

Ю.В. Скрыль, С.М. Слободян

**Экспериментальная установка
для исследования плазменных процессов
высокочастотного емкостного разряда CO₂-лазера**

Ju.V. Skril, S.M. Slobodyan

**The Experimental System for Researching
Plasma Processes in HF Capacity Discharge
of CO₂-laser**

В статье рассматривается структурная схема ВЧ генератора возбуждения разряда в камере CO₂-лазера. Проведён анализ конструкции генератора. Определены основные характеристики ВЧ генератора. Сделаны выводы о возможности применения данной схемы генератора.

Ключевые слова: ВЧ генератор, газовый разряд, камера CO₂-лазера.

В настоящее время в науке и технике проявляется большой интерес к высокочастотным емкостным разрядам. Данный вид разряда широко используется в лазерной технике для создания активной генерирующей среды; в промышленности – для реализации покрытий с помощью нанесения и травления тонких пленок, плазменной обработки и модификации материалов и т.д. Технологические процессы с применением ВЧ емкостной плазмы осуществляются на вакуумных установках, имеющих ВЧ системы, способные с минимальными потерями транслировать генерируемую ВЧ энергию в нагрузку. Типовая ВЧ система обычно состоит из генератора – источника ВЧ колебаний заданного диапазона, формирующего стабильный высокочастотный емкостный разряд и согласующего устройства с нагрузкой, подключенной с помощью линии передачи тока. Задача согласующего устройства – согласование выходного импеданса генератора ВЧ напряжения с входным импедансом нагрузки, подключенной через линию передачи. Нагрузкой является разрядная камера, в активной зоне которой зажигается высокочастотный емкостный разряд.

В лазерной технике достигнуты определенные успехи в создании целевых CO₂-лазеров, возбуждаемых поперечным (ВЧ) разрядом (диапазон частот 1–100 МГц) [1]. Эти лазеры нашли широкое применение для резки и сварки в высокоточном производстве, электронной промышленности, медицине. В лазерах данного типа охлаждение рабочей газовой смеси осуществляется за счет теплообмена с охлаждаемыми электродами, к которым прикладывается возбуждающее ВЧ напряжение. ВЧ разряд

The paper considers the schematic structure of an HF-generator discharge in CO₂-laser cell. A practical analysis of the system design has been carried out. The basic characteristic of the device are defined. The conclusions about the ability to use the given schematic system have been drawn.

Key word: HF-generator, gas discharge, cell CO₂-laser.

обладает рядом преимуществ по сравнению с разрядом постоянного тока. При применении ВЧ разряда требуются значительно меньшие энергетические затраты, так как используется более низкое напряжение для питания генератора ВЧ накачки, возможность плавного изменения интенсивностью излучения CO₂-лазера, простота реализации модуляции. Лазеры этого типа значительно компактнее. При использовании CO₂-лазеров в производстве разрядная камера может закрепляться непосредственно на перемещаемые в пространстве элементы исполнительных устройств и механизмов станков и подключаться с помощью кабеля к генератору ВЧ накачки.

Для исследования процессов и построения вольт-амперных характеристик, происходящих в среде высокочастотного емкостного разряда, на кафедре общей и экспериментальной физики АлтГУ создана экспериментальная установка, так как невозможно анализировать результаты эксперимента, не имея перед собой реальной картины изучаемого явления, а без проведенных изначально натуральных исследований будет затруднена дальнейшая работа по рассмотрению сложных и детальных теорий. Установка состоит из генератора высокой частоты 13,56 и 27,12 МГц с регулируемой выходной мощностью и вакуумной разрядной камеры с изменяемым внутренним давлением 10⁻⁷–760 мм рт. ст.

В данной работе рассматривается экспериментальная установка для проведения физических исследований различных сред, для которых многие вопросы не решены и требуется создание приборов, моделей и методов расчета конкретных задач, свя-

занных с развитием экспериментальной физики. Необходимость исследований по разработке конкретных инженерных решений, совершенствования известных и создания новых лучших вариантов в процессе создания CO₂-лазеров связана с необходимостью разрешения ряда противоречивых требований к лазерам: обеспечения широкого диапазона вариаций вида напряжения (тока) и поля возбуждения; высокого быстродействия генераторов ВЧ возбуждения плазмы, для обеспечения значительного диапазона частот и управления формой сигнала возбуждения плазменного разряда; стабильности уровня, чистоты спектра и других параметров излучаемой мощности; надежности, снижения габаритов и т.п. Другими словами, задача создания генераторов ВЧ с оптимальными параметрами для возбуждения активного пространства лазерных генераторов, оптимизированных для проведения многофункционального, управляемого в реальном времени физического эксперимента является актуальной и одной из определяющих развитие данного типа лазеров.

К числу важнейших областей экспериментальной физики и нелинейной оптики твердых тел относится и исследование процессов взаимодействия объемных материалов и квантовых наноструктур с излучением дальнего инфракрасного и субмиллиметрового диапазонов, где нелинейности высоких порядков проявляются уже при умеренных интенсивностях излучения. При создании данного образца учитывалась основная цель работы, заключающаяся в разработке и создании электронного устройства – ВЧ генератора возбуждения газового разряда CO₂-лазера экспериментальной установки, задача которого – формирование многофункционального (переменного, постоянного или импульсного) поля возбуждения газового разряда, а также исследование и выявление особенностей поведения плазменного разряда от форм и вида воздействия электрических сигналов и полей, на основании которых возможна разработка схемотехнических решений и методики проектирования, позволяющих получить удовлетворительные, для поставленных проблем физического эксперимента, параметры накачки лазера на несовершенной, но сравнительно недорогой элементной базе. Это особенно важно для решения задач взаимодействия лазерного излучения с веществом твердых тел. Первоначально были проведены работы по исследованию и усовершенствованию существующих конструкций генераторов возбуждения высокочастотных емкостных разрядов CO₂-лазеров, разработке новых конструкций, а также разработке обобщенного метода расчета основных характеристик таких устройств, применительно к данной установке известной мощности.

Модельные зависимости позволяют в ряде созданных автором практических конструкций продвинуться в решении проблем устойчивости и поддержания стационарного режима возбуждения ВЧ емкостного газового разряда. Это обусловлено тем,

что для многих конкретных вариантов конструкций схем высокочастотных емкостных разрядов модели электрической проводимости допускают в определенной граничной постановке аналитическое решение, которые как для режима стационарного, так и для определения условий устойчивости имеют особую важность. Однако наличие неоднородностей плазмы ВЧ разряда, естественных для ограниченных объемов камер, существенно влияет на устойчивость разряда. Поэтому принятие тех или иных упрощений и предположений требует внимательного и корректного учета их влияния на стационарность и устойчивость разряда.

Рассмотрено построение математической модели физического процесса возбуждения газового разряда в выбранной оригинальной конструкции разрядной камеры CO₂-лазера, реализующей физический процесс ВЧ газового разряда. Исходя из анализа особенностей рассматриваемой предметной области, обозначен класс исследуемых физических моделей газового разряда и приведены формальные определения и ограничения класса структур схем возбуждения газового разряда. Принятая за основу закономерность непрерывного поведения ВЧ плазменного разряда может быть ограничена классом систем обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) в форме уравнений Коши

$$\dot{x} = f[x, t], \quad t \in [t_0, t_k], \quad x(t_0) = x_0, \quad (1)$$

где $x \in \bar{A}^n$ – вектор состояния; $f: \bar{A} \times \bar{A}^n \rightarrow \bar{A}^n$ – нелинейная вектор-функция, удовлетворяющая условию Липшица.

Локальное поведение процесса в режиме возбуждения высокочастотного емкостного разряда $b_i \in B$, $1 \leq i \leq m$ характеризуется непрерывной закономерностью поведения, полученной из решения задачи Коши с ограничениями

$$\begin{aligned} \dot{y} &= f[y, t], \quad t \in [t_0, t_k], \\ y(t_0) &= y_0, \quad pr: q(t, y) < 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где $y \in \bar{A}^N$ – вектор состояния; $f: \bar{A} \times \bar{A}^N \rightarrow \bar{A}^N$ – нелинейная вектор-функция, удовлетворяющая условиям Липшица; $y_0 \in \bar{A}^N$ – вектор начальных условий; $q(y, t): \bar{A} \times \bar{A}^N \rightarrow \bar{A}^s$; $s = 1, 2, \dots$ – логическая функция, характеризующаяся предикатом событий

$$pr \in \{true, false\}; \quad pr \in \left\{ \begin{array}{l} true, q(y, t) < 0, \\ false, q(y, t) \geq 0. \end{array} \right\}.$$

Из вышеизложенного представления разрядного процесса возбуждения системой дифференциальных уравнений следует, что высокочастотный емкостный разряд является адекватным обобщением динамических систем. Этот важный вывод согласуется с известными понятиями газоразрядного процесса в работах отечественных и зарубежных ученых, изложенных в фундаментальной монографии академика Г.А. Месяца. Процесс возбуждения газового разряда в предположении непрерывного пове-

дения может быть описан системой алгебраических дифференциальных уравнений. Для увеличения класса решаемых задач в этом случае можно расширить систему (2) введением алгебраических уравнений, ограничиваясь при этом алгебраическими уравнениями, разрешенными относительно алгебраических переменных z . Тогда система (2) примет вид

$$\begin{aligned} \dot{y} &= f(y, z, t); \\ z &= \varphi(y, t); \\ y(t_0) &= y_0; z(t_0) = z_0; \\ pr : q(t, y) &< 0; t \in [t_0, t_k], \end{aligned} \quad (3)$$

где $y \in \bar{A}^N$, $z \in \bar{A}^{Nz}$, $f : \bar{A} \times \bar{A}^N \times \bar{A}^{Ns} \rightarrow \bar{A}^N$; $\varphi : \bar{A} \times \bar{A}^N \times \bar{A}^{Ns} \rightarrow \bar{A}^{Ns}$.

Закономерности глобального поведения ВЧ разряда могут быть охарактеризованы совокупностью согласованных вариаций поведения в различных режимных условиях, полученных на множестве решений задачи Коши с ограничениями вида

$$\begin{aligned} \dot{y}^i &= f_i(y^i, t); y^i(t_0) = y^i_0; \\ t &\in [t_0, t_k], \\ pr_i : q_i(t, y^i) &< 0; \end{aligned} \quad (4)$$

где $y^i \in \bar{A}^{N_i}$, $f_i : \bar{A} \times \bar{A}^{N_i} \rightarrow \bar{A}^{N_i}$; $\varphi_i : \bar{A} \times \bar{A}^{N_i} \rightarrow \bar{A}^{s_i}$; $s = 1, 2, \dots$; $1 \leq i \leq m$.

В отличие от изложенного выше, правая часть в (3) может быть задана либо как логически и алгоритмически, либо получена из иной, например математической, формы представления модели на языке рассматриваемой предметной области. В разделе показано, что в общем виде система (4) аналитически неразрешима, в связи с этим исследование таких систем возбуждения плазменного разряда необходимо проводить либо методами компьютерного анализа с использованием инструментальных средств, либо в условиях натурального физического эксперимента. Актуальными в данном случае являются проблемы поиска рационального решения такого рода непрерывных систем (4).

На основе метода расчета была также апробирована методика рационального проектирования широкополосных ВЧ согласующих каскадов схем возбуждения емкостного разряда при выборе конкретного конструктивного исполнения и расчета всех параметров и характеристик таких устройств. Проведено натурное моделирование плазменных процессов и исследование электрических параметров высокочастотного емкостного разряда. Объектом исследования является система: генератор высокой частоты 13.56 и 27.12 МГц – вакуумная разрядная камера. Показана основная цель эксперимента: создание метода и средства диагностики плазмы высокочастотных емкостных разрядов.

Структурно данная установка состоит из трех основных функциональных элементов: генератора высокой частоты, разрядной камеры и системы га-

зонаполнения [2]. В качестве генератора накачки, являющегося источником энергии для ВЧ возбуждения разряда, используют генератор переменного напряжения высокой частоты. Согласно международному соглашению для исключения радиопомех выделены специальные фиксированные частоты для использования в мощных лабораторных и промышленных установках. Это частоты: 13,56; 27,12; 40,68 МГц и т.д. [3]. Разрядная камера обычно представляет собой замкнутый объем, внутри которого размещаются элементы оптической системы в виде плоскопараллельных, плоско-вогнутых или с другой геометрией зеркал и электроды, подключаемые к источнику ВЧ напряжения. Электроды изготавливаются в виде плоскопараллельных пластин, Х-образных, круглых и других форм. Система электродов в этом случае представляет собой конденсатор и возникающий высокочастотный разряд называют емкостным. Накачка лазера осуществляется подачей переменного напряжения высокой частоты от генератора ВЧ с максимальной мощностью 400Вт. Рабочая частота генератора накачки выбрана равной 27,12 МГц, хотя с помощью использования синтезатора частот и несложных коммутаций в выходных каскадах генератора может изменяться в диапазоне 13,56–110 МГц.

Конструктивно генератор осуществлен по многокаскадной схеме и содержит формирователь высокочастотного сигнала – драйвер с рабочей частотой 27,12 МГц и возможностью плавного изменения выходной мощности от 1 до 12 Вт, собранного на распространенных кремниевых полупроводниковых приборах КТ645, КТ606А и КТ920Б. Промежуточный усилитель мощности выполнен на лучевом тетроде 6П45С по схеме с заземленной сеткой. Выходной усилитель мощности исполнен на четырех лучевых тетрадах 6П45С, включенных параллельно с заземленными сетками [4]. Все каскады усиления имеют встроенные стрелочные приборы, отображающие величины проходящих коллекторных и анодных токов. Выходное высокочастотное напряжение через согласующее устройство и измеритель проходящей мощности и коэффициента стоячей волны (КСВ) подводится к разрядной камере.

В генераторе накачки предусмотрена возможность модуляции высокочастотной составляющей напряжениями сигналов различных форм: синусоидальной, пилообразной, импульсной и др. Все усилительные каскады ВЧ генератора накачки для обеспечения спектральной чистоты выходного сигнала работают в линейных режимах [5, 6]. Питание всех ступеней усиления осуществляется от отдельных источников: формирователь сигнала – от стабилизированного источника +12В. На промежуточный каскад усиления подается анодное напряжение +800, а выходной усилитель мощности питается от источника анодного напряжения +800В. Накальные цепи ламп промежуточного и выходных каскадов подключены к источнику переменного напряжения

6,3 и 12,6В, причем для увеличения ресурса электронных ламп предусмотрено плавное включение напряжения. Электронные лампы имеют принудительное воздушное охлаждение с помощью вентиляторов обдува. У вентиляторов есть аэроконтакты, исключающие подачу анодного напряжения выходного усилителя мощности при неработающем вентиляторе. Выпрямительные устройства имеют встроенные стрелочные приборы – измерители входных и выпрямленных напряжений.

Разрядная камера представляет собой цельнометаллическую конструкцию, изготовленную из толстостенной стальной трубы длиной 700 мм с внутренним диаметром 140 мм. Внутренняя поверхность разрядной камеры отшлифована. На внешней поверхности трубы для удобства монтажа различных датчиков приборов объективного контроля образованы восемь одинаковых плоских поверхностей. В верхней грани для визуального наблюдения процесса плазменного разряда имеется окно прямоугольной формы, закрытое полосой прозрачного материала. Над окном установлена перемещающаяся по длине активной зоны разрядной камеры видеокамера с выводом информации в режиме реального времени на монитор компьютера.

На боковые грани разрядной камеры установлены переходные штуцеры для ввода в разрядную камеру охлаждающей жидкости и газовой смеси. Контроль давления и температуры в активной зоне камеры на одну из граней осуществляется датчиками вакуумметра и термометра. Внутри разрядной камеры расположены два параллельных стальных электрода размером 500×48 мм, установленные на дисковых изоляторах из фторопласта и обеспечивающих возможность изменения межэлектродного расстояния от 0 до 20 мм. Электроды имеют охлаждаемые полости. Высокочастотное напряжение от

генератора накачки подводится к электродам через проходные изоляторы, расположенные симметрично на боковых гранях разрядной камеры.

Система зеркал состоит из заднего «глухого» позолоченного зеркала, закрепленного на задней крышке разрядной камеры, и выходного «полупрозрачного» охлаждаемого германиевого зеркала, закрепленного на передней крышке разрядной камеры посредством специального кронштейна. Конструкция камеры позволяет производить юстировку зеркал регулировочными устройствами с помощью выведенных на наружную сторону крышек камеры дистанционных винтов во время работы лазера. Для полноты эксперимента магистрали охлаждения зеркал и электродов разделены, однако при необходимости они могут быть соединены в одну магистраль на внешней поверхности разрядной камеры.

Для крепления разрядной камеры к основанию установки имеются специальные кронштейны. Система газонапуска обеспечивает наполнение внутреннего объема разрядной камеры смесью газов в строгом соответствии с заданным соотношением и регенерацию рабочей смеси путем прокачивания с помощью вакуумного насоса. Подача газовой смеси в разрядную камеру осуществляется из трех разных баллонов с гелием, углекислым газом и азотом. Газы наполняют разрядную камеру через редукторы расхода, регулируемые натекатели, смеситель и расходный вентиль газовой смеси. На пульте управления газонапуском имеются стрелочный вакуумметр и масляный манометр. Регенерация рабочей смеси осуществляется путем низкоскоростной прокачки через вакуумную камеру. Парциальное давление газовой смеси устанавливалось как 1:2:8 для CO_2 , N_2 и He соответственно. Необходимое давление в камере в пределах 20–40 Торр поддерживается с помощью вакуумного насоса.

Библиографический список

1. Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н., Яценко Н.А. Высокочастотный емкостный разряд: Физика. Техника эксперимента: учеб. пособие для вузов. – М., 1995.
2. Перфильев В.О., Скрыль Ю.В., Шушуев Д.А. Экспериментальная установка CO_2 -лазера с щелевой геометрией // Известия АлтГУ. – 2005. – №14(45).
3. Скрыль Ю.В., Слободян С.М. Мощные CO_2 -лазеры с ВЧ накачкой. Принципы построения // Известия АлтГУ. – 2007. – №1(53).
4. Скрыль Ю.В. Мощная CO_2 -лазерная установка с высокочастотным емкостным разрядом // Известия АлтГУ. – 2008. – №1(54).
5. Шахгильдян В.В. Проектирование радиопередающих устройств. – М., 1986.
6. Гавриленко И.И. Радиопередающие устройства. – М., 1983.