ЛАБОРАТОРНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 621.793

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ И ИОННОЙ ОБРАБОТКИ ПОДЛОЖКИ В ВАКУУМЕ

© 2026 г. А. Д. Купцов*, С. В. Сидорова, А. М. Руденко, Г. А. Дьячков

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Россия, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5

**e-mail: alex-kouptsov@bmstu.ru*

Поступила в редакцию 01.12.2025 г.

После доработки19.02.2025 г.

Принята к публикации 05.03.2026 г.

Предложена система для повышения равномерности ионной обработки поверхности подложек и минимизации неоднородности толщины покрытий при магнетронном распылении. Апробирована система изменения угла падения ионов и позиционирования подложки, показывающая увеличение размеров зоны ионной обработки в 9 раз и повышение равномерности толщины при магнетронном распылении до 90%.

1. ВВЕДЕНИЕ

Тонкие пленки толщиной от десятков нанометров до микрометра имеют широкое применение в современной электронике [1, 2], оптике и фотонике [3, 4] и других областях промышленности [5, 6]. Они обладают уникальными свойствами, которые отличаются от свойств массивных материалов того же состава [7]. С учетом миниатюризации электронных компонентов изделия приобретают уникальные свойства благодаря проявлению размерных эффектов в тонкопленочных покрытиях, размеры которых имеют порядок 100 нм.

В микроэлектронике тонкие пленки используются для создания проводников, диэлектриков и полупроводниковых слоев в интегральных микросхемах [8]. В оптике и фотонике они служат основой для создания просветляющих покрытий, фильтров и волноводов. Без развития технологий тонких пленок многие современные достижения в области информационных технологий, связи и медицины были бы просто невозможны.

В эпоху цифровизации и стремительного развития информационных технологий особое внимание уделяется оптическим и фотонным технологиям, которые реализуются с помощью интегрально-оптических устройств. Их изготавливают с помощью тонкопленочных

технологий на планарной подложке – это ионная подготовка подложек и последующее формирование структур методом магнетронного осаждения.

Целью работы является разработка системы обработки подложки и формирования тонкопленочных слоев в вакууме с высокими показателями равномерности.

2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Модернизация и разработка новых конструкторских решений предполагается для вакуумной технологической камеры установки МВТУ-11-1МС (рис. 1), расположенной на кафедре “Электронные технологии в машиностроении” МГТУ им. Н.Э. Баумана [9].

Рис. 1. Внешний вид установки МВТУ-11-1МС

Система перемещения держателя подложки (рис. 2) предусматривает возможность его линейно-поступательного перемещения по вертикальной оси. Это позволяет изменять расстояние между источником ионов или магнетронным источником и подложкой. Кроме того, держатель подложки снабжен приводом, который перемещает подложку от одного источника к другому.

Рис. 2. Схема привода перемещения держателя подложки и поворота источника ионов

На верхнем фланце вакуумной камеры закреплен шаговый двигатель, передающий момент вращения на муфту через ввод вращения в объем вакуумной камеры. Линейный привод имеет рабочий ход штока до 60 мм. Это позволяет в едином вакуумном цикле изменять расстояние от источника ионов до подложки в диапазоне от 146 до 206 мм. Для контроля положения держателя подложки установлен оптический датчик расстояния. Точность перемещения обеспечивается за счет использования передачи винт–гайка внутри конструкции двигателя, которая уменьшает передаточное отношение поворота вала и его линейное перемещение. Этот привод установлен в герметичный металлический кожух. Механизм в сборе используется в вакуумной среде и совершает движение – вращение для позиционирования подложки над источником магнетрона или источником ионов. Вакуумная герметичность соединения поддерживается при использовании уплотнения Вильсона.

Разработанная конструкция для повышения эффективности обработки поверхности ионным источником основана на использовании системы его наклона. Автоматизация реализована на программируемом контроллере семейства Atmega2560. Датчик концевого положения и оптический датчик используются для определения нулевого положения, когда поток ионов перпендикулярен поверхности подложки. Это позволяет задавать угол наклона ионного столба в диапазоне до 15° с дискретностью угла до 5'. При этом увеличивается площадь обработки от 5 до 45 см^2, а равномерность скорости травления покрытий (90 %) повышает производительность процесса.

Элементы закреплены на алюминиевой раме, внешняя форма которой разработана с учетом топологической оптимизации для граничных условий: минимальная энергия деформации, симметричность относительно центральной оси, минимальная толщина стенки 5 мм. В качестве материала рамы выбран алюминий, обеспечивающий небольшую массы рамы (менее 2.3 кг) и достаточную жесткость (максимальное перемещение при нагрузке 50 Н составляет 0.68 мм). Позиционирование рамы происходит по плоскости дна вакуумной камеры и двум фланцам на ней. Привод вращательного движения передачи винт–гайка преобразует вращательное движение в линейно-поступательное, обеспечивая требуемый наклон ионного пучка. Основным структурным элементом является сильфон ISO 63 длиной 100 мм. Шаг винта и винтовой передачи составляет 2 мм, что является минимальным стандартным шагом для подобных кинематических систем. Это минимизирует погрешность позиционирования и обеспечивает контроль скорости перемещения и наклона ионного пучка.

Демонстрация эффективности и важности данной модификации оценивается с помощью процесса травления тонкопленочного медного покрытия толщиной 250 нм, результаты которого показаны на фотографиях (рис. 3). В едином вакуумном цикле ионным источником обработаны подложки ситалла с нанесенным медным слоем. Время обработки составляет 135 с. Расстояние от источника ионов до подложки составляет 146 мм (рис. 3а), 176 мм (рис. 3б) и 206 мм (рис. 3в). В данной конфигурации зоны травления имеют площади 677, 918 и 1310 мм^2 соответственно. Увеличение расстояния пропорционально увеличению размера зоны обработки, но расстояние 206 мм является максимальным от источника до подложки ввиду ограничения габаритов вакуумной камеры.

Рис. 3. Зона обработки источником ионов при фиксированном времени и расстоянии

Площадь обработки зависит от времени воздействия ионного пучка логарифмическим образом. Фиксированным параметром является расстояние, время обработки – изменяемый параметр. При расстоянии 146 мм достичь максимальную площадь травления 1310 мм^2 можно при обработке подложки в течение 27.5 ч, но увеличение расстояния до 206 мм обеспечит эту же величину площади в 12 раз быстрее.

Зависимость площади травления от расстояния линейная:

$$S = 2.65h - 224\,, \qquad (1)$$

где S [мм^2] – площадь травления, h [мм] – расстояние от источника ионов до подложки.

Такая зависимость характеризует способ равномерной обработки поверхности подложки: уменьшение расстояния увеличивает скорость осаждения при распылении, а увеличение расстояния повышает равномерность обработки при травлении покрытий и равномерность толщины при осаждении.

На рис. 4 представлена схема процесса повышения площади обработки поверхности подложки. Тестирование разработанной системы проводилось с помощью предварительного нанесения на подложку методом магнетронного распыления тонкой пленки меди, которая затем путем ионного травления удаляется с поверхности подложки. Центральная зона соответствует диаметру ионного столба (рис. 4а) при обработке в статическом для ионного источника режиме.

Рис. 4. Зона обработки источником ионов до (**а**) и после (**б**) модернизации

Добавление дополнительного перемещения источника ионов позволяет расширить зону травления (рис. 4б). Равномерность скорости травления источником ионов 92% достижима при соблюдении закона скоростей, который описывает поворот подложки на держателе и наклон источника ионов за счет движения каретки и передачи винт–гайка:

$$\omega = 0.147\, v, \qquad (2)$$

где ω [рад/с] – угловая скорость вращения подложки, v [мм/с] – линейная скорость движения каретки передачи винт–гайка.

На рис. 5 представлена подложка ситалла с медной тонкой пленкой после обработки источником ионов при комплексном движении держателя подложки. При расстоянии от источника ионов до подложки 176 мм и времени обработки 240 с данные параметры обеспечивают площадь обработки 1290 мм^2. Предварительная оценка производительности работы источника ионов в таком режиме показывает, что при неизменном времени работы модуля можно обрабатывать в 9 раз большую площадь, чем до модернизации.

Рис. 5. Поверхность травления подложки при комбинированном движении во время обработки источником ионов

Данная система позволяет расширить области применения технологического оборудования и повысить производительность процессов подготовки подложек и формирования тонкопленочных покрытий в вакууме.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами предложен вариант обработки подложки ионным источником и формирования тонкопленочных слоев в вакууме с высокими показателями равномерности по толщине и скорости травления, достигаемыми за счет движения ионного источника и держателя подложки соответственно.

Изменение расстояния от источника распыления до подложки без разгерметизации рабочей камеры повышает структурное совершенство покрытий, равномерность толщины и увеличивает производительность работы оборудования. Разработанный модуль наклона источника ионов увеличивает зону обработки от 677 до 1290 мм^2 при времени работы 450 с.

Изучение процесса распределения потока ионов по поверхности подложки демонстрирует схожий закон распределения ионов в сравнении с законом Кнудсена.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Демихов К.Е., Панфилов Ю.В., Никулин Н.К. и др.* Вакуумная техника: справочник. Москва: Машиностроение, 2009.
2. Handbook of Thin Film Technology. / Ed. by L. I. Maissel and R. Glang. New York: McGraw-Hill. 1970. [Технологии тонких пленок (справочник). / Пер. с анг. под ред. М.И. Елинсона, Г.Г. Смолко, Т. 2. Москва: Советское радио, 1977.]
3. *Di Zhu, Linbo Shao, Mengjie Yu et al.* // Adv. Opt. Photonics. 2021. V. 13. №. 2. P. 242. https://doi.org/10.1364/AOP.411024
4. *Heavens O.S.* Optical properties of thin solid films. New York: Dover Publications, 1991.
5. *Ohring M.* Materials science of thin films: deposition and structure. San Diego-New York-Boston-London-Sydney-Tokyo-Toronto: Academic press, 2002.
6. *Nix W.D.* // Metall. trans. A. 1989. V. 20. №. 11. P. 2217. https://doi.org/10.1007/BF02666659
7. *Acosta E.* Thin Films/Properties and Applications // Thin Films / Ed. by A. Ares. eBook. 2021. https://doi.org/10.5772/intechopen.95527
8. *Kouptsov A., Maltsev V., Sidorova S.* 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power, Moscow, 2024. https://doi.org/10.1109/REEPE60449.2024.10479846
9. *Sidorova S.V., Kouptsov A.D.* // 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power, Moscow, 2024. https://doi.org/10.1109/REEPE60449.2024.10479951

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Внешний вид установки МВТУ-11-1МС.

Рис. 2. Схема привода перемещения держателя подложки и поворота источника ионов: *1* – шаговый двигатель, *2* – муфта, *3* – ввод вращения, *4* – вакуумная камера, *5* – фланцевое соединение, *6* – линейный привод, *7* – корпус привода, *8* – уплотнение Вильсона, *9* – подложка, *10* – магнетрон, *11* – источник ионов, *12* – сильфон, *13* – передача винт–гайка, *14* – привод передачи винт–гайка.

Рис. 3. Зона обработки источником ионов при фиксированном времени и расстоянии от источника ионов до подложки 146 мм (**а**), 176 мм (**б**) и 206 мм (**в**).

Рис. 4. Зона обработки источником ионов до (**а**) и после (**б**) модернизации.

Рис. 5. Поверхность травления подложки при комбинированном движении во время обработки источником ионов.

Рис. 1.

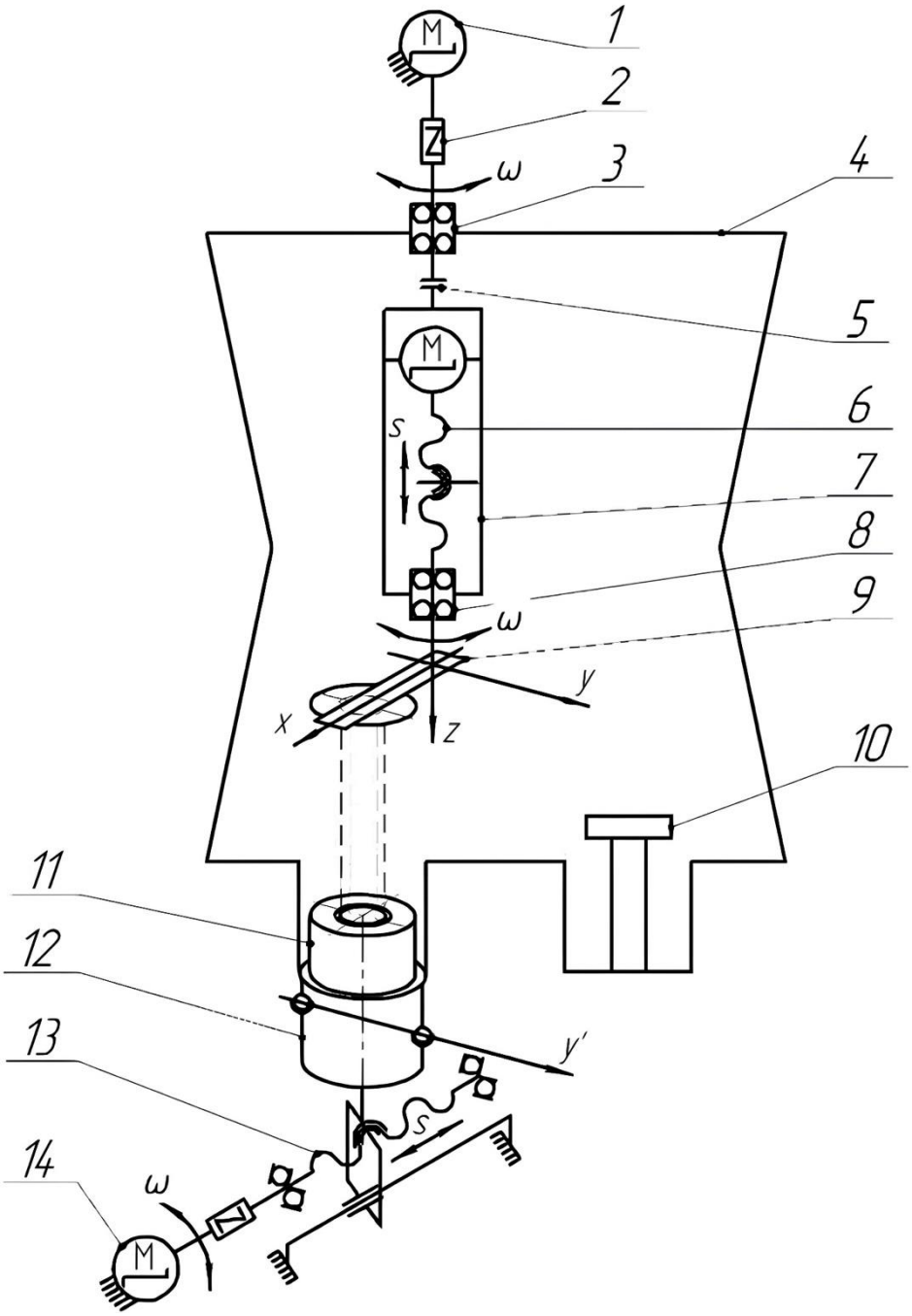

Рис. 2.

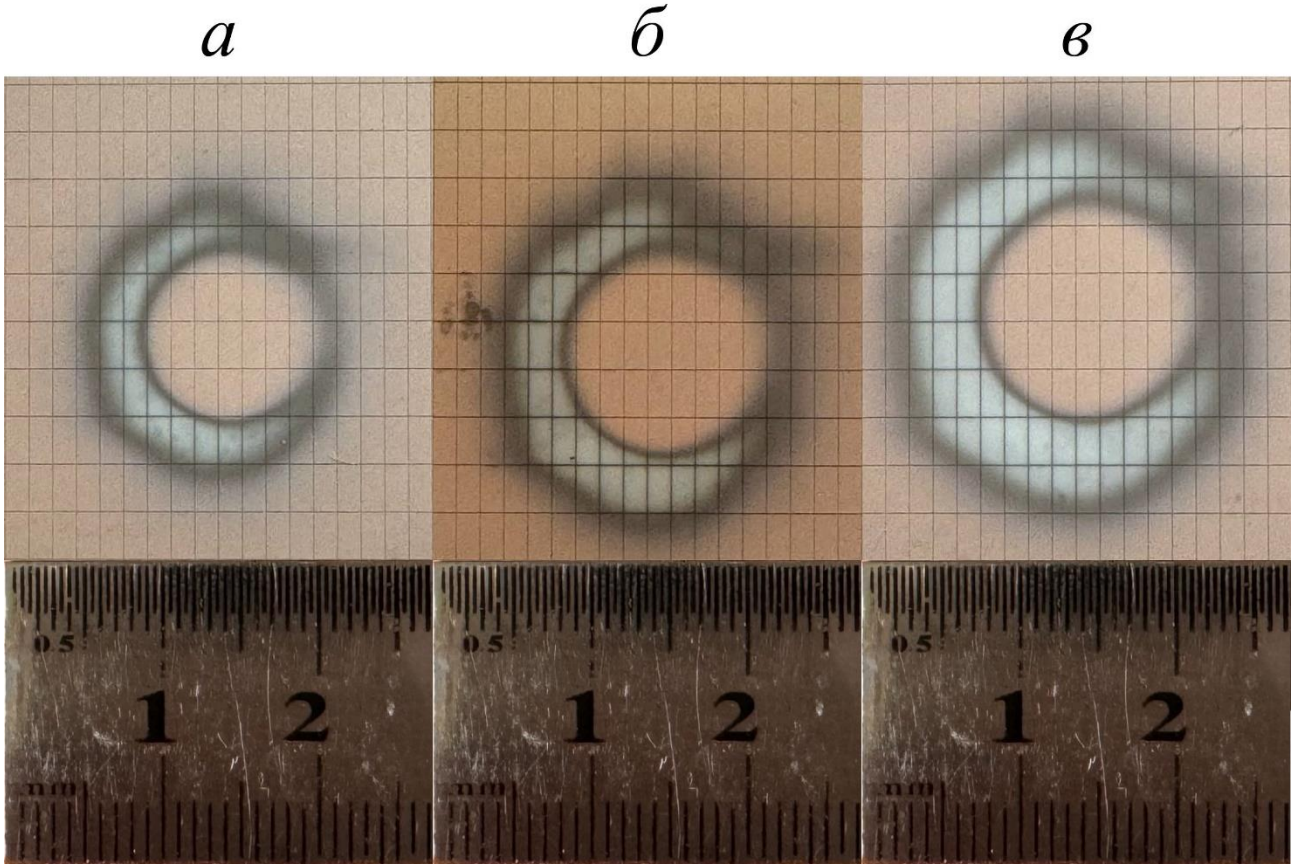

Рис. 3.

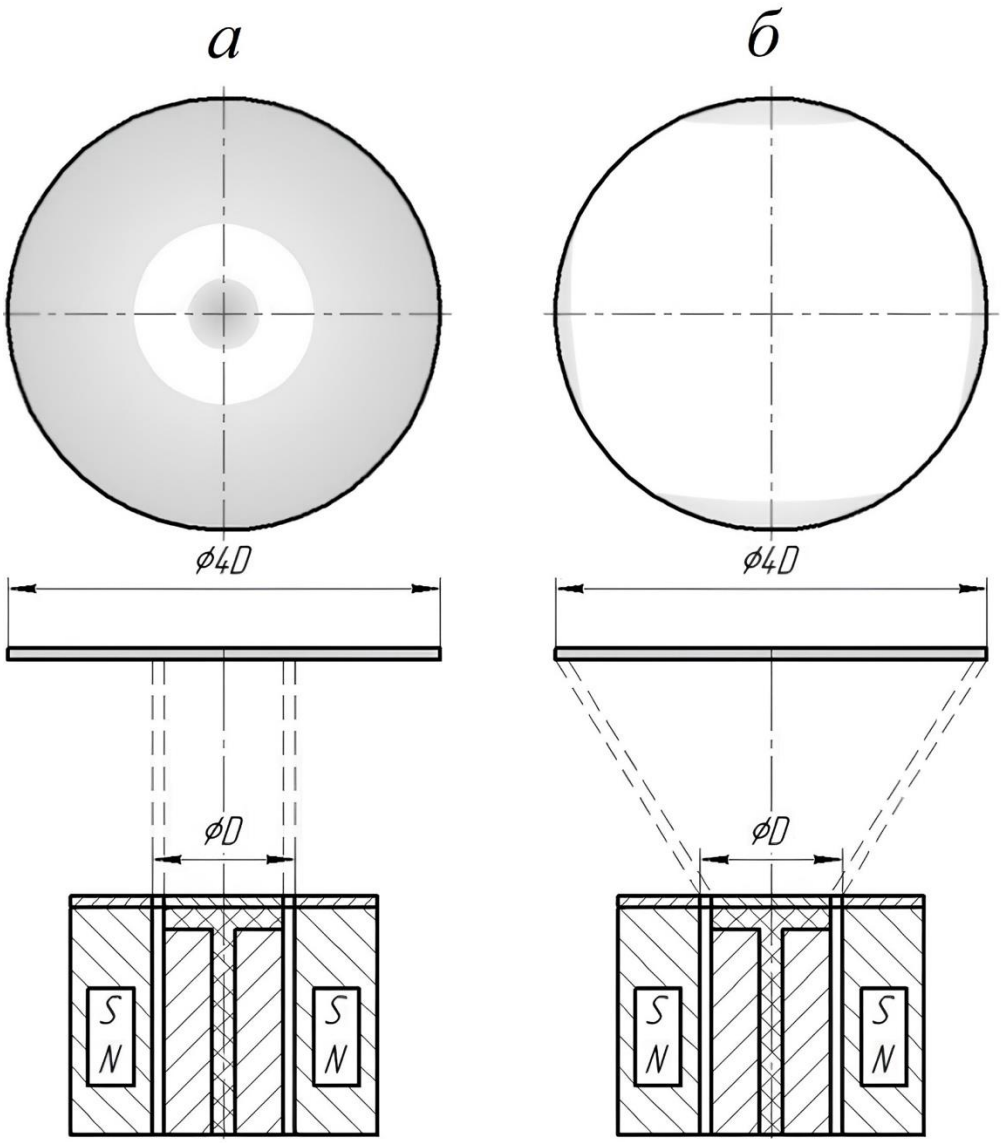

Рис. 4.

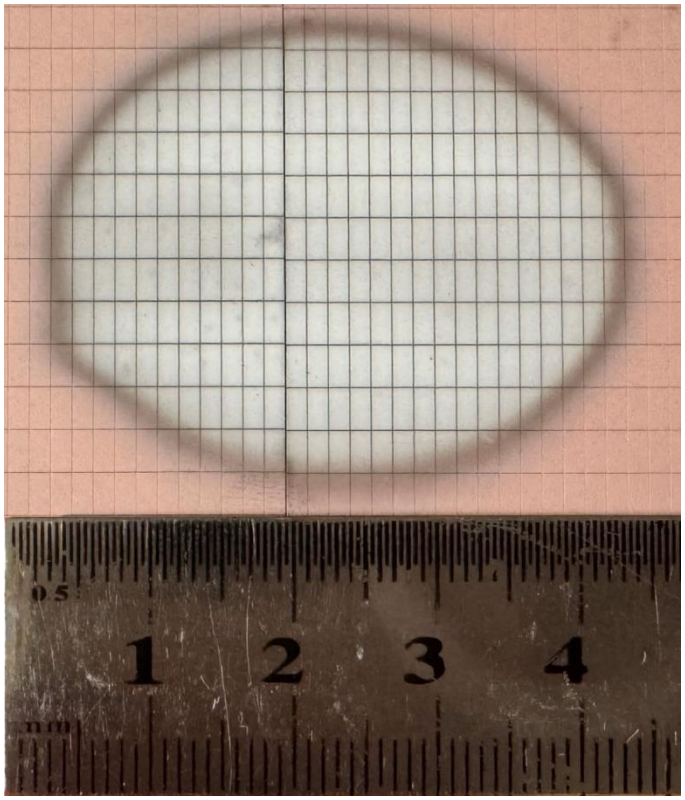

Рис. 5.