

Долговечность молекулярно-напыленных оксидных микрокатодов, изготовленных с применением лазера

Г.А. Жабин, Н.А. Лябин, Д.Ю. Архипов, Е.А. Стройков

АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина»

Аннотация: в данном исследовании рассмотрена работа молекулярно-напыленных оксидных микрокатодов, изготовленных из фольги WRe-27 с применением лазера. Показаны эмиссионные характеристики и долговечность тонкопленочных микрокатодов, изготовленных по разной технологии. Обсуждаются проблемы технологии лазерной резки.

Ключевые слова: молекулярно-напыленный оксидный катод (МНОК), оксидное покрытие, недокальные характеристики, ионно-плазменное распыление мишени, лазер на парах меди (ЛПМ)

1. Введение

В настоящее время для изготовления эмиттеров малошумящих вакуумных СВЧ-приборов широко используется молекулярно-напыленное оксидное покрытие, получаемое методом ионно-плазменного распыления мишени составом активного вещества (BaSrCa)CO₃.

Процесс напыления проходит в три этапа. 1-ый этап – переход вещества мишени из твердой фазы в газовую в процессе распыления высокоэнергетическими ионами газа (Ar и CO₂). 2-ой – перемещение распыляемых частиц из мишени через вакуумную камеру к подложке. 3-ий – осаждение частиц на подложку и формирование активной пленки. [1].

Микрокатоды состоят из подогревателя и керна. Эмиссионное покрытие наносится на керны. На эмиссионные свойства влияет множество факторов: условия ионно-плазменного напыления, толщина и плотность нанесенного покрытия (пленки), условия откачки после установки катода в катодно-подогревательный узел, вакуумные условия в СВЧ-приборе и технология термоэмиссионной тренировки. Большое значение имеет чистота и шероховатость поверхности керна.

Микрокатоды могут быть выполнены различной конструкции из проволоки или фольги. В настоящее время в циклотронных защитных устройствах (ЦЗУ) [3] подогреватель и керн изготавливаются из вольфрам-рениевой проволоки диаметром 50 мкм. На керн напыляется термоэмиссионное покрытие толщиной 1 мкм [2]. Вольфрам-рениевый сплав обладает требуемыми для катода физико-химическими и оптимальными механическими свойствами. В работе [2] было показано, что катоды проволочной конструкции уступают по жесткости катодам, изготовленным из фольги такого же материала.

В настоящей работе проведено исследование влияния традиционной технологии изготовления микрокатодов из вольфрам-рениевой проволоки и методом лазерной микрообработки фольги на их эмиссионные свойства и срок службы.

2. Подготовка образцов и экспериментальные результаты

Пластина из 50 мкм фольги вольфрам-рениевого сплава (WRe-27) размером 30x40 мм после химической обработки подвергалась термориhtовочному отжигу в восстановительной среде, водороде, при температуре 850-860°C в течение 30 минут для обеспечения плоскостности поверхности заготовки. Из данной пластины, на

автоматизированной лазерной технологической установке (АЛТУ) «Каравелла-2М» с применением импульсного лазера на парах меди (ЛПМ) (АО «НПП «Исток» им. Шокина») [3,4], изготавливалась цельная несущая конструкция микрокатода из сплава (WRe-27), состоящая из подогревателя в форме меандра и керна. Для этого пластина устанавливалась на горизонтальном координатном столе ХУ, на которую фокусировалось объективом с $F = 100$ мм лазерное излучение в пятно диаметром 15 мкм. Длина волны излучения составляла 510,6 нм, длительность импульсов излучения – 15 нс, частота повторения импульсов 14 кГц, скорость резки 1 мм/с, количество проходов 5. Пиковая (импульсная) плотность мощности ЛПМ составляет 10^{10} Вт/см² и обработка материала идет в испарительном режиме. При этом зона термического воздействия (ЗТВ) составляла 4...5 мкм [4,5].

Изготовленные на ЛПМ микрокатоды подвергались химической очистке. После химической обработки в трихлорэтилене проводили очистку от ЗТВ с использованием водного раствора кипящей щелочи NaOH. Для финишной очистки использовался раствор перекиси водорода, с последующей промывкой в деионизованной воде с ультразвуком 25 кГц. Затем микрокатод подвергался отжигу в водороде при 1050 °С в течение 30 минут и уменьшению толщины керна методом прессования в специальной стальной оправке до размера 22-24 мкм. Контроль внешнего вида микрокатодов после каждой операции осуществлялся с помощью оптического микроскопа марки Olympus с увеличением $\times 100...1500$.

На рис. 1а представлен фрагмент конструкции микрокатода с подогревателем из вольфрам-рениевой проволоки диаметром 50 мкм с приваренным к нему керном из такой же проволоки с применением лазерной установки RLS-50 (Россия). Параметры настройки лазера: напряжение 260 В, длительность импульса 0,60 мс, частота импульса 2 Гц. Диаметр луча 100 мкм, энергия луча 1,7-2,2 Дж.

На рис.1б показан микрокатод с подогревателем и керном прямоугольного сечения, изготовленный лазерной резкой ЛПМ в виде цельной конструкции из 50 мкм фольги WRe-27. После прессования керна, толщина его составила 24 мкм.

На рис.2 а,б показаны фрагменты изготовленного микрокатода с применением ЛПМ до и после химической обработки детали от образовавшихся окислов и ЗТВ. Шероховатость покрытия катода, изготовленного ЛПМ до химобработки составила около 2 мкм.

С целью уменьшения влияния шероховатости керна на параметры вакуумного прибора было проведено изготовление подогревателя с применением ЛПМ, а керн из проволоки диаметром 50 мкм приваривался к подогревателю по образцу на рис.1а. После плющения керна до толщины 20-24 мкм катод вновь подвергался химической очистке и отжигу. После нанесения пленки иридия на керны, катоды из WRe-27 отжигались в водороде при температуре 1050°С 30 минут. Эмиссионное покрытие на образцах получали в атмосфере аргона и CO₂ ионно-плазменным методом при распылении мишени состава активного вещества (BaSrCa)CO₃ с соотношением элементов ЩЗМ 47:45:8. Рабочее давление газа составляло 0,13-0,11 Па, время напыления покрытия - 3 часа.

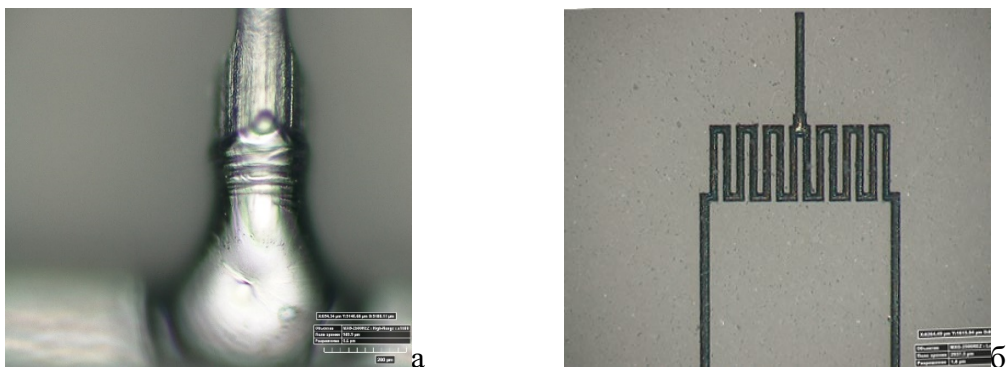


Рисунок 1. а) - изображение сварной точки в месте приваривания керна к проволочному подогревателю микрокатода (x 1500); б) - общий вид микрокатода, изготовленного с применением ЛПМ из фольги WRe-27 (увеличение x 100)

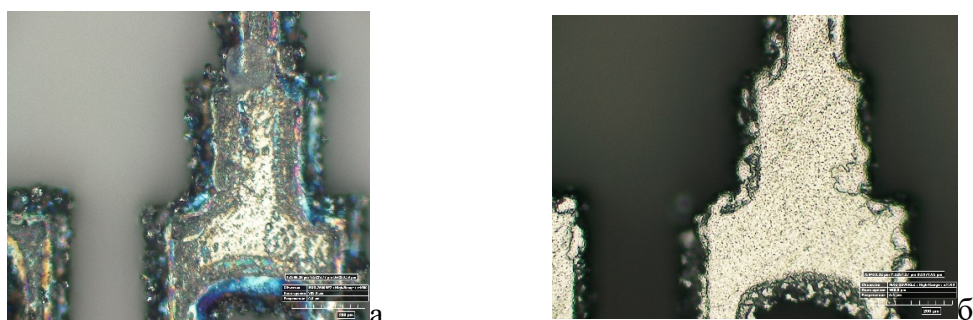


Рисунок 2. Изображение области перехода от подогревателя к керну микрокатода, изготовленного из фольги WRe-27 с применением ЛПМ: а) - непосредственно после изготовления, б) - после химочистки. Увеличение x 1500

Изготовленные микрокатоды устанавливали в катодно-пушечные узлы макетов приборов и откачивали до вакуума $1-1.4 \cdot 10^{-8}$ мм. рт. ст. После активирования и термоэмиссионной тренировки катоды работали в режиме отбора тока с плотностью $1-2,6 \text{ A/cm}^2$.

На рис.3 приведены эмиссионные характеристики и долговечность микрокатода, подогреватель которого изготовлен из фольги WRe-27 в форме меандра с применением ЛПМ, а приваренный к нему керн из проволоки WRe-20. Микрокатод работал с плотностью тока $1,0 - 1,2 \text{ A/cm}^2$ 4000 часов.

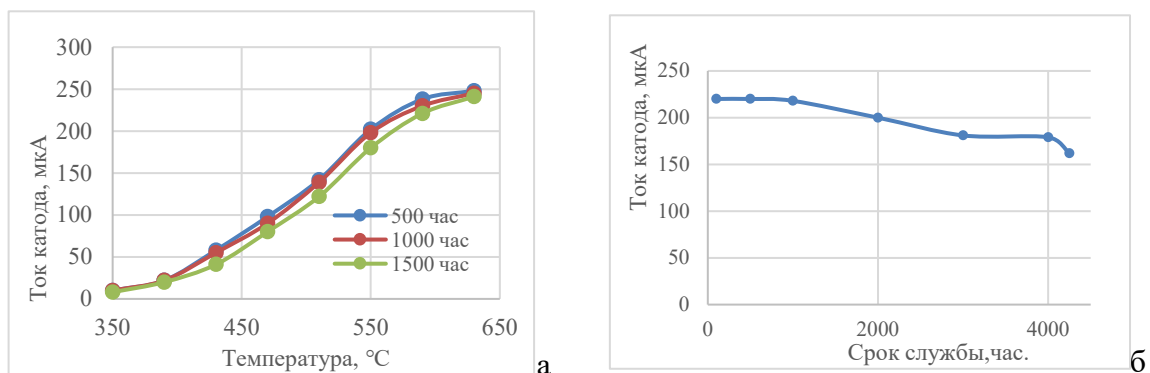


Рисунок 3. а) – эмиссионные характеристики и б) – долговечность микрокатода, подогреватель которого изготовлен из фольги WRe-27 ЛПМ, керн – из проволоки WRe-20.

На рис.4 приведены эмиссионные характеристики и долговечность микрокатода

из фольги, изготовленного в виде единой конструкции с применением ЛПМ. Микрокатод проработал с плотностью тока 2,1-2,6 А/см² 6500 часов.

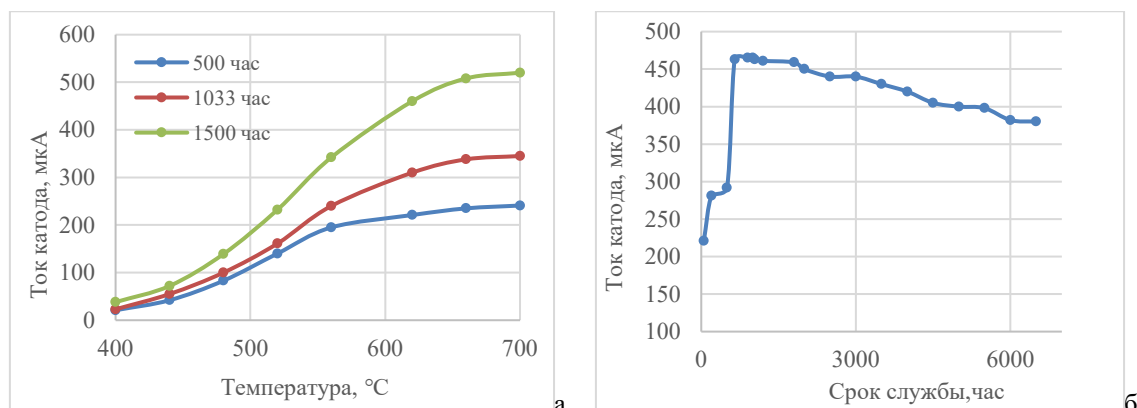


Рисунок 4. а) – эмиссионные характеристики и б) – долговечность микрокатада, изготовленного из фольги WRe-27 в виде цельной конструкции

На рис. 5 приведены эмиссионные характеристики и долговечность микрокатада, подогреватель которого изготовлен из проволоки WRe-27 механическим способом, а керн из проволоки WRe-20 приварен к подогревателю лазерной сваркой. Эмиссионное покрытие наносилось непосредственно на керн, без предварительного напыления на него пленки иридия. Микрокатод работал с плотностью тока 1,2 - 1,4 А/см² 15000 часов.

При пирометрировании катоды из фольги в диапазоне рабочих накалиов показали температуру на 30-50 °С выше, чем из проволоки. В отличие от катодов из фольги, катод из проволоки изготовлен с керном без напыления на него пассивирующей пленки иридия. Возможно, при низкой рабочей температуре термокатада деградирующее влияние вольфрама на эмиссию не происходит.

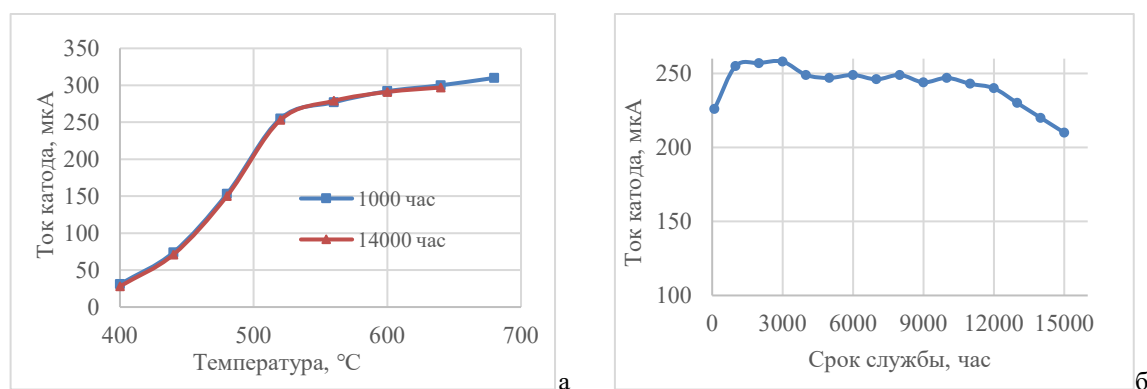


Рисунок 5. а) – эмиссионные характеристики и б) – долговечность микрокатада, подогреватель которого с приваренным керном изготовлены из проволоки.

Химический состав осажденного покрытия у микрокатодов одинаков и обусловлен технологией нанесения ионно-плазменного напыления. Разница в эмиссионных свойствах может быть объяснена различием тепловых режимов работы катодов.

Недостатками конструкции из проволоки являются: низкая технологичность и производительность изготовления из-за ручного труда и необходимости применения сложных прецизионных оправок.

3. Заключение

Микрокатод, изготовленный импульсным наносекундным ЛПМ из фольги WRe-27 в виде единого конструктивного узла, показал долговечность работы около 6000 часов. Микрокатод с подогревателем из фольги WRe-27 с приваренным керном из проволоки WRe-20 показал долговечность 4000 ч. Изготовленный из проволоки микрокатод с подогревателем WRe-27 и керном из сплава WRe-20 продемонстрировал долговечность 15000 ч.

На долговечность значительно повлиял температурный режим катодно-подогревательных узлов. Рабочая температура катода из проволоки составила 550 °С, у катодов, изготовленных с применением ЛПМ, – 630-650 °С. С увеличением температуры срок службы оксидных катодов уменьшается в следствие увеличения скорости испарения атомов Ва с его поверхности [6]. Достоинством катодов, изготовленных ЛПМ, является малое время изготовления, высокая жесткость и виброустойчивость. Дальнейшее совершенствование конструкции катодно-подогревательного узла и применение лазерной технологии резки с пико- и фемтосекундной длительностью импульсов излучения для минимизации ЗТВ позволит существенно увеличить срок службы тонкопленочных микрокатодов.

Список литературы

1. Acosta M. et al. BaTiO₃-based piezoelectrics: Fundamentals, current status, and perspectives //Applied Physics Reviews. – 2017. – Т. 4. – №. 4. – С. 041305.
2. Жабин Г. А. и др. Применение лазера на парах меди в изготовлении молекулярно-напыленных оксидных катодов //Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. - 2020. - Вып. 4 (547). -С. 90-97.
3. Григорьянц А. Г., Казарян М. А., Лябин Н. А. Лазерная прецизионная микрообработка материалов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017. - 416 с.
4. Лябин Н. А. и др. Прецизионная микрообработка материалов ИЭТ на автоматизированных лазерных технологических установках «Каравелла» // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ - техника. – 2017. – Вып. 2 (533). – С. 12-20.
5. Жабин Г. А. и др. Сравнительные характеристики термоэмиссионных катодов, изготовленных с применением наносекундного лазера на парах меди и фемтосекундного волоконного лазера //Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. - 2021. - Вып. 2 (549). -С. 61-66.
6. Масленников О.Ю., Ушаков А.Б. Эффективные термокатоды. – Учебное пособие. – М. МФТИ. - 2003. – 129 с.