

МЕЛКОДИСПЕРСНАЯ ФАЗА И НЕУСТОЙЧИВОСТЬ
ЭМИССИИ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ
ИСТОЧНИКОВ ИОНОВ

В.Е. Бада н, И.С. Г а с а н о в

Процесс ионной эмиссии в жидкометаллических источниках (ЖМИ) при низких значениях токов пучков (нескольких мкА), характеризующийся высокой стабильностью тока и отсутствием мелкодисперсной фазы, к настоящему времени исследован достаточно детально в ряде экспериментальных и теоретических работ. В то же время однозначной интерпретации явлений, происходящих при интенсивных ионных токах (десятки и более мкА), еще не достигнуто. В частности, отсутствует обоснованная модель возбуждения колебаний ионных токов и образования эмиттируемых микрокапель. Предположение о формировании микрокапель в результате неустойчивости поверхности жидкого металла в электрическом поле высказывалось в работах [1, 2]. Один из возможных механизмов - развитие неустойчивости Рэлея на микроструе [1, 3, 4], с вершины которой происходит отрыв микрокапель с размерами порядка диаметра струи. В другой модели предполагается формирование кластеров на вершине колеблющегося конуса Тейлора при возбуждении на поверхности жидкости капиллярных волн [5]. В экспериментах было установлено, что размеры эмиттируемых микрочастиц находятся в широком диапазоне от нескольких до сотен ангстрем и угловое распределение потока кластеров гораздо уже, чем расхождение основного пучка [6-8].

В настоящей работе рассмотрены особенности эмиссии мелкодисперсной фазы при возникновении колебаний ионного тока; обнаружено, что в послепороговой области генерирование микрокапель не сопровождается модуляцией тока приосевой части пучка, а только его периферии; обсуждается механизм образования кластеров и колебаний извлекаемого тока.

Эксперименты проводились с источником ионов олова на установке, схема которой представлена в работе [9]. Рабочее вещество помещалось в графитовый контейнер, нагреваемый электронной бомбардировкой. В качестве зерна использовалось острие из железной проволоки диаметром 0.7 мм. На анод ионного источника подавался положительный потенциал до 10 кВ. Для сепарации частиц применялся аналогичный фильтру Вина масс-анализатор со скрещенными $E \perp H$ полями. Измерялись ионные токи на экстрактор и коллектор, который в отдельных случаях размещался непосредственно за экстрактором, когда масс-анализ не проводился. Усилитель постоянного тока ИМТ-05 позволял регистрировать в цепи коллектора токи величиной 10^{-12} А.

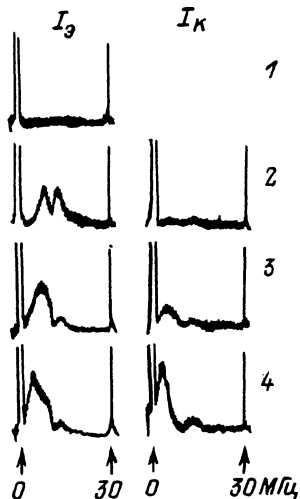
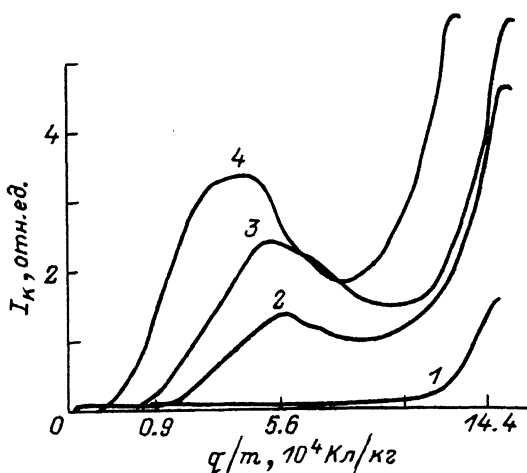
α  β 

Рис. 1. Спектры колебаний ионных токов. Чувствительность измерений уменьшалась от верхней позиции к нижней. б) Область масс-спектра ионного пучка с малым отношением заряда к массе: 1 - $I_0 = 26$ мкА; 2 - 40 мкА, 3 - 68 мкА, 4 - 95 мкА.

Осциллографирование сигналов производилось посредством прибора С8-14, спектры колебаний изучались с помощью анализаторов С4-25 и С4-27. Предельный вакуум в системе, поддерживаемый паромасляным насосом, составлял $5 \cdot 10^{-8}$ Тор.

При увеличении тока извлекаемого пучка он начинает испытывать колебания с частотой 15-20 МГц, которые имеют порог возбуждения по общему току эмиссии $I_0 = I_3 + I_K = 30-40$ мкА [9]. Было обнаружено, что в довольно широкой области изменения I_0 ток на коллектор (I_K) стабилен, в то время как ток на экстрактор (I_3) заметно модулирован (рис. 1, а). С дальнейшим ростом тока пучка начинает проявляться и модуляция I_K , но в меньшей степени, чем I_3 , а также последовательное возбуждение все более низкочастотных и интенсивных гармоник при сохранении ранее возбужденных. Обращает на себя внимание различие (до 2-х раз) в частотном составе сигналов - спектр колебаний тока на коллектор более низкочастотный. При достаточно большом значении тока пучка частоты доминирующих по амплитуде гармоник на обоих спектрах совпадают, а осциллограммы сигналов повторяют друг друга. Следует добавить, что был рассмотрен широкий диапазон спектра вплоть до частот 17 ГГц. Кроме указанной выше низкочастотной области, в остальной части спектра колебания не наблюдались.

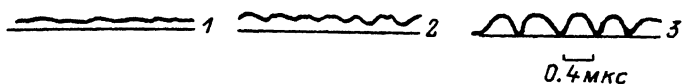


Рис. 2. Осциллограммы тока на коллектор: 1 - $I_0 = 52$ мкА, 2 - 64 мкА, 3 - 80 мкА. Для позиции 1 временной масштаб составляет 0.2 мкс.

Масс-анализ состава эмиттируемого пучка, проведенный в широкой области токов, обнаруживает в целом неизменную форму спектра, т. е. неизменное соотношение трех наибольших по величине пиков, соответствующих ионам Sn^{++} , Sn^+ и группе легких кластеров. Немонотонное изменение формы масс-спектра в зависимости от эмиттируемого тока наблюдалось в области малых q/m , отвечающей группе сравнительно тяжелых частиц. Как видно на рис. 1, б, при определенном токе пучка в спектре скачкообразно появляется пик, величина которого в дальнейшем растет пропорционально току. Если полагать, что эмиттируемые частицы однозарядные, то указанному в спектре пику соответствуют кластеры, состоящие из 15 атомов. В экспериментах зафиксировано одновременное возникновение эмиссии микрокапель и неустойчивости тока периферийной части пучка I_3 (рис. 1, а, б). Необходимо подчеркнуть, что с момента появления модуляции I_3 в некоторой области возрастания общего тока, несмотря на наличие и пропорциональный рост потока микрокапель, практически отсутствует модуляция тока осевой части пучка. При дальнейшем увеличении эмиссии уровень модуляции тока центральной области пучка монотонно растет от нуля до 100 % (рис. 2).

Приведенные данные об особенностях эмиссии кластеров и возбуждения колебаний ионного тока труднообъяснимы в рамках существующих моделей неустойчивости жидкой поверхности в условия ЖМИ. В частности, расчетные максимальные значения инкрементов рэлеевской неустойчивости вытянутой микроструи [3, 4] соответствуют частотам колебаний $f \sim 10^{10}$ Гц, которые на несколько порядков выше наблюдаемых в эксперименте; размеры регистрируемых кластеров значительно меньше масштабов возмущений, получаемых из дисперсионного уравнения капиллярных волн [5] для указанных выше частот колебаний тока пучка. В связи с изложенным, представляет интерес рассмотрение иного механизма образования микрокапель в ЖМИ. Как известно, в определенных режимах извлечение ионов в этих источниках сопровождается существенным локальным перегревом кончика острия. Наблюдаемая эмиссия кластеров при некотором токе пучка возможна в результате процесса взрывной эмиссии на фронте струи, детально изученной в системах со взрывоэмиссионными катодами [10]; на наличие плазмы у поверхности эмиттера ЖМИ указывалось в экспериментах [11]. С увеличением

электрического поля возрастает также плотность тока микрокапель, что вызывает процесс постепенной „эрозии“ выступа. В предельном случае в результате значительного массопереноса периодически происходит существенная деформация эмиттера; ток приобретает форму отдельных импульсов, и частота релаксаций определяется скоростью восстановления объема и геометрии жидкого микроострия. Полагая, что за время одного импульса с поверхности в виде только одноатомных и однозарядных ионов уносится масса жидкости, заключенная в конусе Тейлора [5], оценим поперечные размеры деформированной зоны:

$$d = \sqrt[3]{\frac{24 \operatorname{tg} \alpha \cdot I \cdot \tau \cdot m}{\rho}} \approx 4 \cdot 10^{-5} \text{ см,}$$

где $\alpha = 49.3^\circ$, m - масса ионов, ρ - плотность жидкого металла.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] G o m e r R. // Appl. Phys. 1979. V. 19. N 4. P. 365-375.
- [2] M a i r G.L.R., V o n E n g e l A. // J. Appl. Phys. 1979. V. 50. N 9. P. 5592-5595.
- [3] В л а д и м и р о в В.В., Г о р ш к о в В.Н. // ДАН СССР. 1987. Т. 297. № 5. С. 1107-1111.
- [4] Н а з и н С.С., И з о т о в А.Н., Ш и к и н В.Б. // ДАН СССР. 1985. Т. 283. № 1. С. 121-125.
- [5] Д у д н и к о в В.Г., Ш а б а л и н А.Л. Электрогидродинамические источники ионных пучков. Новосибирск: ИЯФ СО АН СССР, 1987. Препринт 87-63. 66 с.
- [6] W a g n e r A., W e n k a t e s a n T., P e t r o f f P.M., V a r r D. // Vac. Sci. Techn. 1981. V. 19. N 4. P. 1186-1189.
- [7] V a r r D.L. // J. Vac. Sci. Techn. 1987. V. 5. N 1. P. 184-189.
- [8] V a h a s a d r i A., P o u r r e z a s i K., F r a n c o i s M., N a y a k D. - // J. Vac. Sci. Techn. 1988. V. 6. N 1. P. 496-497.
- [9] Г а б о в и ч М.Д., Г а с а н о в И.С., П р о ц е н к о И.М. // ЖТФ. 1988. Т. 58. № 12. С. 2337-2370.
- [10] Ш и р о ч и н Л.А., П о л я к о в М.А., Ф у р с е й Г.Н., Л у п е х и н С.М. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. В. 24. С. 1507-1510.
- [11] П у с т о в и т А.Н., Ж и л а В.И. // ЖТФ. 1986. Т. 56. В. 11. С. 2255-2258.