

УДК 621.378.324

ИССЛЕДОВАНИЕ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ФОРМИРОВАНИЯ ОБЪЕМНОГО РАЗРЯДА НАКАЧКИ В МАЛОГАБАРИТНОМ ТЕА-CO₂ ЛАЗЕРЕ

К. М. До, аспирант РГРТУ; quangmanhars@gmail.com

Б. А. Козлов, д.ф.-м.н., профессор кафедры ЭП РГРТУ; kozlov.qe.ryazan@mail.ru

Теоретически и экспериментально изучено влияние исходного химического состава CO₂-лазерных смесей при атмосферном давлении на процессы, происходящие на начальной стадии формирования объемного разряда накачки. Экспериментально определены энергетические затраты на достижение необходимого уровня начальной ионизации и измерены значения напряжений пробоя в широком диапазоне изменений компонентного состава активной среды малогабаритного отпаянного ТЕА-CO₂ лазера.

Цель работы – определить степень влияния химического состава рабочей смеси на величину энергетических затрат на начальную ионизацию, обеспечивающих однородный пробой, и на значения напряжений пробоя газоразрядного промежутка $d_{AK} = 1.8$ см в малогабаритном ТЕА-CO₂ лазере с активной средой объемом $V = 0.8 \cdot 1.8 \cdot 18$ см³.

Ключевые слова: ТЕА-CO₂ лазер, предварительная ионизация, ВУФ-излучение, фотоионизация, критическая концентрация фотоэлектронов, напряжение пробоя, γ -процессы.

DOI: 10.21667/1995-4565-2018-65-3-156-163

Введение

Объемный самостоятельный разряд, в плазме которого осуществляется накачка ТЕА-CO₂ лазеров, имеет несколько характерных стадий – предварительной ионизации, пробоя, горения и «послесвечения». Каждая из этих стадий характеризуется своими параметрами, основными процессами и закономерностями, а также продолжительностями по времени.

Первые из этих двух стадий – предварительной ионизации и пробоя – являются определяющими в формировании объемного самостоятельного разряда. Они обеспечивают само существование объемного разряда как физического явления. При недостаточном уровне начальной ионизации газов или приложении к газоразрядному промежутку малых по величине и с незначительной скоростью нарастающих напряжений в газоразрядном промежутке формируются только искровые каналы, не пригодные для целей накачки [1-4].

Уровень начальной ионизации и величина напряжения пробоя задают определенный «уровень устойчивости» объемного разряда на стадии горения, в течение которой и осуществляется ввод в плазму разряда энергии накачки, а также продолжительность его устойчивого существования [5, 6]. Уровень начальной ионизации оказывает также заметное влияние на максимальную

частоту повторения импульсов, на которой еще возможно формирование объемного разряда [7].

Стадия предварительной ионизации является подготовительной стадией и осуществляется непосредственно перед пробоем разрядного промежутка. Наиболее рациональным способом реализации предварительной ионизации в небольших по размерам разрядных промежутках является использование ионизирующего вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) излучения, генерируемого во вспомогательных искровых разрядах. Эти методы к настоящему времени достаточно хорошо отработаны и успешно применяются во многих конструкциях малогабаритных ТЕА-CO₂ лазеров [4, 8].

Наряду с этим остаются недостаточно изученными вопросы, связанные с влиянием химического состава рабочих смесей, а именно компонентного состава CO₂:N₂:He, на энергетические затраты на создание необходимого уровня начальных фотоэлектронов и на величину напряжений пробоя газоразрядных промежутков малогабаритных ТЕА-CO₂ лазеров. Отсутствие количественной информации о влиянии химического состава на условия формирования устойчивых объемных разрядов накачки затрудняет как проведение исследований, так и эксплуатацию малогабаритных отпаянных ТЕА-CO₂ лазеров при изменении соотношений между компо-

нентами газовой смеси с целью варьирования параметров импульсов излучения. Эти затруднения особенно заметно проявляются при использовании «штатного» генератора накачки, параметры которого изменяются, как правило, в очень узком диапазоне значений рабочих напряжений.

Теоретическая часть

Уровень начальной ионизации

Минимальная концентрация начальных носителей зарядов на стадии предварительной ионизации определяется из условия перекрытия электронных лавин на некотором расстоянии от катода или, в крайнем случае, на аноде газоразрядного промежутка [1-3, 9].

Начальная концентрация электрон-ионных пар, обеспечивающая перекрытие электронных лавин на аноде и, соответственно, однородный пробой газоразрядного промежутка, определяется по формуле [1, 9]:

$$N_e(0) = \frac{1}{(\sqrt{\lambda_e} d_{AK})^3}, \quad (1)$$

где: $N_e(0)$ – начальная концентрация электронов в газоразрядном промежутке; d_{AK} – расстояние между анодом и катодом основного разрядного промежутка; λ_e – длина свободного пробега электронов в рабочем газе.

Согласно этому критерию минимальная концентрация начальных электрон-ионных пар в разрядном промежутке с $d_{AK} = 1 \div 2$ см накануне пробоя должна быть не менее 10^6 см⁻³.

При условии перекрытия электронных лавин на расстоянии от катода, соответствующем удвоению числа начальных носителей зарядов, концентрация начальных носителей определяется соотношением [2]:

$$N_e(0) = \left(\frac{3\alpha_e e E}{32\varepsilon} \right)^{3/2}, \quad (2)$$

где: α_e – коэффициент ударной ионизации электронами; e – заряд электрона; E – напряженность электрического поля в разрядном промежутке; ε – средняя энергия электрона.

Согласно этому критерию концентрация начальных электрон-ионных пар должна быть не менее $10^8 - 10^9$ см⁻³.

В результате изменения исходного химического состава рабочей смеси и изменения его в процессе работы лазера изменяется длина свободного пробега электронов и, соответственно, концентрация начальных электрон-ионных пар, при которых обеспечивается однородный пробой газоразрядного промежутка.

Среднее значение длины свободного пробега электронов в смеси газов CO₂:N₂:He определяется как:

$$\lambda_e^\Sigma = P_{CO_2} \lambda_e^{CO_2} + P_{N_2} \lambda_e^{N_2} + P_{He} \lambda_e^{He}, \quad (3)$$

где: P_{CO_2} , P_{N_2} , P_{He} – парциальные давления компонентов газовой смеси; $\lambda_e^{CO_2}$, $\lambda_e^{N_2}$, λ_e^{He} – длины свободного пробега электронов в «индивидуальных» газах – двуокиси углерода, молекулярном азоте и гелии.

Изменение соотношений между компонентами газовой смеси приводит к изменению длины свободного пробега электронов и, соответственно, к изменению значения концентрации начальных электронов.

Расчетные зависимости концентрации начальных электронов в смеси газов CO₂:N₂:He от парциального давления гелия приведены на рисунке 1 для двух значений межэлектродного промежутка $d_1 = 1.2$ см (1) и $d_2 = 1.8$ см (2) в соответствии с формулой (1).

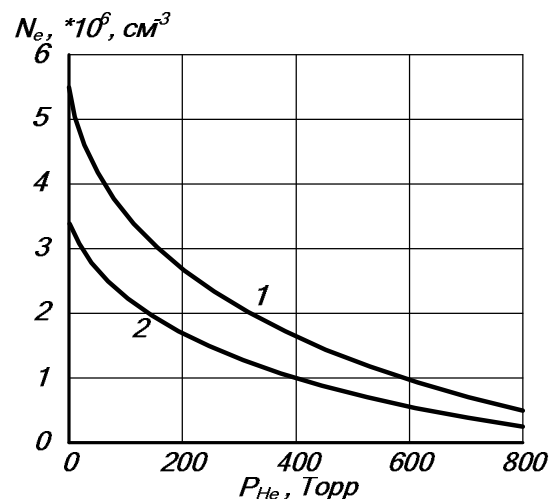


Рисунок 1 – Зависимости концентраций начальных электрон-ионных пар, обеспечивающих однородный пробой в газоразрядных промежутках с $d_{AK-1} = 1.2$ см (1) и $d_{AK-2} = 1.8$ см (2), от парциального давления гелия в смеси

Эти зависимости получены для полного давления газовой смеси в активном элементе 800 Торр при фиксированном соотношении концентраций молекулярных компонентов двуокиси углерода и азота $[CO_2]/[N_2] = 1$.

Концентрации начальных электронов, необходимые для пространственно-однородного развития объемного разряда в промежутке с $d_{AK} = 1.2$ см, превышают соответствующие значения концентраций электронов, характерных для промежутка $d_{AK} = 1.8$ см. Минимальные значения начальной концентрации электрон-ионных пар имеют место в чистом гелии и их значения составляют, соответственно, $N_e = 0.55 \cdot 10^6$ см⁻³ и $N_e = 0.3 \cdot 10^6$ см⁻³. В смеси без гелия (CO₂:N₂:He = 1:1:0) начальные значения концентраций электрон-ионных пар увеличиваются почти на порядок

и достигают значений $5.5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ и $3.4 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$. Это означает, что при наполнении активного элемента ТЕА- CO_2 лазера рабочими смесями с повышенным содержанием молекулярных компонентов для формирования объемного разряда потребуются почти на порядок большие значения концентрации начальных электронов на стадии пробоя по сравнению со смесями, в которых содержится много гелия.

В большинстве конструкций малогабаритных ТЕА- CO_2 лазеров начальные носители зарядов в межэлектродном промежутке создаются с помощью ионизирующего ВУФ-излучения в результате реакций одноступенчатой фотоионизации газовых примесей с потенциалами ионизации $E_{\text{ион}} \leq 10 \text{ эВ}$ [1, 2, 8, 10].

Ионизирующее ВУФ-излучение формируется во вспомогательных искровых разрядах. Концентрация фотоэлектронов N_e , создаваемых ВУФ-излучением, определяется соотношением:

$$N_e = C * N_{\text{им}} * \frac{J_0}{r^2} * \exp(-k_{\text{полг}} r), \quad (4)$$

где $N_{\text{им}}$ – концентрация ионизируемых ВУФ-излучением молекул; J_0 – интенсивность ВУФ-излучения в самом источнике; $k_{\text{полг}}$ – коэффициент поглощения ВУФ-излучения молекулами рабочей смеси; r – расстояние между источником ВУФ-излучения и межэлектродным промежутком для зажигания объемного разряда; C – константа.

Величина коэффициента поглощения ионизирующего ВУФ-излучения в диапазоне длин волн $\lambda \approx 115 \div 120 \text{ нм}$, ответственного за фотоионизацию легкоионизируемых молекулярных компонентов в CO_2 -лазерных смесях, определяется самой двуокисью углерода и составляет $1.5 \text{ см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ [10].

Функция $J_0/r^2 * \exp(-k_{\text{полг}} r)$ в выражении (4) представляет собой закон Бугера для расходящихся оптических пучков и отражает значение интенсивности ВУФ-излучения на удалении r от источника излучения.

На основании этого соотношения определялась относительная степень ослабления интенсивности ионизирующего ВУФ-излучения $J(r)/J_0$ в зависимости от парциального давления двуокиси углерода для различных расстояний от источника ионизирующего ВУФ-излучения до газоразрядного промежутка. При проведении расчетов предполагалось, что величина интенсивности излучения в самом источнике не зависит от исходного химического состава рабочей смеси и определяется только параметрами возбуждающих высоковольтных импульсов. Такие условия реализуются в плазме поверхностных импульсных разрядов [11].

Результаты таких расчетов представлены на рисунке 2. Цифры у каждой кривой справа соответствуют различным расстояниям от источника ВУФ-излучения до разрядного промежутка.

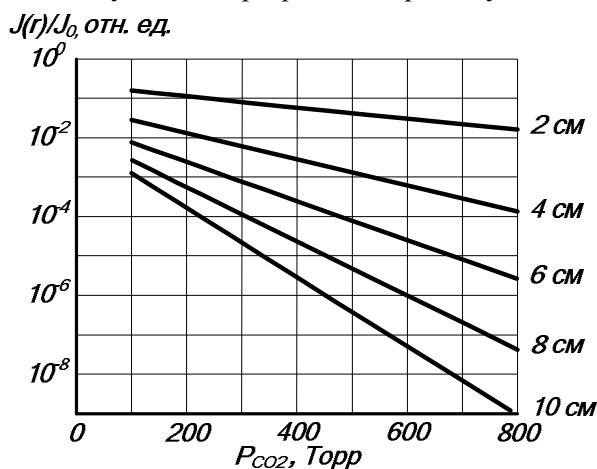


Рисунок 2 – Зависимости относительной интенсивности ионизирующего ВУФ-излучения от парциального давления двуокиси углерода в CO_2 -лазерной смеси для различных расстояний от источника излучения до разрядного промежутка

Полученные расчетные результаты показывают, что интенсивность ионизирующего ВУФ-излучения, достигающего основного разрядного промежутка, с увеличением парциального давления двуокиси углерода в рабочих смесях и по мере удаления от источника излучения уменьшается на порядки.

Это означает, что достижение необходимого уровня концентрации начальных электрон-ионных пар, при котором возможен однородный пробой газоразрядного промежутка, будет связано с пропорциональным увеличением энергетических затрат на начальную ионизацию. Причем это справедливо только для случая, когда спектральные характеристики самого источника ионизирующего УФ-излучения не зависят от химического состава рабочей смеси лазера. В противном случае энергетические затраты на начальную ионизацию возрастут еще больше.

Напряжения пробоя

Напряжение пробоя в импульсном режиме $U_{\text{имп}}$ определяется соотношением вида [12, 13]:

$$U_{\text{имп}} = U_{\text{ст}} + dU/dt * \tau_{\text{зап}}, \quad (5)$$

где $U_{\text{ст}}$ – напряжение статического пробоя; dU/dt – скорость нарастания напряжения на разрядном промежутке; $\tau_{\text{зап}}$ – время запаздывания развития разряда в промежутке.

В общем случае величина $\tau_{\text{зап}}$ включает в себя статистическое время запаздывания, отражающее временной интервал между подачей напряжения на разрядный промежуток и появлением

нием в нем свободных электрон-ионных пар, и время развития разряда. В связи с тем, что при формировании объемных разрядов всегда применяется предварительная ионизация газов, характерное время статистического запаздывания равняется нулю. В этом случае величина $\tau_{3АП}$ в формуле (5) представляет собой характерное время развития объемного разряда.

Характерные времена развития объемного разряда изменяются в зависимости от величины межэлектродного промежутка и амплитуды высоковольтного импульса в пределах от единиц до десятков нс [14-15]. Для межэлектродных промежутков с $d_{AK} = 1 \div 1.5$ см времена развития объемного разряда не превышают 10 нс. Характерные значения скорости нарастания напряжения на разрядных промежутках малогабаритных ТЕА-СО₂ лазеров имеют значения в пределах от $8 \cdot 10^{10}$ до $2 \cdot 10^{11}$ В·с⁻¹ [8, 14, 15]. Эти величины позволяют оценить характерные значения превышения напряжения импульсного пробоя над статическим:

$$\Delta U = dU/dt \cdot \tau_{3АП}. \quad (6)$$

Соответствующие значения находятся в пределах от 0.8 до 2 кВ. Учитывая, что рабочие напряжения имеют значения 20-40 кВ, то увеличение напряжений импульсного пробоя на $0.8 \div 2$ кВ можно не учитывать и пользоваться известными соотношениями для определения статического напряжения пробоя. Его величина, согласно [15, 16], определяется как:

$$U_{пр} = \frac{B(pd_{AK})}{\ln(Apd_{AK}) - \ln \left[\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) \right]}, \quad (7)$$

где p – давление газа; d_{AK} – величина межэлектродного промежутка; γ – коэффициент вторичной ион-электронной эмиссии (γ -процесс) из катода; A и B – константы, определяемые родом газа, его давлением и напряженностью электрического поля в промежутке. Величина γ определяется родом материала катода.

Значения констант A , B и γ установлены экспериментально для большинства индивидуальных газов и наиболее часто применяемых материалов для изготовления катодов и их значения можно найти в справочной литературе по физике газового разряда. Значения же этих констант для произвольных газовых смесей аналитически не описаны и их можно определить только численно или экспериментально. Применительно к СО₂-лазерным смесям атмосферного давления их значения к настоящему времени не определены. Поэтому для определения тенденций изменения напряжений пробоя при изменении исходного химического состава рабочих смесей

ТЕА-СО₂ лазера вычислялись значения напряжений пробоя в индивидуальных газах.

На рисунке 3 приведены расчетные зависимости напряжений пробоя для гелия, азота и двуокиси углерода в диапазоне давлений от 100 до 800 Торр для двух значений межэлектродного промежутка – $d_{AK} = 1.2$ и $d_{AK} = 1.8$ см. Значения констант A , B и γ были взяты в [17].

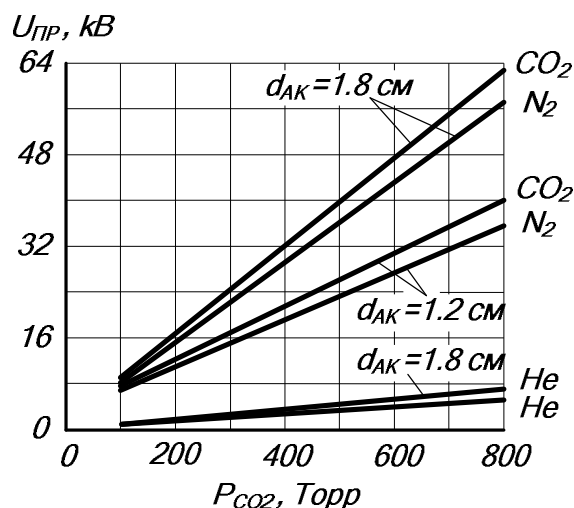


Рисунок 3 – Зависимости напряжений пробоя разрядных промежутков с $d_{AK} = 1$ см и $d_{AK} = 2$ см от давления для индивидуальных газов CO_2 , N_2 и He

Обращают на себя внимание очень маленькие значения напряжений пробоя в чистом гелии, которые для межэлектродного промежутка $d_{AK} = 1.8$ см составляют всего 8 кВ. В чистом азоте напряжения пробоя изменяются от ≈ 8 кВ до 36 кВ ($d_{AK} = 1.2$ см) и от ≈ 12 кВ до 56 кВ ($d_{AK} = 1.8$ см). В двуокиси углерода напряжения пробоя изменяются наиболее заметно. Так, для промежутка с $d_{AK} = 1.2$ см характерны напряжения пробоя в пределах от 10 до 40 кВ, а для промежутка с $d_{AK} = 1.8$ см напряжение пробоя возрастает от 12 до 64 кВ. Очевидно, что в смесях $CO_2:N_2:He$ напряжения пробоя будут отличаться от представленных на рисунке 3 значений, но будут находиться в пределах между значениями, характерными для чистого азота и чистой двуокиси углерода.

Экспериментальная часть

Блок-схема для проведения экспериментальных исследований изображена на рисунке 4. Она состоит из разрядной камеры (РК) и двух газоразрядных промежутков – основного, образованного анодом (А) и катодом (К), и вспомогательного (ВЭ). Расстояние между вспомогательным электродом и центром основного разрядного промежутка составляет $r = 8$ см. Каждый из этих промежутков возбуждался от авто-

номного импульсного генератора ИГ₁ и ИГ₂ с регулируемыми параметрами высоковольтных импульсов. Амплитуда высоковольтных импульсов могла достигать 60 кВ при времени на нарастания 150-200 наносекунд. Необходимая задержка τ между моментами зажигания вспомогательного и основного разрядов обеспечивалась с помощью синхронизатора (Синхр). Эта мера нужна для того, чтобы обеспечить в основном разрядном промежутке необходимый уровень концентрации начальных электронов на стадии подъема напряжения на основном разрядном промежутке. Активный объем основного разрядного промежутка составлял $V = 18 \cdot 1.8 \cdot 0.8 \text{ см}^3$, при этом величина межэлектродного промежутка d_{AK} равнялась 1.8 см. Вспомогательный электрод (ВЭ), он же источник ионизирующего ВУФ-излучения, представляет собой разрядную структуру, смонтированную на плоской керамической подложке (керамика 22ХС) с двенадцатью пластинчатыми электродами из нержавеющей стали, и предназначенную для зажигания сильноточного поверхностного или скользящего разряда. Выбор этого типа разряда был обусловлен тем, что его спектральные характеристики не зависят от рода газа, а определяются родом материала подложки, по которой протекает разрядный ток [11]. Кроме этого, поверхностные разряды являются наиболее эффективными источниками ионизирующего ВУФ-излучения. Откачка и наполнение разрядной камеры рабочими газами проводились с помощью стандартного вакуумного оборудования и измерителей остаточного давления М-11201 и ВИТ-2.

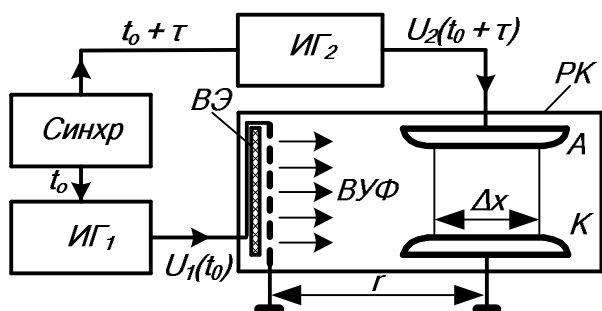


Рисунок 4 – Блок-схема экспериментальной установки; А, К – анод и катод основного разрядного промежутка;

ВЭ – вспомогательный электрод (источник ВУФ-излучения); $U_1(t_0)$ и $U_2(t_0 + \tau)$ – импульсы напряжения для возбуждения вспомогательного и основного разрядных промежутков;

ПК – разрядная камера; r – расстояние между источником ВУФ-излучения и центром основного промежутка; Δx – ширина электродов

Экспериментальные исследования включали в себя определение энергетических затрат на начальную ионизацию, при которой в основном

разрядном промежутке формируется объемный разряд, и определение напряжений пробоя при изменении состава рабочей смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$ в широких пределах. При этом общее давление всегда поддерживалось равным одной атмосфере. Кроме этого поддерживалось неизменным и соотношение концентраций двуокиси углерода и молекулярного азота в смеси равным единице. Выбор именно такого соотношения между концентрациями молекулярных компонентов обусловлен тем, что такие соотношения обеспечивают наиболее высокие значения энергии излучения в импульсе в малогабаритных ТЕА- CO_2 лазерах.

На рисунке 5 приведены экспериментальные зависимости энергии, вводимой в плазму вспомогательного поверхностного разряда, которые обеспечивают необходимый уровень предварительной ионизации газа в основном разрядном промежутке, от содержания гелия в исследуемых смесях. Эти зависимости получены при использовании газовых смесей, состоящих из $\text{CO}_2:\text{He}$ (кривая 1) и $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$ (кривая 2).

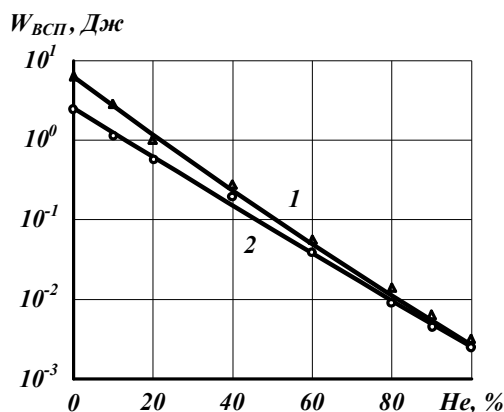


Рисунок 5 – Зависимости энергетических затрат на начальную ионизацию, обеспечивающих однородный пробой газоразрядного промежутка $d_{AK} = 1.2 \text{ см}$, от концентрации гелия в смесях $\text{CO}_2\text{-He}$ (1) и $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-He}$ (2)

Видно, что увеличение концентрации гелия от полного его отсутствия в составе рабочих смесях до 100 % приводит к снижению энергетических затрат на предварительную ионизацию почти на три порядка. При этом, энергетические затраты на начальную ионизацию в смесях $\text{CO}_2:\text{He}$ превышают в несколько раз соответствующие затраты на предварительную ионизацию в трехкомпонентных смесях $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$.

Обращает на себя внимание тот факт, что величина энергии, вводимой в плазму вспомогательного разряда в смесях без гелия имеет значения в несколько джоулей. Энергия накачки для данного варианта ТЕА- CO_2 лазера с активным объемом $V = 18 \cdot 1.8 \cdot 0.8 \text{ см}^3$ также составляет несколько джоулей. Другими словами, реализация

объемного разряда накачки в смесях без гелия достигается ценой затрат, соизмеримых с затратами на накачку. В рабочих смесях, обогащенных гелием, энергетические затраты на начальную ионизацию в основном разрядном промежутке составляют десятки и сотни миллиджоулей.

Напряжения пробоя газоразрядного промежутка с $d_{AK} = 1.8$ см в зависимости от содержания в рабочих смесях гелия приведены на рисунке 6 для двух составов: двухкомпонентного CO_2 -He (1) и трехкомпонентного CO_2 - N_2 -He (2). Видно, что напряжения пробоя сильно зависят от компонентного состава рабочих смесей, применяемых в ТЕА- CO_2 лазерах. В смесях без гелия напряжения пробоя имеют значения в пределах от 48 до 56 кВ (величина межэлектродного промежутка составляет 1.8 см). При этом для двухкомпонентной смеси CO_2 -He (кривая 1) напряжение пробоя превышает соответствующее значение напряжения пробоя в смеси CO_2 - N_2 -He (кривая 2). В последнем случае некоторое снижение напряжения пробоя обусловлено большим значением концентрации двуокиси углерода в смеси. С увеличением содержания в рабочих смесях гелия напряжения пробоя уменьшаются и в среде чистого гелия достигают значений в 6÷8 кВ.

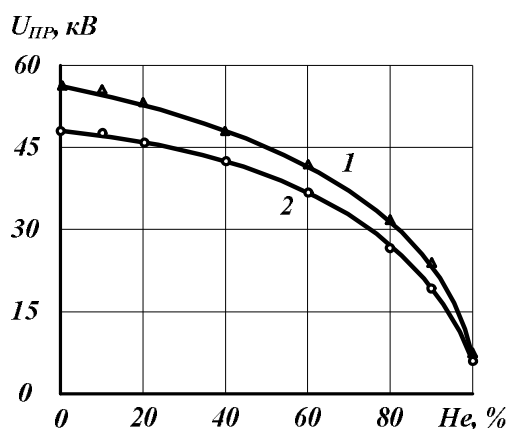


Рисунок 6 – Зависимости напряжений пробоя в CO_2 -лазерных смесях от содержания гелия для межэлектродного промежутка $d_{AK} = 1.8$ см: 1 – CO_2 -He; 2 – CO_2 - N_2 -He

Полученные результаты показывают, что достижение высоких энергетических параметров в малогабаритных ТЕА- CO_2 лазерах, которое достигается применением газовых смесей CO_2 - N_2 -He с повышенным содержанием молекулярных компонентов, неизбежно связано с необходимостью существенного увеличения энергетических затрат на начальную ионизацию и увеличением амплитуды высоковольтных импульсов, обеспечивающих однородный пробой основного разрядного промежутка и ввод в плазму объемного разряда энергии накачки. При этом энергетические затраты на предварительную ионизацию

могут достигать значений, соизмеримых с величиной энергии накачки, а напряжения пробоя увеличиваются до значений 48÷56 кВ.

Обсуждение результатов

Установленные факты изменения уровня начальных электрон-ионных пар, при которых обеспечивается пространственно однородный пробой и формирование объемного разряда накачки в CO_2 -лазерных смесях атмосферного давления, также как и изменение значений напряжения пробоя при изменении исходного химического состава рабочих смесей в малогабаритном ТЕА- CO_2 лазере связаны с влиянием химического состава на основные электроразрядные и фотоионизационные процессы. К ним, в частности, относятся длина свободного пробега электронов, коэффициенты ударного размножения электронов, которые опосредовано присутствуют в эмпирических константах, определяющих значения напряжения пробоя, и значения коэффициентов поглощения ионизирующего УФ-излучения. Сильное – почти на три порядка по сравнению с распространением излучения в чистом гелии – ослабление интенсивности ионизирующего излучения при прохождении слоя двуокиси углерода протяженностью 8 см, по порядку величины соответствуют изменению энергетических затрат на начальную ионизацию при изменении компонентного состава рабочей смеси. В связи с тем, что для формирования объемного разряда требуется вполне определенный уровень начальной ионизации, который, как оказалось, тоже зависит от химического состава смеси, то для его формирования в условиях заметного ослабления интенсивности ионизирующего ВУФ-излучения при увеличении концентрации двуокиси углерода необходимо пропорционально увеличивать силу света источника излучения, т.е. увеличивать энергетические затраты на начальную ионизацию.

«Компенсация» эффективного поглощения ионизирующего ВУФ-излучения и сохранение уровня начальной ионизации на уровне, достаточном для формирования объемного разряда, связана с необходимостью существенного (иногда и на три порядка) увеличения интенсивности источника ВУФ-излучения, либо с максимальным его приближением к основному разрядному промежутку. Последняя мера не всегда возможна из-за конструктивных особенностей электро-разрядных источников УФ-излучения.

Заключение

Основные результаты проделанной работы заключаются в следующем.

1. Установлено влияние исходного химического состава рабочей смеси TEA-CO₂ лазера на уровень начальной ионизации, при котором возможен однородный пробой газоразрядного промежутка. При изменениях концентрации гелия в смесях от нулевого значения до его полного преобладания приводит к изменениям уровня начальной ионизации почти на порядок.

2. В TEA-CO₂ лазере с предварительной ионизацией ионизирующим ВУФ-излучением изменение концентрации гелия от нулевого значения до содержания в 90 % приводит к изменению энергетических затрат на начальную ионизацию почти на три порядка. В CO₂-лазерных смесях с повышенным содержанием гелия затраты на начальную ионизацию измеряются десятками и сотнями миллиджоулей, тогда как в смесях с повышенным содержанием молекулярных компонентов затраты на начальную ионизацию возрастают до значений в несколько джоулей, соизмеримых со значениями энергии накачки.

3. Изменение концентрации гелия в смеси с 80 % до использования смесей без гелия приводит к увеличению напряжения пробоя с 27÷32 кВ до 48÷56 кВ, т.е. в ≈1.7÷1.8 раза.

Библиографический список

1. Хомич В. Ю., Ямщиков В. А. Основы создания систем электроразрядного возбуждения мощных CO₂, N₂- и F₂-лазеров. / М.: Физматлит. 2015. 168 с.
 2. Карнюшин В. Н., Солоухин Р. Н. Макроскопические и молекулярные процессы в газовых лазерах. / М.: Атомиздат. 1981. 200 с.
 3. Osipov V. V. Pulsed repetitive TEA-CO₂ lasers. // Proceedings of SPIE. 1996, Vol. 2619. pp. 32-38.

4. Месяц Г. А., Осипов В. В., Тарасенко В. Ф. Импульсные газовые лазеры. / М.: Наука. 1991. 272с.

5. Визирь В. А., Осипов В. В., Тельнов В. А., Хамидулин Г. М. Малогабаритный CO₂ лазер с высокой частотой повторения импульсов. // Квантовая электроника. 1988. Т.5. № 6. С.1256-1260.

6. Осипов В. В. Самостоятельный объемный разряд. // УФН. 2000. Т. 170. № 3. С. 225-245.

7. Gorkin S. B., Kozlov B. A., Solovyov V. I. Sealed-off TEA-CO₂ lasers with pulse repetition rate up to 5 kHz for technological applications. // Proceedings of SPIE. 1994, Vol. 330. P. 137-150.

8. Кюн В. В., Самородов В. Г. Импульсные TEA-CO₂ лазеры. / Обзоры по электронной технике. Сер. 11. Лазерная техника и оптоэлектроника. 1991. Вып. 2 (1329). 49 с.

9. Runaway Electrons Preionized Diffuse Discharges. Editor V. F. Tarasenko. / New York.: Nova Publishers. 2014. 598 p.

10. Газовые лазеры. / Под ред. И. Мак-Даниэля, У. Нигэна. М.: Мир. 1986. 552с.

11. Зарослов Д. Ю., Карлов Н. В., Кузьмин Г. П., Никифоров С. М. Спектральные характеристики источников преионизации CO₂ лазеров в области вакуумного ультрафиолета. // Квантовая электроника. 1978. Т. 5. № 6. С. 1221-1227.

12. Актон Д., Свифт Д. Газоразрядные лампы с холодным катодом. / М.-Л.: Энергия. 1965. 480 с.

13. Киселев Ю. В., Черепанов В. П. Искровые разрядники. / М.: Сов. Радио. 1976. 67 с.

14. Месяц Г. А. Импульсная энергетика и электроника. / М.: Наука. 2004. 704 с.

15. Королев Ю. Д., Месяц Г. А. Физика импульсного пробоя газов. / М.: Наука. 1991. 224 с.

16. Соболев В. Д. Физические основы электронной техники. / Высшая школа. 1979. 416 с.

17. Смирнов Б. М. Физика слабоионизированного газа в задачах и решениях. / М.: Наука. 1985. 426 с.

UDC 621.378.324

INITIAL FORMATION OF VOLUME PUMPING IN SMALL-SIZED TEA-CO₂ LASER

Do Quang Manh, post-graduate student RSREU, Ryazan; quangmanhars@gmail.com

B. A. Kozlov, PhD, Dr. in physico-mathematical sciences, full professor of Electronic Devices Department, RSREU; kozlov.qe.ryazan@mail.ru

The influence of initial chemical composition of CO₂-laser mixtures at atmospheric pressure on the processes occurring at the initial stage of pump volume discharge formation is studied theoretically and experimentally. The energy costs for achieving the required level of initial ionization are experimentally determined and the values of breakdown voltages in a wide range of changes in component composition of active medium of small-sized sealed-off TEA-CO₂ laser are measured.

The main aim of this work is to determine the degree of influence of chemical composition of working mixture on the amount of energy expenditure for initial ionization providing homogeneous breakdown and on the values of breakdown voltage of gas-discharge gap in small-size TEA-CO₂ lasers with working gaps $V_1 = 0.8 \cdot 0.8 \cdot 18$ and $V_2 = 1.8 \cdot 1.2 \cdot 24$ cm³.

Key words: TEA-CO₂ laser, preliminary ionization, VUV radiation, photo-ionization, critical photoelectron concentration, breakdown voltage, γ – processes.

DOI: 10.21667/1995-4565-2018-65-3-156-163

References

1. **Khomich V. Yu., Yamshchikov V. A.** Osnovy sozdaniya sistem elektrorazryadnogo vzbuzhdeniya moshchnykh SO₂- N₂- i F₂-lazerov. M.: Fizmatlit. 2015. P. 168. (in Russian).
2. **Karnushin V. N., Soloukhin R. I.** Macroscopicheskie i moleculyarnye prossesy v gazovykh lazerakh. Moscow: Atomizdat. 1981. 200 p. (in Russian).
3. **Osipov V. V.** Pulsed repetitive TEA-CO₂ lasers. // Proceedings of SPIE. 1996, Vol. 2619. pp. 32-38.
4. **Mesyaz G. A., Ocipov V. V., Tarasenko V. F.** Impul'snye gazovyye lazery. M.: Nauka, 1991, 272 p. (in Russian).
5. **Vizir' V. A., Osipov V. V., Telnov V. A., Khami-dulin G. M.** Malogabaritnyi CO₂-lazer s vysokoi chaste-toi sledovania impul'sov. Kvantovaya elektronika. 1988, vol. 15. no. 6. pp. 1256-1260 (in Russian).
6. **Osipov V. V.** Samostoitel'nyi obiemnyi razriad. UFN. 2000, Vol. 170, no. 3. pp. 225-245. (in Russian).
7. **Gorkin S. B., Kozlov B. A., Solovyov V. I.** Sealed-off TEA-CO₂ lasers with pulse repetition rate up to 5 kHz for technological applications. Proceedings of SPIE. 1994, Vol. 330. pp. 137-150.
8. **Kun V. V., Samorodov V. G.** Impul'snye TEA-CO₂ lazery. Obzory po elektronnoy tekhnike. Vol. 11. Lazernaya tekhnika i optoelektronika 1991. Issue. 2 (1329). P. 49. (in Russian).
9. Runaway Electrons Preionized Diffuse Discharges. Editor **V. F. Tarasenko**. New York.: Nova Publishers. 2014. 598 p.
10. Gas lasers / Edit. **I. Mc-Daniel and U. Nighan**. Moscow: Mir. 1986. 550 p (in Russian).
11. **Zaroslov D. Iu., Karlov N. V., Kuz'min G. P.** Spektr'nye kharakteristiki istochnikov predionizacii CO₂ laserov v oblasti vakuumnogo ul'trafioleta. Kvantovaya elektronika, 1978. Vol. 5. no. 6. pp. 1221-1227.
12. **Akton D., Svift D.** Gazorazriadnye lampy s kholodnym katodom. M.-L. Energya. 1965. 480 p.
13. **Kiselev Iu. V., Cherepanov V. P.** Iskrovye razriadnyky. M.:Sov. Radio. 1967, 67 p.
14. **Mesyaz G. A.** Impul'snaya energetika i elektronika. M.:Nayka, 2004, 704 p. (in Russian).
15. **Korolev Iu. D., Mecsyaza G. A.** Fizika impul'snovo proboya gazov. M.: Nauka, 1991, 224 p. (in Russian).
16. **Sobolev V. D.** Phizicheskie osnovy electronnoi tekhniki. Vyisaya skola. 1979. 416 p. (in Russian).
17. **Smirnov B. M.** Phizika slaboionizirovannovo gaza v zadachak i resenyak. M.:Nayka, 1985. 426 p. (in Russian).