

## ТЕОРИЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО СТОЛБА ГАЗОВОГО РАЗРЯДА, СЕКЦИОНИРОВАННОГО ПО ПОТОКУ ГАЗА

В.Г.Низьев, О.А.Новодворский

Научно-исследовательский центр по технологическим лазерам РАН

До настоящего времени наиболее мощные газоразрядные  $\text{CO}_2$ -лазеры технологического назначения создаются по концепции быстропроточных, с поперечным разрядом постоянного тока. Эффективным физико-техническим приемом повышения вклада мощности в поток газа является секционирование электродов, как поперек потока газа, так и вдоль по потоку. Разряды, расположенные поперек потока газа, находятся в одинаковых условиях. Однако, условия горения разрядов смещенных вдоль по потоку сильно различаются. Работа такой системы разрядов интересна с физической точки зрения и важна с практической. Оптимальный выбор целого ряда конструктивных параметров такой камеры должен быть обоснованным и осмысленным, а не произвольным.

Существующие в настоящее время теоретические модели тлеющего разряда, секционированного вдоль по потоку [1-3] нельзя признать исчерпывающими. Для описания таких разрядов привлекаются сложные численные методы, обладающие большой физической полнотой, однако требующие большого времени счета, что в итоге не позволяет динамично работать с программой, оперативно моделировать практические ситуации, описывать феноменологические характеристики разряда.

Настоящая полуаналитическая одномерная модель положительного столба диффузного разряда включает минимум основных процессов, играющих определяющую роль в разряде, секционированном вдоль по потоку газа.

### Теоретическая модель

Рассматривалась одномерная стационарная модель разряда. На рис. 1 представлена схема расположения разрядов в канале с потоком газа. Вдоль по потоку газа расположены предионизатор и два разряда. Анод сплошной, катод секционирован, секции подсоединены к источнику питания через балластные сопротивления. Зоны интенсивной ионизации газа расположены симметрично относительно вертикальной оси.

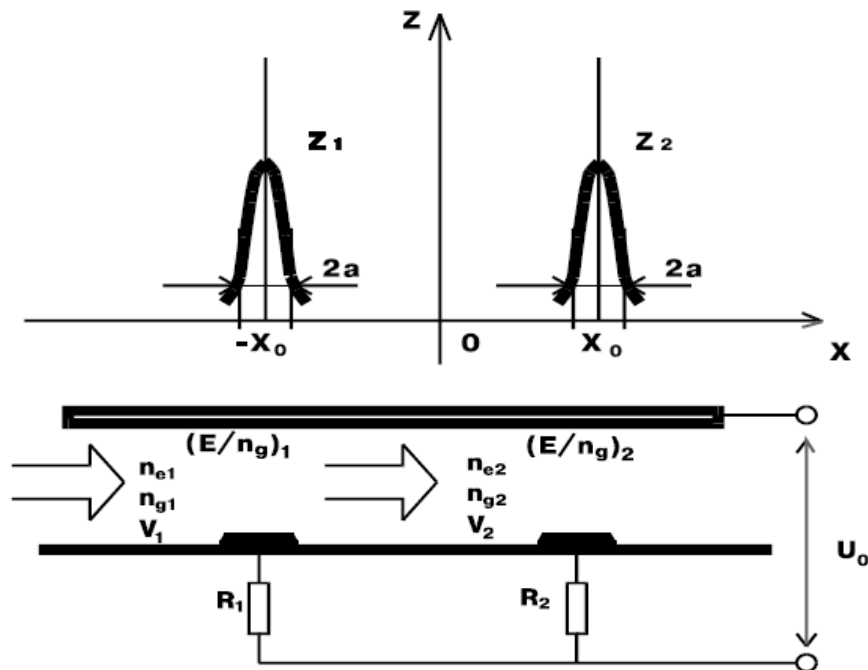


Рис. 1. Расчетная схема расположения разрядов и обозначение параметров.

Прежде всего следует отметить, что для адекватного описания такой структуры разрядов требуется учет рекомбинации. Секционированные вдоль по потоку электродные системы используются для обеспечения повышенных энергокладов при повышенных давлениях газа. В этих условиях роль рекомбинации является преобладающей в сравнении с потерями, обусловленными амбиполярной диффузией заряженных частиц на стенки канала. Что касается амбиполярной диффузии вверх по потоку то при наличии эффективного предьонизатора ею можно пренебречь. В этом случае уравнение баланса числа электронов становится формально интегрируемым.

$$z(x) \cdot n - V(x) \cdot n' - \alpha(x) \cdot n^2 = 0 \quad (1)$$

В безразмерном виде решение запишется следующим образом:

$$\frac{n}{n_0} = \frac{\exp \int K_1(X) \cdot dX}{C + \int K_2(X) \cdot \exp \int K_1(X') \cdot dX' \cdot dX} \quad (2)$$

$X = \frac{x}{a}$ ;  $K_1 = \frac{z \cdot a}{V}$ ;  $K_2 = \frac{\alpha \cdot a \cdot n_0}{V}$ ;  $C$  – постоянная интегрирования.

Здесь  $a$  – характерная ширина зоны ионизации.  $n_0$  – нормировочный уровень концентрации электронов, например, плотность электронов производимая предьонизатором. Задача точного вычисления электрических полей при заданной форме электродов является самостоятельной [2, 4] и выходящей за рамки нашего рассмотрения. Без ущерба для достоверности результатов, касающихся взаимодействия разрядов, пространственная зависимость коэффициента ионизации моделируется интегрируемой функцией вида:

$$K_1(X) \sim \sqrt{(X \pm X_0)^2 + 1}$$

Знаки плюс и минус берутся для левого и правого разрядов, соответственно,  $X_0 = x_0/a$ ;  $x_0$  – абсолютное значение координат центров ионизации разрядов.

Здесь присутствует нормировочный параметр линейного масштаба всей задачи "а", физический смысл которого понятен из рис.1, это характерный размер изменения коэффициента ионизации, общий для обоих разрядов. Поскольку зависимость коэффициента ионизации от поля резкая, а коэффициента рекомбинации гораздо слабее, положим  $K_2(X) = \text{Const}$  в пределах каждого разряда

Константы  $C$  для левого и правого разрядов находятся соответственно из граничного условия нормировки концентрации на уровень предьонизации в месте расположения предьонизатора и из сшивки решений для левого и правого разрядов при  $X=0$ .

Величины  $E/n_g$ ,  $n_g$ ,  $V$  ( $E$  – напряженность электрического поля,  $n_g$  – плотность газа,  $V$  – скорость потока газа) для левого и правого разрядов различны. Эти параметры в свою очередь зависят от величин балластных сопротивлений, включенных в секции, степени подогрева газа, поступающего к правому разряду за счет энергоклада в левый разряд.

Коэффициент ионизации  $Z$  вычислялся в зависимости от  $E/n_g$  для распределения электронов по скоростям Дрюэстейна [5]. В расчеты могут быть введены другие, в частности, эмпирические зависимости первого коэффициента Таунсенда от напряженности электрического поля, представленные, например, в книге [6].

Итерационная схема вычисления  $E/n_g$  следующая: задается начальное значение  $E/n_g$ , вычисляется коэффициент ионизации, плотность электронов и ток, протекающий через секцию. Затем рассчитывается напряжение на балластном сопротивлении и на разряде, определяется  $E/n_g$ , сравнивается с начальным значением, и вычисления повторяются до получения  $E/n_g$  с заданной точностью. Все звенья итерационной цепочки, представлены аналитическими зависимостями.

Скорость потока и плотность газа, входящего в первый разряд  $V_1$ ,  $n_1$ , заданы. Параметры потока, входящего во второй разряд  $V_2$ ,  $n_2$  – вычисляются и зависят от энергоклада в первом разряде:

$$\frac{n_{r1}}{n_{r2}} = \frac{V_1}{V_2} = \left( 1 - \frac{\gamma-1}{\gamma} \cdot \frac{W_1}{P \cdot G} \right) \quad (3)$$

Индексы 1, 2 относятся соответственно к левому и правому разрядам,  $W_1$  - мощность, выделяемая в первом разряде;  $\gamma$  - постоянная адиабаты Пуассона;  $P, G$  давление и объемный расход газа.

Рациональное построение полуаналитической модели разряда, секционированного вдоль по потоку позволяет оперативно получать много полезной информации о параметрах, структуре и свойствах разряда.

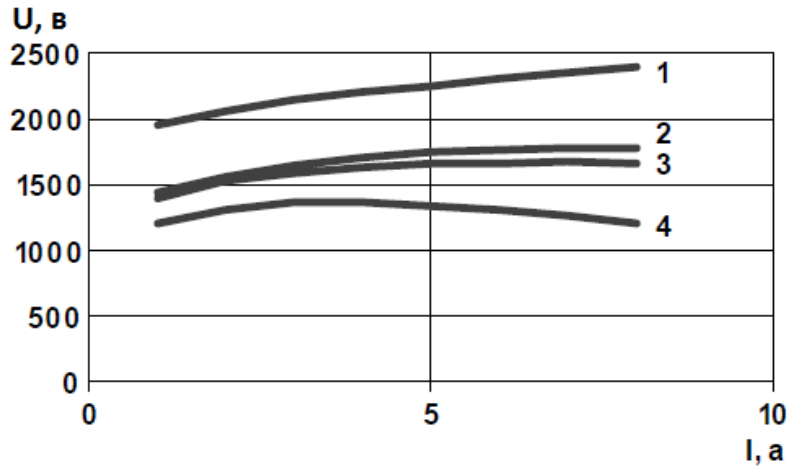


Рис. 2. ВАХ первого (1, 2) и второго (3, 4) разрядов при скорости потока газа 150 м/с (кривые 1, 3) и 50 м/с (кривые 2, 4). Ширина зоны ионизации  $a=2\text{мм}$ ,  $R_1=200\Omega$ ,  $R_2=300\Omega$ , коэффициент рекомбинации  $\alpha=10^{-6}\text{см}^{-3}\text{с}^{-1}$ , уровень предыонизации  $n_p=10^8\text{см}^{-3}$ .

### Результаты расчетов.

На рис.2 приведены вольтамперные характеристики (ВАХ) разрядов при разных скоростях потока газа. Они вычислялись путем изменения общего напряжения  $U$ . Это приводило к изменениям напряжений и токов на первом и втором разрядах. Первый по потоку разряд имеет слаборастущую ВАХ, характер зависимости которой мало меняется со скоростью потока. Увеличение скорости потока газа приводит к росту потерь заряженных частиц в зоне интенсивной ионизации, а значит к увеличению сопротивления разряда. Происходит перераспределение общего напряжения между разрядом и балластником в пользу разряда. Это видно и из рис.3.

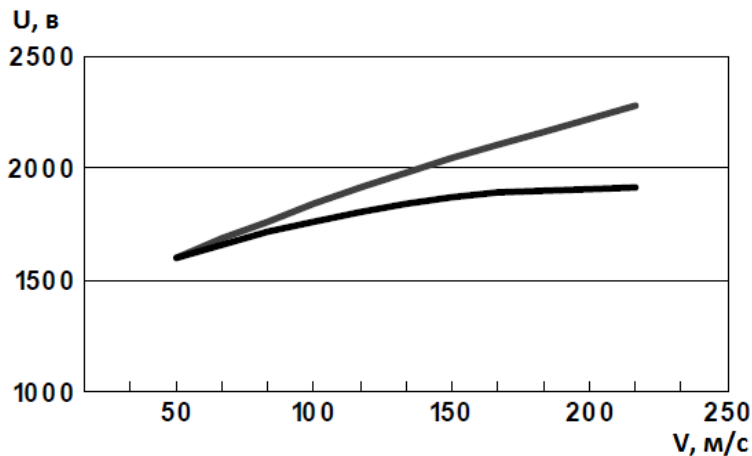


Рис. 3. Зависимость напряжения на первом разряде от скорости потока. Нижняя кривая  $U=\text{Const}$ , верхняя кривая  $i=\text{Const}$ .  $R_1=200\Omega$ ,  $R_2=300\Omega$ ,  $a=2\text{мм}$ ,  $\alpha=10^{-6}\text{см}^{-3}\text{с}^{-1}$ ,  $n_p=10^8\text{см}^{-3}$ .

Что же касается второго разряда, то характер зависимости и наклон ВАХ существенно зависят от скорости потока. Дело в том, что, несмотря на рост напряжения на разряде с ростом скорости потока, удельный энергозатрат в первый разряд в единицах Дж/г при этом падает. Нагрев газа невелик и второй разряд практически не испытывает влияние первого разряда, ВАХ второго разряда также является слаборастущей. Однако при снижении скорости потока из-за нагрева газа в первом разряде, ВАХ второго становится падающей. Причина роста напряжения на разряде с увеличением скорости потока, рис.3, хорошо известна. В балансе заряженных частиц диффузного разряда в потоке газа роль конвективного члена весьма существенна и растет с ростом скорости потока. Рост напряжения компенсирует конвективные потери заряженных частиц.

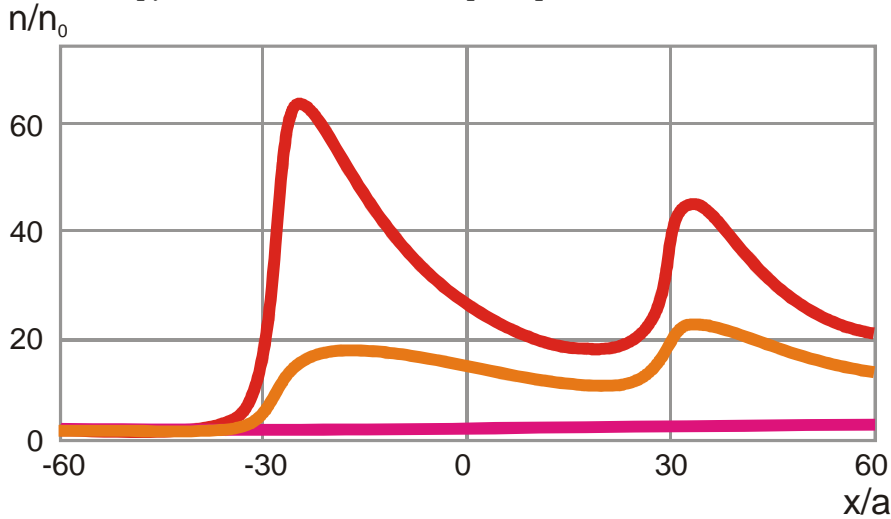


Рис. 4. Распределение электронной концентрации при различном общем напряжении. Снизу вверх  $U=1500, 2000, 2500$  В.  $R_1=200\Omega$ ,  $R_2=300\Omega$ ,  $a=0.2$  см,  $\alpha=10^{-6}$  см<sup>-3</sup> с<sup>-1</sup>.

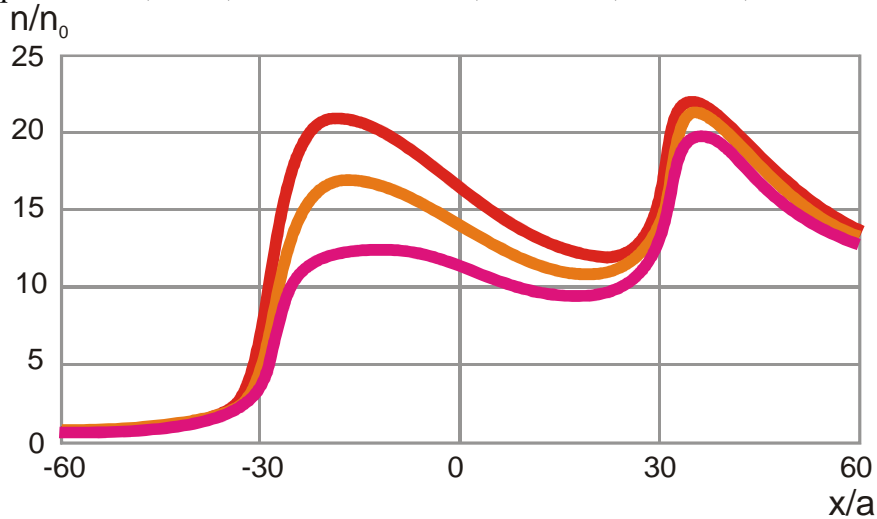


Рис. 5. Распределение электронной концентрации при различных  $R_1$ . Сверху вниз  $R_1=100, 200, 300\Omega$ ,  $R_2=300\Omega$ ,  $U= 2000$ В,  $V=100$ м/с.

На рис.4 представлены распределения электронной концентрации вдоль по потоку при разных напряжениях. Плотность электронов, поступающих в первый разряд от предыонизатора значительно ниже той, что приходит во второй разряд от первого. Это означает, что, если через обе секции течет одинаковый ток, то локальное значение электронной концентрации и плотности тока выше в зоне первого электрода, а не второго. Это определяет место зарождения неустойчивости и контрагирования разряда в энергетически напряженных режимах. Параметр  $jE/n_r$  выше на первом электроде, так как и  $j$  и  $E/n_r$  здесь больше. Это нежелательно, так как, безусловно, повлияет и на горение

разряда во втором и последующих по потоку рядах электродов. Более оптимальным, с точки зрения устойчивости горения разряда во всей камере, является такой выбор балластных сопротивлений, чтобы через второй разряд шел несколько больший ток, чем через первый. Тогда при превышении предельных параметров контрагирование будет происходить на нижнем по потоку электроде с меньшими последствиями для разряда и камеры в целом. При низком вкладе концентрация электронов второго разряда выше концентрации в первом. При высоких вкладах ситуация меняется. Это объясняется квадратичной по концентрации зависимостью рекомбинационных потерь заряженных частиц.

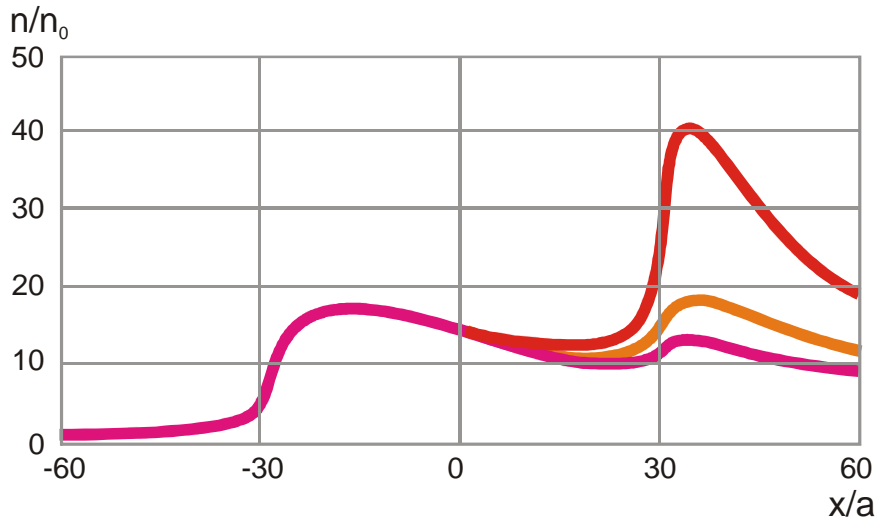


Рис. 6. Распределение электронной концентрации при различных  $R_2$ .  
Сверху вниз  $R_2=100, 400, 700\Omega$ .  $R_1=200\Omega$ ,  $U=2000\text{ В}$ ,  $V=100\text{ м/с}$ .

Влияние величины балластных сопротивлений на распределение электронной концентрации проиллюстрировано на рис.5 и 6. Как и следовало ожидать, влияние  $R_2$  на распределение электронной концентрации в первом разряде отсутствует, а влияние  $R_1$  на второй разряд весьма слабое.

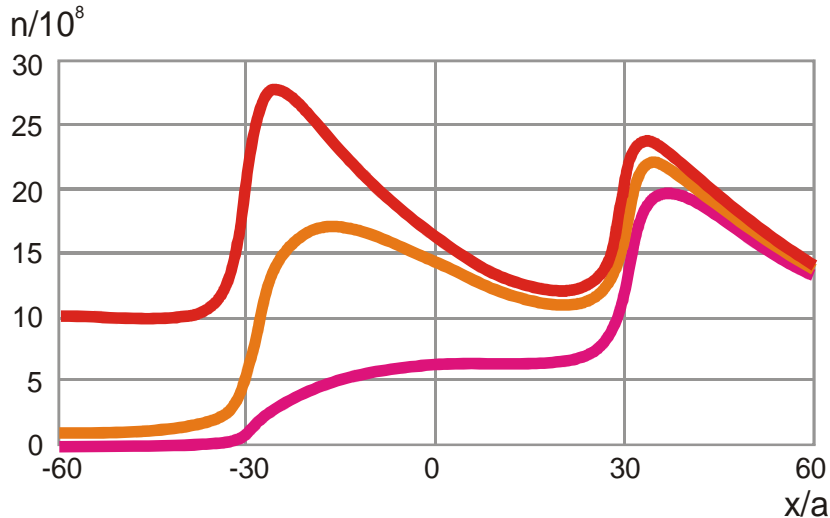


Рис. 7. Распределение электронной концентрации по потоку газа при разном уровне предьонизации  $n_p=10^7, 10^8, 10^9\text{ см}^{-3}$ , соответственно, кривые 1, 2, 3.  
 $U=2000\text{ В}$ ,  $V=100\text{ м/с}$ ,  $R_1=200\Omega$ ,  $R_2=300\Omega$ ,  $a=2\text{ мм}$ .

Распределение электронной концентрации при различных уровнях предьонизации показано на рис.7. С увеличением уровня предьонизации максимальное значение электронной концентрации в первом разряде растет, местоположение этого максимума

смещается в область более интенсивной ионизации. На второй разряд уровень предыонизации практического влияния не оказывает.

Влияние скорости потока на распределение электронной концентрации можно пронаблюдать на рис.8. Скорость потока влияет на структуру как первого так и второго разряда. С увеличением скорости потока при постоянном общем напряжении смещается по потоку максимум электронной концентрации первого разряда, уменьшается  $n$  и ток, распределение приобретает ступенчатый вид.

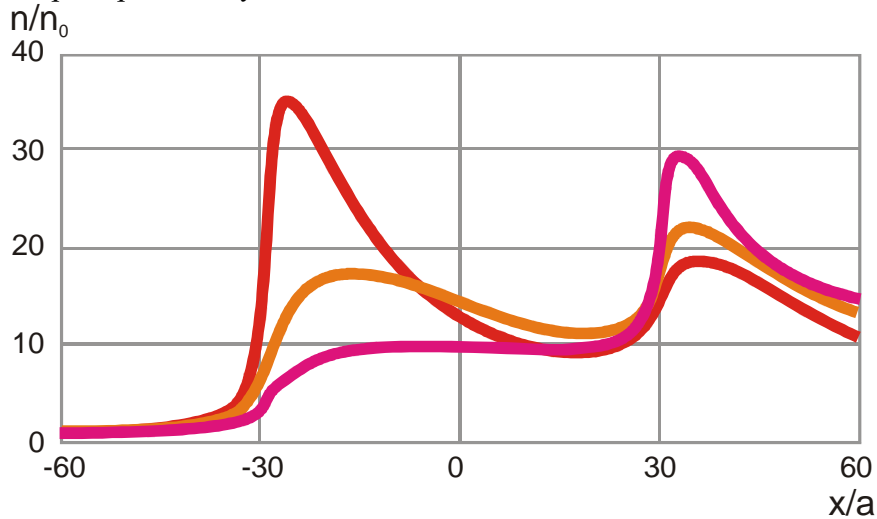


Рис. 8. Распределение электронной концентрации при разных скоростях потока  $V=50, 100, 150$  м/с, соответственно, для фронтов первого разряда слева направо.  $U=2000$  В,  $R_1=200\Omega$ ,  $R_2=300\Omega$ .

### Результаты экспериментов

Практическая цель разработки настоящей теории была непосредственно связана с созданием системы накачки 5 киловаттного технологического  $CO_2$ -лазера. Схема системы накачки показана на рис.9. Здесь применяется так называемая система перекрещенных электродов. Источник питания построен на основе тиристорного источника тока. Блок согласования содержит высоковольтные высокочастотные (2.5 кГц) малогабаритные трансформаторы и выпрямительные блоки по числу секций электродов: 5 - катодных, 20 - анодных. Применяется также предыонизатор с высокочастотным разрядом через диэлектрические электроды.

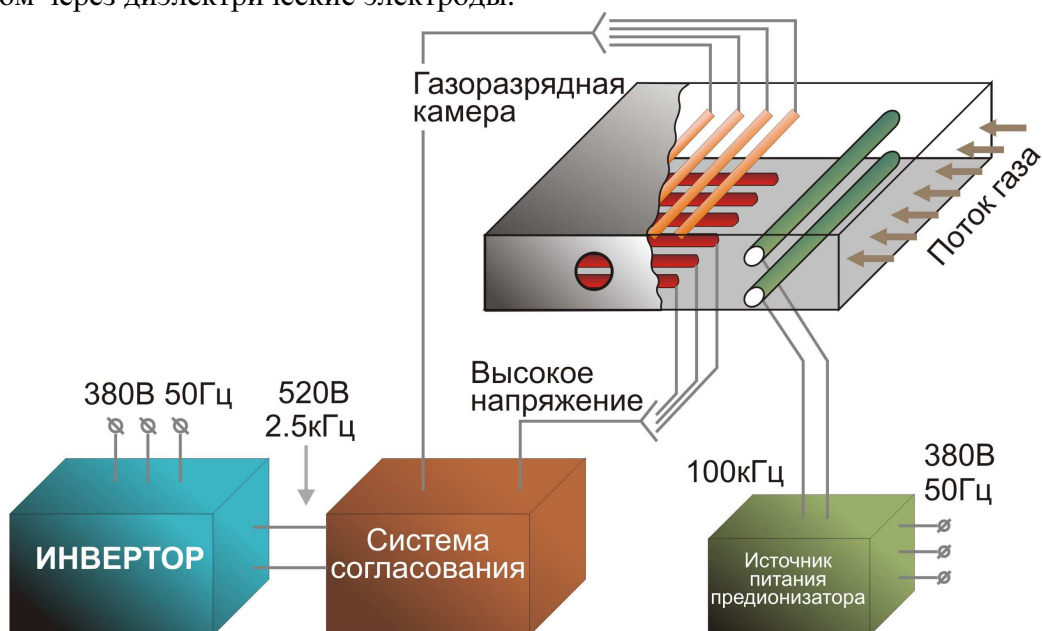


Рис. 9. Схема экспериментальной установки: система накачки технологического лазера

Такая электродная система имеет множество практических преимуществ, одно из которых конструктивная простота и надежность электродной системы. Однако физические аспекты поведения такой системы далеко не тривиальны. Достаточно обратить внимание на то, что число перекрестий, где горят разряды гораздо больше числа секций, где токи фиксированы. Тем не менее, в такой системе электродов разряд горит весьма устойчиво, обеспечивая энергетические параметры не хуже, чем в традиционных конструкциях, при индивидуальном балластировании каждого, отдельного разряда. Было установлено, что это непосредственно связано с влиянием верхних по потоку разрядов на нижние разрядов. Причем, речь идет не о "потере свойства самостоятельности разряда" а о зависимости параметров нижележащих разрядов от вышележащих при том, что и те и другие являются самостоятельными с точки зрения классического определения. Рис. 10,11 полученные на этой установке такую зависимость разрядов наглядно демонстрируют, причем как в электроположительном газе, рис.10, так и в лазерной смеси, рис.11.

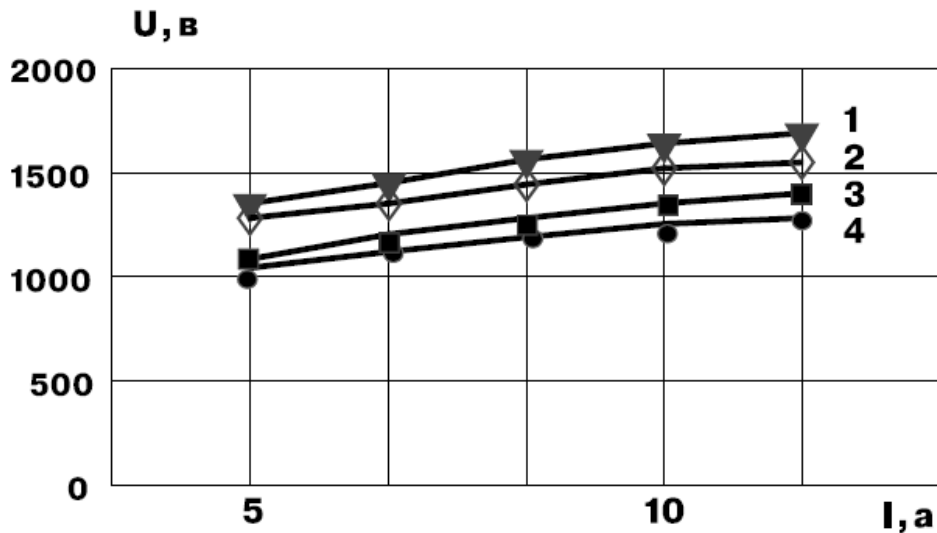


Рис. 10. Вольтамперные характеристики разряда в смеси газов: гелия и азота. Для кривых 1, 2 соотношение компонент  $P_{He}:P_{N_2} = 5:4$ . Для кривых 3,4 соотношение компонент  $P_{He}:P_{N_2} = 5:3$ . Кривые 1, 3 - первый по потоку катод; Кривые 2, 4 - второй по потоку катод.

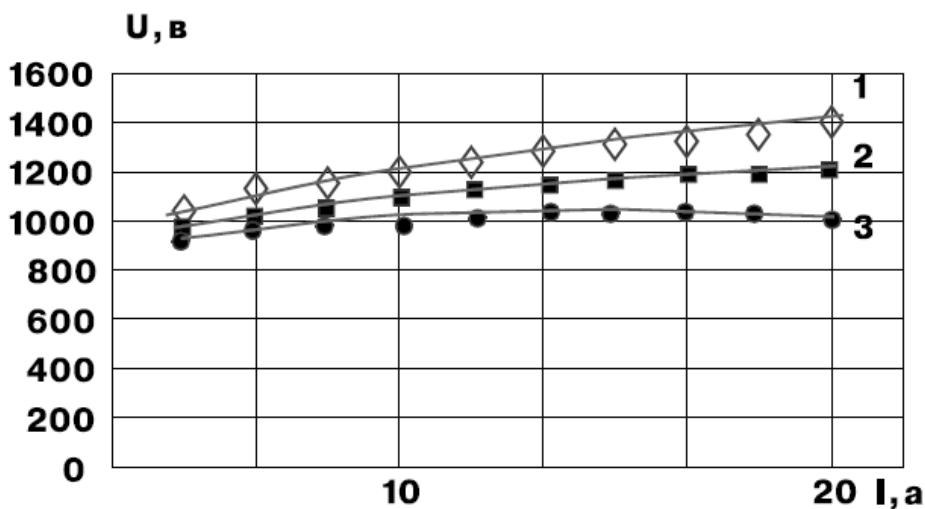


Рис. 11. Вольтамперные характеристики разрядов в лазерной смеси газов: гелия и азота и  $CO_2$  для первого, второго и третьего по потоку катодов, соответственно.

Представленная теория не может претендовать на количественное согласие с экспериментом, однако дает много ценной информации на качественном уровне. Так по

чисто техническим соображениям токи в катодных секциях поддерживались строго одинаковыми. Однако при этом, как показывают расчеты, контрагирование разряда в энергетически предельных режимах должно происходить на верхних по потоку разрядах. Неприятных последствий переключения токов по потоку газа удалось избежать расположив катодные трубки на разном расстоянии от анодной плиты, увеличивающемся вниз по потоку. Это конструктивное решение было введено заблаговременно и сознательно на основе представлений, вытекающих из теории.

Таким образом, построена полуаналитическая модель диффузного разряда в потоке газа с секционированными вдоль по потоку электродами. Модель позволяет вычислить интегральные, практически значимые характеристики таких разрядов.

Представленная теория позволяет в практике реального конструирования разрядных камер мощных технологических лазеров промоделировать различные ситуации, выбрать оптимальные параметры системы.

#### Литература

1. Райзер Ю.П., Суржиков С.Т. Численное моделирование быстропротекающих электроразрядных  $\text{CO}_2$ -лазеров. Препринт ИПМ АН СССР. М.: ИПМ, 1989, № 394, 20 с.
2. Завалова В.Е., Леденев В.И., Панченко В.Я., Райзер Ю.П., С.Т.Суржиков Моделирование физических процессов в активной среде технологического  $\text{CO}_2$ -лазера с секционированным катодом. Тезисы докладов Всесоюзной конференции "Применение лазеров в народном хозяйстве". Шатура: НИЦТЛ, 1989, с.7-8.
3. Бреев В.В., Двуреченский С.В., Пашкин С.В. Численное исследование нестационарных процессов в положительном столбе высоковольтного диффузного разряда. ТВТ. 1979. Т. 17, № 1, 2, с.31, 250.
4. Гладуш Г.Г., Самохин А.А. Расчет двумерного тлеющего разряда в молекулярном газе. Препринт ИАЭ № 3062. М.: ИАЭ, 1978.
5. Баранов В.Ю., Веденов А.А., Низьев В.Г. Разряд в потоке газа. ТВТ, 1972, т.10, № 6, с.1156-1159.
6. Грановский В.Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. М.: Наука, 1971. 543 с.