

УДК 221.384

Капиллярная неустойчивость и эмиссия нанок капель в остром источнике ионов

И. С. Гасанов, Э. Ю. Салаев, И. И. Гурбанов

Институт физики НАН Азербайджана, Баку, Республика Азербайджан

Изучены механизм возбуждения колебаний и характеристики мелкодисперсной фазы в жидкометаллических источниках ионов. При отрыве капля с вершины вытянутого конуса Тейлора на его поверхности развивается система стоячих капиллярных волн с частотами 2–30 МГц. Возмущения жидкой поверхности модулируют извлекающее электрическое поле и ток ионов, спектр колебаний которого имеет квазидискретную форму. Генерируемые нанок капли могут быть также использованы для создания поверхностных квантовых структур.

Продолжительное и детальное изучение источников ионов на проводящей жидкости позволило определить характеристики ионной и нанок капельной эмиссии и выяснить возможности прикладного использования таких источников [1, 2].

Острые эмиттеры обладают наиболее высокой плотностью тока, весьма малой зоной эмиссии, способностью генерировать заряженные капли рабочего вещества с размерами нанометрового масштаба. Возможность фокусировки получаемых пучков до субмикронных размеров находит применение в микротехнологии, а генерация наночастиц различного состава представляет большой интерес для получения тонких пленок и нанотехнологии.

В определенных режимах действия острых источников стабильность ионной эмиссии нарушается и в пучке возникают колебания тока. Как было установлено в экспериментах [3], неустойчивость ионной эмиссии сопровождается генерацией заряженных наночастиц. Обращает на себя внимание тот факт, что спектр колебаний тока является дискретным [3, 4], в то время как спектр частиц по размерам имеет сплошной состав [5]. В условиях экспериментов [6] капли переносили не более 1 % ионного тока.

Было предположено, что возникновение высокочастотных колебаний связано с возбуждением капиллярных волн, а низкочастотных ($f < 10$ МГц) — с возбуждением прибойных волн [4]. Теоретическое рассмотрение явления каплеобразования основывается на неустойчивости Рэлея струи жидкости и неустойчивости Фарадея поверхностных капиллярных волн вблизи основания струи [7]. В этой модели период колебаний ионного тока определяется временем пролета заряженных наночастиц через ускоряющий зазор.

В рамках существующих представлений указанная выше дискретная форма спектра колеба-

ний ионного тока не находит какой-либо интерпретации. В настоящей работе рассматривается механизм развития выделенных мод колебаний в острых эмиттерах на проводящей жидкости и предлагаются новые применения таких источников.

Эксперимент

Измерения проводились с компактным источником ионов индия и олова [8, 9], схема которого представлена на рис. 1. Рабочее вещество помещалось в графитовый контейнер, подогреваемый электронной бомбардировкой с катода. Высота контейнера с иглой не превышает 10 мм. Для обеспечения хорошего смачивания рабочим веществом поверхности иглы ее материал необходимо тщательно подбирать. Для индия в качестве иглы использовалась никелевая, а для олова — стальная проволока диаметром 0,6 мм. В экспериментах измерялись ионные токи в цепи экстрактора и коллектора, а также переменные составляющие этих токов. При измерении сигнала в одной цепи другая цепь заземлялась. Спектр колебаний токов определялся посредством анализатора С4-25 с полосой частот до 60 МГц, анализ сигналов проводился с помощью осциллографа С8-2. Для масс-анализа состава пучков использовался анализатор типа фильтра скоростей Вина со скрещенными $\vec{E} \perp \vec{V}$ полями. Напряженность магнитного поля в анализаторе имела величину 1,4 кЭ, анализатор располагался между экстрактором и коллектором. В цепи коллектора регистрировались токи от 10^{-12} А посредством усилителя постоянного тока У5-9. Источник монтировался на базе вакуумной установки ВУП-4, предельный вакуум в которой составлял $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст.

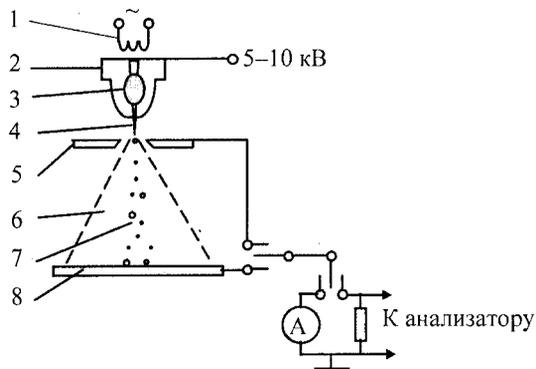


Рис. 1. Схема острейного источника ионов:

1 — накаливаемый катод; 2 — контейнер; 3 — рабочее вещество; 4 — игла; 5 — экстрактор; 6 — ионный пучок; 7 — наноклапны; 8 — коллектор

В экспериментах при монотонном увеличении извлекающего напряжения определялись характеристики ионной и наноклапельной фаз. Эмиссия ионов возникает пороговым образом при извлекающем напряжении 5–6 кВ (расстояние игла — экстрактор около 0,5 мм). Стабильность эмиссии нарушается при ионном токе около 50 мкА, когда в цепи экстрактора возбуждаются колебания с частотой порядка 15–20 МГц. На рис. 2 представлены спектры колебаний в цепи экстрактора и коллектора при различных значениях тока эмиссии.

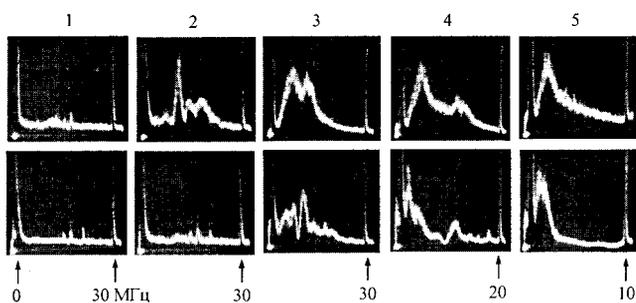


Рис. 2. Спектры колебаний переменных сигналов:

верхний ряд — спектры колебаний в цепи экстрактора, нижний ряд — спектры колебаний цепи коллектора

№ поз.	1	2	3	4	5
I_k , мкА	45	57	75	100	120
I_e , мкА	5	6	21	35	50

Авторами статьи было обращено внимание на то, что до определенного тока эмиссии в цепи коллектора колебания отсутствуют (поз. 2 рис. 2). С дальнейшим увеличением напряжения извлечения в обеих цепях последовательно возбуждаются дискретные моды колебаний с меньшей частотой и большей интенсивностью. При этом ранее возбужденные моды сохраняются неизменными. Минимальная частота колебаний порядка 2 МГц достигается при токе эмиссии 120–150 мкА. Интенсивность колебаний в цепи коллектора значительно меньше, чем в цепи экстрактора. Как видно из рис. 3, при возникновении колебаний вольтамперная характери-

стика не испытывает резкого излома, уровень переменных составляющих токов заметно ниже уровня постоянных составляющих. Причем уровень модуляции сигнала коллектора значительно меньше уровня модуляции сигнала экстрактора.

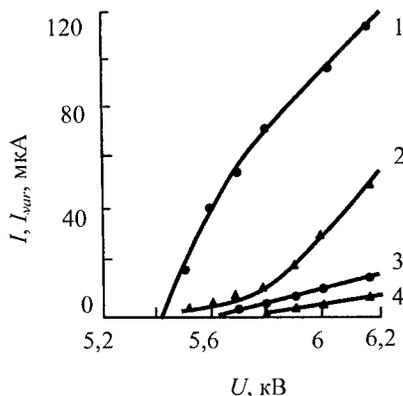


Рис. 3. Зависимость токовых компонент в цепи экстрактора и коллектора от извлекающего напряжения:

1 — I_k ; 2 — I_e ; 3 — \bar{I}_e ; 4 — \bar{I}_k

Как было установлено ранее, при использовании в качестве рабочего вещества сплава никеля, обладающего большой вязкостью, вплоть до 200 мкА ионного тока колебания вообще не возбуждались [10]. Также в источнике ионов олова при малой крутизне вольтамперной характеристики колебания токов не регистрировались. В последнем случае оказалось, что игла была плохо смочена рабочей жидкостью.

Масс-анализ состава получаемых пучков показал, что одновременно с возбуждением колебаний в цепи экстрактора в пучке появляется поток нанодисперсных частиц, распространяющихся вдоль оси пучка [3]. Кривая распределения капель по удельному заряду имеет форму достаточно широкого пика. Максимальный удельный заряд частиц порядка $5 \cdot 10^4$ Кл/кг, т. е. на каждые 15 атомов в среднем приходится один элементарный заряд. С увеличением тока эмиссии величина среднего удельного заряда уменьшается. Необходимо подчеркнуть, что в начальной фазе неустойчивости в цепи экстрактора регистрируется переменный сигнал, на коллектор осаждаются заряженные наночастицы, но в цепи коллектора колебаний нет.

Измерения размеров частиц посредством электронного микроскопа показали, что они составляют сплошной спектр от 2 до 40 нм, число самых малых частиц на три порядка превышает число самых крупных [5, 7], имеются отдельные частицы с размерами до десятых долей мкм. С увеличением общего тока эмиссии диапазон размеров частиц расширяется в сторону больших величин.

Таким образом, в острейном эмиттере ионов колебания тока возникают одновременно с эмиссией заряженных наночастиц; спектр коле-

баний токов является квазидискретным, а спектр частиц по размерам — непрерывным.

Обсуждение результатов

Перечисленные выше наблюдения свидетельствуют о том, что в жидких эмиттерах развивается капиллярная неустойчивость поверхности [4]. По мере увеличения электрического поля конус Тейлора [11] вытягивается и в определенный момент от вершины отрывается капля, импульс отдачи которой модулирует поверхность жидкости. Максимальное на вершине иглы электрическое поле отрывает мелкие капли от гребней поверхностных волн и они распространяются вдоль оси пучка. Оценки показывают, что время остывания на 10 К капля минимального размера на два порядка больше времени их пролета через ускоряющий промежуток, т. е. такие капли с максимальным удельным зарядом являются подвижным эмиттером, с поверхности которого продолжается эмиссия ионов (см. рис. 1). В начальной стадии неустойчивости модуляция электрического поля вследствие возмущений жидкой поверхности происходит с тыльной стороны нанокапель, поэтому ионный ток в цепи коллектора практически не испытывает колебаний. Эта модуляция электрического поля вызывает колебания тока в цепи экстрактора, т. е. в ней протекает емкостный ток. Коллектор экранирован от иглы поверхностью экстрактора, поэтому в его цепи емкостный ток не возникает.

При увеличении напряжения экстрактора возрастает интенсивность капельной эмиссии и, соответственно, возрастает амплитуда возмущения жидкости. При определенной пороговой амплитуде возбуждается более мощная и низкочастотная мода колебаний [12]. В развитой стадии неустойчивости при низком значении удельного заряда капля эмиссии ионов уже не происходит, так как поле на поверхности капли меньше испаряющего поля E_0 . Теперь ионный ток модулируется с частотой капиллярной неустойчивости, и в цепи коллектора также регистрируется переменный сигнал. В отличие от емкостного сигнала экстрактора сигнал коллектора является переменной составляющей тока ионов. В дальнейшем аналогично возникают новые моды колебаний, на поверхности эмиттера может развиваться система стоячих капиллярных волн. Граница системы вблизи конуса Тейлора не является жесткой, так как к вершине иглы все время подтекает жидкость. Вне зоны конуса Тейлора толщина жидкой пленки мала, и здесь колебания поверхности подавляются. В случае большой вязкости рабочего вещества (никель) и слабо смоченной поверхности (олово) капиллярная неустойчивость не развивается.

Оценим длину волны капиллярных волн [12] при предельных частотах колебаний. Для олова при максимальной частоте $f = 30$ МГц

$$\lambda = 3 \sqrt{\frac{8\pi\sigma}{\rho f^2}} = 1,3 \text{ мкм},$$

а при минимальной частоте $f = 2$ МГц $\lambda = 7,9$ мкм (σ — коэффициент поверхностного натяжения, ρ — плотность жидкости).

Последняя величина соответствует размеру конуса Тейлора, определенному по оценкам и непосредственным наблюдениям других авторов.

Минимальная амплитуда возмущений, приводящая к развитию капиллярной неустойчивости [12] при максимальной частоте $f = 30$ МГц

$$A_{rap} = \frac{2\delta}{\omega k} = \frac{4\eta}{\rho f \lambda} = 26 \text{ нм}, \quad (1)$$

где δ — декремент затухания;

η — динамическая вязкость.

Полученная величина на порядок превосходит размер самых мелких и многочисленных частиц, осаждаемых на поверхности коллектора. Причиной этого явления может быть рэлеевская неустойчивость заряженной капли. Оценка минимального размера капли, разрываемой собственным электрическим полем, дает величину

$$R = \frac{4\sigma}{\epsilon_0 E^2} = 1,1 \text{ нм при } E = 1,5 \cdot 10^8 \text{ В/см.}$$

По всей видимости, электростатический распад заряженных капель приводит к тому, что распределение наночастиц по размерам становится непрерывным и несимметричным, в отличие от дискретного спектра колебаний ионного тока.

Считая, что колебания тока в цепи экстрактора вызываются модуляцией электрического поля вследствие возмущений жидкой поверхности эмиттера, можно еще одним способом оценить амплитуду колебаний жидкости. В упрощенной модели систему игла—экстрактор заменим плоским конденсатором с некоторой эффективной площадью пластин S , находящихся на расстоянии d друг от друга. Колебаниям поверхности жидкости соответствует переменное расстояние между пластинами плоского конденсатора ($d + h_m \cos \omega t$). Для периодического емкостного тока в цепи экстрактора получим выражение

$$i = \frac{\epsilon_0 S U \omega h_m}{d^2} \sin \omega t,$$

где U — извлекающее напряжение;

h_m — амплитуда возмущения жидкой поверхности.

При амплитуде переменного тока $I_m = 1$ мкА (см. рис. 3), частоте колебаний $f = 30$ МГц, площади пластин $S = 1$ мм², расстоянии между ними $d = 0,5$ мм

$$h_m = \frac{I_m d^2}{\varepsilon_0 S U \omega} = 30 \text{ нм.}$$

Эта величина соизмерима с пороговой амплитудой (1) возбуждения капиллярной неустойчивости.

В настоящее время существуют различные методы получения дисперсных частиц для нанотехнологии. В острых источниках ионов наноклапья проводящего материала получают простым и недорогим способом. Эти частицы можно осаждасть, например, на поверхность светочувствительных полупроводниковых материалов для модификации их свойств. Посредством нанесения наночастиц также возможно создание различных квантовых структур на предварительно подготовленной поверхности. Подобные исследования уже проводятся в Институте физики НАН Азербайджана.

Заключение

Генерация заряженных наночастиц в острых источниках ионов связана с развитием капиллярной неустойчивости жидкого эмиттера. Колебания поверхности эмиттера модулируют электрическое поле в промежутке игла—

экстрактор. В дальнейшем модуляция поля приводит к модуляции ионного тока. Дискретная форма спектра колебаний связана с развитием стоячих капиллярных волн на поверхности конуса Тейлора. Эмиттируемые заряженные капли разрываются собственным электрическим полем, поэтому спектр частиц по размерам является непрерывным и в нем значительно преобладают частицы с минимальным размером порядка 2 нм.

Литература

1. Kingham D. R., Swanson L. W.// Appl. Phys. A, 1984. V. 34. № 2. P. 123.
2. Ochiai Y., Shihoyama K., Shiokawa T., Tiyoda K. et al.// J. Vac. Sci. Technol. 1986. V. B4. № 1. P. 333.
3. Бадан В. Е., Гасанов И. С.// Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. Вып. 18. С. 49.
4. Дудников В. Г., Шабалин А. Л.// ЖТФ. 1985. Т. 55. № 4. С. 776.
5. Vladimirov V. V., Badan V. E., Gorshkov V. N., Grechko L. G., Soloshenko I. A.// J. Vac. Sci. Technol. 1991. B.9 (5). P. 2582.
6. Tompson S. P., von Engel A.// J. Phys. D: Appl. Phys. 1982. V. 15. № 5. P. 925.
7. Бадан В. Е., Владимиров В. В., Горшков В. Н., Солошенко И. А.// ЖТФ. 1993. Т. 63. № 6. С. 47.
8. Gasanov I. S.// Turkish J. Phys. 1996. V. 20. № 10. P. 1098.
9. Гасанов И. С.// Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 17. С. 23.
10. Габович М. Д., Гасанов И. С., Проценко И. М.// ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 12. С. 2367.
11. Taylor G.// Proc. Royal Soc. Ser. A. 1964. V. 280. № 1382. P. 383.
12. Физические основы ультразвуковой технологии/ Под ред. Л. Д. Розенберга. — М.: Наука, 1970. — 688 с.

Статья поступила в редакцию 22 июля 2004 г.

Capillary instability and emission of nanodroplets in edge ion source

I. S. Gasanov, E. Yu. Salaev, I. I. Gurbanov

Institute of Physics of Azerbaijan NAS, Baku, Republic of Azerbaijan

Were studied the mechanism of excitation of fluctuations and characteristics of small dispersive phase in liquid metal ion source. At a separation of drops from top of the extended Taylor cone on its surface the system of standing capillary waves with frequencies of 2—30 MHz develops. Indignations of a liquid surface modulate extraction electric field and a current of ions which spectrum of fluctuations has the quasi discrete form. Generated nanodroplets can be used also for creation of surface quantum structures.