

Эффект усиления контраста передачи изображения при взаимодействии ультрафиолетового излучения с пленками неорганических фоторезистов

© Н.А. Калитеевская, Р.П. Сейсян

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 22 июня 2000 г. Принята к печати 22 июня 2000 г.)

Теоретически исследовано фотохимическое преобразование тонких пленок неорганических фоторезистов под действием ультрафиолетового излучения эксимерного лазера. Показано, что, оптимизировав интенсивность излучения и дозу облучения, можно достичь сужения переходной области между засвеченными и незасвеченными участками, что приводит к улучшению качества изображения при фотолитографии.

Для создания качественных микросхем необходимо достижение такой рельефной структуры в пленке фоторезиста, чтобы положение краев всех элементов рисунка находилось точно на своих местах и рисунок имел ровные вертикальные края, т.е. идеальным был бы ступенчатый профиль засветки фоторезиста. Однако профиль интенсивности света вблизи заданной границы элемента рисунка представляет собой "гладкую функцию" [1], в ряде случаев немонокотную, что обусловлено волновыми свойствами света (см. рис. 1). Количественной характеристикой этого эффекта является наклон профиля интенсивности света переходной области между светлыми и темными участками изображения — краевой градиент dI/dx . Размытие распределения интенсивности экспонирующего излучения, статистические флуктуации в распределении фотонов, а также неоднородности, возникающие в процессе химического травления, могут приводить к тому, что положение края элемента рисунка может находиться в некотором интервале Δx относительно заданной величины, что снижает качество изображения [1,2]. При исследовании фотохимических трансформаций пленок стеклообразных полупроводников, таких как AsSe и As₂Se₃, под действием излучения эксимерного лазера с длиной волны 193 нм было установлено, что доза излучения, необходимого для засветки фоторезиста, зависит от интенсивности излучения [3], т.е. процесс имеет "нелинейный" характер. Кроме этого, было установлено, что возможно получение изображения с разрешением, сравнимым с длиной волны света [4].

Цель данной работы — изучение влияния такой "нелинейности" на формирование изображения при фотолитографии.

Исследование фотопотемнения пленок AsSe под действием излучения эксимерного ArF-лазера позволило создать модель, количественно описывающую процесс фотохимического преобразования [5]. В соответствии с результатами, полученными в [5], будем полагать, что под действием света материал пленки преобразуется из исходного состояния I в конечное состояние II с другими физическими (например, коэффициентами поглощения на длине волны эксимерного лазера, излучение которого

и вызывает фотохимические превращения — α_1 и α_2 соответственно) и химическими (например, растворимостью в определенном травителе) свойствами. В процессе облучения материал пленки будет представлять собой смесь материалов I и II. Обозначим относительную концентрацию материалов I и II через ρ_1 и ρ_2 соответственно, так что $\rho_1 + \rho_2 = 1$, а коэффициент поглощения облученного материала будет выражаться формулой

$$\alpha = \alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2 = \alpha_2 + (\alpha_1 - \alpha_2) \rho_1. \quad (1a)$$

Поглощение в слое (вдоль оси z) происходит по закону Бугера–Ламберта–Бира, так что

$$\frac{\partial I(z, t)}{\partial z} = -\alpha(z, t) I(z, t), \quad (1b)$$

где $I(z, t)$ — локальная интенсивность, t — время.

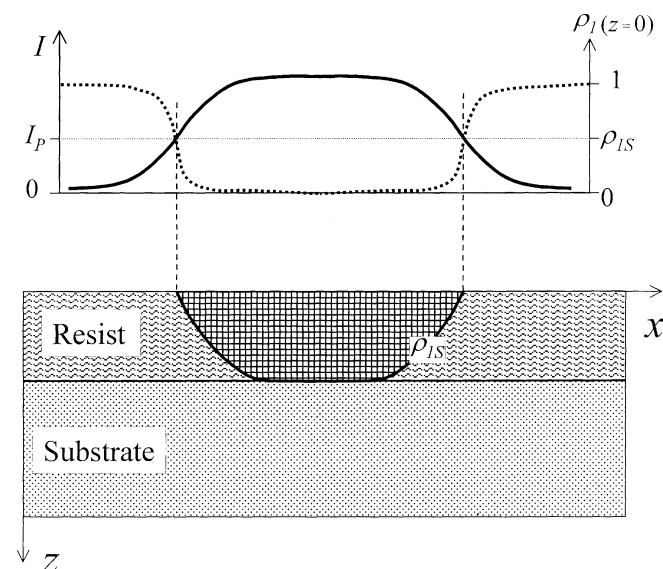


Рис. 1. Слой фоторезиста на подложке и профиль интенсивности света. Линия постоянной пороговой концентрации ρ_{IS} разделяет засвеченный и незасвеченный участки в толще фоторезиста. Сплошная линия — пространственный профиль интенсивности падающего света, пунктирная — профиль концентрации, установившейся на поверхности резиста в процессе облучения.

Изменение концентрации исходного материала под действием света описывается формулой вида

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} = -C\alpha(z, t)I(z, t)F(I)\rho_1, \quad (1в)$$

где C — чувствительность, имеющая размерность [объем][энергия] $^{-1}$. Физический смысл постоянной C — объем материала, который может быть преобразован из состояния I в состояние II при поглощении единицы энергии. Безразмерный зависящий от интенсивности множитель $F(I)$ отражает тот факт, что экспозиция, необходимая для засветки материала, зависит от интенсивности падающего света.

Уравнения (1а)–(1в), вместе с начальным условием $\rho_1|_{t=0} = 1$ и граничным условием $I(t)|_{z=0} = I_0(t)$, где $I_0(t)$ — интенсивность падающего света, составляют систему, позволяющую описать процесс фотохимических трансформаций в пленках. Поскольку зависимость скорости фотохимических превращений от интенсивности света имеет пороговый характер, мы будем, как и в [4], аппроксимировать функцию $F(I)$ выражением

$$F(I) = \frac{1}{2} \left[1 + \text{th} \left(\frac{I - I_{\text{th}}}{\delta} \right) \right], \quad (2)$$

где параметр δ характеризует размытие пороговой интенсивности. Проведенное моделирование фотопотемнения пленок AsSe под действием излучения эксимерного ArF-лазера с длиной волны 193 нм позволило определить, что чувствительность имеет значение $C = 3 \cdot 10^{-3}$ см³/Дж, пороговая интенсивность составляет $I_{\text{th}} = 1.7 \cdot 10^4$ Дж/см²·с, размытие $\delta = 8.5 \cdot 10^3$ Дж/см²·с. Коэффициент поглощения на длине волны излучения эксимерного лазера в состояниях I и II имеет значения $\alpha_1 = 1.0 \cdot 10^5$ см⁻¹ и $\alpha_2 = 1.2 \cdot 10^5$ см⁻¹.

После проведения экспонирования в толще пленки резиста устанавливается некоторый профиль концентрации компонентов $\rho_1(z)$ и $\rho_2(z)$, причем скорость растворения существенно зависит от концентрации компонентов. В случае, когда заданы условия проявления (химический состав травителя, температура, продолжительность процесса проявления), мы можем определить пороговую концентрацию $\rho_{1S}(z)$, разделяющую "засвеченные", растворимые, и "незасвеченные", нерастворимые (при данных условиях проявления), участки пленки резиста — если $\rho_1(z) < \rho_{1S}(z)$, то материал растворяется, в противном случае не растворяется. Положение границы раздела обозначим z_S .

Для расчета профиля концентрации, установившегося в толще фоторезиста при проведении экспонирования, необходимо численно решать систему уравнений (1). Однако предварительная оптимизация характеристик процесса экспонирования может быть проведена аналитически, например таких, как градиент профиля концентрации вблизи порогового значения и наклон изолинии пороговой концентрации около поверхности образца.

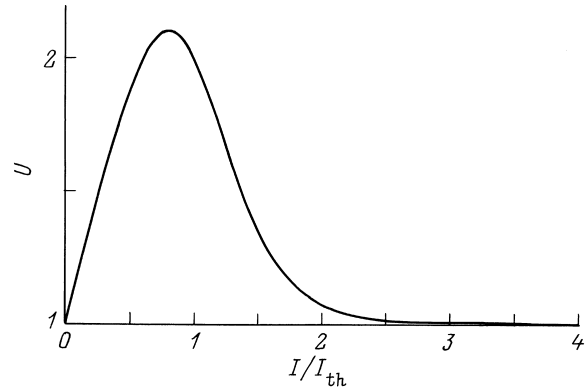


Рис. 2. Зависимость усиления контраста передачи изображения от интенсивности излучения.

Вводя обозначение $\gamma = (\alpha_1 - \alpha_2)/\alpha_2$, мы можем переписать уравнение (1в) для поверхностного слоя пленки, при $z = 0$, разделив переменные:

$$\frac{d\rho_1}{(1 + \gamma\rho_1)\rho_1} = -\alpha_2 C I F(I) dt. \quad (3)$$

Интегрируя уравнение (3) и принимая во внимание, что в начальный момент времени $\rho_1 = 1$, получаем

$$\rho_1 = \left\{ (1 + \gamma) \exp \left[\alpha_2 C \int_0^T I F(I) dt \right] - \gamma \right\}^{-1}, \quad (4)$$

где T — длительность процесса облучения. В случае прямоугольного импульса длительностью T_P и интенсивностью I_P на поверхности устанавливается концентрация

$$\rho_1 = \left\{ (1 + \gamma) \exp [\alpha_2 C T_P I_P F(I_P)] - \gamma \right\}^{-1}. \quad (5)$$

Таким образом, доза $H_P = T_P I_P$ и интенсивность I_P , обеспечивающие достижение пороговой концентрации ρ_{1S} на поверхности образца, связаны соотношением

$$\ln \left(\frac{1/\rho_{1S} + \gamma}{1 + \gamma} \right) = \alpha_2 C I_P F(I_P) T_P. \quad (6)$$

Для создания максимально резкой качественной границы необходимо, чтобы $d\rho_1/dx$ вблизи пороговой концентрации ρ_{1S} было максимально. Пусть b — относительный краевой градиент интенсивности (см. рис. 1),

$$b = \frac{1}{I_P} \frac{\partial I_P}{\partial x}. \quad (7)$$

Дифференцируя уравнение (5) по координате x и используя соотношение (7), получаем, что градиент концентрации пропорционален относительному краевому градиенту интенсивности с некоторым коэффициентом, зависящим от интенсивности,

$$\begin{aligned} d\rho_1/dx &= b(1 + \gamma)\alpha_2 C T_P I_P \exp[\alpha_2 C T_P I_P F(I_P)] \\ &\times [F(I_P) + I_P(\partial F(I_P)/\partial I_P)] / \{ (1 + \gamma) \\ &\times \exp[\alpha_2 C T_P I_P F(I_P)] - \gamma \}^2. \end{aligned} \quad (8)$$

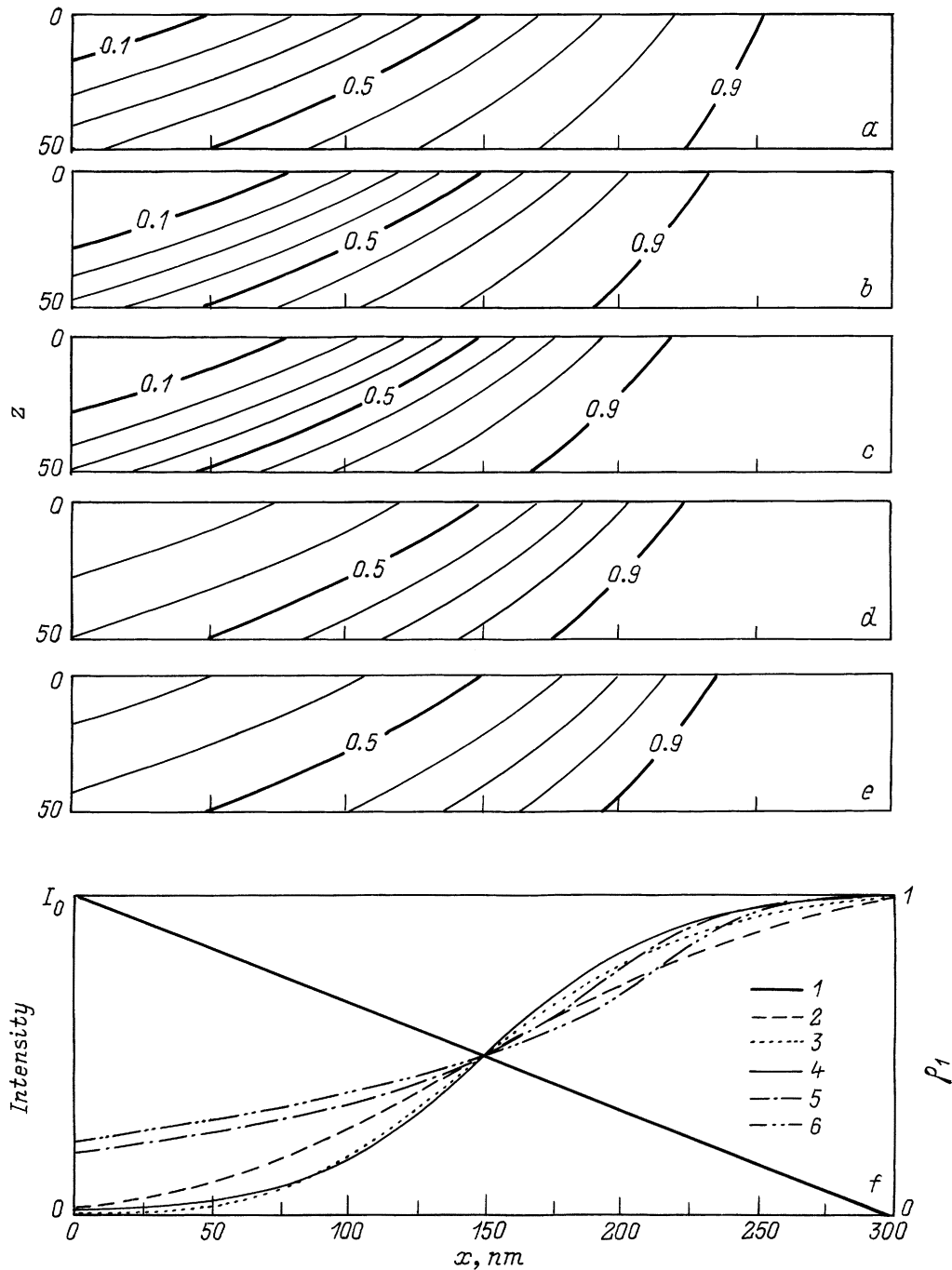


Рис. 3. (a–e) — линии постоянной концентрации, показывающие профили концентрации в толще фоторезиста при облучении; доза облучения подобрана таким образом, чтобы в точке $x = 150$ нм на поверхности пленки в процессе облучения устанавливалась концентрация $\rho_1 = 0.5$; интенсивность в точке $x = 150$ нм на поверхности пленки $I_P = I_0/2 = 0.25I_{th}$ (a), $0.5I_{th}$ (b), $0.803I_{th}$ (c), $1.5I_{th}$ (d), $2I_{th}$ (e). f — пространственный профиль интенсивности излучения (I) и зависимости концентрации от координаты x на поверхности образца при $I_P = I_0/2 = 0.25I_{th}$ (2), $0.5I_{th}$ (3), $0.803I_{th}$ (4), $1.5I_{th}$ (5), $2I_{th}$ (6).

Вводя величину

$$U = \left. \frac{(\partial \rho_1 / \partial x)}{b} \right|_{\rho = \rho_{1S}},$$

характеризующую "усиление контраста передачи изображения" на поверхности, и используя соотношение (6),

получаем

$$U = U_{0\rho}(\rho_{1S}, \gamma)U_1(I_P) = (1 + \rho_{1S}\gamma)\rho_{1S} \times \ln \left[\frac{1/\rho_{1S} + \gamma}{1 + \gamma} \right] \left[1 + \frac{I_P}{F(I_P)} \frac{\partial F(I_P)}{\partial I_P} \right]. \quad (9)$$

Для функции вида (2) можно получить

$$\frac{1}{F(x)} \frac{\partial F(x)}{\partial x} = \frac{2}{\exp(2x) + 1}, \quad (10)$$

где $x = (I - I_{th})/\delta$.

Дифференцируя правую часть уравнения (9) и используя выражение (10), получаем, что максимальное увеличение градиента концентрации достигается при интенсивности падающего излучения I_P , удовлетворяющей соотношению

$$\exp \left[2 \frac{I_P - I_{th}}{\delta} \right] \left[1 - \frac{2I_P}{\delta} \right] + 1 = 0. \quad (11)$$

Таким образом, наилучшее качество передачи изображения может быть достигнуто при параметрах, определяемых соотношениями (6) и (11).

На рис. 2 показана зависимость усиления контраста передачи изображения от интенсивности. В соответствии с уравнением (11) зависимость имеет максимум при значении интенсивности $I_P = 0.803I_{th}$. Правильно подбирая интенсивность света, можно достичь увеличения градиента концентрации в области границы более чем в 2 раза.

На рис. 3 показаны рассчитанные профили концентрации, установившейся в пленке в процессе облучения при различных значениях интенсивности. Пространственный профиль падающего излучения показан на рис. 3, f кривой 1. В рассматриваемой области, соответствующей границе между освещенным и неосвещенным участками, интенсивность падает от максимального значения до 0. Доза облучения для каждого случая подбиралась таким образом, чтобы в точке $x = 150$ нм, на середине рассматриваемого участка, в ходе облучения устанавливалась концентрация $\rho_1 = 0.5$.

Рис. 3, c соответствует оптимальному значению интенсивности $I_P = 0.803I_{th}$. Рис. 3, a и 3, b соответствуют интенсивности, меньшей оптимальной, а рис. 3, d и 3, e — большей оптимальной. Можно видеть, что ширина переходной области, разделяющей засвеченный и незасвеченный участки пленки, минимальна, когда интенсивность I_P соответствует оптимальному значению $0.803I_{th}$.

На рис. 3, f кроме профиля интенсивности приведены зависимости концентрации ρ_1 на поверхности от координаты x , которые показывают существенное увеличение градиента концентрации вблизи границы по сравнению с краевым градиентом падающего излучения при оптимизации значений интенсивности и дозы облучения.

Необходимо отметить, что если временная форма импульса будет отлична от прямоугольной, то параметры, обеспечивающие наилучшее качество изображения, также несколько изменятся, но могут быть определены численным решением системы уравнений (1).

Таким образом, в работе показано, что в случае нелинейных фоторезистов, у которых скорость фотохимического преобразования не прямо пропорциональна интенсивности падающего света, правильный подбор интенсивности падающего света и дозы облучения

позволяет достичь сужения переходной области между засвеченными и незасвеченными участками, что приводит к улучшению качества передачи изображения при фотолитографии.

Список литературы

- [1] Г.Н. Березин, А.В. Никитин, Р.А. Сурис. *Оптические основы контактной литографии* (М., Радио и связь, 1982).
- [2] H. I. Smith. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **6** (1), 346 (1988).
- [3] Е.Г. Бараш, А.Ю. Кабин, В.М. Любин, Р.П. Сейсян. *ЖТФ*, **62** (3), 106 (1994)
- [4] Л.Г. Гладышева, Н.А. Калитеевская, Р.П. Сейсян, Д.В. Смирнов. *Письма ЖТФ*, **22**, (15), 91 (1996)
- [5] Н.А. Калитеевская, Р.П. Сейсян. *ФТП*, **34** (7), 857 (2000).

Редактор Л.В. Шаронова

The effect of the image contrast transfer intensification under ultra-violet radiation interaction with films of inorganic photoresists

N.A. Kaliteevskaya, R.P. Seisyan

loffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia