

- [5] White J. M., Hedrich P. F. // Appl. Optics. 1976. Vol. 15. N 1. P. 151—155.
 [6] Ganshin V. A., Korkishko Yu. N., Morozova T. V. // Phys. St. Sol. (a). 1988. Vol. 110. P. 397—402.
 [7] Коркишко Ю. Н., Ганьшин В. А. // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 4. С. 692—700.
 [8] Begun G. M., Fletcher W. H. // J. Chem. Phys. 1958. Vol. 28. N 3. P. 418—425.
 [9] Ганьшин В. А., Коркишко Ю. Н., Петрова В. З. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 11. С. 2224—2227.
 [10] Ганьшин В. А., Коркишко Ю. Н., Петрова В. З. // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 6. С. 1122—1127.

Московский институт
электронной техники

Поступило в Редакцию
7 апреля 1989 г.

04; 05

Журнал технической физики, т. 60, в. 9, 1990

© 1990 г.

ОБРАЗОВАНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО РЕЛЬЕФА НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПЛАЗМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ

С. В. Зайцев, А. Л. Суворов

Использование острых катодов на основе автоэлектронной эмиссии в широком классе современных приборов и технических устройств [1, 2] стимулирует детальное изучение их эксплуатационных и других свойств и параметров различными экспериментальными методами. Наиболее логичным здесь признано применение методов автоэлектронной и автоионной микроскопии [3], дополненных зондовыми анализами эмиссионных свойств и химического состава поверхности [4, 5]. В автоэлектронных микроскопах исследуются, как известно, процессы поверхностной диффузии, термополевой перестройки, формирование пленок, зависимость эмиссионных свойств от различных параметров, стабильность автоэлектронной эмиссии (ее шумы), долговечность катодов и т. п. В автоионных микроскопах на атомном уровне изучаются структура поверхности острий, тип и параметры присутствующих в них дефектов, влияние на структуру сильных электрических полей, различного рода облучения температуры и т. п. Одним из перспективных направлений автоионно-микроскопических исследований стал особенно в последние годы детальный анализ механических свойств острий, выяснение микромеханизмов их разрушения под действием пондеромоторных сил действующего в приборе электрического поля. Так, в [6] было впервые обращено внимание на то, что предпологаемая поверхность разрушения оплавлена и даже, возможно, аморфизирована. Там же высказано предположение, что в процессе нагружения острия некоторая зона деформируемого материала может расплавляться, в результате чего фиксируемое затупление острия является следствием эмиссии зарядов («микрокапелек») с поверхности проводящей жидкости, а не разрушение материала в традиционном смысле [7].

Вопрос этот до сих пор остается открытым, а приводимые ниже новые результаты, помимо прочего, открывают, на наш взгляд, еще одно весьма плодотворное направление в подобных исследованиях.

Прежде чем перейти к ним, отметим следующее обстоятельство. Как показывает практика, острые катоды (так же, как и эквивалентные им образцы в автоэлектронном или автоионном микроскопе) могут прийти в негодность (разрушиться) в результате разряда во внутренней цепи — между острием и экраном микроскопа. Результат такого действия может быть в принципе различным в зависимости от мощности разряда. Разряды малой мощности (микроразряды) генерируют в приповерхностных слоях острий структурные дефекты, такие как точечные, небольшие дислокационные петли и т. п. [8]. Более мощные разряды обуславливают существенное затупление острий — удаление с их поверхности значительных объемов материала. Возможный механизм такого затупления мы и обсуждаем в настоящей работе.

И еще одно предварительное замечание. В принципе для исследования высокоскоростной деформации острия можно нагружать пондеромоторными силами электрического поля, импульсно повышая потенциал. В свою очередь это повышение можно осуществлять за счет, например, разряда во внешней цепи микроскопа. При этом такой внешний разряд может

привести к внутреннему разряду в пространстве острие—экран микроскопа, а может к такому внутреннему разряду и не привести. В первом случае мы будем иметь дело с чисто механическим воздействием, во втором — с совместным механическим нагружением и действием газовой плазмы внутреннего электрического разряда (последнее в том большей степени, чем ниже вакуум в автоэлектронном микроскопе, чем выше давление изображающего газа в микроскопе автоионном).

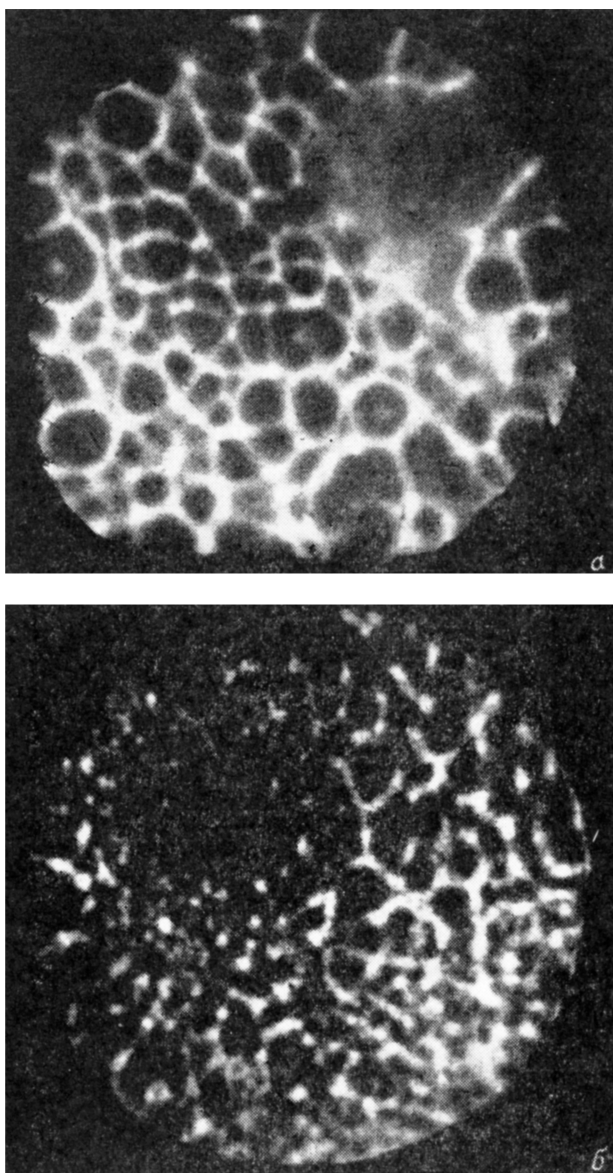


Рис. 1. Периодические структуры на поверхности вольфрамовых острий, возникшие после воздействия на острия гелиевой плазмы электрических разрядов (автоионные изображения).

а, б — разновидности ячеистых структур

В настоящей работе рассматривается как раз второй случай, когда поверхности острий из тугоплавких металлов (вольфрама и его сплавов) подвергались воздействию гелиевой плазмы мощных разрядов. Разряды инициировались у вершины острий при достижении критической величины напряженности электрического поля — на уровне 10^{10} и более В/м и гасились автоматически вследствие затупления вершины острий. После этого поверхность вершины острий изучалась в автоионном микроскопе. В процессе всего эксперимента образцы-острия находились в гелии при давлении 10^{-2} Па и охлаждались жидким азотом. Про-

междуток времени между обработкой в плазме разряда и началом микроскопического анализа не превышал 1 мин.

В результате экспериментов было установлено, что действие плазмы электрических разрядов на поверхность тугоплавких металлов приводит к образованию на поверхности периодического рельефа в виде ячеистых (с параметром 10—50 нм) или филаментарных (с периодом 5—30 нм) структур. Пример таких структур иллюстрируют автоионные изображения рис. 1, а, б.

По нашему мнению, полученный результат достаточно убедительно указывает на то, что совместное механическое и плазменное импульсное воздействие на острие вызывает расплавление материала его (острия) вершины, а на образовавшейся жидкой пленке возникают неустойчивости волнового характера. Причем неустойчивости эти в данном эксперименте удавалось «заморозить» благодаря прерыванию разряда и быстрому охлаждению. Низкие моды колебаний соответствуют, по-видимому, возникновению на поверхности острий единичных микробугорков (об этом подробно см. в [8]), тогда как высокие моды — образованию ячеистых структур.

Полученный результат логично рассмотреть с позиций неустойчивости капиллярных волн в рамках одной из трех существующих моделей Реллея [10], Тонкса [11] и Френкеля [12] (подробно об этом см. в [13]).

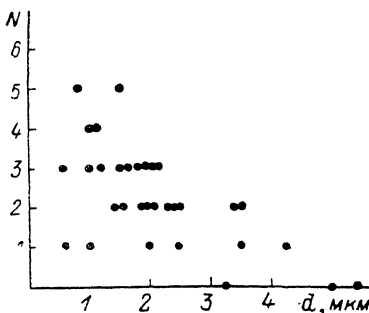


Рис. 2. Зависимость количества микробугорков N , возникших на вершине микроострия в результате разряда от конечного диаметра при вершине d .

Согласно этим работам, критерием проявления неустойчивости Тонкса—Френкеля на поверхности жидкости с кривизной R в электрическом поле напряженностью E и с коэффициентом поверхностного натяжения α является соотношение

$$\nu = \frac{E^2 \cdot R}{\alpha} \geq C,$$

где C — некоторая константа.

Для сферической капли с зарядом при выполнении указанного условия становится неустойчивой основная мода капиллярных волн. Критические же условия проявления неустойчивости более высоких мод также имеют вид приведенного соотношения, но с относительно большим значением константы C .

Учитывая, что напряженность электрического поля вблизи поверхности вершины острия радиусом R и потенциал острия V связаны между собой

$$E = \frac{V}{k \cdot R},$$

где k — некоторая приборная константа (геометрический фактор), приведенное выше условие неустойчивости примет вид

$$\nu = \frac{V^2}{\alpha \cdot k^2 \cdot R} \geq C.$$

Отсюда следует, что при уменьшении радиуса кривизны R острия можно ожидать появления все более высоких мод колебаний. На рис. 2 представлена полученная в данной работе зависимость между диаметром образца и количеством микробугорков (модой). Видно, что с уменьшением диаметра количество микробугорков растет. Причем при диаметрах $d \leq 0.5$ мкм вместо микробугорков образуется ячеистая структура.

Таким образом, в настоящей работе впервые получено экспериментальное подтверждение современных теоретических представлений о процессах зарождения неустойчивостей высокого порядка на поверхности проводящей жидкости в электрическом поле. В практическом плане это позволяет с большей степенью обоснованности судить о расположении на поврежденной электрическим разрядом поверхности зон наиболее интенсивной ионной эмиссии.

Кроме того, полученный результат открывает новые возможности применения автоионной микроскопии в исследовании термокапиллярных явлений, изучении различных

стадий развития неустойчивостей в т. п. Несомненно интересным представляется прежде всего продвинуться в область предельно высоких мод колебаний.

Наконец, будет, по-видимому, целесообразно изучить эмиссионные свойства острых катодов с периодическим рельефом в структуре поверхности.

Список литературы

- [1] *Бондаренко Б. В., Рыбаков Ю. Н., Шешин Е. Н.* Обзоры по электронной технике. Сер. 4. Электровакуумные и газоразрядные приборы. М., 1981. Вып. 4 (814). 59 с.
- [2] *Spindt C. A.* // *J. Appl. Phys.* 1976. Vol. 47. N 12. P. 5248—5252.
- [3] Автоионная микроскопия / Под ред. Дж. Рена, С. Ранганатана. М.: Мир, 1971. 270 с.
- [4] *Ривьере Х.* // Поверхностные свойства твердых тел / Под ред. М. Грина. М.: Мир, 1972. Гл. 4. С. 193—316.
- [5] *Мюллер Э. В.* // Методы анализа поверхности / Под ред. А. Зандерны. М.: Мир, 1979. Гл. 8. С. 201—220.
- [6] *Зайцев С. В., Суворов А. Л.* Препринт ИТЭФ. № 154. М., 1987. 16 с.
- [7] *Журков С. Н.* Физика прочности и пластичности. Л.: Наука, 1986. 152 с.
- [8] *Зайцев С. В., Суворов А. Л.* Поверхность. Физика, Химия, Механика. 1985. № 9. С. 104—110.
- [9] *Бугаев А. А., Лукошкин В. А., Урпин В. А., Яковлев Д. Г.* // *ЖТФ.* 1988. Т. 58. Вып. 5. С. 908—914.
- [10] *Rayleigh J.* // *Phil. Mag.* 1982. Vol. 14. N 1. P. 184—192.
- [11] *Tonks L.* // *Phys. Rev.* 1935. Vol. 18. N 4. P. 592—599.
- [12] *Френкель Я. И.* // *ЖТФ.* 1936. Т. 6. Вып. 4. С. 347—350.
- [13] *Габович М. Л.* // *УФН.* 1983. Т. 140. № 1. С. 137—151.

Поступило в Редакцию
30 мая 1989 г.
В окончательной редакции
2 февраля 1990 г.

01; 04; 09

Журнал технической физики, т. 60, в. 9, 1990

© 1990 г.

ДИСПЕРСИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТОАКТИВНОГО ПЛАЗМЕННОГО ВОЛНОВОДА

Н. А. Азаренков, В. В. Костенко

Исследование электромагнитных свойств плазменного цилиндра, находящегося во внешнем постоянном и однородном магнитном поле, имеет важное значение при решении задач плазменной электроники и в проблеме УТС. В [1, 2] исследованы дисперсионные свойства, топография электромагнитного поля и энергетические характеристики аксиально-симметричных объемных возмущений в электронном плазменном цилиндре, граничащем с вакуумом. Электромагнитные свойства плазменного цилиндра, ограниченного металлическим кожухом, исследовались в работе [3], где получено дисперсионное уравнение аксиально-симметричных волн поверхностного типа

$$\frac{F_1}{k_1} \frac{I_1(k_1 R)}{I_0(k_1 R)} - \frac{F_2}{k_2} \frac{I_1(k_2 R)}{I_0(k_2 R)} = 0 \quad (1)$$

и исследована топография электрического и магнитного полей поверхностных волн. В выражении (1) приняты следующие обозначения:

$$F_{1,2} = \frac{\epsilon_3}{\epsilon_1} (\epsilon_1 k^2 - k_z^2) + k_{1,2}^2, \quad k_{1,2} = -p_1 \pm \sqrt{p_1^2 - p_2},$$

$$p_1 = \frac{1}{2\epsilon_1} [\epsilon_1 + \epsilon_3] (\epsilon_1 k^2 - k_z^2) - \epsilon_3^2 k^2,$$

$$p_2 = \frac{\epsilon_3}{\epsilon_1} [(\epsilon_1 k^2 - k_z^2)^2 - \epsilon_3^2 k^4], \quad k = \frac{\omega}{c}, \quad (1a)$$