

## Возможности применения фемтосекундного волоконного лазера в изготовлении термоэмиссионных катодов

Г. А. Жабин, Н. А. Лябин, Е. В. Скупневский, Д. Ю. Архипов, К. О. Долгих

*Показаны возможности применения волоконного лазера с фемтосекундной длительностью импульсов излучения в изготовлении миниатюрных термоэмиссионных катодов из 50 мкм вольфрам-рениевой фольги. Катодный узел, состоящий из подогревателя и керна, выполнен в виде цельной конструкции с нанесенным методом ионно-плазменного напыления оксидным покрытием. Представлены эмиссионные характеристики катода.*

*Ключевые слова:* молекулярно-напыленный оксидный катод, прецизионная микрообработка, лазеры на парах меди, фемтосекундные волоконные лазеры, лазерное технологическое оборудование, эмиссионные характеристики, долговечность.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-2-67-72

### Введение

Внедрение прецизионных и высокопроизводительных способов лазерной микрообработки материалов изделий электронной техники (ИЭТ) позволяет создавать новые конструкции молекулярно-напыленных оксидных катодов (МНОК) с улучшенными эмиссионными и эксплуатационными свойствами, применяемых в современных циклотронных защитных устройствах (ЦЗУ) [1].

В работе [2] показано, что применение автоматической лазерной технологической установки АЛТУ «Каравелла» с лазером на парах меди (ЛПМ) с длиной волны 510,6 нм

для изготовления МНОК из вольфрам-рениевой фольги позволило уменьшить его паразитные резонансные колебания, увеличить жесткость и вибропрочность по сравнению с конструкцией из 50 мкм проволоки, изготовленной методом механообработки. ЛПМ с наносекундной длительностью импульсов обеспечивают прецизионную микрообработку любых металлических, в частности, тугоплавких материалов из фольги толщиной 0,01–0,2 мм с шероховатостью поверхности реза 2–3 мкм и зоной термического воздействия 2–5 мкм [3–5].

Однако, при микрообработке ЛПМ на поверхности материала со стороны реза (входа луча) остаются выплески металла (грат), что требует последующей неоднократной химической обработки в растворе щелочи с наложением ультразвукового поля. Для МНОК повторная химическая обработка может отрицательно сказаться на параметрах катода из-за уменьшения размеров при травлении металла на 2–3 мкм.

Дальнейшая миниатюризация СВЧ-приборов выдвигает более жесткие требования к качеству поверхности, размерам и параметрам изделий. Существующая технология ЛПМ не позволила изготовить МНОК с шириной керна менее 25 мкм и шероховатостью поверхности реза менее 1 мкм. Повышенная шероховатость

---

Жабин Геннадий Анатольевич<sup>1</sup>, начальник сектора.  
E-mail: zhabingennady@yandex.ru

Лябин Николай Александрович<sup>1</sup>, нач. лаборатории.

Скупневский Евгений Витальевич<sup>2</sup>, инженер.

Архипов Денис Юрьевич<sup>1</sup>, инженер.

Долгих Ксения Олеговна<sup>1</sup>, инженер.

<sup>1</sup> АО «НПП «ИСТОК» им. Шокина».

Россия, 141190, г. Фрязино, М.О., ул. Вокзальная, 2 А.

<sup>2</sup> НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ».

Россия, 124482, Москва, Зеленоград,

Георгиевский пр-т, 5, стр. 1.

Статья поступила в редакцию 18 марта 2021 г.

---

© Жабин Г. А., Лябин Н. А., Скупневский Е. В.,  
Архипов Д. Ю., Долгих К. О., 2021

МНОК препятствует получению высоких параметров ЦЗУ по уровню шума.

В то же время известно [6, 7], что фемтосекундные лазеры из-за малого времени воздействия излучения на материал позволяют получать высокое качество микрообработки: с субмикронной зоной термического влияния (ЗТВ) и без образования расплава. Поэтому в развитие указанного направления в настоящей работе для изготовления цельной конструкции катода применялась созданная на предприятии ООО «НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ» (г. Зеленоград) лазерная прецизионная машина «МЛП1-Фемто» на основе твердотельного волоконного лазера (Yb:YAG) с фемтосекундной длительностью импульсов излучения и длиной волны  $\lambda = 1030 \pm 5$  нм. В результате оптимизации режимов микрообработки были изготовлены из фольги сплава ВР-27 ВП экспериментальные образцы МНОК, которые были испытаны на эмиссионные свойства.

#### Объекты исследований и методика эксперимента

Предварительно заготовка из 50-мкм фольги сплава ВР-27 ВП размером 30×40 мм после химической обработки подвергалась отжигу в водороде в специальной оправке из нержавеющей стали при температуре 850 °С в течение 30 минут для обеспечения плоскостности. Последующее изготовление из заготовки катодов осуществлялось с использованием специальной координатной системы, обеспечивающей автоматическое перемещение фемтосекундного лазерного луча по заданной программе в плоскости координат X–Y и фокусировку светового пятна в направлении оси Z. Точность позиционирования координатной системы и обработки составляла  $\pm 5$  мкм. Диапазон изменения скорости 0–1000 мм/с.

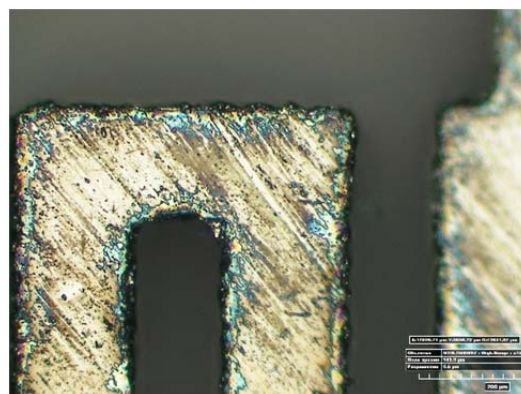
Проведено сравнение результатов изготовления катодов с помощью фемтосекундного лазера и ЛПМ.

На рис. 1 представлена конструкция катода с подогревателем в форме меандра и керном, изготовленного лазерной резкой ЛПМ в виде цельной детали из фольги ВР-27 ВП.

На поверхности катода, изготовленного ЛПМ, вдоль лазерного реза, видны участки в виде остывших капель металла (см. рис. 1, б).



а



б

*Рис. 1. Изображения катода, изготовленного с применением ЛПМ из фольги ВР-27 ВП: а) – общий вид катода, где 1 – керн; 2 – подогреватель в форме меандра; б) – фрагмент подогревателя.*

С целью уменьшения ширины керна до 20–25 мкм и уменьшения шероховатости поверхности реза, ЗТВ и грата, проводились экспериментальные исследования с фемтосекундным лазером по определению оптимальных режимов прецизионной микрообработки. Оптимизация проводилась по следующим параметрам: энергии в импульсе лазерного излучения, скорости обработки и числу проходов лазерного луча. Фокусное расстояние, частота импульсов и длина волны фемтосекундного лазера оставались постоянными. После оптимизации параметров микрообработки на керн катода размером 0,9×0,05×0,025 мм магнетронным распылением наносилась пленка иридия толщиной 0,25 мкм с последующим высокотемпературным отжигом в водороде и напылением в среде аргона и CO<sub>2</sub> термоэмиссионного покрытия (BaSrCa)CO<sub>3</sub> толщиной 0,8 мкм. Параметры ионно-плазменного напыления: давление рабочего газа 0,11 Па, напряжение разряда 800 В, ток разряда 200 мА [8, 9].

Катод монтировался в ЦЗУ с расстоянием катод–анод 100 мкм. СВЧ-прибор откачивался до уровня вакуума  $10^{-9}$  мм рт. ст. и проводилось термическое разложение карбонатов для формирования оксидного покрытия на керне. Эмиссионные свойства МНОК исследовали на стенде термоэмиссионной тренировки ЦЗУ по стандартной методике [10].

### Результаты экспериментов и их обсуждение

Оптимизация и отработка технологии микрообработки проводились на вышеуказанной вольфрам-рениевой фольге в нескольких режимах.

Пороговая (минимальная) плотность мощности испарения вольфрама для импульсного излучения определялась по формуле [3, 4]:

$$q_{и} = \frac{kT}{2A} \sqrt{\frac{\pi}{\tau\delta}} \quad (1)$$

где  $k = 162,8$  Вт/(м К) – коэффициент теплопроводности;  $T = 5828$  К – температура испарения вольфрама;  $A = 0,484$  – коэффициент поглощения;  $\delta = 0,64$  см<sup>2</sup>/с – коэффициент температуропроводности;  $\tau = 250 \times 10^{-15}$  с – длительность импульса лазерного излучения.

Подставляя данные в формулу (1), получаем значения расчетной пороговой пиковой (импульсной) плотности мощности для вольфрама:  $q_{и} = 0,43 \times 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup>.

Экспериментальные значения пиковой плотности мощности излучения определяются по формуле [3, 4]:

$$q_{и} = \frac{P_{ср}}{f\tau S} \quad (2)$$

где  $P_{ср}$  – средняя мощность лазерного излучения;  $f$  – частота следования импульсов;  $\tau$  – длительность импульсного излучения;  $S = (\pi d^2)/4$  – площадь светового пятна сфокусированного пучка излучения;  $d$  – диаметр светового пятна, мкм ( $f = 25 \times 10^3$  Гц,  $\tau = 250 \times 10^{-15}$  с,  $d = 15$  мкм).

Зная пороговую пиковую плотность мощности излучения, определили минимальную среднюю мощность излучения фемтосекундного лазера, необходимую для микрообработки вольфрам-рениевой пластины  $P_{ср} = 0,47$  мВт.

Оптимизацию и отработку технологии проводили при мощности лазерного излучения выше этого значения с целью обеспечения эффективной и производительной микрообработки заготовки из сплава ВР-27 ВП. В качестве фокусирующего элемента использовался F-theta объектив с фокусным расстоянием  $F = 70$  мм для получения обрабатываемого пятна излучения диаметром 15 мкм. При этом диапазон средней мощности излучения составлял 0,5–6 Вт при скорости обработки до 1000 мм/с и числе проходов от 1 до 300. Энергия в импульсе изменялась от 40 до 400 мкДж. Частота следования импульсов была постоянной и составляла  $f = 25 \times 10^3$  Гц.

На рис. 2 показан фрагмент изображения катода, изготовленного из фольги ВР-27 ВП фемтосекундным лазером при неоптимальном режиме обработки.

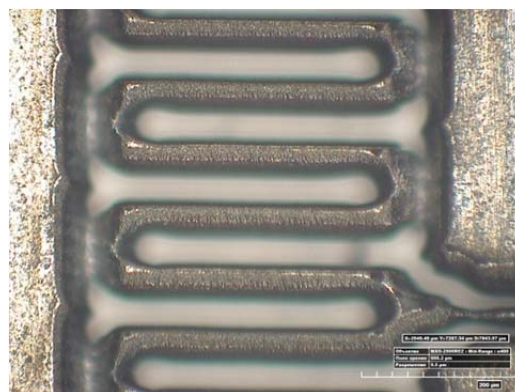


Рис. 2. Изображение фрагмента катода из фольги ВР-27 ВП изготовленного фемтосекундным лазером при неоптимальном технологическом режиме обработки: энергия в импульсе = 50 мкДж,  $P_{изл.} = 0,7$  Вт,  $F_{объект.} = 70$  мм, скорость обработки  $V_{обр.} = 500$  мм/с, число проходов 200,  $d_{св.пятна} = 15$  мкм.

На изображении видны участки подогретателя, где металл удален не полностью. При дальнейшей оптимизации параметров лазерной резки данный дефект был устранен за счет повышения числа проходов луча до 300, скорости до 1000 мм/с и увеличения средней мощности излучения до 5–6 Вт. Этот режим позволил минимизировать ЗТВ и шероховатость поверхности реза. При этом достигнута шероховатость поверхности менее 1 мкм.

На рис. 3 для сравнения показаны изображения кернов катонов, изготовленных с применением ЛПМ и фемтосекундного волоконного лазера.

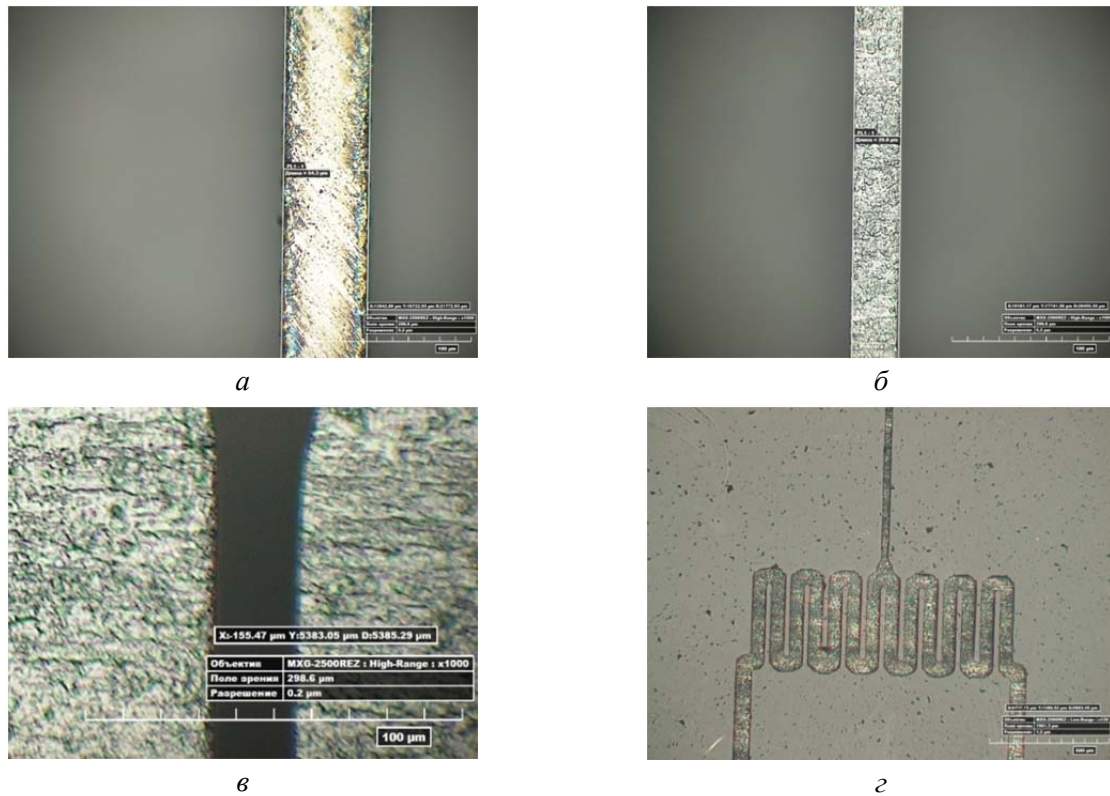


Рис. 3. Изображения катода: а) – керн, изготовленный с применением ЛПМ; б) – керн, изготовленный фемтосекундным лазером; в) – фрагмент меандра катода, изготовленного фемтосекундным лазером; г) – катод, изготовленный фемтосекундным лазером.

Применение лазерной технологии с фемтосекундными импульсами позволило полностью отказаться от механической операции сплющивания керна с 50 до 25 мкм и устранить термическое воздействие лазерного излучения на вольфрам-рениевую фольгу, так как передача импульсной энергии осуществлялась за период на пять порядков меньше наносекундного ЛПМ. При этом шероховатость поверхности лазерного реза составила менее 1 мкм и отсутствовали выплески металла, что свело к минимуму последующую химическую обработку катодов. Изготовление деталей в режиме массива позволило получить 50 катодов за 30 минут.

На рис. 4 представлены эмиссионные характеристики МНОК через 1 час и 120 часов работы. С увеличением длительности работы ток катода увеличился.

МНОК с размером эмиссионной поверхности  $0,7 \times 0,025$  мм, изготовленный из фольги ВР-27ВП на фемтосекундном лазере, показал стабильную работу в макете ЦЗУ в непрерывном режиме с рабочей температурой 650–700 °С при токоотборе 2 А/см<sup>2</sup> в течение 120 часов. В настоящее время эти катоды проходят испытания на долговечность.

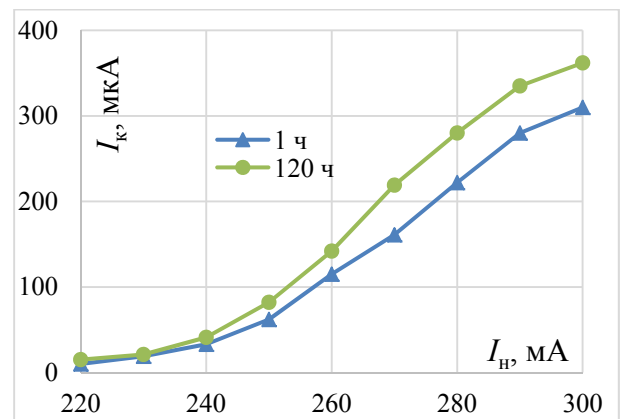


Рис. 4. Эмиссионные характеристики МНОК, изготовленного с применением фемтосекундного волоконного лазера. По горизонтальной оси – ток накала катода.

## Заключение

В работе впервые изготовлен и испытан МНОК для ЦЗУ с применением фемтосекундного иттербиевого волоконного лазера с длиной волны излучения  $\lambda = 1030 \pm 5$  нм.

Экспериментальные исследования МНОК, изготовленных из 50-мкм вольфрам-рениевой фольги, показали, что способ прецизионной



микрообработки лазерным излучением с фемтосекундной длительностью импульсов имеет ряд преимуществ по сравнению с наносекундным ЛПМ и механическим способом изготовления катодов, а именно: высокую производительность; субмикронную шероховатость поверхности реза; отсутствие зоны термического влияния и грата; исключение операции химической очистки катодов от шлака.

МНОК продемонстрировал стабильную работу в макете ЦЗУ с рабочей температурой 650–700 °С при токоотборе 2 А/см<sup>2</sup> в течение 120 часов. Испытания на долговечность продолжаются.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Быковский С. В., Будзинский Ю. А., Калина В. Г., Котов В. Е., Саврухин О. А. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2018. Вып. 3 (538). С. 43.

2. Жабин Г. А., Лябин Н. А., Архипов Д. Ю., Парамонов В. С., Федотов В. В., Долгих К. О. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2020. Вып. 4 (547). С. 90.

3. Григорьянц А. Г., Казарян М. А., Лябин Н. А. Лазерная прецизионная микрообработка материалов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017. .

4. Лябин Н. А., Парамонов В. С., Парамонова Г. М. и др. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2017. Вып. 2 (533). С. 12.

5. Батенин В. М., Лябин Н. А., Маликов М. М. // Прикладная физика. 2020. № 5. С. 97.

6. Лазеры и аппаратура [Электронный ресурс]. URL: <http://www.laserapr.ru/lasery-i-apparatura/165> (дата обращения: 17.03.2021).

7. Малов А. Н., Оришич А. М., Достовалов А. В., Кузнецов А. Г., Бабин С. А. // Прикладная фотоника. 2015. Т. 2. № 2. С. 166.

8. Жабин Г. А., Архипов Д. Ю., Седловец Д. М., Темиряева М. П. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2020. Вып. 1 (544). С. 46.

9. Жабин Г. А., Архипов Д. Ю., Темиряева М. П. // Прикладная физика. 2019. № 5. С. 54.

10. Жабин Г. А., Магамеднебиев З. М., Пашков А. Н. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2018. Вып. 3 (538). С. 50.

PACS: 79.40. + z, 68.37.–d, 68.37.Ps

## The possibilities of using a femtosecond fiber laser in the manufacture of thermionic cathodes

*G. A. Zhabin<sup>1</sup>, N. A. Lyabin<sup>1</sup>, E. V. Skupnevsky<sup>2</sup>, D. Yu. Arkhipov<sup>1</sup>, and K. O. Dolgikh<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Shokhin RPC “Istok”, JSC  
2A Vokzalnaya st., Fryazino, Moscow Region, 141190, Russia  
E-mail: zhabingennady@yandex.ru

<sup>2</sup> SPC «Lasers and Equipment TM»  
5–1 Georgievsky Ave., Moscow, Zelenograd, 124482, Russia

Received March 18, 2021

*The possibilities of using a fiber laser with a femtosecond duration of radiation pulses in the manufacture of miniature thermionic cathodes made of 50 μm of tungsten-rhenium foil are shown. The cathode assembly, consisting of a heater and a core, is made in the form of a solid structure with an oxide coating applied by ion-plasma sputtering. The emission characteristics of the cathode are presented.*

*Keywords:* molecular sputter-deposited oxide cathode, precision microprocessing, lasers on copper vapor, femtosecond fiber lasers, laser processing equipment, emission characteristics, durability.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-2-67-72

**REFERENCES**

1. S. V. Bykovsky, Yu. A. Budzinsky, V. G. Kalina, V. E. Kotov, and O. A. Savrukhn, *Electronnaya tekhnika. Ser. 1. Svch-tekhnika* **3** (538), 43 (2018).
2. G. A. Zhabin, N. A. Lyabin, D. Yu. Arkhipov, V. C. Paramonov, V. V. Fedotov, and K. O. Dolgikh, *Electronnaya tekhnika. Ser. 1. Svch-tekhnika* **4** (547), 90 (2020).
3. A. G. Grigor'yants, M. A. Kazaryan, and N. A. Lyabin, *Lazernaya precizionnaya mikroobrabotka materialov (Laser precision micromachining of materials)* (Fizmatlit, Moscow, 2017).
4. N. A. Lyabin, V. C. Paramonov, G. M. Paramonova et al., *Electronnaya tekhnika. Ser. 1. Svch-tekhnika* **2** (533), 12 (2017).
5. V. M. Batenin, N. A. Lyabin, and M. M. Malikov, *Applied Physics*, No. 5, 97 (2020) [in Russian].
6. *Lasers and equipment* (2021). URL: <http://www.laserapr.ru/lasery-i-apparatura>.
7. A. N. Malov, A. M. Orishich, A. V. Dostovalov, A. G. Kuznetsov, and S. A. Babin, *Prikladnaia Photonika* **2** (2), 166 (2015).
8. G. A. Zhabin, D. Yu. Arkhipov, M. P. Temiryazeva, and D. M. Sedlovets, *Electronnaya tekhnika. Ser. 1. Svch-tekhnika* **1** (544), 46 (2020).
9. G. A. Zhabin, D. Yu. Arkhipov, and M. P. Temiryazeva, *Applied Physics*, No. 5, 54 (2019) [in Russian].
10. G. A. Zhabin, Z. M. Magamednebiev, and A. N. Pashkov, *Electronnaya tekhnika. Ser. 1. Svch-tekhnika* **3** (538), 50 (2018).