

# УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ РАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ПО СЕЧЕНИЮ ПОТОКА ВНЕЭЛЕКТРОДНОЙ ПЛАЗМЫ

В.А. Колпаков, С.В. Кричевский, В.В. Графкин, М.А. Маркушин, И. В. Стариков, Д.С.Лукичев

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

Предложено устройство, позволяющее контролировать в режиме реального времени характер распределения отрицательных частиц по сечению потока низкотемпературной внеэлектродной плазмы, формируемой высоковольтным газовым разрядом. Анализ осуществляется на основе информации, получаемой пакетом из 51 металлических трубок, изогнутых под углом  $0 < \beta \leq 90^\circ$  и линейно расположенных по сечению потока плазмы. Трубки выполняются с внутренним  $D$  и внешним  $d_2$  диаметрами, выбираемыми из с условий  $d_1 < D < d_1 + 0,4L$ ,  $d_2 < d_1 + L$ , что позволило значительно снизить долю частиц плазмы, отраженных от торцевой поверхности трубок, где  $d_1$  – диаметр отверстий в пластине, формирующих микропотоки заряженных частиц, а  $L$  – расстояние между отверстиями. Определена оптимальная конструкция трубок, исключая эффект ионизации атомов остаточного газа в объеме их полостей. Практическое применение устройства для измерения плотности тока по сечению потока внеэлектродной плазмы позволило в едином цикле вакуумной откачки оценить равномерность распределения плотности отрицательно заряженных частиц плазмы, которая оказалась не хуже 98%. Даны рекомендации по корректировке режимов травления оптических микро- и наноструктур во внеэлектродной плазме.

## Введение

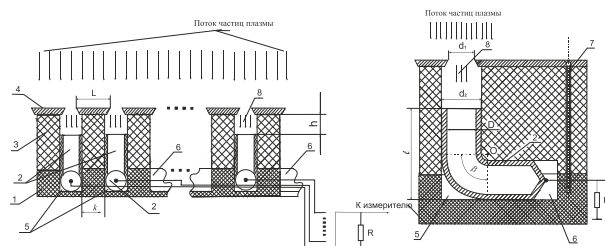
Современные технологии формирования оптических микро- и наноструктур широко используют низкотемпературную плазму [1-3] воспроизводимостью параметров которой оказывает определяющее влияние на качество указанных структур.

Внеэлектродная плазма, формируемая высоковольтным газовым разрядом, является перспективным инструментом для создания оптических микро- и наноструктур требуемого качества, т.к. позволяет путем варьирования расстояния между анодом генератора низкотемпературной плазмы и обрабатываемой поверхностью регулировать механизмы взаимодействия с ней: физическое распыление, ионно-химическое травление, плазмохимическое травление [4,5]. Величина энергии и плотность частиц плазмы, взаимодействующих с указанной поверхностью, оказывает значительное влияние на скорость травления поверхности с помощью отмеченных механизмов [6]. Причем если энергия отрицательно заряженных частиц плазмы определяется конфигурацией электродов: расстоянием анод-катод, размером ячейки сетки анода; напряжением на электродах, давлением в рабочей камере; и ее возможно оценить и выбрать предварительно [7], то плотность данных частиц, и особенно равномерность их распределения по сечению плазменного потока, могут существенно меняться при изменении расстояния анод-подложка, что требует соответствующего экспериментального исследования. Поэтому в настоящей работе поставлена задача контроля равномерности распределения частиц по сечению потока внеэлектродной плазмы с целью корректировки режимов травления оптических микро- и наноструктур в такой плазме для улучшения их качества. Для решения поставленной задачи предложено устройство контроля равномерности распределения плотности потока отрицательно заряженных частиц внеэлектродной плазмы. Работа данного устройства основана на использовании системы линейно расположенных коллекторов в виде изогнутых полостей,

позволяющих проводить измерение указанной характеристики в едином технологическом цикле.

## Методика проведения эксперимента

Схема конструкции устройства контроля равномерности распределения частиц по сечению потока внеэлектродной плазмы представлена на рис. 1 а, б.



**Рис. 1.** Схема конструкции устройства для измерения распределения плотности тока заряженных частиц внеэлектродной плазмы по сечению потока методом изогнутой полости: а – схема измерительного устройства; б – форма изгиба конструкции коллектора

Устройство состоит из диэлектрического основания 1 с линейно расположенными канавками 5, в которые вложены коллекторы 2 в виде трубок, для прокладки электропроводов от каждого коллектора к разъему типа СНО-59 служит паз 6. Электропровода припаиваются припоем ПОС-61 к каждой трубке и к соответствующим контактам электронного разъема.

Основание и корпус выполнены из фторопласта-4, напряжение пробоя которого равно 26 кВ/мм и обеспечивает хорошую изоляцию между коллекторами при толщине диэлектрика  $k = 0,5$  мм. Трубки коллекторов изготавливаются из меди МО (ГОСТ 859-41) и гальванически покрываются золотом толщиной 2 мкм, что увеличивает их проводимость и улучшает износостойкость трубок в химически активной плазме, например  $CF_4$ ,  $HCl$ ,  $SF_6$  и т.д. Фиксация трубок в канавках основания осуществляется посредством скрепления последнего с диэлектрическим корпусом 3 с помощью винтов 8. Кроме того, фиксация винтом позволяет осуществить строгое соосное расположение системы: калиброванного отверстия металлической пластины 4, коллектора 2 и канавки 5. В металлической пластине 4 выполнены отверстия диаметром  $d_1$ , служащие для получения калиброванных микропотоков плазмы 7. Металлическая пластина 4 изготавливается из нержавеющей стали 12Х18Н10Т толщиной 1 мм. Для устранения попадания частиц плазмы на внешнюю и торцевую поверхности трубок коллектора их внутренний диаметр  $D$  выбирают на 10% больше чем диаметр  $d_1$ . Именно диаметр калиброванных отверстий  $d_1$  определяет: величину измеряемого коллектором сигнала  $I_k$ , зависящего от плотности тока  $J$ , и, совместно с расстоянием между отверстиями  $L$ , количество точек измеренных одновременно. Поскольку диапазон токов в цепи разряда 10-200 мА [4], а минимальное значение тока измеряемого коллектором сигнала  $I_k = 0,079$  мкА, то численное значение диаметра  $d_1$ , определяемого выражением  $I_k = 0,25JLd_1^2$ , равно 1мм. Тогда, при указанном выше диапазоне тока разряда  $I$  численные значения величины  $I_k$  находятся в пределах 1-219,8 мкА.

Величина зазора между торцом трубки коллектора  $h$  и металлической пластиной 4 должна быть минимальна, ее значение зависит от потенциала электрического поля в данной точке

и диаметра  $d_1$ . Поскольку от данных параметров зависит провисание эквипотенциалей во внутреннюю полость трубки коллектора [8], то в зависимости от их значений происходит либо замыкание отрицательных ионов, движущихся строго по искривленным силовым линиям на внутреннюю поверхность трубки, либо замыкание на торцевую поверхность отверстия в диэлектрическом корпусе длиной  $h$ .

Потенциал на металлической пластине 4 определяется равенством [9]:

$$U = J\rho \zeta = 28 \cdot 75 \cdot 10^{-8} \cdot 10 = -0,210 \text{ мВ},$$

где  $J = I/\mu SK = 28 \text{ мА/см}^2$  – плотность тока,  $I = 200 \text{ мА}$  – ток разряда,  $\mu = 0.9$  – геометрическая прозрачность сетчатого анода,  $SK = 78,5 \text{ см}^2$  – площадь катода,  $\zeta = 10 \text{ см}$  – длина пластины,  $\rho = 75 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{см}$  – удельное сопротивление материала металлической пластины.

При рассчитанном потенциале и материале диэлектрического корпуса 3 толщина  $h$ , равная  $0.1 \text{ мм}$ , достаточно мала для исключения попадания ионов на диэлектрик и велика – для обеспечения необходимой механической и электрической прочности конструкции.

Количество и координаты точек, измеряемых устройством, зависят от минимального значения параметра  $L$  (рис.1,а), который находится из выражения

$$L = k + (d_2 - D) \quad (1).$$

Причем, внутренний  $D$  и внешний  $d_2$  диаметры изогнутой трубки должны изменяться в пределах

$d_1 < D < d_1 + 0,4L$ ,  $d_2 < d_1 + L$ , т.к. в противном случае либо металлические трубки электрически замыкаются друг с другом, либо происходит нарушение условия их соосного совмещения с микроотверстиями пластины. Кроме того, первое неравенство обеспечивает исключение эффекта отражения от торцевой поверхности трубок заряженных частиц плазмы и занижения результатов измерения. Таким образом, задаваясь параметром  $d_1$ , можно оценить величины  $D=1,1d_1=1,1 \text{ мм}$ ,  $d_2=1,5 \text{ мм}$  и  $L = 1 \text{ мм}$ , соответственно количество точек одновременно измеряемых пакетом, линейно расположенных, изогнутых трубок для потока плазмы, диаметром  $100 \text{ мм}$ , равно 51 точке.

С целью уменьшения числа рекомбинаций заряженных частиц калиброванных микропотоков плазмы с атомами и молекулами остаточного газа во внутреннем объеме полости изогнутой металлической трубки необходимо уменьшать его геометрические характерные размеры  $l$  и  $D$ , выбирая их значения из неравенств

$$\begin{aligned} D &\leq \lambda_e, \\ l &\leq \lambda_e, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\lambda_e$  – длина свободного пробега электрона, определяемая для наибольшего рабочего давления из выражения [4]:

$$\lambda_e = 4 \cdot 20,5 / N\sigma_e = 4 \cdot 20,5 \cdot kT / p\sigma_e. \quad (3)$$

где  $N$  - концентрация атомов и молекул рабочего газа,  $\sigma_e$  – эффективное сечение взаимодействия электрона с атомом рабочего газа,  $k$  – коэффициент Больцмана,  $T$  – температура газа в рабочей камере,  $p$  – давление в рабочей камере.

Подстановка в (3) значений соответствующих параметров для рабочего газа азота и давления в рабочей камере  $p = 20$  Па дает значение  $\lambda_e = 11.47$  мм. Следовательно, параметр  $l$  достаточно выбрать равным 10 мм.

Известно, что при бомбардировке поверхности твердого тела часть ускоренных отрицательных частиц переотражается, поэтому для их регистрации осуществляют изгиб трубок коллекторов под углом  $0 < \beta \leq 900$ , что приводит к увеличению актов взаимодействия со стенками полости. Нижний предел  $\beta = 0$  диапазона значений углов обусловлен тем, что в данном случае частицы, не сталкиваясь с внутренней поверхностью стенок трубки, будут встречать на своем пути атомы остаточного газа, и, взаимодействуя с ними, изменять число заряженных частиц, т.е. будет наблюдаться искажение результатов измерения. Превышение верхнего предела  $\beta > 900$  приведет к тому, что неоправданно усложнится конструкция крепления трубки. Изгиб трубки в заданном диапазоне приводит к тому, что частица перемещается, как по волноводу, и, в конечном итоге, поглощается поверхностью полости трубки. Для усиления процесса поглощения заряженных частиц плазмы изогнутой полостью ее конец выполняют в виде конуса под углом 450.

Выбор значения угла  $\beta$  за пределами указанного выше диапазона приводит к росту погрешности измеряемой величины за счет актов ионизации или рекомбинации. Например, при плотности тока  $J = 2,4$  мА/см<sup>2</sup> и длине пути заряженной частицы в полости трубки  $\chi \geq \lambda_e$  оценка погрешности за счет увеличения числа заряженных частиц в полости трубки по методике [10,11]:

$$\Delta J = J - J_{\text{вт}} = J(1 - \exp [-(\alpha - \alpha_p) \lambda_e]), \quad (4)$$

где,  $J_{\text{вт}} = J \exp [-(\alpha - \alpha_p) \lambda_e]$  – ионный ток за счет ионизации внутри трубки,  $\alpha \approx 1$  см<sup>-1</sup> - коэффициент ионизации,  $\alpha_p = 0,027$ - коэффициент прилипания; дает значение  $\Delta J = 0,81$  мА/см<sup>2</sup> что в относительных единицах составляет 33,75 %.

Поскольку процесс взаимодействия частиц плазмы с атомами остаточного газа в полости изогнутой части трубки коллектора должен быть исключен, ее максимальная длина выбирается равной  $2l$ , что упрощает процесс ее гибки на угол  $\beta$ . Оптимальное значение угла  $\beta$  определяется условием отсутствия столкновений электронов с атомами и молекулами остаточного газа внутри объема коллектора, т.е. при  $\beta < 900$  длина пробега электрона в полости трубки до изгиба увеличивается с величины  $l$  до  $\chi$ , однако ее значение должно удовлетворять условию (2), что в свою очередь накладывает связь между величинами  $D$  и  $\beta_{\text{оптим}}$ :

$$D = (\chi - 1) \operatorname{tg}(90 - \beta_{\text{оптим}}).$$

В процессе измерения отрицательно заряженные частицы плазмы попадают в полость изогнутой металлической трубки 2 (рис. 1, б) и взаимодействуя с ее поверхностью, создают ток, преобразуемый на сопротивлении нагрузки  $R$  в напряжение

пропорциональное количеству заряженных частиц. Далее информационный сигнал поступает на переключатель, выполненный на основе микросхемы AD75019JP и на блок регистрации.

Поскольку расстояние между изогнутыми коллекторами строго фиксированы, то номер измерения означает и его координату.

### Результаты эксперимента

Экспериментальные исследования равномерности распределения плотности тока заряженных частиц по сечению плазменного потока с помощью разработанного устройства представлены на рис. 2 (точки 1).

Зависимость, полученная при токе  $I = 20$  мА, напряжении на электродах  $U = 1000$  В, давлении в рабочей камере 20 Па и расстоянии от анода источника внеэлектродной плазмы до металлической пластины с калиброванными отверстиями 5 мм, показывает, что область равномерной плазмы  $\Delta x$  составляет 66 мм. При этом равномерность распределения частиц по сечению потока плазмы в диапазоне  $18 < x < 84$  мм не хуже 98%.

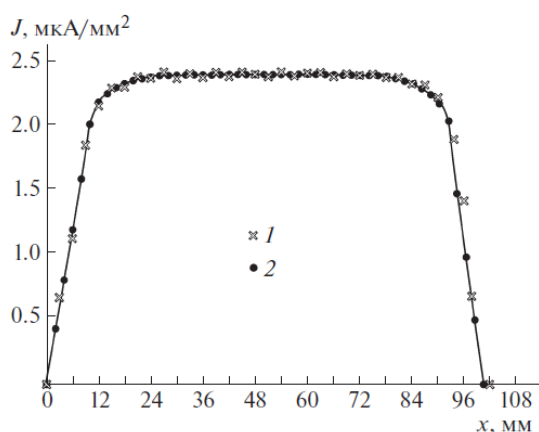


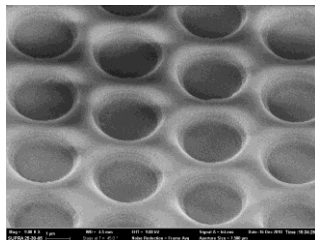
Рис. 2. Распределение плотности тока отрицательных частиц плазмы по сечению потока внеэлектродной плазмы

Достоверность проведенных измерений подтверждается аналогичными измерениями с помощью метода коллектора (точки 2) [12].

По результатам проведенных исследований распределения плотности тока отрицательных частиц по сечению потока внеэлектродной плазмы даны рекомендации для травления оптического микрорельефа. А именно, габаритные размеры обрабатываемой микроструктуры не должен превышать 66 мм, а расстояние от анода-сетки до поверхности подложки выбирается не более 5 см.

С учетом указанных рекомендаций проведены эксперименты по формированию микрорельефа на поверхности кремниевой пластины ориентации (100) с имеющейся на ней маской из резиста марки Shipley UV 210 толщиной 0,8 мкм. Эксперименты выполнялись на стандартной вакуумной установке УВН-2М-1, оснащенной генератором направленных потоков внеэлектродной плазмы и устройством контроля равномерности распределения частиц по сечению потока данной плазмы. Качество микрорельефа

контролировалось на растровом электронном микроскопе (РЭМ) Carl Zeiss Supra 25. Травление кремниевых образцов во внеэлектродной плазме осуществлялось в смеси газов  $CF_4$  и  $O_2$  в режимах: ток разряда  $I = 80$  мА, напряжение на электродах газоразрядного устройства  $U = 2000$  В, давление в вакуумной камере 25 Па, время травления  $t = 10$  мин. Полученный микрорельеф представлен на рисунке 5.



**Рис.3.** Изображение микрорельефа на поверхности кремниевой подложки, сформированного во внеэлектродной плазме

Анализ его изображения показал, что геометрия сформированного профиля повторяет геометрию исходного маскирующего слоя, высота микрорельефа составила 550 нм, шероховатость поверхности – не более 20 нм, т.е. полученный микрорельеф является оптическим.

## **Заключение**

Проведенные исследования равномерности распределения плотности заряженных частиц по сечению потока внеэлектродной плазмы показали возможность эффективного применения данной плазмы для формирования оптических микро- и наноструктур. Установлено, что увеличение тока разряда до значений 80-100 мА не приводит к уменьшению величины  $\Delta x$ , если корректировка тока осуществляется путем увеличения давления в рабочей камере, а расстояние анод-сетка обрабатываемая поверхность выбирается не более 5 см.

Таким образом, применение предлагаемого устройства позволяет увеличить быстродействие процесса контроля равномерности распределения плотности частиц по сечению потока внеэлектродной плазмы без вскрытия рабочей камеры вакуумной установки. Указанное дает возможность осуществлять оперативную корректировку режимов работы генератора низкотемпературной внеэлектродной плазмы.

## **Благодарности**

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. Salgaeva, U.O. Surface modification of optical materials with hydrogen plasma for fabrication of Bragg gratings / U.O. Salgaeva, A.B. Volyncev, S.B. Mendes // Applied Optics.- 2016. Vol. 55, No. 3.-P.485-490.
2. Казанский, Н.Л. Газоразрядные приборы, формирующие направленные потоки внеэлектродной плазмы. Ч.1. Анализ и конструктивные особенности приборов / Казанский Н.Л., Колпаков А.И.,

- Колпаков В.А., Кричевский С.В. // Научное приборостроение. – Санкт-Петербург, 2012. – Т.22. – № 1. – С. 13-18.
3. Казанский, Н.Л. Газоразрядные приборы, формирующие направленные потоки внеэлектродной плазмы. Ч. 2. Результаты модификации. Новые приборы./ Казанский Н.Л., Колпаков А.И., Колпаков В.А., Кричевский С.В., Подлинов В.В. // Научное приборостроение. – Санкт-Петербург, 2012. – Т.22. – № 2. – С. 44-50.
  4. Казанский, Н.Л. Формирование оптического микрорельефа во внеэлектродной плазме высоковольтного газового разряда / Н.Л. Казанский, В.А. Колпаков. – М.: Радио и связь, 2009. – 220 с.
  5. Казанский, Н.Л., Моделирование процесса очистки поверхности диэлектрических подложек в плазме газового разряда высоковольтного типа / Н.Л. Казанский, В.А. Колпаков, С.В. Кричевский // Компьютерная оптика. – 2005. – № 28. – С. 80-86.
  7. Казанский, Н.Л. Исследование особенностей процесса анизотропного травления диоксида кремния в плазме газового разряда высоковольтного типа / Н.Л. Казанский, А.И. Колпаков, В.А. Колпаков // Микроэлектроника. – 2004. – Т. 33. – № 3. – С. 218-233.
  9. Маркушин, М.А. Моделирование распределения электростатического поля в системе электродов устройства, формирующего высоковольтный газовый разряд / М.А. Маркушин, В.А. Колпаков, А.И. Колпаков, С.В. Кричевский // Журнал технической физики, 2015, том 85, вып. 3– С. 60-64.
  10. Браун, Я. Физика и технология источников ионов / Я. Браун, Р. Келлер, А. Холмс, Е. С. Машкова // Под ред. Я. Брауна. - М.: Мир, 1998.- 495 с.
  11. Колесов, С.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов: Учебник для вузов / С.Н. Колесов, И.С. Колесов. - М.: Высш. шк., 2007.- 535 с.
  12. Гречишников, В.М. Метрология и радиоизмерения: Учебное пособие. / В.М. Гречишников. - Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. -160 с.
  13. Чернетский, А.В. Введение в физику плазмы / А.В. Чернетский - М.: Атомиздат, 1969. - 303 с.
  14. Молоковский, С.И. Интенсивные электронные и ионные пучки / С.И. Молоковский, А.Д. Сушков М.: Энергоиздат, 1991. - 302 с.