



Разработка систем плазменной обработки изделий оптики и электроники

К. М. Моисеев, Д. Д. Васильев, И. В. Михайлова, И. А. Воробьев
ООО «Джиэнтех», Москва, Россия; МГТУ им. Баумана, Москва, Россия

Плазменная обработка активно применяется при изготовлении оптических компонентов в изделиях фотоники и микроэлектроники: очистки поверхности от загрязнений, уменьшения шероховатости поверхности, повышения поверхностной энергии и модификации поверхности. В статье представлена информация о линейке установок плазменной обработки MPC, разработанных компанией «Джиэнтех» совместно со специалистами МГТУ им. Н. Э. Баумана. Акцент сделан на инновационную разработку – установку с высокоточным двуполярным импульсным генератором низкой частоты, который обеспечивает повышенную концентрацию низкоэнергетических ионов и существенно меньшую температуру процесса для обработки перспективных изделий фотоники и микроэлектроники (полимерные линзы, волноводы), чувствительных к воздействию плазмы.

Ключевые слова: низкотемпературная импульсная плазма, технология изготовления оптических компонентов, плазменная обработка поверхности, очистка оптических элементов

Статья получена: 28.02.2022. Статья принята: 16.03.2022

Development of Plasma Processing Systems for Optics and Electronics Products

K. M. Moiseev, D. D. Vasilev, I. V. Mikhailova, I. A. Vorobev
GNtech LLC, Moscow, Russia; Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), Moscow, Russia

Plasma treatment is actively used in the manufacture of optical components for photonics and microelectronics products: cleaning the surface from contamination, reducing surface roughness, increasing surface energy and surface modification. The article provides information about the line of MPC plasma processing units developed by GN tech in collaboration with specialists from Moscow State Technical University named after N. E. Bauman. Emphasis is placed on an innovative development – a setup with a high-current bipolar low-frequency pulse generator, which provides an increased concentration of low-energy ions and a significantly lower process temperature for processing advanced photonics and microelectronics products (polymer lenses, waveguides) that are sensitive to plasma.

Keywords: low-temperature pulsed plasma, technology for manufacturing optical components, plasma surface treatment, cleaning of optical elements

Received on: 28.02.2022. Accepted on: 16.03.2022

ВВЕДЕНИЕ

Плазменная обработка применяется для промежуточной и финишной обработки оптических компонентов. Плазменный разряд в среде процессного газа избирательно воздействует на пики шероховатости поверхности, существенно уменьшая ее по сравнению с исходным значением [1]. Лежащие в основе плазменной обработки физические и химические механизмы позволяют не только удалить углерод-

содержащие загрязнения с поверхности оптических компонентов [2], но и остатки полировальных средств и других рабочих материалов [3]. Под воздействием ионов плазмы происходит модификация поверхности, из-за чего уменьшаются повреждения, вызванные лазерной обработкой [4], или изменяется поверхностная энергия, что приводит к улучшению адгезии последующих покрытий как на стеклянных оптических компонентах [5], так и на полимер-



ных материалах [6]. При правильно подобранном режиме обработки возможно удаление углеродсодержащих загрязнений без повреждения покрытия на поверхности оптики [7]. Плазменную обработку используют для очистки оптических элементов в установках экстремальной ультрафиолетовой литографии [8] и кварцевых окон в токамаках и других термоядерных энергетических установках [9]. Также плазменная обработка подходит для согласования показателя преломления поверхностей стеклянных изделий вследствие модификации химического состава приповерхностного слоя стекла за счет ионного воздействия [10].

Кроме того плазменная обработка применяется в полупроводниковом производстве (очистка подложки для нанесения технологических слоев проводника; травление заготовки в процессе изготовления микросхем, снятия фоторезиста с подложки) [11]; в медицине (активация поверхности скальпеля для нанесения антикоррозийного слоя металла; очистка катетеров и дыхательных масок) [12]; при производстве композитных материалов (увеличения поверхностной энергии и адгезионных свойств компонентов композита) [13] и других, где требуется удалить загрязнения с поверхности, сделать поверхность более активной, произвести травление микроструктур или модифицировать приповерхностный слой.

Операции предварительной подготовки поверхности являются обязательными практически в любом технологическом процессе производства изделий оптики, фотоники, микро- и нанoeлектроники и др. В настоящее время требуемая чистота поверхности достигается преимущественно двумя способами: жидкостной химической очисткой или плазменной обработкой. Преимуществом плазменной очистки над жидкостной является отсутствие продуктов реакции, которые зачастую токсичны и вредны для окружающей среды и здоровья человека.

Для плазменной обработки изделия помещаются в вакуумную камеру, производится откачка воздуха, затем подается требуемый процессный газ и зажигается газовый разряд. Плазменная обработка изделий происходит за счет физического взаимодействия ионов с поверхностью объекта обработки. От рода процессного газа, энергии ионов и их количества (плотности) зависит тип воздействия, длительность обработки и температура образца. Современные полупроводниковые, фотонные и квантовые микро- и наноструктуры предъявляют все более жесткие требования к температурному и энергетическому воздействию в процессе своего формирования, при этом эффективность обработки должна быть сохранена. Решением является использовать новые спо-

собы генерации газоразрядной плазмы, отвечающей данным требованиям, например применение низкотемпературной импульсной плазмы с высокой плотностью ионов низкой энергии.

ОБЗОР УСТАНОВОК ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

Установки плазменной обработки низкого давления в зависимости от области применения существенно отличаются друг от друга по типу и энергетическим параметрам газоразрядной плазмы, конфигурации камеры и внутрикамерного устройства, габаритам и стоимости. Для лабораторий и мелкосерийных производств наиболее подходящими являются установки плазменной очистки настольного формата, для поточного производства – напольные. Настольные и напольные установки плазменной обработки изготавливаются во многих странах мира. Ведущие страны по производству установок плазменной обработки: Германия, США, Великобритания, Италия. В Российской Федерации установки плазменной обработки настольного типа серийно не производятся.

Системы начального ценового сегмента имеют низкую степень автоматизации и ограниченный функционал. В них установлен минимально необходимый для контроля процесса набор датчиков, показания с которых выводятся на стрелочные шкалы или монохромные дисплеи. Подача газа и мощность тлеющего разряда регулируются оператором вручную с помощью рукояток или бегунков. Для таких установок характерна упрощенная конструкция дверцы вакуумной камеры без шарниров и направляющих, при которой дверца просто прикладывается к камере, что снижает вес, стоимость и габариты устройства, но снижает надежность. К недостаткам рассматриваемых систем плазменной обработки можно отнести невысокую точность ввода задаваемых параметров, и, как следствие, повышенные требования к оператору установки.

Установки верхнего ценового сегмента представляют собой компьютеризированные машины под управлением специальных программ. Эти системы имеют большее количество датчиков, и управляются с помощью сенсорных дисплеев или удаленно с персонального компьютера по кабелю или по беспроводным протоколам. Собственный микропроцессор автоматически контролирует параметры процесса очистки/травления, а встроенная память позволяет программировать и сохранять пользовательские режимы.

В подавляющем большинстве установок реализуются два типа газоразрядной плазмы – низко-



частотная (НЧ) и высокочастотная (ВЧ), которых в большинстве случаев достаточно для удовлетворения текущих задач. Однако для ряда полупроводниковых и квантовых перспективных изделий использование такого типа плазменной обработки недопустимо, поскольку приводит к выходу из строя активных компонентов: транзисторов, диодов, тиристоров и др., к перегреву или деградации изделий. Поэтому имеется необходимость поиска новых решений плазменной обработки без указанных выше недостатков, например импульсная плазменная обработка.

ЛИНЕЙКА УСТАНОВОК КОМПАНИИ «ДЖИЭНТЕХ»

Российская компания «Джиэнтех» разрабатывает линейку установок плазменной обработки как с базовыми характеристиками и функционалом, аналогичным зарубежным производителям, так и с новыми типами импульсных генераторов плазмы. В общем виде установка плазменной обработки представляет собой стеклянную или металлическую рабочую камеру с размерами от 5 до 20 литров, размещенную в компактном корпусе вместе с узлами генерации разряда, откачки и подачи процессных газов. Для управления установки оснащаются цветным сенсорным дисплеем, позволяют проводить процессы в ручном или полностью автоматическом режимах, создавать и сохранять до 50 рецептов обработки. Архитектура установок плазменной обработки построена по модульному принципу, что позволяет максимально гибко и быстро конфигурировать их под конкретные требования заказчика. Высокая доля компонентов отечественного производства обеспечивает меньшее время изготовления и более низкие цены (на ~30% ниже зарубежных аналогов). В линейке представлены установки настольного и напольного типов.

Установки настольного типа (рис. 1) предназначены для лабораторий, единичного или мелкосерийного производства и реализуют процессы травления, активации или очистки. Модели установок отличаются объемом и материалом камеры, типом разряда (ВЧ или НЧ) и мощностью генератора (табл. 1). Разработана модель установки с возможностью плазменной обработки образцов непосредственно в держателях просвечивающих элект-



Рис. 1. Установка MPC настольного типа

Fig. 1. Tabletop MPC Units

ронных микроскопов (ПЭМ) для их последующего исследования.

Плазменные установки напольного типа (рис. 2) предназначены для мелкосерийных, крупносерийных, массовых производств. Объем камеры и мощность генератора плазмы масштабируются под требования заказчика.

УСТАНОВКИ С СИЛЬНОТОЧНЫМ ДВУПОЛЯРНЫМ ИМПУЛЬСНЫМ ГЕНЕРАТОРОМ

Разрабатываемая в настоящее время линейка установок для обработки изделий с жесткими требованиями к температурному и энергетическому воздействию содержит в своей основе инновационный высокопроизводительный импульсный генераторный модуль регулируемой частоты, который определяет параметры газового разряда. Он позволяет создавать импульсную газоразрядную плазму с низкоэнергетичными (до 1 кэВ) ионами высокой плотности (до $1 \cdot 10^7 / \text{см}^3$). Модуль формирует высокопроизводительные импульсы высокой скважности для

Характеристики моделей установок настольного типа

Модель	MPC LF-12	MPC RF-12	MPC LF-5	MPC RF-5
Объем камеры	12 л	12 л	5 л	5 л
Размеры камеры, мм	200 × 200 × 300	∅225 × 300	130 × 130 × 290	∅150 × 290
Материал камеры	Нержавеющая сталь	Кварцевое стекло	Нержавеющая сталь	Кварцевое стекло
Тип сигнала	НЧ	ВЧ	НЧ	ВЧ
Частота генератора	40 кГц	13,56 МГц	40 кГц	13,56 МГц
Мощность генератора, Вт	200	200	100	50
Кол-во газов	2 (Ar, O ₂)	2 (Ar, O ₂)	1 (Ar)	1 (Ar)



Рис. 2.
Установка
MPC наполь-
ного типа
Fig. 2. Floor
standing MPC
installation

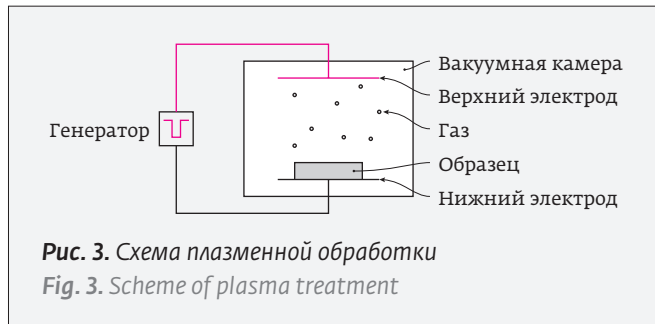


Рис. 3. Схема плазменной обработки
Fig. 3. Scheme of plasma treatment

рушения активных компонентов микро- и нанoeлектроники: транзисторов, диодов, тиристоров – и существенно снизить температуру обработки вплоть до 100 °C на образце и ниже.

Плазменная обработка реализуется в вакуумной камере, предварительно откачанной до определенного давления (рис. 3). В зависимости от требований в камеру подается инертный газ до определенного давления. Внутри камеры расположены электроды, подключенные к генератору. Образец, как правило, располагается на нижнем электроде (рис. 3).

При использовании стандартного генератора импульсов частотой в диапазоне от 40 до 100 кГц в момент импульса газ в вакуумной камере ионизируется, создаются ионы. Из-за длительного времени импульса ионы набирают довольно высокую энергию. В момент отсутствия импульсов ионы движутся к электродам, поэтому часть ионов взаимодействует с образцом, часть – с верхним электродом (рис. 4).

При использовании сильноточного двуполярного импульсного генератора низкой частоты (10 кГц) с подачей импульсов смещения на подложкодержатель в момент отсутствия импульсов генерации плазмы и подачи отрицательного импульса на верх-

генерации газового разряда. В момент отсутствия импульсов генерации газового разряда на электрод-держатель подается напряжение смещения для дополнительного воздействия ионов из плазмы на объекты. Благодаря этому удается избежать раз-

ПОСТАВЩИК КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ И ДРУГИХ ВИДОВ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

СПЕЦИАЛИЗИРУЕМСЯ НА ИЗДЕЛИЯХ ИЗ ТЕХНИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ:

Объемная керамика

Металлизованные платы

Керамические подложки

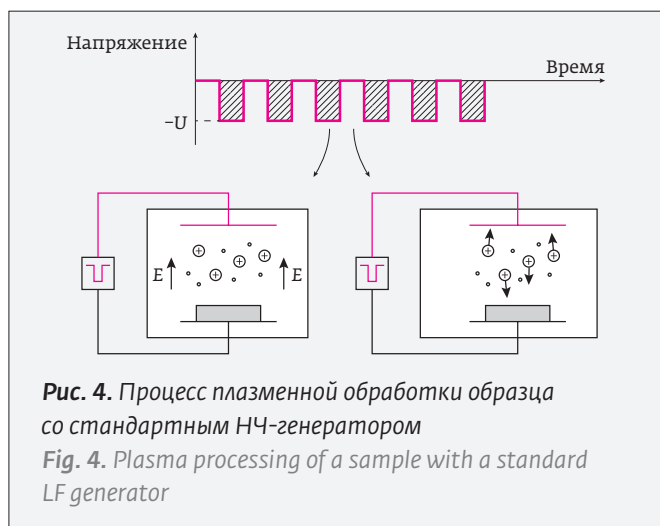
Пьезоэлектрические элементы и кристаллы

Разработка решений

ОБЕСПЕЧИВАЕМ:

- оперативный запуск производства
- соблюдение сроков
- российские технические условия
- выполнение сложных ТЗ
- конкурентные цены
- стабильное качество продукции

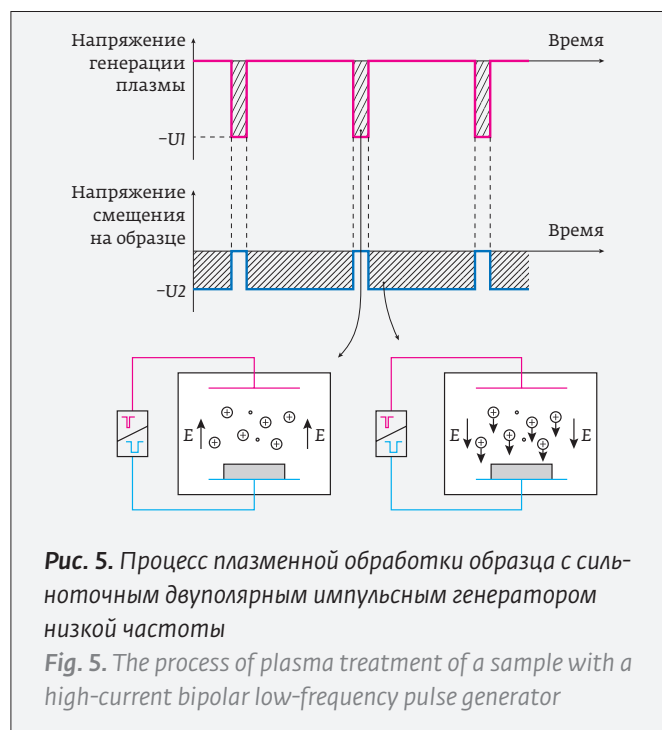
www.gnelectronics.ru



ний электрод процессный газ в вакуумной камере ионизируется, но из-за импульса высокой скважности плотность ионов (их количество) больше, чем при импульсах стандартного генератора той же мощности, а энергия ионов ниже. После импульса генерации плазмы следует импульс напряжения смещения на подложку, вследствие чего все ионы направляются в сторону образца и взаимодействуют с поверхностью (рис. 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование сильноточного двуполярного импульсного генератора низкой частоты в установ-



ках плазменной обработки изделий микроэлектроники позволит использовать все преимущества плазменной обработки и уменьшить негативное влияние на чувствительные структуры. Это позволит обрабатывать более широкий спектр изделий оптики, фотоники и микро- и нанoeлектроники.

Появление на рынке отечественных установок плазменной обработки как со стандартными НЧ- и ВЧ-, так и с импульсными генераторами не только решает задачу импортозамещения, но и способствует разработке и производству перспективных изделий. Установки разрабатываются и производятся компанией «Джиэнтех» и позволяют реализовывать полный спектр задач, характерных для данного класса оборудования. Высокая локализация компонентной базы позволяет снизить стоимость примерно на 30% по сравнению с зарубежными аналогами, а собственное производство и команда разработчиков обеспечивают короткие сроки производства и конфигурирование систем под требования заказчиков.

REFERENCES

1. Gerhard C. Applications of cold atmospheric pressure plasmas in optics manufacturing. *Seventh European Seminar on Precision Optics Manufacturing*. Teisnach, Germany: SPIE, 2020; 15.
2. Gerhard C., Bosch L. Plasma jet cleaning of optics: Cleaning of silver-coated mirrors by means of atmospheric pressure plasma jets. *Vakuum in Forschung und Praxis*. 2018; 30(3): 32–35.
3. Gorodetsky A. E. et al. Effect of Techniques for Polishing Molybdenum Mirrors on their Optical Stability under Cleaning D₂-N₂ Plasma. *J. Synch. Investig.* 2020; 14(5):1003–1015.
4. Gerhard C., Stappenbeck M. Impact of the Polishing Suspension Concentration on Laser Damage of Classically Manufactured and Plasma Post-Processed Zinc Crown Glass Surfaces. *Applied Sciences*. 2018; 8(9):1556.
5. Gerhard C. et al. Improving the Adhesiveness of Cemented Glass Components by DBD Plasma Pre-Treatment at Atmospheric Pressure // *Applied Sciences*. 2019. T. 9. № 24. С. 5511.
6. Mandolino C. et al. Functionalization of Neutral Polypropylene by Using Low Pressure Plasma Treatment: Effects on Surface Characteristics and Adhesion Properties. *Polymers*. 2019; 11(2): 202.
7. Li Y. et al. In situ plasma cleaning of large-aperture optical components in ICF. *Nucl. Fusion*. 2022.
8. Veldhoven J. van et al. Low-Energy Plasma Source for Clean Vacuum Environments: EUV Lithography and Optical Mirrors Cleaning. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2021; 49(10): 3132–3141.
9. Gorodetsky A. E. et al. Plasma Cleaning of KU-1 Optical Quartz from Aluminum Films. *J. Surf. Investig.* 2021; 15 (4): 660–670.
10. Gerhard C. Plasma-Induced Generation of Optically Active Defects in Glasses. *Materials Research Proceedings*. 2020; 16: 38–45
11. Marinov D. et al. Reactive plasma cleaning and restoration of transition metal dichalcogenide monolayers. *NPJ 2D Mater Appl.* 2021; 5(1): 17.
12. Fiebrandt M., Lackmann J.-W., Stapelmann K. From patent to product? 50 years of low-pressure plasma sterilization. *Plasma Process Polym.* 2018; 15(12): 1800139.
13. Yáñez-Pacios A., Martín-Martínez J. Comparative Adhesion, Ageing Resistance, and Surface Properties of Wood Plastic Composite Treated with Low Pressure Plasma and Atmospheric Pressure Plasma Jet. *Polymers*. 2018; 10(6): 643.

АВТОРЫ

Моисеев Константин Михайлович, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана
 ORCID: 0000-0002-8753-7737

Васильев Денис Дмитриевич, старший преподаватель МГТУ им. Н.Э. Баумана
 ORCID: 0000-0003-2147-4216

Воробьев Иван Александрович, генеральный директор ООО «Джиэнтех»,
 info@gnaxel.ru
 ORCID: 0000-0002-7441-5626

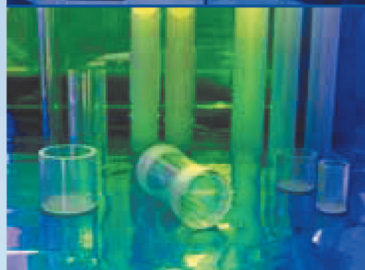
Михайлова Ирина Валерьевна, руководитель проектов ООО «Джиэнтех»,
 info@gnaxel.ru
 ORCID: 0000-0002-4558-261X

Синтетический САПФИР

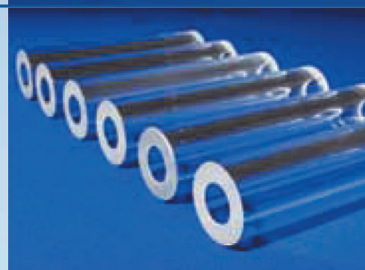
Производство кристаллов и оборудования



Пластины, окна, подложки:
смотровые, защитные, сканерные окна, часовые
стекла, экраны для смартфонов и мобильных
телефонов, оптические компоненты



Трубы и тигли
трубки и тигли различной длины и сечения
для ламп высокого давления, термореакторов,
установок плазменного травления



Стержни круглого и
прямоугольного сечения:
световоды для пирометров, плунжера для
хроматографических насосов и сиквенаторов,
изоляторы, износостойкие направляющие



Индивидуальный заказ:
Термореакторы, часовые и приборные камни,
подшипники, компоненты для научной и
медицинской техники, брекеты, сувенирная
продукция



Оборудование для выращивания
кристаллов

Nika-M60, Nika-M30, Nika-3, Nika-PROFILE



ЗАО «РОСТОКС-Н»

Since 1993

142432 Россия, Московская обл., г. Черноголовка, Проспект Академика Семенова, д. 9, ЗАО «Ростокс-Н»

Тел.: +7 496 527 35 91, +7 496 527 35 96, +7 496 527 35 95 • Факс: +7 496 52 7 36 03

E-mail: belov@ezan.ac.ru, info@rostox-n.ru • <http://www.rostox-n.ru>