

# **Химическая и ионно-плазменная обработка медно-молибденового композита в производстве ламп бегущей волны с высоким коэффициентом полезного действия**

**Д.И. Кириченко, П.Д. Шалаев, Н.О. Шабунин**

АО «НПП «Алмаз»

**Аннотация:** в работе приведены результаты структурирования поверхности токоприёмных электродов коллектора электронов из медно-молибденового композита МД-50. Проведено сравнение структур, полученных избирательным химическим травлением меди и ионно-плазменным напылением молибдена. Показано, что на поверхности медно-молибденового композита МД-50 можно создать микро и нано размерную структуру ионно-плазменным осаждением молибдена.

**Ключевые слова:** лампа бегущей волны, коллектор электронов, коэффициент полезного действия

## **1. Введение**

Лампы бегущей волны (ЛБВ), работающие в условиях ограниченного энергоснабжения, например, в аппаратуре спутников связи, должны обладать высоким коэффициентом полезного действия (КПД). В аппаратуре спутников связи применяют преимущественно ЛБВ О-типа со спиральными замедляющими системами (ЗС). Однако, КПД ( $\eta$ ) этих приборов без рекуперации энергии электронного потока не превышает 40 % в длинноволновой части сантиметрового диапазона частот и уменьшается до 15 – 10 % вблизи границы с миллиметровым диапазоном. Повышение  $\eta$  сверх этих значений обеспечивают многоступенчатой рекуперацией части энергии электронного потока в многосекционных коллекторах электронов.

В коллекторе ЛБВ с  $\eta$  50 – 70% обычно имеются 3 – 4 последовательно расположенные рекуперирующие секции, изолированные по электрическому напряжению от ЗС, корпуса коллектора и между собой. Электрические потенциалы токоприёмных электродов этих секций меньше потенциала ЗС и потенциал электрода каждой следующей секции в направлении от ЗС меньше потенциала электрода предыдущей секции. За счёт этого в коллекторе происходит сортировка электронов электронного потока по энергиям (электроны с большей энергией оседают в секциях с меньшим потенциалом) и частичная рекуперация их энергии. Осуществить полную рекуперацию энергии электронного потока нет возможности, так как непрерывный спектр энергий электронов в коллекторе делится на 3 – 4 части в соответствии с тормозящими потенциалами токоприёмных электродов секций коллектора.

Кроме этого, существенно снижает эффективность рекуперации и  $\eta$  вторичная электронная эмиссия (ВЭЭ) с поверхности токоприёмных электродов. Токоприёмные электроды коллекторов изготавливают из токопроводящих материалов, обычно из молибдена, меди или их сплавов и композитов. Полный коэффициент ВЭЭ этих материалов больше единицы, у молибдена и меди 1,5 – 1,7, по сведениям из разных источников информации. В сложной электронно-оптической системе коллектора первое поколение вторичных электронов может породить на поверхности токоприёмных электродов второе поколение таких электронов и этих поколений может быть больше двух. Вторично-эмиссионные электроны движутся в соответствии с распределением электрического поля в коллекторе от электродов с меньшим

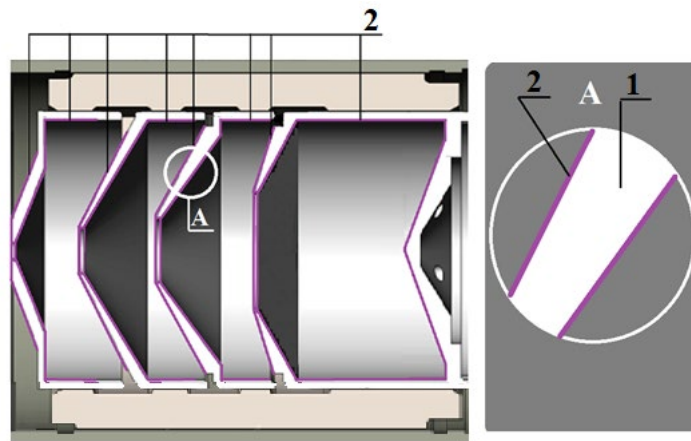
электрическим потенциалом к электродам с более высоким потенциалом, включая ЗС. Это приводит к увеличению тока ЗС, повышению её температуры, увеличению потребляемой мощности ЛБВ и уменьшению  $\eta$ . При коэффициенте ВЭЭ больше единицы процесс «размножения» поколений вторичных электронов может быть причиной неприемлемого роста указанных выше негативных последствий для ЛБВ.

Известны способы снижения вторично-эмиссионной способности токоприёмных электродов коллектора, основанные на применении токоприёмных деталей коллектора из графита [1 – 2], текстурировании поверхности электродов коллектора из углерода или меди [3], нанесения на электроды покрытий из углерода [4]. Эти способы позволяют снизить коэффициент ВЭЭ с поверхности электродов коллектора до значений меньше единицы. Но технологии производства таких коллекторов характеризуются повышенной сложностью, и высокой чувствительностью к отклонению технологических режимов от номинальных значений.

С целью снижения сложности технологии, снижения затрат при производстве и увеличения надёжности коллекторов ЛБВ для спутников связи проведены экспериментальные исследования способа снижения коэффициента ВЭЭ с поверхности электродов коллектора аналогичного [5]. В этом докладе представлены некоторые результаты этой работы.

## 2. Химическое и ионно-плазменное травление деталей из медно-молибденового композита для коллекторов электронов ЛБВ

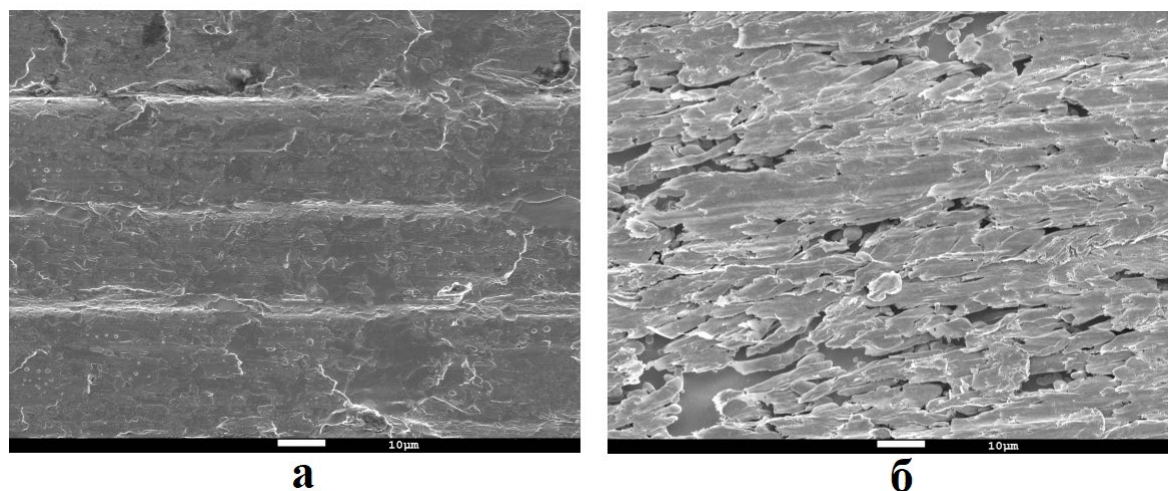
Исследования проведены с целью повышения эффективности рекуперации энергии электронного потока в коллекторе и повышения КПД ЛБВ для усилителей мощности радиосигналов спутников связи. Коллектор обеспечивает четырёх ступенчатую рекуперацию энергии электронного потока в ЛБВ. 3-D модель коллектора показана на рисунке 1.



**Рисунок 1.** Продольный разрез коллектора: 1 – токоприёмный электрод, 2 – обрабатываемые поверхности токоприёмных электродов.

Материал токоприёмных электродов ЛБВ - медно-молибденовый композит МД-50. Композит содержит в своём составе 50% молибдена, 50% меди и представляет собой губку из спрессованного молибденового порошка, поры которой заполнены медью. В промышленном производстве коллектора и ЛБВ с этим коллектором применялся предложенный ранее способ снижения ВЭЭ [5]. При этом способе коэффициент ВЭЭ снижался за счёт изменения структуры поверхности токоприёмных электродов коллектора при избирательном вытравливании меди на глубину несколько микрон. Представлялось, что, в результате вытравливания меди, на поверхности детали возникает сотовидная структура, обеспечивающая снижение коэффициента

ВЭЭ. При производстве ЛБВ величина положительного эффекта (увеличения КПД ЛБВ при применении избирательного травления) оказалась значительно меньше ожидаемой. Для выяснения причин уменьшения положительного эффекта были проведены исследования поверхности деталей коллектора до и после травления. Фотографии, полученные на электронном микроскопе JEOL JSM – 7001F с увеличением 1000, представлены на рисунке 2.



**Рисунок 2.** Поверхность токоприёмного электрода: **а** – до избирательного вытравливания меди, **б** – после избирательного вытравливания меди.

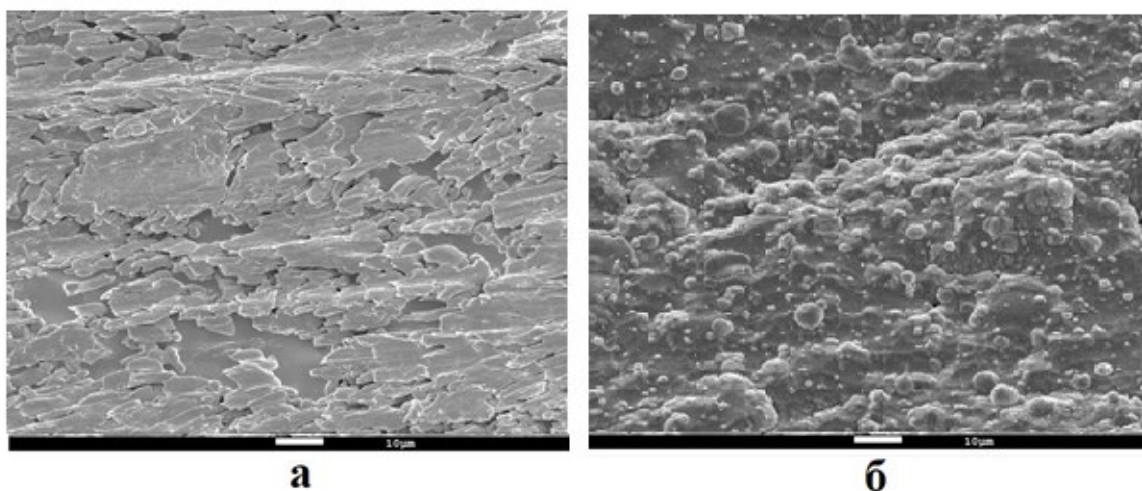
Как видно на рисунке 2 **а**, поверхность электрода после механической обработки покрыта слоем меди. Это может быть следствием выдавливания на поверхность более пластичного металла – в этом варианте меди. Следовательно, ВЭЭ с поверхностями таких электродов будет близка к ВЭЭ с поверхностями аналогичных медных электродов. Учесть влияние макроскопического рельефа поверхности электродов (следов от резца, возникающих при механической обработке детали) на эффективность рекуперации энергии электронов в коллекторе сложно из-за сложных распределений траекторий первичных электронов их энергий.

На рисунке 2 **б** видно, избирательное вытравливание меди на глубину несколько микрон не приводит к получению поверхности с сотовой структурой. Поверхность электрода, как видно на рисунке 2 **б**, образована в основном молибденом. Попытка дополнительного травления меди и молибдена также не принесла желаемых результатов.

В [6] увеличены эффективность рекуперации энергии электронов и КПД мощной ЛБВ X-диапазона в результате нанесения титанового покрытия на внутреннюю поверхность электродов коллектора. Покрытие имело сложную нано и микроструктуру, поэтому указанный положительный эффект был достигнут как за счёт низкого коэффициента ВЭЭ титана, так и за счёт структурирования поверхности покрытия. Возможность применения покрытий из титана в представленной здесь работе исключалась. Детали исследуемого коллектора паяются в узлы в водородных печах, менять эти технологические процессы по ряду причин было нецелесообразно. Поэтому поставленная в данной работе задача состояла в создании на поверхности электродов коллектора микро-нано размерной структуры из молибдена.

Нанесение молибдена на поверхность, показанную на рисунке 2 **б**, позволяет получить покрытие с хорошей адгезией. Микро и нано размерную структуру поверхности электродов после избирательного химического травления меди далее получили травлением ионами молибдена и ионно-плазменным напылением молибдена на травлёные поверхности. Аналогичный способ получения структурированных

поверхностей электродов коллектора использован [6]. Представленные здесь травление ионами молибдена и ионно-плазменное напыление молибдена на травлёные поверхности, выполнены в вакуумной установке УРМ3.279.048. Отличие от [6] состояло в том, что в плазменном источнике дугового типа вакуумной установки использовали катод из молибдена вместо катода из титана, соответственно режимы травления и напыления отличались, отличались также материалы токоприёмных электродов коллектора. В работе [6] материалом электродов была медь. На рисунке 3 показаны поверхности электрода коллектора после травления ионами молибдена (3а) и после ионно-плазменного напыления молибдена (3б)



**Рисунок 3.** Поверхность токоприёмного электрода: **а** – после травления ионами молибдена, **б** – после ионно-плазменного напыления молибдена на травлённую ионами молибдена поверхность.

На рисунке 3а не видно существенных изменений поверхности по сравнению с рисунком 2б. Несколько большее количество пор, заполненных медью, может быть следствием фотографии другого участка поверхности электрода. Структура поверхности, показанная на рисунке 3б, похожа на структуру, полученную в [6]. Здесь показан один из образцов структуры, образованной методом ионно-плазменного напыления из потока положительных ионов с нано микро размерными частицами паров молибдена. Изменением электрического режима работы электроискрового испарителя установки, напряжения смещения её подложкодержателя и времени выдержки в каждом из режимов в процессе ионно-плазменного осаждения можно получать разнообразные структуры поверхности токоприёмных электродов коллектора. Выбор параметров режима ионно-плазменного осаждения молибдена для внедрения в технологию производства ЛБВ будет сделан по результатам испытаний её экспериментальных образцов.

### 3. Заключение

Экспериментально показано, что избирательное вытравливание меди из медно-молибденового композита МД-50 на глубину несколько микрон не приводит к образованию сотообразной структуры на поверхности токоприёмных электродов коллектора электронов, обеспечивающей снижение коэффициента ВЭЭ.

На поверхности медно-молибденового композита МД-50, после избирательного вытравливания меди на глубину несколько микрон можно создать микро и нано размерную структуру ионно-плазменным осаждением молибдена из потока его положительных ионов и паров с нано и микро размерными частицами.

Технологический процесс структурирования поверхности токоприёмных

электродов коллекторов из медно-молибденового композита МД-50 химическим травлением с последующим ионно-плазменным осаждением молибдена может быть внедрён в производство ЛБВ с использованием отечественного технологического оборудования и без изменения технологии изготовления узлов в водородных печах.

#### Список литературы

1. Ramins, P. Verification of an improved computational design procedure for TWT-dynamic refocuser-MDC systems with secondary electron emission losses / P. Ramins, H G. Kosmahl, D. A. Force, et al. // IEEE Transactions on Electron Devices. - 1986. - Vol. ED-33. - № 1. - P. 85-90.
2. Шестеркин, В.И. Углеродные материалы в теплонагруженных узлах ламп бегущей волны и клистронов (обзор) / В.И. Шестеркин, Т.М. Крачковская, П.Д. Шалаев и др. // Радиотехника и электроника. - 2022. - Т.67. - №10. - С. 946-954.
3. А. С. Гилмор-мл Лампы с бегущей волной // Перевод с английского А. Г. Кудряшова под ред. Н. А. Бушуева. М. Изд-во Техносфера. 2013. С. 616.
4. Curren, N.A. TWT efficiency enhancement with textured carbon surfaces on copper MDC electrodes / N.A. Curren, P. Ramins P. // International electron Dev. Meeting. - 1985. – P. 361-363.
5. **Пат. 2093915 РФ, МПК H01J 9/14, 23/027** Способ снижения коэффициента вторичной электронной эмиссии / Желудков В.И., Козлова Р.Ф.; заявитель и патентообладатель Государственное научно-производственное предприятие "Алмаз" – № 93040409/07; заявл. 10.08.1993; опубл. 20.10.1997, - 5 с. : ил.
6. Кириченко Д.И., Шалаев П.Д., Шабунин Н.О., Царев В.А. ионно-плазменное нанесение микро и нано текстурированных покрытий из титана на поверхности коллекторных электродов лампы бегущей волны // Вопросы электротехнологии. – СГТУ. – 2023. - №4. – С. 17 – 24.