

А. Н. Купо, Н. Н. Федосенко, А. С. Побияха
г. Гомель, ГГУ им. Ф. Скорины

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОТОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЛАЗЕРНОГО ЭКСПОНИРОВАНИЯ ФОТОРЕЗИСТОВ

Процесс фотолитографии включает в себя большое число стадий, каждую из которых можно охарактеризовать несколькими параметрами, поэтому его оптимизация при использовании экспериментальных методов весьма неэффективна. Невозможно осуществить оптимизацию всех параметров при помощи большой серии литографических экспериментов, проведенных при переборе всех возможных значений параметров.

Проблему можно упростить, а иногда и полностью устранить, если воспользоваться методами математического моделирования и машинными экспериментами [1; 2]. Моделирование фотолитографии позволяет проводить машинные эксперименты в виртуальном окружении, что может быть значительно быстрее и дешевле, чем полномасштабные эксперименты с использованием реальных заготовок. Преимущества проведения математического моделирования фотолитографии очевидны: они не являются слишком дорогими и не требуют для своего проведения большого времени, а моделируемые ими эксперименты могут быть проведены при большем числе технологических параметров, чем используемом для экспериментальной оптимизации технологического процесса.

Компьютерное моделирование в фотолитографии. В настоящее время существуют программные продукты, которые позволяют точно моделировать процесс дифракции и иных искажений на границе раздела фотошаблон-экспонируемая подложка. На примере (рисунок 1) показан результат моделирования профиля фоторезистивной маски для структуры 0,35 мкм темный элемент/зазор и изолированного элемента 0,35 мкм.

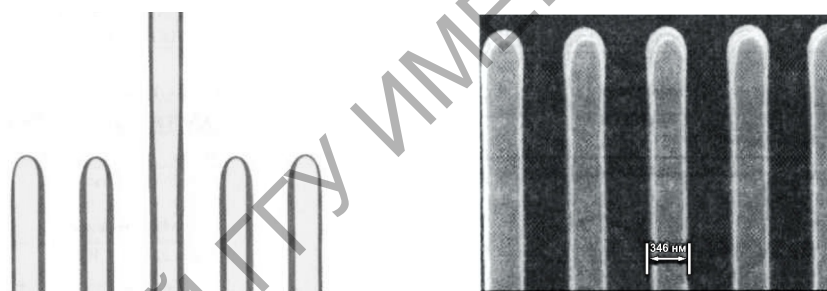


Рисунок 1 – Математическая модель структуры элемент/зазор 0,35 мкм (без оптических aberrаций объектива) и изображение полученной методом растровой электронной микроскопии

Наиболее известным вычислительным комплексом для решения вышеуказанных задач является пакет программ PROLITH [5]. В результате вычислений получаются зависимости профилей проявления от технологических параметров процесса экспонирования и проявления. Исходными параметрами для моделирования являются параметры оборудования для нанесения, экспонирования и проявления фоторезиста, тип фоторезиста, режимы обработки. Пример технического задания на моделирование техпроцесса приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Пример технического задания на моделирование

Формируемая структура	Темный элемент 700 нм в зазоре 400 нм
Активный слой	Si ₃ N ₄ 200 nm-Poly-Si 50 nm-SiO ₂ 20nm-Si
Тип фоторезиста	SPR 955-1,1 CM
Режимы нанесения	d=1,05±0,05 мкм, T=100 °C, 90 sec.
Экспонирование NSR2205illD	Апертура объектива NA=0,63 Апертура осветительной системы NA=0,38
Проявление	Проявитель Megaposit CD-26A 60 сек
Задачи моделирования:	1. Оптимизировать температуру постэкспозиционной сушки (ПЭС) 2. Оптимизировать толщину пленки фоторезиста

На рисунке 2 представлен результат компьютерного моделирования.

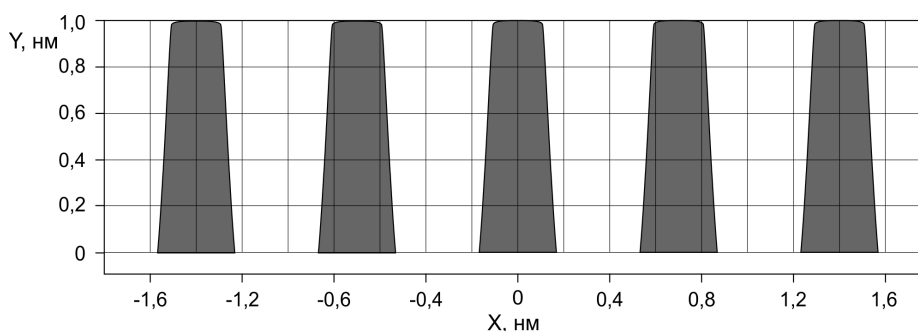


Рисунок 2 – Изображение профиля фоторезистивной маски структуры элемент/зазор 0,35 мкм, полученное в результате компьютерного моделирования

Математическое моделирование фотохимических процессов. Моделирование стадии фотохимической реакции и, особенно, стадии проявления задача нетривиальная. Для последних стадий используются достаточно примитивные модели. Одним из альтернативных подходов является разработка специальных систем математических уравнений для описания фотохимической кинетики, допускающих точные решения [3; 4].

Пионерские работы в этой области выполнены Диллом и его последователями [6]. Согласно его модели поглощение света в слое толщиной d является функцией молярных коэффициентов поглощения ингибитора a_1 , новолачной смолы a_2 , и продуктов фотолиза a_3 . Далее делается предположение о том, что доля непрореагировавшего ортонафтохинондиазида $M(x, t)$ в момент времени t является функцией следующих параметров: A – функция поглощенного излучения; B – не зависит от поглощенного излучения, C – функция светочувствительности. Параметры A , B и C являются функциями длины волны и подбираются экспериментально. Скорость проявления R зависит от химического состава фоторезиста, величины M и состава проявителя. Для постоянных условий эксперимента можно определить функцию $R=f(M)$, которая описывает проявление конкретного фоторезиста в данном проявителе.

В случае одинаковых показателей преломления подложки и позитивного фоторезиста изменение интенсивности излучения I и нормализованной концентрации светочувствительного компонента M в зависимости от глубины (расстояния от поверхности) x и времени экспонирования t выражаются следующими уравнениями:

$$\frac{\partial I(x, t)}{\partial x} = -I(x, t) \cdot [A \cdot M(x, t) + B], \quad (1)$$

$$\frac{\partial M(x, t)}{\partial t} = -I(x, t) \cdot M(x, t) \cdot C, \quad (2)$$

при использовании начальных условий

$$I(0, t) = I_0, \quad (3)$$

$$M(x, 0) = 1, \quad (4)$$

Параметры A , B и C можно определить экспериментально для каждой партии фоторезиста по формулам:

$$A = \frac{1}{d} \ln \left[\frac{T(\infty)}{T(0)} \right], \quad (5)$$

$$B = -\frac{1}{d} \ln(T(\infty)), \quad (6)$$

$$C = \frac{A + B}{A \cdot I_0 \cdot T(0) \cdot [1 - T(0)]} \cdot \frac{dT(0)}{dt}. \quad (7)$$

После численного интегрирования уравнений (1) и (2) с учетом граничных условий (3) и (4), получаем распределение светочувствительного компонента по объему фоторезиста в процессе его экспонирования. Функцию $R=f(M)$ можно определить экспериментально. Часто пользуются эмпирическим соотношением:

$$R(M) = \exp(E_1 + E_2 \cdot M + E_3 \cdot M^2), \quad (8)$$

где E_1 , E_2 и E_3 – эмпирические параметры.

Использование соотношений (1) – (8) позволяет проанализировать зависимость динамики интенсивности излучения I и нормализованной концентрации светочувствительного компонента M от времени экспозиции t и толщины слоя фоторезиста.

Полученные зависимости, представленные в относительных единицах, изображены на рисунках 3 и 4.

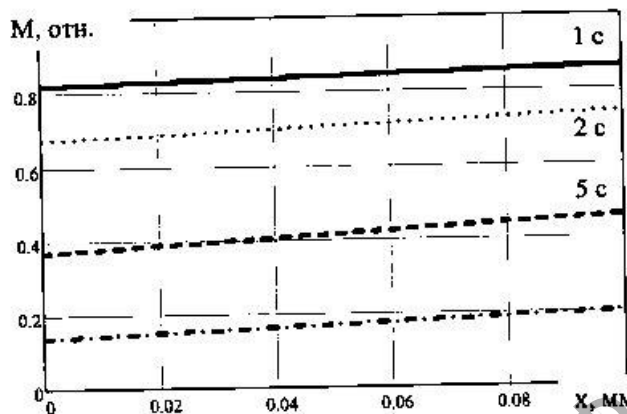


Рисунок 3 – Зависимость нормализованной концентрации светочувствительного компонента от толщины слоя фоторезиста и различного времени экспозиции

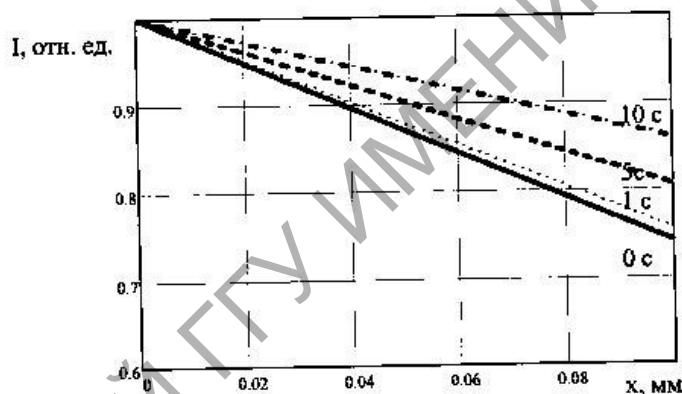


Рисунок 4 – Зависимость относительной интенсивности излучения от толщины слоя фоторезиста, рассчитанная для различных времен экспозиции

Из приведенных на рисунках графиков видно, что распределение относительной концентрации в слое электролита толщиной 0,1 мм, в процесс обработки практически однородно по толщине (отклонение составляет ~ (10–15) %), при этом с увеличением времени экспозиции в пределах (1÷10) с уменьшается в 4–5 раз. Интенсивность экспонирующего лазерного излучения в начале процесса уменьшается на 25 % при прохождении толщины слоя 0,1 мм, однако с течением времени доля поглощенного излучения уменьшается до 13 %, что согласуется с соответствующим уменьшением концентрации светочувствительного компонента.

Таким образом, в результате проведенных исследований разработаны и созданы математические модели фотохимических процессов, протекающих при экспонировании фоторезистов. Сделан анализ существующих математических моделей. Показана целесообразность использования методов математического моделирования для исследования процессов фототравления. На основании модели Дилла [5] разработана математическая модель и проанализированы зависимости динамики интенсивности излучения и нормализованной концентрации светочувствительного компонента от времени экспозиции и толщины слоя фоторезиста.

Список использованных источников

- 1 Cui, Z. Comparative study of AZPF514 and UVIII chemically amplified resists for electron beam nanolithography / Z. Cui, P. D. Prewett // Microelectron. Eng. – 1999. – Vol. 46, № 1–4. – P. 255–258.

- 2 Umbach, C. P. Nanolithography with an acid catalyzed resist / C. P. Umbach, A. N. Broers, C. G. Willson, R. Koch, R. B. Laibowitz // J. Vac. Sci. Technol. B. – 1988. – Vol. 6, № 1. – P. 319–322.
- 3 Gould, C. Advanced process control: basic functionality requirements for lithography/ C. Gould // Proc. IEEE Advanced Semiconductor Manufacturing Conference XII, 2001. – P. 49–53.
- 4 Валиев, К. А. Физические основы субмикронной литографии в микроэлектронике / К. А. Валиев, А. В. Раков. – М. : Радио и связь, 1984. – 350 с.
- 5 Mack, C. A. PROLITH: a comprehensive optical lithography model / C. A. Mack // Proc. SPIE. – 1985. – Vol. 538. – P. 207–220.
- 6 Dill, F. H. IEEE Trans. Electron. Devices / F. H. Dill // V. ED-22. – 1975. – №. 7. – P. 440–444.