

Радиационно-стимулированная эрозия поверхности автоэлектронных эмиттеров

© Т.И. Мазилова, И.М. Михайловский, В.А. Ксенофонтов

Национальный научный центр
"Харьковский физико-технический институт", Украина

Поступило в Редакцию 10 апреля 2001 г.

Изучены особенности эрозии поверхности игольчатых автоэмиттеров под действием бомбардировки ионами гелия. Анализ радиационно-стимулированного формирования атомной шероховатости поверхности свидетельствует о нединамическом характере смещения поверхностных атомов при энергиях ионов ниже порога образования стабильных френкелевских пар и катодного распыления. Обсуждается квазистатический механизм эрозии поверхности в результате смещения атомов в низкокоординационные положения при выделении энергии образования междоузельных атомов гелия.

Большой интерес к автоэлектронным катодам связан с возможностью их применения в качестве активных элементов различного типа электронных устройств. Открытие явления взрывной эмиссии, широко используемой в настоящее время для генерирования сильноточных электронных пучков, стимулировало изучение процессов, протекающих на поверхности автокатодов при высоких значениях плотности токов [1]. В последние годы благодаря развитию сканирующей туннельной микроскопии, разработке новых типов автоэмиттеров для нанотехнологии [2–5] и созданию когерентных автоэмиссионных источников [6] существенно увеличился объем исследований в этой области. Вместе с тем применение автоэлектронных эмиттеров в электронно-лучевых приборах и микроэлектронных устройствах существенно ограничивается их относительно низкой устойчивостью к ионной бомбардировке. Ионная бомбардировка неизбежно сопутствует автоэлектронной эмиссии в результате ударной ионизации атомов остаточных газов — прежде всего инертных газов, проникающих в вакуумные камеры из атмосферы и сравнительно плохо откачиваемых стандартными сверхвысоковакуумными насосами.

При рассмотрении вопросов радиационной стойкости автокатодов обычно используется механизм кумулятивного катодного распыления, развитый в ранних работах по автоэлектронной эмиссии острых катодов [7,8], и представления об эрозии поверхности в результате протекания радиационно-стимулированной поверхностной самодиффузии [9,10]. К настоящему времени можно считать установленным, что эволюция атомной топографии в процессе бомбардировки автокатодов с субмикронными радиусами кривизны эмитирующей поверхности определяется в основном процессами радиационно-стимулированной поверхностной миграции. Вместе с тем механизм этого явления остается во многом невыясненным. В настоящей работе методами полевой ионной и электронной микроскопии исследовалось взаимодействие низкоэнергетических ионов гелия с атомно-гладкой поверхностью вольфрамовых эмиттеров.

Исследования проводились с помощью двухкамерного полевого эмиссионного микроскопа с охлаждением образцов и криогенных сорбционных сверхвысоковакуумных насосов жидким водородом. В ионном режиме рабочее напряжение изменялось в пределах 1.5–25 кВ, в автоэлектронном — 0.1–2.5 кВ. Давление остаточных газов во внутренней рабочей камере поддерживалось в пределах 10^{-7} – 10^{-6} Па, давление изображающего газа — гелия составляло $(2-4) \cdot 10^{-3}$ Па. Игольчатые образцы изготавливались из вольфрама чистотой 99.98% методом электрохимического травления. Температура образцов в процессе ионной бомбардировки поддерживалась в пределах 80–300 К. Эмитирующая поверхность автокатодов формировалась испарением при 80 К в электрическом поле положительной полярности напряженностью $5.8 \cdot 10^{10}$ В/м.

Параметры облучения ионами гелия при работе в автоэлектронном режиме при напряженностях поля $E = (2-4) \cdot 10^9$ В/м определялись по методике, описанной в [9,11]. Распределение ионов гелия по энергиям было близко к максвелловскому. Средняя энергия ионов гелия $\langle W \rangle$ приблизительно равна $e r_0 E$, где e — заряд электрона, r_0 — радиус кривизны полусферической части поверхности эмиттера. В проводившихся экспериментах средняя энергия варьировалась в пределах 25–500 эВ. Максимальная энергия бомбардирующих ионов W_{\max} в четыре-пять раз превышала среднее значение $\langle W \rangle$. После облучения автоэмиттеров полярность напряжения изменялась и производился анализ эрозии поверхности в полевом ионном режиме.

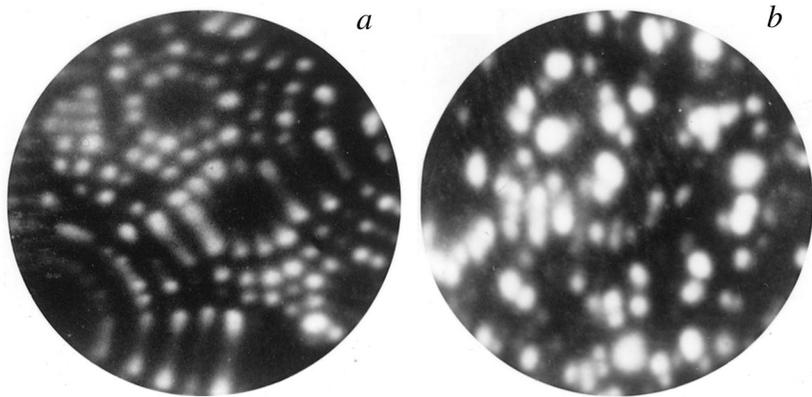


Рис. 1. Ионно-микроскопические изображения низковольтного игольчатого автоэммитера до (а) и после (б) облучения флюенсом ионов гелия 10^{13} ion/cm².

На рис. 1 приведены полевые ионно-микроскопические изображения игольчатого автоэммитера с радиусом кривизны у вершины $r_0 = 6$ nm до (а) и после (б) облучения ионами гелия со средней энергией 30 eV флюенсом $4.2 \cdot 10^{14}$ ion/cm² при 100 К. Максимальное значение энергии ионов гелия в этом эксперименте составляло 150 eV. Средняя энергия, передаваемая поверхностным атомам вольфрама $\langle w_a \rangle$, приблизительно равна 1.2 eV. Облучение приводило к нарушению регулярности расположения атомов в поверхностном слое. На поверхности наблюдались хаотически распределенные центры повышенной яркости, большинство из которых представляло собой изображения отдельных атомов. Повышение яркости изображения связано с тем, что в результате бомбардировки эти атомы оказались смещенными в положения с пониженными значениями поверхностных координационных чисел, характеризующиеся относительно высокой локальной напряженностью электрического поля. Напряженность полевого испарения таких атомов на 8–12% ниже пороговой напряженности испарения со ступенек плотноупакованных плоскостей {211} и {110}. В этих экспериментах значения $\langle W \rangle$ и W_{\max} были существенно ниже порогового значения энергии катодного распыления и образования стабильных френкелевских пар точечных дефектов (450 eV) [12]. В связи с этим для описания эрозии поверхности

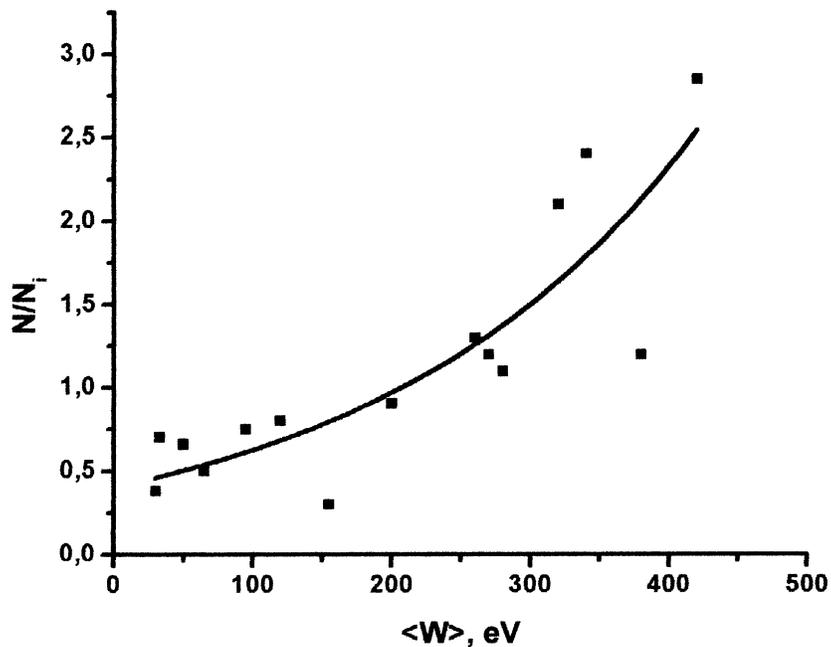


Рис. 2. Зависимость отношения поверхностной плотности центров повышенной яркости N к флюенсу N_i от средней энергии ионов гелия.

под действием низкоэнергетической ионной бомбардировки не могут быть применены динамические механизмы формирования атомной шероховатости поверхности в результате катодного распыления [7,8] или выхода на поверхность междоузельных атомов радиационного происхождения [13].

На рис. 2 приведена зависимость отношения поверхностной плотности центров повышенной яркости N к флюенсу ионов N_i от средней энергии ионов гелия. Поверхностная плотность центров плавно растет с энергией ионов. Отсутствуют какие-либо особенности на кривой, которые следовало бы ожидать при реализации динамических механизмов формирования атомной микрошероховатости. В частности, не наблюдается скачка поверхностной плотности атомов в окрестности

$\langle W \rangle = 450$ eV, соответствующей порогу дефектообразования в объемных (и приповерхностных) слоях. И что особенно существенно: эрозия поверхности не подавляется при снижении энергии ионов до уровня $\langle W \rangle = 30$ eV, соответствующего средней энергии, передаваемой атомам вольфрама $\langle w_a \rangle = 1.2$ eV. Таким образом, радиационная стойкость наноэмиттеров, характеризующихся малыми, допороговыми средними значениями энергии бомбардирующих ионов, не может быть описана в рамках какого-либо столкновительного механизма радиационно-стимулированной поверхностной самодиффузии.

Динамические эффекты могут вносить определенный вклад в формирование микрорельефа поверхности путем смещения поверхностных атомов в энергетически близкие положения. Однако наблюдения появления атомов на поверхности после прекращения облучения подтверждают вывод о возможности реализации нестолкновительного механизма формирования атомной шероховатости бомбардируемой поверхности низковольтных автоэмиттеров.

При низкоэнергетичной бомбардировке наноэмиттеров в условиях, когда практически исключены динамические каналы эрозии: катодное распыление, смещение поверхностных атомов в низкокоординационные положения, радиационное образование пар Френеля с последующим диффузионным выходом подвижных междоузельных атомов на поверхность, — существенную роль могут играть релаксационные процессы в поверхностных слоях, насыщенных внедренными атомами гелия. Наличие атомов гелия в приповерхностных слоях обнаруживается при температуре 300 К масс-спектрометрически с помощью двухимпульсного атомного зонда — полевого ионного микроскопа (АЗ-ПИМ) [14]. При работе АЗ-ПИМ в двухимпульсном режиме практически исключается возможность регистрации при масс-анализе атомов гелия, неизбежно присутствующих в остаточном газе. Возможность внутренней абсорбции гелия в приповерхностных слоях металлов обычно связывают с захватом атомов гелия приповерхностными вакансиями. Однако, как отмечалось выше, в большинстве проведенных в настоящей работе экспериментов энергия бомбардирующих ионов гелия была существенно ниже порога дефектообразования. Таким образом, АЗ-ПИМ анализ подтверждает вывод об абсорбции атомов гелия приповерхностными слоями бездефектных нанокристаллов.

Несмотря на то что влияние гелия на радиационную повреждаемость металлов являлось предметом многочисленных исследований [12,15],

механизм взаимодействия единичных атомов гелия с поверхностными слоями металлов остается неизученным. Известно, что взаимодействие атомов гелия с атомами металлов носит только характер отталкивания и их внедрение в кристаллическую решетку приводит к локальному смещению окружающих его атомов матрицы. Расчетные значения энергии образования междоузельного атома гелия зависят от его расположения в решетке и изменяются в вольфраме в пределах 5.5–7.4 eV [12], что существенно превышает максимальные значения энергии смещения поверхностных атомов вольфрама в низкокоординационные положения. Таким образом, в условиях, когда для описания эрозии поверхности под действием низкоэнергетической ионной бомбардировки не могут быть применены динамические механизмы формирования атомной шероховатости поверхности, смещение поверхностных атомов металла в результате выделения энергии образования междоузельных атомов гелия может вносить существенный вклад в эрозию поверхности. Возникновение атомной шероховатости в процессе ионной бомбардировки — смещение атомов в низкокоординационные положения на поверхности, наблюдавшееся в настоящей работе, должно приводить к повышению миграционной подвижности и может рассматриваться при феноменологическом описании как радиационно-стимулированное снижение энергии поверхностной самодиффузии.

Список литературы

- [1] Месяц Г.А. Эктоны. Ч. 1. Екатеринбург: Наука, 1993. 184 с.
- [2] Magonov S.N., Whangbo M.H. Surface Analysis with STM and AFM. Berlin: Springer Verlag, 1996. 450 p.
- [3] Фурсей Г.Н., Глазанов Д.В., Баскин Л.М., Евгеньев А.О., Кочерыженков А.В., Полежаев С.А. // Вакуумная микроэлектроника. 1997. Т. 26. № 2. С. 89–96.
- [4] Баскин Л.М., Владимиров Г.Г., Шредник В.Н. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 1999. № 7. С. 67–71.
- [5] Мазилова Т.И. // ЖТФ. 2000. Т. 70. № 2. С. 102–105.
- [6] Knoblauch A., Miller Ch., Kalbitzer S. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 1998. V. B. 139. P. 20–27.
- [7] Dyke W.P., Charbonnier F.M., Strayer R.M., Floyd R., Barbour J.P., Trolan J.K.J. // Appl. Phys. 1960. V. 31. N 5. С. 58–70.
- [8] Елинсон М.И., Васильев Г.Ф. Автоэлектронная эмиссия. М.: Физматгиз, 1958. 340 с.

- [9] Дранова Ж.И., Михайловский И.М. // ФТТ. 1971. Т. 31. № 5. С. 1108–1111.
- [10] *Cavaille J.Y., Drechsler M.* // Surf. Sci. 1978. V. 75. P. 342–354.
- [11] Березняк П.А., Слезов В.В. // Радиотехника и электроника. 1972. № 2. С. 354–358.
- [12] Залужный А.Г., Сокурский Ю.Н., Тебус В.Н. Гелий в реакторных материалах. М.: Энергоатомиздат, 1988. 224 с.
- [13] Герасименко В.И., Дранова Ж.И., Михайловский И.М. // ФТТ. 1983. Т. 25. № 8. С. 2456–2461.
- [14] Лазарев Б.Г., Ксенофонов В.А., Михайловский И.М., Великодная О.А. // ФНТ. 1998. Т. 24. № 3. С. 272–277.
- [15] *Распыление твердых тел ионной бомбардировкой.* Вып. II / Под ред. Р. Бериша. М.: Мир, 1986. 488 с.