

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ НИТЕВИДНЫХ НАНОРАЗМЕРНЫХ КРИСТАЛЛОВ НА ПОВЕРХНОСТИ АВТОЭЛЕКТРОННЫХ КАТОДОВ МАГНЕТРОНОВ С БЕЗНАКАЛЬНЫМ ЗАПУСКОМ

Н.Е. Леденцова, Д.В. Бычков, И.П. Ли, А.В. Шуманов, В.И. Капустин

АННОТАЦИЯ

Запуск безнакальных магнетронов в режим генерации обусловлен током автоэлектронной эмиссии с вискеро́в, формирующихся на дислокациях поверхности танталовых автокатодов в процессе активирования катодно-подогревательного узла (КПУ). При уровне тока автоэлектронной эмиссии, не достаточном для запуска магнетрона, катоды проходят дополнительную диодную тренировку, которая увеличивает временной цикл обработки лампы и включает в себя использование дополнительных производственных ресурсов. В представленной работе отражены результаты исследований влияния дефектов поверхности танталовых шайб, искусственно созданных посредством ионного и химического травления, на процессы роста нановискеро́в. Рассмотрена возможность использования вольфрамовых и ниобиевых шайб в качестве автокатодов для магнетронов с «холодным» катодом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

АВТОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ, НАНОВИСКЕРЫ, ТРАВЛЕНИЕ, PD-BA КАТОДЫ, МАГНЕТРОН

RESEARCHING CONDITIONS FOR FORMATION OF FILAMENTOUS NA-NOSCALE CRYSTALS ON SURFACES OF FIELD EMISSION CATHODES OF MAG-NETRONS WITH INITIAL START

N.E. Ledentsova, D.V. Bychkov, I.P. Li, A.V. Shumanov, V.I. Kapustin

ABSTRACT

The launch of magnetrons with instant start into the generation mode is due to the current of field emission from nanoscale crystals, formed on the surface of tantalum fieldemission cathodes during the activation of the cathode-heating unit (CHU). When the current level is not sufficient to launch the magnetron, cathodes should additionally be trained in diode. This process increases the time cycle of magnetron and includes the use of extra production resources. The presented work reflects the results of researching the effect of the defects on the surface of tantalum emitters artificially created by means of ion and chemical etching on the growth processes of nanowhiskers. The possibility of using tungsten and niobium as a new material also considered in this article.

KEYWORDS

FIELD EMISSION, NANOWHISKERS, ETCHING, PD-BA CATHODES, MAGNETRON

ВВЕДЕНИЕ

Техническое назначение магнетрона – генерация электромагнитного излучения в диапазоне СВЧ. АО «Плутон» занимает лидирующую позицию в серийном выпуске магнетронов с мгновенной готовностью, которые входят в группу ЭВП СВЧ-приборов и выделяются среди других временем запуска. В этих магнетронах запуск в режим генерации

обеспечивается током автоэлектронной эмиссии (АЭЭ), создаваемым автоэмиссионным катодом (АЭК), а поддержание этой генерации происходит за счёт вторично-электронной эмиссии с Pd-Ba вторично-эмиссионных катодов (ВЭК). На рис. 1 схематически представлен узел «катод-анод» такого магнетрона, на котором обозначено: 1 — анодный блок, 2 — kern катода, 3 — технологический подогреватель, 4 — концевые экраны, 5 — автоэмиссионные эмиттеры, представляющие собой танталовые кольца, 6 — вторично-эмиссионные палладий-бариевые эмиттеры [1].

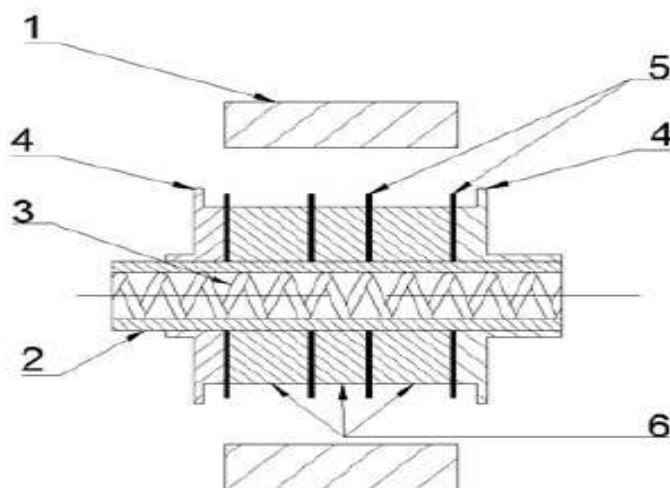


Рис. 1. Схема катодного узла безнакального магнетрона

Известно, что в качестве рабочей поверхности автоэмиссионных катодов выступают острые кромки Ta колец, которые в процессе активирования катода покрываются пленкой BaO, что, как следствие, снижает работу выхода электронов со значения 4,12 эВ (Ta) [2] до 2,1-2,3 эВ (BaO). После проведения большего количества исследований в АО «Плутон» выяснилось, что на боковой поверхности танталовых автокатодов в процессе активирования катода во время откачки и тренировки прибора происходит формирование системы палладиевых острий – вискеро́в, частично или полностью покрытых BaO, способных обеспечить достаточный уровень автоэмиссии для запуска прибора в режим генерации [3]. Формирование системы нановискеро́в происходит на дислокациях на поверхности тантала. В связи с этим, важной задачей является поиск способов создания и преумножения таких дефектов на автоэлектронных эмиттерах до постановки в прибор, с целью увеличения количества нановискеро́в, их высоты и концентрации, что может привести к повышению тока автоэлектронной эмиссии. В работе также будет исследована возможность использования других материалов, таких как ниобий и вольфрам, в качестве материалов автокатодов.

Поиск способов формирования системы палладиевых острий играет важную роль в получении требуемых автоэмиссионных параметров катода и является перспективной и важной задачей при разработке новых мощных приборов.

ОБОРУДОВАНИЕ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В представленной работе процесс активирования катода производился в высоковакуумной установке для исследования автоэмиссионных свойств, представленной на рис. 2. Откачка камеры с помещённым в неё анодным блоком с катодно-подогревательным узлом производилась форвакуумным насосом, затем магниторазрядным насосом НМД-0,25 до

давления в камере $\approx 3 \cdot 10^{-8}$ Торр. Контроль давления в камере осуществлялся магниторазрядным вакуумметром ПММ-32, размещенным непосредственно под образцом. При непрерывном обезгаживании камеры, выполнялось активирование катода. Измерение тока автоэмиссии производили высоковольтным импульсным источником с амплитудой импульса напряжения до - 5 кВ, длительностью импульса (изменяемая) – 0,5/1/6 мкс, скважностью – 1000. Регистрация значений I_a и I_{a2} по времени выполнялась на персональный компьютер в программном пакете Excel.

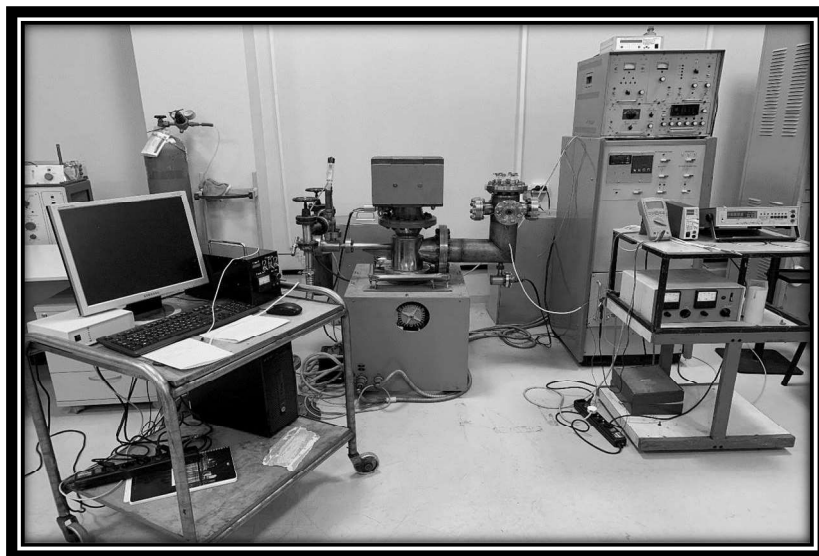


Рис. 2. Внешний вид установки для исследования автоэмиссионных свойств катодных материалов

Конструкция первого КПУ представлена на рис.3, на котором обозначено следующее: 1 -катодная ножка, 2 - две вольфрамовые втулки, 3 - восемь вольфрамовых шайб, 5, 5', 7, 8 – чередующиеся авто- и палладий-бариевые вторично-электронные катоды 4, 6 - экран. Автокатод 5 был выполнен из тантала толщиной 0,01 мм, 5' – из тантала толщиной 0,01 мм, одна сторона которого была подвергнута процессу ионно-плазменного травления в среде азота в течение 10 минут, 7 - из вольфрамовой фольги толщиной 0,02 мм, 8 – из ниобиевой фольги толщиной 0,03 мм. Катодный узел был активирован по режиму, аналогичному режиму обработки серийных КПУ.

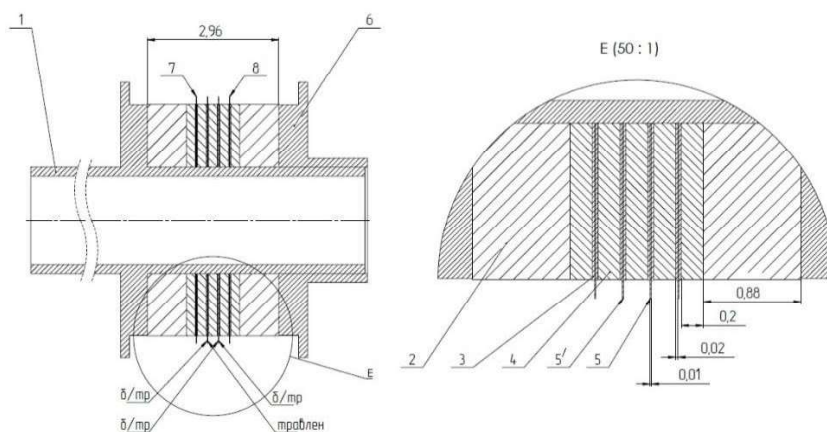


Рис. 3. Конструкция КПУ № 1

После активирования ток автоэмиссии катода оказался на уровне экспериментальной погрешности. На рис. 4 представлено изображение демонтированной сборки, полученной с использованием растрового электронного микроскопа фирмы «ZEISS EVO 40». Для удобства исследования, автоэммитеры были загнуты в одну сторону.

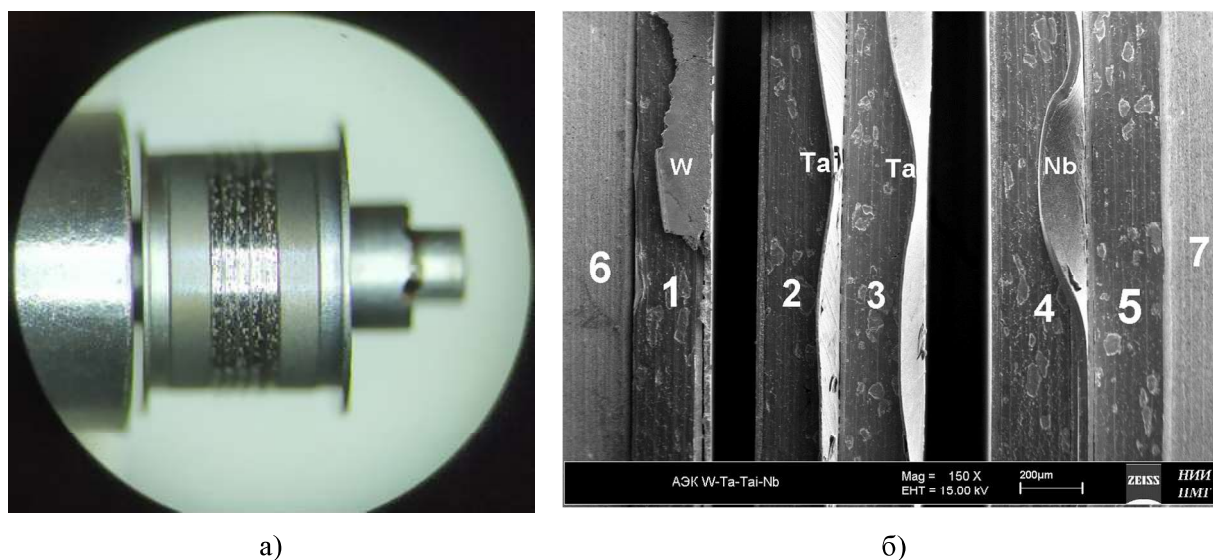


Рис. 4. Общий вид катодной сборки КПУ-1 (а) и его РЭМ-изображение (б)

Ниже на рис. 5-8 представлены микрофотографии поверхностей вольфрамового, ниобиевого и танталовых автокатодов и их элементный состав, соответственно.

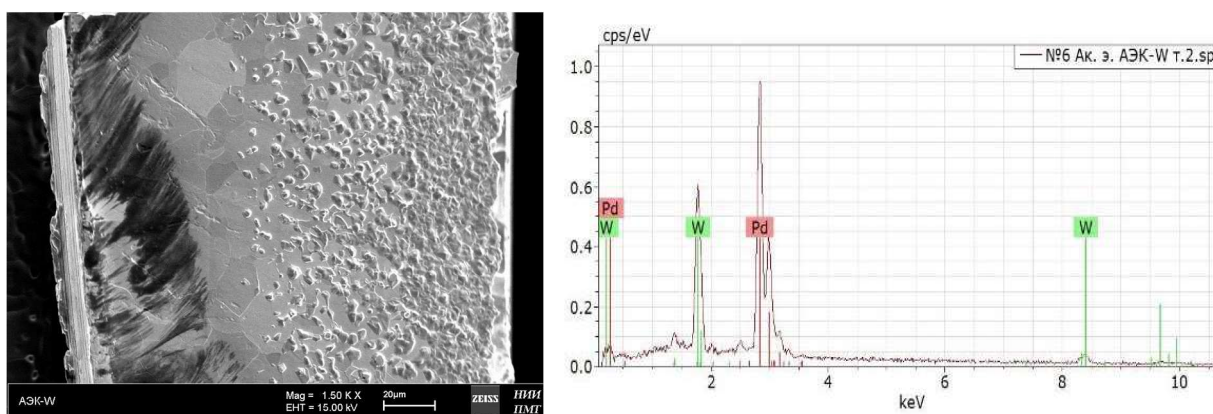


Рис. 5. Микрофотография поверхности вольфрамового автокатода и его элементный состав

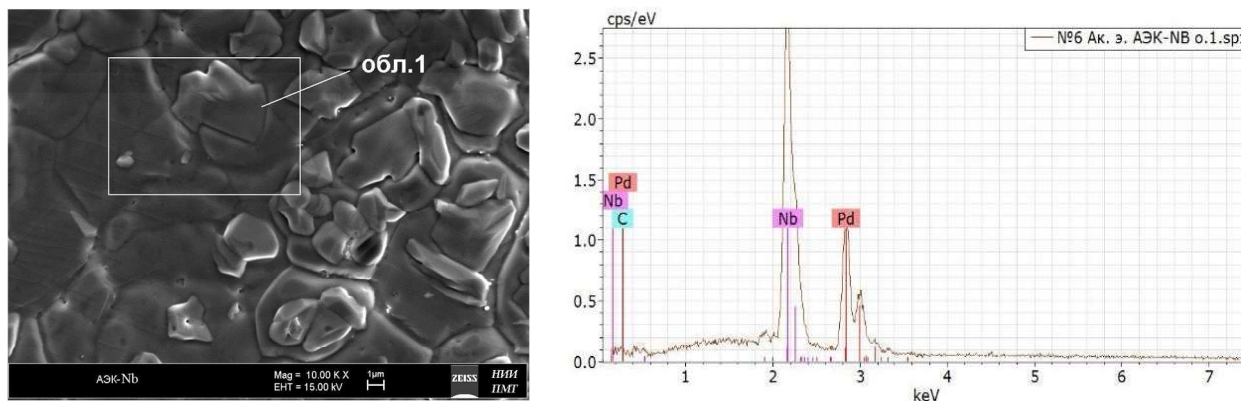


Рис. 6. Микрофотография поверхности ниобиевого автокатода и его элементный состав

Поверхности вольфрамовой и ниобиевой шайб покрыты плёнкой палладия, однако роста вискерсов не наблюдается (рис. 5, 6).

Поверхности травлённого и не травлённого танталовых автокатодов (рис. 7, 8) также покрыты слоем палладия. Отмечается начало процесса формирования зародышей нитевидных кристаллов.

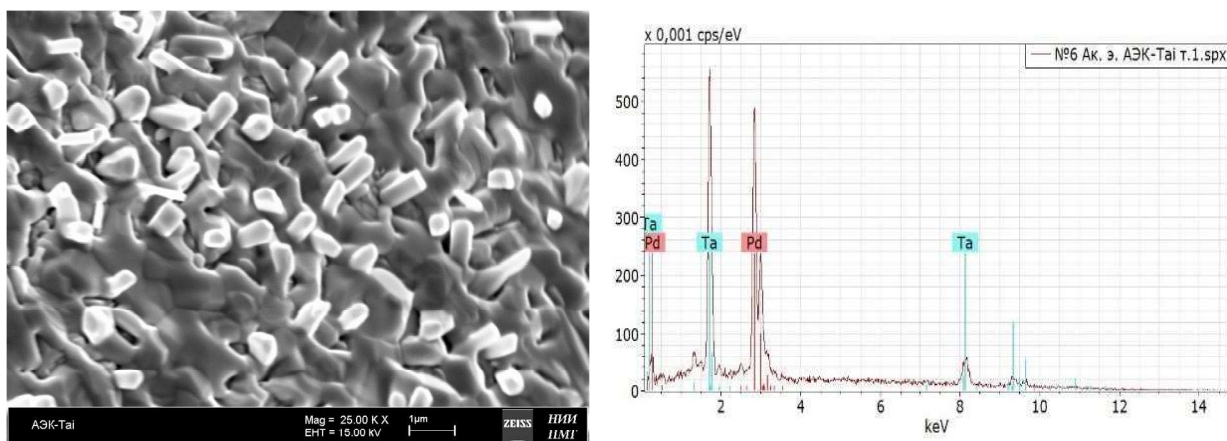


Рис. 7. Микрофотография поверхности танталового автокатода, поверхность которого была протравлена плазмой азота в течение 10 мин и его элементный состав

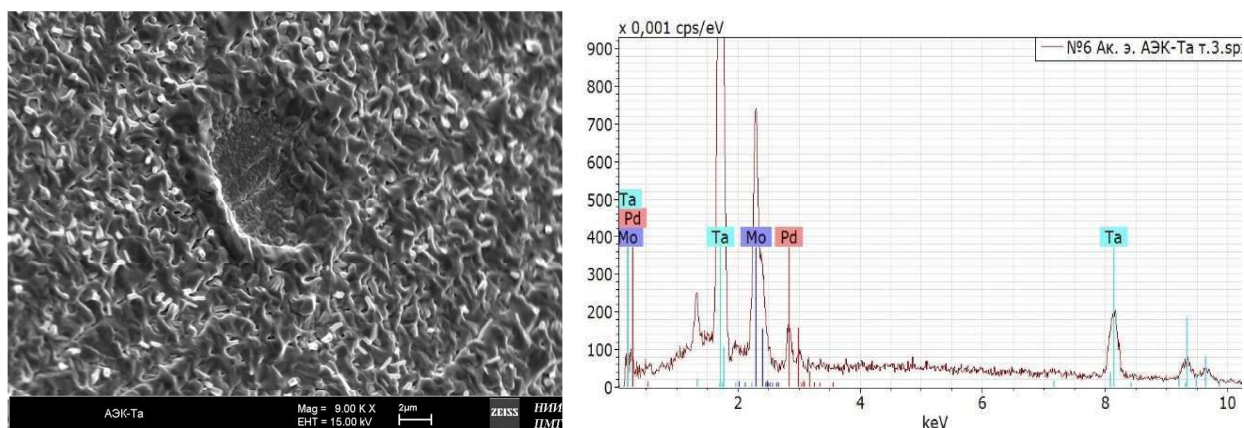


Рис. 8. Микрофотография поверхности танталового автокатода и элементный состав

Резюмируя полученные результаты исследований первой катодной сборки, можно отметить следующее.

Вискеры на поверхности вольфрамового и ниобиевого автокатодов не обнаружены. Вероятно, данный эффект вызван отсутствием на их поверхности микродефектов, которые нивелируются, предположительно, во время рекристаллизационного отжига при прокатке фольг.

На поверхности травлённого и не травлённого танталовых автокатодов отчетливо видны зародыши вискеров, причём их количество на травлённой поверхности несколько больше. Вероятно, низкая автоэмиссия была обусловлена недостаточно развитой структурой нановискеров, т.е. катод был недостаточно активирован.

В связи с тем, что вискеры растут на микродефектах, дальнейшая исследовательская работа будет проводиться на КПУ 2, автокатоды которого будут протравлены не только в ионной плазме, но и методами химико-технологической обработки. Ниже представлена конструкция КПУ № 2, который был собран для проведения аналогичного эксперимента.

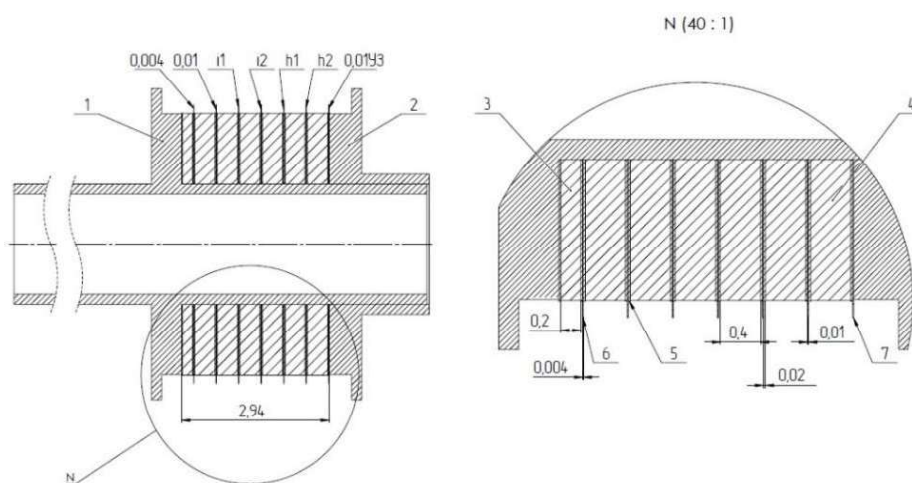


Рис. 9. Конструкция КПУ №2

КПУ №2 состоял из катодной ножки 1, экрана 2, семи палладий-бариевых эмиттеров 3 и 4, четырнадцати вольфрамовых шайб 5, танталового автокатода, толщиной 0,004 мм, шести танталовых автокатодов, толщиной 0,01 мм, обработанных следующим образом:

- «0,01» – тантал толщиной 0,01 мм, обезжиренный в трихлорэтилене с ультразвуком;

- «i1» и «i2» - тантал с ионным травлением в плазме азота в течение 15 мин и 30 мин, соответственно;

- «h1» - тантал, обработанный химико-технологическим методом в растворе HNO_3 и 5% HF (40%-я);

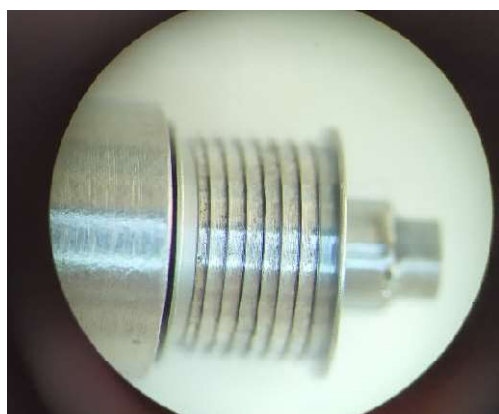
- «h2» - тантал, обработанный химико-технологическим методом в течение 2 минут в смеси HNO_3 и H_2SO_4 (3:1) с ультразвуком;

- «0,01УЗ» - тантал толщиной 0,01 мм, обезжиренный в трихлорэтилене с ультразвуком и дополнительно подвергнутый ультразвуковой обработке в абсолютном спирте.

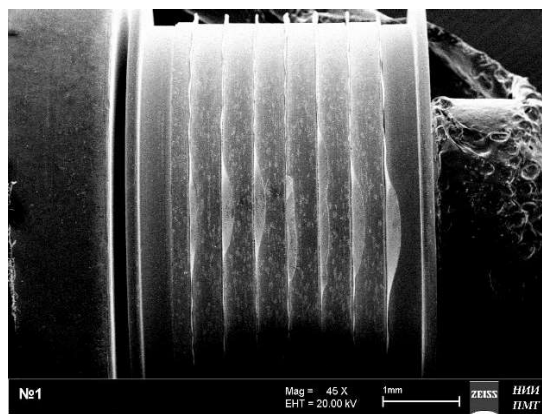
КПУ №2 был активирован по режимам активировки катодов серийно выпускаемых магнетронов в установке для исследования автоэмиссионных свойств. Ток термоэмиссии соответствует уровню тока ТЭЭ, получаемому с катодов серийных изделий.

После активирования КПУ № 2 был также демонтирован и, аналогично КПУ № 1, исследован в растровом электронном микроскопе «ZEISS EVO 40». Для удобства исследования, автоэммиттеры были загнуты в одну сторону. Полученные результаты представлены на рисунках 10-11.

Элементный состав всех представленных танталовых автокатодов схож с составом образца «0,01», показанным на рис.11в. Также из полученных изображений видно, что наноразмерные нитевидные кристаллы присутствуют на всех автокатадах, однако большее количество вискероидов было сформировано на поверхности АЭК «0,01», а также после химического травления. Нельзя не выделить разную плотность распределения нановискероидов и их форму на разных образцах: на образце «0,01» – плоские, широкие в большом количестве; на образце «h1» - в большом количестве, но расположены не равномерно; на образце «h2» – тонкие, вытянутые, в большом количестве; на образце «i1» – длинные, тонкие, в относительно небольшом количестве; на образцах «0,004» и «0,01УЗ» – в относительно небольшом количестве, по сравнению с другими.



а)



б)

Рис. 10. Общий вид катодной сборки КПУ-2 (а) и его РЭМ-изображение (б)

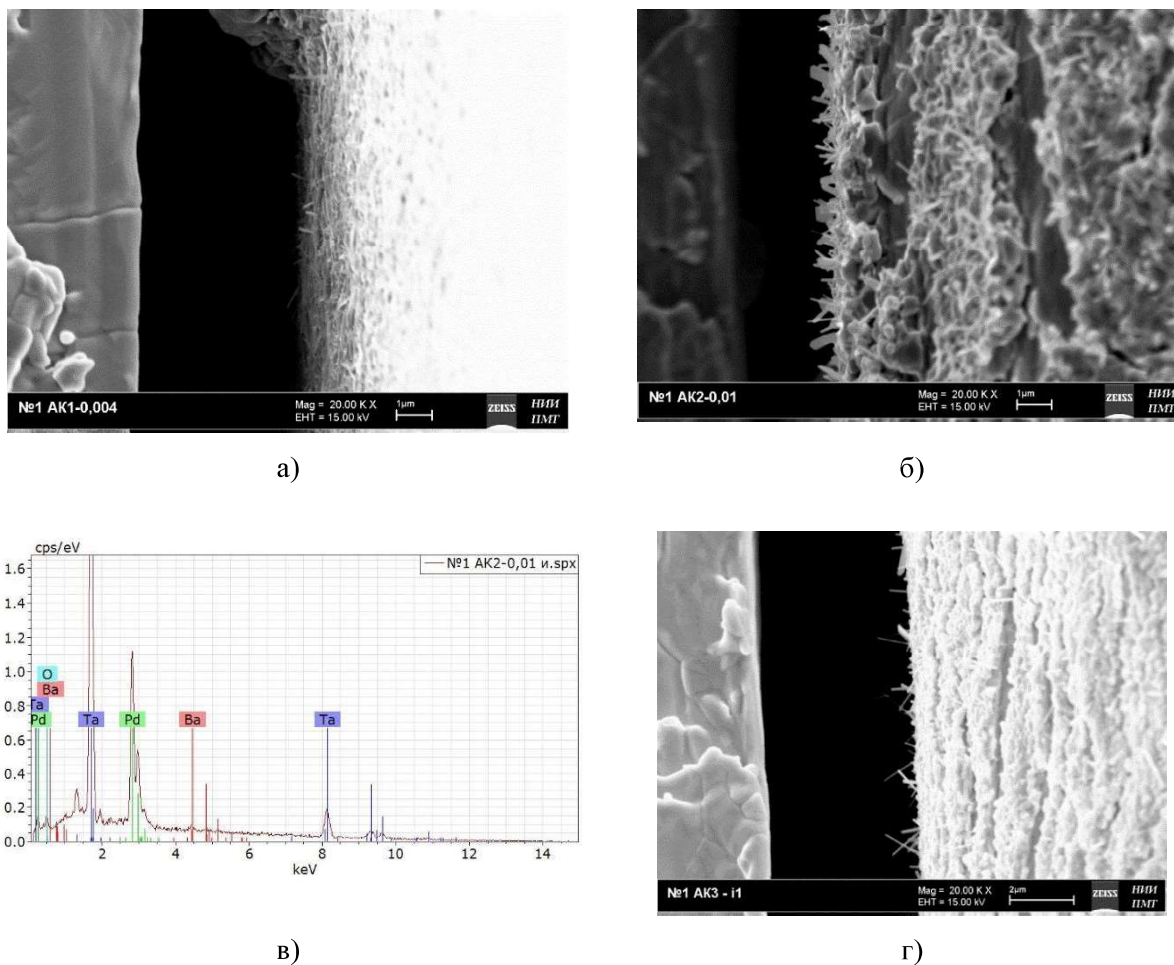


Рис. 11. Изображения автокатодов: (а) – автокатод «0,004»; (б) – автокатод «0,01»; (в) – элементный состав автокатода «0,01»; (г) – автокатод «i1»

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проделанной работы способствовали выявлению положительного влияния искусственного создания микродефектов на поверхности тантала на рост и количество вискерсов, что несомненно может послужить новым перспективным направлением при создании магнетронов с мгновенной готовностью.

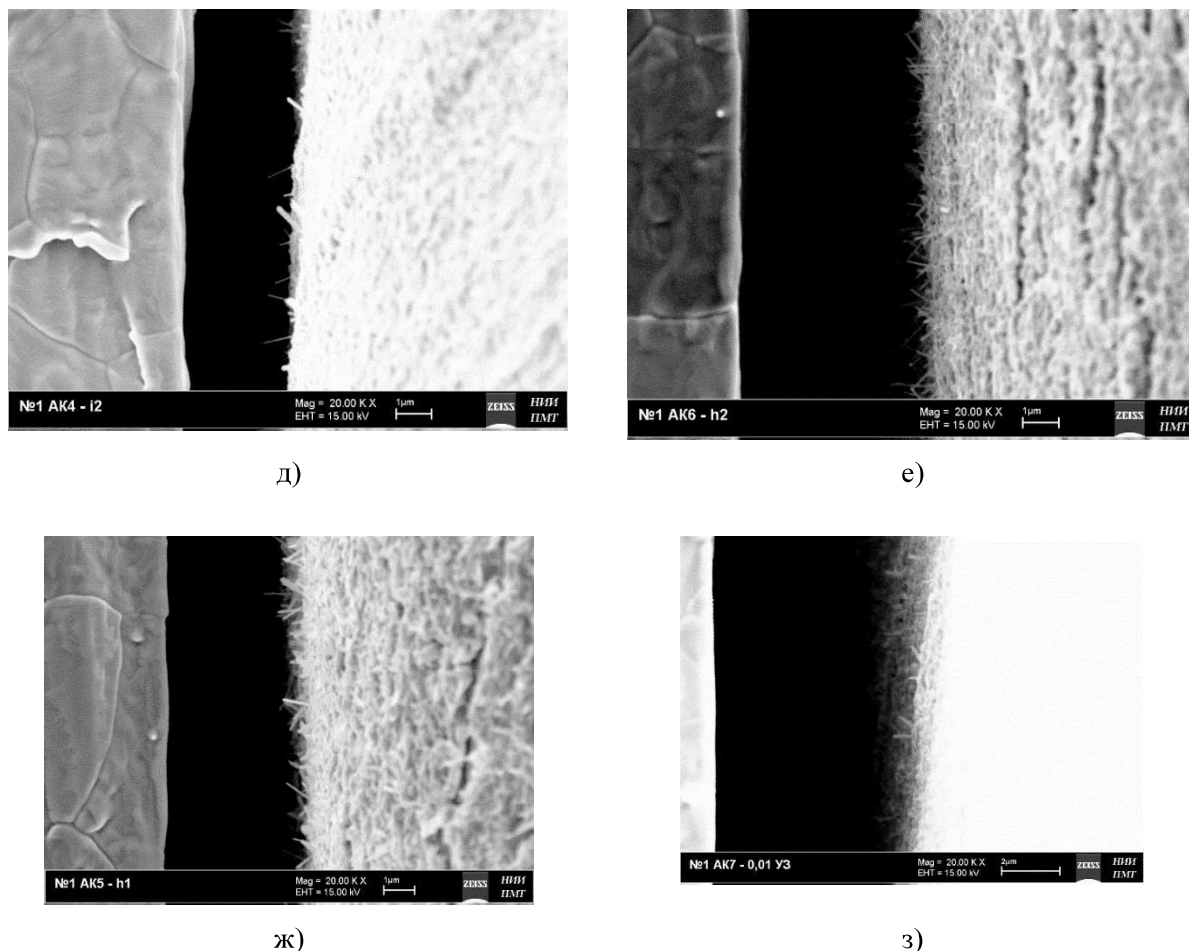


Рис. 11. Изображения автокатодов (продолжение): (а) – автокатод «0,004»; (б) – автокатод «0,01»; (в) – элементный состав автокатада «0,01»; (г) – автокатод «i1» (д) – автокатод «i2», (е) – автокатод «h2», (ж) – автокатод «h1», (з) – автокатод «0,01УЗ»

ЛИТЕРАТУРА

1. Ли И.П. Одновременное активирование автоэлектронного и вторично-эмиссионного катодов магнетрона с безнакальным запуском // Известия вузов. Электроника. — 2014. — Т. 30. — № 3 (107). — С. 30—36.
2. Фоменко В.С. Эмиссионные свойства материалов // Киев. «Наукова думка» 1981. — С. 339.
3. Капустин В.И., Ли И.П. Теория, электронная структура и физикохимия материалов катодов СВЧ-приборов // Научная мысль. М. Инфра-М, 2020.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Н.Е. Леденцова – кандидат технических наук, начальник лаборатории исследования свойств материалов технического центра «Базовые технологии ЭВП» АО «Плутон», г. Москва.

Д.В. Бычков – ведущий инженер-технолог лаборатории исследования свойств материалов технического центра «Базовые технологии ЭВП» АО «Плутон», г. Москва.

И.П. Ли – доктор технических наук, заместитель генерального директора по научно-технологическому развитию АО «Плутон», г. Москва; e-mail: i.li@pluton.msk.ru

А.В. Шуманов – директор технического центра «Базовые технологии ЭВП» АО «Плутон», г. Москва.

В.И. Капустин – доктор физико-математических наук, профессор, главный специалист технического центра «Базовые технологии ЭВП», МИРЭА-Российский технологический университет; e-mail: kapustin@mirea.ru