

УДК 535.421; 621.793/.794

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННАЯ ФОТОЛИТОГРАФИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЗИСТОВ НА ОСНОВЕ ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ СТЕКЛООБРАЗНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

В. А. Данько, И. З. Индутный, В. И. Минько, П. Е. Шепелявый

*Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАН Украины,
03028, г. Киев, просп. Науки, 41
E-mail: danko-va@ukr.net*

Исследовано применение халькогенидных стеклообразных полупроводников в качестве неорганического вакуумного фоторезиста для получения периодического рельефа на подложках разного состава. Показано, что халькогенидный резист может быть успешно реализован в сочетании с интерференционной (в том числе иммерсионной) литографией для формирования одно- и двумерных субмикронных периодических структур с пространственной частотой от 300 до 8000 мм^{-1} . Разработаны технологические процессы получения рельефных структур и литографических масок с субмикронными размерами элементов на полупроводниковых, диэлектрических и металлических подложках, описаны их возможные применения.

Ключевые слова: интерференционная литография, халькогенидный неорганический фоторезист, иммерсия, травление, периодический рельеф.

Введение. Халькогенидные стеклообразные полупроводники (ХСП) и тонкоплёночные структуры на их основе широко используются в современном высокотехнологичном производстве: оптической регистрации информации (оптические диски), оптическом волокне и волоконно-оптических приборах (сенсоры, усилители, демультимплексоры и др.), неорганическом вакуумном резисте, ячейках энергонезависимой памяти и др. В основе большинства применений ХСП лежат стимулируемые внешними влияниями (например, световыми потоками) структурные превращения в тонких плёнках этих стёкол. На основе двух фотостимулированных эффектов в плёнках ХСП (фотостимулированная диффузия в структурах ХСП—металл [1] и фотопотемнение плёнок ХСП [2]) разработаны высококоразрешающие вакуумные неорганические фоторезисты и технологии их применения в оптической технике, голографии, электронике.

Цель данной работы — демонстрация преимуществ халькогенидного фоторезиста. Приведён обзор результатов выполненных авторами исследований применения неорганического фоторезиста на основе ХСП в технологии интерференционной (голографической) фотолитографии.

Интерференционная фотолитография. Общая характеристика. Одним из наиболее технологичных методов получения периодически структурированной резистивной маски с высокой пространственной частотой является запись на фоторезисте интерференционной картины от двух или нескольких когерентных световых пучков — так называемая интерференционная литография. Сочетание интерференционной литографии с возможностями, которые обеспечиваются физическими свойствами неорганического фоторезиста на основе ХСП, находит широкое применение в технологиях изготовления дифракционных оптических элементов и устройств с микронными и субмикронными размерами элементов (голографические дифракционные решётки, линзы и зеркала, устройства ввода/вывода оптического излучения и т. п.) [3–5]. К преимуществам метода интерференционной литографии можно отнести то, что он технологически несложный и более дешёвый по сравнению с другими видами литографии, а также позволяет записывать голографическую

картину с высокой степенью однородности на значительных площадях, размер которых в большинстве случаев ограничивается лишь мощностью лазера и/или чувствительностью резиста.

С помощью этого метода можно изготовить маску с отверстиями, которые имеют вид параллельных линий с периодом от долей микрометра до нескольких микрометров (го-лографическая дифракционная решётка). Если провести двукратное экспонирование при двух взаимно перпендикулярных ориентациях пластины с резистом относительно направления падения лучей, то получим маску в виде периодически расположенных отверстий или точек (в зависимости от условий экспонирования и селективного травления) [6, 7].

Период интерференционной картины d определяется соотношением

$$d = (\lambda/2n) \sin(\theta/2),$$

где λ — длина волны света в вакууме; n — показатель преломления среды, в которой формируется интерференционная картина; θ — угол схождения лучей. Если интерференция световых пучков осуществляется в оптической среде воздуха, показатель преломления которого $n \sim 1$, то минимальное значение d достигается при экспонировании во встречных пучках и составляет $\lambda/2$.

При необходимости уменьшения периода дифракционных структур (увеличение пространственной частоты интерференционной картины) в оптический путь когерентных пучков вводят оптический преломляющий элемент (рефракционную призму) с показателем преломления $n > 1$ [8, 9]. В соответствии с приведённым соотношением на одной из граней призмы получают интерференционную картину с периодом, в n раз меньшим, т. е. при заданных значениях параметров λ и θ использование оптической среды с более высоким, чем у воздуха, показателем преломления даёт возможность уменьшить размер элементов периодической структуры. Для проведения записи на фоторезисте светового поля, сформированного в призме, обеспечивают оптическую связь между призмой и фоторезистом путём использования иммерсионной жидкости для устранения воздушного промежутка между их поверхностями. Практически это осуществляется методом нанесения иммерсионной жидкости на соответствующую грань призмы и прижатия к этой грани подложки с фоторезистом.

Ещё эффективнее можно уменьшить размер записанных элементов с использованием твердофазной иммерсионной литографии, когда фоторезист наносится непосредственно на грань призмы с высоким показателем преломления. Тогда интерференционная картина формируется непосредственно в среде призма—фоторезист, что позволяет повысить её пространственную частоту.

Преимущества халькогенидных фоторезистов. Неорганические фоторезисты на основе ХСП, использованные авторами в интерференционной фотолитографии (в основном двойные и тройные соединения состава As—S—Se), характеризуются исключительно высокой разрешающей способностью (до 1 нм), светочувствительностью в широком спектральном диапазоне. Кроме того, эти фоторезисты являются достаточно технологичными, поскольку плёнки ХСП можно наносить в вакууме на любые подложки (в том числе неплоские), используя те же технологии и оборудование, что и для нанесения функциональных слоёв в микроэлектронике. Показатель преломления плёнок ХСП существенно выше, чем органических резистов, и равняется 2,5–3,0 в видимой области спектра. Это обуславливает перспективность применения халькогенидных резистов в иммерсионной фотолитографии.

В результате облучения светом свойства плёнки ХСП существенно изменяются, в частности оптические и механические характеристики, растворимость в химических травителях. Фотостимулированные изменения в таких плёнках бывают реверсивными и неревверсивными [10]. Использование халькогенидных плёнок в качестве фоторезиста связано

именно с нереверсивными изменениями их растворимости. После экспонирования скорость растворения плёнок изменяется и в зависимости от состава плёнки и типа растворителя можно получить разную величину селективности, т. е. отношение скоростей растворения экспонированных и неэкспонированных участков плёнки. Можно получить также травление как позитивного, так и негативного типа, когда экспонированные участки растворяются быстрее или же медленнее, чем неэкспонированные. В предлагаемой работе использовались селективные травители негативного типа на основе аминов.

Нереверсивные фотостимулированные изменения в халькогенидном резисте связаны со структурными изменениями осаждённых в вакууме слоёв халькогенидов. Основным типом связей в матрице аморфного халькогенида тройного состава As—S—Se является связь мышьяк—халькоген. Однако в термически осаждённой в вакууме плёнке наблюдается значительное содержание «неправильных» связей: As—As, S—S и Se—Se, присутствуют также поры и пустоты. В результате освещения и/или отжига происходит полимеризация молекулярных групп в основную матрицу халькогенидного стекла и количество гомополярных связей и пустот уменьшается. Это приводит к изменению свойств плёнки, в том числе и растворимости.

Дифракционные структуры на слоях ХСП. В процессе разработки технологии интерференционной литографии на основе халькогенидных фоторезистов были оптимизированы толщины ХСП, величины экспозиции интерференционным полем лазерного излучения, состав травителей, а также длительность селективного травления в зависимости от пространственной частоты и скважности периодической структуры. Теоретически и экспериментально были исследованы возможности управления формой профиля элементов рельефных структур с помощью изменения технологических условий, а также применения двухслойного фоторезиста. В частности, путём численного моделирования показано, что голографическая картина, которой осуществляется экспонирование, точнее всего воспроизводится в фоторезисте (линейный отклик системы), если запись выполняется излучением с длиной волны из области слабого поглощения резиста [11].

На основе оптимизированных технологических процессов изготовлены экспериментальные образцы решёток и бинарных рельефных структур, определены их морфологические параметры и дифракционные свойства. Запись интерференционных структур осуществлялась излучением аргонового и гелий-кадмиевого лазеров.

На рис. 1, *a* представлено полученное с помощью атомного силового микроскопа (АСМ) изображение решётки (и профиль её штрихов) с пространственной частотой $\nu = 5350 \text{ мм}^{-1}$, записанной на слое As_2S_3 аргоновым лазером (длина волны 476 нм) с использованием жидкостной иммерсии. Фотополимерная копия решётки показана на рис. 1, *b*. Для получения копий использован фотополимер «Янтарь-3», разработанный в Институте химии высокомолекулярных соединений НАН Украины.

Как видно из рисунка, профиль штрихов копии идентичен профилю штрихов оригинала решётки и близок к синусоиде. Период решёток d равняется 187 нм ($\nu = 5350 \text{ мм}^{-1}$), глубина рельефа h оригинала решётки составляет 50 нм, глубина модуляции h/d достигает 0,27. Таким образом, согласно [10] получена решётка с высоким уровнем модуляции. Для фотополимерной копии глубина рельефа несколько уменьшается ($h = 44 \text{ нм}$).

Применяя твердофазную интерференционную фотолитографию, удаётся формировать рельефные структуры с рекордными значениями пространственной частоты, которых затруднительно достичь даже с помощью электронной литографии. Итак, используя излучение гелий-кадмиевого лазера ($\lambda = 440 \text{ нм}$) и твердофазную иммерсию (фоторезист наносили непосредственно на одну из граней призмы из оптического стекла марки СТФ с $n = 2,2$), мы получили решётку с пространственной частотой порядка 8000 мм^{-1} на слое As—S—Se (рис. 2). Пространственный период рельефа этой решётки 125 нм, т. е. дифракционные свойства проявляются лишь в глубоком ультрафиолете.

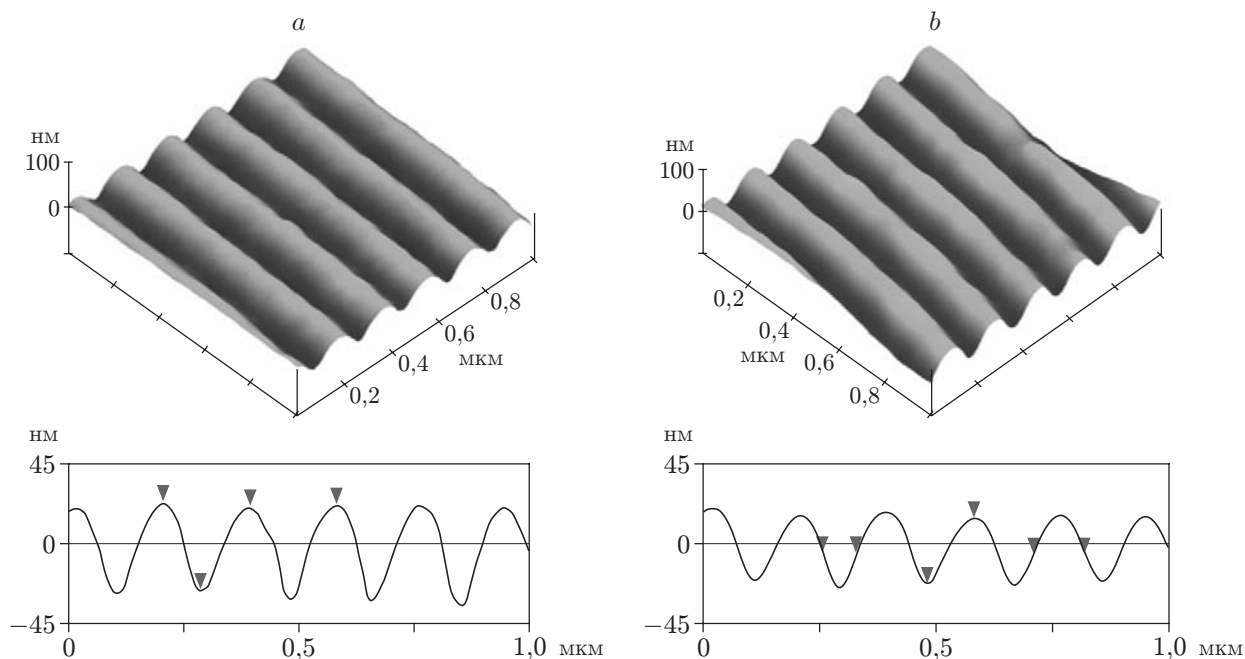


Рис. 1. АСМ-изображение решётки и профиля её штрихов: *a* — решётка записана на слое As_2S_3 , *b* — фотополимерная копия решётки

Метод интерференционной фотолитографии позволяет формировать на поверхности твёрдых тел структуры и более сложных конфигураций, чем решётки, за счёт нескольких экспонирований интерференционной картиной от двух когерентных пучков или же экспонирования сложной интерференционной картиной, сформированной несколькими когерентными пучками. Возможна также комбинация этих двух методов.

В качестве примера на рис. 3 приведено АСМ-изображение периодического рельефа, полученного на слое фоторезиста As_2S_3 с помощью двойного экспонирования. Для такого экспонирования использовалась интерференционная картина, сформированная излучением гелий-кадмиевого лазера ($\lambda = 440$ нм). Пространственная частота этой бинарной структуры в двух взаимно перпендикулярных направлениях составляет 5700 мм^{-1} , глубина модуляции $70\text{--}75$ нм. Форма профиля элементов рассмотренных структур близка к синусоиде, что предопределено характеристиками фоторезиста (значительная протяжённость

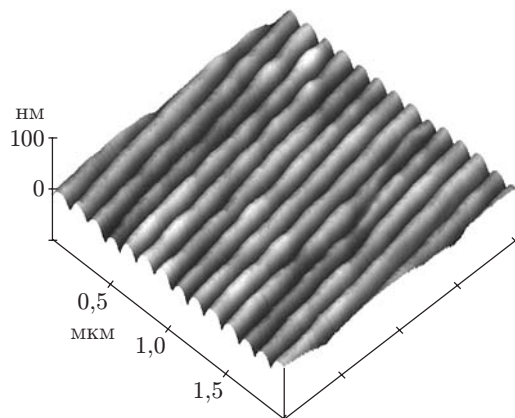


Рис. 2. АСМ-изображение решётки с пространственной частотой 8000 мм^{-1}

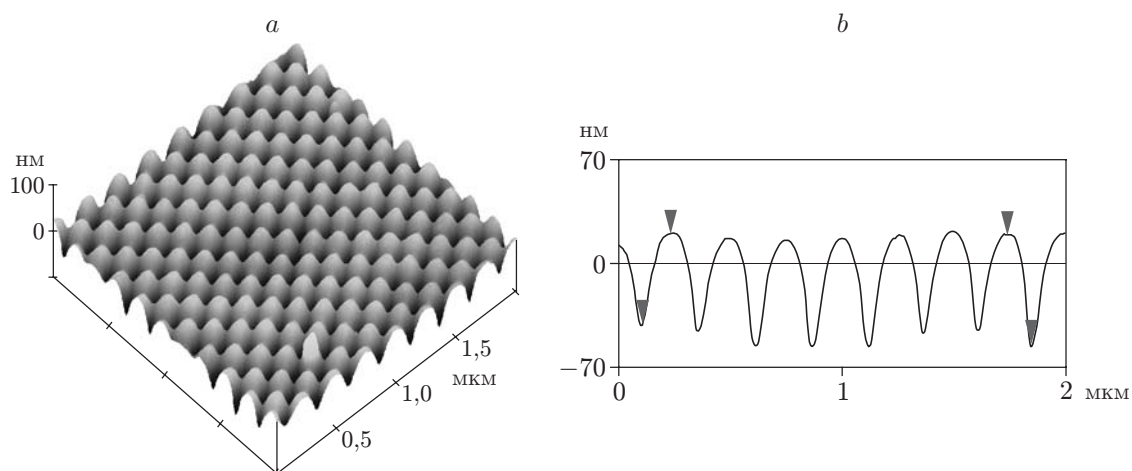


Рис. 3. АСМ-изображение периодического рельефа, полученного на слое As_2S_3 с помощью иммерсионной литографии: *a* — аксонометрическая проекция, *b* — диагональный разрез

линейного участка характеристической кривой) и оптимальными условиями экспонирования и послеэкспозиционной обработки [11].

Сформированные на слоях ХСП интерференционные структуры с синусоидальной формой разреза элементов, как показано на рис. 1–3, можно использовать в качестве дифракционных оптических элементов, оригиналов рельефно-фазовых голограмм, матриц для термического или фотополимерного копирования. Однако для других применений (формирование фотонных кристаллов, выращивание нанопроводов, эмиссионных структур и т. д.) необходимо формирование рельефных структур с формой профиля элементов, близкой к прямоугольной. С этой целью проведены исследования формирования дифракционных структур на двухслойном халькогенидном фоторезисте [12]. На рис. 4, *a*, *b* приведены АСМ-изображения периодического рельефа, сформированного в двухслойном халькогенидном фоторезисте $\text{As}_{40}\text{S}_{30}\text{Se}_{30}$ — $\text{As}_4\text{Ge}_{30}\text{S}_{66}$ с помощью двойного интерференционного экспонирования и двухстадийного травления. Если во время формирования защитной маски в фоточувствительном слое $\text{As}_{40}\text{S}_{30}\text{Se}_{30}$ соответствующим образом подобрать экспозицию и время травления, то можно получить маску, которая будет представлять собой поверхность с периодически расположенными отверстиями (см. рис. 4, *a*). Диаметры отверстий можно изменять, меняя время травления, — таким способом формируется упорядоченная микропористая структура, причём величина пористости в определённых границах технологически управляема.

При увеличении времени протравливания слоя $\text{As}_{40}\text{S}_{30}\text{Se}_{30}$ получались структуры в виде выступов, диаметр которых также определялся временем травления (см. рис. 4, *b*). Высота или глубина рельефа зависит в основном от времени травления слоя $\text{As}_4\text{Ge}_{30}\text{S}_{66}$ и изменяется в пределах его начальной толщины.

Форма профиля отверстий и выступов сформированной структуры является трапециевидальной, достаточно близкой к прямоугольной; наблюдается качественная поверхность элементов структуры. Следует заметить, что стёкла на основе Ge—S характеризуются более высокой термической и механической стойкостью по сравнению со стёклами системы As—S—Se, что также важно при их использовании в качестве литографических масок. В частности, это позволяет формировать копии таких изделий по стандартной технологии тиражирования компакт-дисков [13] или с применением фотополимеров [14].

Формирование рельефных структур через интерференционную маску в халькогенидном фоторезисте. Интерференционная фотолитография на слоях ХСП мо-

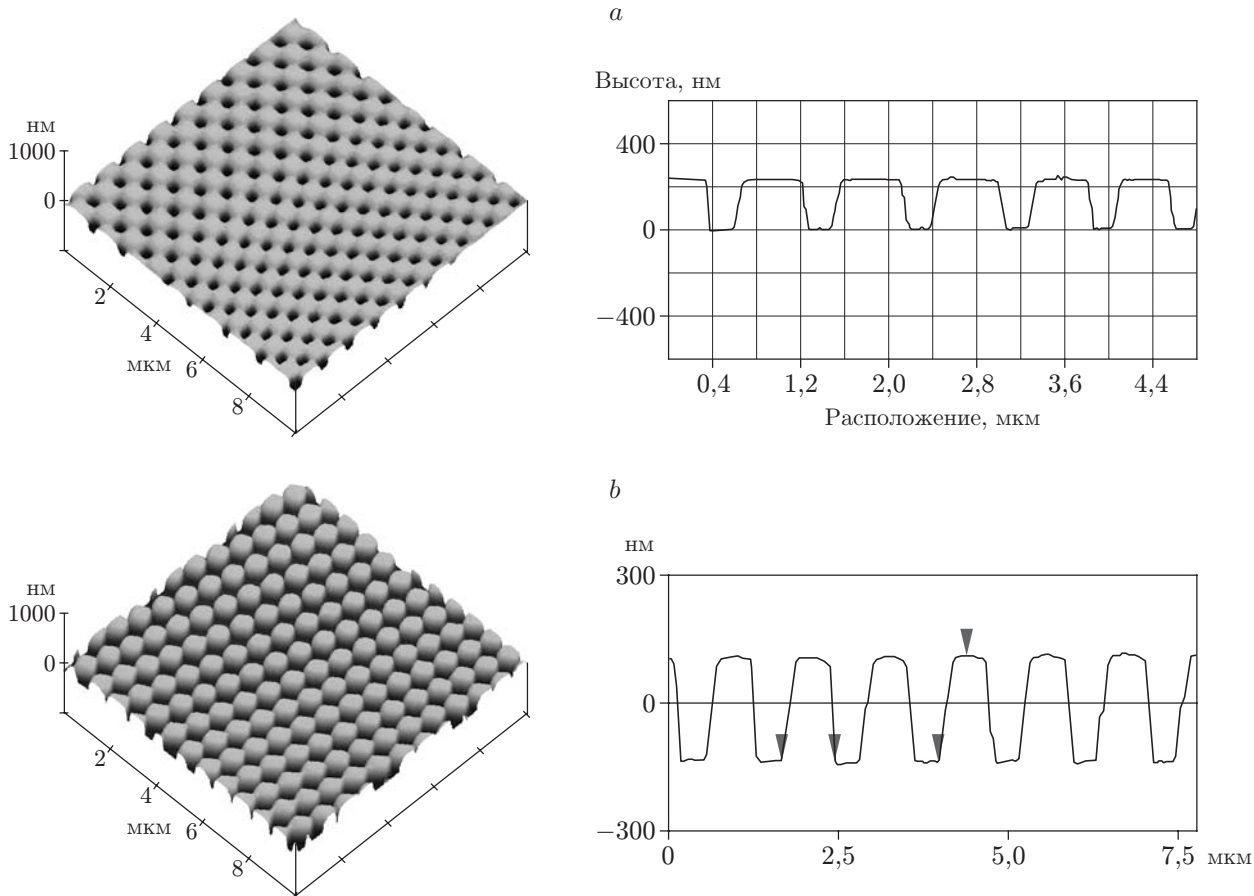


Рис. 4. АСМ-изображения периодического рельефа, сформированного в двухслойном фоторезисте $\text{As}_{40}\text{S}_{30}\text{Se}_{30}$ — $\text{As}_4\text{Ge}_{30}\text{S}_{66}$; время травления слоя $\text{As}_{40}\text{S}_{30}\text{Se}_{30}$: 30 с (а), 80 с (б)

жет также применяться для формирования литографической маски в целях последующего травления материала подложки. Разработан метод формирования литографической маски для селективного травления поверхности полупроводниковых и других подложек жидкостными травителями. Например, получены образцы периодического рельефа на поверхности $\text{Si}\langle 100 \rangle$ с использованием фоторезиста состава $\text{As}_{40}\text{S}_{60}$.

Для этого на пластину $\text{Si}\langle 100 \rangle$ последовательно наносились слой хрома и неорганический резист, после чего осуществлялось экспонирование (одинарное или двойное в зависимости от структуры, которую хотели получить) интерференционным полем, сформированным когерентными пучками лазерного излучения, и селективное травление фоторезиста. При этом время травления выбиралось таким образом, чтобы создать литографическую маску необходимой скважности (соотношение открытых областей подложки и областей, покрытых фоторезистом). Следующий этап — удаление слоя хрома через халькогенидную маску. Травление халькогенидных соединений выполнялось безводными растворами органических щелочей, а слоя Cr — водным раствором HCl . Образованная в результате двухслойная резистивная маска $\text{As}_{40}\text{S}_{60}$ — Cr применялась для формирования на поверхности Si соответствующего рельефа. Так как для анизотропного травления монокристаллов кремния с кристаллографической ориентацией $\langle 100 \rangle$ использовались щелочные соединения на основе аминов, способные активно растворять и халькогенидные соединения, процесс травления кремния осуществлялся фактически через хромовую маску.

Дифракционные свойства полученных структур исследовались путём измерения спек-

тральной зависимости дифракционной эффективности η образцов, которые предварительно покрывались отражающим слоем Al толщиной 100 нм. Значение η определялось как отношение интенсивности дифрагированного излучения к интенсивности падающего. Спектральные измерения проводились для первого порядка дифракции в интервале 400–800 нм по схеме Литтрова для двух направлений поляризации падающего света при значении угла между падающим и дифрагированным пучками 8° [12].

На рис. 5, *a* приведены изображение формы профиля периодического рельефа и график спектральной зависимости дифракционной эффективности структуры η (кривые 1 и 2 отвечают параллельному (E_p) и перпендикулярному (E_s) расположению электрического вектора световой волны относительно штрихов решётки), полученной на поверхности монокристалла кремния в виде дифракционной решётки с периодом около 0,9 мкм путём анизотропного травления через защитную маску. Время травления кремния составило 60 с. При этом глубина рельефа достигла 0,65 мкм, а форма профиля штрихов близка к треугольной. Наблюдается значительная глубина модуляции рельефа ($\sim 0,7$), а также качественная (без значительных дефектов) поверхность штрихов.

Как видно из рисунка, большая глубина модуляции и несинусоидальный профиль штрихов решётки обуславливают высокие (до 80 %) значения дифракционной эффективности лишь в длинноволновой части спектра.

При уменьшении времени травления кремния изменяется и форма профиля штрихов. На рис. 5, *b* изображена форма профиля рельефа, образованного на поверхности Si

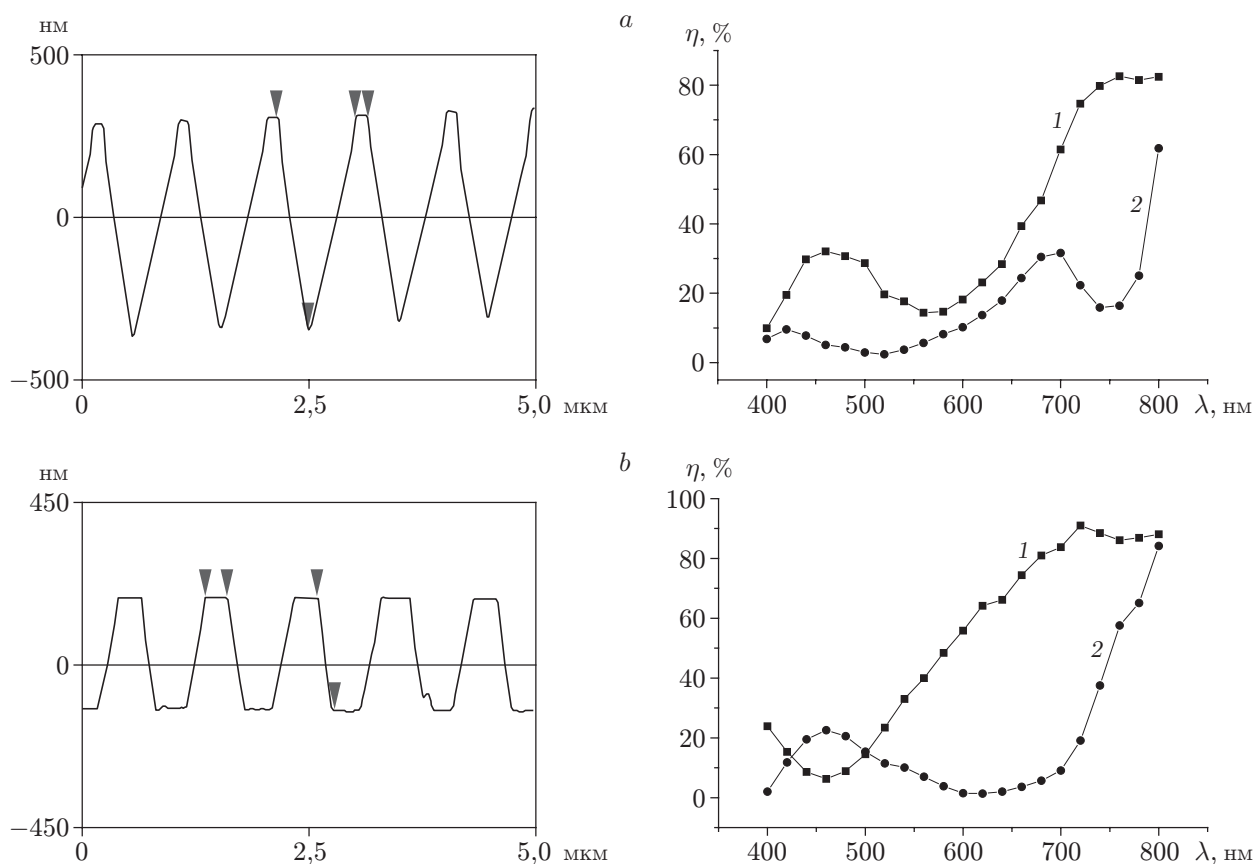


Рис. 5. АСМ-изображения формы профиля рельефа периодических структур на поверхности монокристалла кремния и спектральные зависимости их дифракционной эффективности; время травления образцов: 60 с (*a*), 20 с (*b*)

за время травления 20 с. Глубина рельефа при этом составляет около 0,3 мкм, а форма профиля штрихов близка к трапецеидальной. Также можно отметить, что в результате анизотропного характера травления глубина получаемого рельефа не пропорциональна времени травления.

Что касается спектральной зависимости дифракционной эффективности полученных структур, то наблюдаются значительные отличия в поведении величины η для E_p - и E_s -поляризованного света, особенно в красной области спектра. Такое изменение связано с изменением формы профиля штрихов решётки [15–17].

Подобные кремниевые решётки с симметричными треугольными или трапецеидальными штрихами могут использоваться, в частности, в демультимплексорах [18] и лазерах с переменной длиной волны [19].

Путём анизотропного травления через сформированную двойным экспонированием защитную маску получены структуры с субмикронными размерами элементов (рис. 6, *a*) на поверхности монокристалла кремния площадью до 75×75 мм. Увеличение площади подложки, на которой могла быть сформирована данная структура, ограничивалось интенсивностью излучения лазера, используемого для записи интерференционной картины.

Методом интерференционной фотолитографии с использованием халькогенидного фоторезиста изготовлены также качественные дифракционные структуры с субмикронными размерами элементов на пластинах GaAs, диэлектрических подложках и плёнках металлов.

Полученные структуры могут быть использованы для повышения эффективности электронной эмиссии, в сенсорных и оптоэлектронных устройствах, а также как профилированные подложки для выращивания фотонных структур. В качестве примера на рис. 6, *b* показано электронно-микроскопическое изображение разреза структуры, выращенной с помощью наклонного осаждения в вакууме монооксида кремния (угол осаждения между нормалью к подложке и направлением на испаритель составлял 75°). Осаждение осуществлялось на профилированную с помощью интерференционной литографии кремниевую пластину (см. рис. 6, *a*). Получена упорядоченная двумерная анизотропная фотонная структура (см. рис. 5, *b*), которая состоит из SiO_x -колонн субмикронных размеров, выращенных на Si-столбиках. Диаметр SiO_x -колонн в нижней части совпадает с диаметром Si-столбиков. Каждая SiO_x -колонна наклонена и имеет нанокolonчатую структуру (диа-

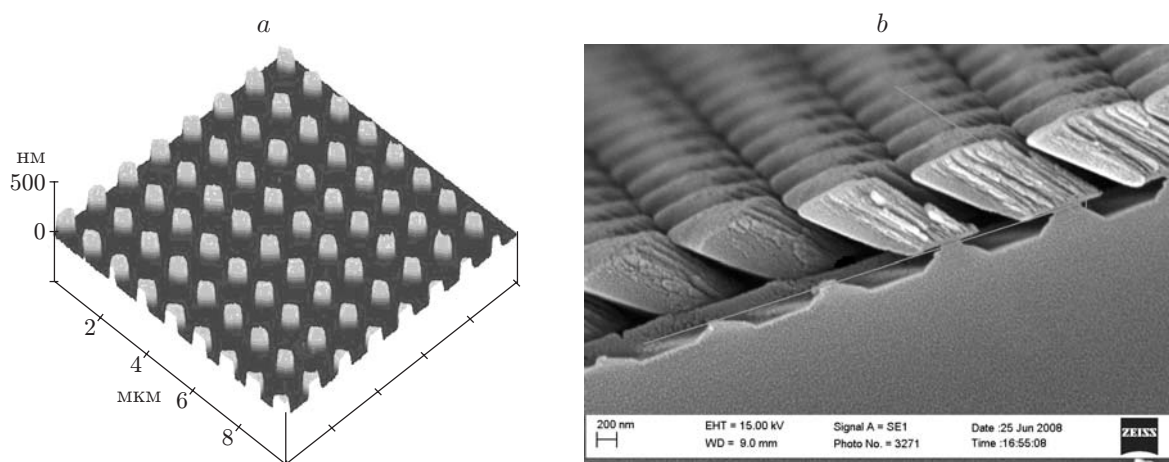


Рис. 6. Изображения периодических структур, сформированных на поверхности кремниевых пластин: *a* — АСМ-изображение двумерной структуры на поверхности Si(100); *b* — электронно-микроскопическое изображение сечения структуры SiO_x , выращенной на профилированной поверхности Si

метр наноколонн, образующих микроколонны, 10–100 нм). Пористость SiO_x -микроколонн около 58 %, состав $x = 1,51$, плотность $0,88 \text{ г/см}^3$ [20]. Такая анизотропная упорядоченная структура может использоваться в качестве поляризационных фильтров, фотонных кристаллов и т. п.

Заключение. В предложенной работе дан обзор результатов проведённых авторами исследований по применению неорганического халькогенидного фоторезиста в технологии интерференционной литографии.

Показано, что дешёвая и высокопродуктивная интерференционная литография с использованием халькогенидных фоторезистов позволяет формировать рельефные структуры с контролируемой формой и размерами элементов с пространственной частотой до 8000 мм^{-1} на образцах различного состава большой площади (до $70 \times 70 \text{ мм}$). Полученные высокочастотные дифракционные наноструктуры находят применение в качестве дифракционных оптических элементов, элементов оптоэлектронных сенсоров, штампов для тиражирования нано- и микроструктур, подложек для выращивания фотонных структур, упорядоченных матриц нанопроводов и т. д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костышин М. Т., Михайловская Е. В., Романенко П. Ф. Об эффекте фотографической чувствительности тонких полупроводниковых слоев, нанесенных на металлические подложки // ФТТ. 1966. **8**, № 2. С. 571–572.
2. Костышин М. Т., Михайловская Е. В., Романенко П. Ф., Сандул Г. А. О фотографической чувствительности тонких полупроводниковых слоев // ЖНиПФиК. 1965. **10**, вып. 6. С. 450–451.
3. Indutnyi I. Z., Stronski A. V., Romanenko P. F. et al. Manufacturing of holographic optical elements with the help of chalcogenide resists // Proc. SPIE. 1994. **2321**. P. 352–354.
4. Indutnyi I. Z., Stronski A. V., Kostioukevich S. A. et al. Holographic optical element fabrication using chalcogenide layers // Opt. Eng. 1995. **34**, N 4. P. 1030–1039.
5. Vlcek M., Ewen P. J. S., Wagner T. High efficiency diffraction gratings in As—S layers // Journ. Non-Cryst. Solids. 1998. **227–230**. P. 743–747.
6. Бредихин В. И., Буренина В. Н., Верёвкин Ю. К. и др. Наноразмерная интерференционная литография с импульсным УФ-лазером // ЖТФ. 2004. **74**, вып. 9. С. 86–90.
7. Shishido A., Diviliansky I. B., Khoo I. C. et al. Direct fabrication of two-dimensional titania arrays using interference photolithography // Appl. Phys. Lett. 2001. **79**, N 20. P. 3332–3334.
8. Shank C. V., Schmidt R. V. Optical technique for producing $0.1\text{-}\mu\text{m}$ periodic surface structures // Appl. Phys. Lett. 1973. **23**, N 3. P. 154–155.
9. Pat. **6,185,019 B1 US**. Holographic patterning method and tool employing prism coupling /D. S. Hobbs, B. D. MacLeod, A. F. Kelsey. Publ. 06.02.01.
10. Индутный И. З., Костышин М. Т., Касярум О. П. и др. Фотостимулированные взаимодействия в структурах металл—полупроводник. Киев: Наук. думка, 1992. 239 с.
11. Minko V. I., Shepeliavyi P. E., Danko V. A. et al. Recording of high efficiency diffraction gratings by He—Ne laser // Semicond. Phys., Quantum Electron. and Optoelectron. 2004. **7**, N 1. P. 88–92.
12. Indutnyi I. Z., Popescu M., Lorinczi A. et al. Fabrication of submicrometer periodic structures using interference lithography and two-layer chalcogenide photoresist // Journ. Optoelectron. and Adv. Mater. 2009. **11**, N 12. P. 1967–1971.
13. Костюкевич С. А., Шепелявый П. Е., Москаленко Н. Л. и др. Исследование процесса мастеринга компакт-дисков на неорганических фоторезистах // Регистрация, хранение и обработка данных. 2001. **3**, № 4. С. 5–11.

14. **Matyushova V. G., Matyushov V. F., Indutnyi I. Z. et al.** Photopolymeric materials as a matrixes for information recording // Proc. of the 2nd Intern. Conf. "Electronic Processes in Organic Materials". Киев: «Принтер ЛТД», 1998. P. 169.
15. **Maystre D., Petit R.** Essai de determination theorique du profil optimal d'un reseau holographique // Opt. Commun. 1971. **4**, N 1. P. 25–28.
16. **Loewen E. G., Neviere M., Maystre D.** Grating efficiency theory as it applies to blazed and holographic gratings // Appl. Opt. 1977. **16**, N 10. P. 2711–2721.
17. **Дмитриева Л. А., Голубенко И. В., Савицкий Г. М.** Дифракционная эффективность голографических решеток симметричных профилей // ОМП. 1985. № 1. С. 4–6.
18. **Popov E., Hoose J., Frankel R. et al.** Low polarization dependent diffraction grating for wavelength demultiplexing // Opt. Express. 2004. **12**, N 2. P. 269–275.
19. **Pat. 6958859 B2 US.** Grating device with high diffraction efficiency /J. Hoose, R. Frankel, E. Popov, M. Neviere. Publ. 25.10.05.
20. **Indutnyi I. Z., Maidanchuk I. Yu., Min'ko V. I. et al.** Visible photoluminescence from annealed porous SiO_x films // Journ. Optoelectron. and Adv. Mater. 2005. **7**, N 3. P. 1231–1236.

Поступила в редакцию 15 февраля 2010 г.
