

Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ, В.А. КУРНАЕВ, Н.В. МАМЕДОВ,
А.А. ДВОРНОВА, Д.В. КОЛОДКО
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ЭМИССИОННЫЕ СВОЙСТВА МОДЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛА СТЕНКИ ТЯР С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛЕНКОЙ

Измерение эмиссионных свойств с материалов, покрытых тонкими диэлектрическими пленками, является актуальным, поскольку одним из кандидатных материалов ТЯР является бериллий, на поверхности которого легко образуется оксидная диэлектрическая пленка. Поскольку бериллий ядовит, то в качестве модельного материала вместо него в имитационных экспериментах часто используется алюминий. Например, тонкая (4–10 нм) оксидная пленка на поверхности алюминиевого электрода значительно повышает его эмиссионную способность, поскольку не только повышается коэффициент вторичной эмиссии, но и создаются условия для полевой эмиссии [1]. Усиление эмиссии объяснялось изменением толщины этой пленки при конкуренции процессов распыления и образования оксида. Все это приводит к образованию поверхностно плазменных неустойчивостей [2].

Однако в этих экспериментах не было возможности измерить толщину пленки на коллекторе без выноса образца на атмосферу. Таким образом, актуальной задачей является определение *in situ* толщины диэлектрической пленки при измерении ее эмиссионных свойств.

Модернизированная установка Большой Масс-Монохроматор МИФИ (БММ) [3] позволяет с помощью энергоанализатора анализировать толщину тонких поверхностных пленок в диапазоне от 5 до 60 Å, а также проводить элементный анализ поверхности по упруго выбитым и рассеянным положительным и отрицательным ионам непосредственно в процессе травления. Также бомбардировка ионами аргона обеспечивает приемлемую скорость распыления поверхностной пленки, при контролируемом изменении ее толщины.

Для измерения вольт-амперных характеристик мишеней из обращенных к плазме материалов под действием электрических полей, характерных для дебаевского слоя на границе плазмы с поверхностью плазмы, был изготовлен миниатюрный анод, что позволяло расположить его так, чтобы расстояния до краев катода было значительно больше вакуумного промежутка. Вакуумный промежуток был подобран таким образом, чтобы, с одной стороны, была возможность создавать достаточно сильные поля

между катодом и анодом при напряжениях, недостаточных для возникновения паразитных разрядов между анодом и другими частями камеры, а с другой стороны, этот промежуток должен быть достаточно большим, чтобы отраженный ионный пучок мог проходить в энергоанализатор.

Мишень представляла собой кремниевую подложку, на которую методом электронно-лучевого испарения осаждался слой вольфрама толщиной $\sim 150 \text{ \AA}$, а затем слой алюминия, толщиной $\sim 30 \text{ \AA}$. После экспозиции образца на атмосферу пленка алюминия полностью окислялась, переходя в диэлектрическую пленку Al_2O_3 .

На рис. 1а приведены результаты моделирования в коде SCATTER от пучка протонов с энергией 12 кэВ для различных толщин пленки оксида алюминия на вольфраме, а на рис. 1б энергетические спектры, полученные в эксперименте в процессе травления поверхности пучком ионов аргона. Толщина пленки определялась по сопоставлению положений пиков для экспериментального и моделированного спектров.

Для диэлектрических пленок толщиной, соответствующем экспериментальным спектрам, приведенным на рис. 1, проводилось измерение эмиссионных свойств, однако не удавалось при напряженностях поля вплоть до $5 \cdot 10^4 \text{ В/см}$ измерить токи более 1 нА. Предположительно, это связано с отсутствием эмиссионных центров на гладкой поверхности. При увеличении электрического поля до значений выше $6,5 \cdot 10^4 \text{ В/см}$ произошел резкий всплеск тока, после которого токи появились и при напряжениях, при которых до всплеска их не было (рис.2). На этом рисунке приведены ВАХ, последовательно измеренные сразу после всплеска тока: сначала при подъеме, а затем при снижении напряжения между электродами.

Форму ВАХ можно интерпретировать при помощи модели «включения», описанной, например в [4]. В этой модели предполагается, что после превышения определенной напряженности электрического поля в диэлектрической пленке, «включаются» некоторые эмиссионные центры, которые могут эмитировать значительные токи, в том числе и при тех напряженностях внешнего поля, при которых до «включения» центра токов не было. Как видно из графика, характеристики обладают гистерезисом, что, согласно модели, связано с тем, что после снятия напряжения между электродами часть эмиссионных центров «выключается», а часть остается во включенном состоянии. При повторном измерении ВАХ с подъемом напряжения токи появляются при меньших напряжениях, что также сви-

детельствует о том, что часть эмиссионных центров остаются во «включенном» состоянии. После выдержки электродов под напряжением гистерезис ВАХ уменьшается, и она приходит к виду ABC с 2-мя характерными экспонентами. Участок АВ связан с «контактным» ограничением: сопротивление контакта металл-диэлектрик много больше, чем сопротивление при движении электронов по «объему» диэлектрика. Участок ВС связан с ограничением тока при движении по «объему» диэлектрика и его наклон зависит от толщины диэлектрического слоя.

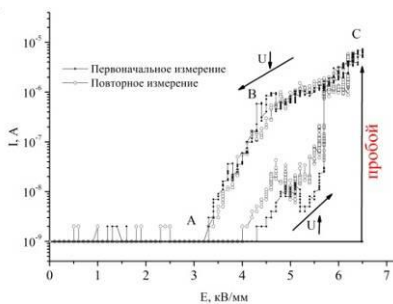
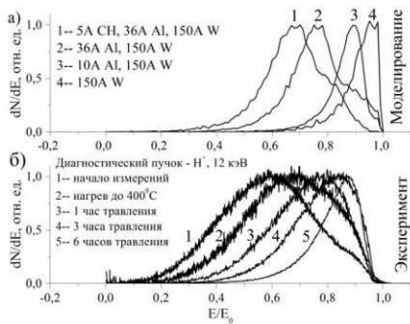


Рис. 1. Моделированные (а) и экспериментальные (б) энергетические спектры отраженных ионов водорода при различной толщине поверхностной пленки

Рис. 2. Вольт-амперные характеристики токов с поверхности, покрытой диэлектрической пленкой

После измерения ВАХ образец был исследован на сканирующем электронном микроскопе VEGA3 TESCAN (рис. 3). Из фотографий видно, что диэлектрическая пленка после всплеска токов отслоилась, а как показано в [5], места контакта диэлектрической пленки с проводящей подложкой могут быть источниками эмиссии электронов при низких напряжениях. Также из фотографий видно, что кромки «островков» на фотографии значительно более светлые, чем подложка, что означает, что они являются источником повышенной электрон-электронной эмиссии. Более детальные измерения на этом микроскопе показали, что коэффициент электрон-электронной эмиссии с кромок в пять раз выше, чем с подложки.

Элементный анализ показал, что темные области (подложка состоит из кремния), а в пленках можно детектировать лишь наличие вольфрама, что

говорит о том, что отслоилась вся (150А W и ~ 30А Al(O)) нанесенная пленка.

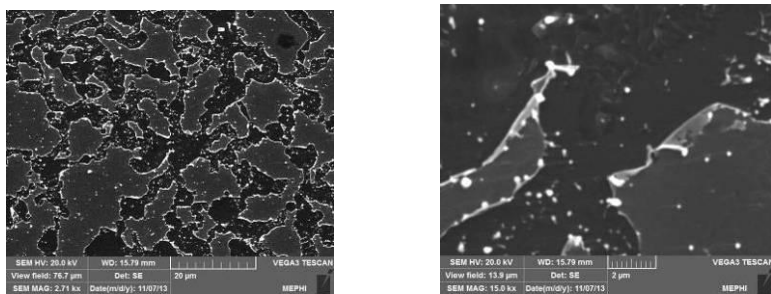


Рис. 3. Фотографии поверхности образца, полученные на сканирующем электронном микроскопе VEGA3 TESCAN, после всплеска токов полевой эмиссии

Таким образом, в результате работы опробована методика *in situ* измерения эмиссионных свойств катода с тонкой диэлектрической пленкой на поверхности при контроле ее толщины и состава, а также при изменении ее толщины. Показано, что наблюдаемые токи эмиссии появлялись только после пробоя диэлектрической пленки, после которого пленка стала «островковой». ВАХ измеренных токов были интерпретированы согласно модели «включения». Измерение на сканирующем электронном микроскопе показало, что коэффициент вторичной электрон-электронной эмиссии с краев «островков» пленки в пять раз выше, чем с основной поверхности. Таким образом, токи полевой эмиссии даже с макроскопически гладкой поверхности, с участками тонкой диэлектрической пленки на ней, могут быть сравнимы с токами с поверхностей, обладающих развитым рельефом.

- [1] К.М. Гуторов и др, Изв. РАН. Сер. физ. 74(2) (2010) 208.
- [2] V.Kurnaev et al, Emission properties of PFCs under plasma and its components impact, 20th International conference «Plasma Surface Interaction» - Aachen, 2012, p.233.
- [3] Мамедов Н.В. и др, Изв. РАН. Сер. физ. 76(6) (2012) 781.
- [4] R.V.Latham, High voltage vacuum insulation, Academic press, 1995.
- [5] Д. Н. Синельников и др, Ядерная физика и инжиниринг 4(7) (2013) 631.