

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ РИСУНКА ШАБЛОНА ПРИ ЭЛЕКТРОННО- И ИОННО-СТИМУЛИРОВАННОМ ОСАЖДЕНИИ ВОЛЬФРАМА

А.В. Котосонова, А.С. Коломийцев
Южный Федеральный Университет,
Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения,
ул. Шевченко 2, 347922 Таганрог, Ростовская обл., Россия,
alena.kotosonova@gmail.com, askolomiytsev@sfsedu.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований процессов формирования наноразмерных структур вольфрама методами электронно- и ионно-стимулированного осаждения. Сформированы массивы структур с заданными размерами от 10 до 250 нм. Установлено, что полученные размеры структур отличаются от заданных значений на величину от 10% до 400%. Показано, что точность переноса топологического рисунка при электронно-стимулированном осаждении в 2-5 раз выше, чем при ионно-стимулированном осаждении. Определено, что величина отклонения размеров структур от заданных при электронно-стимулированном осаждении практически постоянна и составляет примерно 45 нм, что позволяет при формировании структур от 50 до 300 нм производить соответствующую корректировку на этапе формирования растровых шаблонов, что позволит существенно снизить величину отклонения. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических процессов изготовления и проектировании конструкции приборов и структур наноэлектроники, микро- и наносистемной техники.

Ключевые слова: нанотехнологии; микроэлектроника; фокусированный ионный пучок; фокусированный электронный пучок; осаждение материалов из газовой фазы; точность; разрешающая способность.

STUDYING THE ACCURACY OF THE PATTERN TRANSFER DURING ELECTRON-AND ION-INDUCED DEPOSITION OF TUNGSTEN

Alena Kotosonova, Alexey Kolomiytsev
Southern Federal University, Institute of Nanotechnologies, Electronics and Equipment Engineering,
2 Shevchenko Str., 347922 Taganrog, Rostov Region, Russia,
alena.kotosonova@gmail.com, askolomiytsev@sfsedu.ru

The results of experimental studies of the formation of nanoscale tungsten structures by electron and ion-induced deposition are presented. The formation of structures by electron and ion-induced deposition was carried out using raster graphic patterns formed in the system control software and defining the trajectories of electron and ion beams. Experimental studies were performed using a Nova NanoLab 600 scanning electron-ion microscope equipped with a gas-injection system. Silicon SEP-4.5 was used as a substrate. In the course of research, W (CO) 6 gas was injected into the vacuum chamber through an injector, which under the action of a stream of accelerated particles decomposed into solid tungsten and volatile components. As a result of carrying out the process with an accelerating ion beam voltage of 30 keV, an ion beam current of 1 pA, an electron beam current of 33 pA, and a beam exposure time of 1 ms, arrays of structures with specified sizes from 10 to 250 nm are formed.

It is established that the obtained sizes of the structures differ from the given values by a value from 10% to 400%. It is shown that the transfer accuracy of the topological pattern in electron-induced deposition is 2-5 times higher than in ion-induced deposition.

It was determined that the deviation of the sizes of the structures from the ones specified in the electron-stimulated deposition is almost constant and amounts to approximately 45 nm, which allows, during the formation of structures from 50 to 300 nm, to make a corresponding adjustment at the stage of forming raster patterns, which will significantly reduce deviations.

The results obtained can be used in the development of technological processes of manufacturing and the design of the devices and structures of nanoelectronics, micro- and nanosystems technology.

Keywords: nanotechnology; microelectronics; focused ion beam; focused electron beam; chemical vapor deposition; accuracy; resolution.

Введение

Совершенствование современной электронной компонентной базы напрямую связано с развитием новых методов формирования микро- и наноразмерных структур. Наряду с традиционными процессами оптической и электронно-лучевой литографии, перспективными также являются методы локального формирования наноразмерных структур, основанные на применении фокусированных электронных (ФЭП) и ионных пучков (ФИП) [1]. Принцип формирования структур заключается в локальном разложении металлоорганических соединений, подаваемых в вакуумную камеру, под действием фокусированных электронных и ионных

пучков с энергией 5-30 кэВ. Как правило, для реализации ионно-стимулированного осаждения применяют пучок галлия с минимальным диаметром около 7 нм, что, с одной стороны, обеспечивает достаточно высокую скорость разложения газа, а, с другой, приводит к тому, что в составе осаждаемого материала будет содержаться некоторое количество примеси галлия [2]. При электронно-стимулированном осаждении скорость протекания процесса существенно ниже, однако, за счет меньшего диаметра пучка (от 1 нм) достигается более высокая разрешающая способность процесса, а также содержание посторонних примесей в осаждаемом материале будет минимальным.

Формирование структур методом электронно- и ионно-стимулированного осаждения осуществляется при помощи растровых графических шаблонов, формируемых в программе управления технологической установки и задающих траектории перемещения соответствующих пучков. Очевидно, что разрешающая способность процесса осаждения определяется типом пучка, его диаметром и типом газа-источника осаждаемого материала [3]. Учитывая, что процесс разложения газа на твердые и летучие компоненты под действием потока ускоренных частиц является достаточно сложным и многоступенчатым, то однозначная корреляция между диаметром пучка, разрешающей способностью и точностью переноса рисунка шаблона на подложку может не наблюдаться.

Целью данной работы является проведение экспериментальных исследований процессов формирования наноразмерных структур вольфрама методами электронно- и ионно-стимулированного осаждения и анализ точности переноса заданного топологического рисунка шаблона на подложку.

Методика эксперимента

Экспериментальные исследования проводились с использованием растрового электронно-ионного микроскопа Nova NanoLab 600 (FEI Company), оснащенного газовой-инжекционной системой. В качестве подложки был использован кремний КЭФ-4.5. В ходе исследований в вакуумную камеру через инжектор подавался газ $W(CO)_6$, который под действием потока ускоренных частиц разлагался на твердый вольфрам (осаждаемый на подложку) и летучие компоненты (удаляемые из камеры вакуумной системой).

В программе управления системой Nova NanoLab 600 были сформированы растровый шаблон, представляющий собой набор 15 квадратных структур с размерами в диапазоне от 10 до 250 нм. Высота структур определялась временем проведения процесса и подбиралась таким образом, чтобы для всех структур она составляла 50 ± 20 нм.

Как для электронного, так и для ионного пучка выбирались максимально возможные значения ускоряющего напряжения и минимально возможные значения тока пучка, что позволяет обеспечить наименьший диаметр пучка, и, соответственно, наилучшую разрешающую способность. Так, для ФИП выбранный ток пучка составил 1 пА, что при ускоряющем напряжении 30 кэВ обеспечивает минимальный диаметр пучка – 7 нм. Для ФЭП при минимальном допустимом значении тока, равном 7.5 пА, не удалось стабилизировать параметры пучка и добиться оптимальной фокусировки, поэтому было решено использовать следующее за ним значение тока ФЭП, равное 33 пА.

Время воздействия пучка в каждой точке (dwell time) выбиралось экспериментальным путем. Было установлено, что при значении dwell time, равном 1 мс, в случае использования как ионного, так и электронного пучка осаждение происходит равномерно с достаточно высокой скоростью и не конкурирует с ионно-стимулированным осаждением при использовании галлиевого ФИП.

Общее время проведения процесса определялось значениями выбранных технологических па-

раметров и составило для электронно-стимулированного осаждения – около 16 мин, для ионно-стимулированного осаждения – около 2 мин. После проведения процесса осаждения поверхность подложки со сформированными структурами исследовалась методом растровой электронной микроскопии. На рисунке 1 представлены РЭМ-изображения сформированных матриц при электронно- (а) и ионно-стимулированном (б) осаждении вольфрама.

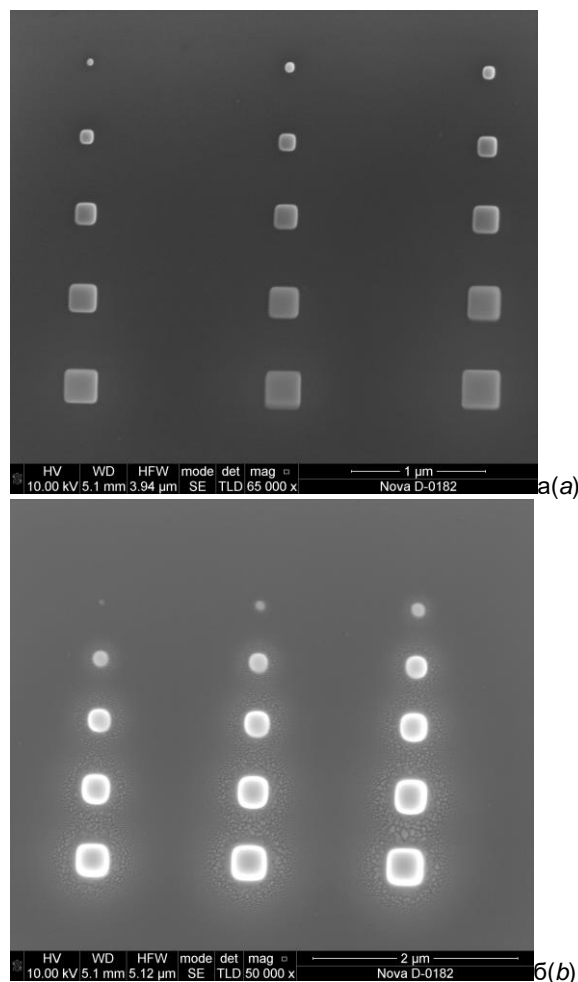


Рис. 1. РЭМ изображение массива структур: а – осаждение электронным пучком; б – осаждение ионным пучком

Fig. 1. SEM image of the array of structures: a - electron beam deposition; b - ion beam deposition

Для измерения латеральных геометрических размеров сформированных наноразмерных структур использовался программный пакет SYS Software Scandium (Olympus).

Результаты и их обсуждение

На основании результатов измерений были построены зависимости полученного и заданного размеров структур вольфрама для электронно- и ионно-стимулированного осаждения (рис. 2). На график также нанесена «теоретическая» зависимость, которая иллюстрирует 100% соответствие полученных и заданных размеров.

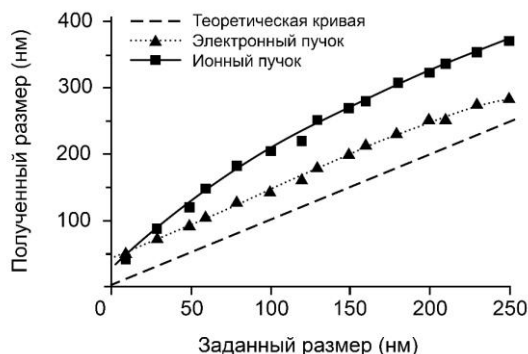


Рис. 2. Зависимости значений заданного и фактического размера структуры при осаждении электронным и ионным пучками

Fig. 2. Dependencies of the values of a given and the actual size of the structure during the deposition by electron and ion beams

Анализ полученных зависимостей показывает, что при осаждении как электронным, так и ионным пучком наблюдается превышение размеров сформированных структур относительно заданных шаблоном. Отмечается, что отклонение растёт с увеличением размера структуры. Применение ионного пучка приводит к значительно большему отклонению размеров структур от заданных, чем в случае применения электронного пучка. Также отмечено, что при осаждении электронным пучком отклонение размера во всем диапазоне параметров эксперимента носит аддитивный характер и в среднем составляет 45 нм.

Для более точной оценки возникающего отклонения размеров был введен параметр δ , определяющий отклонение значения полученного размера от заданного в процентах:

$$\delta = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100\% ,$$

где δ – отклонение, l_0 – заданный размер структуры, l – полученный размер структуры.

На рисунке 3 представлена зависимость отклонения от заданного размера при осаждении электронным и ионным пучком.

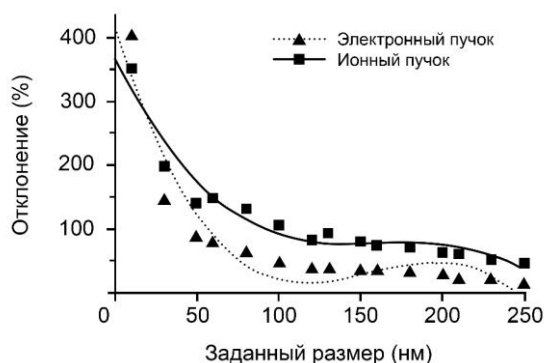


Рис. 3. Зависимости значений отклонения размера структуры при осаждении электронным и ионным пучками

Fig. 3. The dependence of the values of the deviation of the structure size during the deposition of electron and ion beams

Анализ полученной зависимости показывает, что для структур размером менее 40 нм при осаждении электронным пучком и менее 100 нм при осаждении ионным пучком отклонение составляет более 100%. Ошибка также присутствует и при формировании структур наибольшего размера в выбранном диапазоне (250 нм). Так, отклонение для электронно-стимулированного осаждения составляет около 10%, для ионно-стимулированного осаждения - 50%.

Заключение

В работе проведены экспериментальные исследования процессов формирования наноразмерных структур вольфрама методами электронно- и ионно-стимулированного осаждения. Сформированы массивы структур с заданными размерами от 10 до 250 нм.

Установлено, что полученные размеры структур отличаются от заданных значений на величину от 10% до 400%. Показано, что точность переноса топологического рисунка при электронно-стимулированном осаждении в 2-5 раз выше, чем при ионно-стимулированном осаждении.

Определено, что величина отклонения размеров структур от заданных при электронно-стимулированном осаждении практически постоянна и составляет примерно 45 нм, что позволяет при формировании структур от 50 до 300 нм производить соответствующую корректировку на этапе формирования растровых шаблонов, что позволит существенно снизить величину отклонения.

Благодарности

Результаты были получены с использованием оборудования Научно-образовательного центра «Нанотехнологии» Южного Федерального Университета. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №18-79-00175).

Библиографические ссылки / References

- 1 Utke Ivo, Hoffmann Patrik, Melngailis John Gas-assisted focused electron beam and ion beam processing and fabrication. *Journal of Vacuum Science & Technology B* 2008; 26: 1197-1276.
- 2 Ageev O.A., Kolomytsev A.S., Bykov A.V., Smirnov V.A., Kots I.N. Fabrication of advanced probes for atomic force microscopy using focused ion beam. *Microelectronics Reliability* 2015; (55): 2131-2134.
- 3 Ageev O.A., Vnukova A.V., Gromov A.L., I'in O.I., Kolomytsev A.S., Konoplev B.G., Lisitsyn S.A. Analysis of modes nanoscale profiling during ion-stimulated deposition of W and Pt using the method of focused ion beams *Nanotechnologies in Russia* 2014; 9: 145-150.