

УДК 537.5; 537.525.99

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

## ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ПРИБОРЫ, ФОРМИРУЮЩИЕ НАПРАВЛЕННЫЕ ПОТОКИ ВНЕЭЛЕКТРОДНОЙ ПЛАЗМЫ. Ч. I. АНАЛИЗ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИБОРОВ

На основе анализа газоразрядных приборов, генерирующих ионно-электронные пучки в высоковольтном газовом разряде, предложены новый подход к формированию широкоформатных направленных потоков низкотемпературной плазмы вне межэлектродного пространства и соответствующий газоразрядный прибор с целью применения его для изготовления микро- и наноразмерных дифракционных структур на широкоформатных пластинах.

*Кл. сл.:* газоразрядный прибор, ионно-электронные пучки, внеэлектродная плазма, травление оптических материалов, формирование микрорельефа, формирование наноразмерных структур

### ВВЕДЕНИЕ

Современные газоразрядные приборы формируют низкотемпературную плазму в межэлектродном пространстве [1]. Электроды при этом могут находиться внутри вакуумной камеры либо вынесены за ее пределы. Такой подход связан с конструктивной сложностью, энергоемкостью источников плазмы и как следствие с их высокой стоимостью. Это объясняется следующими недостатками, характерными для существующих приборов, генерирующих низкотемпературную плазму:

- явление уменьшения скорости травления с увеличением относительных размеров обрабатываемой поверхности [2, 3], в том числе за счет ионного затенения и затенения нейтралами, эффект микрозагрузки [4];
- необходимость оптимизации конструкции приборов [4];
- взаимодействие плазмы со стенками вакуумной камеры [4];
- влияние материала, геометрии и свойств поверхности подложки на параметры газовых разрядов [5, 6].

Приведенные недостатки усложняют последовательность и повышают стоимость технологических процессов изготовления микро- и наноструктур, необоснованно расширяют спектр установок, реакторов и рабочих газов. Указанная проблема становится еще более острой для дифракционной оптики — при формировании микро- и наноразмерных дифракционных структур с высокой равномерностью на широкоформатных пластинах различных оптических материалов [7, 8].

В данной работе предлагается провести анализ

особенностей газоразрядных приборов, формирующих ионно-электронные пучки в высоковольтном газовом разряде с целью устранения недостатков, характерных для современных отечественных и зарубежных аналогов, а также применения данных приборов для изготовления микро- и наноразмерных дифракционных структур на широкоформатных пластинах в низкотемпературной плазме.

### АНАЛИЗ ПРИБОРОВ, ФОРМИРУЮЩИХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНУЮ ПЛАЗМУ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ГАЗОВОГО РАЗРЯДА

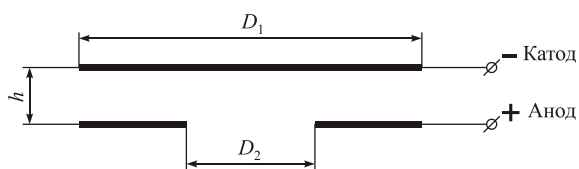
Впервые высоковольтный газовый разряд был открыт в Институте электросварки имени Е.О. Патона Академии наук УССР в 70-х годах прошлого столетия и успешно применен для сварки и в лазерной технике [9–11]. Позднее, в 1980-х годах авторы работ [12, 13] расширили область его применения: разряд стал использоваться для пайки элементов полупроводниковых приборов.

С другой стороны, характерной особенностью изготовления дифракционных оптических элементов (ДОЭ) является формирование дифракционного микрорельефа на значительных площадях с практически одинаковыми параметрами канавок [7]. Для этого при изготовлении ДОЭ ионно-плазменными технологиями требуется использование в качестве технологического инструмента частиц плазмы с энергией от единиц до сотен электрон-вольт с равномерным распределением их концентрации и энергии по площади сечения потока плазмы. Наиболее просто данное условие можно реализовать применением в технологических процессах осесимметрич-

ных пучков (потоков) низкотемпературной плазмы [8]. В настоящее время такие пучки формируются в газоразрядных приборах, реализующих высоковольтный газовый разряд [14].

Высоковольтный разряд в газе является аномальной разновидностью тлеющего разряда, поэтому он обладает всеми его достоинствами и у него полностью отсутствует такой недостаток, как зависимость параметров газового разряда от месторасположения в нем обрабатываемой подложки и от свойств ее поверхности. Его возникновение обусловлено неоднородным распределением электрического поля, достигаемым особенностями электродов газоразрядного устройства (рис. 1) [12].

Анализ схемы электродов газоразрядного прибора показывает, что если его электроды выполнены из сплошного материала, то при сближении анода и катода до темного астонового пространства тлеющий разряд прекращается, т. к. выполняется неравенство  $\gamma Q < 1$ , где  $\gamma$  — число электронов, выбиваемых одним ионом из катода,  $Q$  — число положительных ионов. Однако если в аноде выполнить сквозное отверстие, то в его области уже нет запрета для выполнения неравенства  $\gamma Q \geq 1$ : физически это означает, что в генерации одного или нескольких пар положительных ионов  $Q$  принимают участие один или более электронов, т. е. возникают условия образования газового разряда за пределами анода.

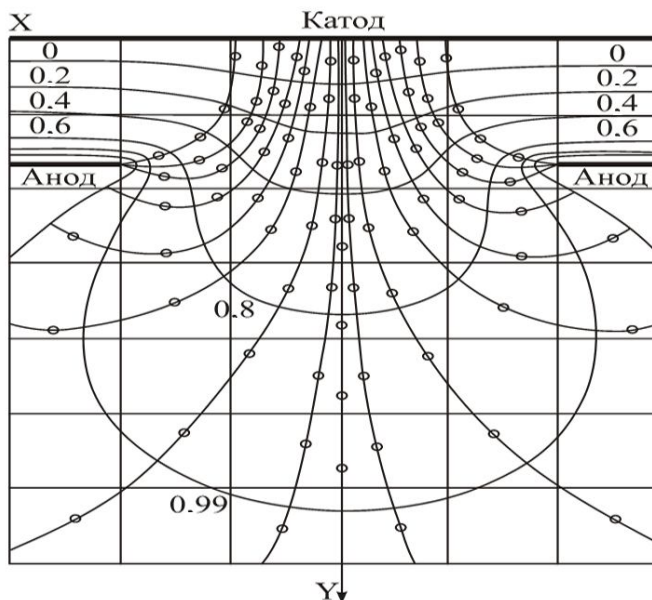


**Рис. 1.** Схема газоразрядного прибора на основе элементарной ячейки, формирующей ионно-электронные пучки произвольной формы в высоковольтном газовом разряде

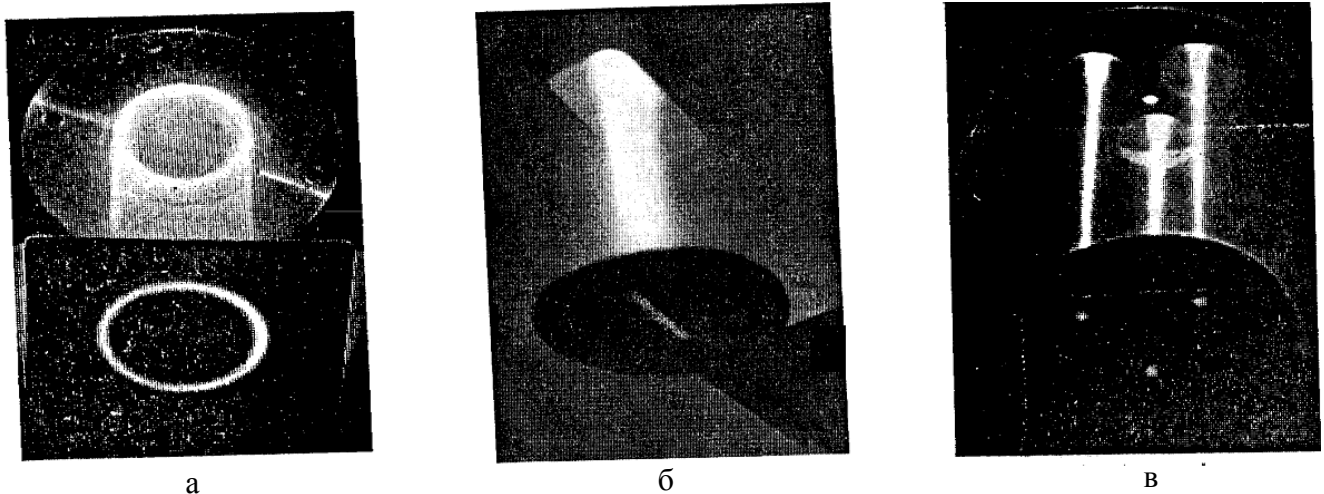
Таким образом, в области отверстия в аноде электрон, вылетевший с поверхности катода под действием поля, продолжает свое движение в ускоряющем поле газоразрядного прибора за пределами межэлектродного пространства вплоть до осуществления акта ионизации атома остаточного газа. В результате в области отверстия в аноде формируется направленное движение электронов. При этом каждой точке катода соответствует своя траектория движения электрона, вдоль которой в среднем образуется  $Q$  ионов, достигающих катода в точке вылета электрона. Движение электронов и ионов вдоль той же траектории является необходимым условием зажигания разряда [14].

Анализ эквипотенциалей показывает [13, 15], что вблизи оси симметрии отверстия в аноде будет выполняться максимальное соответствие этому условию, а в периферийной части отверстия в аноде — минимальное (рис. 2).

При достаточной величине градиента электрического поля у катода каждый вылетевший из него электрон движется по направлению, описываемому прямолинейным участком соответствующей силовой линии поля [14]. Электрон, обладая малой массой, приобретает значительную скорость на длине свободного пробега и продолжает свое прямолинейное движение за границами анода.



**Рис. 2.** Распределение электрического поля в области электродов газоразрядного устройства



**Рис. 3.** Приборы, формирующие ионно-электронные пучки в высоковольтном газовом разряде, содержащие диафрагму с отверстием кольцеобразной (а), ленточной форм (б) и с тремя отверстиями цилиндрической формы (в) [14]

Характерным свойством ионов, обладающих большой массой и малой скоростью, является их движение строго по направлению силовой линии, поэтому в области искривления траектории движения электрона нарушаются условия самоподдержания высоковольтного газового разряда из-за отсутствия электрон-ионного взаимодействия.

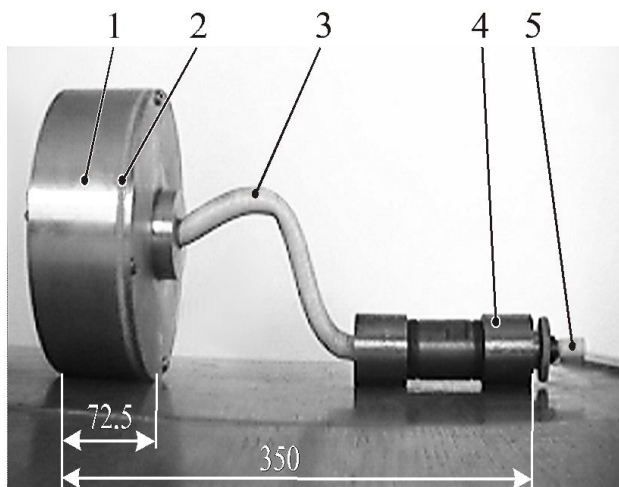
Количество ионов, образовавшихся на прямолинейном прикатодном участке движения, зависит от его длины, давления газа и распределения силовых линий электрического поля вдоль этого участка. В частности, с увеличением давления растет концентрация ионов, однако не все ионы, образованные на прямолинейном участке движения, будут двигаться к катоду по направлению силовой линии, а только те, которые возникают в местах достаточного градиента поля, необходимого для их движения в сторону катода.

Таким образом, разряд возникает только на прямолинейных участках силовых линий при условии, что на их длине электроны и ионы успевают набрать энергию равную энергиям ионизации атомов остаточного газа и материала катода или больше их. Более подробно механизм формирования низкотемпературной плазмы высоковольтным газовым разрядом представлен в работе [16].

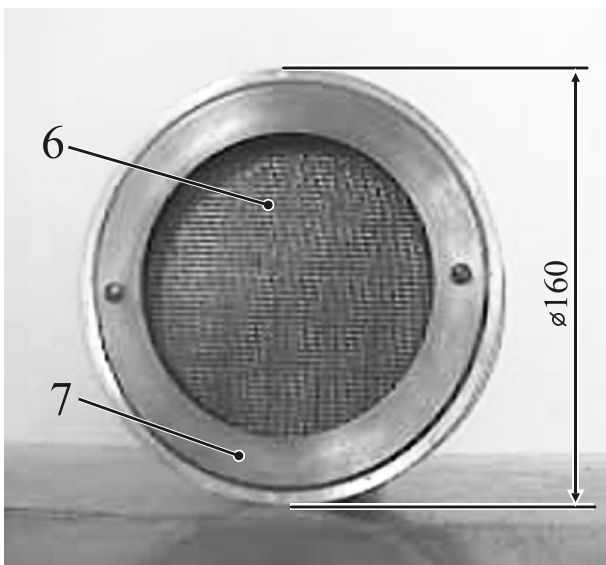
В работах [9, 14, 17] рассматриваются приборы, формирующие ионно-электронные пучки в высоковольтном газовом разряде (см. рис. 3). Данные приборы содержат систему электродов, состоящую из плоского катода, плоского анода, диафрагмы с отверстием различной формы и размеров  $d_a$ . Расстояние  $h$  между катодом и диафрагмой таково, что при рабочих давлениях газа  $p = 10^{-2} - 10^{-1}$  Торр и напряжениях  $\leq 50$  кВ вне отверстия в

диафрагме разряд зажегся не может. Расстояния  $h$  в приведенных работах менялись от 5 до 15 мм, а  $d_a$  от 10 до 20 мм. Ток ионно-электронного пучка в 45–600 мА достигается при напряжении на электродах 17–25 кВ. Такие режимы работы газоразрядного устройства неприемлемы для формирования дифракционного микрорельефа [8].

В работе [12] показана возможность формирования пучков низкотемпературной плазмы высоковольтным газовым разрядом с сечением ленточной формы. Для этого применялся анод толщиной 20 мм с отверстием в центре размером  $d_a = 5 \times 30$  мм. Расстояние  $h$  в данной работе равнялось 3 мм, что привело к стабилизации существования высоковольтного разряда и снижению потенциала его зажигания. Ток луча меняется от 0 до 40 мА при варьировании ускоряющего напряжения в диапазоне 0.5–7 кВ. Такие режимы работы газоразрядного устройства подходят для травления оптических материалов [18]. Энергия частиц, взаимодействующих с поверхностью подложки, будет составлять в этом случае единицы, десятки и сотни электронвольт, что вполне достаточно для осуществления плазмохимического или ионно-химического травления. Однако геометрические размеры луча при этом составляют всего  $0.8 \times 25$  мм. Возникает необходимость сканирования луча по поверхности подложки. Авторами [12] установлено, что при приближении ленточного пучка к краю подложки начинается усиленное отражение теплового поля от ее торцевой грани. В области поверхности между пучком и краем подложки начинается интенсивное накопление тепловой энергии, приводящее к росту температуры. Создаются разные условия травления материала на краях пластины и в ее



а



б

**Рис. 4.** Внешний вид газоразрядного прибора, формирующего направленные потоки внеэлектродной плазмы.

а — вид сбоку; б — вид спереди; 1 — корпус-анод; 2 — изоляция катода от корпуса; 3 — изоляция высоковольтного ввода; 4 — устройство крепления газоразрядного прибора в рабочей камере; 5 — высоковольтный ввод; 6 — анодная сетка; 7 — кольцо крепления анодной сетки. Габаритные размеры указаны в мм

центральной области, а следовательно, сформировать дифракционный микрорельеф и тем более наноразмерные структуры с одинаковыми параметрами по всей площади подложки не представляется возможным. Для устранения этого недостатка в большинстве практических случаев значительно увеличивают общую площадь подложки, создавая условия равномерного нагрева в области травле-

ния. Значительный расход дорогостоящего материала подложки и малая скорость травления не позволяют осуществить широкое внедрение ленточных пучков для формирования микро- и наноразмерных дифракционных структур.

### РАЗРАБОТАННЫЙ ПРИБОР

На основе проведенного анализа в настоящей работе для формирования таких структур предлагается использовать газоразрядный прибор, способный создавать широкоформатные направленные потоки низкотемпературной плазмы, генерируемой высоковольтным газовым разрядом вне межэлектродного пространства (рис. 4), при этом активные частицы плазмы двигаются к поверхности подложки по нормали [8]. В дальнейшем будем называть такую плазму внеэлектродной. Внешний вид предложенного прибора представлен на рис. 4.

Для увеличения эмиссии электронов катод изготовлен из алюминия [19], а для увеличения равномерности распределения частиц плазмы по энергиям анод изготовлен в виде сетки с размером ячейки  $1.8 \times 1.8$  мм из проволоки диаметром 0.5 мм, выполненной из нержавеющей стали, что значительно снижает ее химическую активность к частицам плазмы и увеличивает стойкость анода к температурному нагреву [20]. Расстояние между электродами выбирается из соотношения  $h \leq 2-3\lambda$ , где  $\lambda$  — длина свободного пробега заряженной частицы. Это позволяет снизить напряжение зажигания разряда до  $U_z = 300$  В. Ток разряда при этом изменяется в диапазоне 0–200 мА, а ускоряющие напряжения — от 0.3 до 6 кВ. Диаметр электродов выбирается в зависимости от размеров обрабатываемой пластины и может изменяться от 50 мм до 200 мм и более. Выбранный размер ячейки сетки обусловлен следующими обстоятельствами. Если его значения выше 1.8 мм, то наблюдается снижение равномерности распределения заряженных частиц по сечению плазменного потока вследствие уменьшения числа ячеек. В случае  $d_a < 1.8$  мм нарушаются условия самоподдержания разряда в указанных диапазонах его токов и ускоряющих напряжений при  $h \leq 2-3 \lambda$ , что не противоречит результатам, представленным в работе [14].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Достоинством предложенного прибора является его способность формировать широкоформатные направленные потоки низкотемпературной внеэлектродной плазмы. Данный прибор отличается от уже существующих своей универсальностью и простотой конструкции, которая позволяет

применять при изготовлении изделия легкодоступные материалы. Реализация предложенного прибора позволяет достигнуть значения напряжения зажигания разряда  $U_3 = 300$  В, тока разряда — до 200 мА и ускоряющих напряжений — от 0.3 до 6 кВ. Установлено, что перечисленные режимы работы газоразрядного прибора приемлемы для травления оптических материалов. Во второй части работы будут представлены результаты модификации предложенного прибора, а также новые приборы с целью их применения для формирования микро- и наноразмерных дифракционных структур на широкоформатных пластинах оптических материалов.

#### Благодарности

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. 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.
2. Hyun-Ho D., Chung-Kyu Y., Ki-Woong W. Effects of bias frequency on reactive ion etching lag in an electron cyclotron resonance plasma etching system // J. Vac. Sci. and Technol. A. 1997. V. 15, N 3. Pt 1. P. 664–667.
3. Ковалевский А.А., Малышев В.С., Цыбульский В.В., Сорокин В.М. Исследование процесса изотропного плазмохимического травления пленок диоксида кремния // Микроэлектроника. 2002. Т. 31, № 5. С. 344–349.
4. Путья М.Г. Плазменные методы формирования трехмерных структур УБИС. М.: МИЭТ, 2005. 128 с.
5. Woodworth J.R., Aragon B.P., Hamilton T.W. Effect of bumps on the wafer on ion distribution functions in high-density argon and argon-chlorine discharges // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 70, N 15. P. 1947–1949.
6. Hebner G.A., Blain M.G., Hamilton T.W. Influence of surface material on the boron chloride density in inductively coupled discharges // J. Vac. Sci. and Technol. A. 1999. V. 17, N 6. P. 3218–3224.
7. Методы компьютерной оптики / Под ред. В.А. Сойфера. М.: Физматлит, 2003. 688 с.
8. Казанский Н.Л., Колпаков В.А. Формирование оптического микрорельефа во внеэлектродной плазме высоковольтного газового разряда. М.: Радио и связь, 2009. 220 с.
9. Вагнер И.В., Болгов Э.И., Гракун В.Ф. и др. Формирование электронных пучков произвольной формы в высоковольтном разряде в газе и особенности

- конструирования газоразрядных пушек // Автоматическая сварка. 1972. № 12. С. 27.
10. Handle S.K., Nordhage F.R. Method for triggering high voltage vacuum discharges // J. Appl. Phys. 1997. V. 81, N 9. P. 6473–6475.
  11. Донко З., Рожжа К., Шалаи Л. Высоковольтный разряд с полым катодом: применение в лазерной технике и моделирование движения электронов // Физика плазмы. 1998. Т. 24, № 7. С. 637–648.
  12. Комов А.Н., Колпаков А.И., Бондарева Н.И., Захаренко В.В. Электронно-лучевая установка для пайки элементов полупроводниковых приборов // Приборы и техника эксперимента. 1984. № 5. С. 218–220.
  13. Колпаков А.И., Расстегаев В.П. Расчет электрического поля газоразрядной пушки высоковольтного типа. Деп. в ВИНТИ 18.04.79, №1381–79 Деп.
  14. Вагнер И.В., Болгов Э.И., Гракун В.Ф. и др. Элементарная ячейка для формирования электронных пучков произвольной формы в высоковольтном разряде в газе // Журнал технической физики. 1974. Т. 44, вып. 8. С. 1669–1674.
  15. Колпаков В.А., Осипов А.Н. Моделирование характера распределения эквипотенциалей электростатического поля в газоразрядном устройстве высоковольтного типа // Труды IV Международной конференции "БИКАМП-2003". Санкт-Петербург, 2003. С. 335–338.
  16. Казанский Н.Л., Колпаков В.А. Исследование механизмов формирования низкотемпературной плазмы газовым разрядом высоковольтного типа // Компьютерная оптика. 2003. № 25. С. 112–117.
  17. Вагнер И.В., Гракун В.Ф., Гохвельд В.Л. // Автоматическая сварка. 1971. № 12. С. 15.
  18. Казанский Н.Л., Колпаков А.И., Колпаков В.А. Исследование особенностей процесса анизотропного травления диоксида кремния в плазме газового разряда высоковольтного типа // Микроэлектроника. 2004. Т. 33, № 3. С. 218–233.
  19. Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов И.В. Основы электронно-лучевой обработки материалов. М.: Машиностроение, 1978. 222 с.
  20. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. М.: Высшая школа, 1990. 320 с.

**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.)

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

Контакты: Колпаков Всеволод Анатольевич,  
kolpakov@ssau.ru

Материал поступил в редакцию 14.06.2011.

**GAS-DISCHARGE DEVICES FORMING DIRECTED FLOWS  
OF THE OFF-ELECTRODE PLASMA.  
PART I. ANALYSIS AND STRUCTURAL FEATURES OF 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>**

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

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

Based on the analysis of gas-discharge devices forming ion and electron beams in high-voltage gas discharge, a new approach and corresponding gas-discharge device that generates large-format directed flows of the off-electrode plasma for the production of micro- and nano-sized diffractive structures on large-format plates is proposed.

*Keywords:* gas-discharge device, ion and electron beams, off-electrode plasma, etching of optical materials, forming of microrelief, forming of nano-sized structures