

УДК 537.5; 537.525.99

© Н. Л. Казанский, В. А. Колпаков, А. И. Колпаков,  
С. В. Кричевский, В. В. Подлипов

## ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ПРИБОРЫ, ФОРМИРУЮЩИЕ НАПРАВЛЕННЫЕ ПОТОКИ ВНЕЭЛЕКТРОДНОЙ ПЛАЗМЫ. Ч. II. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДИФИКАЦИИ. НОВЫЕ ПРИБОРЫ

Рассмотрен новый класс газоразрядных приборов, формирующих направленные потоки внеэлектродной плазмы для изготовления микро- и наноразмерных дифракционных структур на широкоформатных пластинах.

*Кл. сл.:* газоразрядный прибор, модернизация, генератор, фокусатор, внеэлектродная плазма, травление оптических материалов, формирование микрорельефа, формирование наноразмерных структур

### ВВЕДЕНИЕ

В первой части работы [1] на основе проведенного анализа газоразрядных приборов, формирующих ионно-электронные пучки в высоковольтном газовом разряде, и их особенностей предложены, проанализированы, исследованы новый подход к формированию широкоформатных направленных потоков низкотемпературной плазмы вне межэлектродного пространства и соответствующий газоразрядный прибор. Целью создания прибора было его применение для формирования микро- и наноразмерных дифракционных структур на широкоформатных пластинах из оптических материалов. В процессе исследования прибора был выявлен ряд недостатков, потребовавших его доработки. В частности, возникновение паразитных разрядов в изоляции катода и кабеля электропитания газоразрядного прибора в процессе его работы, что сдерживает достижение поставленной цели.

Задачами данной работы являются: 1) эффективное применение низкотемпературной внеэлектродной плазмы в ионно-плазменных процессах травления микро- и наноразмерных дифракционных структур; 2) расширение функциональных возможностей предложенного газоразрядного прибора; 3) создание на его основе новых газоразрядных устройств, генерирующих потоки внеэлектродной плазмы с заданной диаграммой направленности.

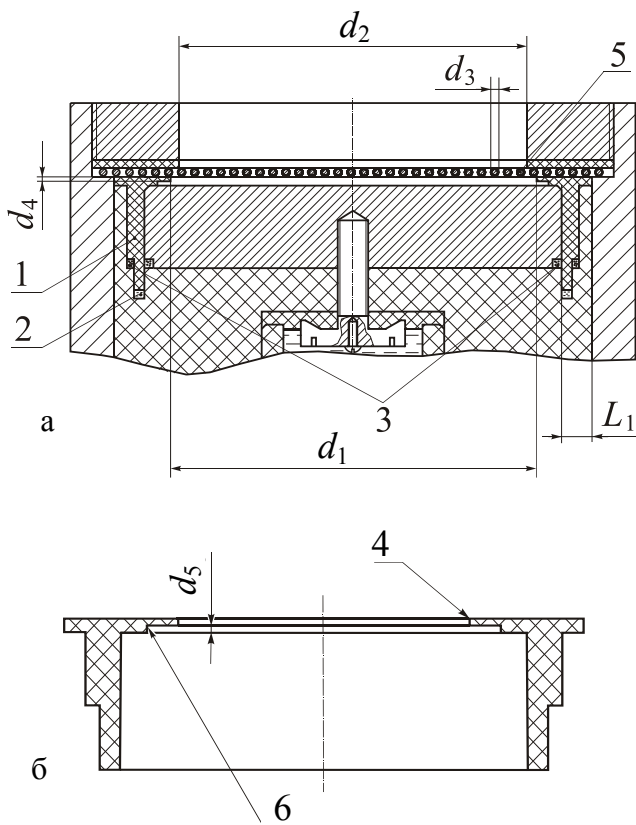
### МОДИФИКАЦИЯ ГАЗОРАЗРЯДНОГО ПРИБОРА, ФОРМИРУЮЩЕГО НАПРАВЛЕННЫЕ ПОТОКИ ВНЕЭЛЕКТРОДНОЙ ПЛАЗМЫ

Для устранения недостатков, упомянутых во

введении, предлагается следующая модификация прибора.

Повышение диэлектрических свойств изолятора катода осуществлено за счет введения в его конструкцию новых элементов, представленных на рис. 1, а (элементы 1, 2, 3), а также фторопластовой прокладки, схема которой представлена на рис. 1, б. Общий размер толщины диэлектрика между катодом и корпусом прибора ( $L_1$ ) определяется пробивным напряжением фторопласта [2]. Толщина фторопластовой прокладки ( $d_4$ ) определяется расстоянием между катодом и анодом, которое в свою очередь определяется максимальным рабочим давлением в вакуумной камере и выбирается меньше темного астонового (катодного) пространства тлеющего разряда. В противном случае между электродами загорается одна из разновидностей тлеющего разряда. Проведенная модернизация изоляции катодного узла позволила полностью исключить механизмы электропробоя его поверхности во всем диапазоне рабочих напряжений на электродах прибора.

Устранение условий образования паразитных разрядов в изоляции кабелей электропитания требует нежелательного увеличения толщины диэлектрика и усложнения конструкции кабеля за счет использования многослойной изоляции из дорогостоящих материалов [2]. Поэтому в настоящей работе предлагается такой кабель электропитания газоразрядного прибора, который легко изгибается с целью придания ему необходимой формы и применение которого позволяет устранить условия возникновения паразитных газовых разрядов [3]. Высоковольтный кабель содержит фторопластовую оболочку в форме полого цилиндра. Конкретная величина толщины стенки оболочки определяется необходимостью изгиба кабеля при монтаже газоразрядного прибора в вакуумной



**Рис. 1.** Схема изоляции катода (а) и фторопластовой прокладки (б).

1 — п-образная проточка; 2 — вакуумное масло; 3 — вакуумная резина; 4 — торцы фторопластовой прокладки; 5 — медное кольцо; 6 — проточка фторопластовой прокладки;  $d_1$  — внутренний диаметр фторопластовой прокладки;  $d_2$  — внутренний диаметр анодного кольца;  $d_3$  — диаметр проволоки анода-сетки;  $d_4$  — минимальная толщина фторопластовой прокладки;  $d_5$  — толщина противопробойного зазора

установке: чем круче изгиб, тем тоньше выполняется стенка фторопластовой оболочки. Внутри оболочки проходит медный провод, на который по легкоскользкой посадке поочередно нанизаны фторопластовые стабилизирующие диски и керамические или фторопластовые разделительные элементы в виде трубочек, позволяющие осуществить жесткую фиксацию его положения по центру внутренней полости оболочки, делая равномерным распределение электрического поля по всей длине кабеля.

В качестве изолирующей жидкости используется вакуумное масло, обладающее хорошими диэлектрическими свойствами и низким давлением пара, что позволяет без определенных трудностей использовать его в вакуумных системах.

Необходимость соединения высоковольтного кабеля с керамическим электрическим вводом вакуумной установки требует разработки соответствующего высоковольтного ввода.

В настоящей работе предлагается высоковольтный ввод, состоящий из керамического ввода и экранирующего его корпуса, верхней и нижней крышек корпуса. Внутреннее пространство высоковольтного ввода так же, как и кабеля, заполняется вакуумным маслом, что увеличивает пробивное напряжение изоляции, устраняет возможность возникновения паразитных газовых разрядов между поверхностью керамического ввода и корпусом и является принципиальным отличием такого ввода от существующих аналогов.

Длительная эксплуатация высоковольтного ввода показала, что даже при работе газоразрядного прибора в максимальных режимах ( $I = 200$  мА,  $U = 6$  кВ,  $p = 10^{-1}$  Торр) в течение длительного времени ( $>100$  ч) паразитные газовые разряды отсутствовали.

Проведенная модернизация позволила полностью устранить возможность возникновения электропробоя элементов изоляции предложенного газоразрядного прибора и снизить колебания тока газового разряда до 1.5–2 %, что обеспечило стабильность параметров газоразрядного прибора при его длительной работе.

### НОВЫЕ ПРИБОРЫ, ФОРМИРУЮЩИЕ НАПРАВЛЕННЫЕ ПОТОКИ ВНЕЭЛЕКТРОДНОЙ ПЛАЗМЫ

На основе проведенной модификации в настоящем разделе предлагаются новые приборы, формирующие направленные потоки низкотемпературной внеэлектродной плазмы. Данные приборы предназначены для формирования оптического микрорельефа и наноразмерных структур на участках сложной геометрической формы, в том числе на криволинейных поверхностях, что является актуальной задачей для дифракционной оптики [4].

#### Многолучевой генератор газоразрядной плазмы

Для решения задачи формирования оптического микрорельефа и наноразмерных структур одновременно на нескольких участках различной геометрической формы необходимо, чтобы газоразрядное устройство формировало несколько потоков однородной плазмы с разными формами их сечения при одновременном увеличении тока разряда, снижении напряжения на электродах газоразрядного устройства, упрощении его конструкции и условий эксплуатации.

Наиболее близкими с точки зрения удовлетворения заявленного требования, являются источники газоразрядной плазмы, предложенные авторами работ [5–8]. Однако подробный анализ данных источников плазмы позволяет выделить следующие их недостатки:

- схема расположения электродов устройств не позволяет одновременно создавать несколько потоков плазмы с разной формой сечения и в разных направлениях;

- конструктивные особенности электродов устройств не позволяют создавать однородные потоки плазмы [6];

- невысокая эффективность источника плазмы, обусловленная малой долей (около 4 %) извлекаемых из плазмы ионов [5].

Для решения поставленной задачи предлагается многолучевой генератор газоразрядной плазмы [9] (рис. 2), лишенный перечисленных недостатков. Данный прибор формирует несколько направленных потоков однородной низкотемпературной внеэлектродной плазмы с разными формами их сечения при одновременном увеличении тока разряда и снижении напряжения на электродах газоразрядного устройства.

Значение толщины изоляции в этом случае определяется диапазоном  $\lambda < h < 3\lambda$ , где  $\lambda$  — длина сво-

бодного пробега электронов в потоке газоразрядной плазмы,  $h$  — толщина диэлектрика. Нами запатентован [9] указанный диапазон значений  $h$ , т. к. экспериментально установлено, что при нарушении условия  $\lambda < h < 3\lambda$  разряд в предложенной электродной системе не зажигается. В области отверстий, сформированных в системе "анод—изоляция—катод", возникает структура "полый анод—полый катод". Количество и форма отверстий определяется условиями проведения технологических операций.

При подаче на электродную систему напряжения от 0.3 до 6 кВ в области отверстий возникает искривление силовых линий электрического поля. Свободные электроны, не встречая на своем пути ограничения, входят в полость катода и осуществляют ионизацию атомов остаточного газа.

Если электрон ионизирует один и более атомов, то в полости возникает облако газоразрядной плазмы, которое является эффективным источником свободных электронов для формирования газового разряда в области отверстия в аноде. Поскольку в промежутке анод—катод свободный электрон не успевает набрать энергию для ионизации атомов остаточного газа, то ионизация происходит за пределами поверхности анода, т. е. разряд возникает за пределами электродов устройства. Это позволяет получать потоки газоразрядной плазмы в сотни и тысячи миллиампер при напряжениях 0.3–1 кВ. Формирование потока газоразрядной плазмы за пределами электродов устройства устраняет зависимость ее параметров от площади обрабатываемой поверхности (эффект загрузки). Следует отметить, что форма полости катода в зависимости от требований технологической операции может быть квадратной, сферической, прямоугольной, т. е. любой. Главными условиями возникновения газового разряда являются:  $H \geq 3\lambda$ ;  $\lambda < h < 3\lambda$ ;  $Q_y > 1$ , где  $\lambda$  — длина свободного пробега электрона;  $H$  — минимальный размер полости катода на пути движения иона;  $h$  — толщина диэлектрика в области отверстий в катоде и аноде. Выполнение неравенства  $H \geq 3\lambda$  является определяющим, т. к. в противном случае нарушаются условия возникновения газового разряда в полости катода. Уменьшение зазора между катодом и анодом менее  $\lambda$  приводит к увеличению вероятности их замыкания. С другой стороны, малые зазоры между анодом и катодом способствуют возникновению дугового разряда между ними, в результате которого газоразрядное устройство необратимо выходит из строя. Увеличение зазора между анодом и катодом более  $3\lambda$  приводит к возникновению в промежутке паразитных разрядов, являющихся аномальными разновидностями тлеющего разряда, и интенсивному выгоранию рабочих поверхностей анода и катода.

В процессе работы такого устройства в области отверстий генерируется одновременно несколько по-

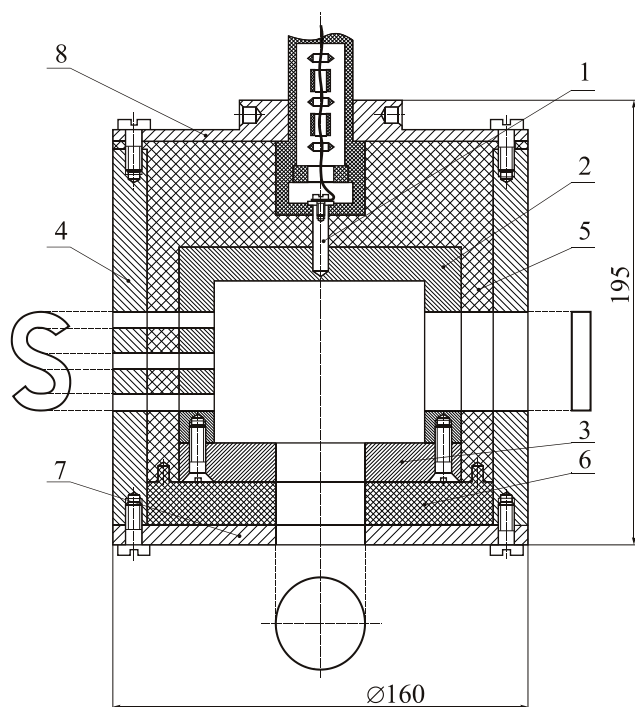


Рис. 2. Многолучевой генератор газоразрядной плазмы.

1 — высоковольтный электрод; 2 — полый катод; 3 — основание; 4 — полый анод; 5 — изоляция; 6, 7, 8 — крышки

токов низкотемпературной плазмы с разной или одинаковой формой их сечений в одном или разных направлениях. Логическим продолжением работы будет проведение экспериментальных исследований электрофизических параметров данных потоков внеэлектродной плазмы.

### Фокусатор газоразрядной плазмы

Формирование оптического микрорельефа и наноразмерных структур на криволинейных поверхностях в низкотемпературной плазме требует равномерной обработки поверхности независимо от угла ее наклона. Существующие газоразрядные устройства, представленные, например, в [10, 11], из-за плоской конструкции электродов неспособны обрабатывать криволинейные поверхности, т. к. большинство частиц плазмы взаимодействует с криволинейной поверхностью под некоторым углом, что приводит к неравномерному распределению энергии, поглощаемой поверхностью обрабатываемого материала, и, следовательно, к неравномерному ее травлению. В то же время при проектировании высокоэффективных компактных объективов широко применяются дифракционные корректоры aberrаций, размещенные непосредственно на вогнутой (или выпуклой) поверхности линз [12].

В настоящей работе для формирования направ-

ленного потока низкотемпературной внеэлектродной плазмы, частицы которой бомбардируют криволинейную поверхность в направлении нормали к любой ее точке, при одновременном увеличении тока разряда и снижении напряжения на электродах устройства предлагается фокусатор газоразрядной плазмы [13].

На рис. 3 представлена его конструкция, которая включает в себя высоковольтные ввод 1, кабель 2, через которые на катод 3 подается электропитание. Катод 3 коаксиально установлен в полый корпус 5, а между катодом и анодом проложена изоляция 6, корпус 5 закрыт крышкой 7 и сетчатым анодом 4, образуя электродную систему газоразрядного устройства; по образующей поверхности анод 4 прижимается кольцом 8 к корпусу 5, образуя с ним электрическую цепь. Катод и сетчатый анод изготавливаются с кривизной, равной кривизне поверхности обрабатываемого изделия 9 и располагаются на расстоянии  $15\lambda < h < 50\lambda$  от него (рис. 3).

Функционирование прибора аналогично работе многолучевого генератора газоразрядной плазмы. За пределами анода в области анод—подложка возникает облако газоразрядной плазмы, которое является эффективным источником химически активных частиц, принимающих участие в вертикальном травлении криволинейной поверхности.

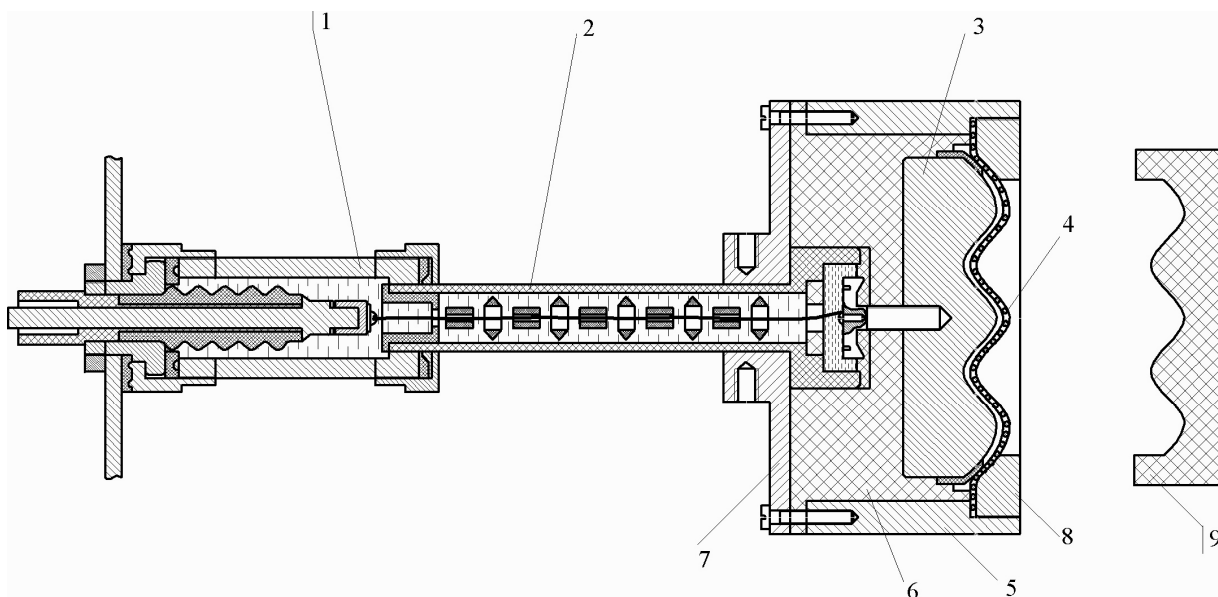


Рис. 3. Фокусатор газоразрядной плазмы.

1 — высоковольтный ввод; 2 — высоковольтный кабель; 3 — катод; 4 — сетчатый анод; 5 — полый корпус; 6 — изоляция; 7 — крышка; 8 — прижимное кольцо; 9 — обрабатываемое изделие

В процессе работы фокусатора газоразрядной плазмы в области ячеек сетки возникают потоки плазмы, направление которых строго соответствует нормали к площади каждой ячейки сетки и, следовательно, к соответствующему участку обрабатываемой поверхности. При нанесении маскирующего слоя на криволинейную поверхность образца травление осуществляется только в незащищенной маской области. Происходит формирование дифракционного микрорельефа на криволинейной поверхности.

Однако если образец расположить на расстоянии от анода менее  $15\lambda$ , то газовый разряд приобретает неустойчивость, т. е. вместо стабильного горения наблюдаются вспышки и процесс травления поверхности прекращается. Расположение образца на расстоянии более  $50\lambda$  от анода приводит к тому, что частицы плазмы в этой области движутся уже не прямолинейно, а подобно частицам положительного столба тлеющего разряда. Хаотичное движение частиц значительно увеличивает неравномерность и уменьшает скорость травления материала, что приводит к искажению геометрических параметров микро- и наноструктур.

Разработанные нами газоразрядные приборы апробированы при травлении кремния с целью формирования на его поверхности дифракционных микроструктур.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Первые эксперименты проводились с использованием стандартной вакуумной установки УВН-2М-1, оснащенной генератором направленных потоков внеэлектродной плазмы. Кремниевая подложка со сформированной на ее поверхности резистивной маской располагалась на водоохлаждаемом, электрически изолированном подложкодержателе из алюминия. Это обеспечило формирование микрорельефа на поверхности кремния при потенциале поверхности, равном плавающему потенциалу плазмы. Таким образом, потенциал смещения подложки не оказывал влияния на значение энергии частиц ионно-электронного потока, взаимодействующих с поверхностью.

Анализ качества образцов до и после обработки в плазме проводился с использованием растрового электронного микроскопа (РЭМ) Carl Zeiss Supra 25.

Для проведения эксперимента по травлению были подготовлены образцы, представляющие собой монокремниевые пластины ориентации (100) со сформированной на их поверхности с помощью фотолитографии [14] маской из резиста марки Shipley UV 210. Вид сформированной маски показан на рис. 4. Толщина резистивного слоя составляет  $0.8 \mu\text{м}$ .

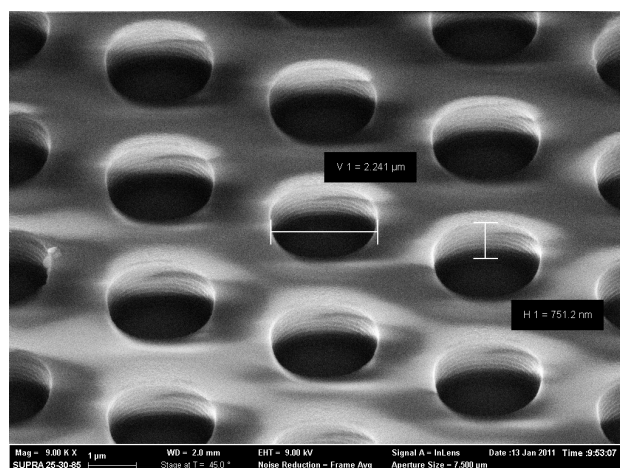


Рис. 4. Изображение резистивной маски на поверхности кремния

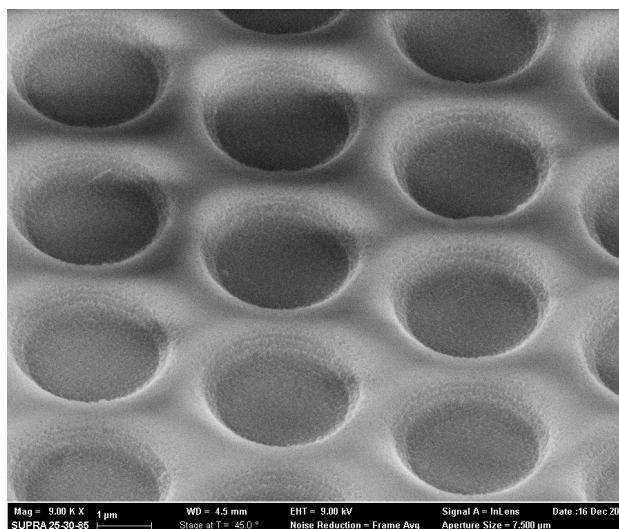


Рис. 5. Изображение микрорельефа на поверхности кремниевой подложки, сформированного во внеэлектродной плазме

Травление кремния осуществлялось во внеэлектродной плазме в смеси газов  $\text{CF}_4$  и  $\text{O}_2$  при значении тока разряда  $I = 80 \text{ мА}$  и напряжении на электродах газоразрядного устройства  $U = 2000 \text{ В}$  [15, 16]. Давление в вакуумной камере поддерживалось на уровне  $0.2\text{--}0.25 \text{ мбар}$  ( $20\text{--}25 \text{ Па}$ ). Время травления равнялось  $t = 10 \text{ мин}$  и было выбрано исходя из временной стойкости резистивной маски к плазменной обработке в процессе травления и необходимой высоты оптического микрорельефа на поверхности кремния.

На рис. 5 показан микрорельеф, сформированный на поверхности кремния после травления образца в указанном режиме и удаления резистивной маски.

Анализ изображения микрорельефа, представленного на рис. 5, показывает, что геометрия полученного профиля повторяет геометрию исходного маскирующего слоя. Высота микрорельефа составляет 550 нм, а шероховатость поверхности — не более 20 нм. Тем не менее более точное сравнение геометрических параметров резистивной маски и сформированного микрорельефа позволяет утверждать, что незначительное "скругление" стенок профиля все же существует. "Скругление" и наклон боковых стенок можно объяснить отклонением от первоначальной траектории движения падающих частиц на поверхность в результате таких эффектов, как зарядка маски направленным потоком электронов, наличие углового распределения частиц в ионном потоке, затенения и отражения ионов от стенок маски, неоптимальным расстоянием до образца. Степень влияния перечисленных эффектов, характерных для электронно-стимулированного радикального травления, зависит от локальной плотности радикалов, их вида, соотношения и энергии [17]. В целом проведенный анализ подтверждает, что микрорельеф, представленный на рис. 5, является оптическим, а выполненные эксперименты подтверждают работоспособность разработанных газоразрядных приборов и возможность формирования с их помощью микро- и наноразмерных дифракционных структур.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты, описанные в статье (части I и II), свидетельствуют о перспективности направления, связанного с созданием и применением для формирования микро- и наноразмерных дифракционных структур нового класса газоразрядных приборов. Данные приборы отличаются от существующих уменьшением стоимости, энергоемкости, количества контролируемых параметров.

Проведенные эксперименты подтверждают необходимость дальнейшего развития предложенного ряда газоразрядных приборов с целью совершенствования технологии формирования дифракционных оптических элементов, предназначенных для работы на длинах волн от терагерцового до рентгеновского диапазонов. Логическим продолжением работы будет проведение исследований по следующему ряду направлений:

- детальная диагностика внеэлектродной плазмы, например, с помощью зонда Ленгмюра и интерпретация получаемых данных;
- уточнение физических и математических моделей взаимодействия частиц внеэлектродной плазмы с поверхностью твердых тел, гетероструктур и полимеров на основе интерпретации полученных результатов и открытых физических явлений;

- модернизация конструкций применяемых реакторов и устройств и создание новых приборов, комплексное исследование внеэлектродной плазмы, формируемой ими, и их электрофизических характеристик;
- переход к формированию наноструктур и технологиям на основе разработанных газоразрядных приборов.

### Благодарности

*Авторы выражают благодарность д.т.н., профессору М.Г. Путьре; к.т.н., доценту А.А. Голишникову; ведущему инженеру-технологу технологического центра МИЭТ А.А. Жукову за предоставление используемых при написании данной статьи образцов, а также многочисленные полезные, плодотворные и эффективные дискуссии.*

*Работа выполнена при поддержке грантов Президента Российской Федерации для поддержки ведущих научных школ НШ-7414.2010.9 и молодых российских ученых МД-1041.2011.2, а также гранта Carl Zeiss в рамках Программы поддержки научно-исследовательской работы молодых ученых ВУЗов России (Договор № СПбГУ 7/11 КЦ).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казанский Н.Л., Колтаков В.А., Колтаков А.И., Кричевский С.В. Газоразрядные приборы, формирующие направленные потоки внеэлектродной плазмы. Ч. 1. Анализ и конструктивные особенности приборов // Научное приборостроение. 2012. Т. 22, № 1. С. 13–18.
2. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. М.: Высшая школа, 1990. 320 с.
3. Патент РФ № 2295791, 20.03.07.
4. Методы компьютерной оптики / Под ред. В.А. Сойфера. М.: Физматлит, 2003. 688 с.
5. Oks E., Vizir A., Yushkov G. // Rev. Sci. Instrum. 1998. V. 69. P. 853.
6. Патент США № 3831052 А, 20.08.74.
7. Патент РФ № 2231164, 20.06.04.
8. Патент РФ № 2215383, 27.10.03.
9. Патент РФ № 2333619, 10.09.08.
10. Орликовский А.А. Плазменные процессы в микро- и нанoeлектронике. Плазмохимические реакторы нового поколения и их применение в технологии микроэлектроники // Микроэлектроника. 1999. Т. 28, № 6. С. 415–426.
11. Путьра М.Г. Плазменные методы формирования трехмерных структур УБИС. М.: МИЭТ, 2005. 128 с.
12. Greisukh G.I., Bobrov S.T., Stepanov S.A. Optics of diffractive and gradient-index elements and systems. Bellingham, WA: SPIE PRESS, 1997. 414 p.
13. Патент РФ № 2339191, 20.11.08.
14. Моро У. Микролитография. Ч. 1 (пер. с англ.). М.: Мир, 1990. 605 с.
15. Казанский Н.Л., Колтаков А.И., Колтаков В.А. Исследование особенностей процесса анизотропного травления диоксида кремния в плазме газового разряда высоковольтного типа // Микроэлектроника.



2004. Т. 33, № 3. С. 218–233.
16. Казанский Н.Л., Колпаков В.А. Формирование оптического микрорельефа во внеэлектродной плазме высоковольтного газового разряда. М.: Радио и связь, 2009. 220 с.
17. Амиров И.И., Морозов О.В., Изюмов М.О. и др. Плазменные процессы глубинного травления Si и SiO<sub>2</sub> для целей микротехнологии // Квантовые компьютеры, микро- и нанoeлектроника: физика, технология, диагностика и моделирование / Ред. А.А. Орликовский. М.: Наука, 2005 (ФТИАН; Т. 18). С.173–189.

*Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королёва (Национальный исследовательский университет), г. Самара (Казанский Н.Л., Колпаков В.А., Колпаков А.И., Кричевский С.В., Подлипнов В.В.)*

*Учреждение Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН, г. Самара (Казанский Н.Л., Подлипнов В.В.)*

Контакты: Колпаков Всеволод Анатольевич, kolpakov@ssau.ru

Материал поступил в редакцию 28.07.2011.

## GAS-DISCHARGE DEVICES FORMING DIRECTED FLOWS OF THE OFF-ELECTRODE PLASMA. PART II. RESULTS OF UPDATING. NEW DEVICES

**N. L. Kazansky<sup>1,2</sup>, V. A. Kolpakov<sup>1</sup>, A. I. Kolpakov<sup>1</sup>,  
S. V. Krichevsky<sup>1</sup>, V. V. Podlipnov<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*S.P. Korolev Samara State Aerospace University (National Research University)*

<sup>2</sup>*Image Processing Systems Institute RAS, Samara*

A new class of gas-discharge devices forming directed flows of the off-electrode plasma for the production of micro- and nano-sized diffractive structures on large-format wafers is described.

*Keywords:* gas-discharge device, modernization, generator, focusator, off-electrode plasma, etching of optical materials, microrelief formation, nano-sized structures formation