

12

О генерации ионов и микрокапель в эмиттерах на проводящей жидкости

© И.С. Гасанов

Институт фотоэлектроники АН Азербайджана, Баку

Поступило в Редакцию 2 декабря 1998 г.

В окончательной редакции 11 марта 1999 г.

Изучались характеристики мелкодисперсной компоненты электродинамического источника ионов индия и олова. Эмиссия микрокапель возникает пороговым образом при определенной величине тока пучка, одновременно с этим возбуждаются колебания ионного тока с частотой порядка 10 МГц. При предельных значениях тока ионов размеры микрокапель составляют сплошной спектр от 20 до 400 Å. Анализируются механизмы образования легких ионов и заряженных микрокапель в источниках данного типа: соответственно полевая ионизация пара и тепловое диспергирование жидкости.

Несмотря на то что период комплексного исследования острых источников на основе проводящих жидкостей был достаточно длительным [1–3], общепринятой интерпретации процессов в них еще не достигнуто. Это касается, в частности, механизмов генерации заряженных микрокапель и возбуждения колебаний ионного тока. Затруднительность трактовки наблюдаемых явлений связана с практической невозможностью их диагностики, так как процессы ионообразования происходят в области микронных масштабов.

В настоящей работе на основе изучения характеристик мелкодисперсной компоненты анализируются механизмы образования легких ионов и заряженных микрокапель в жидкометаллических эмиттерах.

В экспериментах использовался источник ионов индия и олова с током до 150 мкА и энергией до 10 кэВ [4]. Спектры колебаний ионного тока, частично попадающего на экстрактор, регистрировались посредством анализатора С4-25 с полосой пропускания до 60 МГц. Масс-спектры получались с помощью анализатора со скрещенными E, H полями типа фильтра скоростей Вина (рис. 1). Напряженность однородного магнитного поля в нем составляла 1.4 кОе, напряженность электрического поля между отклоняющими пластинами 7–0–2 кВ/см.

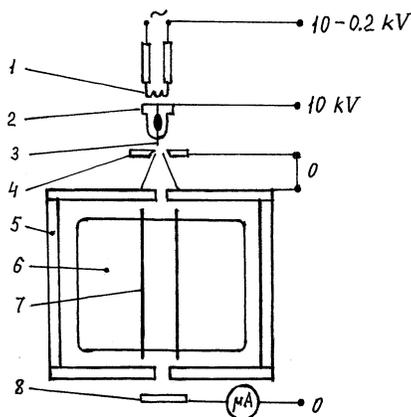


Рис. 1. Схема ионного источника с масс-анализатором: 1 — катод, 2 — контейнер, 3 — острие, 4 — экстрактор, 5 — магнитопровод, 6 — постоянный плоский магнит, 7 — отклоняющая пластина, 8 — коллектор.

Усилитель постоянного тока позволял фиксировать ток компонентов пучка, проходящих сквозь масс-анализатор на коллектор 8, величиной от 10^{-12} А.

При зазоре между острием и экстрактором около 0.5 мм пороговое напряжение эмиссии ионов составляло 4–6 кV. До 30–40 μ А тока ионов эмиссия высокостабильна, а в дальнейшем в пучке возбуждаются колебания тока с частотой около 25 МГц. При непрерывном увеличении тока в спектре пороговым образом появляются все более интенсивные и низкочастотные моды, а ранее возбужденные моды сохраняются. Обращает на себя внимание дискретная форма частотного спектра, т. е. в системе раскачиваются не любые, а выделенные моды. Максимальному току ионов олова 150 μ А соответствует минимальная частота колебаний порядка 2 МГц.

Масс-анализ состава пучка ионов олова, проведенный в широкой области токов, обнаруживает в целом неизменную форму спектра. Основной вклад в ионный ток создают ионы Sn_2^+ и Sn^+ . В экспериментах четко зафиксировано, что колебания тока пучка возникают одновременно с эмиссией заряженных микрокапель, которым в масс-спектре отвечает пик в области малых удельных зарядов [5]. Ток,

переносимый микрокаплями, составляет малую долю тока легких ионов (менее 2%) и регистрировался только с помощью усилителя. Расчеты показывают, что при удельном заряде микрокапель $q/m = 5 \cdot 10^4 \text{ C/kg}$ на 15 атомов олова приходится один элементарный заряд, а скорость частиц при ускоряющем напряжении $U = 6 \text{ kV}$ составляет $v = E/H = \sqrt{2qU/m} = 2.5 \cdot 10^6 \text{ cm/s}$ (E, H — напряженности электрического и магнитного полей в анализаторе соответственно).

Для определения размеров микрокапель после их осаждения на графитовые пленки производилось фотографирование пленок под электронным микроскопом. Оказалось, что с увеличением тока пучка в нем появляются более крупные частицы, размеры микрокапель составляют сплошной спектр в широкой области от 20 до 400 Å, количество самых мелких частиц превышает число самых крупных на три порядка, имеются отдельные частицы с диаметром микронного масштаба.

Следует подчеркнуть, что генерация микрокапель не приводит к излому вольт-амперной характеристики источника, в то время как масс-перенос при этом резко возрастает. Указанное означает, что эмиссия заряженных микрокапель не нарушает процесса образования легких ионов.

Приведенные выше характеристики микрокапельной фазы [6] позволяют интерпретировать процессы эмиссии носителей заряда в жидко-металлических источниках как результат перегрева эмиттера. Значительный перегрев вершины иглы острых источников отмечался в ряде работ, для источника ионов галлия температура иглы достигала 1000°C [7].

Последовательность процессов в источнике при непрерывном увеличении напряжения между иглой, смоченной рабочим веществом, и экстрактором можно представить следующим образом.

Электрическое поле заостряет поверхность жидкости, что приводит к значительному возрастанию поля вблизи выступа с малой кривизной и пробой вакуумного промежутка с эмиссией легких ионов. Электроны, образующиеся при полевой ионизации пара, а также выбиваемые быстрыми ионами с поверхности электродов, ускоряются полем в направлении иглы в виде остророфокусированного пучка. Локальный ввод мощности в жидкость возбуждает ее электронную подсистему, в результате чего снижается энергия связи поверхностного атома. При уровне мощности 10^6 W/cm^2 обеспечивается высокая скорость аномального испарения в таких явлениях, как пробой вакуумной изоляции и

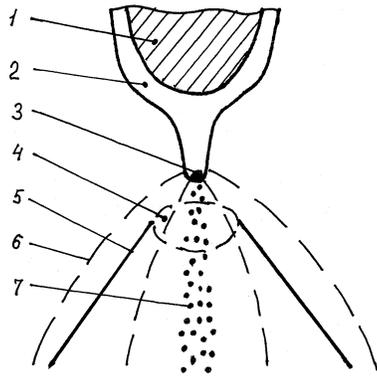


Рис. 2. Схема эмиссии ионов и микрокапель: 1 — острие, 2 — жидкость, 3 — область перегрева (диспергирования) жидкости, 4 — область ионизации пара, 5 — граница пучка, 6 — линии поля, 7 — микрокапли.

эмиссия ионов с поверхности жидкости [8]. В условиях электродинамического источника коэффициент полевой ионизации атома за время его пробега t [9]

$$P(t) = 1 - \exp \left[-\frac{A\omega t s}{\hbar} \exp \left(-\frac{2s}{\hbar} \right) \right] \quad (1)$$

близок к единице. Регистрируемые величины ионных токов не могут быть обеспечены обычным тепловым испарением жидкости даже при температуре 1000°C .

Несоответствие состава ионного пучка стехиометрическому составу рабочего вещества, наличие пара с высокой концентрацией порядка 10^{16} cm^{-3} [10] и ярко светящейся области у вершины острия свидетельствуют в пользу указанного выше механизма образования ионов в результате ионизации anomalно испаряющихся атомов в сильном электрическом поле порядка 10^8 V/cm .

С ростом тока пучка возрастает разогрев вершины острия вторичными электронами и при вскипании центральной зоны эмиттера происходит разлет заряженных микрокапель. Форма сплошного спектра размеров микрокапель аналогична распределению пузырьков пара по

размерам в кипящей жидкости, выражаемому формулой [11]:

$$f(x) = \frac{1}{2} \sqrt{x} e^{-1/3x^{3/2}}, \quad (2)$$

где $x = R/R_0$, R_0 — наиболее вероятный радиус пузырьков.

Области генерации ионов и микрокапель схематично могут быть представлены так, как показано на рис. 2. Длина пробега атомов до ионизации конечна, поэтому области генерации пространственно разделены, что и обуславливает монотонность ВАХ источника при эмиссии микрокапель.

При закипании жидкости также резко усиливается испарение атомов из зоны перегрева. Нарастающий в локальной области пространственный заряд ионов и микрокапель уменьшает величину электрического поля вблизи поверхности жидкости до тех пор, пока не прекратится ее диспергирование. Оценки показывают, что охлаждение жидкого олова на 10 К за счет уноса тепла испарением атомов при уровне вводимой электронами мощности 10^7 W/cm^2 произойдет за время $9 \cdot 10^{-8} \text{ s}$, что сравнимо с наблюдаемым периодом колебаний ионного тока.

Дальнейшее монотонное увеличение тока пучка таким же образом увеличивает вводимую мощность. Однако диспергирование жидкости будет импульсным, так как ее разогрев и унос тепла испаряемым веществом происходят за конечное время. Новый, более интенсивный и низкочастотный пик в спектре колебаний появится при таком токе ионов, когда мощность электронного пучка будет достаточной для вскипания более широкой концентрической зоны эмиттера. То есть спектр колебаний ионного тока отражает развернутую во времени последовательность микровзрывов нарастающей интенсивности.

Список литературы

- [1] *Gomer R.* // Appl. Phys. 1979. V. 19. P. 365–375.
- [2] *Kingham D.R., Swanson L.W.* // Appl. Phys. A. 1984. V. 34. P. 123.
- [3] *Бадан В.Е., Владимиров В.В., Горшков В.Н., Солошенко И.А.* // ЖТФ. 1993. Т. 63. № 6. С. 47–65.
- [4] *Габович М.Д., Гасанов И.С., Проценко И.М.* // ЖТФ. 1988. Т. 58. № 12. С. 2367–2370.
- [5] *Бадан В.Е., Гасанов И.С.* // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 18. С. 49–52.
- [6] *Gasarov I.S.* // Tr. J. Phys. 1996. V. 20. N 10. P. 1098–1108.

- [7] *Hornsey R.I., Marriot P.J.* // Phys. D: Appl. Phys. 1989. V. 22. N 5. P. 699.
- [8] *Ptitsin V.E.* // Rev. Sci. Instr. 1994. V. 65 (4). P. 1354, 1476–1478.
- [9] *Мюллер Э.В., Цонг Т.Т.* Полевая ионная микроскопия, полевая ионизация и полевое испарение. М.: Наука, 1980. 220 с.
- [10] *Venkatesan T., Wagner A., Nash D.* et al. // Appl. Phys. Lett. 1981. V. 39. N 1. P. 9–11.
- [11] *Завойский В.К.* // Атомная энергия. 1964. Т. 16. № 1. С. 64–65.