

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИОННО-КЛАСТЕРНОЙ ОБРАБОТКИ НА СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ОПТИЧЕСКОЙ СТЕКЛОКЕРАМИКИ МЕТОДОМ ФЛИККЕР-ШУМОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

ANALYSIS OF INFLUENCE OF CLUSTER-ION PROCESSING ON OPTICAL GLASS CERAMICS SURFACE CONDITION BY METHOD OF FLICKER-NOISE SPECTROSCOPY

А.Д. Бакун, А.С. Гусев, Н.И. Каргин, И.А. Матющенко, С.Ф. Тимашев
A.D. Bakun, A.S. Gusev, N.I. Kargin, I.A. Matiushchenko, S.F. Timashev

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Институт функциональной ядерной электроники,
115409, Каширское ш., 31, г. Москва, Россия, e-mail: matushenko.ilya@gmail.com*

A method of parameterization of supersmooth surfaces used in micro- and nanoelectronics as substrates and light-reflecting elements is proposed. The method is based on the flicker-noise spectroscopy (FNS) as the general phenomenological approach to extracting information from the chaotic temporal or spatial signals. The glass-ceramic samples were processed by cluster-ion beams and their topology was investigated by atomic force microscopy before and after treatment. It is established that gas cluster ion beams processing of glass ceramics leads to angstrom-level surface roughness.

В работе предложен метод параметризации особенностей нанорельефа сверхгладких поверхностей, используемых в микро- и нанoeлектронике в качестве материалов-подложек, а также в качестве светоотражательных элементов технических устройств. Метод основан на использовании фликкер-шумовой спектроскопии как общего феноменологического подхода к извлечению информации из хаотических временных или пространственных сигналов. Согласно ФШС, информация о текстуре поверхности содержится в корреляционных связях составляющих исследуемых сигналов в разных диапазонах пространственных частот – низкочастотных (резонансных) и высокочастотных, представляемых последовательностью нерегулярностей разных типов (всплески, скачки, разрывы производных) на всех уровнях пространственной иерархии структуры исследуемых систем. Состояние поверхности в методе ФШС описывалась двумя основными параметрами:

1. Параметр σ , нм, являющийся *мерой нерегулярностей-скачков* исследуемого профиля и характеризующий среднеквадратичное отклонение высот профиля от базового профиля, формируемого совокупностью низкочастотных резонансных составляющих хаотических зависимостей $h(x)$; этот параметр определяется как *фактор «ступенчатости» хаотической составляющей высот профиля*.

2. Параметр $S_c(L_0^{-1})$, $(\text{нм})^2\text{мкм}$, являющийся мерой «высокочастотных» нерегулярностей исследуемого профиля, наиболее резко изменяющихся на масштабах 1

– 100 нм особенностей рельефа; этот параметр определяется как *фактор «острийности» структуры поверхности*.

Возможности ФШС подхода в определении параметров «сверхгладких» поверхностей продемонстрированы при АСМ исследовании образцов из литиевого алюмосиликатного ситалла (СО-115М), которые предназначены для изготовления элементов прецизионной отражающей оптики. При этом следует отметить, что исследуемые подложки были предварительно подвергнуты механо-химической обработке, на финишной стадии которой использован абразив с размерами зерен $0.1 \div 0.4 \text{ мкм}$. Полированная поверхность такой стеклокерамики включает дефекты разного происхождения, характеризующиеся различными пространственными масштабами:

- следы механо-химического воздействия в виде анизотропных линейно структурированных дефектов, оставшиеся после абразивного полирования;
- уединенные выступы (впадины) при локальных нарушениях однородности;
- остаточный хаотический рельеф;
- «наночастицы», соответствующие выходу на поверхность кристаллитов β -эвкриптита $\text{LiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$.

Для удаления (сглаживания) перечисленных дефектов поверхности в работе применялся метод ионно-кластерной обработки. Использование пучков ускоренных кластерных ионов в качестве дополнения или замещения стандартной технологии химико-механической планаризации позволяет избавиться от основного ее недостатка – формирования остаточного рельефа с размахом высот порядка 1 нм. К достоинствам метода также следует отнести меньшую трудоемкость и хорошую совместимость с планарной технологией изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.

Обработка экспериментальных образцов осуществлялась с помощью установки «nAccel 100» (*Exogenesis*), в которой газовые кластеры образуются при адиабатическом расширении рабочего газа (аргона) в вакуум через сверхзвуковое сопло с диаметром критического сечения 50 мкм. Сформированные кластеры ионизировались электронным ударом и ускорялись разностью потенциалов 10 – 30 кВ. Затем пучок ускоренных кластерных ионов попадал в камеру образца, где происходило его взаимодействие с обрабатываемой поверхностью. Плотность тока в центре пучка при

ускоряющем напряжении 30 кВ составляла 2 мкА/см^2 , профиль распределения тока гауссов с полушириной около 12 мм. В ходе экспериментов давление остаточных газов в камере образца не превышало $4 \times 10^{-2} \text{ Па}$. Сепарация ионизированных частиц по массам не осуществлялась. Типичная схема установки для получения газовых кластерных ионов приведена на рисунке 1.

Отличительной особенностью применяемого ускорителя является возможность обработки поверхности пучком ускоренных нейтральных атомов. Для этого перед камерой образца располагается электростатический конденсатор, отклоняющий заряженные частицы, содержащиеся в пучке. На мишень попадает только пучок ускоренных нейтральных атомов, образовавшийся при частичном разрушении кластерных ионов в результате столкновений с молекулами остаточных газов. В этом случае отсутствие корреляции между ударами отдельных атомов исключает возбуждение ударных волн и образование «кратеров» на поверхности. Обработка стеклокерамики пучком ускоренных атомов привела в поставленных экспериментах к наилучшим результатам.

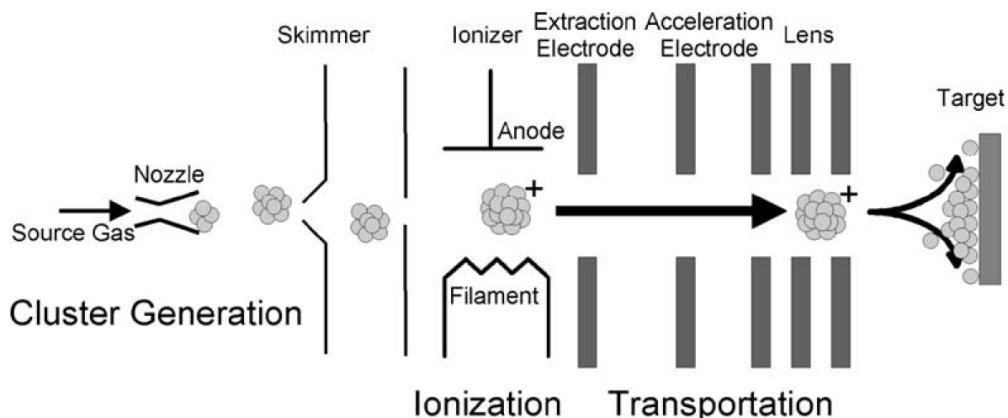


Рисунок 1 – Схема получения газовых кластерных ионов

В ходе выполнения исследования было установлено, что ионно-кластерная обработка при выбранных режимах воздействия, приводит, во-первых, к сглаживанию дефектов поверхности экспериментальных образцов, мерой которого может служить изменение ФШС параметров σ и $Sc(L_0^{-1})$, и, во-вторых, к «планаризации» поверхности, мерой которой являются величины среднеквадратичных отклонений указанных ФШС параметров.

Работа выполнена в рамках базовой части госзадания Министерства образования и науки РФ на 2017-2019 г., проект №16.7771.2017/БЧ.