

Ю. Я. ВОЛКОЛУПОВ, канд. физ.-мат. наук,
Т. К. БУРМАКА, С. В. ЕМЕЛЬЯНОВ,
П. И. РЫЛЬЦЕВ, канд. физ.-мат. наук

ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ПОДДЕРЖАНИЯ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА

Несамостоятельные газовые разряды, в объеме которых плотность плазмы поддерживается внешним источником ионизации, широко используются в физике и технике, например для накачки активных сред газовых лазеров. Но проблема повышения устойчивости и однородности несамостоятельного разряда до сих пор остается актуальной.

Впервые эффект повышения устойчивости и однородности горения при создании газоразрядной плазмы внешним ионизатором, а не собственным электрическим полем описан в работе [1]. Он обусловлен тем, что концентрация электронов определяется в основном мощностью ионизатора, и флуктуации электронной температуры не приводят к сильным флуктуациям электронной концентрации. Кроме того, в несамостоятельном разряде можно в широких пределах изменять напряженность поля, не ограничиваясь определенными значениями напряжения горелки, которые свойственны самостоятельным разрядам. Это дает возможность поддерживать газовый разряд в области таких электрических полей, которые обеспечивают формирование в плазме разряда функции распределения электронов, необходимой для оптимального заселения метастабильного уровня возбуждения рабочей среды лазера. Очевидные преимущества несамостоятельного газового разряда обуславливают повышенный интерес к нему. Внешними ионизаторами могут быть источники ультрафиолетового, рентгеновского, радиоактивного излучений, интенсивных электронных пучков. К устройствам ионизации предъявляются следующие требования. Скорость образования электронно-ионных пар S в плазме разряда внешним ионизатором должна значительно превышать скорость размножения электронов под действием собственного электрического

поля $S \gg an_e v_e$, где a — количество электронов, образуемых разрядом на единичной длине; n_e — концентрация электронов; v_e — скорость дрейфа к аноду. Для выполнения этого условия устройство ионизации должно поддерживать концентрацию электронов в плазме разряда на уровне $10^{11}—10^{12}$ см $^{-3}$. Второе

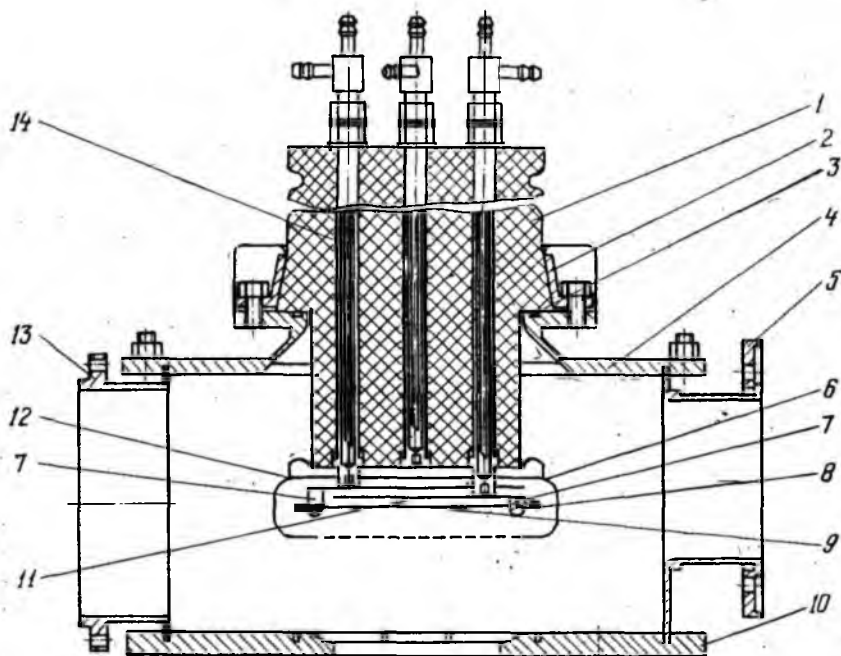


Рис. 1

требование заключается в равномерной ионизации газа по занимаемому объему. Им в полной мере удовлетворяют источники высокоэнергетичных электронов с большим поперечным сечением пучка и равномерным распределением плотности тока по сечению (неравномерность не должна превышать 10 %). Обычно требуется такое распределение плотности тока, чтобы пространственный масштаб допустимой неоднородности был много меньше площади поперечного сечения электронного пучка. Требование однородности пучка связано с необходимостью равномерной ионизации газа внешним ионизатором, так как неравномерность ионизации может приводить к росту коэффициента «прилипания» и, как следствие, к возникновению электрополевой неустойчивости разряда. Описываемый источник электронов для поддержания самостоятельного разряда обеспечивает формирование, ускорение и выведение в рабочую среду газоразрядной камеры электронного пучка с энергией частиц до 150 кэВ, площадью поперечного сечения 800 см 2 и общей

силой тока 100 мА. Конструктивная схема устройства выбрана исходя из рекомендаций работы [2].

На рис. 1 представлена конструкция источника, которая состоит из узла ввода высокого напряжения, рабочей камеры, катодно-сеточного узла и окна выпуска потока электронов.

Разборная рабочая камера 4 выполнена из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. В ней предусмотрены два фланца для откачных агрегатов: 13 — для электродугового агрегата типа АВЭД-2/260М, 5 — для магниторазрядного насоса НОРД-250. Благодаря такому решению обеспечивается быстрая предварительная откачка объема до давления 10^{-3} Па и поддерживается высокий безмасленный вакуум насосом НОРД на уровне $6 \cdot 10^{-4}$ — 3×10^{-5} Па.

Узел ввода высокого напряжения в рабочую камеру собран на основе изолятора из органического стекла 1, который с помощью прокладки 3 и прижимного кольца 2 уплотняется «на вакуум». Для подведения накального напряжения, высокого и сеточного потенциалов используются медные шпильки 14, являющиеся одновременно несущими элементами катодно-сеточного узла. В целях уменьшения тепловой нагрузки изолятора шпильки охлаждаются водой. Электронно-оптическая система источника — четырехэлектродная. Разделение областей формирования и ускорения пучка позволяет уменьшить влияние малых изменений геометрии электронно-оптической системы на выходные параметры пучка. В источнике используется прямоканальный катод 9, состоящий из двадцати вольфрамовых нитей диаметром 0,2 мм и длиной 120 мм, параллельных короткой стороне выпускного окна на расстоянии 40 мм друг от друга. Размеры катода превышают размеры выходного окна. Тем самым устраняются краевые эффекты, возникающие при неравномерном нагреве нитей катода вблизи массивных токоподводящих шин. Такой катод обеспечивает длительную работоспособность при давлении $(4-8) \cdot 10^{-5}$ Па [2]. Нити закрепляются в цангах 8 на двух медных шинах 7, к которым подводится переменное напряжение от накального трансформатора. Цанги с одной стороны подпружинены для устранения провисания нити при нагреве. Нити катода в рабочем режиме нагреваются до температуры порядка 2200—2400 К, током 90 А и напряжением 4—10 В. Магнитное поле, создаваемое переменным током накала, вызывает модуляцию плотности тока пучка и нестабильность характеристик источника. Для устранения модуляции к шинам питания по всей длине крепятся две параллельные медные пластины 11, 12. Расстояние между ними 15 мм. В этом случае магнитные поля в зазоре компенсируются. Кроме того, на пластину 11 подается высокий (катодный) потенциал (-150 кВ). Она одновременно служит и формирующим электродом, электрическое поле которого направляет электроны, выходящие из катода, к выпускному окну. Для управления электронным потоком

в конструкцию введена сетка 6. Изменением ее потенциала можно варьировать плотность тока пучка и его распределение вплоть до полного запираания источника. Основная особенность источников электронов для управления газовым разрядом состоит в необходимости разделения области ускорения частиц (вакуум порядка 10^{-3} — 10^{-4} Па) и области взаимодействия пучка с газом (давление 10^5 Па).

Электроны выводятся через тонкую металлическую фольгу (в импульсном режиме могут использоваться пленки из полимерных материалов). Фольга опирается на поддерживающую решетку. От надежности и долговечности этого узла зависят эксплуатационные характеристики всего источника. Поэтому при разработке устройства ионизации ему уделяется особое внимание. В рассматриваемой установке узел выпуска представляет собой медный фланец 10 с опорной решеткой щелевого типа, аналогичной описанной в работе [3]. К нему со стороны, обращенной в газоразрядную камеру, крепится фольга. Пластина опорной решетки имеет ширину 1 мм, высоту 12 мм. Расстояние между пластинами 6 мм. Для отвода теплоты, выделяемой электронным пучком в фольге и опорной решетке, во фланце предусмотрены каналы охлаждения. В большинстве источников [2; 4] используется металлическая фольга в окне выпуска электронов. В этом случае применяются материалы с малым зарядом ядра, т. е. большей прозрачностью для заряженных частиц. Однако получение прозрачной для электронного потока вакуумно-плотной фольги необходимых размеров связано со многими технологическими трудностями. Поэтому в рассматриваемом источнике используется фольга из сложного композитного сплава на базе легких элементов с зарядом ядра не более 13. Применение такой фольги позволяет при ускоряющем напряжении 150 кВ получать в непрерывном режиме в атмосфере пучок электронов с площадью поперечного сечения 800 см^2 и общей силой тока до 100 мА, что составляет 50 % силы тока катода. Эти данные в 1,5 раза превышают результаты, описанные в работе [2].

Ускоряющее напряжение 0—150 кВ подается от регулируемого источника, выполненного по схеме однополупериодного выпрямителя с умножением. Параметры выведенного пучка измеряются с помощью плоского разрезного алюминиевого коллектора с ячейкой $5 \times 5 \text{ мм}^2$, удаленного на расстояние 10—30 мм от фольги. В эксперименте учитывались поправочные коэффициенты на вторичную эмиссию, ионный ток и поглощение электронов в воздушном промежутке, приведенные в работе [5]. Истинное значение тока, измеренного коллектором в виде плоской пластины (цилиндр Фарадея не применяется из-за больших размеров окна), определяется из соотношения

$$J_{\text{ист}} = \frac{J_{\text{кол}}}{K_{\text{и}} K_{\text{погл}} K_{\text{втор}}}$$

где K_n — поправочный коэффициент на полный ток; $K_{\text{погл}}$ — коэффициент, учитывающий поглощение электронов в воздушном зазоре между фольгой и коллектором; $K_{\text{втор}}$ — коэффициент, учитывающий вторичную эмиссию электронов из коллектора.

На рис. 2 дано распределение плотности выводимого электронного тока по сечению пучка для фиксированных расстояний между коллектором и фольгой.

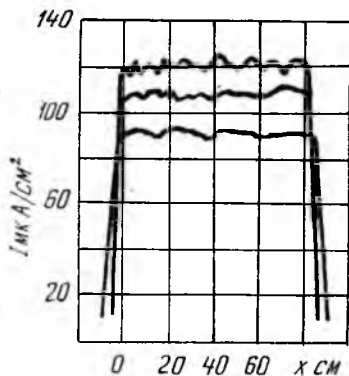


Рис. 2

При удалении коллектора распределение плотности тока становится более равномерным. Это связано с рассеянием электронов пучка на молекулах газа. Если для значения расстояния, равного 1 см (кривая 1), неравномерность плотности тока по сечению пучка не превышает 10 %, то для расстояний 2 и 3 см неравномерность распределения уменьшается до 8 и 5 % (кривые 2, 3). Интегральный ток различных положений коллектора составляет

98, 90 и 77 мА соответственно.

Описанные характеристики электронного пучка являются удовлетворительными для возбуждения больших объемов активной среды электроионизационных лазеров.

Список литературы: 1. *Несамостоятельный стационарный газовый разряд в смесях при атмосферном давлении и ионизации электронным пучком*/ Е. П. Велихов, С. А. Голубев, Ю. К. Земцов и др.//Журн. эксперим. и теорет. физики. 1973. 65. № 2. С. 543—549. 2. *Григорьев Ю. В., Шантурин Л. П.* Импульсная электронная пушка с выпуском потока большого сечения в атмосферу//Приборы и техника эксперим. 1978. 2. С. 187—189. 3. *Федоров В. И., Мясников А. С., Шантурин Л. П.* Расчет фольговых окон для электронных пушек с широким потоком//Приборы и техника эксперим. 1981. 6. С. 144—147. 4. *Численное исследование несамостоятельного разряда, инициируемого электронным пучком*/В. И. Богданова, В. А. Бурцев, Н. И. Козаченко и др.//Физика плазмы. 1982. 8. № 1. С. 189—192. 5. *Григорьев Ю. В., Степанов А. В.* Измерение тока электронов с энергией 60—130 кэВ в воздухе//Приборы и техника эксперим. 1982. 5. С. 124—126.

Поступила в редколлегию 04.07.84.