

06;11

## О генерации заряженных наночастиц в острийных источниках ионов

© И.С. Гасанов, И.И. Гурбанов

Институт физики НАН Азербайджана, Баку  
E-mail: ilkhamg@mail.ru

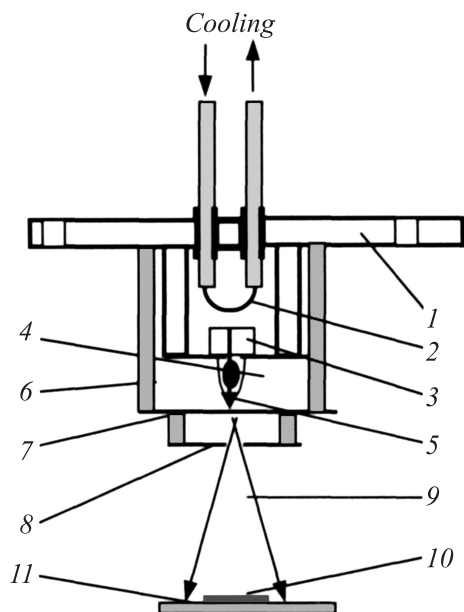
Поступило в Редакцию 22 октября 2007 г.

Изучались условия формирования дисперсной фазы острийного источника ионов индия и олова. Генерация заряженных капелек происходит пороговым образом при определенном токе пучка, одновременно с этим возбуждаются колебания ионного тока с частотой 15–20 МГц в результате капиллярной неустойчивости поверхности проводящей жидкости в сильном электрическом поле. Размеры наночастиц, определенные с помощью электронного микроскопа, составляют сплошной спектр от 2 до 20 нм, их средний удельный заряд равен  $5 \cdot 10^4$  С/кг. Посредством этих нанокпель возможно создание различных поверхностных квантовых структур. Обсуждаются возможности получения наночастиц полупроводниковых материалов в модификации источника с пористым электродом.

PACS: 29.25.Ni, 52.25.Tx, 81.16.Rf

Общепринятым методом получения наночастиц в настоящее время является метод плазменной абляции, заключающийся в быстром испарении материала под действием мощного лазерного облучения и последующей конденсации частиц в результате охлаждения плазмы при ее продуве инертным газом [1]. В жидкометаллических (острийных) источниках ионов происходит также эмиссия дисперсной фазы, которая переносит малую долю заряда и до 90% массы рабочего вещества [2]. Эмиссия дисперсной фазы сопровождается возбуждением колебаний ионного тока, что связано с капиллярной неустойчивостью жидкой поверхности [3].

В настоящей работе сообщается о методе формирования наночастиц посредством острийных ионных источников, который позволяет контролировать энергию и направление скоростей заряженных наночастиц и непосредственно осаждать их в требуемые точки поверхности.



**Рис. 1.** Схема острейного источника ионов: 1 — фланец; 2 — катод; 3 — контейнер; 4 — рабочее вещество; 5 — игла; 6 — изолятор; 7 — экстрактор; 8 — тормозящий электрод; 9 — ионный пучок; 10 — подложка; 11 — коллектор.

Эксперименты проводились с компактным источником ионов индия и олова с током до  $150\ \mu\text{A}$  и энергией до  $10\ \text{kV}$  (рис. 1) [4]. Спектры колебаний ионного тока регистрировались с помощью анализатора спектра С4-25, состав ионного пучка анализировался посредством масс-анализатора со скрещенными электромагнитными полями типа фильтра скоростей Вина и двухкоординатного самописца. Размеры наночастиц после их осаждения на полированные металлические подложки определялись с помощью просвечивающего электронного микроскопа Тесла и атомного силового микроскопа AFM NE. Источник монтировался на базе вакуумной установки ВУП-4 с предельным вакуумом  $5 \cdot 10^{-6}\ \text{mm Hg}$ .

Рабочее вещество при плавлении должно смачивать поверхность тугоплавкой иглы для обеспечения непрерывного подтекания жидкости

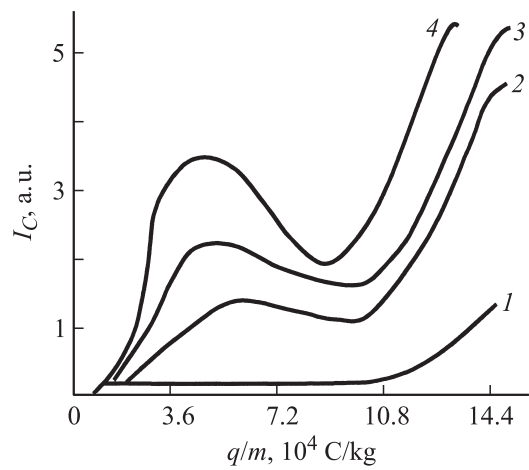
к вершине иглы. В экспериментах для индия использовалась никелевая игла, а для олова — железная. Эмиссия наночастиц индия и олова наблюдалась при токе пучков 30–40  $\mu\text{A}$  и извлекающем напряжении 5–6 кВ. Одновременно регистрировались колебания ионного тока с частотой 15–20 МГц [5]. Частотный спектр является дискретным, при увеличении общего тока пучка пороговым образом возбуждаются более интенсивные и низкочастотные колебания, интенсивность и местоположение соответствующих линий спектра в дальнейшем не меняется. Уровень модуляции тока в цепи экстрактора в несколько раз выше, чем уровень модуляции тока в цепи коллектора. Это связано с тем, что коллектор практически полностью экранирован от области с сильным электрическим полем (ускоряющий зазор игла-экстрактор) поверхностью экстрактора (рис. 1).

Колебания ионного тока связаны с развитием стоячих капиллярных волн на поверхности конуса Тейлора [6,7]. Из выражения для длины волны капиллярной неустойчивости [8] можно получить значения длин волн, например, при предельных наблюдаемых частотах

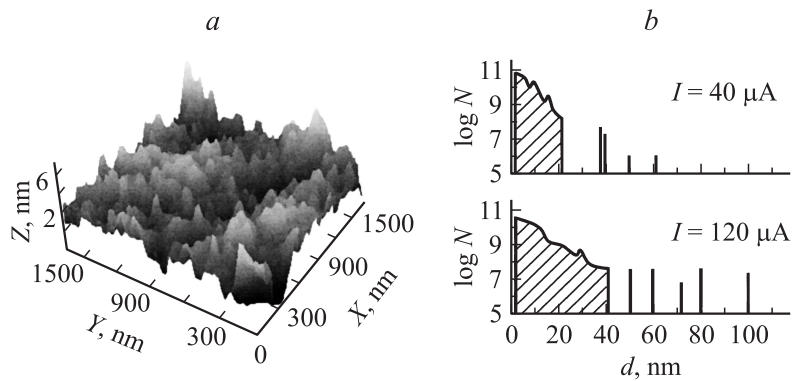
$$\lambda_1 = \sqrt[3]{\frac{8\pi\sigma}{\rho f^2}} = 1.3 \mu\text{m},$$

где  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения,  $\rho$  — плотность жидкости при  $f = 30$  МГц и  $\lambda_2 = 7.9 \mu\text{m}$  при  $f = 2$  МГц. Последняя величина, соответствующая возмущениям наибольшей длины волны, хорошо согласуется с непосредственными измерениями размера конуса Тейлора посредством теневой фотографии.

При возбуждении колебаний тока (ток пучка 40  $\mu\text{A}$ ) в спектре масс наблюдается новый широкий пик в области низкого удельного заряда (рис. 2). Максимум пика соответствует удельному заряду  $5 \cdot 10^4$  С/кг; при увеличении тока пучка этот максимум смещается в сторону его низких значений. Это означает, что с увеличением тока пучка генерируются наночастицы все большего размера. Трехмерное изображение поверхности с осажденными наночастицами индия, полученное посредством атомного силового микроскопа, представлено на рис. 3,а. При осаждении капельной фазы полированная подложка из нержавеющей стали находилась на расстоянии 70 мм от иглы, время экспозиции составляло 12 с при общем токе ионного пучка 65  $\mu\text{A}$ . Как видно, характерный размер частиц по координате  $z$  составляет несколько



**Рис. 2.** Область масс-спектра ионного пучка, соответствующая нанокпельной фазе (Sn),  $I_b$ ,  $\mu\text{A}$ : 1 — 28; 2 — 40; 3 — 68; 4 — 95.



**Рис. 3.** AFM-изображение поверхности с осажденными наночастицами индия (a) и гистограммы размеров наночастиц олова, полученные посредством электронного микроскопа (b).

нанометров. С помощью просвечивающего электронного микроскопа были получены гистограммы размеров наночастиц олова (рис. 3, *b*) [9]. При пороговом токе пучка  $40 \mu\text{A}$  размеры частиц находятся в диапазоне 2–20 nm, с увеличением тока диапазон расширяется в сторону больших величин. Число частиц наименьшего размера на три порядка превышает число частиц наибольшего размера. Имеются отдельные частицы с размерами в десятые доли микрометра.

Получение наночастиц проводящих материалов посредством острых источников практически не представляет затруднений. С точки зрения формирования поверхностных квантовых структур представляет большой интерес получение наночастиц полупроводниковых веществ. Однако большинство чистых полупроводников и их соединений обладает высоким давлением ( $p > 10^{-3} \text{ mm Hg}$ ) насыщенных паров при температуре плавления. При таком давлении будет поджигаться газовый разряд между иглой и экстрактором и нарушаться процесс полевой эмиссии.

Для получения ионной эмиссии на жидких полупроводниках была предложена модификация ионного источника с пористым электродом [10,11]. Выходное отверстие контейнера уплотняется острым электродом из пористого вольфрама. При плавлении рабочее вещество втекает в поры электрода и не позволяет парам рабочего вещества выходить из контейнера в вакуум. Источник работает при сравнительно высокой температуре контейнера, чтобы перепад давлений способствовал протеканию жидкости сквозь поры. Из-за высокой температуры величина ионного тока выше, чем в обычных острых источниках. В наших будущих экспериментах предстоит определить особенности развития капиллярной неустойчивости в источнике с пористым электродом. Следует ожидать, что в условиях высокой температуры рабочего вещества из-за снижения вязкости жидкости и коэффициента поверхностного натяжения будет возрастать интенсивность накопительной эмиссии и расширяться диапазон размеров генерируемых наночастиц.

Сканированием потока заряженных наночастиц их можно осаждать в требуемые точки предварительно подготовленной поверхности и формировать различные квантовые структуры. Структуры можно формировать и другим способом: сначала осадить частицы на поверхность, а затем перераспределить их по нужным координатам с помощью зондового микроскопа.

## Список литературы

- [1] *Poole C., Owens F.* // Introduction to nanotechnology. John Wiley&Sons, Lnc., 2003. 325 p.
- [2] *Mair G.L., von Engel A.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1981. V. 14. N 9. P. 1721–1728.
- [3] *Гасанов И.С., Салаев Э.Ю., Гурбанов И.И.* // Прикладная физика. 2005. № 5. С. 46–49.
- [4] *Гасанов И.С.* // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 17. С. 23–28.
- [5] *Бадан В.Е., Гасанов И.С.* // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 17. С. 49–52.
- [6] *Дудников В.Г., Шабалин А.Л.* Электродинамические источники ионных пучков. Препринт 87–63 ИЯФ СО АН СССР. Новосибирск, 1987. 66 с.
- [7] *Гасанов И.С., Гурбанов И.И.* // Сб. докл. Харьковской нанотехнологической ассамблеи. Украина. 2007. С. 183–187.
- [8] *Ландау Л.Д., Лившиц Е.М.* Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
- [9] *Бадан В.Е., Владимиров В.В., Горшков В.П., Солошенко И.А.* // ЖТФ. 1993. Т. 63. В. 6. С. 47–65.
- [10] *Ishikawa I., Takagi T.* // J. Appl. Phys. 1984. V. 56. N 11. P. 3050–3056.
- [11] *Ishikawa I.* // NIM. 1989. V. B40/41. Part II. P. 1037–1041.