15

Оптимизация технологий изготовления структур интегральной фотоники с использованием позитивного электронного резиста AR-P 6200

© В.А. Киселевский[1,2], К.А. Фетисенкова[2,3], А.А. Татаринцев[2], А.Е. Мельников[2], О.Г. Глаз[2,4]

[1] Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова РАН, Москва, Россия
[2] Физико-технологический институт им. К.А. Валиева РАН, Москва, Россия
[3] Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный, Россия
[4] Национальный исследовательский университет „МЭИ“, Москва, Россия

e-mail: sevakiselevskiy@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.10.2024 г.
В окончательной редакции 17.12.2024 г.
Принята к публикации 28.02.2025 г.

Создана методика для изготовления волноводов с каналом заданной ширины, используя электронно-лучевую литографию с применением позитивного электронного резиста AR-P 6200 (CSAR 62). Разработан технологический процесс с подобранными параметрами, позволивший изготовить тестовые структуры интегральной фотоники.

Ключевые слова: волоконная оптика, электронно-лучевая литография, плазмохимическое травление, позитивный электронный резист.

DOI: 10.61011/OS.2025.03.60246.2-25

Введение

В последнее время наблюдается интенсивное развитие интегральной фотоники. Технологический задел, а также компактность и удобство конфигурации элементов фотоники на кремниевых подложках имеет огромное преимущество при реализации фотонных структур методами современного полупроводникового производства. Для производства фотонных интегральных схем в основном используются проекционные системы фотолитографии, так как производительность электронно-литографического оборудования недостаточна для массового производства. Часто степперы используют вместе с электронно-лучевой литографией (ЭЛЛ) для создания вводных и выводных решеток. Такие работы выполняют, например, Optoelectronics Research Centre, Cumec и другие организации. Однако использование фотолитографии для формирования маски не всегда оправдано ввиду сложности и дороговизны изготовления фотошаблонов, а также требований к шероховатости края волновода [1]. Альтернативным способом формирования топологии фотонных структур для исследовательской деятельности, а также для мелкосерийного производства является ЭЛЛ [2,3].

Кремний в последнее время привлекает большое внимание как материал для высокоинтегрированной фотоники. Он имеет низкие потери для окна оптической связи (1.8–2.0 dB/cm), показатель преломления 3.5 на телекоммуникационных длинах волн и позволяет изготавливать недорогие оптоэлектронные решения для объектов различных масштабов — от больших расстояний до соединений чип-чип. Кроме того, кремниевые фотонные устройства могут быть изготовлены с использованием стандартной технологии обработки кремния. Совместимость с методами создания комплиментарных структур металл-оксид-полупроводник (КМОП) позволяет сравнительно дешево производить монолитно интегрированные оптоэлектронные структуры. При этом при изготовлении волноводов на основе структур кремний-на-изоляторе возможно достичь размеров канала до $0.2 \times 0.5\,\mu$m высоты и ширины соответственно [4].

Существует зависимость между геометрическими параметрами волновода и длиной волны передаваемого излучения [1,5]. Для распространения волны с допустимым значением потерь длина волны распространяющегося излучения должна быть сравнима с поперечным размером волновода. В применениях интегральной оптики используют излучение с длинами волн видимого спектра, а также инфракрасное излучение ближнего диапазона. Волноводы с поперечным размером меньше длины волны распространяющегося излучения также используют в устройствах интегральной оптики. Например, такие нанопроволоки длиной менее $200\,\mu$m используют для связи волновода с резонатором [6].

При производстве фотонных структур их геометрические параметры определяются как поставленной задачей, так и разрешением и возможностями используемых технологических процессов и материалов [7]. Несоот-

ветствия размеров изготовленных волноводных структур размерам, рассчитанным при проектировании, могут приводить к серьезным ошибкам при работе волновода в различных устройствах интегральной оптики. Например, изменение ширины волновода на 1 nm приводит к погрешности в длине волны примерно 1 nm в спектрах пропускания интерферометров Маха-Цендера, микрорезонаторов или резонаторов на фотонных кристаллах [8].

Технология ЭЛЛ широко применяется при прототипировании и изготовлении структур волоконной и фотонной оптики. Благодаря высокому разрешению при формировании структур ЭЛЛ является высокоточным и технологическим методом. Технология ЭЛЛ позволяет сравнительно быстро и дешево получать прототипы структур для дальнейшего исследования или использования.

Разрешение ЭЛЛ определяется размерами электронного зонда, энергией электронного пучка, свойствами электронных резистов и параметрами проявления. Хотя технологии ЭЛЛ улучшались на протяжении многих лет, все еще существует необходимость в оптимизации как технологии, так и технологических процессов с учетом параметров электронно-лучевого резиста (чувствительностью, разрешением и контрастностью) для увеличения производительности. Не менее важным параметром для формирования волноводных структур с использованием маски из электронного резиста является плазмостойкость резистивной маски. Данная характеристика является определяющей при создании структур с высоким аспектным соотношением [9]. Использование маски из электронного резиста для процесса плазмохимического травления (ПХТ) позволяет избежать дополнительных технологических операций для удаления жесткой маски, а также загрязнения материалов соответствующими примесями. В большинстве случаев полимерная резистивная маска может быть легко удалена в кислородной плазме.

Формирование волноводов возможно как с использованием позитивных, так и негативных электронных резистов. Среди негативных электронных резистов выделяют, например, такие резисты как HSQ [10–12] или AR-N 7520 [13] благодаря высокому разрешению и плазмостойкости. Данные резисты активно применяются при формировании фотонных структур методом ЭЛЛ. Формирование протяженных волноводов с использованием негативного электронного резиста требует высокой точности совмещения полей рисования электронного литографа во избежание разрывов в канале волновода. Проблема состоит в том, что единовременно электронный литограф может экспонировать поле протяженностью до нескольких сотен микрометров на поверхности образца, а затем требуется сместить образец относительно электронной колонны для того, чтобы экспонируемая область оставалась в фокусе электронной колонны. При смещении столика с образцом могут возникать ошибки совмещения полей рисования, которые приводят к разрыву канала волновода. Разрывы канала будут существенно влиять на потери интенсивности сигнала при прохождении по волноводу. При этом увеличить размеры поля рисования таким образом, чтобы вся структура помещалась внутрь единовременно экспонируемой области, не представляется возможным, так как при увеличении размеров поля рисования уменьшается точность изготовления структур и шероховатость их краев. Также, как правило, негативный резист требует более высокой дозы. Таким образом, ввиду сложности в обращении и требованиям к стабильности установки ЭЛЛ, в особенности при создании крупноразмерных структур, использование негативных резистов не всегда целесообразно.

Альтернативой может быть литография с использованием позитивного электронного резиста, например AR-P 6200 [14]. При таком методе вокруг кремниевого волновода формируется рисунок в позитивном резисте для дальнейшего травления. Неизбежно возникающие ошибки совмещения не будут приводить к разрыву канала волновода, так как в данном случае экспонируется не сам волновод, а область вокруг него. Дефекты, являющиеся результатами ошибок совмещения, могут быть частично или полностью устранены при последующем ПХТ, так как имеют малые линейные размеры и находятся вне волновода. Также в рамках отработки параметров литографии было незначительно увеличено поле рисования (~ 20 nm), что позволило избежать разрывов вдоль канала волновода на используемой литографической установке. После процесса ПХТ получается структура волновода, окруженная протравленным объемом. На следующем этапе протравленный объем может быть заполнен оксидом кремния, а пластина пройти процедуру планаризации.

Позитивный электронный резист AR-P 6200 или CSAR 62 (Allresist) принадлежит к группе стирол-акрилатов. Основными компонентами резиста являются поли(α-метилстирол-со-метилхлоракрилат), генератор кислоты и растворитель анизол. Полимерные слои, кроме того, термически стабильны до 240 °C, температура стеклования составляет 148 °C. По сравнению с резистами на основе полиметилметакрилата (PMMA), CSAR 62 обладает лучшей чувствительностью и плазмостойкостью. Высокая чувствительность резиста достигается за счет введения атомов галогена в полимерную цепь [9,14]. Обычно для этой цели используется хлор (как и для CSAR 62 — метилхлоракрилат), но также используются бром или йод [14]. Атомы хлора поддерживают разрыв полимерной цепи при облучении электронами, а галогенсодержащий кислотный генератор усиливает этот эффект [14]. В результате для разделения высокомолекулярного полимера на более мелкие фрагменты требуется меньше энергии (меньшая доза экспонирования). Эти фрагменты быстро растворяются в проявителе, в то время как не экспонированные, все еще высокомолекулярные области резиста не подвергаются воздействию проявителя. Добавление термостабильного кислотного генератора дало этому резисту его название

- химический усиленный резист (CSAR). Поскольку кислотный генератор активируется в процессе электронного облучения, слои не требуют процесса отжига после экспонирования [15].

Хорошая плазмостойкость достигается за счет введения в полимер ароматических заместителей, таких как, например, фенильные, нафтильные или антрацильные группы [14]. Кроме того, CSAR содержит α-метилстирол для обеспечения устойчивости к травлению. Благодаря своим π-электронам ароматы значительно более стабильны в присутствии различных плазм по сравнению с алифатическими полимерами, такими как ПММА, и, таким образом, достигают высокого уровня стабильности, близкого к фоторезистам. Фоторезисты в основном состоят из новолаков (смесей крезолов, конденсированных с формальдегидом), которые обладают, благодаря крезолам, высоким содержанием ароматов и, следовательно, более стабильны в процессах плазменного травления [14,15].

Таким образом, резист AR-P 6200 CSAR 62 обладает необходимыми характеристиками, подходящими для прототипирования и мелкосерийного производства волоконных структур. Дополнительным плюсом является удобство последующей планаризации устройств интегральной оптики, выполненных с применением позитивного резиста, если это будет необходимо.

Размеры структур волоконной оптики, полученные методом ЭЛЛ, должны соответствовать размерам, полученным при моделировании и расчетах, с минимальным возможным отклонением, так как изменение размеров оптических структур очень сильно влияет на число мод и корректность работы устройства в дальнейшем. Результаты, представленные в настоящей работе, позволят подобрать технологические параметры — дозу и размер структур шаблона для получения итоговых структур с требуемыми характеристиками с погрешностью менее 10 nm.

Методика экспериментов

Для тестирования резиста использовались пластины кремний-на-изоляторе (КНИ). Слой кремния толщиной 220 nm на оксиде кремния толщиной 2 μm находился на кремниевой пластине ориентацией (100). КНИ-пластины перед нанесением резиста очищались в кислородной плазме в течение 2 min при потоке газа 50 sccm. Резист AR-P 6200 (CSAR 62) с концентрацией 4 % (разбавитель анизол) наносился на подготовленные пластины на центрифуге SM-180 (SAWATEC AG, Швейцария) при целевых оборотах 4000 rpm. При этом на начальном этапе столик центрифуги раскручивался до 300 rpm с угловым ускорением 300 rad/s^2 для равномерного распределения резиста по поверхности пластины. Вращение столика центрифуги с частотой 300 rpm поддерживалось в течение 5 s. Затем за время 5 s столик достигал целевых оборотов, которые поддерживались в течение 60 s. Сушка резиста после нанесения проводилась на плитке HP-200 (SAWATEC AG, Швейцария) при 150 °C в течение 240 s в атмосфере азота.

Для контроля толщины нанесенных слоев использовался метод спектральной эллипсометрии, обеспечивающий погрешность 1 nm и менее, и приемлемое пространственное разрешение по площади пластины. Измерения проводились на спектральном эллипсометре M-2000X (J.A. Woollam Co., Inc., США) в схеме с постоянным углом падения луча (65°) в диапазоне длин волн 246.3–999.8 nm.

Экспонирование пластин проводилось на установке ЭЛЛ Raith-150 (Raith, Inc., Германия) при максимальной энергии электронного пучка 30 keV и диафрагме 30 μm, что формировало пучок электронов размером около 1 nm и током до 120 pA. Непосредственно перед экспонированием ток зонда измерялся на цилиндре Фарадея, после чего время нахождения луча в точке экспонирования пересчитывалось. Экспонирование линий с наименьшим размером проводилось при максимальной энергии электронов $E_0 = 30$ keV. Шаблон для экспонирования тестовых структур состоял из набора линий различной ширины. Для получения линий 500 nm такой шаблон состоял из линий шириной от 500 до 850 nm с шагом 50 nm. Для получения линий 4500 nm шаблон состоял из линий шириной от 4500 до 4710 nm с шагом 70 nm. Получены кремниевые волноводы с шириной канала от 500 nm до 10 μm и длиной от 5 до 20 mm. Дозы экспонирования варьировались от 70 до 100 μC/cm^2 с шагом 10 μC/cm^2.

Также проведена серия тестов для получения структуры решетки. Экспонирование структур решетки проводилось при энергии электронного пучка 30 keV и диафрагме 10 μm, ток зонда при таких параметрах равен 19 pA. Экспонирование проводилось с шагом 4 nm в поле 50 nm. Доза экспонирования была постоянной и составляла 100 μC/cm^2.

Проявление пластин проводилось в амилацетате при комнатной температуре (22 °C) в течение 60 s. Затем пластины обрабатывались в изопропиловом спирте (ИПС) ОСЧ в течение 30 s и сушились потоком сухого чистого азота. После проявления сушка пластин на плитке не проводилась.

Плазмохимическое травление проводилось на установке Dual PlasmaLab 100 (Oxford Instruments Plasma Technology, Великобритания) с использованием индуктивно-связанной (ICP) плазмы газов SF6/C4F8, возбуждаемой на частоте 2 MHz. Контролируемое смещение на образце создавалось высокочастотным генератором с частотой 13.56 MHz, что позволяло получать эквивалентное постоянное напряжение смещения VDC в диапазоне 80 – 150 V. Пластины были сегментированы для получения набора образцов с идентичными группами линий. Базовое давление в камере реактора составляло 10 – 6 Torr. Плазмохимическое травление образцов проводилось при доле SF6 в плазмообразующей смеси, равной 22 %, и напряжении смещения, равном 100 V. Время процессов травления было одинаковым для всех

образов и составило 100 s. Глубина травления составила 200 nm.

Изображения профилей структур после процесса травления, а также параметры структур были получены с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Ultra 55 (Carl Zeiss AG, Германия) с пространственным разрешением ~ 1 nm.

Результаты и обсуждение

При литографии волновода с использованием позитивного электронного резиста экспонируются области рядом с каналом волновода. Экспонирование структур с дозами $80 - 100\,\mu$C/cm^2 позволяет полностью проявить резист, однако при таких дозах происходит уход латеральных размеров проэкспонированного объема, что приводит к уменьшению канала волновода. Уменьшение дозы приводит к неполному проявлению резиста и значительно ухудшает ситуацию. Таким образом, было выяснено, что в процессе работы с позитивным электронным резистом фактическая ширина канала волновода отличается от ширины канала, указанной в литографическом шаблоне. Такое уменьшение канала волновода связано с переэкспонированием соседних областей (эффект близости), с чувствительностью и контрастностью выбранного резиста, с параметрами проявления (в частности, с температурой проявителя). Размеры структур, полученных после проявления, определяются такими параметрами, как выбранная доза экспонирования и внешние факторы, влияющие на уменьшение размеров структур в процессе проявления. Скорректировать эффект уменьшения размеров формируемых структур возможно при оптимальном подборе дозы, а также коррекции ширины экспонируемых областей.

При литографии AR-P 6200 с дозой $80 - 95\,\mu$C/cm^2 на поверхности проэкспонированной области иногда остаются нерастворимые фрагменты резиста. Для удаления этих фрагментов перед травлением использовалась анизотропная подчистка резиста в кислородной плазме при давлении 10 mTorr и потоке 10 sccm кислорода, а также мощности 40 W на RF-реакторе в течение 30 s. Так как основной интерес представляет фактическая ширина структур в кремнии после процесса травления, то здесь представлены результаты после ПХТ кремния в смеси газов C_4F_6 и SF_6 с потоками 48 и 22 sccm соответственно при давлении 10 mTorr. Мощность, подаваемая на RF-реактор, составляла 10 W, на ICP-реактор — 1200 W. Время травления подбиралось исходя из требуемой глубины травления. Все размеры на представленных графиках даны по результатам измерения протравленного через резистивную маску кремния.

Подбор дозы экспонируемых участков линейной части волноводов

Для исследования влияния дозы экспонирования на ширину линии при фиксированных размерах линии в шаблоне была проведена серия тестов с дозой экспонирования линии 70, 80, 90 μC/cm^2 (рис. 1). Стоит обратить внимание, что уход ширины линии при изменении дозы незначительный, что обеспечивает стабильное технологическое окно по дозе.

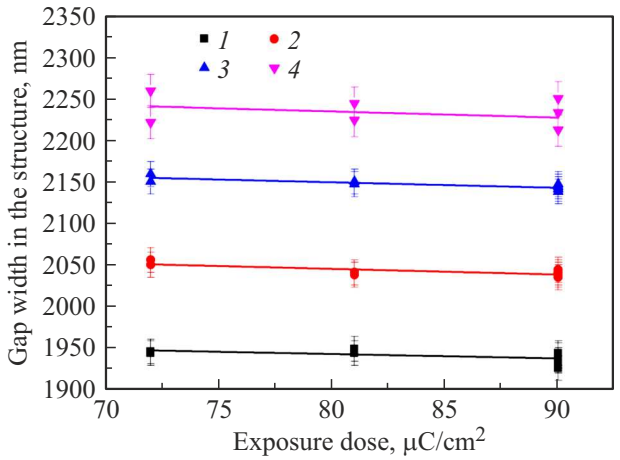


Рис. 1. Зависимость ширины зазора между линиями от дозы экспонирования линии после процесса травления. При ширине зазора в шаблоне: *1* — 2000 nm ($y = 1985.27273 - 0.5303 \times$ Dose), *2* — 2100 nm ($y = 2099.63636 - 0.68182 \times$ Dose), *3* — 2200 nm ($y = 2202.5 - 0.66667 \times$ Dose), *4* — 2300 nm ($y = 2293.68182 - 0.74242 \times$ Dose).

Как видно из рисунка, в диапазоне упомянутых доз итоговая ширина линии меняется незначительно. Следовательно, данный параметр можно зафиксировать и далее не учитывать при подборе ширины линии.

Подбор ширины экспонируемой линейной части волновода

Скорректировать изменение размера структур, происходящее из-за внешних факторов в процессе проявления и экспонирования, возможно путем подбора размеров шаблона для экспонирования. В современной волоконной оптике достаточно часто встречаются структуры с шириной канала порядка 500 nm, когда необходима высокая точность в соблюдении размеров.

В работе выполнено измерение ширины канала в кремниевых структурах после ПХТ. Структуры были проэкспонированы при помощи шаблонов с различной шириной зазора от 500 до 850 nm с шагом 50 nm (рис. 2, *a*), и шаблонов с шириной от 4500 до 4710 nm с шагом 70 nm (рис. 2, *b*).

СЭМ-изображения примеров структур, полученных для различных ширин зазоров в шаблоне в процессе измерений, выполненных для каналов с шириной 500 nm, представлены на рис. 3.

На рис. 2 показано, что ширина полученных структур линейно изменяется при изменении ширины литографического шаблона. Аналогичные процедуры подбора ши-

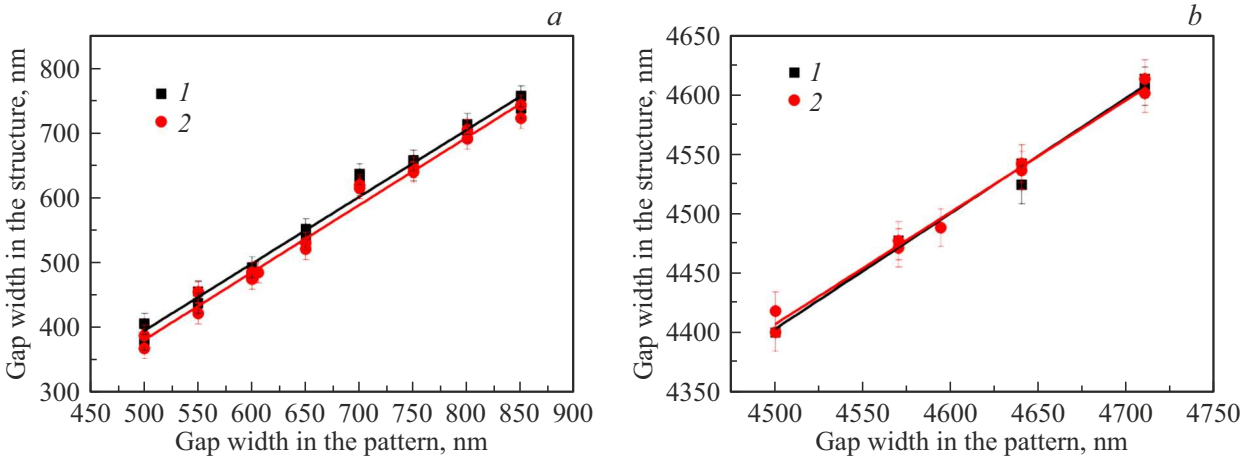


Рис. 2. Зависимость ширины зазора итоговой структуры от ширины зазора в исходном шаблоне. (*a*) Ширина шаблона 500 nm: (*1*) $y = -120.05357 + 1.03369x$, (*2*) $y = -138.11862 + 1.04147x$. (*b*) Ширина шаблона 4500 nm: (*1*) $y = 24.38462 + 0.97308x$, (*2*) $y = 162.83018 + 0.9432x$. Данные представлены для линий, полученных при дозах 90 (*1*), 100 μC/cm^2 (*2*) после травления в течение 100 s.

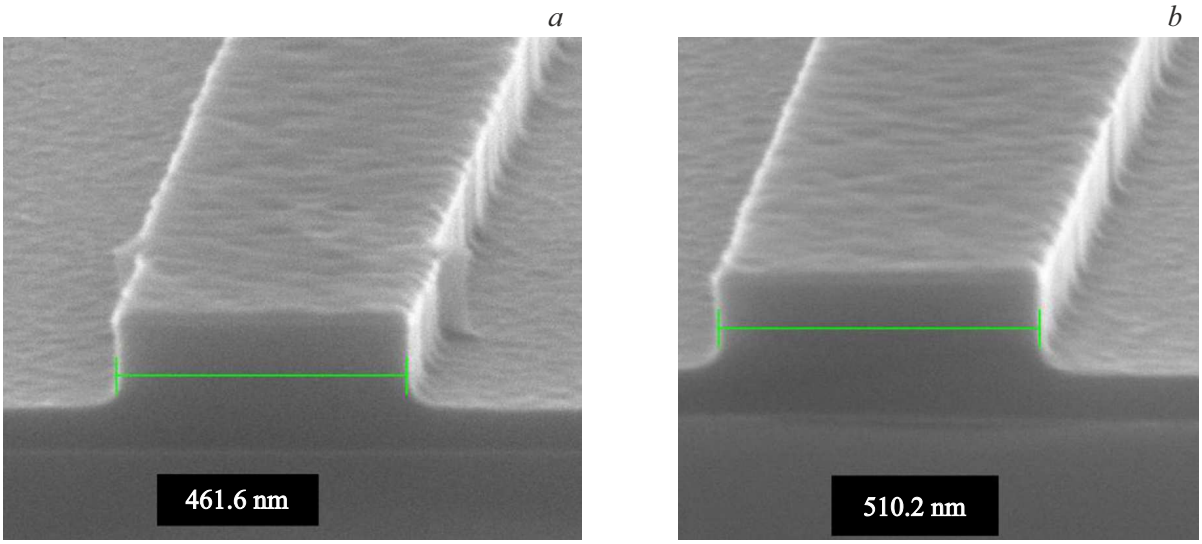


Рис. 3. Изображения сколов каналов кремниевых структур после травления при ширине зазора литографического шаблона 560 (*a*), 570 nm (*b*).

рины зазора в литографическом шаблоне были успешно проведены для волноводов с шириной канала 2.5 и 6.5 μm. По этим экспериментам были найдены значения ширины зазора между двумя областями литографии, обеспечивающие необходимую ширину канала волновода.

Подбор параметров экспонирования для получения периодических структур Помимо волоконного канала, устройства волоконной и интегральной оптики могут включать в себя периодические структуры для ввода и вывода излучения в канал волновода, такие как дифракционные решетки. При создании подобных структур соответствие проектируемых и фактических размеров не менее важно, чем при создании канала волновода. В данной части работы описана методика подбора параметров литографии для создания дифракционной решетки на кремниевой пластине с заранее заданным периодом.

Для получения решеток с периодом 465 nm и коэффициентом заполнения 0.5 проведен необходимой подбор ширины шаблона. Доза литографии в этом случае была 100 6μC/cm^2. На рис. 4 представлены СЭМ-изображения профилей полученных структур после процесса травления.

Получена зависимость ширины линии после травления от ширины линии в шаблоне (рис. 5). Зависимость аппроксимирована методом наименьших квадратов (МНК).

По данным расчета, ширина линий в 233 nm при периоде решетки 465 nm получается при фактической ширине линии шаблона 186 nm. При последующих ли-

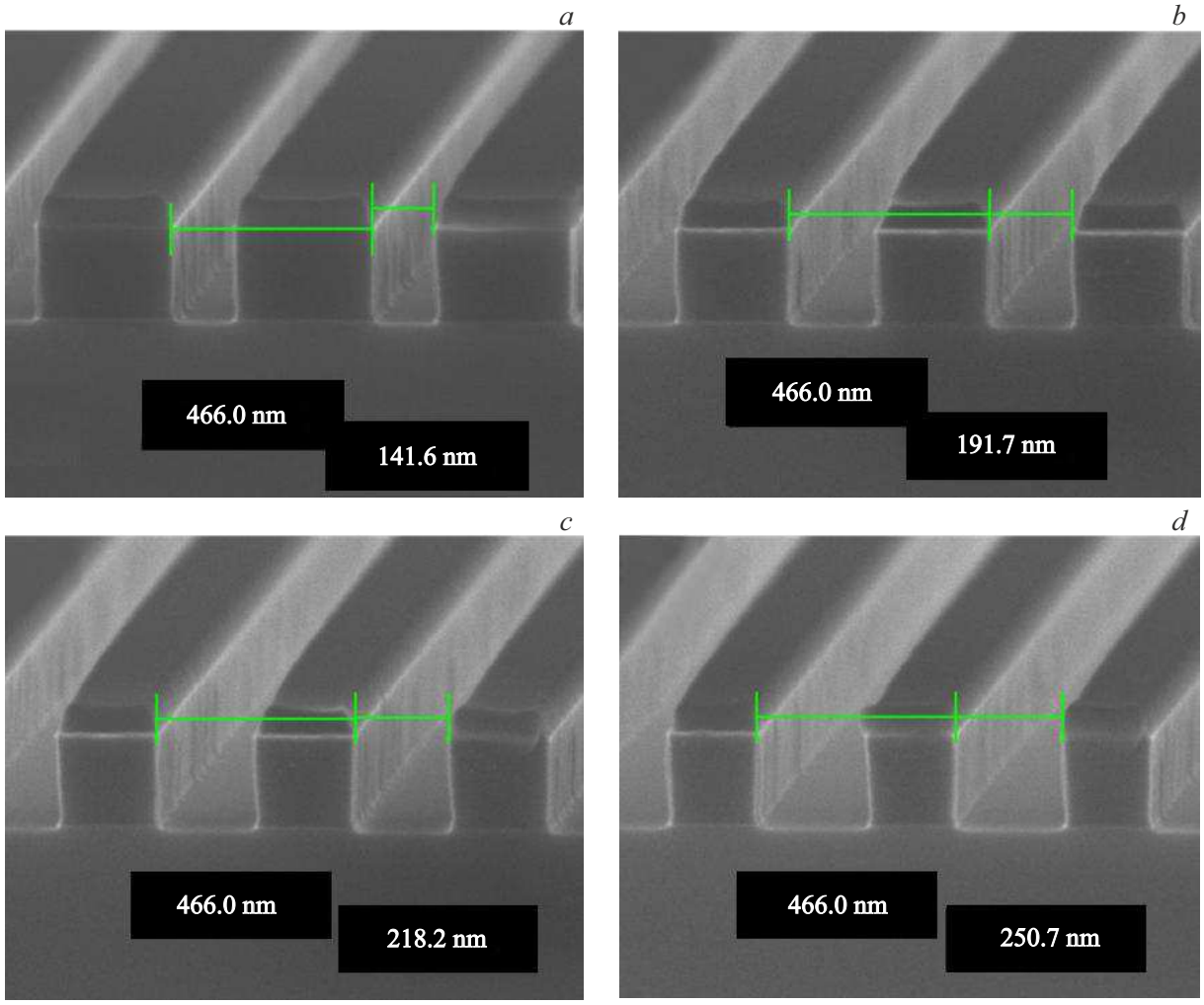


Рис. 4. Ширина и период проэкспонированных и потравленных на глубину 200 nm линий разной толщины с периодом 465 nm: ширина линии шаблона 100 (*a*), 150 (*b*), 175 (*c*), 200 nm (*d*).

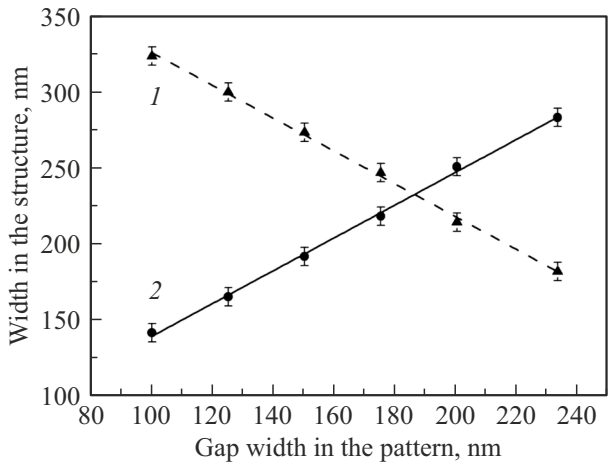


Рис. 5. Зависимость ширины линии после травления от ширины линии в шаблоне. Аппроксимация МНК. Линии разной ширины с периодом 465 nm: (*1*) зависимость ширины линии, (*2*) зависимость ширины зазора между линиями.

тографиях линии решетки в шаблоне были изменены на 186 nm. Глубина травления подбиралась по времени травления и может изменяться по необходимости.

На рис. 6 представлено СЭМ-изображение структуры решетки, полученной при ширине линии в шаблоне 186 nm.

Таким образом, корректировка размеров линии в шаблоне в соответствии с проведенными расчетами позволяет получить структуру решетки с шириной линии 232 nm и периодом решетки 465 nm.

Заключение

В ходе работы были подобраны параметры для литографии волоконных и периодических структур, применимых в интегральной оптике, с учетом технологических особенностей выбранного резиста AR-P 6200 (CSAR). Получены зависимости итоговой ширины линии от дозы, сделан вывод о возможности получения требуемой ширины с использованием любой дозы в диапазоне

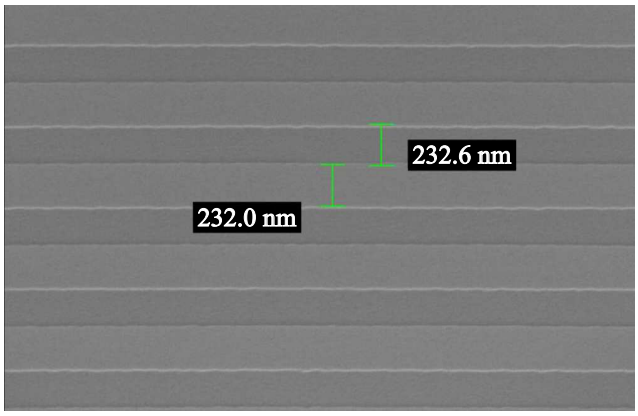


Рис. 6. Пример сформированной решетки волновода.

70-100 μC/cm^2. Получены зависимости итоговой ширины канала от ширины литографического шаблона, найдены аппроксимирующие коэффициенты. Может быть сделан вывод о том, что итоговая ширина канала отличается от ширины литографического шаблона приблизительно на 100 nm в меньшую сторону.

При помощи отработанного технологического процесса были изготовлены тестовые образцы, содержащие волоконные структуры с шириной канала 0.5, 2.5, 4.5 и 6.5 μm, а также тестовый образец с дифракционной решеткой с периодом 465 nm. Этот технологический процесс также может быть применен и для изготовления структур интегральной оптики с другими размерами того же порядка с погрешностью менее 10 nm.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках Государственного задания ФТИАН им. К.А. Валиева РАН Минобрнауки РФ по теме № FFNN-2022-0021.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] D. Melati, A. Melloni, F. Morichetti. Adv. Opt. Photon., **6**, 156–224 (2014). DOI: 10.1364/AOP.6.000156
[2] R. Menon, A. Patel, D. Gil, H.I. Smith. Materials Today, **8** (2), 26–33 (2005). DOI: 10.1016/S1369-7021(05)00699-1
[3] U.D. Zeitner, M. Oliva, F. Fuchs, D. Michaelis, T. Benkenstein, T. Harzendorf, E-B. Kley. Appl. Phys. A, **109**, 789–796 (2012). DOI: 10.1007/s00339-012-7346-z
[4] L. Thylén, L. Wosinski. Photonics Research, **2** (2), 75–81 (2014). DOI: 10.1364/PRJ.2.000075
[5] K. Iizuka. *Engineering optics* (Springer, NY., 2008). Ch. 35, p. 316–317.
[6] A.H. Atabaki, S. Moazeni, F. Pavanello, H. Gevorgyan, J. Notaros, L. Alloatti, M.T. Wade, C. Sun, S.A. Kruger, H. Meng, K. Al Qubaisi, I. Wang, B. Zhang, A. Khilo, C.V. Baiocco, M.A. Popović, V.M. Stojanović, R.J. Ram. Nature, **556**, 349–354 (2018). DOI: 10.1038/s41586-018-0028-z
[7] Y. Su, Y. Zhang, C. Qiu, X. Guo, L. Sun. Adv. Mater. Technol., **5** (8), 1901153 (2020). DOI: 10.1002/admt.201901153
[8] P. Dong, W. Qian, H. Liang, R. Shafiiha, D. Feng, G. Li, J.E. Cunningham, A.V. Krishnamoorthy, M. Asghari. Opt. Express, **18**, 20298 (2010). DOI: 10.1364/OE.18.020298
[9] S. Thoms, D.S. Macintyre. J. Vacuum Sci. Technol. B, **32** (6), (2014). DOI: 10.1116/1.4899239
[10] А.В. Мяконьких, А.В. Шишлянников, А.А. Татаринцев, В.О. Кузьменко, К.В. Руденко, Е.С. Горнев. Микроэлектроника, **50** (5), 333–338 (2021). DOI: 10.31857/s0544126921050045
[11] А.А. Татаринцев, А.В. Шишлянников, К.В. Руденко, А.Е. Рогожин, А.Е. Иешкин. Микроэлектроника, **49** (3), 163–169 (2020). DOI: 10.31857/s0544126920030060
[12] A.V. Miakonkikh, N.A. Orlikovskiy, A.E. Rogozhin, A.A. Tatarintsev, K.V. Rudenko. Russ. Microelectron., **47** (3), 157–164 (2018). DOI: 10.1134/S1063739718030101
[13] K. Fetisenkova, A. Melnikov, V. Kuzmenko, A. Miakonkikh, A. Rogozhin, A. Tatarintsev, O. Glaz, V. Kiselevsky. Processes, **12** (9), 1941 (2024). DOI: 10.3390/pr12091941
[14] Allresist Positive E-Beam Resists AR-P 6200 (CSAR 62) product information [Электронный ресурс]. URL: https://www.allresist.com/portfolio-item/e-beam-resist-ar-p-6200-series-csar-62/
[15] I. Kostic, K. Vutova, E. Koleva, R. Andok, A. Bencurova, A. Konecnikova. *Polymer science: research advances, practical applications and educational aspects* (2016). P. 488–497.