

**ФИЗИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА**

УДК 621.373.826

**ДИНАМИКА ФОТОЭЛЕКТРОНОВ НА СТАДИИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ИОНИЗАЦИИ В CO<sub>2</sub>-ЛАЗЕРНЫХ СМЕСЯХ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ****Б. А. Козлов**, д.ф.–м.н., профессор кафедры ПЭл РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0001-5957-3688, e-mail: kozlov.qe.ryazan@mail.ru

**Е. А. Козлов**, к.т.н., доцент кафедры ПЭл РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0003-2038-6732, e-mail: ewg.kozlov2015@yandex.ru

**Д. С. Маханько**, к.т.н., старший научный сотрудник АО «Плазма», Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0002-7609-9970, e-mail: mahdim@rambler.ru

*Получена количественная информация о динамике фотоэлектронов на стадии предварительной ионизации в отпаянном ТЕА-CO<sub>2</sub> лазере, рабочие смеси которого содержат продукты плазмохимических реакций. Установлено, что спад концентрации фотоэлектронов на стадии предварительной ионизации на несколько порядков обусловлен ослаблением интенсивности ионизирующего излучения вторичными соединениями, образующимися в активной среде лазера под воздействием плазмохимических реакций. Обоснован механизм локализации объемного разряда наносекундной длительности, ограничивающего частоту повторения импульсов и уровень средней мощности лазерного излучения.*

**Ключевые слова:** ТЕА-CO<sub>2</sub> лазер, объемный разряд, накачка, предварительная ионизация, плазмохимические реакции, концентрация и время жизни фотоэлектронов.

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2026-95-255-262**Введение**

Определяющим фактором при создании отпаянных импульсно-периодических ТЕА-CO<sub>2</sub> лазеров со значительным ресурсом является сохранение пространственной однородности плазмы объемного разряда накачки. Однородная структура плазмы объемного разряда нарушается в результате развития плазменных неустойчивостей, а также гибели начальных электронов ниже порогового значения на стадии предварительной ионизации в результате реакций прилипания к электроотрицательным соединениям [1-5]. Многочисленные исследования показали, что времена развития плазменных неустойчивостей в объемных разрядах в электроотрицательных газах достаточно близки или превышают время дрейфа электронов через разрядный промежуток, в котором формируется объемный разряд накачки. В таких условиях, добываясь с помощью генераторов накачки длительностей тока объемного разряда, не превышающих времени дрейфа электронов через газоразрядный промежуток, можно исключить развитие плазменных неустойчивостей и последующее перерождение объемного разряда накачки в локальный разряд. Однако и при переходе к наносекундным длительностям токов накачки локализация объемного разряда не исключается. Снижение концентрации фотоэлектронов на стадии предварительной ионизации ниже некоторого критического уровня ( $10^6 - 10^8 \text{ см}^{-3}$ ) изначально приводит к формированию искровых каналов [1, 3].

Противоречивая информация относительно условий перехода объемного разряда в локальный на частотах повторения импульсов в сотни герц и выше затрудняет проектирование отпаянных ТЕА-CO<sub>2</sub> лазеров с необходимым набором рабочих параметров.

Цель настоящей работы заключалась в определении причин локализации объемного разряда наносекундной длительности в условиях накопления в  $\text{CO}_2$ -лазерных смесях продуктов плазмохимических реакций.

### Методики изучения динамики фотоэлектронов

Изучение динамики фотоэлектронов включает в себя определение абсолютных значений концентрации фотоэлектронов и их времен жизни в зависимости от степени воздействия плазмы объемного разряда на рабочую смесь  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He}$  при атмосферном давлении. Эти параметры экспериментально определялись с помощью ионизационной камеры, которая наполнялась исследуемыми смесями непосредственно из активного элемента лазера.

В состав экспериментальной установки (рисунок 1) входили активный элемент лазера (ТЕА- $\text{CO}_2$ ), высоковольтные импульсные генераторы (ИГ<sub>1</sub>, ИГ<sub>2</sub>) для возбуждения вспомогательного и основного (объемного) разрядов, синхронизатор (Синхр), задающий моменты запуска генераторов с плавно регулируемой задержкой между ними, система откачки и наполнения (ОН) активного элемента рабочими газами  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He}$ , фотоприемник (ФП) и автономная система измерения концентраций фотоэлектронов и их времен жизни (ИК) в рабочем газе, подаваемом из активного элемента работающего лазера ( $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} + \langle X \rangle$ ). Символ  $\langle X \rangle$  означает множество вторичных соединений, образующихся в рабочей смеси лазера в результате плазмохимических реакций под воздействием объемного разряда накачки и вспомогательных искровых или коронных разрядов.

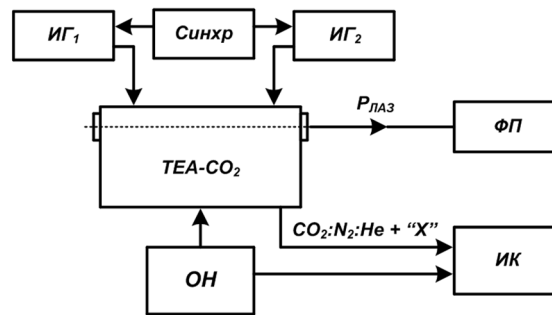


Рисунок 1 – Структурная схема экспериментальной установки  
Figure 1 – Structural diagram of experimental setup

Наполнение ионизационной камеры перед проведением измерений рабочими смесями из активного элемента ТЕА- $\text{CO}_2$  лазера проводилось после ее откачки до остаточного давления  $10^{-2}$  мм рт. ст. Перенаполнение ионизационной камеры рабочими газами осуществлялось после определенного периода времени работы лазера, когда в активном элементе устанавливался равновесный химический состав.

ВУФ-излучение от источника (ИИ) диафрагмировалось таким образом, чтобы исключить возможность освещения электродов (а, к) ионизационной камеры и дополнительного создания фотоэлектронов в результате внешнего фотоэффекта. В режиме тока насыщения концентрация фотоэлектронов  $N_e$  связана с измеряемой плотностью тока соотношением [6]:

$$N_e = j / e \cdot V_{др}, \quad (1)$$

где  $j$  – плотность тока;  $e$  – заряд электрона;  $V_{др}$  – скорость дрейфа электронов в газовой смеси.

При использовании газовых смесей скорость дрейфа электронов определялась по известным скоростям дрейфа электронов в «индивидуальных» газах [7] по формуле [8]:

$$1 / V_{др} = \sum_i W_i / V_{др(i)}, \quad (2)$$

где  $W_i$  – парциальная доля  $i$ -го газа в рабочей смеси.

Минимальная концентрация фотоэлектронов, которая могла быть измерена в данных условиях, составляла  $10^4 \text{ см}^{-3}$ .

Определение параметров фотоэлектронов проводилось на измерительном модуле, схема которого приведена на рисунке 2.

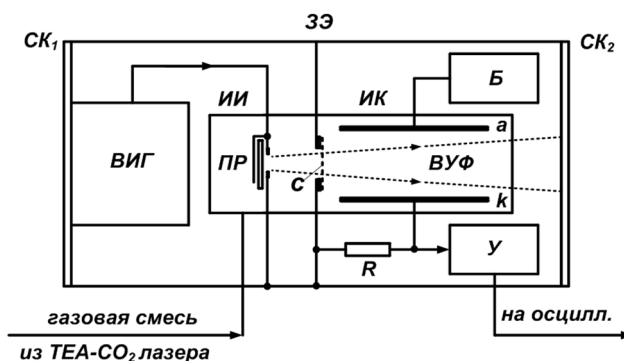


Рисунок 2 – Структурная схема измерительного модуля для определения параметров фотоэлектронов, создаваемых ВУФ-излучением в  $\text{CO}_2$ -лазерных смесях, содержащих продукты плазмо-химических реакций. ВИГ – высоковольтный импульсный генератор; ПР – поверхностный искровой разряд; ЗЭ – защитный экран; ИК – ионизационная камера; СК<sub>1</sub> и СК<sub>2</sub> – съемные крышки защитного экрана; R – нагрузочный резистор ионизационной камеры; У – усилитель; Б – батарея; ИИ – источник ионизирующего

Figure 2 – Structural diagram of measuring module for determining the parameters of photoelectrons created by VUV radiation in  $\text{CO}_2$ -laser mixtures containing products of plasma-chemical reactions.

ВИГ – high-voltage pulse generator; ПР – surface spark discharge; ЗЭ – protective screen; ИК – ionization chamber; СК<sub>1</sub> and СК<sub>2</sub> – removable covers of protective screen; R – ionization chamber load resistor; У – amplifier; Б – battery; ИИ – ionizing radiation source

### Результаты измерений и их обсуждение

В результате проведенных измерений были получены следующие основные результаты (рисунок 3). Изменение исходного химического состава рабочей смеси ТЕА- $\text{CO}_2$  лазера под воздействием плазмы объемного разряда накачки, работающего на частотах повторения импульсов от 0,1 до 1,6 кГц, приводит к снижению концентрации фотоэлектронов на стадии предварительной ионизации на 4 – 5 порядков по сравнению со значениями концентрации в свежеприготовленных смесях. Значения концентраций фотоэлектронов, создаваемых ВУФ-излучением в «равновесных» смесях на частотах повторения импульсов 1,6 кГц, меньше значений концентрации фотоэлектронов при возбуждении лазера на частотах повторения импульсов 0,1 кГц на 1 – 3 порядка и зависят от соотношений  $\text{CO}_2:\text{N}_2$  в рабочей смеси.

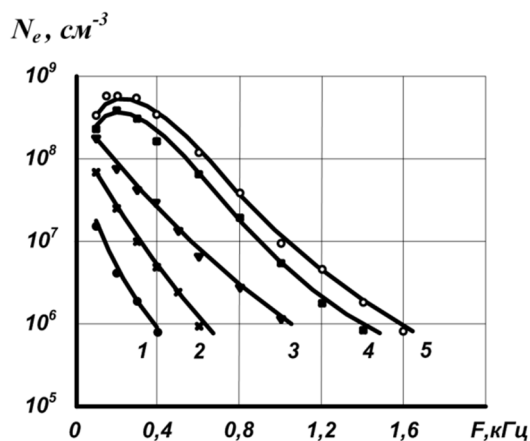


Рисунок 3 – Зависимости концентраций фотоэлектронов, создаваемых ВУФ-излучением в «стационарных»  $\text{CO}_2$ -лазерных смесях в результате объемной фотоионизации, от частоты повторения импульсов:  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 15 : 5 : 80$  (1);  $7 : 7 : 86$  (2);  $1 : 1 : 8$  (3);  $1:2:7$  (4);  $1 : 3 : 6$  (5);  $P_{\Sigma} = 1 \text{ Атм}$

Figure 3 – Dependences of photoelectrons concentrations created by VUV radiation in «stationary»  $\text{CO}_2$  laser mixtures as a result of volume photoionization on pulse repetition rate:  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 15 : 5 : 80$  (1);  $7 : 7 : 86$  (2);  $1 : 1 : 8$  (3);  $1 : 2 : 7$  (4);  $1 : 3 : 6$  (5);  $P_{\Sigma} = 1 \text{ Атм}$

В смесях с повышенным содержанием двуокиси углерода ( $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1,5 : 0,5 : 8$ ,  $P_{\Sigma} = 1$  Атм) спад концентрации фотоэлектронов с уровня  $2 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$  на частотах повторения импульсов 0,1 кГц до  $0,8 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$  происходит при увеличении частоты повторения импульсов до 0,4 кГц. В смеси с исходным химическим составом  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 3 : 6$  (повышенное содержание азота) в диапазоне частот повторения 0,1 – 0,2 кГц наблюдается некоторое увеличение концентрации фотоэлектронов, а затем при увеличении частоты повторения импульсов до 1,6 кГц концентрация фотоэлектронов с уровня  $7 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$  уменьшается до значений  $N_e = 0,8 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ .

Времена жизни фотоэлектронов по мере увеличения степени воздействия объемного разряда на рабочую смесь лазера уменьшаются с уровня 4 – 5 мкс до значений 0,2 – 1,2 мкс. Значения времен жизни в чистых азоте и гелии не зависят от частоты зажигания в них объемного разряда и составляют, соответственно 8 и 12 мкс.

Скорость образования фотоэлектронов в газовой среде ТЕА- $\text{CO}_2$  лазера на удалении « $r$ » от источника ВУФ-излучения может быть описана выражением вида [6, 9]:

$$dN_e / dt = A \cdot J_{\text{вф}} \cdot (1 / r^2) \cdot \Sigma \sigma_i \cdot N_i \cdot \exp[-(\Sigma \sigma_i \cdot N_i + \Sigma \sigma_p \cdot N_p) \cdot r], \quad (3)$$

где  $J_{\text{вф}}$  – сила света источника ВУФ-излучения в области 115 – 125 нм в пределах окна прозрачности двуокиси углерода [9];  $\sigma_i, \sigma_p$  – сечения фотоионизации и фотопоглощения излучения в области 115-125 нм;  $N_i, N_p$  – концентрации молекул, ответственных за фотоионизацию и фотопоглощение;  $N_e$  – концентрация фотоэлектронов;  $A$  – коэффициент пропорциональности.

Процесс образования электрон-ионных пар длится в течение продолжительности импульса ВУФ-излучения, который не превышает 20 – 50 нс. Гибель фотоэлектронов происходит в результате электрон-молекулярных столкновений, т.е. значительно медленнее. В связи с этим гибелью носителей зарядов на стадии их создания можно пренебречь.

Излучение с длинами волн в области 115 – 125 нм в  $\text{CO}_2$ лазерных смесях может ионизировать только такие соединения, как  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  и органические примеси, всегда присутствующие в газах технической чистоты. В ослаблении интенсивности излучения принимают участие процессы как фотопоглощения, так и фотоионизации. Из компонентов исходной рабочей смеси лазера только двуокись углерода имеет большое сечение  $\sigma_{\text{CO}_2} \approx 10^{-17} \text{ см}^2$ . Сечения поглощения молекулярного азота и гелия имеют значения на несколько порядков меньше. Вторичные соединения, нарабатываемые в рабочей смеси в результате плазмохимических реакций, такие как  $\text{O}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}_2$ , ..., также обладают достаточно большими сечениями поглощения излучения в области 115 – 125 нм. Так, например, сечения фотопоглощения оксидов азота достигают значений  $10^{-17} - 10^{-18} \text{ см}^2$  [10-14].

Типичные значения концентраций вторичных соединений, нарабатываемых в  $\text{CO}_2$ -лазерных смесях без введения в них легкоионизируемых органических примесей, находятся на уровне:  $N_{\text{O}_2} \approx 10^{16} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ;  $N_{\text{O}_3} \approx 10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ;  $N_{\text{NO}} \approx 10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ;  $N_{\text{NO}_2} \approx 10^{13} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , ... [15].

Полный коэффициент поглощения излучения с учетом как фотопоглощения, так и фотоионизации газов определяется как:

$$K_{\Sigma} = \Sigma k_i = \Sigma \sigma_i \cdot N_i + \Sigma \sigma_p \cdot N_p \quad (4)$$

где  $\sigma_p, \sigma_i$  – сечения поглощения и сечения ионизации при поглощении ВУФ-излучения молекулами сорта  $i$  в области длин волн 115 – 125 нм;  $N_p, N_i$  – концентрации поглощающих и ионизируемых молекул.

В равновесных рабочих смесях полные коэффициенты поглощения в области 115 – 125 нм за счет образования вторичных соединений достигают значений 1,5 – 3  $\text{см}^{-1}$ . При удалении облучаемой области на 3 – 5 см от источника ВУФ-излучения ослабление интенсивности без учета геометрических факторов может достигать 5 – 6 порядков. Образование оксидов азота способствует увеличению концентрации начальных фотоэлектронов [предэкспоненциальный множитель в выражении (3)]. В конечном итоге концентрация фотоэлектронов

по мере увеличения степени воздействия плазмы объемного разряда на химический состав рабочей смеси лазера может приводить к снижению концентрации фотоэлектронов на 2 – 4 порядка.

Свободные электрон-ионные пары после их создания с помощью излучения гибнут в результате рекомбинации и прилипания к электроотрицательным молекулам. Как было показано в [4, 5, 15], исчезновение свободных носителей зарядов в CO<sub>2</sub>-лазерных смесях атмосферного давления преимущественно происходит в результате реакций прилипания. Гибель фотоэлектронов происходит в результате трех частичных столкновений [4, 5]:



Константы скорости этой реакции имеют значения:

$$K = 2 \cdot 10^{-32} \text{ см}^6 \cdot \text{с}^{-1}, M = \text{He}, \quad (6)$$

$$K = 3,3 \cdot 10^{-30} \text{ см}^6 \cdot \text{с}^{-1}, M = \text{CO}_2, \quad (7)$$

$$K = 3,3 \cdot 10^{-31} \text{ см}^6 \cdot \text{с}^{-1}, M = \text{N}_2, \quad (8)$$

$$K = 1,9 \cdot 10^{-30} \text{ см}^6 \cdot \text{с}^{-1}, M = \text{O}_2. \quad (9)$$

Отрицательный ион O<sub>2</sub><sup>-</sup> при столкновениях с молекулами CO<sub>2</sub> преобразуется в отрицательный ион CO<sub>4</sub><sup>-</sup> [4, 5, 15]:



где  $K = 10^{-29} \text{ см}^6 \cdot \text{с}^{-1}$  ( $M = \text{CO}_2$  или  $\text{O}_2$ ).

Характерное время спада концентрации фотоэлектронов в результате реакций прилипания определяется как [5]:

$$\tau = (K \cdot [O_2] \cdot [M])^{-1}. \quad (11)$$

Подставляя в это выражение характерные значения концентраций кислорода и двуокиси углерода и молекул – партнеров по столкновениям  $M$ , можно получить соответствующие значения времен жизни фотоэлектронов. Их значения находятся на уровне от единиц до десятков микросекунд. Измеренные времена жизни фотоэлектронов в равновесных смесях имеют значения в пределах 0,25 – 1,2 мкс. Такие расхождения с расчетными значениями, полученными согласно выражению (11), могут быть связаны с тем, что в условиях проводившихся измерений концентрации вторичных соединений имеют гораздо большие значения, чем те, которые приведены в литературе применительно к работе ТЕА-CO<sub>2</sub> лазеров на частотах повторения импульсов в единицы и десятки герц.

Полученные экспериментальные данные показывают, что концентрация фотоэлектронов, создаваемых ВУФ-излучением на стадии предварительной ионизации в рабочих смесях отпаянного ТЕА-CO<sub>2</sub> лазера, по мере увеличения концентрации вторичных соединений с увеличением частоты повторения импульсов уменьшается на один–три порядка, а время жизни фотоэлектронов при этом сокращается с нескольких микросекунд до сотен наносекунд. За время накачки (длительности тока объемного разряда)  $\tau_H \approx 100 - 120$  нс реакции прилипания не в состоянии заметным образом изменить концентрацию создаваемых фотоэлектронов. Поэтому основным процессом, оказывающим влияние на уровень концентрации фотоэлектронов на стадии предварительной ионизации, является ослабление интенсивности ионизирующего ВУФ-излучения продуктами плазмохимических реакций.

Полученные данные относительно динамики фотоэлектронов на стадии предварительной ионизации изменяют точку зрения на механизм локализации объемного разряда накачки и ограничения частоты повторения импульсов в отпаянных импульсно-периодических ТЕА-CO<sub>2</sub> лазерах. Формирование объемного разряда происходит в две стадии. На первой из них – стадии предварительной ионизации – в межэлектродном промежутке создается необходимый уровень ( $10^6 - 10^8 \text{ см}^{-3}$ ) начальных электрон-ионных пар, а затем возбуждается ос-

новой – объемный – разряд. При уровне начальной ионизации менее приведенных значений в разрядном промежутке формируется исключительно искровой канал, не пригодный для целей возбуждения активной среды. В этой связи снижение уровня начальных носителей зарядов в результате ослабления интенсивности ионизирующего ВУФ-излучения является первопричиной локализации объемного разряда в условиях накопления в активной среде ТЕА-СО<sub>2</sub> лазера существенных концентраций вторичных соединений, обладающих значительными сечениями поглощения. Поскольку концентрации вторичных соединений увеличиваются с ростом частоты зажигания объемного разряда, то значение частоты повторения импульсов, на которой происходит перерождение объемного разряда в локальный, определяется условием достижения минимального уровня начальной ионизации.

Возбуждение объемного разряда импульсами тока длительностью 100 – 120 нс исключает переход объемного разряда в локальный в результате развития плазменных неустойчивостей. На стадии предварительной ионизации снижение концентрации начальных носителей зарядов ниже «критического» уровня  $10^6 - 10^8 \text{ см}^{-3}$  обусловлено преимущественно за счет ослабления интенсивности ионизирующего ВУФ-излучения. Вклад реакций прилипания электронов к электроотрицательным соединениям в этих условиях сравнительно мал.

Таким образом, основной вклад в снижение концентрации начальных фотоэлектронов на несколько порядков связан с ослаблением интенсивности ионизирующего ВУФ-излучения и может быть положен в основу механизма локализации объемного разряда накачки и ограничения частоты повторения импульсов в отпаянных импульсно-периодических ТЕА-СО<sub>2</sub> лазерах.

### Выводы

1. В отпаянном импульсно-периодическом ТЕА-СО<sub>2</sub> лазере зарегистрировано уменьшение концентрации свободных электронов, создаваемых ВУФ-излучением на стадии предварительной ионизации, на 1 – 3 порядка при увеличении частоты повторения импульсов с уровня в 0,1 кГц до 0,4 – 1,6 кГц.

2. Минимальные измеренные значения времен жизни фотоэлектронов в СО<sub>2</sub>-лазерных смесях, содержащих продукты плазмохимических реакций, составляют величины в пределах 0,2 – 1,2 мкс. В чистых азоте и гелии времена жизни фотоэлектронов на стадии предварительной ионизации составляют, соответственно 8 и 12 мкс.

3. Обоснована новая точка зрения на механизм локализации объемного разряда наносекундной длительности и ограничения частоты повторения импульсов в отпаянных импульсно-периодических ТЕА-СО<sub>2</sub> лазерах. Его суть заключается в том, что накопление в активной среде лазера множества вторичных соединений с высокими значениями коэффициентов поглощения в области вакуумного ультрафиолета снижает уровень начальной ионизации ниже порогового значения в результате ослабления интенсивности ионизирующего ВУФ-излучения.

### Библиографический список

1. Карнюшин В.Н., Солоухин Р.И. Макроскопические и молекулярные процессы в газовых лазерах. М.: Атоимиздат, 1981. 200 с.
2. Велихов Е.П., Баранов В.Ю., Летохов В.С. и др. Импульсные СО<sub>2</sub>-лазеры и их применение для разделения изотопов. М.: Наука, 1983. 304 с.
3. Хомич В.Ю., Ямщиков В.А. Основы создания систем электроразрядного возбуждения мощных СО<sub>2</sub>-, N<sub>2</sub>- и F<sub>2</sub>-лазеров. М.: Физматлит, 2015. 256 с.
4. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Долгопрудный: Интеллект, 2009. 736 с.
5. Norris B., Smith A.L.S. Attachment loss of photo-ionization electrons in TEA CO<sub>2</sub> lasers // J.Phys.D: Appl. Phys. 1977. Vol. 10. pp. 237-240.
6. Babcock R.V., Liberman I., Partlov W.D. Volume Ultraviolet Preionization from Bare Sparks // IEEE J. Quant. Electron. 1976. Vol. QE-12. № 1. Pp. 29-34.
7. Хаксли Л., Кромптон Р. Диффузия и дрейф электронов в газах. М.: Мир, 1977. 672 с.

8. **Оришич А.М., Пономаренко А.Г., Солоухин Р.И.** О предельных энергетических характеристиках импульсных ТЕА-лазеров на  $\text{CO}_2$  // ЖПМТФ. 1975. №1. С.3-14.
9. Газовые лазеры. Под ред. И.Мак-Даниэля и У.Нигена. М.: Мир. 1986. 552 с.
10. **Scott S.J., Smith A.L.S.** Identification of the origins of photoionization in  $\text{CO}_2$  TEA lasers // Appl. Phys. 1984. В. 33. № 1. Pp. 1-5.
11. **Weisler G.L.** Photoionization in gases and photoelectric emission from solids. Berlin.: Springer. 1965. Vol. 21. Pp. 304-341.
12. **Hudson R.D.** Critical Review of Ultraviolet Photoabsorption Cross Sections for Molecules of Astrophysical and Aeronomic Interest // Reviews of Geophysics and Space Physics. 1971. Vol. 9. № 2. Pp. 305-406.
13. **Калверт Дж., Питтс Дж.** Фотохимия. М.: Мир, 1968. 572 с.
14. **Мак-Даниэль И.** Процессы столкновений в ионизованных газах. М.: Мир, 1967. 832 с.
15. **Смит К., Томсон Р.** Численное моделирование газовых лазеров. М.: Мир. 1981. 516 с.

UDC 621.373.826

## PHOTOELECTRON DYNAMICS AT PRE-IONIZATION STAGE IN SEALED-OFF TEA-CO<sub>2</sub> LASERS

**B. A. Kozlov**, Dr. in physics and mathematics, full professor, department of industrial electronics RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0001-5957-3688, e-mail: kozlov.qe.ryazan@mail.ru

**E. A. Kozlov**, Ph.D. (in technical sciences), associate professor, department of industrial electronics, RSREU, Ryazan;

orcid.org/0000-0003-2038-6732, e-mail: ewg.kozlov2015@yandex.ru

**D. S. Makhanko**, Ph.D. (in technical sciences), senior researcher, JSC Plasma, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0002-7609-9970, e-mail: mahdim@rambler.ru

*Quantitative information was obtained on photoelectron dynamics during pre-ionization stage in a sealed TEA-CO<sub>2</sub> laser, the working mixtures of which contain products of plasma-chemical reactions. The authors established that the decrease in photoelectron concentration during pre-ionization stage by several orders of magnitude is due to the attenuation of ionizing radiation intensity by secondary compounds formed in laser's active medium under the influence of plasma-chemical reactions. A mechanism for localizing a nanosecond volume discharge which limits pulse repetition rate and average power of laser radiation was substantiated.*

**Keywords:** TEA-CO<sub>2</sub> laser, volume discharge, pumping, preliminary ionization, plasma-chemical reactions, concentration and lifetime of photoelectrons.

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2026-95-255-262

### References

1. **Karnyushin V.N., Solouhin R.I.** Makroskopicheskie i molekulyarnye processy v gazovyh lazerah. Moscow, *Atoimizdat*, 1981, 200 p. (in Russian).
2. **Velihov E.P., Baranov V.Yu., Letohov V.S.** and others. Impul'snye CO<sub>2</sub> lazery i ih primeneniye dlya razdeleniya izotopov. Moscow, *Nauka*, 1983, 304 p. (in Russian).
3. **Homich V.Yu., Yamshchikov V.A.** Osnovy sozdaniya sistem elektrorazryadnogo vzbuzhdeniya moshchnykh CO<sub>2</sub>-, N<sub>2</sub>- i F<sub>2</sub>-lazerov. Moscow, *Fizmatlit*, 2015, 256 p. (in Russian).
4. **Rajzer Yu.P.** Fizika gazovogo razryada. *Dolgoprudnyj: Intellekt*, 2009, 736 p. (in Russian).
5. **Norris B., Smith A.L.S.** Attachment loss of photo-ionization electrons in TEA CO<sub>2</sub> lasers. *J.Phys.D: Appl. Phys.*, 1977, Vol. 10, pp. 237-240.
6. **Babcock R.V., Liberman I., Partlov W.D.** Volume Ultraviolet Preionization from Bare Sparks. *IEEE J. Quant. Electron.* 1976. Vol. QE-12. no. 1, pp. 29-34.
7. **Hakli L., Krompton R.** Diffuziya i drejff elektronov v gazah. Moscow, *Mir*, 1977, 672 p. (in Russian).

8. **Orishich A.M., Ponomarenko A.G., Solouhin R.I.** O predel'nyh energeticheskikh harak-teristikah impul'snyh TEA-lazerov na CO<sub>2</sub>. *ZhPMTF*. 1975, no. 1, pp. 3-14. (in Russian).
9. *Gazovye lazery*. Pod red. I.Mak-Danielya i U.Nigena. Moscow, *Mir*, 1986, 552 p. (in Russian).
10. **Scott S.J., Smith A.L.S.** Identification of the origins of photoionization in CO<sub>2</sub> TEA lasers. *Appl. Phys.* 1984, B.33, no. 1, pp. 1-5.
11. **Weisler G.L.** Photoionization in gases and photoelectric emission from solids. Berlin, *Springer*, 1965, vol. 21, pp. 304-341.
12. **Hudson R.D.** Critical Review of Ultraviolet Photoabsorption Cross Sections for Molecules of Astrophysical and Aeronomic Interest. *Reviews of Geophysics and Space Physics*. 1971, vol. 9, no. 2, pp. 305-406.
13. **Kalvert Dzh., Pitts Dzh.** Fotohimiya. Moscow, *Mir*, 1968, 572 p. (in Russian).
14. **Mak-Daniel' I.** Processy stolknovenij v ionizovannyh gazah. Moscow, *Mir*, 1967, 832 p. (in Russian).
15. **Smit K., Tomson R.** Chislennoe modelirovanie gazovyh lazerov. Moscow, *Mir*, 1981, 516 p. (in Russian).