

УДК 621.378.324

О МЕХАНИЗМЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ ОБЪЕМНОГО РАЗРЯДА В МАЛОГАБАРИТНЫХ ОТПАЯННЫХ ТЕА-CO₂ ЛАЗЕРАХ

Б. А. Козлов, д.м-ф.н., профессор кафедры ЭП РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0003-4747-6340, e-mail: kozlov.qe.ryazan@mail.ru

Май Тхэ Нгуен, аспирант РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0002-4360-853X, e-mail: maithenguyen.ryazan@gmail.ru

Изучены структура поверхности электродов и их автоэлектронные характеристики до воздействия на них плазмы объемного разряда и после определенного времени взаимодействия с плазмой объемного разряда в CO₂-лазерных смесях атмосферного давления. Установлено, что под воздействием плазмы объемного разряда изменяются микроструктура рабочих поверхностей электродов и их автоэмиссионные свойства. Обоснован механизм локализации объемного разряда накачки в результате локального увеличения автоэлектронных токов с поверхности катодов. Целью работы является установление причин и возможного механизма локализации объемного самостоятельного разряда в CO₂-лазерных смесях атмосферного давления в условиях длительного взаимодействия плазмы объемного разряда с рабочими поверхностями электродов.

Ключевые слова: объемный разряд, автоэлектронная эмиссия, ТЕА-CO₂ лазер, ресурс, микроструктура поверхности катодов, плазмохимические реакции, химический состав рабочих смесей.

DOI: 10.21667/1995-4565-2019-70-169-178

Введение

Ресурс работы малогабаритных отпаянных ТЕА-CO₂-лазеров определяется временем, в течение которого объемный разряд сохраняет свою пространственную однородность. Для лазеров, работающих на частотах повторения импульсов от единиц герц до десятков герц ресурс определяют числом разрядных импульсов. Типичные значения ресурса для малогабаритных отпаянных ТЕА-CO₂-лазеров без регенерации рабочих смесей составляют 10⁴-10⁵ импульсов. После этого объемный разряд локализуется и становится не пригодным для целей накачки. Применение методов каталитической регенерации рабочих смесей позволяет заметно увеличить ресурс и достичь уровня 10⁶-10⁷ импульсов [1, 2].

Перерождение объемного разряда в сильноточный локальный, не пригодный для целей накачки, в отпаянных ТЕА-CO₂ лазерах происходит под воздействием продуктов плазмохимических реакций, накапливающихся в рабочих смесях. Основной компонентой, вызывающей локализацию объемного разряда, является молекулярный кислород. Объемный разряд может трансформироваться в локальный в результате снижения уровня начальной ионизации, а также в результате развития плазменных и химико-ионизационных неустойчивостей [1-9]. Все эти механизмы перерождения объемного разряда в локальный базируются на процессах, которые протекают в объеме межэлектродного промежутка, т.е. в газовой среде. Характерные времена развития плазменных неустойчивостей имеют значения, по величине совпадающие с временами дрейфа электронов через разрядный промежуток или превышают эти значения более чем на порядок [2-9]. Минимальные времена развития плазменных неустойчивостей применительно к разрядным промежуткам с межэлектродным расстоянием $d = 0,8-1$ см составляют 30-50 наносекунд.

Наряду с процессами, протекающими в объеме газоразрядного промежутка, протекают процессы и на поверхности электродов. В результате длительного взаимодействия рабочих поверхностей электродов с «активными» формами кислорода (O, O₂, O₃, O⁻, O₂⁻, O₃⁻) и оксидов азота в форме отрицательных и положительных ионов на рабочих поверхностях образу-

ются слои окисных, карбидных, нитридных и более сложных по химическому составу образований [10-12].

В [2, 8, 13] показано, что при наличии на поверхности катодов диэлектрических включений может иметь место электрический пробой этих включений с последующим образованием локальных каналов и перерождением объемного разряда в сильноточный искровой канал.

Применительно к условиям возбуждения объемного разряда в малогабаритных отпаянных ТЕА-СО₂ лазерах, в которых электроды в течение длительного времени взаимодействуют с плазмой объемного разряда, изучение поведения автоэлектронных характеристик электродов позволит обосновать механизм локализации объемного разряда, а также определить род материала электродов, при использовании которого для изготовления электродов могут быть достигнуты наибольшие значения ресурса работы малогабаритных отпаянных ТЕА-СО₂ лазеров.

Экспериментальные методы и установки

Исследования включали в себя визуальные наблюдения за пространственной структурой объемного разряда, изучение микроструктуры поверхности электродов на растровом электронном микроскопе, изучение автоэлектронных характеристик катодов в зависимости от степени воздействия на них плазмы объемного разряда, а также проведение прямых ресурсных испытаний малогабаритного отпаянного ТЕА-СО₂ лазера.

На рисунке 1 приведена общая схема экспериментальной установки. Она включает в себя газоразрядную камеру ГРК с четырьмя одинаковыми разрядными промежутками, генератор высоковольтных импульсов ГВВИ, систему откачки и наполнения камеры исследуемыми газами с необходимым соотношением между компонентами СО₂, N₂, He.

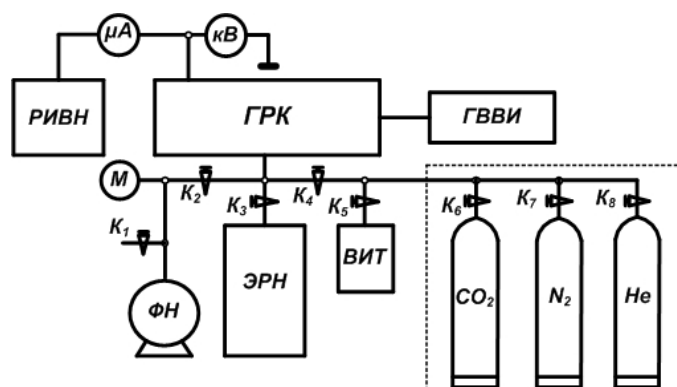


Рисунок 1 – Общая схема установки

Figure 1 – General installation scheme

В состав системы откачки входят форвакуумный насос ФН, электроразрядный насос ЭРН (НОРД-100), ионизационно-термопарный вакуумметр ВИТ (ВИТ-2) и стрелочный вакуумметр М. С помощью вакуумных кранов К₁-К₈ задаются последовательность откачки и наполнения газоразрядной камеры исследуемыми газами и уровнями рабочих давлений в пределах от одной атмосферы (наполнение рабочими смесями для формирования объемного разряда) до 10⁻⁸ мм рт. ст. (при изучении автоэлектронных характеристик катодов).

На рисунке 2 отражена структура электродов, установленных в газоразрядной камере ГР (рисунок 1), для одновременного зажигания объемного разряда в четырех промежутках. Профилированные катоды К₁-К₄ неподвижно зафиксированы на верхней части газоразрядной камеры, выполненной из кварца. Катоды изготавливались из таких материалов, как Al, Mg, Ni, Cu, Mo, Ta, Nb, W and C (графит) и могли легко заменяться в процессе проведения исследований. Общий анод А в форме отполированной плоской пластины из никеля был установлен на сильфоне узле СУ. С помощью этого узла расстояние между электродами «А-К» могло при необходимости контролируемым образом изменяться в пределах от 0,5 мм до 2 см.

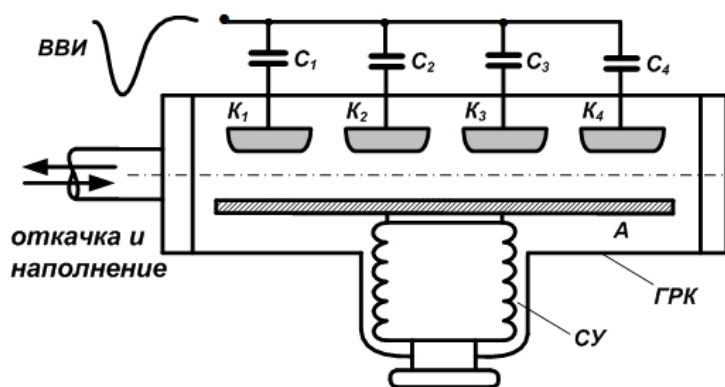


Рисунок 2 – Структура газоразрядной камеры
Figure 2 – Gas discharge chamber structure

(Электроды для зажигания вспомогательных искровых разрядов, инициирующих зажигание объемных разрядов, на рисунке 2 не приведены).

Перед проведением исследований газоразрядная камера ГРК откачивается форвакуумным насосом до остаточного давления $P_{\text{ост}} < 10^{-2}$ мм рт. ст. Затем она наполняется газовой смесью $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$ с необходимым соотношением между компонентами до полного давления $P_{\Sigma} = 1$ Атм.

Высоковольтный импульс ВВИ амплитудой до 30 кВ, подаваемый от генератора высоковольтных импульсов ГВВИ одновременно на катоды K_1 - K_4 через разделительные конденсаторы C_1 - C_4 , приводит к формированию индивидуальных объемных разрядов в промежутках между катодами K_1 - K_4 и общим анодом А. Величина межэлектродного промежутка при этом устанавливается равной 8 мм. Объемные разряды наносекундной длительности с плотностью энергии $W = 150\text{-}250$ мДж·см⁻³ зажигались на частоте повторения импульсов 25 герц. Такие частоты повторения импульсов были достигнуты благодаря применению эффекта «электрического ветра» [14]. (Электродная система для формирования «электрического ветра» на рисунке 2 не приведена).

После определенного числа разрядных импульсов разрядная камера выкачивается форвакуумным, а затем электроразрядным насосами до остаточного давления $P_{\text{ост}} < 10^{-8}$ мм рт. ст. С помощью сильфонного узла СУ разрядные промежутки уменьшаются до уровня в 1 мм. В этих условиях проводятся измерения значений автоэлектронных токов в зависимости от напряжения, подаваемого на индивидуальные промежутки от регулируемого источника высокого напряжения РИВН (см. рисунок1). Величина этого напряжения могла плавно изменяться в пределах от нуля до 40 кВ. Статический киловольтметр кВ (С-95) и микроамперметр $\mu\text{А}$ с пределами измерений $0,01\div 10$ $\mu\text{А}$ позволяли проводить измерения автоэлектронных токов в вакуумных промежутках в зависимости от напряжения.

Полученные в этих измерениях данные представлялись в координатах Фаулера-Нордгейма [8, 13, 15]. По наклону полученных зависимостей и известной величине работы выхода электронов из поверхности исследуемых материалов определялись значения локальных коэффициентов усиления электрического поля.

Величина работы выхода электронов из исследуемых поверхностей электродов определялась по измеряемой в вакууме методом «вибрирующего конденсатора» [16, 17] контактной разности потенциалов. Суть этого метода заключается в измерении тока смещения, возникающего при изменении емкости конденсатора, образованного двумя материалами. При этом работа выхода одного из материалов должна быть известна. Ток смещения исчезает, если контактная разность потенциалов компенсируется напряжением от источника, включенного последовательно в цепь одного из образцов, а компенсирующее напряжение равно и противоположно по знаку контактной разности потенциалов. Достоинствами этого метода являются непосредственный отсчет значений контактной разности потенциалов, простота оборудования, возможность проведения измерений на очень маленьких участках поверхности.

В настоящей работе емкость конденсатора, образованного фрагментом исследуемого материала и молибденового стержня диаметром 0,3 мм, изменялась с помощью электромагнита. Резонансная частота вибрирующей системы составляла $F = 1080$ Гц с амплитудой колебаний электрода $a = 0,1$ мм.

Электрическая и вакуумная схемы экспериментальной установки для измерений работы выхода электронов из исследуемых материалов приведены на рисунке 3, а и рисунке 3, б. Напряжение с генератора синусоидальных колебаний 4 на резонансной частоте подается на электромагнит 3 и приводит в движение игольчатый электрод 1, который совершает колебания над изучаемой поверхностью 2. Переменный сигнал, возникающий при вибрации игольчатого электрода 1 на измерительном сопротивлении R_1 (рисунок 3, а), усиливается четырехкаскадным усилителем 5, детектируется и регистрируется нуль-индикатором 6. Компенсация контактной разности потенциалов осуществляется напряжением определенной полярности, снимаемым с потенциометра R_2 и измеряемым вольтметром 7. Нулевое показание вольтметра 7 соответствует равенству компенсирующего напряжения контактной разности потенциалов.

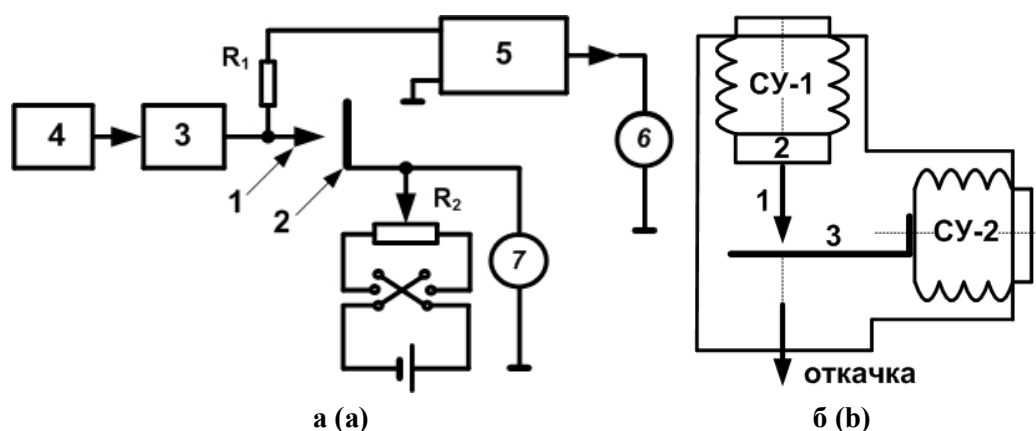


Рисунок 3 – Электрическая (а) и вакуумная (б) схемы установки для измерений работы выхода электронов методом «вибрирующего конденсатора»
Figure 3 – Electrical (a) and vacuum (b) setup circuits for measuring the electron work function by the «vibrating capacitor» method

Измерение контактной разности потенциалов проводилось в вакуумной камере из стекла (рисунок 4, б). Резонансная система 2 с «вибрирующим» электродом 1 из молибдена устанавливалась на платформе сильфонного узла СУ-1. На предметном столике 3 могли устанавливаться до 14 полосок из измеряемых материалов. Эти материалы устанавливались под «вибрирующим» электродом 1 с помощью сильфонного узла СУ-2. Микрометрические перемещения предметного столика относительно «вибрирующего» электрода 1 позволяли получать информацию о величине работы выхода электронов в различных точках исследуемых материалов.

Контактная разность потенциалов и, соответственно, величина работы выхода электронов измерялись с погрешностью 50 мВ.

Состояние поверхности изучалось на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6610. Пространственная структура объемного разряда контролировалась визуально и фотографическим методом.

Результаты экспериментальных исследований

Микроструктура поверхности электродов из Al, Ni, Ta и С (графита) до воздействия на них плазмы объемного разряда и после воздействия на них 10^6 плазменных импульсов отражена на фотографиях, приведенных на рисунке 4.

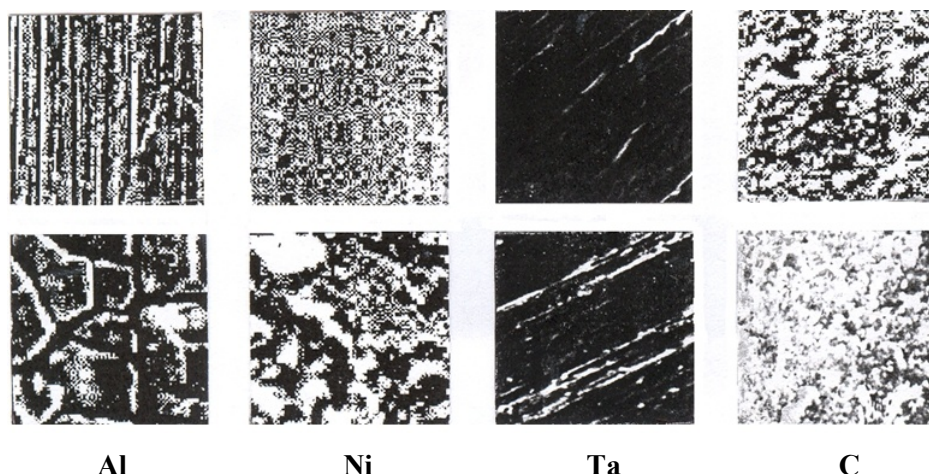


Рисунок 4 – Микроструктура поверхности электродов из Al, Ni, Ta и графита (C) до воздействия на них плазмы объемного разряда (верхний ряд) и после 10^6 разрядных импульсов (нижний ряд)

Figure 4 – Microstructure of the surface of electrodes made of Al, Ni, Ta and graphite (C) before the action of a volume discharge plasma on them (upper row) and after 10^6 discharge pulses (lower row)

Объемный разряд возбуждался в смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:1:8$. Верхний ряд соответствует «чистым» поверхностям, т.е. поверхностям, которые не подвергались воздействию плазмы объемного разряда. Нижний ряд отражает состояние рабочих поверхностей электродов после воздействию на них 10^6 разрядных импульсов. Видно, что длительное воздействие плазмы объемного разряда в CO_2 -лазерных смесях, содержащих кислород в различных по активности формах, оксиды азота, озон и другие соединения, приводит к заметным изменениям в микроструктуре поверхностей катодов. Они покрываются плотными слоями, по всей видимости, окислов металлов, нитридных, карбидных и других сложных по химическому составу соединений и комплексов. Их измеренная толщина достигает значений $\approx 0,1\div 0,2$ мм.

Наблюдения за пространственной структурой объемного разряда в межэлектродном промежутке показали, что рабочая поверхность катода независимо от его материала полностью покрыта яркосветящимися игольчатого вида плазменными образованиями, которые на расстоянии $2\div 4$ мм от поверхности катода расширяются в поперечных размерах и дают однородный плазменный столб. Расстояние между ними по поверхности катода составляет ≈ 1 мм и это расстояние с течением времени изменяется очень мало. Диаметр нитевидных плазменных образований визуально оценивается в доли миллиметра. Длина же этих яркосветящихся образований по мере увеличения числа разрядных импульсов увеличивается в сторону анода. Когда длина нитевидных образований достигает величины в $30\div 40$ % от межэлектродного промежутка, один из нитевидных каналов перекрывает весь промежуток и далее в межэлектродном промежутке формируется только один сильноточный локальный разряд. Формирование объемного разряда в этих условиях становится невозможным.

Структура плазмы объемного разряда в исходной смеси газов независимо от материала катода обладает высокой пространственной однородностью. Спустя $10^4\div 10^6$ разрядных импульсов промежутки с катодами из алюминия и магния оказываются полностью перекрыты яркосветящимися локальными каналами. В газоразрядных промежутках из Ni, Ta, W и C структура плазменного столба объемного разряда за это же время заметно не изменяется. Наименьшие изменения в структуре объемного разряда в катодной области и в области положительного столба наблюдаются в промежутках с катодами из W и C.

Воздействие плазмы объемного разряда на рабочие поверхности электродов приводит к изменению работы выхода электронов из этих поверхностей на $0,1\text{--}0,2$ эВ. Наблюдаемые изменения работы выхода электронов из рабочих поверхностей могут быть связаны с образованием на них окисных соединений, солей, карбидов, нитридов, смешанных окислов,

сплавов с моноокисью углерода и ряда других соединений. Значения работы выхода электронов у этих соединений изменяются в более широких пределах, чем у чистых металлов [10-12].

На рисунке 5 приведены характерные зависимости автоэлектронных токов от напряжения в координатах Фаулера-Нордгейма. Цифрой «1» обозначены характеристики, полученные при изучении электродов до воздействия на них плазмы объемного разряда. Цифрам «2» соответствуют характеристики, полученные после воздействия на электроды 10^6 разрядных импульсов. Наклоны полученных зависимостей содержат информацию о значениях коэффициента усиления β электрического поля на микро неоднородностях поверхности.

Величина коэффициента усиления электрического поля количественно связана с наклоном соответствующих прямых в координатах Фаулера-Нордгейма соотношением:

$$\beta = 2.87 \cdot 10^7 \cdot \varphi^{3/2} / \operatorname{tg} \alpha,$$

где $\operatorname{tg} \alpha$ – тангенс угла наклона приведенных на рисунке 5 зависимостей.

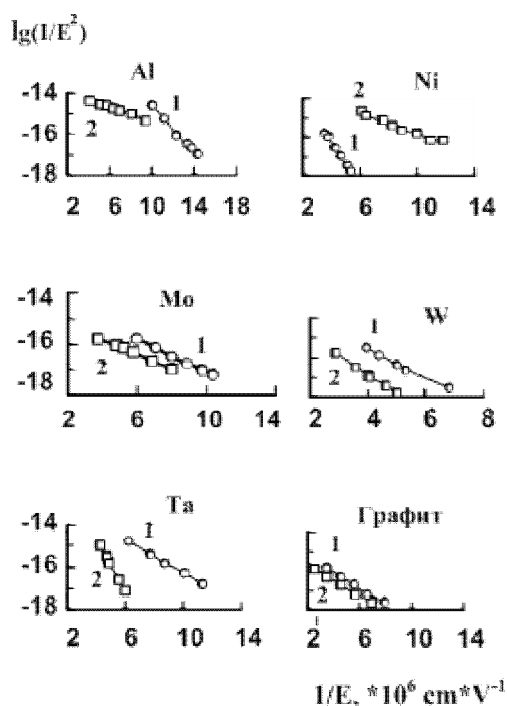


Рисунок 5 – Вольт-амперные характеристики автоэлектронных токов из рабочих поверхностей катодов из Al, Ni, Mo, W, Ta и графита в координатах Фаулера-Нордгейма до воздействия на электроды плазмы объемного разряда (1) и после воздействия на них 10^6 разрядных импульсов (2)

Figure 5 – Current – voltage characteristics of autoelectronic currents from the working surfaces of cathodes of Al, Ni, Mo, W, Ta and graphite in the Fowler – Nordheim coordinates before exposure to plasma electrodes of a volume discharge (1) and after exposure to 10^6 discharge pulses (2)

В таблице 1 приведены данные по значениям коэффициента усиления электрического поля для электродов из исследованных материалов, которые не подвергались воздействию плазмы объемного разряда (β_0), и для условий длительного взаимодействия рабочих поверхностей электродов с плазмой объемного разряда (β_T).

Таблица 1 – Значения коэффициента усиления электрического поля
Table 1 – The values of the electric field gain

Материал катодов	Al	Ni	Mo	W	Ta	C
β_0	570	530	340	340	740	420
β_T	1650	1240	704	240	500	410

Значения β_T получены после воздействия на рабочие поверхности электродов 10^6 разрядных импульсов.

Наибольшие изменения коэффициента усиления электрического поля на микронеоднородностях катодной поверхности после воздействия на нее плазмы объемного разряда отмечаются у электродов из алюминия и никеля. Величина усиления электрического поля на поверхностях электродов из молибдена, тантала, вольфрама и графита изменяется незначительно.

Полученные экспериментальные результаты показывают, что увеличение автоэлектронных токов из рабочих поверхностей катодов, которые подвергались воздействию плазмы объемного разряда связано главным образом с увеличением локальных значений напряженности электрического поля на образующихся под воздействием плазмы объемного разряда проводящих или слабопроводящих микронеоднородностях. Эти результаты указывают также на целесообразность изготовления электродов малогабаритных отпаянных ТЕА-СО₂ лазеров из таких материалов, как Мо, W, Та и графит.

С целью увеличения вклада автоэлектронных токов в общий ток объемного самостоятельного разряда в СО₂ лазерных смесях атмосферного давления рабочие поверхности изучавшихся катодов покрывались слоем углеродной сажи, содержащей углерод в микро- и наноструктурированных формах [18]. Такая сажа была получена в электродуговом реакторе при зажигании сильноточного дугового разряда между графитовыми электродами в атмосфере гелия. Эти покрытия привели к увеличению общего тока объемного самостоятельного разряда в 1.5÷2 раза при прочих равных условиях (состав рабочей смеси, напряжение на разрядном промежутке).

Проведение прямых ресурсных испытаний малогабаритного отпаянного ТЕА-СО₂ лазера с электродами, изготовленными из различных материалов, показали следующее:

1. Ресурс объемного разряда накачки в активном элементе лазера и ресурс самого малогабаритного отпаянного ТЕА-СО₂-лазера с одинаковыми по форме электродами из алюминия, меди, магния и никеля достигает 10^4 - 10^5 импульсов.
2. Ресурс объемного разряда и ресурс малогабаритных отпаянных ТЕА-СО₂ лазеров с электродами из молибдена, вольфрама, тантала достигает 10^6 - 10^7 импульсов.
3. Применение электродов из графита обеспечивает ресурс до 10^8 разрядных импульсов.

Обсуждение полученных результатов

Полученные экспериментальные результаты указывают на наличие автоэлектронных эффектов, которые усиливаются по мере увеличения степени воздействия плазмы объемного разряда (числа разрядных импульсов) на рабочие поверхности электродов для зажигания объемного самостоятельного разряда в малогабаритных отпаянных ТЕА-СО₂ лазерах. Увеличение тока автоэлектронной эмиссии в условиях проведения измерений может быть обусловлено как изменениями величины работы выхода электронов из рабочих поверхностей электродов, так и изменениями значений коэффициентов усиления электрического поля на неоднородностях, которые возникают на поверхности электродов под воздействием плазмы объемного разряда.

Измерения работы выхода электронов по измерениям контактной разности потенциалов показали, что работы выхода электронов из «модифицированных» поверхностей изменяется на десятые доли электрон-вольта по отношению к «чистым» материалам, из которых изготовлены электроды. В этой связи увеличение тока автоэлектронной эмиссии можно трактовать как увеличение, вызванное увеличением коэффициента локального усиления электрического поля на вновь образовавшихся неоднородностях на поверхности электродов.

Измеренные значения коэффициентов усиления локальных электрических полей имеют значения в пределах от 240 до 1650. Применительно к металлическим электродам такие значения усиления электрического поля на неоднородностях могут быть достигнуты при условии, что высота выступов h относится к поперечным размерам выступов в таких же преде-

лах, т.е. $h/d \approx 240 \div 1650$ [7, 11, 13, 19]. Наблюдаемые на фотографиях поверхностей электродов неоднородности рельефа не обнаруживают выступов, которые могли иметь соотношения высоты к поперечным размерам порядка $10^2 \div 10^3$. В данных условиях, когда внешняя поверхность электродов не демонстрирует резких изменений рельефа, возможными причинами заметного увеличения значений автоэлектронных токов по мере изменения химического состава поверхности электродов и их микрорельефа могут быть сами диэлектрические или слабопроводящие слои из окислов, карбидов, нитридов и других комплексных соединений, приводящие к усилению электрического поля.

К заметному усилению напряженности электрического поля в условиях относительно небольших изменений в рельефе рабочих поверхностей электродов может быть наличие сильнопроводящих слоев внутри слабопроводящих (скрытая проводимость) [20]. В последнем случае сильнопроводящая структура, образованная из паров металлического электрода, может давать необходимое соотношение между высотой и поперечными размерами на уровне $10^2 \div 10^3$.

Увеличение коэффициента локального усиления электрического поля по мере увеличения времени взаимодействия плазмы объемного разряда с рабочей поверхностью (в первую очередь катода) закономерным образом приводит к увеличению абсолютного значения тока автоэлектронной эмиссии.

При достижении характерного для каждого автоэлектронного эмиттера из исследуемого материала значения тока автоэлектронной эмиссии происходит тепловой взрыв микроострия с выбросом паров и капель на поверхность рядом с острием [7, 8, 13, 18, 21]. В парах испаренного вещества происходит интенсивная ионизация и образование повышенной проводимости. Образовавшийся эмиссионный центр с повышенной концентрацией свободных носителей зарядов дает начало образованию сильнопроводящего канала в промежутке. Характерное время развития сильнопроводящего канала соответствует времени дрейфа электронов через промежуток. Такой процесс представляет собой переход автоэлектронной эмиссии во взрывную [7, 8, 13, 21].

Заключение

1. Длительное взаимодействие плазмы объемного разряда с рабочими поверхностями электродов приводит к заметному изменению микроструктуры поверхностей.

2. Значение работы выхода электронов из поверхностей, покрытых комплексными соединениями, отличается от работы выхода электронов из чистых поверхностей на десятки доли электрон-вольта.

3. Образующиеся на поверхности электродов под воздействием плазмы объемного разряда слои окисных и других соединений приводят к увеличению автоэлектронных токов из этих поверхностей более чем на порядок.

4. Локализация объемного разряда в малогабаритных отпаянных ТЕА-СО₂ лазерах происходит в результате перехода автоэлектронной эмиссии во взрывную. Первопричиной этого является увеличение коэффициента усиления локального электрического поля на микронеровностях.

5. Ресурс работы малогабаритных отпаянных ТЕА-СО₂ лазеров определяется ресурсом объемного разряда накачки и зависит от рода материала электродов. Наиболее приемлемыми материалами для изготовления электродов малогабаритных отпаянных ТЕА-СО₂ лазеров являются молибден, вольфрам и графит. Максимальный ресурс более чем в 2 тысячи часов достигнут при изготовлении электродов для зажигания объемного разряда из графита.

Библиографический список

1. Кюн В. В., Самородов В. Г. Импульсные ТЕА-СО₂ лазеры // Обзоры по электронной технике. Сер.11. Лазерная техника и оптоэлектроника. 1991. Вып.2 (1329). 49 с.
2. Месяц Г. А., Осипов В. В., Тарасенко В. Ф. Импульсные газовые лазеры. / М.: Наука. 1991. 272с.

3. **Константинов М. Д., Осипов В. В., Суслов А. И.** Химико-ионизационная неустойчивость объемного разряда в квазистабильных газовых средах // ЖТФ. 1990. Т.60. Вып.10. с. 27–36.
4. **Norris B., Smith A. L. S.** Attachment loss of photo-ionization electrons in TEA CO₂ lasers // J.Phys. D: Appl. Phys. 1977. V.10. p.237-240.
5. **Смит К., Томсон Р.** Численное моделирование газовых лазеров. М.: Мир. 1981. 516 с.
6. **Райзер Ю. П.** Физика газового разряда. Долгопрудный.: Интеллект, 2009. 736 с.
7. **Месяц Г. А.** Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. 704 с.
8. **Королев Ю. Д., Месяц Г. А.** Автоэмиссионные и взрывные процессы в газовом разряде. – Новосибирск.: Наука, 1982. 260 с.
9. **Витteman В.** СО₂-лазер. М.: Мир, 1990. – 360 с.
10. **Лабунов В. А., Пархуток В. П.** Окисление металлов и полупроводников в низкотемпературной кислородной плазме / ЦНИИ «Электроника». М.: 1978. 71 с.
11. Физико-химические свойства окислов. Справочник / Под ред. **Г. В. Самсонова.** М.:Металлургия, 1969. 456 с.
12. **Фоменко В. С., Подчерняева И. А.** Эмиссионные и адсорбционные свойства веществ и материалов. Справочник / Под ред. Г.В.Самсонова. М.: Атомиздат. 1975. 320 с.
13. **Сливков И. Н.** Процессы при высоком напряжении в вакууме. М.:Энергоатомиздат. 1986. 256 с.
14. **Kozlov B. A., Solovyov V. I.** Formation of gas flow in active media of small-sized sealed-off TEA-lasers by an «electrical wind» // Proceedings of SPIE. 1998. Vol. 3574. Pp.519-525.
15. **Елинсон М. И., Васильев Г. Ф.** Автоэлектронная эмиссия. М.: Физматлит, 1958. 272 с.
16. **Калашников С. Г.** Электричество. М.: Наука. 1983. 560 с.
17. **Kozlov B. A., Fomin S. G.** Energy parameters and resource of high-power pulse-periodical sealed-off TEA-CO₂ lasers // Proceedings of SPIE. 2000. Vol. 4351. Pp. 123-133.
18. **До Куанг Мань, Козлов Б. А., Май Тхэ Нгуен.** О роли углеродной сажи в формировании объемного разряда накачки в СО₂-лазерных смесях атмосферного давления // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2018. № 66-2. С. 77-81.
19. **Демирчан К. С., Нейман Л. Р., Коровкин Н. В., Чечурин В. Л.** Теоретические основы электротехники. Часть I. Питер. 2003. 576 с.
20. **Латам Р.** Вакуумная изоляция установок высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1985, 192 с.
21. **Месяц Г. А.** Эктоны. Часть I. Екатеринбург, Наука. 1993. 184 с.

UDC 621.378.324

ABOUT VOLUME DISCHARGE LOCALIZATION MECHANISM IN SMALL-SIZED SEALED-OFF TEA-CO₂ LASERS

B. A Kozlov, Dr. Sc. (Phys. and Math.), professor, department of electronic devices, RSREU, Ryazan, Russia; orcid.org/ 0000-0003-4747-6340, e-mail: kozlov.qe.ryazan@mail.ru

Mai The Nguyen, post-graduate student, RSREU, Ryazan, Russia; orcid.org/0000-0002-4360-853X, e-mail: maithenguyen.ryazan@gmail.ru

*The structure of electrode surface and their auto-electronic characteristics were studied before exposure to volume discharge plasma and after a certain time of interaction with volume discharge plasma in atmospheric pressure CO₂ laser mixtures. It was found that under the influence volume discharge plasma, the microstructure of electrodes working surfaces and their field emission properties change. The mechanism of the pumping volume discharge localization as a result of local increase in field currents from cathodes surface is substantiated. **The aim of this work** is to establish the causes and possible localization mechanism of self-sustained volume discharge at atmospheric-pressure CO₂ laser mixtures under conditions of prolonged interaction of volume discharge plasma with working surfaces of electrodes.*

Key words: volume discharge, field emission of electrons, TEA-CO₂ laser, resource, cathode surface microstructure, plasma-chemical reactions, chemical composition of working mixtures.

DOI: 10.21667/1995-4565-2019-70-169-178

References

1. **Kyun V. V., Samorodov V. G.** Impulsnyye TEA-CO₂ lazery. *Obzory po elektronnoy tekhnike. Lazernaya tekhnika i optoelektronika*. 1991, vol. 2 (1329), no. 11, pp. 49. (in Russian).
2. **Mesyats G. A., Osipov V. V., Tarasenko V. F.** *Impulsnyye gazovyye lazery* (Pulsed gas lasers). Moscow, Nauka, 1991, 272 p. (in Russian).
3. **Konstantinov M. D., Osipov V. V., Suslov A. I.** Khimiko-ionizatsionnaya neustoychivost obyemnogo razryada v kvazistabilnykh gazovykh sredakh. *JTF*. 1990, vol.60, issue 10, pp. 27-36 (in Russian).
4. **Norris B., Smith A. L. S.** Attachment loss of photo-ionization electrons in TEA-CO₂ lasers. *J.Phys. D: Appl. Phys.* 1977, vol.10, pp. 237-240.
5. **Smith K., Thomson R.** *Chislennoye modelirovaniye gazovykh lazerov* (Numerical simulation of gas lasers). 1981, Moscow, Mir., 516 p. (in Russian).
6. **Raiser Yu. P.** *Fizika gazovogo razryada* (Gas discharge physics). 2009, Intellect. 736 p. (in Russian).
7. **Mesyats G. A.** *Impulsnaya energetika i elektronika* (Pulse power and electronics) Moscow, Nauka, 2004, 704 p. (in Russian).
8. **Korolev Yu. D., Mesyats G. A.** *Avtoemissionnyye i vzryvnyye protsessy v gazovom razryade* (Field emission and explosive processes in a gas discharge) Novosibirsk, Nauka, 1982, 260 p.(in Russian).
9. **Witteman V.** *CO₂-lazer* (CO₂-lazer). Moscow, Mir. 1990, 360 p. (in Russian).
10. **Labunov V. A., Parkhutok V. P.** *Okisleniye metallov i poluprovodnikov v nizkoterperaturnoy kislorodnoy plazme* (Oxidation of metals and semiconductors in low-temperature oxygen plasma). Moscow, Central Research Institute «Electronics». 1978, 71 p. (in Russian).
11. *Fiziko-khimicheskiye svoystva okislov* (Physicochemical Properties of Oxides). Moscow, Metallurgy. 1969, ed. by **G. V. Samsonov**, 456 p. (in Russian).
12. **Fomenko V. S., Podchernyaeva I. A.** *Emissionnyye i adsorbtsionnyye svoystva veshchestv i materialov* (Emission and adsorption properties of substances and materials). Moscow, Atomizdat, 1975, ed. by **G. V. Samsonov**, 320 p. (in Russian).
13. **Slivkov I. N.** *Protsessy pri vysokom napryazhenii v vakuume* (High Voltage Vacuum Processes). Moscow, Energoatomizdat, 1986, 256 p. (in Russian).
14. **Kozlov B. A., Solovyov V. I.** Formation of gas flow in active media of small-sized sealed-off TEA-lasers by an «electrical wind». *Proceedings of SPIE*. 1998, vol. 3574, pp.519-525.
15. **Elinson M. I., Vasiliev G. F.** *Avtoelektronnaya emissiya* (Field emission). Moscow, Fizmatlit, 1958, 272 p. (in Russian).
16. **Kalashnikov S. G.** *Elektrichestvo* (Electricity). Moscow, Nauka, 1983, 560 p. (in Russian).
17. **Kozlov B. A., Fomin S. G.** Energy parameters and resource of high-power pulse-periodical sealed-off TEA-CO₂ lasers. *Proceedings of SPIE*. 2000, vol. 4351, pp. 123-133.
18. **Do Kuang Manh, Kozlov B.A., Mai The Nguyen.** O roli uglerodnoy sazhi v formirovanii obyemnogo razryada nakachki v CO₂-lazernykh smesyakh atmosfernogo davleniya. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2018, no. 66-2, pp. 77-81. (in Russian)
19. **Demirchan K. S., Neumann L. R., Korovkin N. V., Chechurin V. L.** *Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki* (Theoretical Foundations of Electrical Engineering). St. Petersburg. 2003, part 1, 576 p. (in Russian).
20. **Latam R.** *Vakuumnaya izolyatsiya ustanovok vysokogo napryazheniya* (Vacuum insulation of high voltage installations). Moscow.: Energoatomizdat, 1985, 192 p. (in Russian).
21. **Mesyats G. A.** *Ektony* (Ectons). Yekaterinburg, Nauka. 1993, part 1, 184 p. (in Russian).