

---

---

## МОДЕЛИРОВАНИЕ

---

УДК 621.382

# КИНЕТИКА ЭКСПОНИРОВАНИЯ СЛОЯ ПОЗИТИВНОГО ФОТОРЕЗИСТА НА ОПТИЧЕСКИ СОГЛАСОВАННОЙ ПОДЛОЖКЕ

© 2025 г. В. П. Кудря

Физико-технологический институт им. К.А. Валиева РАН

Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”, Москва, Россия

E-mail: kyp@ftian.ru

Поступила в редакцию 24.09.2024 г.

После доработки 20.02.2025 г.

Принята к публикации 20.02.2025 г.

Проведен анализ ряда работ, посвященных моделированию процесса экспонирования фотоактивного слоя, лежащего на оптически согласованной подложке. Показана связь уравнений Дилла с ранее полученными системами уравнений. Последовательно рассмотрены способы сведения системы двух уравнений Дилла в частных производных к обыкновенным дифференциальным уравнениям, точность численного решения которых можно легко контролировать. Предложена процедура использования таких уравнений для характеристизации фотохимических свойств позитивных фоторезистов.

**Ключевые слова:** экспонирование позитивных фоторезистов, характеристизация позитивных фоторезистов, моделирование экспонирования позитивных фоторезистов

**DOI:** 10.31857/S0544126925010034, **EDN:** GIKWRO

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Модель Дилла и соответствующие ей два дифференциальных уравнения первого порядка в частных производных, описывающие динамику экспонирования слоя позитивного фоторезиста, широко используются для численного моделирования процесса фотолитографии (см., например, [1]). С другой стороны, подобные уравнения ранее были предложены в литературе для описания динамики фотохимических процессов в слоях, содержащих фотоактивные компоненты. Более того, в частном случае отсутствия поглощения другими компонентами было получено аналитическое решение этих уравнений. Интерес также представляют результаты, касающиеся сведения уравнений Дилла к обыкновенным дифференциальным уравнениям первого порядка.

Настоящая работа посвящена краткому изложению эволюции моделей экспонирования фотоактивного слоя, рассмотрению частного случая, в котором удается получить аналитическое решение системы двух дифференциальных уравнений первого порядка в частных производных, а также сведению этих уравнений к обыкновенным дифференциальным уравнениям первого порядка. В последнем разделе предложена процедура обработки экспериментальной зависимости коэффициента пропускания слоя позитивного фот-

орезиста, лежащего на оптически согласованной подложке, от времени экспонирования с целью получения численных значений коэффициентов модели Дилла. В предложенной процедуре для увеличения точности решения используется упомянутое выше обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка.

## 2. ЭВОЛЮЦИЯ МОДЕЛЕЙ ЭКСПОНИРОВАНИЯ ФОТОАКТИВНОГО СЛОЯ

Экспоненциальный закон ослабления интенсивности света при прохождении через поглощающую среду был экспериментально установлен П. Бугером в 1729 г., его теоретическое обоснование было получено И. Ламбертом в 1760 г., а связь между коэффициентом поглощения и концентрацией поглощающих молекул в растворе была установлена А. Бером в 1852 г. Соответствующий закон уменьшения интенсивности света в среде  $I(x)$  носит название закона Бугера–Ламберта–Бера

$$\frac{dI(x)}{dx} = -\kappa I(x)n, \quad (1)$$

где  $\kappa$  – молекулярный коэффициент поглощения ( $\text{м}^2$ ), который также называется сечением поглощения излучения одной молекулой;  $n$  – концен-

трация поглощающих молекул ( $\text{м}^{-3}$ ). Отметим, что уравнение (1) соответствует случаю, когда взаимодействие света с поглощающей молекулой не приводит к ее изменению (например, фотораспаду).

В 1922 г. Р. Вегшайдер опубликовал обширную работу по кинетике фотохимических реакций [2]. В ней, в частности, была рассмотрена задача прохождения света через слой вещества, образованного фотоактивными молекулами и невзаимодействующим со светом компонентом (матрицей). Предполагалось, что поглощение света осуществляется только фотоактивными молекулами, которые в результате фотохимической реакции распадаются, причем продукты распада уже не являются фотоактивными и никак не влияют на прохождение света. Для интенсивности света и концентрации фотоактивных молекул была предложена система уравнений в частных производных:

$$\begin{aligned}\frac{\partial I(x, t)}{\partial x} &= -\kappa I(x, t)n(x, t), \\ \frac{\partial n(x, t)}{\partial t} &= -\varphi\kappa I(x, t)n(x, t),\end{aligned}\quad (2)$$

где  $\varphi$  — выход реакции распада фотоактивных молекул в результате поглощения света ( $\text{Дж}^{-1}$ ).

Таким образом, к уравнению (1) Вегшайдер добавил дифференциальное уравнение, описывающее скорость уменьшения концентрации фотоактивных молекул. В результате процесс стал не только пространственно неоднородным, но, в отличие от предыдущего случая, еще и нестационарным, что обусловило использование для его описания системы дифференциальных уравнений в частных производных.

Отметим, что фактически такая же фотохимическая модель была впоследствии предложена в работе К. Херрика [3] для позитивного диазотипного процесса. Для плотности фотоактивных молекул, проинтегрированной по толщине слоя, в указанной работе приведены дифференциальные уравнения (написанные, впрочем, не вполне корректно). Можно показать, что эти уравнения после ряда преобразований приводятся к уравнениям (2).

В приложении к работе [4] со ссылкой на частное сообщение 1947 года известного американского физика Дж. Кирквуда (J.G. Kirkwood) без комментариев приводится система уравнений для описания фотохимической кинетики в слое с учетом поглощения света матрицей, в которой находятся фотоактивные молекулы:

$$\begin{aligned}\frac{\partial I(x, t)}{\partial x} &= -\mu I(x, t) - \kappa I(x, t)n(x, t), \\ \frac{\partial n(x, t)}{\partial t} &= -\varphi\kappa I(x, t)n(x, t),\end{aligned}\quad (3)$$

где  $\mu$  — коэффициент поглощения света матрицей. Указанное слагаемое делает модель Кирквуда бо-

лее адекватной для описания фотохимической кинетики в реальных фотоактивных слоях.

В той же работе изложена модель самого К. Херрика, в которой, кроме поглощения света матрицей, учитывается также поглощение света продуктами распада фотоактивных молекул. Нетрудно показать, что в интересующем нас случае  $n(x, 0) = n_0$ , типичном для слоев фоторезиста, уравнения Херрика сводятся к уравнениям Кирквуда с некоторыми эффективными коэффициентами  $\mu$  и  $\kappa$ .

Наконец, в 1973 году Ф. Дилл и Э. Нойройтер представили доклад на конференции Solid-State Device Research [5], а в 1974–1975 годах опубликовали несколько статей, в которых изложили модель экспонирования позитивного фоторезиста, состоящего из пленкообразующего компонента (смолы) и ингибитора растворения этой смолы (фотоактивного компонента). (Отметим, что в литературе эта модель называется моделью Дилла.) Модель включает два дифференциальных уравнения (см., например, [6]):

$$\begin{aligned}\frac{\partial I(x, t)}{\partial x} &= -[AM(x, t) + B]I(x, t); \\ \frac{\partial M(x, t)}{\partial t} &= -CM(x, t)I(x, t),\end{aligned}\quad (4)$$

где  $M$  — относительная концентрация ингибитора,  $A$  — оптическое поглощение за счет ингибитора,  $B$  — оптическое поглощение за счет смолы,  $C$  характеризует оптическую чувствительность ингибитора. Фактически, это уравнения Кирквуда, причем, в типичном для фотолитографии предположении  $n(x, 0) = n_0$ , имеют место соотношения, связывающие коэффициенты двух моделей,

$$M(x, t) = \frac{n(x, t)}{n_0}; \quad A = \kappa n_0, \quad B = \mu, \quad C = \varphi\kappa. \quad (5)$$

Интересно отметить, что в работе [7] было показано, как уравнения Дилла можно получить из уравнений, фактически полученных Херриком в работе [4].

Большим достоинством модели Дилла, обеспечившим ей широкое распространение в программах моделирования процесса фотолитографии, является то, что коэффициенты  $A$ ,  $B$  и  $C$  считаются параметрами модели. Их значения могут быть получены с помощью процедуры подгонки решения этих уравнений к экспериментальной зависимости, например, коэффициента пропускания пленки фоторезиста от дозы экспозиции. В оставшейся части статьи все преобразования мы будем проводить для системы уравнений (4).

Важно подчеркнуть, что приведенные выше системы уравнений относятся только к полубесконечной среде или к слою, лежащему на оптически согласованной (без отражения от интерфейса) подложке. Если оптическое согласование с подложкой отсутствует, то в эту систему необходимо добавить

уравнение, описывающее пространственное распределение интенсивности света в слое с учетом интерференции прямой волны с волнами, отраженными от верхнего и нижнего (нижних) интерфейсов.

### 3. АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ ВЕГШАЙДЕРА

Как показано в работе [2], уравнения (2) имеют аналитическое решение. Поскольку в указанной работе описание процедуры получения этого решения довольно громоздкое и занимает две страницы, в Приложении А приведена более простая последовательность преобразований, результирующим является обыкновенное дифференциальное уравнение Ферхольста, имеющее аналитическое решение:

$$\begin{aligned} M(x, t) &= \frac{1}{[1/M(0, t) - 1]\exp(-Ax)} = \\ &= \frac{\exp(Ax)}{\exp(CI_0 t) - 1 + \exp(Ax)}. \end{aligned} \quad (6)$$

Подстановка этого решения в уравнение Вегшайдера для интенсивности после несложных преобразований дает аналитическое решение и для интенсивности:

$$T(x, t) = \frac{I(x, t)}{I_0} = \frac{\exp(CI_0 t)}{\exp(CI_0 t) - 1 + \exp(Ax)}, \quad (7)$$

где  $T(x, t)$  коэффициент пропускания фотоактивного слоя толщиной  $x$  в момент времени  $t$ , скорректированный на отражение от интерфейса воздух-слой.

Наконец, для величины локальной дозы экспозиции

$$E(x, t) = \int_0^t dr' I(x, t'), \quad I(x, t) = \frac{\partial E(x, t)}{\partial t}. \quad (8)$$

также можно получить аналитическое решение

$$\begin{aligned} E(x, t) &= \frac{1}{C} \ln \{1 + \exp(-Ax) [\exp(CI_0 t) - 1]\} = \\ &= \frac{1}{C} \ln \{1 + \exp(-Ax) [\exp(CE_0(t)) - 1]\}, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $E_0(t) = I_0 t$ .

Решения (6), (7) и (9) могут использоваться в качестве тестовых для верификации программ численного решения уравнений Дилла в частном случае  $B = 0$ .

### 4. ПЕРЕХОД К ОБЫКНОВЕННЫМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ УРАВНЕНИЯМ

Для численного решения уравнений Дилла была предложена конечно-разностная схема, которая заключалась в поочередном решении простейших

конечно-разностных уравнений для  $M$  (при фиксированном распределении  $I(x)$ ) и для  $I$  (при фиксированном распределении  $M(x)$ ) (см., например, [8]). Такая схема имеет низкую точность и, кроме того, требует согласованного подбора пространственного и временного шагов. Преобразование уравнений Дилла к обыкновенным дифференциальным уравнениям позволяет использовать более точные разностные схемы (см., например, [9]) и устраняет проблему согласования шагов.

В приложении к работе [4] без вывода приведено дифференциальное уравнение, которое Дж. Кирквуд получил для  $M(x, t)$ . В обозначениях модели Дилла это уравнение имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \ln M(x, t) + A \int_0^x dx' M(x', t) \exp[B(x' - x)] \right\} = \\ = -CI_0 \exp(-Bx). \end{aligned} \quad (10)$$

В Приложении Б показано, что с помощью последовательности преобразований это уравнение может быть приведено ко второму уравнению Дилла. Поскольку эти преобразования обратимы, уравнение (10) действительно может быть получено из уравнений Дилла.

Проинтегрируем уравнение (10) по времени

$$\begin{aligned} \ln M(x, t) + Ae^{-Bx} \int_0^x dx' [M(x', t) - 1] e^{Bx'} = \\ = -CI_0 e^{-Bx} t, \end{aligned} \quad (11)$$

продифференцируем полученное уравнение по  $x$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \ln M(x, t)}{\partial x} - ABe^{-Bx} \int_0^x dx' [M(x', t) - 1] e^{Bx'} + \\ + A[M(x, t) - 1] - BCI_0 e^{-Bx} t = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

и подставим в него выражение для интеграла из уравнения (10). В результате получаем обыкновенное дифференциальное уравнение для относительной концентрации фотоактивного компонента (при этом  $t$  – параметр):

$$\frac{d \ln M(x, t)}{dx} + B \ln M(x, t) - A[1 - M(x, t)] = 0 \quad (13)$$

с начальным условием

$$M(0, t) = \exp(-CI_0 t). \quad (14)$$

Будем называть уравнение (13) с начальным условием (14) уравнением Кирквуда.

Из второго уравнения Дилла можно получить соотношение между  $M(x, t)$  и  $E(x, t)$

$$M(x, t) = \exp[-CE(x, t)]. \quad (15)$$

Подстановкой этого выражения в (14) можно получить обыкновенное дифференциальное уравнение для локальной дозы экспозиции (при этом  $t$  – параметр)

$$\frac{dE(x,t)}{dx} = -\frac{A}{C}\{1 - \exp[-CE(x,t)]\} - BE(x,t) \quad (16)$$

с начальным условием

$$E(0,t) = I_0 t. \quad (17)$$

Отметим, что уравнение (16) было получено в работе [4] другим способом, поэтому вместе с начальным условием (17) будем называть его уравнением Херрика.

Поскольку функции  $M(x, t)$  и  $E(x, t)$  связаны простым соотношением (15), для получения распределения  $M(x)$  при заданном  $t$  можно использовать любое из полученных уравнений.

## 5. ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ ФОТОХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЗИТИВНЫХ ФОТОРЕЗИСТОВ

Характеризация фотохимических свойств позитивного фоторезиста заключается в нахождении значений коэффициентов  $A$ ,  $B$  и  $C$ . Экспериментально измеряемой оптической характеристикой слоя фоторезиста толщиной  $d$ , лежащего на оптически согласованной подложке, является зависимость его коэффициента пропускания от дозы (или времени) экспонирования на длине волны актиничного излучения ([10]). Выражение для указанного коэффициента пропускания, скорректированного на отражение от интерфейса воздух–слой, можно получить путем интегрирования первого уравнения Дилла ([7])

$$T(t) = \frac{I(d,t)}{I_0} = \exp \left\{ - \int_0^d dx [AM(x,t) + B] \right\} = \\ = \exp \left\{ - \int_0^d dx [A \exp[-CE(x,t)] + B] \right\}. \quad (18)$$

Известно ([7]), что коэффициенты пропускания, полученные в двух предельных случаях,

$$T_0 = T(0) = \frac{I(d,0)}{I_0} = \exp \left[ - \int_0^d dx (A + B) \right] = \\ = \exp[-(A + B)d], \quad (19)$$

$$T_\infty = T(\infty) = \frac{I(d,\infty)}{I_0} = \exp \left( - \int_0^d dx B \right) = \exp(-Bd), \quad (20)$$

позволяют сразу определить два параметра модели Дилла:

$$A = \frac{1}{d} \ln \frac{T_\infty}{T_0}, \quad B = \frac{1}{d} \ln \frac{1}{T_\infty}. \quad (21)$$

Для определения параметра  $C$  в работе [7] было предложено вычислять скорость изменения коэффициента пропускания в момент времени  $t = 0$  из экспериментальных данных. Действительного, из первого интегрального выражения для коэффициента пропускания и второго уравнения Дилла следует, что

$$\frac{dT(t)}{dt} = -T(t)A \int_0^d dx \frac{\partial M(x,t)}{\partial x} = \\ = ACT(t) \int_0^d dx M(x,t)I(x,t). \quad (22)$$

Отсюда легко получить, что в начальный момент времени

$$C = \left. \frac{dT(t)}{dt} \right|_{t=0} \frac{A + B}{AI_0 T_0 (1 - T_0)}. \quad (23)$$

Полученные таким образом значения коэффициентов  $A$ ,  $B$  и  $C$  используются в работе [7] в качестве начального приближения для переменных в итерационной процедуре минимизации среднеквадратичного отклонения расчетной зависимости  $T^{\text{calc}}(t)$  от экспериментальной, которая включает в себя многократное решение уравнений Дилла.

Можно предложить более экономный способ определения коэффициентов  $A$ ,  $B$  и  $C$ . Будем считать, что для конкретной экспериментальной зависимости  $T^{\text{expt}}(t)$  величины коэффициентов  $A$  и  $B$  точно определяются формулами (21), а подгонка расчетной зависимости  $T^{\text{calc}}(t)$  к экспериментальной используется для определения величины коэффициента  $C$ , например, вычисленной по формуле (23). Далее, при некотором значении  $t^*$ , соответствующем, например, экспериментальному значению коэффициента пропускания  $0.5(T_{\min}^{\text{expt}} + T_{\max}^{\text{expt}})$ , решается уравнение Кирквуда или Херрика для пробного значения коэффициента  $C$  с одновременным вычислением интеграла (18), вычисляется значение  $T(t^*)$  и сравнивается с экспериментально полученным значением. Если теоретическое значение коэффициента меньше экспериментального значения, то увеличивают значение коэффициента  $C$  и повторяют процедуру. В противном случае значение коэффициента  $C$  уменьшается. Процедуру поиска решения можно оптимизировать, используя один из методов, изложенных, например, в [11].

Описанную процедуру следует повторить несколько раз для экспериментальных кривых  $T^{\text{expt}}(t)$ , снятых в разных точках подложки, чтобы определить средние значения коэффициентов и их среднеквадратичные отклонения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье проведен анализ ряда работ, посвященных моделированию процесса экспонирования фототактического слоя, лежащего на оптически согласованной подложке. Показана связь уравнений Дилла с ранее полученными системами уравнений. Последовательно рассмотрены способы сведения системы двух уравнений Дилла в частных производных к обыкновенным дифференциальным уравнениям, точность численного решения которых можно легко контролировать. Предложена процедура использования таких уравнений для характеризации фототактических свойств позитивных фоторезистов.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках Государственного задания ФТИАН им. К.А. Валиева РАН по теме № FFNN-2022-0019.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технология СБИС. Кн. 2. Под ред. С. Зи. М.: Мир. 1986. 453 с. [VLSI Technology. Edited by S. M. Sze. McGraw-Hill Book Company, New York, 1983]
2. Wegscheider R. Beiträge zur photochemischen Kinetik // Zeitschrift für Physikalische Chemie. 1922. V. 103. No. 1. P. 273–306.  
<https://doi.org/10.1515/zpch-1922-10318>
3. Herrick C.E. The Sensitometry of the Positive Diazoype Process // Journal of the Optical Society of America. 1952. V. 42. No. 12. P. 904–910.  
<https://doi.org/10.1364/JOSA.42.000904>
4. Herrick C.E. Solution of the Partial Differential Equations Describing Photodecomposition in a Light-absorbing Matrix having Light-absorbing Photoproducts // IBM Journal of Research and Development. 1966. V. 10. No. 1. P. 2–5.  
<https://doi.org/10.1147/rd.101.0002>
5. Dill F.H., Neureuther A.R. Machining integrated optical structures in photoresist // IEEE Transactions on Electron Devices. 1973. V. 20. No. 12. P. 1173–1173.  
<https://doi.org/10.1109/T-ED.1973.17826>
6. Neureuther A.R., Dill F.H. Photoresist modeling and device fabrication applications // Proceedings of the Symposium on Optical and Acoustical Microelectronics. Microwave Research Institute Symposia Series. 1975. V. 18. P. 233–249.
7. Dill F.H., Hornberger W.P., Hauge P.S., Shaw J.M. Characterization of positive photoresist // IEEE Transactions on Electron Devices. 1975. V. 22. No. 7. P. 445–452.  
<https://doi.org/10.1109/T-ED.1975.18159>
8. Dill F.H., Neureuther A.R., Tuttle J.A., Walker E.J. Modeling Projection Printing of Positive Photoresists // IEEE Transactions on Electron Devices. 1975. V. 22. No. 7. P. 456–464.  
<https://doi.org/10.1109/T-ED.1975.18161>
9. Арушанян О.Б., Залёткин С.Ф. Численное решение обыкновенных дифференциальных уравнений на Фортране. М.: Изд. МГУ. 1990. 336 с.
10. Dill F.H., Tuttle J.A., Neureuther A.R. Limits of optical lithography // International Electron Devices Meeting. 1974. P. 13–16.  
<https://doi.org/10.1109/IEDM.1974.6219620>
11. Хемминг Р.В. Численные методы для научных работников и инженеров. М.: Наука. 1968. 400 с. [Hamming R. W. Numerical Methods for Scientists and Engineers. McGraw-Hill Book Company, New York, 1962]
12. Краснов М.Л. Обыкновенные дифференциальные уравнения. М.: Высшая школа. 1983. 128 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Второе уравнение Вегшайдера (2) можно легко преобразовать к виду

$$\frac{\partial \ln M(x, t)}{\partial t} + CI(x, t) = 0. \quad (A-1)$$

Если прибавить к обеим сторонам этого уравнения слагаемое  $-CI_0$ , где  $I_0 = I(0, t)$  – интенсивность падающего на слой фоточувствительного слоя излучения с коррекцией на отражение от интерфейса воздух/слой, то получим уравнение

$$\begin{aligned} \frac{\partial \ln M(x, t)}{\partial t} + C[I(x, t) - I_0] &= \\ = \frac{\partial \ln M(x, t)}{\partial t} + C \int_0^x dx' \frac{\partial I(x', t)}{\partial x'} &= -CI_0. \quad (A-2) \end{aligned}$$

Поскольку в уравнениях Вегшайдера  $B = 0$ , имеет место простое соотношение между производными

$$\frac{\partial M(x, t)}{\partial t} = -CM(x, t)I(x, t) = \frac{C}{A} \frac{\partial I(x, t)}{\partial x}. \quad (A-3)$$

Если отсюда выразить производную по  $x$  через производную по  $t$  и полученное выражение подставить под интеграл в уравнении (A-2), то получим простое дифференциальное уравнение

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \ln M(x, t) + A \int_0^x dx' M(x', t) \right] = -CI_0, \quad (A-4)$$

интегрирование по времени которого с использованием начального условия  $M(x', 0) = 1$  приводит к уравнению

$$\ln M(x, t) + A \int_0^x dx' [M(x', t) - 1] = -CI_0 t. \quad (A-5)$$

Наконец, дифференцирование этого уравнения по  $x$  приводит к так называемому логистическому уравнению или уравнению Ферхульста (Verhulst),

$$\frac{\partial M(x,t)}{\partial x} - AM(x,t)[1 - M(x,t)] = 0, \quad (\text{A-6})$$

которое имеет аналитическое решение (см., например, [12]).

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Если в уравнении (10) выполнить дифференцирование по времени, то получим уравнение

$$\begin{aligned} \frac{\partial \ln M(x,t)}{\partial t} + Ae^{-Bx} \int_0^x dx' \frac{\partial M(x',t)}{\partial t} e^{Bx'} = \\ = -CI_0 e^{-Bx}. \end{aligned} \quad (\text{Б-1})$$

Из уравнений (4) можно получить следующее соотношение между производными по времени и по координате

$$\frac{\partial M(x,t)}{\partial t} = \frac{C}{A} \left[ \frac{\partial I(x,t)}{\partial x} + BI(x,t) \right]. \quad (\text{Б-2})$$

Постановка этого соотношения под интеграл в уравнении (Б-1) дает уравнение

$$\begin{aligned} \frac{\partial \ln M(x,t)}{\partial t} + Ce^{-Bx} \left[ \int_0^x dx' \frac{\partial I(x',t)}{\partial x'} e^{Bx'} + \right. \\ \left. + \int_0^x dx' BI(x',t) e^{Bx'} \right] = -CI_0 e^{-Bx}. \end{aligned} \quad (\text{Б-3})$$

Первый интеграл легко берется по частям, в результате чего уравнение значительно упрощается и сводится к одной из форм записи второго уравнения Дилла

$$\frac{\partial \ln M(x,t)}{\partial t} + CI(x,t) = 0. \quad (\text{Б-4})$$

## EXPOSURE KINETICS OF A POSITIVE PHOTORESIST LAYER ON AN OPTICALLY MATCHED SUBSTRATE

© 2025 V. P. Kudrya

NRC "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

E-mail: kyp@ftian.ru

A number of works devoted to modeling the exposure process of a photoactive layer lying on an optically matched substrate is analyzed. The relationship between Dill's equations and previously obtained systems of equations is shown. Methods for reducing the system of two Dill's partial differential equations to ordinary differential equations, the accuracy of the numerical solution of which can be easily controlled, are considered sequentially. A procedure for using such equations to characterize the photochemical properties of positive photoresists is proposed.

*Keywords:* positive resist exposure, positive resist characterization, positive resist exposure simulation

## REFERENCES

1. VLSI Technology. Edited by S.M. Sze. McGraw-Hill Book Company. USA 654, 1983, ISBN: 978-0070626867.
2. Wegscheider R. Beiträge zur photochemischen Kinetik // Zeitschrift für Physikalische Chemie. 1922. V. 103. No 1. P. 273–306.  
<https://doi.org/10.1515/zpch-1922-10318>
3. Herrick C.E. The Sensitometry of the Positive Diazoype Process // Journal of the Optical Society of America. 1952. V. 42. No 12. P. 904–910.  
<https://doi.org/10.1364/JOSA.42.000904>
4. Herrick C.E. Solution of the Partial Differential Equations Describing Photodecomposition in a Light-absorbing Matrix having Light-absorbing Photoproducts // IBM Journal of Research and Development. 1966. V. 10. No 1. P. 2–5.  
<https://doi.org/10.1147/rd.101.0002>
5. Dill F.H., Neureuther A.R. Machining integrated optical structures in photoresist // IEEE Transactions on Electron Devices. 1973. V. 20. No 12. P. 1173–1173.  
<https://doi.org/10.1109/T-ED.1973.17826>
6. Neureuther A.R., Dill F.H. Photoresist modeling and device fabrication applications // Proceedings of the Symposium on Optical and Acoustical Microelectronics. Microwave Research Institute Symposia Series. 1975. V. 18. P. 233–249.
7. Dill F.H., Hornberger W.P., Hauge P.S., Shaw J.M. Characterization of positive photoresist // IEEE Transactions on Electron Devices. 1975. V. 22. No 7. P. 445–452. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1975.18159>

8. *Dill F.H., Neureuther A.R., Tuttle J.A., Walker E.J.* Modeling Projection Printing of Positive Photore-sists // IEEE Transactions on Electron Devices. 1975. V. 22. No 7. P. 456–464.  
<https://doi.org/10.1109/T-ED.1975.18161>
9. *Arushanyan O.B., Zaletkin S.F.* Chislennoe reshenie obyknovennykh differentsial'nykh uravnenii na For-trane. MSU Press, RF 336, 1990, ISBN: 5-211-00957-6 (in Russian).
10. *Dill F.H., Tuttle J.A., Neureuther A.R.* Limits of optical lithography // International Electron Devices Meet-ing. 1974. P. 13–16.  
<https://doi.org/10.1109/IEDM.1974.6219620>
11. *Hamming R.W.* Numerical Methods for Scientists and Engineers. McGraw-Hill Book Company. USA 432, 1962. ISBN: 978-0070258860
12. *Krasnov M.L.* Obyknovennye differencial'nye uravneniya. Vysshaja Shkola. USSR 128, 1983 (in Russian).