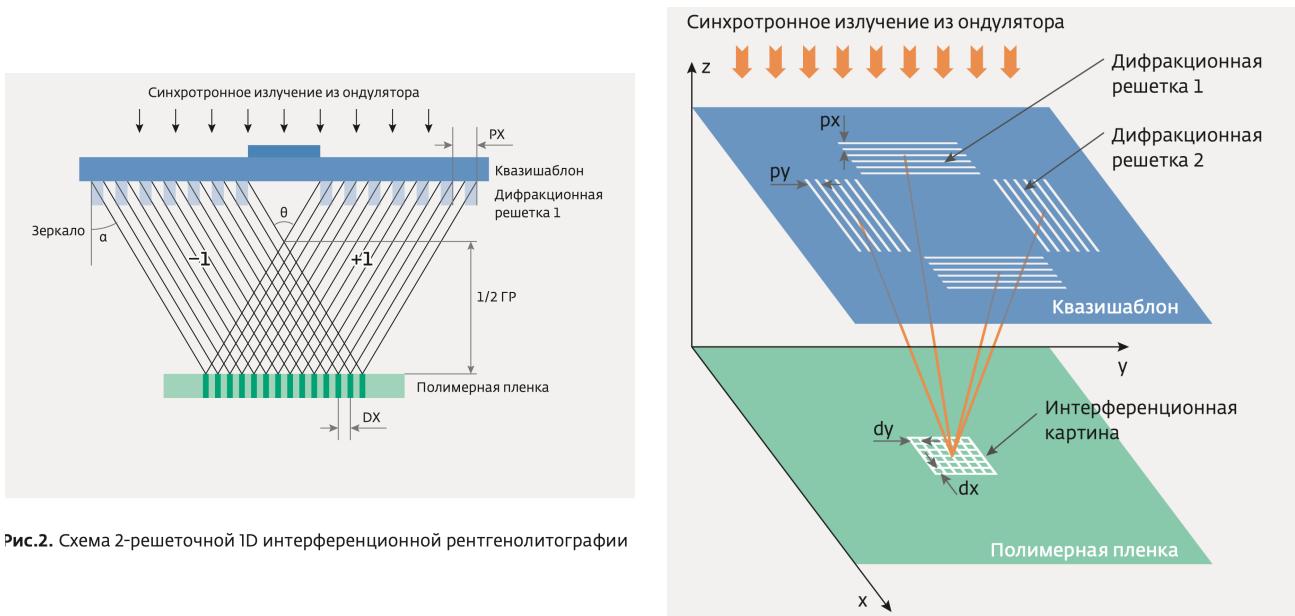


Рисунок 1.3 — Схематическое изображение процесса ИЛ.

когерентного пучка на соответствующее число пучков с помощью различных интерференционных схем. При наноструктурировании ИЛ применяется для получения метаматериалов [16], нанофотонных и наноплазмонных устройств [17], биомедицинских объектов [18], изделий на основе выращиваемыхnanoэлементов и самоорганизующихся структур [19] и др. В оптическом и УФ-диапазонах используются зеркальные схемы (Френеля, Ллойда и др.), схемы на преломляющей оптике (бипризма Френеля, билинза Бийе) или комбинированные зеркально-линзовые схемы. В этих диапазонах в качестве источника исходного пучка с высокой степенью монохроматичности и когерентности используются мощные лазеры, позволяющие получить разрешение до 100 нм. Вопрос обеспечения высокого разрешения ИЛ решается путем перехода в область рентгеновского излучения [20]. К недостаткам метода можно отнести не самую высокую производительность и возможность получения исключительно периодических структур.

1.1.4 Полутоновая литография

Полутоновая литография (ПЛ) – общее название для методов, позволяющих получить сложный трехмерный рельеф в резисте в литографическом

процессе с одной стадией экспонирования [21]. В их основе лежит пространственная модуляция дозы при экспонировании, приводящая к локально-му увеличению или уменьшению скорости растворения резиста при проявлении. Таким образом, конечный рельеф имеет ступенчатую форму и состоит из участков резиста, растворенных в различной степени. Сглаживание границы между участками, проэкспонированных с различными дозами, может быть в дальнейшем достигнуто за счет оплавления образца при температурах вблизи его температуры стеклования. При этом существующие методы моделирования эволюции поверхности полимеров при их оплавлении позволяют использовать этот процесс как дополнительный этап структурирования [22]. Таким образом, полутоновая литография с последующим оплавлением образца является гибкой технологией микро- и наноструктурирования, использующейся в оптике иnanoфотонике [23], микрофлюидике [24], формировании микроэлектромеханических систем [25] и других областях. Существует как электронно-лучевая, так и фото-ПЛ, однако, фото-ПЛ имеет некоторые ограничения, связанные с оплавлением резиста. Так, например, вязкость широко распространенного негативного фоторезиста SU-8 при экспонировании увеличивается, что усложняет процесс контролируемого оплавления [26]. К недостаткам метода можно отнести его сложность и производительность, еще более низкую, чем при электронно-лучевой и фотолитографии за счет дополнительной стадии оплавления образца.

1.1.5 Сканирующая зондовая литография

Сканирующая зондовая литография (СЗЛ) включает в себя семейство технологий формирования структур с наноразмерным разрешением. Каждая из технологий основана на применении специального сканирующего зонда для воздействия на поверхность образца, приводящего к локальным изменениям поверхности. В зависимости от природы воздействия зонда на поверхность можно выделить следующие основные виды СЗЛ:

- механическая, в которой изменение поверхности образца происходит в результате механического воздействия зонда [27];

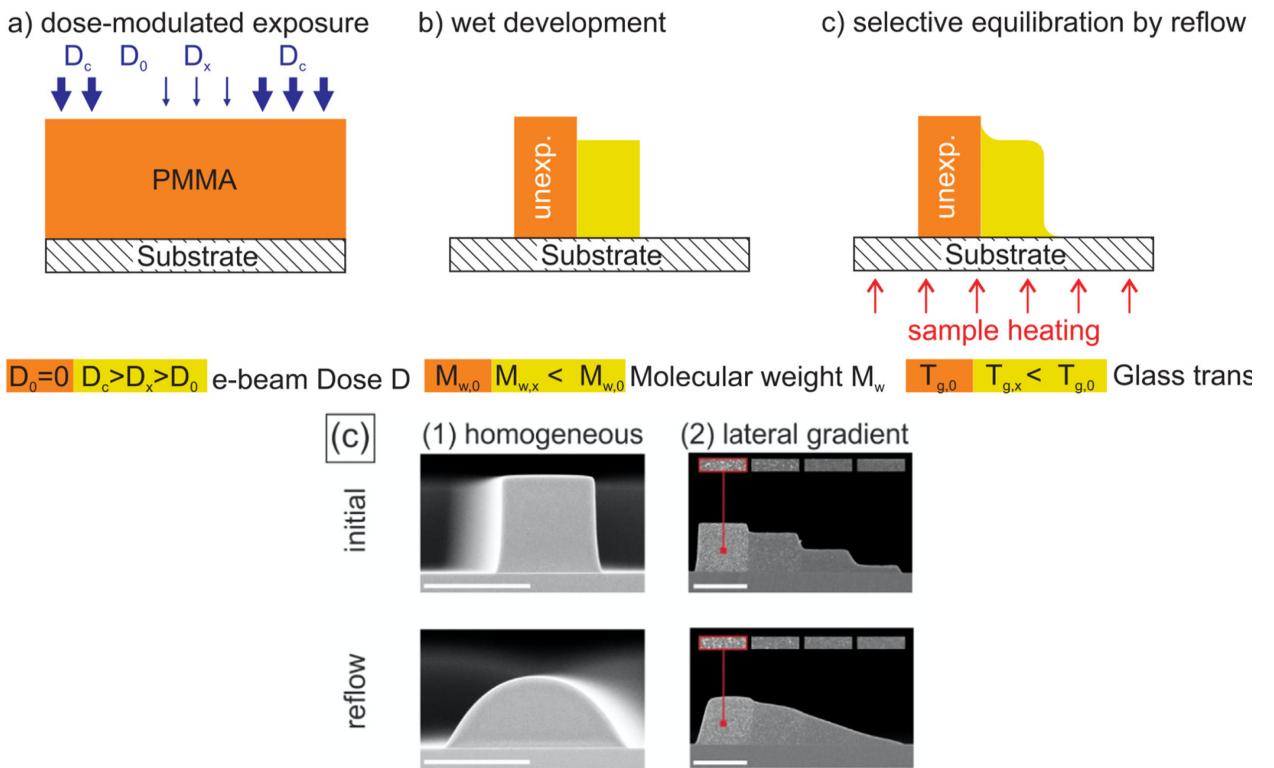


Рисунок 1.4 — Схематическое изображение процесса ПЛ и примеры структур.

- термохимическая, в которой воздействие нагретого зонда на образец приводит к термической активации различных химических реакций в нем [28];
- СЗЛ с приложением напряжения, при которой высокая напряженность электростатического поля в области зонда приводит к разложению молекул жидкости [29] или газа [30], окружающего образец, и локальному отложению материала на образце;
- окислительная СЗЛ, основанная на модификации поверхности путем ее локального окисления [31];
- перьевая СЗЛ, в которой сканирующий зонд используется для нанесения на поверхность образца органических, полимерных или коллоидных наночернил [32; 33]

Поскольку сканирующий зонд воздействует только на поверхность образца, этот метод может быть использован только для послойного формирования рельефа (в отличие от, например, ДЛЛ). Однако, высокое разрешение этой технологии и возможность ее реализации с использованием различных материалов обеспечили ей широкое применение. При этом, как и ДЛЛ, производительность сканирующей зондовой литографии крайне низка.

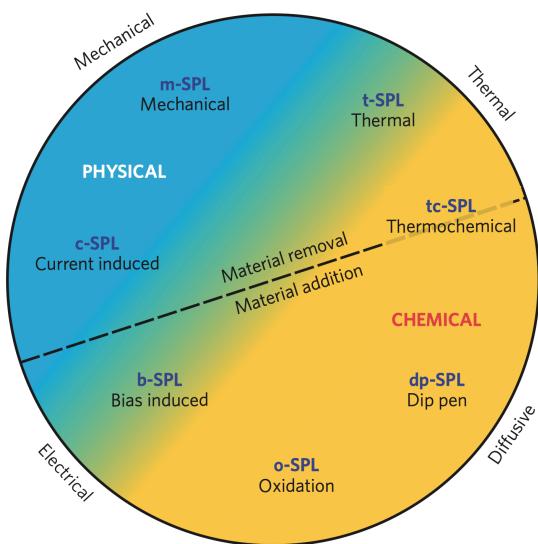


Рисунок 1.5 — Диаграмма, отображающая различные реализации метода СЗЛ.

1.2 Блок-сополимеры

1.3 Методы на основе цепной деполимеризации резиста

Процесс цепной деполимеризации полимерных молекул [34], обратный процессу полимеризации, может быть использован для формирования рельефа в полимерном резисте. Цепная реакция деполимеризации резиста становится возможна при повышенных температуре (выше температуры стеклования резиста), и для инициирования этого процесса требуется нарушение целостности главной цепи полимерной молекулы, приводящее к радикализации концов молекулы в месте разрыва [35]. В процессе цепной деполимеризации резиста от полимерной молекулы последовательно отделяется большое число мономеров (по разным данным от нескольких сотен до нескольких тысяч [36–38]), который вследствие диффузии покидает область, в которой находилась молекула. Это приводит к образованию свободного пространства в резисте, что и позволяет использовать этот процесс для микро- и наноструктурирования.

Существуют два устоявшихся подхода в области формирования трехмерного рельефа в резисте на основе процесса цепной деполимеризации. В

каждом из них нагревание резиста происходит локально, что ограничивает область деполимеризации резиста. Первый подход по своей сути является термической сканирующей зондовой литографией, в который для разрушения целостности полимерных молекул используется нагретый зонд [39]. Разрывы молекул в этом случае происходят случайно за счет повышенной температуры резиста. Во втором подходе используется сфокусированный лазерный луч, который вызывает локальный нагрев резиста и разрушение в главной цепи его молекул [40].

1.3.1 Моделирование слоя полимера

Здесь будет про моделирование слоя полимера - модель идеальной цепи и совмещение цепей.

1.4 Моделирование электронно-стимулированных разрывов полимерных молекул

Количественной характеристикой процесса электронно-стимулированной деградации полимера является радиационно-химический выход разрывов G_s , определяемый как число разрывов молекул полимера, происходящее при выделении в нем энергии 100 эВ:

$$G_s = \frac{N_{scissions}}{100 \text{ эВ}}. \quad (1.1)$$

Экспериментально значение G_s определяется на основе среднечисловых значений молекулярной массы полимера до и после экспонирования (M_n и M_f , соответственно), определяемых методом гель-проникающей хроматографии. При известных M_n и M_f значение G_s может быть определено из выражения [41]:

$$M_f = \frac{M_n}{1 + \frac{G_s E}{100 \rho N_A}} \quad (1.2)$$

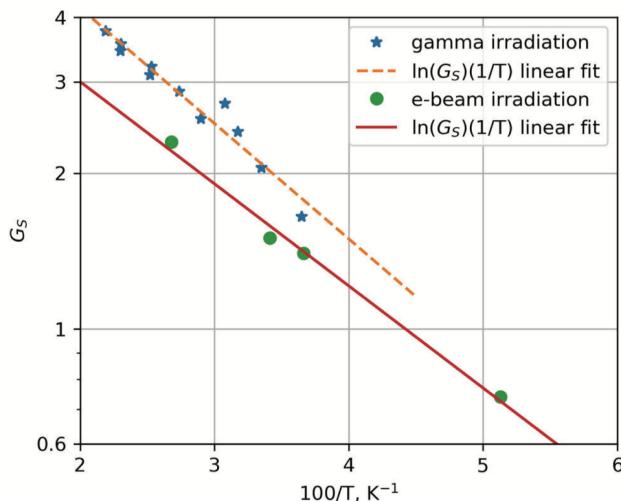


Рисунок 1.6 — Зависимость G_s от T для ПММА при экспонировании гамма- и электронным излучением.

Исходя из различных экспериментов по измерению G_s , его значение для ПММА при экспонировании электронным лучом было принято равным 1.8 [42]. Также было установлено, что при экспонировании гамма- и электронным излучения при различных температурах (T) зависимость $\ln G_s(1/T)$ близка к линейной.

Считается, что электронно-стимулированные разрывы полимерных молекул происходят в результате взаимодействия налетающего электрона с валентными электронами атомов углерода, образующими С—С связь в главной цепи ПММА [43].

1.4.1 Моделирование термической деполимеризации резиста

Термическая деполимеризация полимеров включается в себя процессы возникновения активного центра деполимеризации, его распространения вдоль молекулы полимера и последующего затухания или переноса на новую молекулу [44]. Кинетические схемы этих процессов может быть представлена в следующем виде (обозначения P_n и R_n относятся к стабильной полимерной молекуле и радикализованной полимерной молекуле, соответственно, n – степень полимеризации, R_E – концевой радикал):

Возникновение активного центра деполимеризации



Распространение активного центра деполимеризации



Перенос активного центра деполимеризации



Затухание активного центра деполимеризации



На основе данных кинетические схем можно ввести константы вышеописанных процессов и выразить скорость изменения числа стабильных полимерных молекул P_n и радикализованных полимерных молекул R_n за счет каждого из процессов:

Скорость изменения числа стабильных полимерных молекул P_n

уменьшения P_n за счет разрывов внутри молекулы:

$$k_s(n-1)P_n$$

уменьшения P_n за счет разрывов на концах молекулы:

$$k_E P_n$$

уменьшения P_n за счет переноса активного центра деполимеризации:

$$k_I(R/V)(n-1)P_n$$

увеличение P_n за счет переноса активного центра деполимеризации:

$$k_I \frac{R_n}{V} \sum_{n=2}^{\infty} n P_n + k_r \frac{R}{V} \sum_{j=n+1}^{\infty} P_j$$

увеличение P_n за счет уменьшения числа радикалов:

$$k_T \alpha_n, \alpha_n = \begin{cases} R_n & \text{реакция 1 порядка} \\ R_n R/V & \text{диспропорционирование} \\ \frac{1}{2} \sum_{i+j=n}^{\infty} R_i R_j / V & \text{рекомбинация} \end{cases},$$

где R – полное число радикалов: $R = \sum_{i=1}^{\infty} R_i$

Скорость изменения числа радикализованных полимерных молекул R_n

увеличение R_n за счет разрывов внутри молекулы:

$$2k_S \sum_{j=n+1}^{\infty} P_j$$

увеличение R_n за счет разрывов на концах молекулы:

$$k_E P_n$$

увеличение R_n за счет распространения активного центра деполимеризации:

$$k_P R_{n+1}$$

уменьшение R_n за счет распространения активного центра деполимеризации:

$$k_P R_n$$

увеличение R_n за счет переноса активного центра деполимеризации:

$$k_I \frac{R}{V} \sum_{j=n+1}^{\infty} P_j$$

уменьшение R_n за счет переноса активного центра деполимеризации:

$$\frac{k_I R_n}{V} \sum_{n=2}^{\infty} n P_n$$

уменьшение R_n за счет уменьшения числа радикалов:

$$k_T \beta R_n, \beta = \begin{cases} 1 & \text{реакция 1 порядка} \\ R/V & \text{диспропорционирование или рекомбинация} \end{cases}.$$

Учет всех процессов, приводящих к изменению P_n и R_n , позволяет описать весь полимерный образец системой уравнений, описывающих каждую

степень полимеризации:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dots \\ \frac{dP_n}{dt} = -(n-1)(k_S + k_I R/V) P_n - k_E P_n + k_I R/V \sum_{j=n+1}^{\infty} P_j + k_I R_n \frac{d_0}{m_0} + k_T \alpha_n \\ \dots \\ \frac{dR_n}{dt} = (2k_S + k_I R/V) \sum_{j=n+1}^{\infty} P_j + k_E P_n - \left(\frac{k_I d_0}{m_0} + k_P + k_T \beta \right) R_n + R_P R_{n+1} \\ \dots \\ \frac{dR_1}{dt} = (2k_S + k_I R/V) \frac{W}{xm_0} + \frac{k_E}{m_0} \frac{W}{x} - \left(\frac{k_I d_0}{m_0} + k_T \beta \right) R_1 + k_P R_2, \end{array} \right. \quad (1.3)$$

где m_0 – масса мономера, x – среднечисловая степень полимеризации образца.

В исходном виде система 1.3 включает в себя $2N$ уравнений (N – максимальная степень полимеризации молекул образца), и ее решение представляет собой трудоемкую задачу – не в последнюю очередь за счет суммирования в слагаемых, описывающих эффект переноса активного центра деполимеризации на другую молекулу. Это явление является важной частью процесса полимеризации (в этом случае происходит перенос центра полимеризации) [45], однако его проявление в процессе деполимеризации до сих пор находится под вопросом [37].

Исключение процесса переноса активного центра деполимеризации из рассмотрения, а также предположение о постоянной концентрации радикализованных молекул в слое полимера существенно упрощают систему 1.3. В предположении о инициировании деполимеризации за счет разрывов в про-

извольном месте молекулы она принимает вид [46]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dots \\ dP_n/dt = -(n-1)k_s P_n + k_r R_n \bar{R}, \\ \dots \\ \dots \\ dR_n/dt = 2k_s \sum_{j=n+1}^{\infty} P_j + k_p (R_{n+1} - R_n) - k_T \bar{R} R_n = 0 \quad (n \geq 2) \\ \dots \\ dR_1/dt = 2k_s (W/xm_0) + k_p R_2 - k_T \bar{R} R_1 = 0 \end{array} \right. , \quad (1.4)$$

где $\bar{R} = R/V$.

Решение системы 1.4 упрощается при условии, что распределение молекулярной массы полимера является известным. В этом случае преобразования системы приводят ее к совокупности уравнений вида [46]:

$$\frac{dM_i}{dt} = k_s \left(\frac{2}{i+1} - 1 \right) M_{i+1} + \frac{dM_0}{dt} - k_s M_1 - \frac{i}{\gamma} \left(k_s M_i + \frac{dM_{i-1}}{dt} \right) \quad (i \geq 1), \quad (1.5)$$

где $1/\gamma = k_p/(k_T \bar{R})$ – средняя длина цепи деполимеризации, M_i – момент функции распределения порядка i :

$$M_i = \sum_{n=2}^{\infty} n^i P_n. \quad (1.6)$$

В качестве распределения молекулярной массы полимера может использоваться распределение Шульца-Цимма [46; 47], корректно описывающее полимеры, полученные методом радикальной полимеризации [48]:

$$P_n = C_0 n^z \exp(-n/y) \quad (1.7)$$

где P_n – число молекул степени полимеризации n , C_0 – нормировочный множитель. Параметр z характеризует ширину распределения:

$$M_w/M_N = (z+2)/(z+1), \quad (1.8)$$

где M_n и M_w – среднечисловая и средневесовая молекулярная масса, соответственно, а параметр y определяется из выражения:

$$x = y(z + 1). \quad (1.9)$$

При этом моменты функции распределения высших порядков могут быть выражены через параметры y и z и момент первого порядка M_1 :

$$M_i = M_1 \prod_{n=2}^i (z + n) y^{i-1}. \quad (1.10)$$

Отметим, что M_0 выражает полное число полимерных молекул, M_1 – среднечисловую степень полимеризации.

Далее удобно ввести безразмерные переменные:

$$\begin{aligned} \tau &= y^0 k_s t \\ \tilde{M}_1 &= M_1 / M_1^0 \\ \tilde{y} &= y / y^0 \\ \tilde{\gamma} &= \gamma y^0 \\ \tilde{x} &= x / x^0 = [y(z + 1) / y^0 (z^0 + 1)], \end{aligned} \quad (1.11)$$

которые в дальнейшем используются в уравнениях вида 1.5 для i , равного 1, 2 и 3. В конечном счете система этих трех нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка принимает вид:

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{M}_1'}{\tilde{M}_1} &= \left[\frac{1}{\tilde{y}} \frac{d\tilde{y}}{d\tau} + \frac{1}{(z + 1)} \frac{dz}{d\tau} - \tilde{y}(z + 1) \right] / [1 + \tilde{\gamma}\tilde{y}(z + 1)] \\ \tilde{y}' &= (BF - CE) / (AE - DB) \\ z' &= (CD - AF) / (AE - DB), \end{aligned} \quad (1.12)$$

где

$$\begin{aligned}
 A &= -\left[\frac{1}{\tilde{y}[1 + \tilde{\gamma}\tilde{y}(z+1)]} + \frac{(z+2)\tilde{\gamma}}{(z+2)\tilde{\gamma}\tilde{y}+2} \right] \\
 B &= -\left[\frac{1}{(z+1)[1 + \tilde{\gamma}\tilde{y}(z+1)]} + \frac{\tilde{\gamma}\tilde{y}}{(z+2)\tilde{\gamma}\tilde{y}+2} \right] \\
 C &= \left[\frac{\tilde{y}(z+1)}{\tilde{\gamma}\tilde{y}(z+1)+1} - \frac{\frac{1}{3}(z+2)(z+3)\tilde{\gamma}\tilde{y}^2 + 2(z+2)\tilde{y}}{(z+2)\tilde{\gamma}\tilde{y}+2} \right] \\
 D &= \left[\frac{(z+2)\tilde{\gamma}}{(z+2)\tilde{\gamma}\tilde{y}+2} - \frac{2(z+2)(z+3)\tilde{\gamma}\tilde{y} + 3(z+2)}{(z+2)(z+3)\tilde{\gamma}\tilde{y}^2 + 3(z+2)\tilde{y}} \right] \\
 E &= \left[\frac{\tilde{\gamma}\tilde{y}}{(z+2)\tilde{\gamma}\tilde{y}+2} - \frac{\tilde{\gamma}\tilde{y}(2z+5) + 3}{(z+2)(z+3)\tilde{\gamma}\tilde{y} + 3(z+2)} \right] \\
 F &= \left[\frac{\frac{1}{3}(z+2)(z+3)\tilde{\gamma}\tilde{y}^2 + 2(z+2)\tilde{y}}{(z+2)\tilde{\gamma}\tilde{y}+2} - \right. \\
 &\quad \left. - \frac{\frac{1}{2}(z+2)(z+3)(z+4)(\tilde{\gamma}\tilde{y}^2 + 3(z+2)(z+3)\tilde{y})}{(z+2)(z+3)\tilde{\gamma}\tilde{y} + 3(z+2)} \right]. \tag{1.13}
 \end{aligned}$$

Производные в левой части 1.12 берутся по переменной τ , а сама система решается численно.

1.5 Моделирование оплавления резиста на основе аналитического подхода

Моделирование оплавления резиста может быть проведено аналитически на основе подхода, предложенного для моделирования оплавления периодических структур, полученных методом НИЛ [49; 50]. В его основе лежит Фурье-преобразование профиля резиста $h(t)$:

$$\begin{aligned}
 h(x, t) &= h_0 + \tilde{h}(x, t) \\
 \tilde{h}(x, t) &= \sum_{-\infty}^{+\infty} a_n(t) \exp \left(in \frac{2\pi}{\lambda} x \right), \tag{1.14}
 \end{aligned}$$

где h_0 – средняя высота профиля, λ – пространственный период профиля.

Уравнения Навье-Стокса при условии отсутствия проскальзывания и с учетом расклинивающего и Лапласова давления может быть выражено в

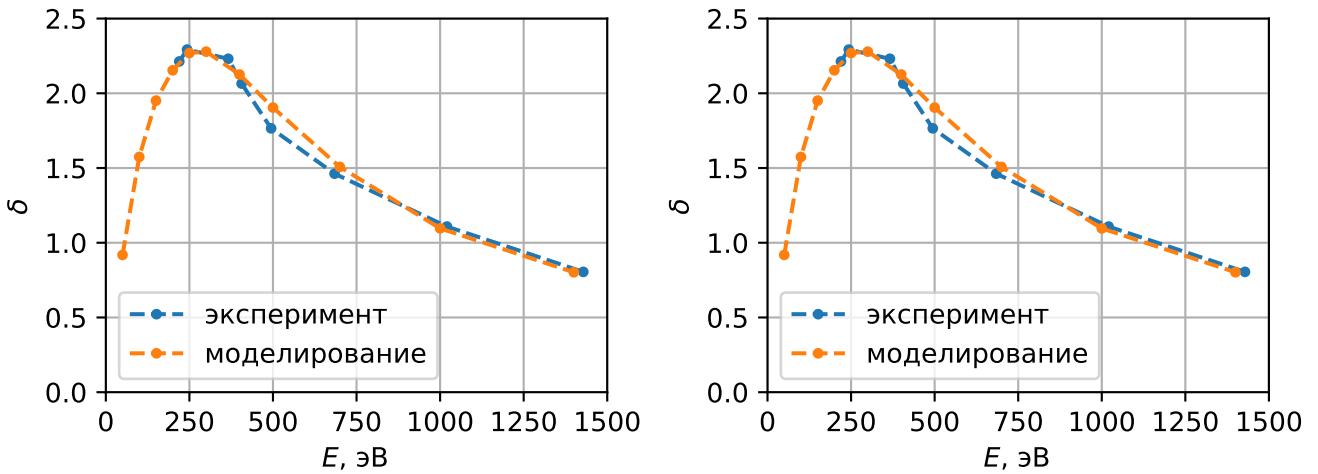


Рисунок 1.7 — An example graph

виде:

$$\partial_t \tilde{h} - \frac{A}{6\pi\eta h_0} \partial_x^2 \tilde{h} + \frac{\gamma h_0^3}{3\eta} \partial_x^4 \tilde{h} = 0, \quad (1.15)$$

где A – постоянная Гамакера, γ – коэффициент поверхностного натяжения резиста.

Его решение приводит к выражению для времени затухания n -й гармоники профиля τ_n :

$$\frac{1}{\tau_n} = \left(n \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \frac{A}{6\pi h_0 \eta} + \left(n \frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 \frac{\gamma h_0^3}{3\eta}. \quad (1.16)$$

При выполнении условия $\left(\frac{h_0^2}{\lambda} \right)^2 \ll \frac{A}{\gamma}$ выражение для τ_n принимает более простой вид:

$$\tau_n = \frac{3\eta}{\gamma h_0^3} \times \left(\frac{\lambda}{2\pi n} \right)^4. \quad (1.17)$$

Результирующий профиль в момент времени t определяется суммой гармоник:

$$\tilde{h}(x, t) = \sum_{-\infty}^{+\infty} a_n(0) \exp \left(-\frac{t}{\tau_n} + i n \frac{2\pi}{\lambda} x \right). \quad (1.18)$$

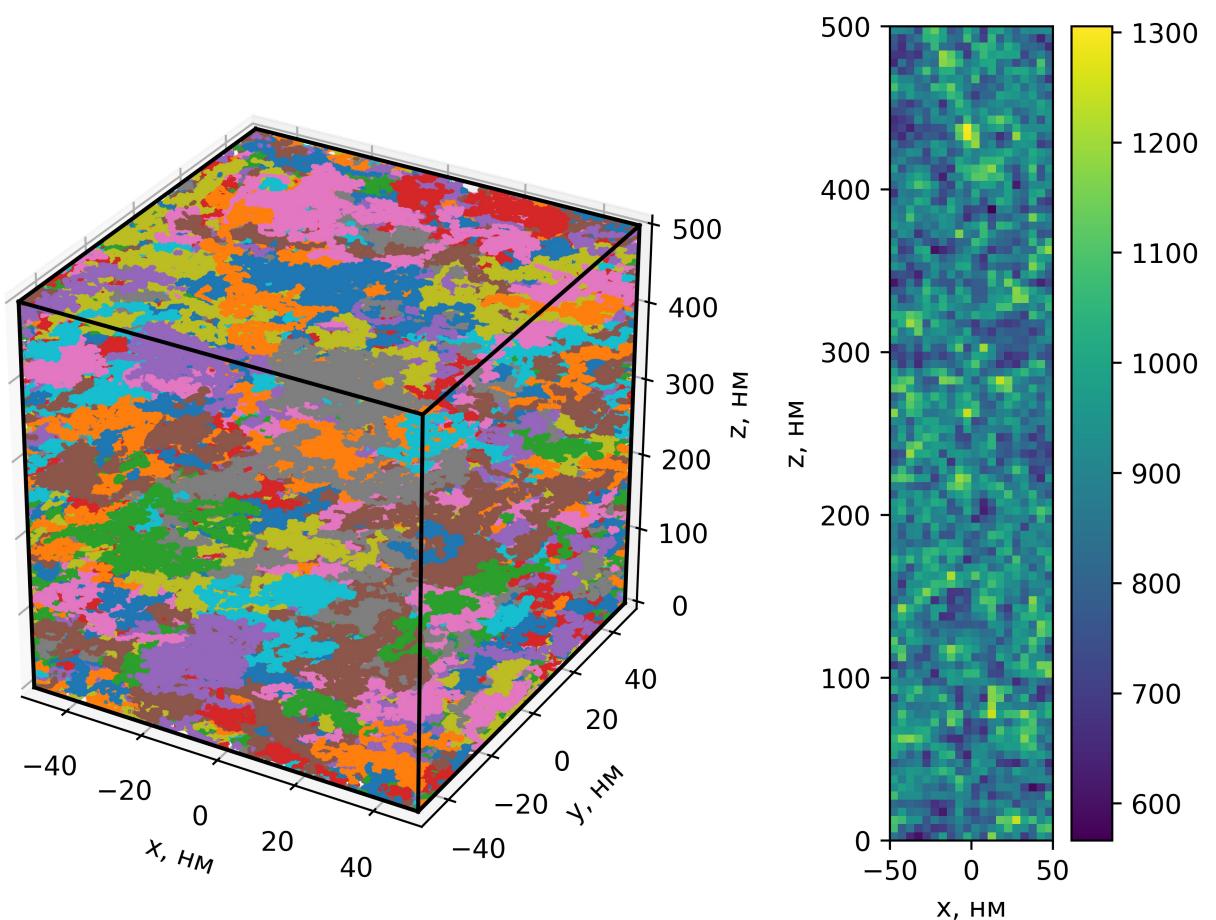


Рисунок 1.8 — An example graph

1.6 Моделирование оплавления резиста на основе численного подхода

Здесь будет про Surface Evolver.

Список литературы

1. *Chou S. Y. Nanoimprint lithography // Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures.* — 1996. — т. 14, № 6. — с. 4129.
2. *Guo L. J. Nanoimprint Lithography: Methods and Material Requirements // Advanced Materials.* — 2007. — т. 19, № 4. — с. 495—513.
3. *Nanoimprint lithography: an enabling technology for nanophotonics / Y. Yao [и др.] // Applied Physics A: Materials Science and Processing.* — 2015. — т. 121, № 2. — с. 327—333.
4. *Guo L. J., Cheng X., Chou C. F. Fabrication of Size-Controllable Nanofluidic Channels by Nanoimprinting and Its Application for DNA Stretching // Nano Letters.* — 2004. — т. 4, № 1. — с. 69—73.
5. *Konijn M., Alkaisi M. M., Blaikie R. J. Nanoimprint lithography of sub-100 nm 3D structures // Microelectronic Engineering.* — 2005. — т. 78/79, № 1—4. — с. 653—658.
6. *High Quality 3D Photonics using Nano Imprint Lithography of Fast Sol-gel Materials / O. Bar-On [и др.] // Scientific Reports.* — 2018. — т. 8, № 1. — с. 1—7.
7. *Three-Dimensional μ -Printing: An Enabling Technology / J. K. Hohmann [и др.] // Advanced Optical Materials.* — 2015. — т. 3, № 11. — с. 1488—1507.
8. *Finer features for functional microdevices / S. Kawata [и др.] // Nature.* — 2001. — т. 412, № 6848. — с. 697—698.
9. *3D printed microfluidic devices: enablers and barriers / S. Waheed [и др.] // Lab on a Chip.* — 2016. — т. 16, № 11. — с. 1993—2013.
10. *Dittrich P. S., Schwille P. Spatial Two-Photon Fluorescence Cross-Correlation Spectroscopy for Controlling Molecular Transport in Microfluidic Structures // Analytical Chemistry.* — 2002. — т. 74, № 17. — с. 4472—4479.

11. Biomimicry at the nanoscale: current research and perspectives of two-photon polymerization / A. Marino [и др.] // Nanoscale. — 2015. — т. 7, № 7. — с. 2841—2850.
12. Two-Photon Polymerization of Sub-micrometric Patterned Surfaces: Investigation of Cell-Substrate Interactions and Improved Differentiation of Neuron-like Cells / A. Marino [и др.] // ACS Applied Materials & Interfaces. — 2013. — т. 5, № 24. — с. 13012—13021 ; — PMID: 24309089.
13. 3D-printed eagle eye: Compound microlens system for foveated imaging / S. Thiele [и др.] // Science Advances. — 2017. — т. 3, № 2.
14. Three-Dimensional Nanostructures for Photonics / G. von Freymann [и др.] // Advanced Functional Materials. — 2010. — т. 20, № 7. — с. 1038—1052.
15. Lu C., Lipson R. H. Interference lithography: A powerful tool for fabricating periodic structures // Laser and Photonics Reviews. — 2010. — т. 4, № 4. — с. 568—580.
16. Large-area magnetic metamaterials via compact interference lithography / N. Feth [и др.] // Optics Express. — 2007. — т. 15, № 2. — с. 501.
17. Fabrication of three-dimensional polymer photonic crystal structures using single diffraction element interference lithography / I. Divlansky [и др.] // Applied Physics Letters. — 2003. — т. 82, № 11. — с. 1667—1669.
18. Holographic lithography for biomedical applications / E. Stankevicius [и др.] // Laser Sources and Applications. — 2012. — т. 8433. — с. 843312.
19. A path to ultranarrow patterns using self-assembled lithography / Y. S. Jung [и др.] // Nano Letters. — 2010. — т. 10, № 3. — с. 1000—1005.
20. Arrays of nanoscale magnetic dots: Fabrication by x-ray interference lithography and characterization / L. J. Heyderman [и др.] // Applied Physics Letters. — 2004. — т. 85, № 21. — с. 4989—4991.
21. Grayscale lithography—automated mask generation for complex three-dimensional topography / J. Loomis [и др.] // Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS. — 2016. — т. 15, № 1. — с. 013511.

22. Kirchner R., Schift H. Mobility based 3D simulation of selective , viscoelastic polymer reflow using surface evolver Mobility based 3D simulation of selective , viscoelastic polymer reflow. — 2014.
23. Development of a deep silicon phase fresnel lens using gray-scale lithography and deep reactive ion etching / B. Morgan [и др.] // Journal of Microelectromechanical Systems. — 2004. — т. 13, № 1. — с. 113–120.
24. Nock V., Blaikie R. J. Fabrication of optical grayscale masks for tapered microfluidic devices // Microelectronic Engineering. — 2008. — т. 85, № 5/6. — с. 1077–1082.
25. Maskless direct write grayscale lithography for MEMS applications / C. McKenna [и др.] // Biennial University/Government/Industry Microelectronics Symposium - Proceedings. — 2010.
26. Kirchner R., Schift H. Thermal reflow of polymers for innovative and smart 3D structures: A review // Materials Science in Semiconductor Processing. — 2019. — т. 92, March. — с. 58–72.
27. Plow and ridge nanofabrication / W. Shim [и др.] // Small. — 2013. — т. 9, № 18. — с. 3058–3062.
28. High-speed, sub-15 nm feature size thermochemical nanolithography / R. Szoszkiewicz [и др.] // Nano Letters. — 2007. — т. 7, № 4. — с. 1064–1069.
29. High-field scanning probe lithography in hexadecane: Transitioning from field induced oxidation to solvent decomposition through surface modification / I. Suez [и др.] // Advanced Materials. — 2007. — т. 19, № 21. — с. 3570–3573.
30. Nanopatterning of carbonaceous structures by field-induced carbon dioxide splitting with a force microscope / R. Garcia [и др.] // Applied Physics Letters. — 2010. — т. 96, № 14. — с. 1–4.
31. Modification of hydrogen-passivated silicon by a scanning tunneling microscope operating in air / J. A. Dagata [и др.] // Applied Physics Letters. — 1990. — т. 56, № 20. — с. 2001–2003.

32. Applications of dip-pen nanolithography // Nature Nanotechnology. — 2007. — т. 2, № 3. — с. 145—155.
33. Controlling the number of proteins with dip-pen nanolithography / E. Bellido [и др.] // Advanced Materials. — 2010. — т. 22, № 3. — с. 352—355.
34. Simha R., Wall L. A., Blatz P. J. Depolymerization as a chain reaction // Journal of Polymer Science. — 1950. — окт. — т. 5, № 5. — с. 615—632.
35. Cowley P. R. E. J., Melville H. W. The photo-degradation of polymethylmethacrylate II. Evaluation of absolute rate constants for a depolymerization reaction // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences. — 1952. — март. — т. 211, № 1106. — с. 320—334.
36. Madorsky S. L. Thermal degradation of organic polymers. — New York : Interscience Publishers, 1964.
37. Mita I., Obata K., Horie K. Photoinitiated Thermal Degradation of Polymers II. Poly(methyl methacrylate) // Polymer Journal. — 1990. — май. — т. 22, № 5. — с. 397—410.
38. Inaba A., Kashiwagi T., Brown J. E. Effects of initial molecular weight on thermal degradation of poly(methyl methacrylate): Part 1-Model 1 // Polymer Degradation and Stability. — 1988. — т. 21, № 1. — с. 1—20.
39. Probe-Based 3-D Nanolithography Using Self-Amplified Depolymerization Polymers / A. W. Knoll [и др.] // Advanced Materials. — 2010. — апр. — т. 22, № 31. — с. 3361—3365.
40. Li K., Oprysko M. M. Laser writing on a novel bilayer resist structure // Applied Physics Letters. — 1985. — май. — т. 46, № 10. — с. 997—999.
41. Greeneich J. S. Impact of electron scattering on linewidth control in electron-beam lithography // Journal of Vacuum Science and Technology. — 1979. — нояб. — т. 16, № 6. — с. 1749—1753.
42. Charlesby A., Moore N. Comparison of gamma and ultra-violet radiation effects in polymethyl methacrylate at higher temperatures // The International Journal of Applied Radiation and Isotopes. — 1964. — дек. — т. 15, № 12. — с. 703—708.

43. *Aktary M., Stepanova M., Dew S. K.* Simulation of the spatial distribution and molecular weight of polymethylmethacrylate fragments in electron beam lithography exposures // Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures. — 2006. — т. 24, № 2. — с. 768.
44. *Boyd R. H.* Theoretical Depolymerization Kinetics in Polymers Having an Initial “Most Probable” Molecular Weight Distribution // The Journal of Chemical Physics. — 1959. — авг. — т. 31, № 2. — с. 321—328.
45. *Gridnev A. A., Ittel S. D.* Catalytic Chain Transfer in Free-Radical Polymerizations // Chemical Reviews. — 2001. — дек. — т. 101, № 12. — с. 3611—3660.
46. *Boyd R. H., Lin T.-P.* Theoretical Depolymerization Kinetics. III. The Effect of Molecular-Weight Distribution in Degrading Polymers Undergoing Random-Sission Initiation // The Journal of Chemical Physics. — 1966. — авг. — т. 45, № 3. — с. 778—781.
47. *Kotliar A. M.* Evaluation of molecular weight averages resulting from random chain scission process for wide distributions as in polyolefins // Journal of Polymer Science Part A: General Papers. — 1964. — март. — т. 2, № 3. — с. 1057—1067.
48. *Turgman-Cohen S., Genzer J.* Computer Simulation of Controlled Radical Polymerization: Effect of Chain Confinement Due to Initiator Grafting Density and Solvent Quality in “Grafting From” Method // Macromolecules. — 2010. — нояб. — т. 43, № 22. — с. 9567—9577.
49. *Leveder T., Landis S., Davoust L.* Reflow dynamics of thin patterned viscous films // Applied Physics Letters. — 2008. — т. 92, № 1. — с. 90—93.
50. Reflow of supported sub-100 nm polymer films as a characterization process for NanoImprint lithography / Т. Leveder [и др.] // Microelectronic Engineering. — 2011. — авг. — т. 88, № 8. — с. 1867—1870.