

Ю.В. Петров

Санкт-Петербургский государственный университет, Междисциплинарный Ресурсный Центр
по направлению «нанотехнологии», Санкт-Петербург, Россия

СКАНИРУЮЩИЙ ИОННЫЙ ГЕЛИЕВЫЙ МИКРОСКОП



Описан опыт использования сканирующего гелиевого микроскопа ORION (Carl Zeiss) в исследованиях, проводимых в Междисциплинарном Ресурсном Центре по направлению «нанотехнологии» (Санкт-Петербург, Россия). Затронуты вопросы о формировании и стабильности гелиевого одноатомного источника, о процессах взаимодействия ионов гелия с исследуемым веществом; описаны возможности применения ионной гелиевой микроскопии и литографии.

Ключевые слова: сканирующий ионный гелиевый микроскоп, одноатомный источник, пространственное разрешение.

К настоящему времени растровые электронные и ионные микроскопы получили широкое распространение и используются как в целях диагностики исследуемых объектов, так и для получения заданных структур различными методами (электронной или ионной литографии, ионного травления и др.). При этом ионные микроскопы, которые, как правило, используют жидкометаллические источники, заметно уступают электронным в пространственном разрешении. Не так давно, в 2007 году, был выпущен в коммерческую реализацию первый сканирующий ионный микроскоп производства Carl Zeiss ORION, использующий в качестве зонда ионы гелия. Его заявленное разрешение лучше, чем у электронных.

В гелиевом микроскопе используется явление автоионизации газа на острие, основные принципы которого описаны в классической работе *Мюллера* [1]. Источником ионов служит вольфрамовое острие, аналогичное применяемому в электронных микроскопах с автоэмиссионным катодом. В отличие от автоэмиссионного катода электронных микроскопов это ос-

трие проходит стадию дополнительного формирования (термополевого испарения [1]), с помощью которой формируется пирамидальный нанокристалл с тремя атомами на вершине. Пучки от двух атомов обрезаются диафрагмой, и таким образом только один атом вольфрама используется в качестве рабочего источника ионов (рис. 1).

Основные параметры одноатомного газового автоионного источника подробно описаны в работах [2–5]. К ним относятся помимо рекордно малого размера источника (~0,25 нм) также высокая яркость и высокая степень монохроматичности пучка (менее 0,5 эВ). Другим свойством источника такого типа является его нестабильность. В силу атомарного масштаба на первый план выходят эффекты, связанные с адсорбцией/десорбцией и миграцией атомов по поверхности. Для достижения высокой степени ионизации, которая определяет ток ионного пучка, а также для сохранения формы источника необходимо поддержание острия в сильном электрическом поле при температуре ниже 100 К. В таких условиях время жизни источника может составлять от нескольких дней до нескольких недель.

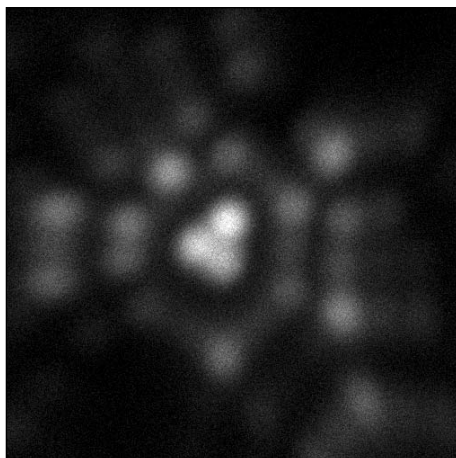


Рис. 1. Автоионное изображение эмитирующего источника с тремя атомами вольфрама на вершине

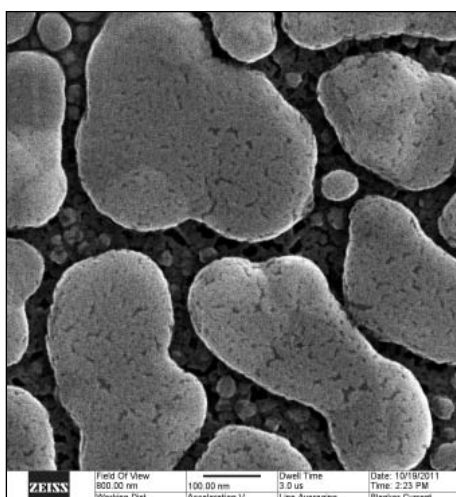


Рис. 2. Частицы золота, покрытые полимерной пленкой

Регулировка ионного тока осуществляется как вариацией давления газообразного гелия, так и изменением параметров оптической системы (размер диафрагмы, положение кроссовера пучка). Благодаря тому, что ток автоионизации пропорционален при прочих равных условиях только давлению газа вблизи острия [1], изменение тока давлением гелия не требует перенастройки оптической системы.

Как было теоретически показано в работе [6], размер зондирующего пятна, равный 0,25 нм,

может быть достигнут в гелиевом микроскопе с использованием конструктивно несложных электростатических линз. Вместе с тем, как и в электронных микроскопах, конечное пространственное разрешение изображения определяется латеральными размерами области взаимодействия ионов с исследуемым объектом. В настоящий момент существует две коммерчески доступных версии прибора с паспортным разрешением 0,75 и 0,35 нм.

С точки зрения микроскопии интерес представляют особенности возбуждения вторичных электронов гелиевым пучком. Величина квантового выхода вторичных электронов в гелиевом микроскопе растет с увеличением энергии и может достигать 8 в зависимости от материала мишени. Как было отмечено в работах [7, 8], зависимость выхода вторичных электронов от угла падения пучка, определяющая топографический контраст, больше от материала мишени и энергии ионов, чем при возбуждении электронами, что необходимо учитывать при проведении количественных измерений.

Одной из важных характеристик процесса взаимодействия ионов с веществом является энергетическое распределение вторичных электронов. В прошедшем году нами было показано [9], что при ионном возбуждении можно ожидать заметного уменьшения энергии вторичных электронов по сравнению с электронным возбуждением. Основная доля вторичных электронов обладает энергией менее 2 эВ. Особенностью возбуждения ионами гелия является возможность потенциальной эмиссии — эмиссии, вызванной нейтрализацией ионов, одновременно с кинетической.

Одним из возможных применений гелиевого пучка помимо микроскопии является литография. Предельное разрешение литографии, полученное в гелиевом микроскопе, составляет 6 нм [10], что существенно лучше предельных параметров для электронной литографии (рис. 2).

Таким образом, сканирующий ионный гелиевый микроскоп обладает рядом особенностей,

отличающих его от электронных микроскопов, и позволяет получить субнанометровое разрешение микроскопии, а также высокое разрешение ионной литографии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мюллер Э.Б. Автоионизация и автоионная микроскопия // УФН. — 1962. — Т. LXXVII. — Вып. 3. — С. 481.
2. Tondare. V.N. Quest for high brightness, monochromatic noble gas ion sources // J. Vac. Sci. Technol. A. — 2005. — V. 23. — № 6. — P. 1498.
3. Notte J., Hill R., McVey S. et al. An Introduction to Helium ion microscopy // Microsc. Microanal. — 2006. — V. 12. — P.126.
4. Ward B.W., Notte J.A. Economou N.P. Helium ion microscope: A new tool for nanoscale microscopy and metrology // J. Vac. Sci. Technol. B. — 2006. — V. 24, № 6. — P. 2871.
5. Morgan J., Notte J., Hill R., Ward B. An Introduction to the helium ion microscope // Microsc. Today. — 2006. — V. 14. — № 4. — P. 24.
6. Kalbitzer S. and Zhukov V. Resolution of the Scanning Helium Microscope // Op. Appl. Phys. J. — 2008. — V.1. — P. 4.
7. Ramachandra R., Griffin B., Joy D. A model of secondary electron imaging in the helium ion scanning microscope // Ultramicrosc. — 2009. — V. 109. — P. 748.
8. Inai K., Ohya K. Ishitani T. Simulation study on image contrast and spatial resolution in helium ion microscope // J. Elect. Microsc. — 2007. — V. 56, № 5. — P. 163.
9. Vyvchenko O.F., Petrov Yu.V. Secondary electrons energy distribution and energy selective imaging in helium ion microscope. Advancements in Helium Ion Microscopy // SPIE

- Defence, Security and Sensing, 25–29 April 2011, Orlando, USA, p. 277, Proceedings of SPIE, Vol. 8036 80360O-1.
10. Sidorkin V., van Veldhoven E., van der Drift E. et al. Sub-10-nm nanolithography with a scanning helium beam // J. Vac. Sci. Technol. B. — 2009. — V. 27, № 4. — P. L18.

Ю.В. Петров

СКАНУЮЧИЙ ІОННИЙ ГЕЛІЄВИЙ МІКРОСКОП

Описано досвід використання скануючого гелієвого мікроскопа ORION (Carl Zeiss) в дослідженнях, що проводяться в Міждисциплінарному Ресурсному Центрі за напрямком «нанотехнології» (С-Петербург, Росія). порушені питання про формування та стабільність гелієвого одноатомного джерела, про процеси взаємодії іонів гелію з досліджуваною речовиною; описані можливості застосування іонної гелієвої мікроскопії та літографії.

Ключові слова: скануючий іонний гелієвий мікроскоп, одноатомне джерело, просторова розподільна здатність.

Yu.V. Petrov

SCANNING HELIUM ION MICROSCOPE

This article describes the experience of using helium microscope ORION (Carl Zeiss) at the Interdisciplinary Resource Center of «Nanotechnology» (St.Petersburg, Russia). Author discusses the formation and stability of helium single atom source, the processes of interaction of helium ions with the investigated substance, describes the possibility of applying helium ion microscopy and lithography.

Key words: helium ion microscope, single atom source, high resolution.

Стаття надійшла до редакції 04.01.12