

# ГЕНЕРАТОР ВНЕЭЛЕКТРОДНОЙ ПЛАЗМЫ С ПОЛЫМ КАТОДОМ

В.А. Колпаков, С.В. Кричевский, В.В. Графкин, М.А. Маркушин, Ю.С. Струкель, С.Г. Серов

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия

Предложен генератор формирующий широкоапертурный поток отрицательно заряженных частиц плазмы с сечением 120 мм. Параметры генератора: ток разряда - 1 А; ускоряющее напряжение от 0.3 до 6 кВ; плотность тока до 10 мА/см<sup>2</sup>; длина потока до 50 см; равномерность распределения заряженных частиц по сечению потока плазмы не хуже 98%.

Конструкция генератора содержит коаксиально расположенные ячейки сетчатого анода и сетки катода, замыкающей полость в его объеме глубиной  $L = 3-5$  длин свободного пробега электрона в потоке газоразрядной плазмы. Расстояние между сетчатым анодом и сеткой катода равно темному астоновому пространству тлеющего разряда. Показано, что длительность непрерывной работы катода и диапазон рабочих давлений определяются выбранными значениями глубины его полости и ускоряющего напряжения.

## Введение

Перспективы развития оптической компонентной базы предъявляют жесткие требования к качеству обработки поверхности широкоформатных пластин в потоках низкотемпературной плазмы [1]. Промышленные устройства [2-4], формирующие подобные потоки с помощью газовых разрядов ВЧ, СВЧ и магнетронного типов, имеют неустойчивость резонансной частоты и требуют постоянного контроля за ее величиной [5]. Кроме того, данные генераторы плазмы характеризуются рядом недостатков: малой долей извлекаемых ионов из плазмы (КПД около 4%); неравномерностью распределения частиц плазмы по сечению ее потока, невозможностью увеличения плотности плазмы при постоянной энергии ионов, бомбардирующих поверхность; уменьшением скорости травления с увеличением относительных размеров поверхности.

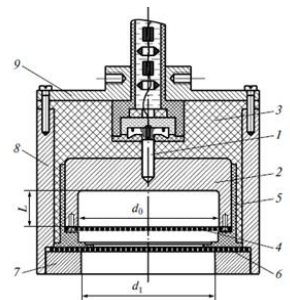
В работе [6] предложено применение для формирования оптических микроструктур высоковольтного газоразрядного прибора, генерирующего широкоформатные потоки внеэлектродной плазмы. Использование данного устройства позволяет устранить эффект загрузки, обеспечить равномерную обработку широкоформатных пластин оптических материалов, снизить требования к чистоте реакторов и используемых материалов [7]. Однако существенным недостатком такого устройства является значительный нагрев такого катода, разрушающий его изоляцию при длительной работе [8].

## Генератор внеэлектродной плазмы с полым катодом для обработки поверхности оптических материалов

С целью снижения температуры катода в настоящей работе предлагается увеличить длину пути, проходимого заряженной частицей в системе электродов при формировании высоковольтного газового разряда. Данная задача решается путем использования полого катода, закрытого сеткой и сетки-анода, позволяющих в пространстве соосных ячеек увеличивать количество актов взаимодействия заряженных частиц с нейтральными атомами и молекулами рабочего газа, уменьшая энергию положительных ионов и

одновременно увеличивая число актов ионизации за счет неупругих электронных соударений. Таким образом, достигается увеличение количества положительных ионов ( $\alpha$ - процесс), выбивающих из катода электроны ( $\gamma$ -процесс) при уменьшении энергии данных ионов, что соответственно снижает температуру катода и скорость его распыления. В качестве рабочих газов использовались воздух и хладон-14 ( $CF_4$ ).

Реализация указанного осуществляется с помощью генератора внеэлектродной плазмы с полым катодом схема конструкции которого представлена на рис.1.



**Рис.1.** Схема конструкции генератора внеэлектродной плазмы с полым катодом: 1 – высоковольтный электрод; 2 – полый катод; 3 – катодный изолятор; 4 – сетка катода; 5 – диэлектрический элемент; 6 – сетка-анод; 7 – металлическое кольцо; 8 – корпус; 9 – крышка

Генератор содержит: высоковольтный электрод 1, полый катод 2 из алюминия, фторопластовый катодный изолятор 3, сетку 4 из нержавеющей стали, закрывающую полость катода, фторопластовый диэлектрический элемент 5, сетку-анод 6, металлическое кольцо 7, металлические корпус 8 и крышку 9.

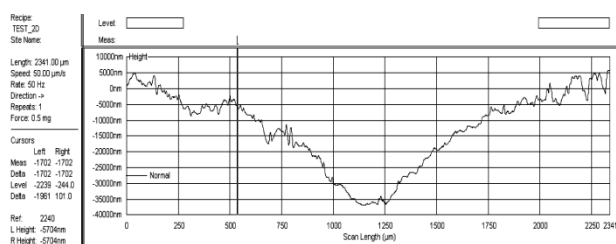
Диаметр полости в катоде  $d_0$  определяется необходимой плотностью тока и равномерностью ее распределения на поверхности обрабатываемой пластины, т.е. ее площадью. Глубина полости катода  $L$  выбирается из диапазона  $3\lambda_e < L < 5\lambda_e$ , где  $\lambda_e$  – длина свободного пробега электрона. При выполнении данного неравенства в среднем происходит  $k$  взаимодействий электрона с атомами и молекулами остаточного газа в полости катода, что приводит к образованию энергетически возбужденных молекул и атомов, отрицательных и положительных ионов [9]. Положительные ионы, образовавшиеся на длинах  $\lambda_e, 2\lambda_e, 3\lambda_e, k\lambda_e$ , под действием ускоряющего поля начинают свое движение к катоду в точках, соответствующих разным потенциалам электрического поля  $\phi_{\lambda_e}, \phi_{2\lambda_e}, \phi_{3\lambda_e}, \dots, \phi_{k\lambda_e}$ , сталкиваясь с атомами и молекулами, теряют часть своей энергии, а подходя к катоду набирают соответствующие энергии  $E_{\lambda_e} < E_{2\lambda_e} < E_{3\lambda_e} < E_{k\lambda_e}$ . Именно поэтому уменьшается распыление катода. Значения энергий  $E_{\lambda_e}, E_{2\lambda_e}, E_{3\lambda_e}, \dots, E_{k\lambda_e}$  можно определить, используя выражение [10]:

$$E_n = E_{n-1} \left( 1 - \frac{4m_i M}{(m_i + M)^2} \right) + eU \left( 1 - \frac{2}{\pi} \arctg \frac{(h + n\lambda_i)}{2c} \right), \quad (1)$$

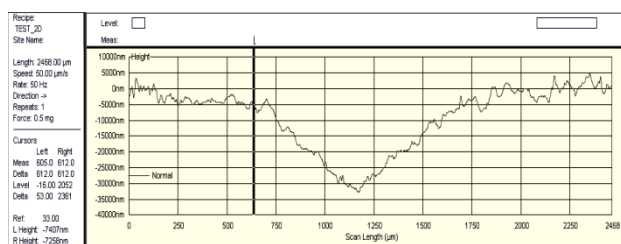
где  $n$  – номер соударения иона с атомом или молекулой в полости катода;  $E_{n-1}$  – энергия, набранная ионом перед столкновением  $n$ ;  $m_i$  – масса положительного иона;  $M$  – масса атома или молекулы рабочего газа;  $\lambda_i$  – длина свободного пробега иона;  $e$  – заряд электрона;  $U$  – ускоряющее напряжение на электродах;  $c$  – постоянная, вычисляемая по

методике [11]. Следует отметить, что при  $n=1$  величина  $E_{n-1}$  равна тепловой энергии иона  $\epsilon=1,5kT$  [2,7], имеющей при температуре 293 К значение 0,003 эВ, что существенно меньше энергии 391 эВ (определяемой вторым слагаемым в формуле (1)), сообщаемой иону электрическим полем на длине его свободного пробега. Поэтому в расчетах величиной  $E_0$  можно пренебречь. Оценка длины свободного пробега положительного иона по методике [12] дает до 84 его столкновений с атомами и молекулами в полости катода, а энергия такого иона, согласно выражению (1), уменьшается до 137,1 эВ.

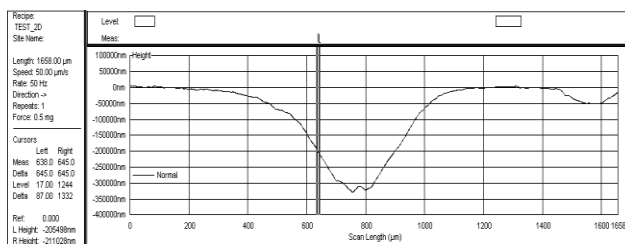
При  $L=(1-2)\lambda_e$  энергии положительных ионов достигают значений  $E_n \geq 177,1$  эВ, достаточных для распыления материала катода. В результате на поверхности катода наблюдаются ямки травления, профили которых представлены на рис. 2.



а



б



в

Рис. 2. Профили ямок травления на поверхности катода: а, б – в области края катода; в – в центре катода

Анализ геометрии профилей ямок травления на поверхности катода в пределах трех ячеек сетки раз мером 3x3 мм, соответствующих области края катода (рис.2 а,б), показывает, что глубина травления таких ямок минимальна. Это объясняется влиянием торцевых поверхностей полого катода, металлического кольца и пространства анод-катод, которые изменяют кривизну электрического поля в рассматриваемой области, образуя горизонтальную составляющую скорости положительных ионов. Последнее приводит к увеличению расстояния, проходимого положительными ионами и, следовательно, к увеличению числа их взаимодействий с атомами остаточного газа, что в свою очередь, приводит к потере ионами энергии или рекомбинации. Взаимодействие

свободных электронов с положительными ионами и их последующая рекомбинация формирует нейтральные атомы, которые, сохраняя направление движения к катоду, образуют на нем пленку. Например, в случае использования в качестве рабочего газа  $CF_4$  на поверхности катода наблюдается пленка черного цвета. Это дает возможность предполагать, что в рекомбинации участвуют углеродсодержащие ионы. Процессы рекомбинации в области пространства катод-анод распределены неравномерно, поэтому пленка углерода, выполняющая роль маскирующего слоя, также формируется неравномерной по толщине. Более того, неравномерность процессов рекомбинации приводит к неравномерному уменьшению плотности плазмы по краям катода. Следовательно, формирование маскирующего слоя и снижение плотности плазмы приводят к уменьшению глубины ямок травления, которая в рассматриваемом случае не превышает 35 мкм. За пределами трех крайних ячеек сеток 4,6 (см. рис. 1), в направлении последующих ячеек в сторону центра катода, большая часть прямолинейных участков силовых линий поля достигает горизонтальной поверхности полости катода. Поскольку ионы взаимодействуют по нормали с поверхностью катода, то передаваемая ей энергия может быть определена с помощью равенства [12]:

$$\Delta T_{k\lambda e} = \frac{4E_n m_i M_k}{(m_i + M_k)^2}, \quad (2)$$

где  $M_k$  – масса атома материала катода;  $E_n$  – энергия положительного иона у поверхности катода;  $m_i$  – масса положительного иона. Подставляя в (2) значения массы атома алюминия и иона азота ( $N_2^+$ ) и рассчитанные с помощью выражения (1) значения  $E_n$  для  $U=1200$  В, получим, в случае  $L=2\lambda_e$ , значение  $\Delta T_{\lambda e}=177,044$  эВ. Зная  $\Delta T_{\lambda e}$ , можно оценить коэффициент распыления, используя выражение [13]:

$$S_{k\lambda e} = \alpha \frac{3}{2\pi^2} \frac{\Delta T_{k\lambda e}}{2\varepsilon_b}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от отношения массы иона к массе атома подложки;  $\varepsilon_b$  – энергия сублимации атомов алюминия, равная 3,26 эВ [14]. При взаимодействии иона азота с атомом алюминия имеем  $MAI/MN_2 = 0,962$  и  $\alpha = 0,3$  [14], тогда  $S_{2\lambda e}=1,238$ . Данное значение коэффициента распыления показывает, что ион способен удалять атомы поверхности катода в области ячеек сетки катода, образуя ямки травления, глубина которых, согласно рис. 2в, составляет 300 мкм. Скорость распыления, определяемая по формуле [14]:

$$v = \frac{j_u \cdot S_{k\lambda e} \cdot M_k}{e \cdot N_A \cdot \rho}, \quad (4)$$

где  $j_u$  – плотность ионного тока в сечении, перпендикулярном направлению падения ионов, А/см<sup>2</sup>;  $N_A$  – число Авогадро;  $\rho$  – плотность материала катода г/см<sup>2</sup>, для плотности тока 1 мА/см<sup>2</sup>, дает величину  $v = 1,285$  нм/с. Данное значение скорости распыления катода неприемлемо высоко, т.к. в этом случае происходит быстрое формирование ямок травления с глубиной 300 мкм. Указанное приводит к увеличению количества столкновений положительных ионов с атомами и молекулами, а следовательно, к уменьшению энергии, передаваемой ионами катоду, соответственно

снижению эмиссии электронов и изменению параметров заряженных частиц плазмы. Таким образом, ямки в катоде глубиной 300 мкм определяют длительность его непрерывной работы. С другой стороны, при ионной бомбардировке катода происходят активное поглощение им энергии, сопровождающееся увеличением его температуры до 100 0С. Поэтому число взаимодействий положительных ионов с атомами остаточного газа необходимо увеличивать, доводя значения  $L$  до  $L = (3 \div 5)\lambda_e$ . Оценка параметров процесса распыления по формулам (1) – (4) для случая  $L = (3 \div 5)\lambda_e$  дает следующие их значения:  $E_n = 137,1 \div 94,135$  эВ,  $\Delta T_{k\lambda e} = 137,034 \div 94,097$  эВ,  $Sk_{\lambda e} = 0,958 \div 0,658$  и  $v = 0,9941 \div 0,683$  нм/с. Очевидно, что ионы  $N_2^+$ , в рассматриваемом случае, не способны эффективно участвовать в механизме распыления поверхностных атомов катода. Однако, увеличивать  $L$  до значений, превышающих  $5\lambda_e$  нецелесообразно, т.к. увеличиваются размеры генератора.

Используя выражения (1) – (3), заменяя  $h+n\lambda_i$  на  $L$ , можно определить минимально возможную глубину полости катода:

$$L = 2c \operatorname{tg} \left[ \frac{\pi}{2} \left( 1 - \left[ \begin{array}{l} S_{k\lambda e} \varepsilon_b \frac{\pi^2 (m_i + M_k)^2}{3m_i M_k \alpha} \\ - E_{n-1} \left( 1 - \frac{4m_i M}{(m_i + M)^2} \right) \frac{1}{eU} \end{array} \right] \right) \right] - h \quad (5)$$

Для разряда в среде азота при  $U = 1200$  В,  $Sk_{\lambda e} = 0,658$  выражение (5) дает значение  $L = 0,513$  см, которое близко значению  $3\lambda_e = 0,6084$  см, вычисленному с помощью выражения  $\lambda = 1/(N\sigma)$  [12], где  $N$  – концентрация частиц в плазме;  $\sigma$  – эффективное сечение взаимодействия иона с частицами рабочего газа.

Используя приведенные выше данные о скорости распыления катода для значений величины  $L = 2\lambda_e$ ,  $L = (3 \div 5)\lambda_e$ , и глубине ямок травления (см. рис. 2 в), можно провести оценку времен формирования таких ямок:  $t_{2\lambda_e} = 65$  ч и  $t_{3\lambda_e, 5\lambda_e} = 84-122$  ч, соответственно.

Таким образом, длительность непрерывной работы катода определяется выбранными значениями величины  $L$ , ускоряющего напряжения и временем формирования указанных ранее ямок травления.

Для электроизоляции катодного узла от анода в противоположные полости, выполненные вдоль внешней поверхности катода и катодной изоляции, помещают по легкопрессовой посадке диэлектрический элемент конструкции генератора 5 (см. рис. 1), изготовленный из фторопласта марки Ф 4. Причем его толщина  $h$  (см. рис. 3) определяет расстояние между анодом и катодом, и по величине, всегда меньше темного астонового пространства тлеющего разряда.

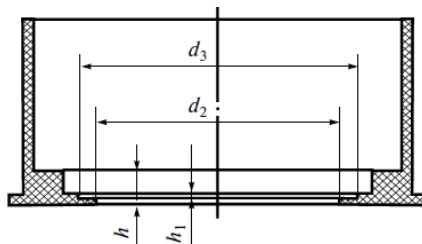


Рис.3. Схема конструкции изоляции между анодом и катодом

Необходимым условием генерации широкоапертурного потока низкотемпературной плазмы газовым разрядом за пределами анода является соосное расположение ячеек сеток анода и катода. Размеры ячеек определяются неравенством  $1 < d < 10$  мм, а расстояние между ними -  $0,1 < j < 5$  мм (см. рис.4). Несоосность ячеек сеток приводит к значительному уменьшению тока газоразрядной плазмы за счет рассеяния электронов и положительных ионов при их взаимодействии с материалами сеток. Аналогичное явление возникает и при изготовлении ячеек размером 1 мм и менее. Однако при  $d > 10$  мм создаются условия возникновения паразитной составляющей движения заряженных частиц в направлении стенок рабочей камеры, что приводит к размытию границ потока плазмы.

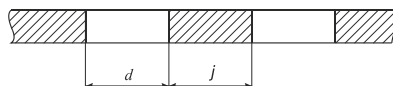


Рис. 4. Схема расположения ячеек на локальном участке сетки катода или анода

При  $j \leq 0,1$  мм с электроны и положительные ионы, взаимодействуя с сетками анода и катода, нагревают их до (900-1200) 0С. В этом случае эмиссионная способность сеток увеличивается и происходит электрический пробой в области анод-катод. В свою очередь, это приводит к выгоранию локального участка сеток и образованию потока плазмы, размером в 3-4 раза превосходящим размеры соседних микропотоков, формируемых ячейками сеток анода и катода. При изготовлении промежутков между ячейками сеток 5 мм и более наблюдается разъединение микропотоков плазмы, формируемых каждой ячейкой сетчатых электродов, что соответственно уменьшает равномерность распределения частиц плазмы по сечению общего потока с 98% до (50-78)%.

Распыленные атомы материалов катода и сеток адсорбируются на внутренней поверхности торца фторопластовой прокладки 5 (см. рис. 1), образуя проводящую пленку и нарушая изоляцию анода и катода. Короткое замыкание промежутка катод-анод в области этой пленки приводит к возникновению дугового разряда и разрушению конструкции фторопластовой прокладки. Для исключения условий возникновения данного типа пробоя в диэлектрическом элементе 5, разделяющем электроды, выполняют отверстие диаметром  $d_2 = 120$  мм (см. рис. 3) на 3-5 размеров ячеек сеток меньше величины  $d_0$  и изготавливают проточку диаметром  $d_3$  на 2 размера ячейки сетки больше величины  $d_2$  с толщиной  $h_1=1$ мм. Указанное позволяет значительно увеличить поверхность диэлектрика, разделяющего катод и анод, устранить возможность образования поверхностного пробоя в области электродов.

Подавая на электроды генератора ускоряющее напряжение от 0,3 до 6 кВ, в области ячеек сеток формируют искривление силовых линий электрического поля [7]. При соблюдении условия возникновения газового разряда  $\gamma Q \geq 1$  (где  $\gamma$  – число электронов, выбиваемых одним положительным ионом из катода,  $Q$  – число ионов, образуемых за счет ионизации атомов и молекул остаточного газа электронным ударом) вне электродов генератора возникают микропотоки газоразрядной плазмы [8] с плотностью тока до 10 мА/см<sup>2</sup>. Двигаясь по прямолинейным участкам силовых линий поля, электроны на длине свободного пробега успевают набрать энергию, достаточную для ионизации атомов

остаточного газа как в полости катода, так и за пределами анода. Это позволяет уменьшить рабочее давление, при котором осуществляется обработка пластин по сравнению с генератором с плоским катодом.

## Заключение

Проведенные экспериментальные исследования генератора внеэлектродной плазмы с полым катодом показали, что в течение трех лет при эксплуатации в режимах:  $U = 1200$  В,  $I_{л} = 0,1-1$  А катод заменялся в среднем через каждые  $t_{ср} = 120$  ч. Полученные результаты свидетельствуют об увеличении срока службы генератора в 2 раза, благодаря снижению температуры катода, что является целью настоящей работы.

Указанное подтверждает целесообразность применения разработанного генератора для формирования оптических микроструктур на широкоформатных пластинах.

Работа выполнена при поддержке грантов Президента Российской Федерации для поддержки молодых российских ученых - докторов наук (№ МД-5205.2016.9) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-07-00494 А).

## Литература

1. Соيفер В.А. Методы компьютерной оптики / Под ред. В.А. Соифера. М.: Физматлит, 2000.
2. Берлин Е.В., Двинин С.А., Сейдман Л.А. Вакуумная технология и оборудование для нанесения и травления тонких пленок. М.: Техносфера, 2007.
3. Орликовский А.А. // Микроэлектроника. 1999. Т.28. №5. С. 344-362.
4. Орликовский А.А. // Микроэлектроника. 1999. Т.28. №6. С. 415-426.
5. Oks E.M., Vizir A. V. Yushkov G. Y. // Review of Scientific Instruments. 1998. 69(2). pp. 853-855.
6. Казанский Н.Л., Колпаков В.А. // Микроэлектроника. 2003. №25. С. 112-117.
7. Казанский Н.Л., Колпаков В.А. Формирование оптического микрорельефа во внеэлектродной плазме высоковольтного газового разряда. М.: Радио и связь, 2009. 220с.
8. Казанский Н.Л., Колпаков В.А. // Компьютерная оптика. 2003. №25. С. 112-117.
9. 9. Ткачев А.Н., Яковленко С.И. // Труды института общей физики им. А.М. Прохорова. Т. 63. 2007. С.64-101.
10. Казанский Н.Л., Колпаков В.А. Формирование оптического микрорельефа во внеэлектродной плазме высоковольтного газового разряда. М.: Радио и связь, 2009. 220с.
11. Колпаков А.И., Расстегаев В.П. Деп в ВИНТИ 18.04.79, № 1381-79 Деп.
12. Кудрявцев А.А., Смирнов А.С., Цендин Л.Д. Физика тлеющего разряда: Учебное пособие. СПб.: Лань, 2010. 512с.
13. Гаврилов Н.В., Меньшиков А.И. ЖТФ. 2012. Т.82. В.3. С. 88-93.
14. Никоненко В.А. Математическое моделирование технологических процессов: моделирование в среде MathCAD / Под ред. Г.Д. Кузнецова. М: МИСиС, 2001.