

**РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ**

УДК 621.793:621.3.049.77

В. Е. ОБУХОВ<sup>1</sup>, Е. П. ШПАК<sup>1</sup>, С. П. ЖВАВЫЙ<sup>2</sup>, В. А. АЗАРКО<sup>3</sup>**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР  
В СЛОЯХ ВАКУУМНОГО РЕЗИСТА**<sup>1</sup>Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск Беларусь,  
e-mail: obukhov@tut.by, ket27051973@gmail.com<sup>2</sup>Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь,  
e-mail: zhvavyi@inel.bas-net.by<sup>3</sup>Институт химии новых материалов НАН Беларуси, Минск, Беларусь,  
e-mail: mixa@ichnm.basnet.by

Изучены методом моделирования процессы формирования топологических структур с 3D-элементами различных размеров и конфигурации в слоях вакуумного резиста импульсным лазерным излучением с разной плотностью энергии. Экспериментально установлено, что моделирование позволяет прогнозировать реальные параметры работы установок лазерной вакуумной микролитографии для качественного формирования 3D-элементов топологии в слоях вакуумного резиста при создании масок.

*Ключевые слова:* микролитография, вакуумная проекционная литография, вакуумный резист, технологии ИМС

V. E. OBUKHOV<sup>1</sup>, E. P. SHPAK<sup>1</sup>, S. P. ZHVAVYI<sup>2</sup>, V. A. AZARKO<sup>3</sup>**SIMULATION OF FORMATION OF TOPOLOGICAL STRUCTURES IN VACUUM RESIST LAYERS**<sup>1</sup>Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,  
e-mail: obukhov@tut.by, ket27051973@gmail.com,<sup>2</sup>B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus,  
Minsk, Belarus, e-mail: zhvavyi@inel.bas-net.by,<sup>3</sup>The Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,  
e-mail: mixa@ichnm.basnet.by

The modeling of formation of topological structures with 3D elements of various sizes and configurations in a vacuum resist exposed to pulsed laser radiation with different energy density was carried out. It was found experimentally that the simulation allows predicting the actual parameters of lithography laser systems for high-quality formation of 3D topology elements in layers of vacuum resist when creating masks.

*Keywords:* microlithography, vacuum resist, vacuum projection lithography, microelectronic circuit technology.

**Введение.** Современные мировые производства стремятся к максимальной автоматизации технологических процессов, оставляя все меньшую роль человеческому фактору. В наибольшей степени эти тенденции развиваются и в микроэлектронике. Автоматизированные минипроизводства интегральных микросхем (ИМС) особенно выгодны при мелкосерийном производстве заказных и полузаказных ИМС, не требующих максимальной минимизации размеров формируемых элементов и изготавливаемых на основе базовых матричных кристаллов, создаваемых по традиционной крупносерийной технологии. Наименее поддаются автоматизации процессы традиционной «мокрой» микролитографии, состоящие из более десятка операций и требующие больших количеств химических растворов, деионизованной воды, участков по утилизации вредных химических отходов.

Альтернативой традиционной «мокрой» микролитографии является «сухая» лазерная вакуумная микролитография, где прямое формирование рельефных (3D) структур в слоях вакуумного резиста (ВР) происходит по абляционному процессу лазерным излучением, прошедшим через фотшаблон и оптическую систему литографической установки. Дальнейшие процессы формирования топологических структур на поверхности полупроводниковых пластин или в технологических слоях на их поверхности выполняются «сухим» способом методами плазмохимического, реактивно-ионного или ионного травлений, ионного легирования. «Сухая» микролитография состоит всего из четырех операций: нанесения в вакууме на полупроводниковую пластину слоя ВР; лазерного формирования в нем топологического 3D-рисунка; выполнения необходимой технологической операции через маску из ВР и последующего снятия слоя ВР в кислородосодержащей плазме [1]. Формирование 3D-рисунков в слоях ВР выполняется с помощью установки вакуумной лазерной литографии [2]. Производство заказных ИМС при использовании процесса «сухой» лазерной микролитографии может быть полностью автоматизировано в замкнутом технологическом процессе на минифабрике в виде кластера оборудования [1]. Над этой проблемой усиленно работают такие передовые фирмы мира как Alcatel CIT (Франция), General Signal (США), Lam Research (США), Ulvac and Vactronic (Япония), MARATHON Cluster Tool Integration Platforms (США) и др.

Однако отработка процесса качественного формирования 3D-структур в слоях ВР – трудоемкая задача, требующая больших временных и энергетических затрат, а также длительного непроизводительного использования дорогостоящей литографической установки. Вследствие этого в настоящее время большое внимание уделяется разработке программ моделирования литографических процессов с последующим их применением для оценки условий формирования в пленке ВР элементов различных форм и размеров. Использование программ, моделирующих различные литографические процессы, актуально, так как позволяет заранее прогнозировать параметры процесса и качество формирования масок.

Моделирование процессов микроэлектроники успешно развивается в целом ряде зарубежных фирм [3–5], однако в области моделирования процессов микролитографии основное внимание уделяется определению условий, при которых при экспонировании в слоях ВР не происходит образования стоячих волн, препятствующих формированию топологических структур с субмикронными размерами элементов. В резистах, используемых в процессах лазерной вакуумной литографии, стоячие волны отсутствуют, так как эти резисты имеют высокий коэффициент поглощения экспонирующего излучения (порядка  $10^5 \text{ см}^{-1}$ ). Поэтому в настоящей работе методами моделирования изучались закономерности формирования лазерными импульсами в слоях ВР по абляционному механизму 3D-изображений тестовых рисунков в зависимости от условий экспонирования и физико-химических свойств материала резиста.

В качестве ВР могут быть использованы неполимерные органические материалы, обладающие рядом специфических свойств: сублимация в вакууме при нагревании, высокий коэффициент поглощения лазерного излучения и низкий коэффициент теплопроводности, высокие защитные свойства при технологических операциях плазмохимического, реактивно-ионного или ионного травлений, ионного легирования, полное удаление с полупроводниковой пластины в кислородосодержащей плазме.

Цель настоящей работы – изучение методом компьютерного моделирования закономерностей процесса формирования в слоях ВР тестовых 3D-структур с субмикронными размерами элементов и определение оптимальных параметров экспонирования в зависимости от параметров лазерного экспонирующего излучения, реальных характеристик оптических систем литографических установок, геометрических размеров и расположения формируемых элементов, величины дефокусировки объектива.

При моделировании в расчеты закладывались параметры ВР на основе перилентетракарбонной кислоты [6].

**Алгоритм расчета процесса лазерной микролитографии.** В настоящей работе модель лазерной вакуумной литографии представлена как совокупность трех последовательных процессов:

построение проекционной системой установки микролитографии с фиксированным коэффициентом редукиции топологического рисунка фотошаблона (миры) в плоскости поверхности пленки ВР на полупроводниковой пластине (оптическая задача);  
 поглощение энергии экспонирующего излучения пленкой ВР;  
 удаление материала ВР с экспонируемых лазерным излучением областей пленки, т. е. формирование 3D-рисунка в слое ВР (тепловая задача).

С целью определения оптимальных условий создания масок в пленках ВР методами лазерной микролитографии разработана программа моделирования процессов формирования в них 3D-структур, основанная на модели процесса испарения пленки ВР под действием импульсного лазерного излучения, которая учитывала характеристики изображения топологического рисунка в плоскости пленки ВР и строилась при следующих допущениях:

теплофизические параметры ВР не зависят от его температуры;  
 начальное распределение температуры по площади пленки ВР повторяет распределение по ней освещенности лазерного излучения вследствие практически мгновенного перехода энергии излучения в тепловую энергию;

процесс удаления материала с поверхности пленок ВР под действием лазерного излучения имеет термическую природу (вкладом фотохимических реакций пренебрегалось);

процесс абляции резиста под действием лазерного излучения имеет пороговый характер, т. е. при величине плотности энергии излучения в импульсе ниже некоторого порогового значения абляции материала ВР не происходит [7].

В [7] предполагалось, что ввиду низкой теплопроводности материала ВР (порядка  $10^{-4}$  Вт/(см·К)) и короткой длительности лазерного импульса (порядка  $10^{-7}$  с), а также наличия энергетического порога процесса абляции материала ВР граница формируемого в нем элемента совпадает с границей освещенности лазерным излучением. Однако это предположение требовало теоретической (методом моделирования) и экспериментальной проверки.

В данной работе результаты расчетов для наглядности представлены в графическом виде. Параллельно с моделированием процессов лазерной литографии проводилась экспериментальная проверка результатов расчетов путем их внесения в параметры экспонирования литографической установки.

С помощью разработанной ранее программы [7] выполнялся расчет дифракционных структур изображения элементов миры в плоскости поверхности пленки ВР при различных длинах волн. В настоящей работе алгоритм решения данной задачи дополнен решением тепловой задачи абляции материала ВР.

При моделировании учитывались реальные параметры оптических систем экспериментальных установок лазерной вакуумной проекционной микролитографии ЭМ-594 и ЭМ-5094 [2] с длинами волн экспонирующего излучения  $\lambda \sim 266$  и  $532$  нм соответственно, характеристики волнового фронта, коэффициент пропускания и др. Толщина  $d$  пленки ВР принималась порядка  $0,5$  мкм (экспериментально установлено [6], что данной толщины достаточно, чтобы слой ВР мог выполнять роль защитной маски при технологических операциях плазмохимического и реактивно-ионного травления). Апертура  $NA$  объективов литографических установок принималась равной  $0,4$ .

Решение тепловой задачи построения 3D-изображений элементов миры в слое ВР с помощью лазерного излучения, прошедшего через оптическую систему литографической установки, представлено ниже.

Уравнение теплопроводности для интенсивно поглощающей излучение лазера пленки ВР на технологическом слое диоксида кремния и кремниевой подложке, нагреваемой под действием наносекундных лазерных импульсов, согласно [8], приведено в следующем виде:

$$\rho_i \{c_i + L_s \delta(T - T_s)\} \frac{\partial T}{\partial t} = k_i \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + F(x, t), \quad x > S(t), \quad (1)$$

$$T(x, t = 0) = T_0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=S(t)} = 0, \quad T|_{x \rightarrow \infty} = T_0,$$

$$k_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=d_1} = k_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=d_1}, \quad T_1 \Big|_{x=d_1} = T_2 \Big|_{x=d_1},$$

$$k_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=d_2} = k_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{x=d_2}, \quad T_2 \Big|_{x=d_2} = T_3 \Big|_{x=d_2}, \quad \begin{cases} \frac{dS}{dt} \geq 0 & \text{при } T(S(t), t) = T_s, \\ \frac{dS}{dt} = 0 & \text{при } T(S(t), t) < T_s, \end{cases}$$

$$F(x, t) = (1 - R) \frac{E(t)}{\tau} \alpha_i \exp(-\alpha_i x) \quad \text{при } x \geq S(t),$$

$$I_1 = 1, \quad x \leq d_1,$$

$$I_2 = \exp(-\alpha_1(d_1 - S(t)) + \alpha_2 d_1), \quad d_1 < x \leq d_2,$$

$$I_3 = I_2 \exp((\alpha_3 - \alpha_2)d_2), \quad d_2 < x,$$

где  $i = 1, 2, 3$  (1 – пленка ВР, 2 – пленка SiO<sub>2</sub>, 3 – Si-подложка),  $\rho$  – плотность,  $c$  – удельная теплоемкость,  $L_s$  – удельная теплота сублимации материала ВР,  $\delta$  – функция Дирака,  $T_0$  – начальная температура ВР,  $T_s$  – температура сублимации ВР,  $T$  – текущая температура ВР,  $t$  – время,  $k$  – коэффициент теплопроводности,  $S(t)$  – координата фронта испарения,  $F(x, t)$  – тепловой источник,  $R$  – коэффициент отражения пленки ВР,  $E(t)$  – плотность энергии,  $\tau$  – длительность импульса излучения,  $\alpha$  – коэффициент поглощения,  $d$  – толщина пленки.

При решении поставленной задачи предполагалось, что при достижении на поверхности пленки ВР температуры сублимации материал ВР удаляется и граница фазового перехода перемещается по координате  $x$  с температурой, близкой к температуре сублимации.

Такая постановка задачи несколько отличается от рассматриваемых ранее задач абляции твердых тел [например, 9, 10]. В данном случае учитывается нестационарность процесса сублимации под действием объемного источника тепла, так как глубина проникновения оптического излучения в пленку ВР (порядка 0,1 мкм) сравнима с толщиной пленки (порядка 0,5 мкм).

Для численного решения задачи Стефана в данной постановке применялся метод сглаживания [11]:  $\delta$ -функция заменялась  $\delta$ -образной функцией вида (2)

$$\delta(T - T_s, \Delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\Delta} \exp\left[-\frac{(T - T_s)^2}{2\Delta^2}\right] \quad (2)$$

с начальной полушириной  $\Delta = 10$  К, которая в зависимости от градиента температуры изменялась с условием, чтобы область определения  $\delta$ -образной функции приходилась не менее чем на три счетные точки. Уравнение (1) решалось методом прогонки [12] с применением итерационного процесса. Начальный шаг по времени равен 0,2 нс и в зависимости от сходимости итераций в процессе счета мог изменяться. При описании теплового источника  $F(x, t)$  форма лазерного импульса  $E(t)$  полагалась гауссовой с длительностью по полувысоте  $\tau \sim 100$  нс, что соответствовало параметрам лазера ЛТИ 701М установок литографии.

Программа расчета позволяет представить результаты исследований графически в виде 3D-изображений. В данной статье 3D-изображения результатов расчетов представляются в плоском формате, где клин проявления определяется как отношение ширины прорисовки краев элементов к толщине пленки резиста.

Ранее [13] нами показано, что для лазерной абляции материала ВР целесообразно использовать многоимпульсные режимы экспонирования, так как для достижения одинаковых результатов при многоимпульсных режимах экспонирования энергетические затраты лучистой энергии приблизительно в 20 раз ниже, чем при одноимпульсных режимах. Поэтому методом моделирования изучалось качество формирования в слоях ВР толщиной порядка 0,5 мкм элементов линейки специально разработанных микроструктур под воздействием лазерного излучения при количестве лазерных импульсов в одну точку  $n = 8$ , длительности импульсов  $\tau \sim 10^{-7}$  с, частоте следования

импульсов  $f \sim 7000$  Гц. Доза излучения, израсходованная на проработку единицы площади экспонируемых участков вакуумного резиста, рассчитывалась как плотность энергии излучения в лазерном импульсе, умноженная на число импульсов в одну точку поверхности.

В процессе расчетов, подкрепленных экспериментальными исследованиями, установлено, что лазерным излучением с  $\lambda \sim 532$  нм качественное формирование 3D-элементов возможно только при их размерах не менее 0,8–1,0 мкм, однако при этом доза лазерного излучения требуется несколько меньшая, чем для формирования элементов того же размера излучением с  $\lambda \sim 266$  нм.

**Подготовка и проведение исследований.** На первом этапе выполнения исследований разработаны тестовые миры с одновременным набором квадратных элементов, имеющих стороны 12, 10, 8, 6 и 4 мкм, которые при проекционном переносе изображений в плоскость пленки ВР с фиксированной редуцией 0,1 должны обеспечить формирование в ней элементов с размерами сторон 1,2; 1,0; 0,8; 0,6 и 0,4 мкм соответственно. Для исключения влияния взаимного расположения элементов на их формирование они располагались на расстояниях, в несколько раз превышающих их собственные размеры.

Методом моделирования проведено исследование влияние дозы лазерного излучения с  $\lambda \sim 266$  нм на качество формирования элементов указанной миры. На основании проведенных исследований установлено следующее:

лазерным излучением с длиной волны порядка 266 нм при реальных параметрах оптической системы установки микролитографии возможно формирование в слоях ВР 3D-структур с минимальными размерами вплоть до 0,4 мкм;

для каждого номинала размеров элемента существует своя оптимальная доза лазерного излучения, при которой возможно его качественное формирование в слое ВР;

с уменьшением размера элементов оптимальная доза излучения для их качественного формирования в слоях ВР возрастает, но при этом происходит растравливание элементов более крупных размеров;

при апертуре объектива  $NA \sim 0,4$  и наличии на фотошаблоне элементов с размерами в области 4–12 мкм (в плоскости ВР элементов с размерами 0,4–1,2 мкм) невозможно подобрать условия экспонирования для качественного формирования элементов всех размеров одновременно.

Представляется интересным изучение влияния величин энергии лазерных импульсов на формирование ансамбля 3D-структур, состоящих из элементов одной ширины, но разной длины и с расстояниями между элементами, равными их ширине. Для этого разработана соответствующая линейка мир. Данные миры различались между собой лишь шириной составляющих их элементов. Моделировались процессы формирования 3D-рисунков масок с наборами элементов, номинальные размеры ширины которых составляли 1; 0,8; 0,6; и 0,5 мкм. Наибольший интерес представляла собой мира для формирования элементов с шириной порядка 0,5 мкм лазерным излучением с  $\lambda \sim 266$  нм. Результаты данных исследований проиллюстрированы рис. 1. При относительно низких дозах излучения порядка 0,44 Дж/см<sup>2</sup> (рис. 1, а) отмечаются слабая проработка внутренних углов элементов и взаимное влияние на форму друг друга.

Повышение дозы излучения до порядка 0,72 Дж/см<sup>2</sup> позволяет практически устранить взаимное влияние элементов на их форму (рис. 1, б), однако их внутренние углы прорабатываются недостаточно, из-за чего квадратные на мире элементы являются еще не вполне квадратами в слое резиста.

Дальнейшее повышение дозы излучения до порядка 1,2 Дж/см<sup>2</sup> приводит к уменьшению клина проявления элементов (рис. 1, в), но внутренние углы элементов все еще проработаны недостаточно, отмечается ухудшение проработки внешних углов Т-образного элемента.

Увеличение дозы излучения до порядка 1,6 Дж/см<sup>2</sup> приводит к качественному формированию как протяженных, так и квадратных элементов (рис. 1, г). При этом отмечаются взаимное влияние протяженных элементов друг на друга и дальнейшее ухудшение проработки внешних углов у Т-образного элемента.

Повышение дозы излучения выше 1,6 Дж/см<sup>2</sup> становится нецелесообразным, так как увеличивается клин проявления элементов, усиливается влияние на процесс формирования друг на друга близко расположенных элементов, наблюдается дальнейшее ухудшение проработки внешних углов элементов Т-образной формы.

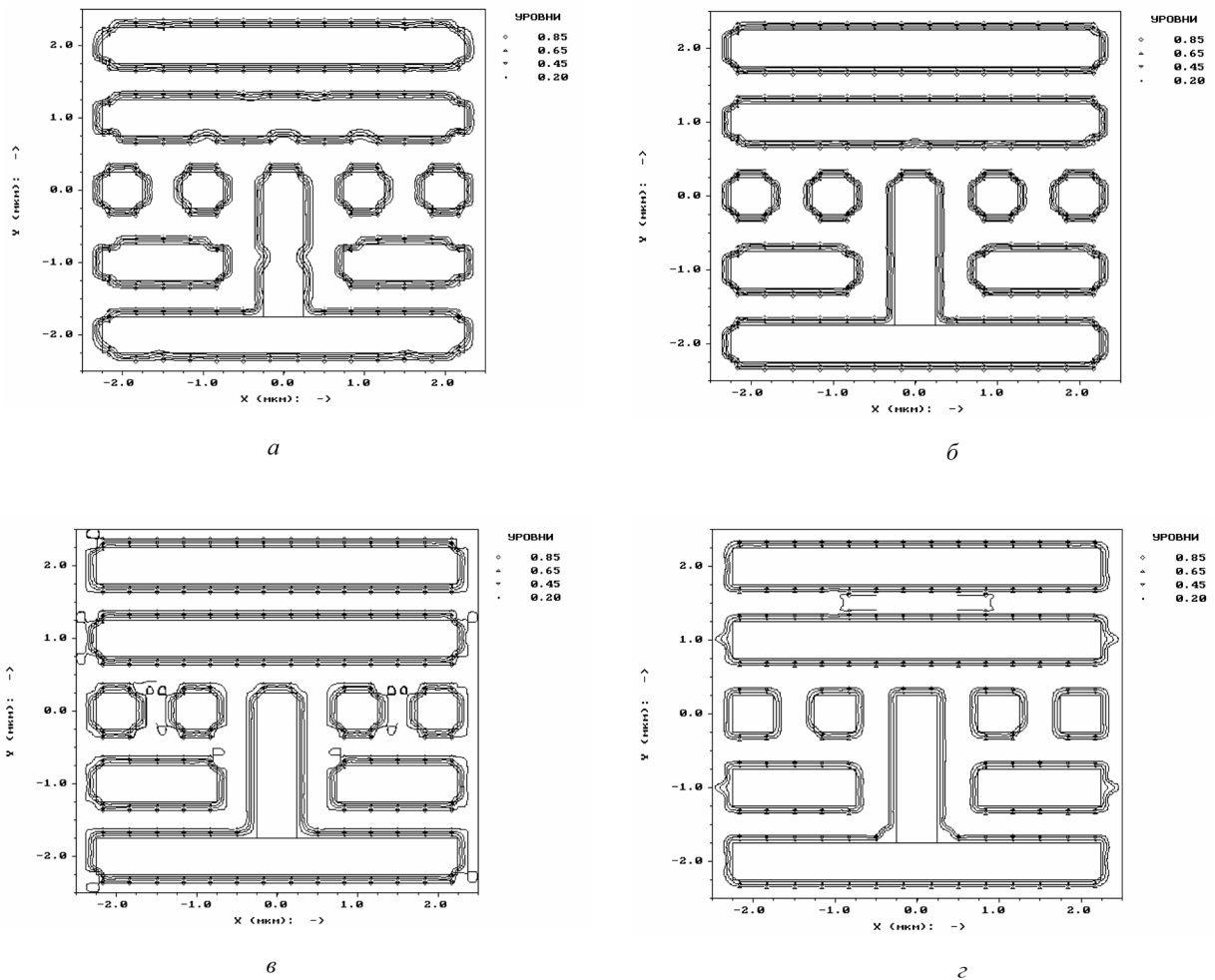


Рис. 1. 3D-структура в слоях ВР с номинальным значением ширины элементов 0,5 мкм, сформированная лазерным излучением с различными значениями дозы ( $\text{Дж}/\text{см}^2$ ): 0,44 (а); 0,72 (б); 1,2 (в); 1,6 (г)

Проведенные исследования с мирами, содержащими элементы разной ширины, показывают, что для качественного формирования группы элементов с номинальными размерами ширины 0,5 мкм требуются дозы излучения, следовательно, и общие затраты лучистой энергии, почти в 4 раза большие, чем затраты для формирования элементов с номиналом ширины 0,8 мкм и приблизительно в 2–2,5 раза большие, чем затраты для формирования элементов с номинальными размерами ширины порядка 0,5 мкм. Как свидетельствуют результаты моделирования процессов формирования элементов с номинальным размером порядка 0,6 мкм:

лазерным излучением с длиной волны 266 нм возможно качественное формирование в слоях вакуумного резиста 3D-структур с элементами шириной до порядка 0,5 мкм;

эффект взаимного влияния одних элементов на формирование других (эффект близости) проявляется наиболее сильно при низких дозах излучения;

минимально эффект близости элементов проявляется при оптимальных значениях дозы излучения;

с увеличением дозы излучения (ниже оптимальной) качество проработки элементов возрастает, клин проявления уменьшается, но внутренние углы элементов прорабатываются недостаточно, в то время как внешние углы Т-образных элементов прорабатываются удовлетворительно;

при оптимальных условиях экспонирования клин проявления элементов имеет минимальную величину, внутренние углы элементов прорабатываются удовлетворительно, но внешние углы Т-образных элементов прорабатываются недостаточно;

превышение дозы излучения выше оптимальной для данного номинального размера элемента приводит к увеличению его реальных размеров выше номинального значения и искажению формы, клин проявления элементов возрастает и начинается растрав поверхности ВР;

растрав поверхности ВР начинает проявляться, в первую очередь, между протяженными, параллельными, рядом расположенными элементами.

Известно, что для качественного формирования 3D-структур в слоях вакуумного резиста изображения элементов микры должны быть точно сфокусированы в плоскости поверхности слоя ВР, т. е. плоскость Гаусса объектива должна совпадать с плоскостью поверхности ВР или вели-

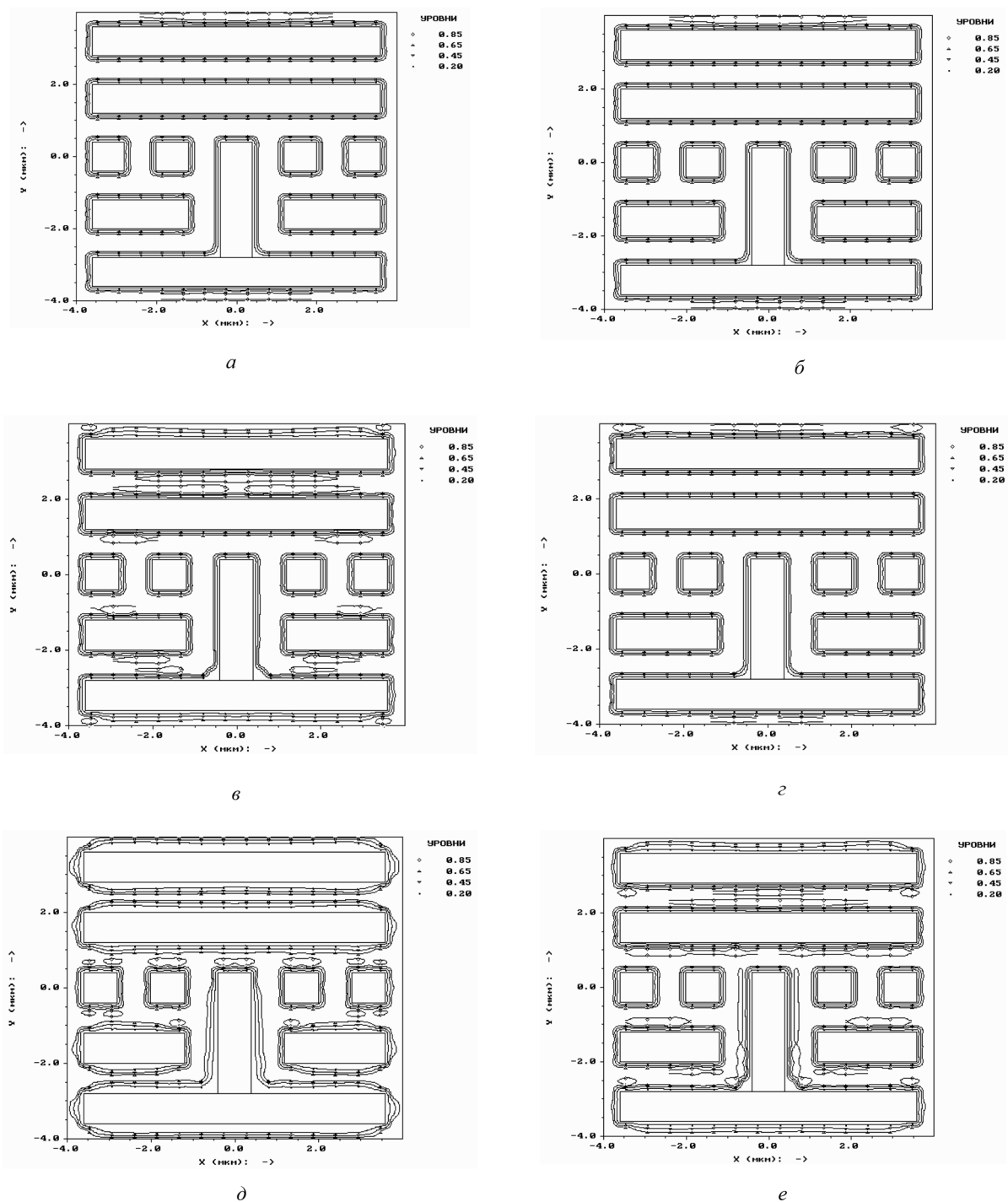


Рис. 2. Зависимость качества формирования элементов с номинальной шириной 0,8 мкм при разных степенях расфокусировки объектива  $\Delta f$  (мкм): 0 (а);  $\pm 0,25$  (б);  $+0,5$  (в);  $-0,5$  (г);  $+1,0$  (д);  $-1,0$  (е)

чина расфокусировки объектива  $\Delta f = 0$ . На практике всегда существует ошибка в точности фокусировки объектива (инструментальная, человеческий фактор и др.). Задача исследований данного раздела – оценка величины допустимой расфокусировки объектива  $\Delta f$ , при которой заметного ухудшения качества проработки элементов не происходит.

Для проведения испытаний выбраны мира с номинальной шириной элементов 8 мкм (0,8 мкм в плоскости ВР), лазерное некогерентное излучение с  $\lambda \sim 266$  нм и оптимальной дозой излучения порядка 0,48 Дж/мкм<sup>2</sup>.

Недофокусировка, т. е. случай, когда плоскость Гаусса объектива была выше поверхности ВР, отмечалась знаком «-», а перефокусировка, т. е. когда плоскость Гаусса объектива была ниже плоскости поверхности ВР, – знаком «+». Результаты исследований приведены на рис. 2. Из рисунка следует, что при величине расфокусировки объектива  $\Delta f = \pm 0,25$  мкм заметной разницы в качестве формирования элементов в сравнении со случаем, когда  $\Delta f = 0$  мкм, не наблюдается (рис. 2, а, б). Повышение  $\Delta f$  до + 0,5 мкм приводит к заметному увеличению клина проявления протяженных элементов, ухудшению проработки их внутренних углов (рис. 2, в), в то время как при  $\Delta f = - 0,5$  мкм качество проработки элементов изменяется незначительно (рис. 2, г).

Дальнейшее увеличение расфокусировки объектива до  $\Delta f = + 1,0$  мкм приводит к искажению формы и размеров протяженных элементов (квадратные элементы воспроизводятся нормально) и внутренних углов Т-образного элемента (рис. 2, д), в то время как при величине расфокусировки  $\Delta f = - 1,0$  мкм наблюдается только увеличение клина проявления элементов при сохранении номинальных размеров у их дна (рис. 2, е).

Из результатов данных исследований следует:

для точного воспроизведения элементов мира при их формировании излучением с  $\lambda \sim 266$  нм и апертуре объектива  $NA = 0,4$  дефокусировка объектива (отклонение плоскости Гаусса от поверхности слоя вакуумного резиста) не должна превышать величину  $\pm 0,25$  мкм;

при  $\Delta f = \pm 0,5$  мкм недофокусировка объектива (плоскость Гаусса выше поверхности слоя ВР) меньше влияет на точность воспроизведения элементов, чем перефокусировка объектива (плоскость Гаусса ниже поверхности слоя ВР).

В качестве экспериментальной проверки соответствия реальных и рассчитанных методом моделирования режимов экспонирования при формировании маски из ВР они закладывались в управляющий комплекс экспериментальной литографической установки ЭМ-5094 ( $\lambda \sim 532$  нм).

Маски формировались в пленках ВР на основе перилентетракарбоновой кислоты толщиной порядка 0,5 мкм, нанесенных на подложку из кремния, поверхность которой была предварительно закрыта пленкой SiO<sub>2</sub> толщиной порядка 0,3 мкм. Номинальный размер ширины протяженных элементов масок составлял 0,8 мкм. Далее проводились плазмохимическое травление пленок оксида кремния до кремниевой подложки через маски из ВР и их последующее удаление

в кислородосодержащей плазме.

Результаты эксперимента иллюстрируются рис. 3, который свидетельствует о близком соответствии оптимальных параметров экспонирования, определенных путем моделирования, и реальных оптимальных параметров установок литографии при формировании масок.

Теоретически методом моделирования показано [13] и практически подтверждено, что в процессе лазерной абляции в окнах маски всегда остается тончайший (порядка 0,02 мкм) прозрачный для лазерного излучения и неудаляемый им слой ВР. Последний образуется за счет того, что энергия лазерного излучения с его некоторой толщины начинает расходоваться на разогрев подложки и температура ВР уже не достигает температуры его субли-

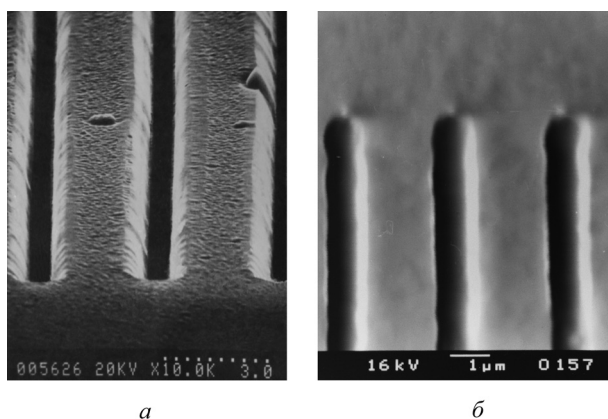


Рис. 3. Фрагмент маски в слое ВР, содержащий 3D-элементы шириной порядка 0,8 мкм (а); фрагмент топологии, сформированной методом плазмохимического травления в слое SiO<sub>2</sub> через маску из ВР (маска из ВР удалена в кислородосодержащей плазме) (б)



мации. На практике этот слой легко удаляется кратковременной обработкой маски (несколько секунд) в кислородосодержащей плазме, не влияющей на ее защитные свойства.

**Заключение.** Проведено моделирование процессов «сухой» лазерной вакуумной микролитографии импульсным лазерным излучением в слоях вакуумного резиста. Выполнено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными. Установлено, что этот метод позволяет реально оценивать возможность качественного формирования 3D-элементов топологии разрабатываемых ИМС, возможные сочетания элементов разных размеров и форм, а также заранее прогнозировать оптимальные параметры импульсного лазерного экспонирования в вакууме слоев вакуумного резиста при создании масок. Показано, что на этапе подготовки производства новых изделий микроэлектроники данный метод позволяет значительно сократить временные и материальные затраты на отработку технологических процессов лазерной вакуумной микролитографии.

### Список использованной литература

1. Green technological process of dry laser vacuum microlithography and equipment cluster for its realisation in ASIC manufacturing / V. E. Obukhov [et al.] // Proc. of the Joint Intern. Congress «Electronics Goes Green 2004 +». – Германия – Берлин, 2004. – P. 803–806.
2. A Submodule For The Laser Vacuum Projection Lithography / V. A. Azarko [et al.] // Proc. SPIE. – 1994. – Vol. 2336. – P. 227–232.
3. Iterative methods in semiconductor device simulation / C. S. Rafferty [et al.] // IEEE Trans. Elec. Dev. – 1985. – Vol. ED-32, N 10. – P. 2018–2027.
4. Dutton, R. W. Modeling and simulation for VLS / R. W. Dutton // Intern. Electron Devices Meeting. Technical Digest. – 1986. – P. 2–7.
5. Dutton, R. W. Perspectives on technology and technology-driven CAD / R. W. Dutton, A. J. Strojwas // IEEE Trans. CAD-ICAS. – 2000. – Vol. 19, N 12. – P. 1544–1560.
6. Lithographic Properties of Perylenetetracarboxylic Acid Derivatives Films / V. A. Azarko [et al.] // Proc. SPIE. – 1996. – Vol. 3179. – P. 99 – 102.
7. Dry patterning of resistive masks and topological structures / V. V. Boksha [et al.] // Proc. SPIE. – 1993. – Vol. 2091. – P. 101–111.
8. Лазерная обработка электрохромных пленок  $WO_3$  в полосе собственного поглощения / Б. А. Будкевич [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 1988. – № 1. – С. 39–43.
9. Любов, Б. Я. Развитие тепловой модели поверхностного испарения металлов под действием концентрированных потоков энергии / Б. Я. Любов, Э. Н. Соболев // Физика и химия обработки материалов. – 1979. – № 6. – С. 12 – 19.
10. Углов, А. А. Расчет абляции пластины конечной толщины / А. А. Углов, И. Ю. Смуров, Ю. Н. Лохов // Физика и химия обработки материалов. – 1982. – № 1. – С. 3–7.
11. Самарский, А. А. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана / А. А. Самарский, Б. Д. Моисеенко // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1965. – Т. 5, № 5. – С. 816 – 827.
12. Годунов, С. К. Разностные схемы / С. К. Годунов, В. С. Рябенский. – М.: Наука, 1973. – 400 с.
13. Обухов, В. Е. Моделирование процессов абляции пленок органических материалов под воздействием импульсного лазерного излучения / В. Е. Обухов, Е. П. Шпак, С. П. Жвавый // Сб. матер. IV МНТК «Современные методы и технологии создания и обработки материалов». – Беларусь – Минск, 2009. – Т. 2. – С. 183–188.

Поступила в редакцию 10.01.2015