

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.9.8>

УДК: 537.533

## ПОЛЕВАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-НАПЫЛЕННОГО ОКСИДНОГО ТЕРМОКАТОДА

Лобанов В.М.<sup>1</sup>, Будзинский Ю.А.<sup>2</sup>, Шешин Е.П.<sup>1</sup>,  
Жабин Г.А.<sup>2</sup>, Лобанов С.В.<sup>1</sup>, Чадаев Н.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет),  
141700, Долгопрудный, Московской обл., Институтский пер., 5

<sup>2</sup>НПП «Исток» им. А.И. Шокина,  
141190, Фрязино, ул. Вокзальная, 2а

Статья поступила в редакцию 24 мая 2024 г.

**Аннотация.** Представлены результаты исследования эмиссионных характеристик молекулярно-напыленного оксидного термокатода на основе тройного карбоната щелочноземельных металлов с толщиной эмиссионного слоя  $\sim 1$  мкм в диапазоне рабочих температур  $590 \div 730$  °С. Результаты находятся в хорошем согласии с полученными ранее для оксидного термокатода с толщиной эмиссионного слоя  $\sim 100$  мкм, наносимого методом пульверизации, и соответствуют модели «пятнистого катода» – суперпозиции эмиссии пятен, находящихся на разных этапах активации. Детализировано представление о явлении активации, протекающем при заданной температуре в некотором интервале значений напряженности электрического поля на поверхности эмиссионных пятен как при повышении, так и при понижении анодного напряжения. Получены энергетические спектры эмитированных электронов отдельного эмиссионного пятна с шириной на полувысоте  $\sim 100$  мэВ. Измерены величины изменения потенциала

эмитирующей поверхности катода в пределах зондируемой области  $\sim 0,9$  В, и падения потенциала на эмиссионном слое под зондируемой областью  $\sim 4,1$  В.

**Ключевые слова:** оксидный термокатод, термоэмиссия, термоактивация, токовая активация, электронная спектроскопия, электронная структура.

**Автор для переписки:** Лобанов Вячеслав Михайлович, [lobanov.vm@mipt.ru](mailto:lobanov.vm@mipt.ru)

## Введение

Исследование оксидного термокатаода с эмиссионным слоем, нанесенным пульверизацией, методом полевой электронной спектроскопии показало, что его эмиссия соответствует модели «пятнистого катода» и полный ток катода является суперпозицией токов эмиссионных пятен – множества выступов на поверхности, дающих прямолинейные вольт-амперные характеристики в координатах Фаулера-Нордгейма, см. рис. 1а, [1]. Было установлено, что эмиссионный процесс пятен модулируется явлением активации, протекающим в три этапа при увеличении напряжения эмиссии: активация и возрастание тока эмиссии, максимальная эмиссия, деактивация и падения тока эмиссии пятен до нуля [2]. При этом энергетический спектр эмитированных электронов катода оказывается суперпозицией спектров множества пятен, находящихся на разных этапах активации. По ходу экспериментов спектры отдельных пятен и весь спектр катода в целом постепенно смещались в область низких энергий.

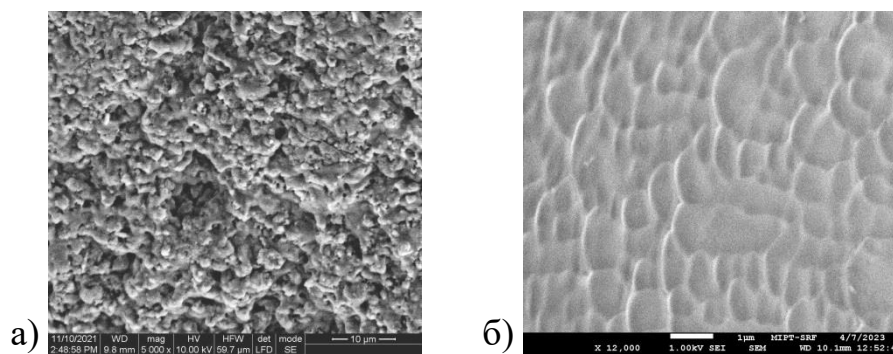


Рис. 1. Поверхность эмиссионного слоя оксидного термокатаода:

- а) нанесенного методом пульверизации, толщина  $\sim 100$  мкм
- и б) методом молекулярного напыления, толщина  $\sim 1$  мкм.

После исследования по газовыделению эмиссионного слоя и почти ста часов токоотбора 1 мА это смещение достигало  $\sim 9$  эВ и связывалось с постепенным разложением карбонатов, изменением состава и увеличением электрического сопротивления эмиссионного слоя, толщина которого была велика ( $\sim 100$  мкм). Было высказано предположение, что уменьшение толщины эмиссионного слоя и повышение его однородности повлечет уменьшение смещения спектров пятен в область низких энергий.

## 1. Спектроскопия молекулярно-напыленного оксидного термокатода

В настоящем исследовании в качестве образцов использовались миниатюрные катодно-подогревные узлы, изготовленные на основе серийных с толщиной эмиссионного слоя  $\sim 1$  мкм нанесенного по технологии молекулярного напыления на вольфрам-рениевые сферы диаметром 100 мкм. Исследование поверхности эмиссионного слоя в атомно-силовом и электронном микроскопах показало высокую ее однородность при размерах зерен  $0,3 \div 2$  мкм (см. рис. 1б). В отличие от оксидных катодов, получаемых пульверизацией, катафорезом и другими способами с плотностью покрытия  $2,8-3$  г/см<sup>3</sup> и шероховатостью 2-3 мкм, молекулярно-напыленный слой имеет плотность  $3,9-4,1$  г/см<sup>3</sup>, обладает хорошим сцеплением с керном, отсутствием в покрытии органического вещества биндера, гладкостью поверхности и высокой эмиссионной однородностью [3,4].

В вакуумной камере стенда испытываемые катоды сначала обезгаживались при температуре  $\sim 200$  °С, а затем активировались двумя ранее описанными в [1,2] методами: на первом этапе исследования – активацией током – постепенным увеличением тока накала при высоком анодном напряжении до момента появления тока эмиссии и в соответствии с технологическими рекомендациями – на втором. Давление остаточных газов при измерениях не превышало  $2 \times 10^{-9}$  Торр.

Электронное изображение первого образца оказалось заключенным в яркое кольцо, образованное электронами, эмитировавшими с периферии

сферы катода, изображение лобовой части сферы внутри кольца было неярым даже после полной активации катода. Соотношение диаметров кольца изображения и сферы катода позволило оценить увеличение электронного проектора и размеры зондируемой области катода, оказавшейся близкой к размерам самых малых зерен эмиссионного слоя.

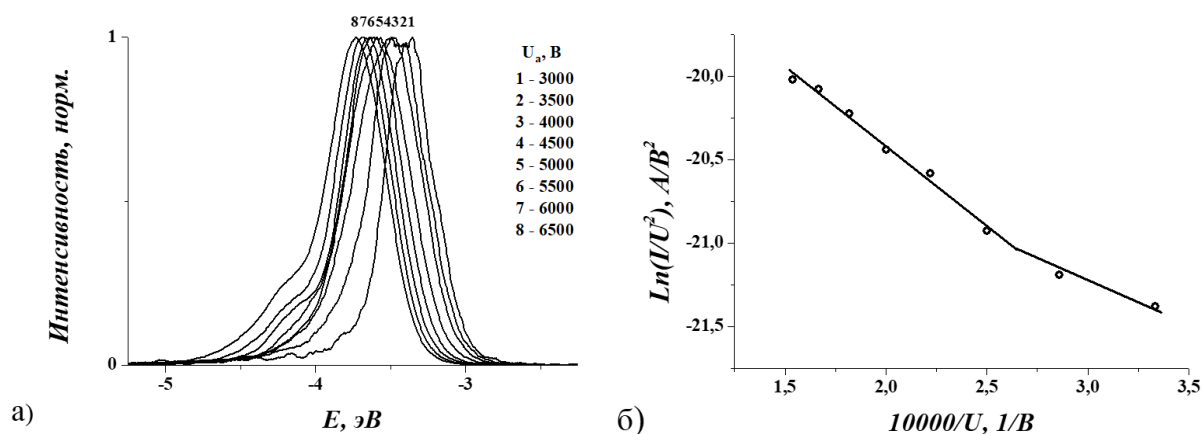


Рис. 2. а) Изменение формы и положения энергетического спектра эмитированных электронов первого образца при увеличении анодного напряжения энергоанализатора;  
 б) соответствующая спектрам зондовая вольт-амперная характеристика, температура катода  $640\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Динамика изменения энергетического спектра эмитированных электронов при температуре катода  $640\text{ }^{\circ}\text{C}$  и увеличении напряжения на аноде энергоанализатора в диапазоне  $U_a = 3000 \div 6500\text{ В}$  представлена на рис. 2а. Она полностью отвечает модели пятнистого катода и суперпозиционной природе его характеристик [1,2]. Из исходного положения в начале исследования  $\sim -3,3\text{ эВ}$  спектр монотонно смещался в область низких энергий при неравномерных перемещениях его высоко- и низкоэнергетических склонов и неравномерном изменении его ширины на полувысоте – то увеличении от  $0,38\text{ эВ}$  до  $0,50\text{ эВ}$  при  $U_a = 3000 \div 4000\text{ В}$ , то уменьшении от  $0,50\text{ эВ}$  до  $0,40\text{ эВ}$  при  $U_a = 4500 \div 5500\text{ В}$  и вновь увеличении от  $0,40\text{ эВ}$  до  $0,45\text{ эВ}$  при  $U_a = 6000 \div 6500\text{ В}$ . Немонотонность перемещения склонов спектра, появление дополнительного пика, излом зондовой вольт-амперной характеристики указывали на присутствие

процессов активации-деактивации эмиссионных пятен зондируемой области. Зарегистрированное исходное положение спектра  $\sim -3,3$  эВ использовалось далее в исследовании для отсчета смещения спектров в область низких энергий.

Для выделения эмиссии электронов, эмитирующих из лобовой части сферы, второй катод устанавливался внутри отверстия никелевого супрессора  $\varnothing 0,8$  мм, находившегося под потенциалом катода. Это позволило уменьшить эмиссионное изображение катода и избежать формирования яркого кольца. Методика измерений оставалась прежней: вначале при активации током и малых накалах, а затем после полной термо- и токовой активации. Изучение процесса активации и эмиссии отдельных пятен требует уменьшения зондового отверстия энергоанализатора, увеличения расстояния катод-анод и применения токовой активации при малых температурах для активации минимального количества пятен. Мы использовали два последних приема.

На рис. 3 представлено изменение энергетического спектра эмитированных электронов при низких анодных напряжениях и температуре катода  $590$  °С: наблюдалась динамика изменения, установленная ранее [1,2], когда при увеличении анодного напряжения спектр начинает расширяться в область низких энергий вследствие активации новых пятен с меньшим форм-фактором и бóльшим внутренним сопротивлением. При  $U_a = 0,52$  кВ и  $T_{\text{кат}} = 590$  °С спектр имел наименьшую ширину на полувысоте равную  $\sim 100$  мэВ, и необходимо отметить, что для катода изготовленного методом пульверизации наименьшая ширина на полувысоте  $\sim 120$  мэВ была получена практически при тех же условиях эксперимента и эмиссии  $U_a = 0,53$  кВ и  $T_{\text{кат}} = 600$  °С [2].

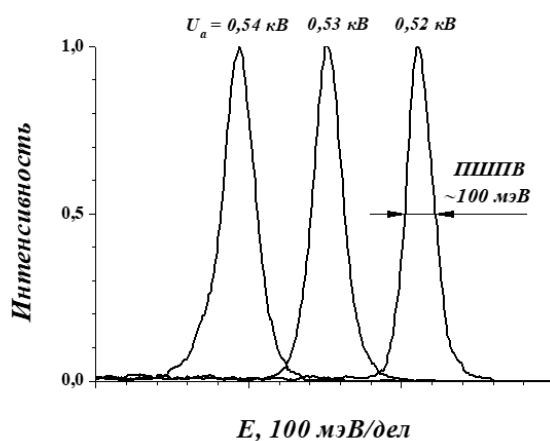


Рис. 3. Расширение энергетического спектра эмитированных электронов в область низких энергий при увеличении анодного напряжения, температура катода  $590$  °С.

Ниже представлены результаты спектральных исследований катода после его полной термо- и токовой активации. На рис. 4 представлена динамика изменения спектра при уменьшении анодного напряжения в диапазоне от  $1,75$  кВ до  $0,80$  кВ и температуре катода  $710$  °С. Вначале, несмотря на уменьшение анодного напряжения, амплитуда спектра увеличивалась, т.е. увеличивался ток эмиссии пятен (спектры 1-4 на рис. 4а). Это объяснимо в рамках модели активацией пятен с бóльшим форм-фактором, которые при бóльших значениях анодного напряжения были деактивированы. При  $U_a = 1,60$  кВ амплитуда спектра, т.е. ток эмиссии пятен, достигала максимума и при дальнейшем понижении напряжения монотонно падала до нуля при

$U_a = 0,85$  кВ вследствие деактивации исходных пятен (спектры 5-13 на рис. 4б и 14-16 на рис. 4в). Но при  $U_a = 1,20$  кВ начиналась активация и рост эмиссии пятен с еще бóльшим форм-фактором, но с бóльшими внутренними сопротивлениями, что приводило к сдвигу спектра на  $\sim 0,5$  эВ в область низких энергий (спектры 10'-13' на рис. 4б). При  $U_a = 0,90$  кВ активация и эмиссия этих пятен достигали максимума (спектры 14'-16' на рис. 4в), и при дальнейшем падении анодного напряжения начиналась их деактивация и падение эмиссии (спектры 16'-18' на рис. 4в).

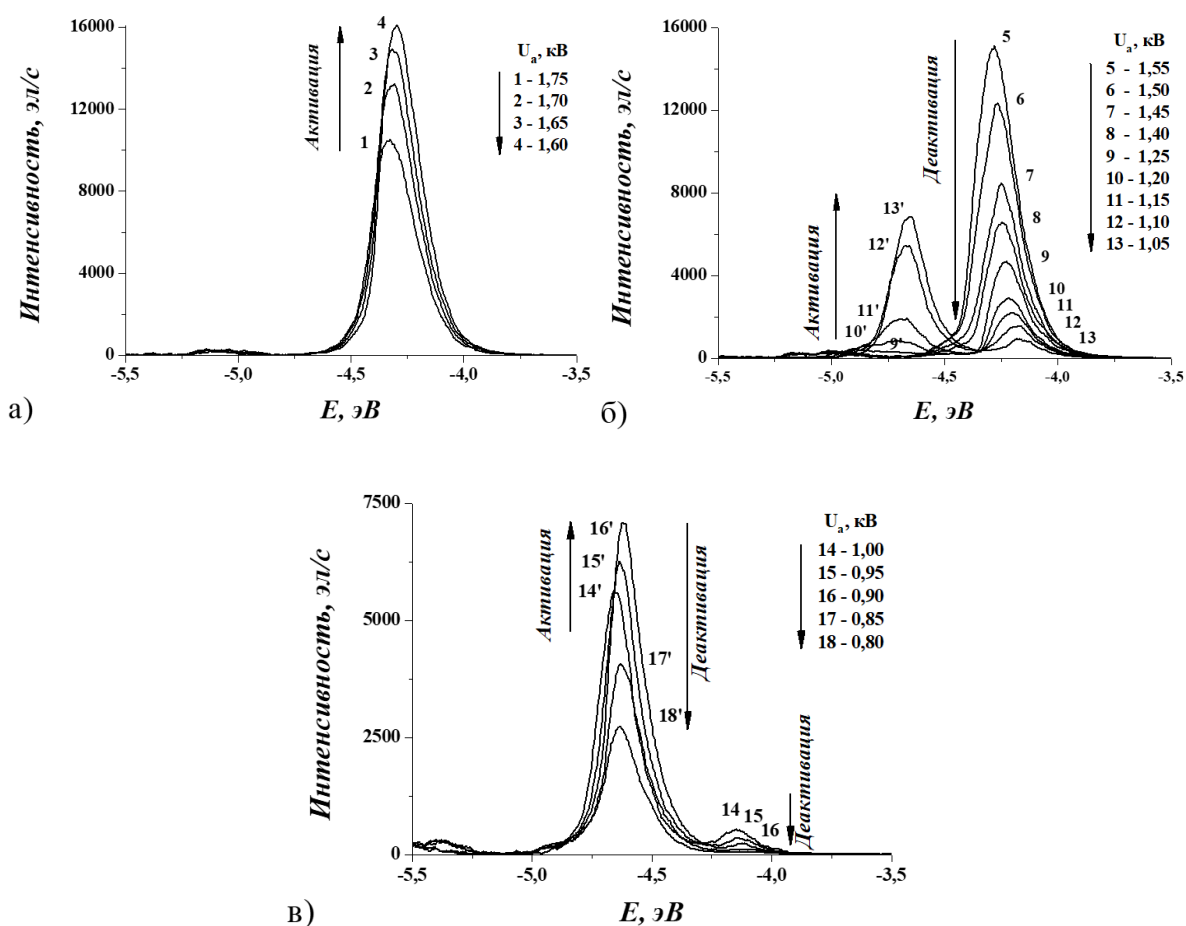


Рис. 4. Влияние процессов активации-деактивации эмиссионных пятен на формирование и смещение энергетического спектра эмитированных электронов второго образца на  $\sim 0,5$  эВ в область низких энергий при уменьшении анодного напряжения в диапазоне  $1,75 \div 0,80$  кВ и температуре катода  $710$  °С.

Несмотря на суперпозиционный характер динамики спектра на рис. 4, смещение пиков во всем диапазоне изменения анодного напряжения не зависело от активации и деактивации пятен, роста и падения их эмиссионных токов и было направлено в область высоких энергий, что соответствовало падению полного тока эмиссии катода при падении анодного напряжения. Начальное положение спектра  $\sim -4,3$  эВ вследствие деактивации исходных и активации новых пятен изменилось на положение  $\sim -4,7$  эВ и смещение спектра от начального положения скачком увеличилось от  $\sim 1$  эВ до  $\sim 1,4$  эВ.

С увеличением температуры катода активация охватывает все большее количество пятен на зондируемой поверхности, на рис. 5 представлен

процесс активации-деактивации, роста и падения эмиссии зондируемого участка катода при увеличении напряжения анода в диапазоне  $0,41 \div 1,50$  кВ и температуре  $\sim 730$  °С.

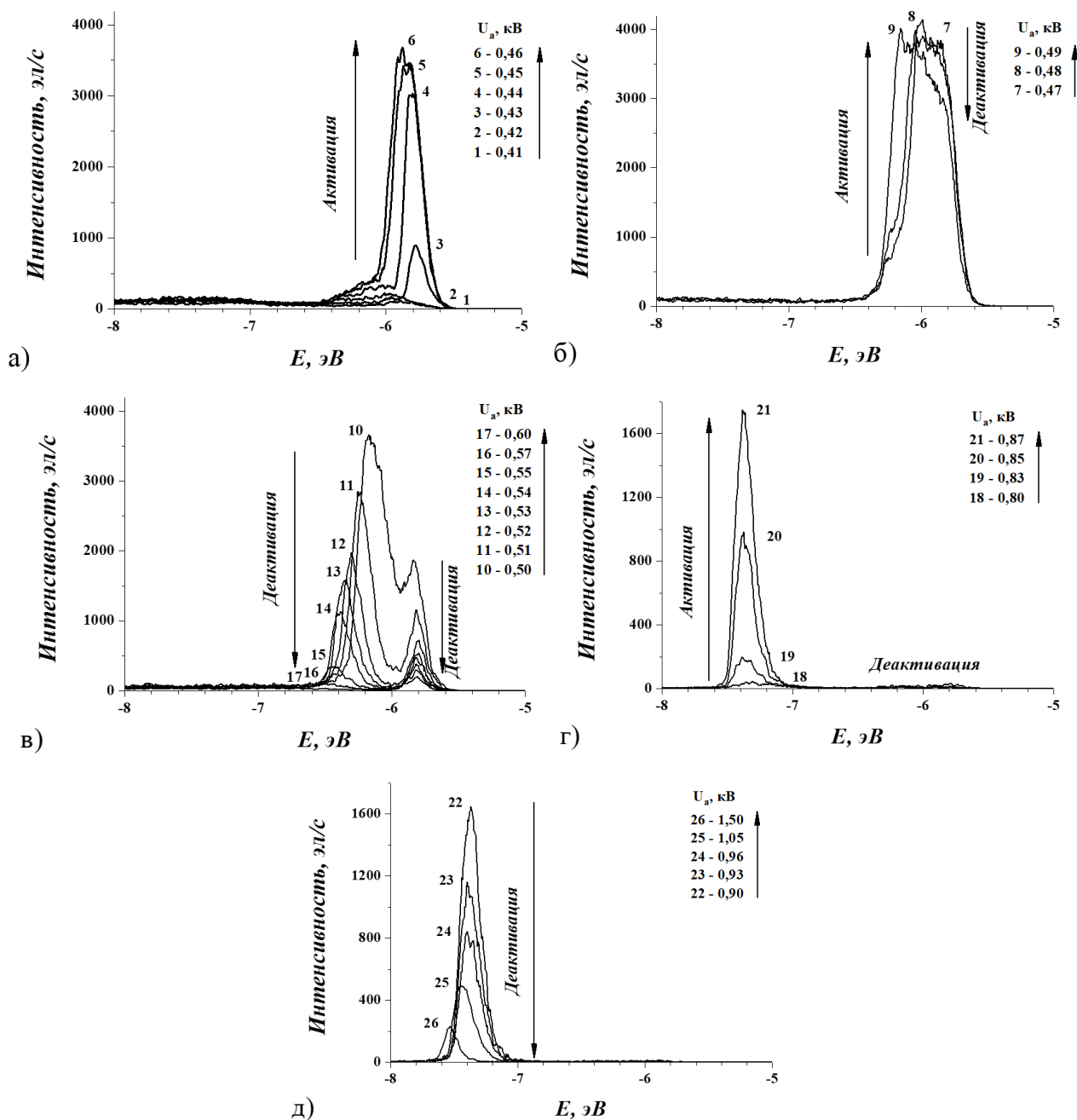


Рис. 5. Влияние процессов активации-деактивации эмиссионных пятен на формирование и смещение энергетического спектра эмитированных электронов в двух интервалах энергии  $-5,5 \div -6,5$  эВ и  $-7,1 \div -7,6$  эВ при увеличении анодного напряжения в диапазоне  $0,41 \div 1,50$  кВ и температуре катода  $730$  °С.



На рис. 5а можно проследить как при анодных напряжениях  $0,41 \div 0,46$  кВ в интервале энергий  $-5,5 \div -6,5$  эВ возникала небольшая предварительная эмиссия (спектры 1,2 и др. на рис. 5а). Эта предварительная эмиссия предшествовала росту (активации) эмиссии, возникавшей при  $U_a = 0,43$  кВ у пятен с наибольшим форм-фактором и наименьшим внутренним сопротивлением (спектр 3 на рис. 5а). С ростом анодного напряжения активированная эмиссия развивалась на пятна с меньшим форм-фактором и бóльшими внутренними сопротивлениями (спектры 4-6 на рис. 5а). Это приводило к формированию суперпозиционного спектра катода, расширявшегося в область низких энергий. При напряжениях  $0,47 \div 0,49$  кВ активация охватывала весь интервал энергий  $-5,5 \div -6,5$  эВ, ток эмиссии пятен достигал максимальных значений, а полная ширина спектра на полувысоте максимальной величины  $\sim 0,6$  эВ (спектры 7-9 на рис. 5б). Далее, в интервале анодных напряжений  $0,50 \div 0,80$  кВ начиналась деактивация и падение токов эмиссии пятен до нуля (спектры  $10 \div 17$  на рис. 5в и 18 на рис. 5г), а полная ширина спектра у основания достигала  $\sim 1$  эВ. Увеличение анодного напряжения в интервале  $0,80 \div 1,5$  кВ приводило к смещению спектра в область низких энергий на  $\sim 1$  эВ, активации и росту эмиссии пятен в интервале энергий  $-7,1 \div -7,6$  эВ с еще меньшим форм-фактором и бóльшими внутренними сопротивлениями (спектры  $18 \div 21$  на рис. 5г). Затем происходила их деактивация и падение эмиссии (спектры  $22 \div 26$  на рис. 5д).

В представленной динамике изменения спектра независимо от активации и деактивации пятен, роста и падения их эмиссионных токов смещение было направлено в область низких энергий и соответствовало росту полного тока эмиссии катода при увеличении анодного напряжения. Объяснить эти смещения спектров (см. рис. 4 и 5) в рамках модели пятнистого катода позволяет детальное рассмотрение динамики их изменения во взаимосвязи с процессами активации-деактивации эмиссии: при повышении анодного напряжения в начальный момент эмиссии активируется группа пятен с наибольшим форм-фактором и наименьшими

внутренними сопротивлениями, а при понижении анодного напряжения, наоборот, активируется группа пятен с наименьшим форм-фактором (деактивированные до того) и большими внутренними сопротивлениями. По мере увеличения/уменьшения напряжения пятна последовательно достигают этапов максимальной эмиссии и деактивации. В результате суперпозиционный спектр при повышении анодного напряжения смещается в область низких энергий, а при понижении анодного напряжения – в область высоких энергий.

Другая важная деталь процесса активации проявилась в регистрации некой предварительной эмиссии, предшествующей активации, которую можно наблюдать на рис. 5а у всех спектров начиная с самых низких анодных напряжений. Эта эмиссия обозначила весь интервал энергий, в котором затем протекала активация пятен, т.е. состояние предварительной эмиссии испытывали все активируемые пятна и уже на этом этапе были установлены смещения всех эмиссионных пятен, еще до их активации и появления индивидуальных токов активированной эмиссии. Эта же предварительная эмиссия наблюдалась и во втором интервале энергий на рис. 5а и 5д, в котором затем протекала активация пятен и возрастала эмиссия. Т.е. динамика изменения спектров на рис. 4 и 5 показывала, что направления смещения и величина смещений спектров эмиссионных пятен задавались уже на этапе предварительной эмиссии до активации пятен и не зависели от их активированных индивидуальных токов эмиссии.

В отличие от энергетических спектров автоэлектронов одноострийных катодов из металлов и полупроводников, измеренные спектры оксидных катодов являются суперпозиционными, результатом наложения узких спектров (с ПШПВ  $\sim 100$  мэВ) множества пятен, локализованных в зондируемой области поверхности. Полная ширина этого суперпозиционного спектра у основания (ПШОС) за вычетом краев ( $\sim 100$  мэВ вследствие действия процессов активации-деактивации) дает величину изменения потенциала на эмитирующей поверхности катода в пределах зондируемой области. Так, на рис. 5 ПШОС

спектра достигала  $\sim 1$  эВ, т.е. изменение потенциала эмитирующей части зондируемой поверхности катода составляло  $\sim 0,9$  В. В случае одноострийных полупроводниковых эмиттеров смещение спектра в область низких энергий может достигать десятков и даже сотен электрон-вольт и определяется падением потенциала на полупроводнике. В отличие от полупроводников, смещение спектра оксидного катода в область низких энергий от исходного положения определяется падением потенциала на эмиссионном слое, на промежутке керн – эмиссионная поверхность, что позволяет измерить потенциал эмитирующей поверхности зондируемой области катода относительно керна. Так, на рис. 5а начальное положение спектра  $\sim -5,7$  эВ вследствие деактивации исходных и активации новых пятен изменилось на положение  $\sim -7,4$  эВ на рис. 5д и полное смещение спектра от исходного ( $\sim -3,3$  эВ) составило  $\sim 4,1$  эВ, т.е. падение потенциала на эмиссионном слое под областью зондирования составило  $\sim 4,1$  В.

Очевидно, в целом, описанная динамика изменения энергетического спектра эмитированных электронов молекулярно-напыленного катода при увеличении анодного напряжения в значительной степени повторила и воспроизвела динамику изменения спектра катода изготовленного методом пульверизации [1,2], добавив новые детали к описанным ранее этапам активации: при заданной температуре активация эмиссионных пятен происходила как при повышении, так и при понижении анодного напряжения, указывая на интервал значений напряженности электрического поля на поверхности оксида бария внутри которого поверхность кристаллов активируется.

## Заключение

Таким образом, методом полевой электронной спектроскопии исследован молекулярно-напыленный оксидный термокатод с толщиной эмиссионного слоя  $\sim 1$  мкм в диапазоне рабочих температур  $590 \div 730$  °С. Результаты исследования находятся в хорошем согласии с полученными ранее результатами для оксидного термокатада с толщиной эмиссионного слоя  $\sim 100$  мкм, наносимого методом пульверизации, и соответствуют модели «пятнистого катода», - суперпозиции эмиссии пятен, обладающих различными потенциалами и внутренними сопротивлениями несмотря на высокую однородность поверхности и малую толщину эмиссионного слоя.

В результате проведенных экспериментов детализировано представление о явлении активации, протекающем при заданной температуре в некотором интервале значений напряженности электрического поля на поверхности эмиссионных пятен как при повышении, так и при понижении анодного напряжения.

При самой низкой температуре катода были зарегистрированы еще более узкие, чем зарегистрированные ранее, спектры отдельного эмиссионного пятна с ПШПВ  $\sim 100$  мэВ. При более высоких температурах пики спектров были суперпозиционными и довольно узкими с ПШПВ  $\sim 150 \div 250$  мэВ и широкими с ПШПВ  $\sim 0,6$  эВ и более. Полная ширина у основания суперпозиционных спектров позволила измерить величину изменения потенциала эмитирующей поверхности катода в пределах зондируемой области равную  $\sim 0,9$  В. Смещение пиков и спектра в целом при изменении анодного напряжения происходило как монотонно, так и скачкообразно при деактивации исходных и активации новых эмиссионных пятен и было как небольшим ( $\sim 0,4$  эВ), так и значительным ( $\sim 1,7$  эВ). Смещение энергетического спектра эмитированных электронов позволило измерить величину падения потенциала на эмиссионном слое под зондируемой областью равную  $\sim 4,1$  В.

## Литература

1. Лобанов В.М., Шешин Е.П., Чадаев Н.Н., Лобанов С.В. Особенности эмиссии и полевая электронная спектроскопия оксидного термокатода. // *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2023. №4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.4.6>
2. Лобанов В.М., Шешин Е.П., Лобанов С.В., Чадаев Н.Н. Полевая электронная спектроскопия оксидного термокатода. // *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2023. №9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.9.11>
3. Г.А. Жабин, А.В. Коннов. Влияние способа изготовления мишени  $(\text{BaSrCa})\text{CO}_3$  и рабочего газа на эмиссионные свойства молекулярно-напыленных микрокатодов. // *Прикладная физика*. 2023. № 2. С. 77-83. <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2023-2-77-83>
4. Жабин, Г.А. О технологии изготовления молекулярно-напыленных оксидных катодов с повышенной плотностью тока. // *Сборник статей VII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ»*. Санкт-Петербург. СПбГЭТУ. 2018. С. 182-186. [https://mwelectronics.etu.ru/assets/files/2018/1/05\\_12.pdf](https://mwelectronics.etu.ru/assets/files/2018/1/05_12.pdf)

### Для цитирования:

Лобанов В.М., Будзинский Ю.А., Шешин Е.П., Жабин Г.А., Лобанов С.В., Чадаев Н.Н. Полевая электронная спектроскопия молекулярно-напыленного оксидного термокатода. // *Журнал радиоэлектроники*. – 2024. – №. 9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.9.8>