

**МОДИФИКАЦИЯ АЛМАЗНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ФОТОЛИТОГРАФИИ,  
ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКЕ И МАГНЕТРОННОМ ОСАЖДЕНИИ**

**А.В. Голованов, Н.В. Лупарев, Б.П. Сорокин**

Антон Владимирович Голованов\*, Николай Викторович Лупарев, Борис Павлович Сорокин  
Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов, ул. Центральная, 7А, Троицк,  
Москва, Российская Федерация, 108840  
E-mail: anton.golovanov@phystech.edu \*, luparev@gmail.com, bpsorokin1953@yandex.ru

*Исследовано влияние стандартных технологий формирования функциональных интерфейсов на поверхности полупроводниковых материалов – фотолитографии, плазмохимической очистки поверхности подложек высокочастотным кислородным разрядом низкого давления и роста тонких металлических пленок – на форму и шероховатость поверхности монокристаллического алмаза. Предварительно было показано, что фотолитография без плазменной очистки и магнетронное осаждение алюминиевой пленки без нагрева подложек не вносят в алмазную поверхность изменений, различными методами оптической профилометрии, электронной и оптической микроскопии, однако после литографии на поверхности остаются органические загрязнения, ухудшающие адгезию металлической пленки. Далее в работе было исследовано влияние перечисленных технологических операций по отдельности и в комбинациях на поверхность синтетического алмаза. Обнаружено, что при обработке алмазных подложек даже непродолжительная очистка в течение 5 мин кислородной плазмой высокочастотного разряда с низкой мощностью накачки плазмы 20 Вт приводит к протравливанию канавок на алмазной поверхности. Глубина канавок под влиянием плохо контролируемых внешних факторов различается как более чем на порядок в разных опытах (0,3 – 19 нм), так и на 10 – 50 % в пределах одной подложки. Также воздействие плазмы на алмазную поверхность вызывает изменение коэффициента вторичной электронной эмиссии. Нанесение алюминиевой пленки после плазменной очистки не приводит к заметным изменениям рельефа алмазной поверхности. Качество полировки алмаза (в «твердом» или «мягком» направлении), тип алмаза (Ia или Ib) и способ его изготовления (монокристалл НРНТ или гомоэпитаксиальная CVD пленка) не оказывают влияния на формирование канавок травления.*

**Ключевые слова:** синтетический алмаз, плазмохимическое травление, фотолитография, магнетронное осаждение

**MODIFICATION OF DIAMOND SURFACE DURING PHOTOLITHOGRAPHY,  
PLASMA-CHEMICAL CLEANING, AND MAGNETRON DEPOSITION**

**A.V. Golovanov, N.V. Luparev, B.P. Sorokin**

Anton V. Golovanov \*, Nicolay V. Luparev, Boris P. Sorokin  
Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials, Tsentralnaya st., 7A, Troitsk, Moscow,  
108840, Russia  
E-mail: anton.golovanov@phystech.edu \*, luparev@gmail.com, bpsorokin1953@yandex.ru

*An influence of the conventional planar technology of the semiconductor surface treatment operations (photolithography, plasma-chemical surface cleaning in radio frequency low-pressure oxygen discharge, and thin metal films growth) on monocrystalline diamond surface topography and roughness is investigated. It is preliminary shown that photolithography without the plasma cleaning and magnetron deposition of an aluminum film do not induce any diamond surface changes which could be found by the optical profilometry, electron and optical microscopy. However, as a result of the lithography some organic contaminants can decrease the adhesion of the aluminum film and have to remove from the surface. Further, the influence of the above-listed surface treatment operations separately and in combinations on the synthetic diamond surface is investigated. It is found that an even short oxygen plasma cleaning during 5 min with a low bias power of 20 W leads to etching the grooves on the diamond surface. The depth of the etching grooves varies by more than an order of magnitude in different experiments (0.3 - 19 nm), and by 10-20% within the same substrate under the influence of the poorly controlled external factors. Also, oxygen plasma treatment changes its secondary electron emission coefficient. Deposition of aluminum film after plasma cleaning does not induce noticeable changes in the diamond surface topography. The quality of diamond surface polishing (in "hard" or "soft" direction), the diamond's type (IIa or IIb) as well as producing method (HPHT or homoepitaxial CVD) do not affect the result of grooves formation.*

**Key words:** synthetic diamond, plasma-chemical etching, photolithography, magnetron deposition

**Для цитирования:**

Голованов А.В., Лупарев Н.В., Сорокин Б.П. Модификация алмазной поверхности при фотолитографии, плазмохимической очистке и магнетронном осаждении. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2020. Т. 63. Вып. 11. С. 49–56

**For citation:**

Golovanov A.V., Luparev N.V., Sorokin B.P. Modification of diamond surface during photolithography, plasma-chemical cleaning, and magnetron deposition. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* [Russ. J. Chem. & Chem. Tech.]. 2020. V. 63. N 11. P. 49–56

**ВВЕДЕНИЕ**

Алмаз выделяется среди полупроводниковых материалов рядом уникальных свойств, в числе которых: большая ширина запрещенной зоны 5,5 В [1], прозрачность в диапазоне длин волн от УФ (220 нм) до дальнего ИК (20 мкм) [2], относительно высокий коэффициент преломления 2,4, наличие более 500 оптически активных типов дефектов [3-5], в том числе перспективных однофотонных источников NV и SiV, рекордно высокая теплопроводность [6, 7], сверхвысокое поле электрического пробоя  $\sim 2 \times 10^7$  В/см [8], скорость звука до 18,5 км/с [9-11], высочайшая твердость. Появление в XX веке технологий синтеза высококачественного алмаза с воспроизводимыми свойствами способствовало развитию отраслей науки и техники, связанных с использованием свойств алмаза в таких направлениях, как: нанофотоника в видимом и частично УФ диапазоне [2], высокотемпературные квантовые системы на основе однофотонных источников на центрах окраски [2-4], акустические резонаторы, работающие на частотах до 20 ГГц [9-11], высокотемпературная и радиационно-стойкая силовая электроника [1, 8, 12, 13], преобразова-

тели энергии радиационного распада в электрическую прямого действия с почти 100% сбором заряда [14, 15], делители пучка на каналах синхротронных источников и лазеров на свободных электронах [16, 17]. Для изготовления устройств на поверхности кристалла алмаза требуется создавать соответствующие интерфейсы, в том числе электрические контакты, диэлектрические окна, пьезоэлектрические пленки и т.п. Обычно для этого применяется стандартный для технологии полупроводниковых материалов цикл «литография + рост тонких пленок» [18, 19].

В процессе литографии жертвенный слой фото- или электронно-чувствительного резиста подвергается локальному воздействию (экспонированию) световым или электронным лучом в соответствии с шаблоном. В результате экспонирования изменяется стойкость резиста к определенным растворителям, затем рисунок проявляется жидкостным травлением. После химического проявления на открытой поверхности подложки могут оставаться следы непрореагировавшего резиста. Так как обычно резисты являются органическими полимерами, для устранения следов используется очистка в кислородной плазме ВЧ-разряда малой

мощности [20]. Однако в случае алмазных подложек плазменная очистка может быть не столь безобидной, как для других полупроводниковых материалов. Этот вопрос требует детального изучения.

В последние 20 лет в мире было проведено немало работ по плазменной обработке алмаза как по анизотропному травлению алмаза, селективному к защитным маскам [18, 19, 21] (в том числе с использованием мягких защитных масок из полимерных материалов [2, 22, 23]), так и по квазиизотропному травлению, селективному к кристаллографическим плоскостям [24, 25]. Наиболее часто для травления алмаза используют кислород в чистом виде [21, 22, 24, 25] или с добавками, повышающими степень его ионизации [26]. Однако целью подавляющего большинства работ являлось достижение высоких скоростей травления для создания на поверхности алмаза рельефных структур с высоким аспектным соотношением, для чего использовались мощные установки с плазмами высокой плотности.

Целью данной работы, напротив, было исследовать влияние вспомогательных операций полупроводниковой технологии маломощного режима плазменной очистки на поверхность синтетического алмаза. Для этого необходимо было решить следующие задачи:

- оценить меру воздействия на алмазную поверхность процессов фотолитографии, плазменной очистки и роста наносимых пленок по отдельности и в комбинациях;
- определить скорость травления алмаза в процессе плазменной очистки.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе использовались подложки монокристаллического алмаза типа Ib и IIa, полученные как методом температурного градиента на заправке при высоком давлении и температуре (НРПТ) [27], так и методом химического осаждения из газовой фазы (CVD) на НРПТ алмазных подложках [12]. Прямоугольные пластины с ориентацией рабочей плоскости (001) размером 4-5 мм и толщиной 200-400 мкм вырезали из ростовых монокристаллов лазерной резкой. Пластины механически полировали на шлифовальном круге Dialit Super Table. Поверхности алмаза свойственна анизотропия твердости, заключающаяся в наличии т.н. «мягких» и «твердых» направлений. Так, для плоскости (001) «мягкими» и «твердыми» будут направления  $\langle 100 \rangle$  и  $\langle 110 \rangle$  соответственно. Полировка в «мягком» направлении обеспечивает наибольшую интенсивность съема алмаза, однако

на поверхности остаются царапины глубиной 1-100 нм. В «твердом» направлении интенсивность съема алмаза минимальна, но достигается практически атомарная гладкость поверхности с шероховатостью менее 1 нм [28, 29]. В работе [28] исследовались подложки обоих типов.

Для удаления всех типов загрязнений алмазные подложки отмывали последовательно в растворе поверхностно-активного вещества, ацетоне и изопропиловом спирте при воздействии ультразвуком. Затем подложки промывали деионизованной водой, высушивали обдувкой азотом и отжигали на воздухе при температуре 680 °С в течение 20 мин для удаления следов неалмазного углерода. Работы с подложками велись в условиях чистого помещения.

Взрывная фотолитография для формирования рельефа металлических электродов производилась следующим образом: слой позитивного фоторезиста AZ1505 наносили раскручиванием на центрифуге со скоростью 8000 об/мин, после чего высушивали при температуре 110 °С в течение 2 мин. Толщина пленки резиста при этом составляла 0,4-0,6 мкм в зависимости от размера и формы подложки. Резист подвергался экспонированию лазерным лучом с длиной волны 405 нм на установке Heidelberg  $\mu$ PG 101 в соответствии с программно заданным шаблоном. Доза экспонирования составляла  $\sim 300$  мДж/см<sup>2</sup>. Затем шаблон проявляли в щелочном (без металла) проявителе AZ726MIF в течение 40 с.

ВЧ-реактор с емкостной связью для плазменной очистки встроен в загрузочный шлюз напылительной магнетронной системы AJA ORION 8. В вакуумной камере расположены плоскопараллельные электроды диаметром 150 мм. Нижний электрод является столиком для подложек. На него от генератора через согласующую схему подается ВЧ смещение частотой 13,56 МГц. Для выполнения плазмохимической очистки поверхности алмазные подложки помещались в вакуумную камеру, которую откачивали до давления  $10^{-4}$  торр. Затем при непрерывной откачке осуществлялась продувка камеры кислородом с расходом 20 см<sup>3</sup>/мин в течение 20 мин. В камере зажигался ВЧЕ-разряд при давлении 100 мторр и мощности накачки 20 Вт, после чего давление уменьшалось до 60 мторр и выполнялась плазмохимическая очистка в течение 5 мин. DC-смещение на нижнем электроде составляло не менее 150 В.

В [30] показано, что наиболее вероятным механизмом химического травления алмаза в кис-

лородной плазме является адсорбция атомов кислорода на поверхностных атомах углерода с последующим химическим взаимодействием, приводящим к образованию молекул СО (энергия активации  $E_{act} = 0,1-0,44$  эВ в зависимости от расположения атома углерода) и десорбция молекулы СО ( $E_{act} = 2,38$  эВ). Так как плазменная очистка производится при комнатной температуре, вероятность термодесорбции СО очень мала, что подтверждается чрезвычайно низкой скоростью плазмохимического травления алмаза в реакторах ICP даже при очень высокой степени ионизации плазмы [21, 24, 25]. В процессах же CVD-синтеза, когда алмазные подложки разогреваются до 600-700 °С, плазмохимическое травление алмаза широко используется [31]. При наличии DC-смещения на столике (обязательном для генератора плазмы с емкостной связью) поверхность алмаза подвергается бомбардировке ионами кислорода энергией 150 эВ. Из-за высокой энергии связи атомов углерода в алмазе (7,5 эВ) [32] он плохо поддается ионному распылению, однако наличие на поверхности молекул СО с низкой энергией связи ускоряет этот процесс на порядок [33]. Таким образом, плазменная очистка даже на малой мощности способствует формированию канавок травления на алмазной поверхности.

В качестве материала для металлизации использовался алюминий. Металлизация толщиной 150-300 нм наносилась методом магнетронного осаждения на установке AJA ORION 8 со следующими параметрами: давление 3 мторр, процесс-газ аргон 20 см<sup>3</sup>/мин, Al мишень 99,999%, мощность на магнетроне 250 Вт, скорость роста пленки 4,33 нм/мин. Нагрев подложек при осаждении с литографией не производился, так как температура выше 120 °С повреждает фоторезист.

После осаждения пленки производилась финальная процедура взрывной литографии. Подложки обрабатывали ультразвуком в N-метилпирролидоне, при этом слой фоторезиста набухал (взрывался), отламывая лежащий на нем материал пленки. Затем алюминиевая металлизация удалялась жидкостным химическим травлением в 30% растворе КОН.

Рельеф и шероховатость поверхности алмазных подложек исследовался до и после нанесения пленок методами оптической профилометрии на установке Sensofar S Neox. Скорость травления алмаза определялась по высоте сформированной ступеньки. Также поверхность исследовалась методом сканирующей электронной микроскопии на сканирующем электронном микроскопе Vega 3 Tescan.

Чтобы исследовать влияние фотолитографии, плазмохимической очистки и магнетронного осаждения на алмазную поверхность по отдельности и в комбинациях, применялась следующая схема. На поверхности алмазной подложки формировали 4-5 структур одинаковой формы (рис. 1). Эскиз структуры состоял из прямоугольного поля размером 285×355 мкм для измерения шероховатости, и трех полосок шириной 50 мкм для измерения глубины травления. В пленке фоторезиста проявляли половину структур (№ 1 и № 2), и подложка подвергалась плазмохимической очистке. Затем проявляли остальные структуры – в них поверхность алмаза не подвергалась воздействию плазмы. Чтобы защитить проявленные структуры от металлизации, часть подложки (структуры № 2 и № 4) закрывали фоторезистом. Затем производили магнетронное осаждение пленки на подложку. Результаты обработки поверхности показаны в табл. 1.

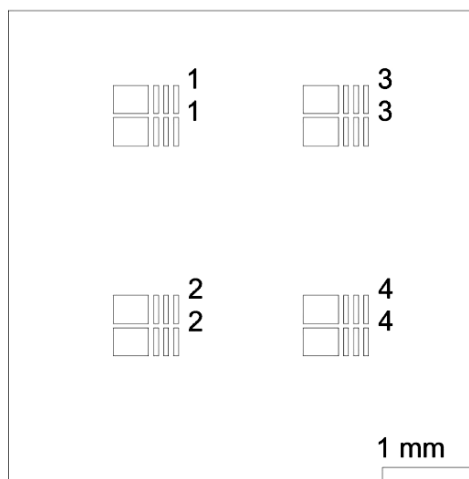


Рис. 1. Эскизы структур для эксперимента имели одинаковую форму, но подготовлены по-разному  
 Fig. 1. Structures experimentally investigated had the same shape, but were prepared in different ways

**Таблица 1**  
**Подготовка экспериментальных структур на алмазной поверхности**  
**Table 1. Preparation of the experimental structures on a diamond surface**

№	Обработка поверхности
1	Проявление шаблона, плазменная очистка, магнетронное осаждение
2	Проявление шаблона, плазменная очистка
3	Проявление шаблона, магнетронное осаждение
4	Проявление шаблона

При этом часть структуры № 2 оказалась не закрыта фоторезистом, что позволило вблизи сравнить области поверхности с металлизацией и без нее.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 приведена фотография алмазной поверхности после нанесения и вскрытия пленки из алюминия толщиной 130 нм, сделанная с помощью оптического микроскопа. Форма структуры №1, подготовленной по обычному циклу, точно соответствует шаблону. В структуре №3 металлизация частично отошла от подложки. Для определения причины плохой адгезии металла алмазная поверхность исследовалась перед напылением металлизации с использованием конфокального КР-спектрометра Renishaw inVia. В спектрах комбинационного рассеяния алмазной поверхности на дне окон, сформированных литографией в фоторезисте и не подвергнутых очистке, наблюдался повышенный люминесцентный фон. Очистка в кислородной плазме, также, как и кипячение подложки в кислоте Каро (смесь 25%  $H_2O_2$  и 98%  $H_2SO_4$  в соотношении 1:2 по объему, которая эффективно удаляет органику) в течение 15 мин, полностью убирала люминесцентный фон, и на поверхности наблюдался только спектр комбинационного рассеяния алмаза. На алмазных подложках, отмытых от всех типов загрязнений по указанному выше алгоритму и не контактировавших с фоторезистом, люминесцентный фон также не наблюдался. Мы ассоциируем фон с частицами фоторезиста, оставшимися после проявления на алмазной поверхности. Они служат причиной нежелательного нарушения рисунка литографии.

Повреждения алмазной поверхности после кислородной плазмы (структура №2) и после литографии (структура №4) в оптический микроскоп не различимы. Ниже структуры №1 заметен кусочек цифры «2», который не был закрыт фоторезистом. Царапины, видимые на фотографии, расположены на нижней стороне подложки и интереса не представляют.

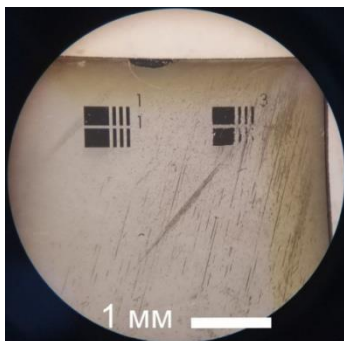


Рис. 2. Структуры, сформированные на алмазной поверхности с различной подготовкой. Фотография получена с помощью оптического микроскопа

Fig. 2. Structures formed on a diamond surface with a different preparation. Image was taken with an optical microscope

После химического удаления металлизации алмазная поверхность изучалась методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) (рис. 3). По-разному обработанные области алмазной поверхности имеют различный коэффициент эмиссии вторичных электронов, что выражается в яркости изображения.

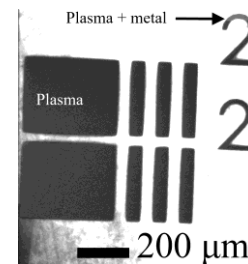


Рис. 3. РЭМ-изображение алмазной поверхности после химического удаления алюминиевой металлизации

Fig. 3. SEM image of a diamond surface after the chemical removal of aluminum metallization

На месте структур №3 и №4 не было обнаружено никаких следов, которые могли быть обнаружены методом РЭМ при любом доступном увеличении. Там, где находились структуры №1 и 2, видны следы открытой поверхности, подвергавшейся плазмохимическому травлению. Следы имеют четкую границу, но их глубину с помощью РЭМ оценить затруднительно. Это свидетельствует о том, что проявление фоторезиста и магнетронное осаждение без нагрева не меняют свойств алмазной поверхности, а плазмохимическая обработка меняет коэффициент вторичной эмиссии алмазной поверхности, что, скорее всего, связано с кислородной терминацией.

Глубина канавок травления определялась методом оптической профилометрии на установке Sensofar S Neox (рис. 4). Канавки имеют четкие границы с вертикальными стенками. Это свидетельствует о том, что анизотропное ионное распыление вносит основной вклад в механизм их формирования. Глубину канавки усредняли по 3-4 измерениям для каждой исследуемой структуры. В табл. 2 приведены результаты измерения глубины канавок травления в нескольких экспериментах для разных способов обработки поверхности.

С учетом низкой мощности накачки (20 Вт) средняя скорость травления алмаза 2-3 нм/мин соответствует известным результатам по травлению алмаза в кислородной плазме [5, 19, 21, 22]. В каждом опыте глубина канавок травления, сформированных в сочетании ПХТ и магнетронного осаждения, больше, чем при действии только ПХТ, хотя этот результат и лежит в пределах погрешности измерения.

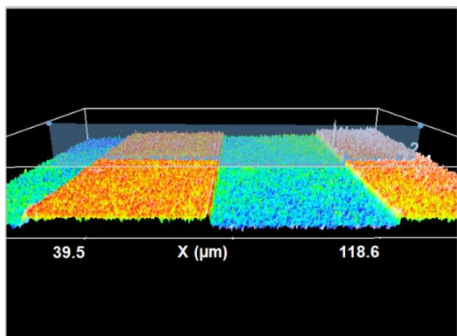


Рис. 4. Измерение глубины канавок травления методом оптической профилометрии (Sensofar S Neox). Глубина канавки около 0,8 нм

Fig. 4. Measuring the etching groove depth by the optical profilometry (Sensofar S Neox). Groove depth is about 0.8 nm

Таблица 2

**Глубина канавок травления (в нанометрах), измеренная в экспериментах для обработки алмазной поверхности плазмохимическим травлением (ПХТ) и магнетронным осаждением алюминия (м. о.)**

**Table 2. Etching groove depth (in nanometers) measured in the experiments for diamond surface treatment with plasma etching (ПХТ), and aluminum magnetron deposition (м. о.)**

№ опыта	Обработка поверхности	Глубина канавок, нм
1	ПХТ + м. о.	14,9±2,0
2	ПХТ + м. о.	8,4±1,0
3	ПХТ + м. о.	18,9±2,0
4	ПХТ	7,92±0,77
4	ПХТ	9,02±0,77
4	ПХТ + м. о.	9,23±0,77
4	ПХТ + м. о.	10,6±0,77
4	ПХТ + м. о.	10,13±0,77
4	м. о.	нет канавок
5	ПХТ	< 0,5
5	ПХТ + м. о.	0,84±0,05
5	м. о.	нет канавок

Однако главный вывод из табл. 2 состоит в том, что глубина канавок отличалась в несколько раз от одного опыта к другому, и на 10-50% от структуры к структуре в пределах одной подложки в одном опыте. Авторы предлагают несколько возможных объяснений столь высокого разброса значений глубины травления. Первое состоит в том, что остаточный слой органики, удаление которого является основной целью ПХТ, может иметь разную толщину вдоль поверхности подложки. При нанесении на подложку небольшой площади пленка фоторезиста имеет неравномерную толщину [34], и условия литографии всегда слегка различаются от опыта к опыту. Вторая причина заключается в том, что десорбция газов из стенок вакуумной камеры оказывает влияние на состав плазмы и точные параметры разряда (давление,

энергия ионов) зависят от истории использования вакуумной камеры. Для полной стабилизации разряда требуется многочасовое предварительное кондиционирование. Третья возможная причина связана с преимущественным травлением приповерхностного слоя алмаза, поврежденного полировкой [35]. Разные стороны подложки могут лежать в разных секторах роста алмаза и быть по-разному отполированы из-за поворотов подложки, сопутствующих процессу полировки. Таким образом, использование плазменной очистки для контролируемого внесения изменений в рельеф алмазной поверхности представляется затруднительным до того момента, когда влияние вышеперечисленных параметров будет исследовано более подробно.

В работе исследовались подложки, отполированные как в мягком направлении (со следами полировки и с шероховатостью 5-10 нм), так и в жестком направлении (с шероховатостью < 0,5 нм). Было обнаружено, что в результате плазменной очистки и магнетронного осаждения исходный рельеф алмазной поверхности повторяется на дне канавок, и величина шероховатости остается без изменений. Эксперименты на алмазах различного типа показали, что ни тип монокристаллического алмаза (Ia или Ib), ни метод его изготовления (НРНТ или гомоэпитаксиальные CVD пленки) не оказывают систематического влияния на результат.

## ВЫВОДЫ

В работе было изучено влияние технологических операций, широко распространенных в планарной технологии, – взрывной фотолитографии, плазмохимической очистки в кислородном ВЧ-разряде и магнетронного осаждения алюминия, – на рельеф отполированной поверхности синтетического алмаза. Процессы фотолитографии и магнетронного осаждения без нагрева не вызывают заметных изменений алмазной поверхности. Обработка кислородной плазмой ВЧ-разряда, которая используется для удаления следов фоторезиста, приводит к модификации алмазной поверхности и к протравливанию на ней определенного рельефа, например, в виде канавок. При этом влияние неконтролируемых внешних факторов приводит к разбросу значений глубины травления более чем на порядок от 0,5 до 19 нм, и для практического использования эффекта травления требуются дополнительные исследования. Однако сам факт формирования трехмерных рельефных структур с толщиной нанометрового масштаба может представлять значительный интерес, например, для создания

акустических и оптических волноводных структур для акусто- и оптоэлектроники. Так как отказ от плазменной очистки приводит к ухудшению адгезии металлизации и потере качества литографии, необходимо либо подбирать максимально щадящие режимы сухого травления, либо искать иные способы обработки алмаза.

Работа была поддержана Российским научным фондом (проект № 16-12-10293-П). Работа была выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием ФГБНУ ТИСНУМ «Исследования наноструктурных, углеродных и сверхтвердых материалов», а также с использованием оборудования Центра коллективного пользования высокоточных измерительных технологий в области фотоники (ckp.vniiofi.ru, ВНИИОФИ).

This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 16-12-10293-P). The work was performed using the equipment of the Shared-use Equipment Center of the Federal State Budgetary Scientific Institution TISNUM "Research of nanostructured, carbon and superhard materials", as well as using the equipment of the Shared Use Equipment Center for high-precision measuring in photonics (ckp.vniiofi.ru, VNIIOFI).

#### REFERENCES ЛИТЕРАТУРА

1. Tarelkin S., Bormashov V., Buga S., Volkov A., Teteruk D., Kornilov N., Kuznetsov M., Terentiev S., Golovanov A., Blank V. Power diamond vertical Schottky barrier diode with 10 A forward current. *PSS(a)*. 2015. V. 212. N 11. P. 2621. DOI: 10.1002/pssa.201532213.
2. Hausmann B. J. M., Bulu I., Venkataraman V., Deotare P., Lončar M. Diamond nonlinear photonics. *Nat. Photon.* 2014. V. 8. P. 369–374. DOI: 10.1038/nphoton.2014.72.
3. Schröder T., Mouradian S. L., Zheng J., Trusheim M. E., Walsh M., Chen E. H., Li L., Bayn I., Englund D. Quantum nanophotonics in diamond. *J. Opt. Soc. Am. B*. 2016. V. 33. N 4. P. B65. DOI: 10.1364/JOSAB.33.000B65.
4. Aharonovich I., Greentree A.D., Prawer S. Diamond photonics. *Nat. Photon.* 2011. V. 5. N 7. P. 397–405. DOI: 10.1038/nphoton.2011.54.
5. Fukuda R., Balasubramanian P., Higashimata I., Koike G., Okada T., Kagami R., Teraji T., Onoda S., Haruyama M., Yamada K., Inaba M., Yamano H., Stürner F., Schmitt S., McGuinness L., Jelezko F., Ohshina T., Shinada T., Kawarada H., Kada W., Hanai-zumi O., Tanii T., Isoya J. Lithographically engineered shallow nitrogen-vacancy centers in diamond for external nuclear spin sensing. *New J. Phys.* 2018. V. 20. P. 083029. DOI: 10.1088/1367-2630/aad997.
6. Prikhodko D., Tarelkin S., Bormashov V., Golovanov A., Kuznetsov M., Teteruk D., Volkov A., Buga S. Thermal conductivity of synthetic boron-doped single-crystal HPHT diamond from 20 to 400 K. *MRS Commun.* 2016. V. 6. N 2. P. 1–6. DOI: 10.1557/mrc.2016.12.
7. Tarelkin S., Bormashov V., Kuznetsov M., Buga S., Terentiev S., Prikhodko D., Golovanov A., Blank V. Heat capacity of bulk boron-doped single-crystal HPHT diamonds in the temperature range from 2 to 400 K. *J. Superhard Mater.* 2016. V. 38. N 6. P. 412–416. DOI: 10.3103/S1063457616060058.
8. Umezawa H., Shikata S., Funaki T. Diamond Schottky barrier diode for high-temperature, high-power, and fast switching applications. *Jpn J. Appl. Phys.* 2014. V. 53. N 5 (S1). P. 05FP06. DOI: 10.7567/JJAP.53.05FP06.
9. Sorokin B.P., Kvashnin G.M., Telichko A.V., Gordeev G.I., Burkov S.I., Blank V.D. Study of high-overtone bulk acoustic resonators based on the Me1/AlN/Me2/(100) diamond piezoelectric layered structure. *Acoust. Phys.* 2015. V. 61. N 4. P. 422–433. DOI: 10.1134/S106377101503015X.
10. Sorokin B.P., Kvashnin G.M., Novoselov A.S., Bormashov V.S., Golovanov A.V., Burkov S.I., Blank V.D. Excitation of hypersonic acoustic waves in diamond-based piezoelectric layered structure on the microwave frequencies up to 20 GHz. *Ultrasonics*. 2017. V. 78. P. 162–165. DOI: 10.1016/j.ultras.2017.01.014.
11. Sorokin B.P., Novoselov A.S., Kvashnin G.M., Luparev N.V., Asafiev N.O., Shipilov A.B., Aksenkov V.V. Development and study of composite acoustic resonators with Al/(Al, Sc)N/Mo/diamond structure with a high Q factor in the UHF range. *Acoust. Phys.* 2019. V. 65. N 3. P. 263–268. DOI: 10.1134/S1063771019030072.
12. Blank V., Bormashov V., Tarelkin S., Buga S., Kuznetsov M., Teteruk D., Kornilov N., Terentiev S., Volkov A. Power high-voltage and fast response Schottky barrier diamond diodes. *Diam. Relat. Mat.* 2015. N 57. P. 32–36. DOI: 10.1016/j.diamond.2015.01.005.
13. Polyakov A., Smirnov N., Tarelkin S., Govorkov A., Bormashov V., Kuznetsov M., Teteruk D., Buga S., Kornilov N., Lee I. Electrical properties of diamond platinum vertical Schottky barrier diodes. *Mater. Today-Proc.* 2016. V. 3. P. S159–S164. DOI: 10.1016/j.matpr.2016.02.027.
14. Bormashov V., Troschiev S., Volkov A., Tarelkin S., Korostylev E., Golovanov A., Kuznetsov M., Teteruk D., Kornilov N., Terentiev S., Buga S., Blank V. Development of nuclear microbattery prototype based on Schottky barrier diamond diodes. *PSS (a)*. 2015. V. 212. N 11. P. 2539–2547. DOI: 10.1002/pssa.201532214.
15. Bormashov V.S., Troschiev S.Yu., Tarelkin S.A., Volkov A.P., Teteruk D.V., Golovanov A.V., Kuznetsov M.S., Kornilov N.V., Terentiev S.A., Blank V.D. High power density nuclear battery prototype based on diamond Schottky diodes. *Diam. Relat. Mat.* 2018. V. 84. N 11. P. 41–47. DOI: 10.1002/pssa.201532214.
16. Terentyev S., Polikarpov M., Di Michiel M., Zholudev S., Yunkin V., Kuznetsov S., Blank V., Snigirev A. Linear parabolic single-crystal diamond refractive lenses for synchrotron X-ray sources. *J. Synchrotron Radiat.* 2017. V. 24. N 1. P. 103–109. DOI: 10.1107/S1600577516017331.
17. Shvyd'ko Y., Blank V., Terentyev S. Diamond X-ray optics: Transparent, resilient, high-resolution, and wavefront preserving. *MRS Bull.* 2017. V. 42. N 06. P. 437–444. DOI: 10.1557/mrs.2017.119.
18. Uhlén F., Lindqvist S., Nilsson D., Reinspach J., Vogt U., Hertz H., Holmberg A., Barrett R. New diamond nanofabrication process for hard x-ray zone plates. *J. Vac. Sci. Technol. B*. 2011. V. 29. N 6. P. 06FG03. DOI: 10.1116/1.3656055.
19. Yamada T., Yoshikawa H., Uetsuka H., Kumaragurubaran S., Tokuda N., Shikata S. Cycle of two-step etching process using ICP for diamond MEMS applications. *Diam. Relat. Mat.* 2007. V. 16. N 4–7. P. 996–999. DOI: 10.1016/j.diamond.2006.11.023.

20. Plasma etching processes for interconnect realization in VLSI. Ed. by N. Posseme. London: Oxford: ISTE Press; Elsevier Ltd. 2015. 108 p.
21. **Toros A., Kiss M., Graziosi T., Sattari H., Gallo P., Quack N.** Precision micro-mechanical components in single crystal diamond by deep reactive ion etching. *Microsyst Nanoeng.* 2018. V. 4. N 1. P. 1-8. DOI: 10.1038/s41378-018-0014-5.
22. **Lee C.L., Gu E., Dawson M.D.** Micro-cylindrical and micro-ring lenses in CVD diamond. *Diam. Relat. Mat.* 2007. V. 16. N 4-7. P. 944-948. DOI: 10.1016/j.diamond.2006.11.027.
23. **Lee C.L., Gu E., Dawson M.D., Friel I., Scarsbrook G.A.** Etching and micro-optics fabrication in diamond using chlorine-based inductively-coupled plasma. *Diam. Relat. Mat.* 2008. V. 17. N 7-10. P. 1292-1296. DOI: 10.1016/j.diamond.2008.01.011.
24. **Kiss M., Graziosi T., Quack N.** Demonstration of V-groove diffraction gratings in single crystal diamond. Göteborg, Sweden: Elsevier. 2017. P. O8A.3.
25. **Khanaliloo B., Mitchell M., Hryciw A.C., Barclay P.E.** High-Q/V monolithic diamond microdisks fabricated with quasi-isotropic etching. *Nano Lett.* 2015. V. 15. N 8. P. 5131-5136. DOI: 10.1021/acs.nanolett.5b01346.
26. **Hwang D.S., Saito T., Fujimori N.** New etching process for device fabrication using diamond. *Diam. Relat. Mat.* 2004. V. 13. N 11-12. P. 2207-2210. DOI: 10.1016/j.diamond.2004.07.020.
27. **Blank V.D., Kuznetsov M.S., Nosukhin S.A., Terentiev S.A., Denisov V.N.** The influence of crystallization temperature and boron concentration in growth environment on its distribution in growth sectors of type IIb diamond. *Diam. Relat. Mat.* 2007. V. 16. N 4-7. P. 800-804. DOI: 10.1016/j.diamond.2006.12.010.
28. **Doronin M.A., Polyakov S.N., Kravchuk K.S., Mochalov S.P., Lomov A.A., Troschiev S.Yu., Terentiev S.A.** Limits of single crystal diamond surface mechanical polishing. *Diam. Relat. Mat.* 2018. V. 87. P. 149-155. DOI: 10.1016/j.diamond.2018.05.016.
29. **Sorokin B.P., Bormashov V.S., Korostylev E.V., Novoselov A.S., Doronin M.A., Kravchuk K.S., Blank V.D.** Usage of electron back scattering diffraction for investigation of buried damage layer underneath a single crystalline diamond surface. *J. Mater. Sci.: Materials in Electronics.* 2017. V. 28. N 18. P. 13464-13471. DOI: 10.1007/s10854-017-7185-y.
30. **Lvova N.A., Ponomarev O.V., Ryazanova A.I.** Modeling the hydrogen and oxygen atoms interaction with the defects on a diamond surface. *Tech. Connect Briefs.* 2017. V. 4. P. 8-11.
31. **Friel I., Clewes S.L., Dhillon H.K., Perkins N., Twitchen D.J., Scarsbrook G.A.** Control of surface and bulk crystalline quality in single crystal diamond grown by chemical vapour deposition. *Diam. Relat. Mat.* 2009. V. 18. N 5-8. P. 808-815.
32. **Vietzke E., Refke A., Philipps V., Hennes M.** Energy distributions and yields of sputtered C2 and C3 clusters. *J. Nucl. Mater.* 1997. V. 241-243. P. 810-815.
33. **Guzmán de la Mata B., Dowsett M.G., Twitchen D.** Sputter yields in diamond bombarded by ultra low energy ions. *Appl. Surf. Sci.* 2006. V. 252. N 19. P. 6444-6447.
34. **Golovanov A.V., Bormashov V.S., Luparev N.V., Tarelkin S.A., Troschiev S. Yu., Buga S.G., Blank V.D.** Diamond microstructuring by deep anisotropic reactive ion etching. *PSS(a).* 2018. P. 1800273. DOI: 10.1002/pssa.201800273.
35. **Korostylev E.V., Bormashov V.S., Tarelkin S.A., Doronin M.A.** Using electron backscatter diffraction to investigate the influence of mechanical polishing on the state of the surface of diamond. *J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech.* 2017. V. 11. N 1. P. 125-129. DOI: 10.1134/S1027451017010141.

Поступила в редакцию 04.03.2020

Принята к опубликованию 02.09.2020

Received 04.03.2020

Accepted 02.09.2020