



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.9.11>

УДК: 537.533

ПОЛЕВАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ОКСИДНОГО ТЕРМОКАТОДА

Лобанов В.М., Шешин Е.П., Лобанов С.В., Чадаев Н.Н.

Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141700, Долгопрудный, Московской обл., Институтский пер., 5

Статья поступила в редакцию 30 мая 2023 г.

Аннотация. Представлены результаты детального измерения динамики изменения энергетических спектров эмитированных электронов неактивированного и активированного оксидных термокатодов при увеличении напряжения эмиссии и температурах катодов ~ 590 °С и ~ 600 °С, изменения спектров соответствовали модели пятнистого катода. Представлены результаты измерения энергетического спектра эмитированных электронов отдельного элементарного эмитирующего пятна оксидного термокатаода, спектр имел гауссовскую форму и отличался рекордной узостью ширины на полувысоте равной 120 мэВ.

Ключевые слова: оксидный термокатод, термоэмиссия, автоэмиссия, автокатод, электронная спектроскопия, электронная структура.

Автор для переписки: Лобанов Вячеслав Михайлович, lobanov.vm@mipt.ru

Введение

Метод полевой электронной спектроскопии позволяет изучать электронную структуру объема и поверхности эмиссионного материала вблизи уровня Ферми, обладает уникальными возможностями анализа электронной структуры наноразмерных областей объема и поверхности материала в условиях эмиссии электронов, воздействия электрического поля, электрического тока и температуры, адсорбции и десорбции атомов и молекул, позволяет измерять вольт-амперные характеристики зондируемых нанообластей в режиме счета электронов. Условия анализа материалов столь близки к условиям термоэлектронной эмиссии, что метод полевой электронной спектроскопии естественным образом применим для изучения эмиссионных свойств кристаллов оксида бария и его энергетической электронной зонной структуры.

В настоящей работе мы докладываем результаты продолжения исследования [1] эмиссионных свойств оксидного термокатода на основе тройного карбоната щелочноземельных металлов методом полевой электронной спектроскопии. Были проведены детальные изучения изменений энергетического спектра эмитированных электронов при увеличении эмиссионного напряжения. Использовались две методики подготовки термокатодов предварительно обезгаженных прогревом: по первой подавалось высокое эмиссионное напряжение и постепенно повышался накал до момента появления тока эмиссии, после чего начиналось его исследование методом полевой электронной спектроскопии; по второй катод подвергался процедурам термо- и токовой активации в соответствии с технологическими рекомендациями и затем исследовался методом полевой электронной спектроскопии. В качестве образцов использовались серийные катодно-подогревные узлы торцевого типа диаметром 1 мм с эмиссионным слоем на основе тройного карбоната щелочноземельных металлов. Методика измерений докладывалась в [1] и осталась неизменной.

1. Спектроскопия неактивированного оксидного термокатада

На обезгаженный, не подвергавшийся термоактивации оксидный термокатод, подавалось высокое напряжение и постепенно повышался ток накала. Самопроизвольный рост эмиссионного тока, указывающий на начало процесса токовой активации, начинался при температуре ~ 640 °С. Измеренный энергетический спектр эмитированных электронов состоял из единственного пика гауссовской формы с шириной на полувысоте равной 0,3 эВ и свидетельствовал об эмиссии электронов высокой монохроматичности. Для уменьшения нагрузки на вторично-электронный умножитель энергоанализатора ток накала и температура катода уменьшались до ~ 590 °С.

На рис. 1а приведена динамика изменения энергетического спектра эмитированных электронов в диапазоне анодных напряжений энергоанализатора $U_a = 2250 \div 5000$ В от однопиковой формы при $U_a = 2250$ В до формы с дополнительным низкоэнергетическим пиком, при $U_a = 5000$ В, расположенным на $\sim 0,4$ эВ ниже основного.

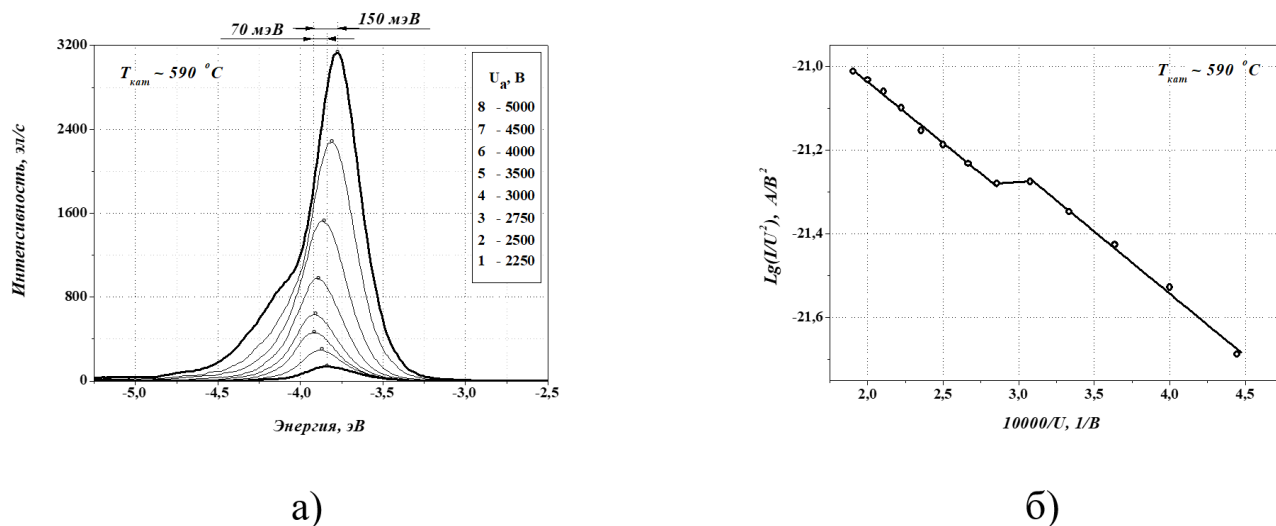


Рис. 1. Энергетический спектр эмитированных электронов и вольт-амперная характеристика зондируемой области неактивированного оксидного термокатада при температуре ~ 590 °С

Соответствующая динамике изменения спектра вольт-амперная характеристика участка поверхности зондируемого энергоанализатором приведена на рис. 1б. В координатах Фаулера-Нордгейма ВАХ состояла из двух

прямолинейных участков одинакового наклона с падением эмиссии после $U_a = 3250$ В и смещением участка высоких напряжений в область меньших токов. Линейные участки ВАХ указывали на автоэлектронный режим эмиссии зондируемой области поверхности, а излом в область меньших токов, согласно модели пятнистого катода, указывал на деактивацию эмиссии некоторых пятен зондируемой области и суперпозицию спектра. Если для активированного оксидного катода в [1] не удавалось построить зондовую ВАХ вследствие поочередной активации и деактивации эмиссионных пятен зондируемой области, то для неактивированного катода это оказалось возможным вследствие меньшего количества активированных пятен в зондируемой области и значительно меньших изменений спектра и деактивации эмиссионных пятен в диапазоне изменения анодных напряжений.

Вместе с падением эмиссии в области излома ВАХ наблюдалась необычная динамика энергетического смещения спектра при увеличении анодного напряжения: в диапазоне $U_a = 2250 \div 2750$ В спектр нормальным образом смещался в область низких энергий на ~ 70 мэВ, а далее, в диапазоне $U_a = 2750 \div 5000$ В, – в область высоких энергий на ~ 150 мэВ, см. рис. 1а. Подобное смещение энергетического спектра эмитированных электронов оксидного термокатаода отмечалось в работе [2] и в качестве возможных причин предполагались увеличение плотности поверхностных состояний, электронной экранировки, проводимости поверхности вследствие токовой активации. Однако, обнаружение этапа деактивации эмиссии пятен при увеличении напряжения эмиссии потребовало иного объяснения, лежащего в рамках модели пятнистого катода.

2. Спектроскопия активированного оксидного термокатаода

Были проведены повторные измерения энергетического спектра эмитированных электронов активированного оксидного термокатаода из той же области зондирования поверхности, что и в работе [1], с целью установления его детальных изменений в диапазоне анодных напряжений $U_a = 400 \div 1500$ В.

Измеренные спектры, подобно описанным в [1,2] показывали хорошую электронную экранировку эмиссионной поверхности, при увеличении напряжения эмиссии их ведущий высокоэнергетический край почти не сдвигался в область низких энергий, но сами спектры расширялись в низкоэнергетическую область, превращаясь из узкого однопикового в широкие многопиковые.

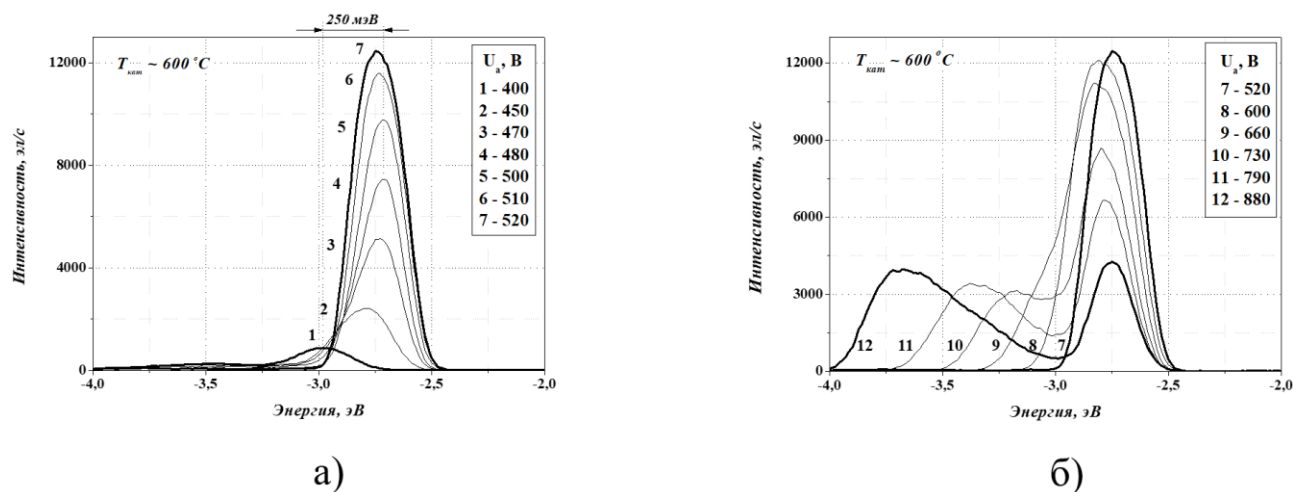


Рис. 2. Динамика изменения энергетического спектра эмитированных электронов оксидного термокатода при увеличении анодного напряжения энергоанализатора U_a , показывающая этапы активации, роста и деактивации эмиссии пятен, формирующих спектр

На рис. 2а представлена динамика изменения спектра при увеличении анодного напряжения энергоанализатора от 400 В до 520 В. Амплитуда спектра и эмиссионный ток зондируемой области увеличивались, но энергетическое смещение спектра было необычным: в диапазоне $U_a = 400 \div 480$ В спектр смещался в область высоких энергий на 250 мэВ (спектры 1-4 на рис. 2а), а затем, при $U_a = 500 \div 600$ В, – нормальным образом в область низких энергий на ~ 50 мэВ (спектры 5-8 на рис. 2а и 2б). Немонотонно изменялась ширина пика на полувысоте: вначале она возрастала до ~ 270 мэВ при $U_a = 520$ В, а затем уменьшалась до ~ 220 мэВ при $U_a = 790$ В (см. рис. 2б). При анодном напряжении энергоанализатора $U_a = 520$ В амплитуда пика достигала максимального значения, а при дальнейшем увеличении напряжения падала, указывая на деактивацию эмиссии пятен формирующих пик, спектр уширялся в область низких энергий, образуя дополнительный низкоэнергетический пик. При

дальнейшем увеличении анодного напряжения дополнительный пик продолжал смещаться в область низких энергий и спектр становился широким многопиковым. Описанная динамика изменения спектра при увеличении анодного напряжения энергоанализатора адекватно объяснима лишь моделью пятнистого катода и суперпозицией спектра от нескольких эмиссионных пятен, локализованных в области зондирования и отличающихся значениями напряжений токовой активации и падениями напряжения на внутренних сопротивлениях.

Поскольку эмиссионные пятна, зоны поверхностных состояний, открывались на диэлектрической поверхности оксида бария в результате ее токовой активации, необходимо было определить доли электронов в спектре, эмитированных из объема диэлектрика и из зон поверхностных состояний. Был проведен эксперимент по ориентационной зависимости спектра, измерены серии спектров после поворота катода на $\pm 4^\circ$ в горизонтальной плоскости относительно оси энергоанализатора.

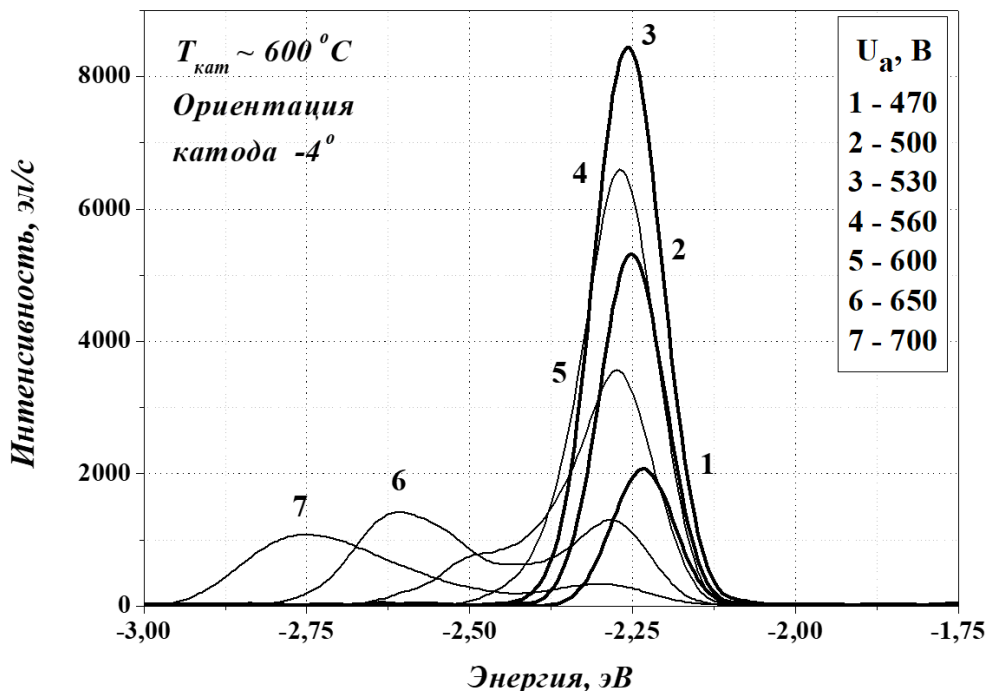


Рис. 3. Динамика изменения энергетического спектра эмитированных электронов отдельного эмиссионного пятна, показывающая активацию, рост и падение эмиссии пятна при увеличении анодного напряжения от 470 В до 700 В.

Динамика изменения измеренных спектров осталась прежней, подобной приведенной на рис. 2 и в [1], но ширина измеренных спектров на полувывоте оказалась рекордно узкой ~ 120 мэВ и энергетическое смещение спектра с ростом напряжения эмиссии стало нормальным, см. рис. 3, – с ростом анодного напряжения энергоанализатора спектр монотонно смещался в область низких энергий. Очевидно, изменение ориентации катода на $\pm 4^\circ$ приводило к изменению взаимной экранировки пятен и удалению некоторых из них за пределы области зондирования, вследствие чего спектры становились узкими с нормальным смещением в область низких энергий.

Рекордная узость спектра и его нормальное монотонное смещение в область низких энергий с ростом анодного напряжения энергоанализатора указывали на отсутствие суперпозиции и получение спектра отдельного эмиссионного пятна в модели пятнистого оксидного термокатода. Т.е. спектры 1-7 на рис. 3 показывали динамику изменения спектра и эмиссионной способности отдельного эмиссионного пятна на эмиссионной поверхности зерна оксидного термокатода при увеличении напряжения эмиссии от момента активации (спектр 1) и возрастания эмиссии (спектры 2 и 3) до начала падения эмиссии, активации второго эмиссионного пятна и смещения его накладывающегося спектра (спектр 4), продолжения падения эмиссии и формирования вторым эмиссионным пятном дополнительного низкоэнергетического пика (спектр 5), дальнейшего падения эмиссии первого пятна и продолжения смещения спектра второго пятна в область низких энергий (спектры 6 и 7). Смещение максимума спектра отдельного эмиссионного пятна в диапазоне изменения анодного напряжения $470 \div 700$ В составило 70 мэВ, а смещение дополнительного максимума, – максимума накладывающегося спектра от второго пятна достигло 500 мэВ, свидетельствуя при значительно меньшем эмиссионном токе (меньшей амплитуде пика) о значительно большем его внутреннем сопротивлении.

Установленная нормальная динамика изменения и энергетического смещения спектра отдельного эмиссионного пятна позволила заключить, что

необычные смещения пиков спектров активированного и неактивированного катодов в область высоких энергий при увеличении напряжения эмиссии, см. рис. 1а и рис. 2а, были обусловлены суперпозицией узких спектров от нескольких эмиссионных пятен, локализованных в области зондирования и обладавших близкими значениями напряжений активации и падений напряжения на внутренних сопротивлениях в начальный момент эмиссии.

Детальное измерение динамики изменения спектров от отдельного и от нескольких эмиссионных пятен показало, что в эмиссионных свойствах пятен оксидного термокатада кроме этапов активации и роста эмиссии присутствует этап деактивации эмиссии, который выражается в изломе зондовых ВАХ неактивированного катода в область меньших токов при высоких напряжениях и невозможности построения зондовых ВАХ для активированного катода.

Таким образом, полученные результаты подтверждают модель пятнистого катода для оксидного термокатада, указывая на эмиссию множества пятен, находящихся в состояниях различной степени активации, отличающихся напряженностью электрических полей над пятнами, напряженностью электрических полей и токов активации и деактивации, внутренними сопротивлениями.

Заключение

Методом полевой электронной спектроскопии исследованы эмиссионные свойства оксидного термокатада на основе тройного карбоната щелочноземельных металлов при температуре ~ 600 °С.

Установлено соответствие эмиссии оксидного термокатада модели пятнистого катода, в которой эмиссионные пятна находятся в состояниях различной степени активации и деактивации эмиссии, зависящих от величины анодного напряжения.

Измерен энергетический спектр эмитированных электронов зондируемой области оксидного термокатада, представляющий собой суперпозицию спектров эмиссионных пятен, локализованных в области зондирования, отличающихся

внутренними сопротивлениями и находящихся в состояниях различной степени активации и деактивации эмиссии.

Измерен энергетический спектр эмитированных электронов отдельного эмиссионного пятна оксидного термокатада, имеющий гауссовскую форму и отличающийся рекордной узостью ширины на полувысоте равной 120 мэВ, нормальным малым и монотонным смещением в область низких энергий с ростом напряжения эмиссии, подобно тому, как это имеет место при полевой электронной спектроскопии углеграфитов, металлов и низкоомных полупроводников [3,4].

Литература

1. Лобанов В.М., Шешин Е.П., Чадаев Н.Н., Лобанов С.В. Особенности эмиссии и полевая электронная спектроскопия оксидного термокатада. // Журнал радиоэлектроники. 2023. №4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.4.6>
2. Шешин Е.П., Лобанов В.М., Чадаев Н.Н., Лобанов С.В. Полевая электронная спектроскопия оксидных катодов. // Журнал радиоэлектроники. 2022. №4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.4.3>
3. K. H. Bayliss and R. V. Latham. An Analysis of Field-Induced Hot-Electron Emission from Metal-Insulator Microstructures on Broad-Area High-Voltage Electrodes. // Proceedings of the Royal Society. Lond. A 1986 V403, P 285-311. <https://doi.org/10.1098/rspa.1986.0013>
4. Gadzuk J. W. and Plummer E. W. Field Emission Energy Distribution (FEED). // Reviews of Modern Physics. 1973. V.45. N 3. P.487-548. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.45.487>

Для цитирования:

Лобанов В.М., Шешин Е.П., Лобанов С.В., Чадаев Н.Н. Полевая электронная спектроскопия оксидного термокатада. // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.9.11>