

## **Устойчивость секционированного разряда. Безбалластная система накачки мощного технологического CO<sub>2</sub> лазера**

Одним из направлений развития мощных технологических CO<sub>2</sub> лазеров являются лазеры с накачкой постоянным током и поперечной прокачкой газовой смеси. Для возбуждения активной среды в большом объеме обычно применялось секционирование катода с общим анодом. В Институте была разработана оригинальная система накачки активной среды с помощью, так называемых, перекрещенных электродов, обладающая многочисленными преимуществами. Основные достижения сотрудников Института в этой области:

- Разработан уникальный метод теоретического описания устойчивости распределения токов в разветвленных цепях, в том числе в системе секционированных электродов.
- Теоретически предсказана и экспериментально доказана высокая устойчивость разряда в системе перекрещенных электродов.
- Создана уникальная система накачки мощного технологического CO<sub>2</sub> лазера с безбалластным питанием секционированного разряда постоянного тока.
- На этих принципах создан 5 кВт CO<sub>2</sub> лазер, исследованы его характеристики.

Работы по теме опубликованы в российских и международных научных журналах и докладывались на международной конференции в США. Оригинальные технические решения были запатентованы в России.

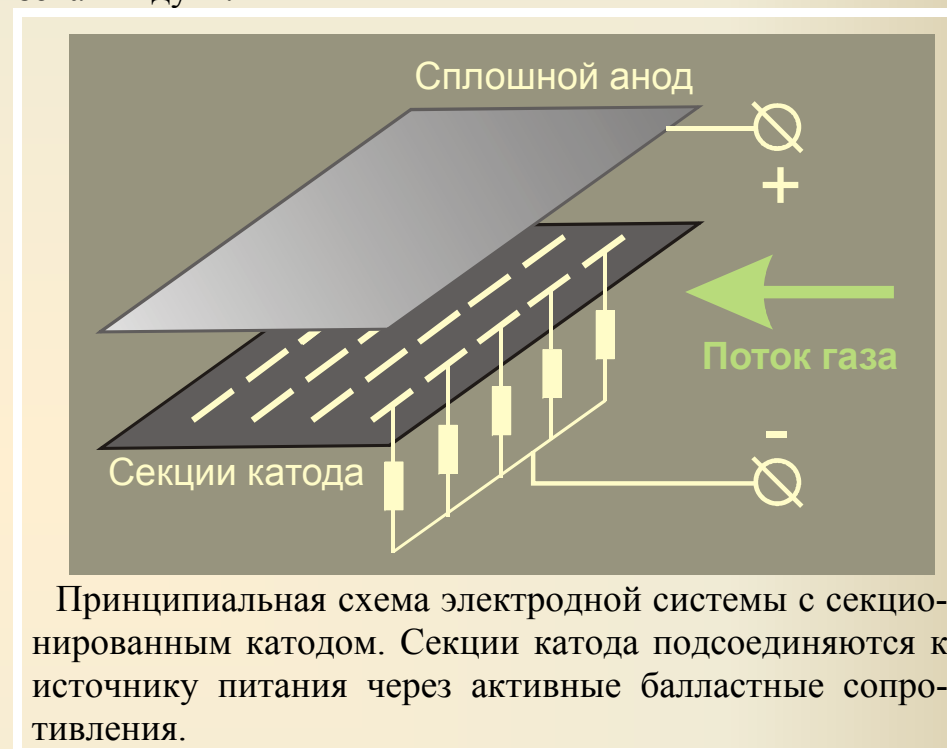


## ВВЕДЕНИЕ



Мощность выходного излучения в лазерах с поперечным разрядом и поперечной прокачкой газа, определяется удельным вкладом мощности разряда в лазерную смесь и расходом газа через разрядный промежуток. Существует концепция именно такой, как изображено на рисунке, электродной системы, состоящей из пары трубок для мощного технологического  $\text{CO}_2$  лазера. Однако, такая электродная система весьма чувствительна к «внешним

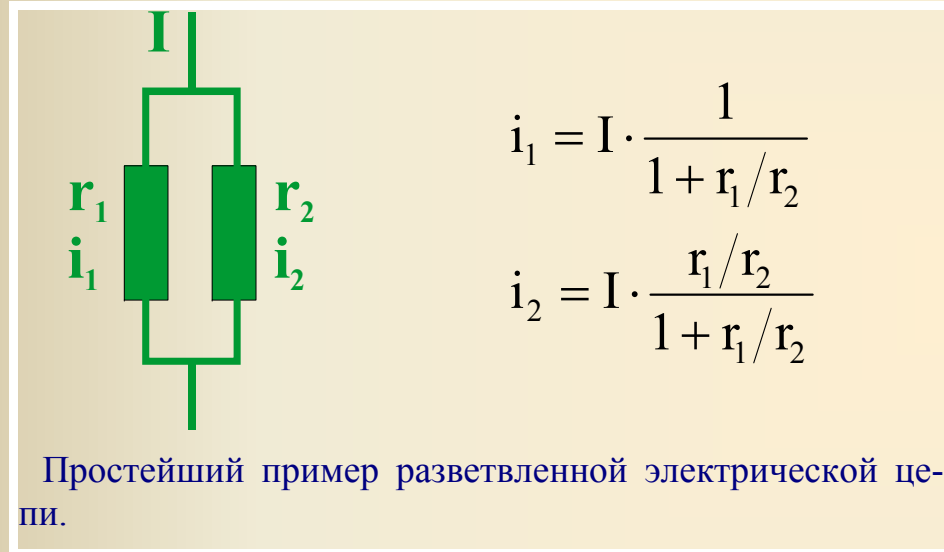
условиям», она требует очень тщательного исполнения, исключительной однородности газового потока, специальной защиты на случай контрагирования разряда и образования дуги.



Гораздо большую популярность получили системы накачки, основанные на секционированных электродах. Требования к точности исполнения здесь обычные, последствия контрагирования разряда и перехода в дуговой режим (при предельно высоких вкладах мощности в разряд) гораздо менее опасны, вследствие ограничения тока через секцию.

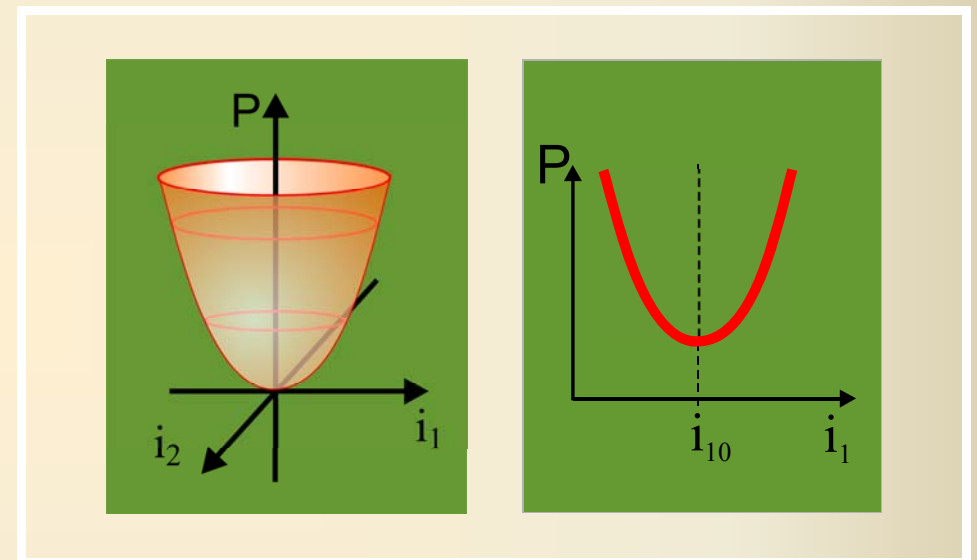
## ОСНОВЫ ТЕОРИИ

При разработке электродной системы с секционированными электродами возникает вопрос об оптимальной абсолютной величине активных балластных сопротивлений, подключенных к секциями катода. Распределение тока в разветвленной цепи, вычисленное по закону Кирхгофа, зависит лишь от относительной величины сопротивлений, а не от их абсолютных значений.



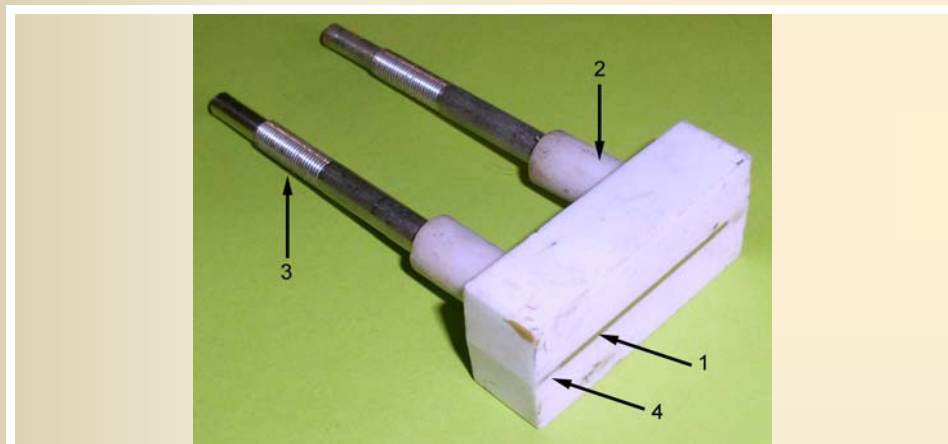
Интуитивно понятно, что слишком маленькие сопротивления не обеспечат стабильности разряда. При больших сопротивлениях потери в них будут недопустимо велики. Однако, возникает вопрос о формальном расчете устойчивости распределения токов в сложной разветвленной цепи.

Для таких расчетов нужно воспользоваться принципом минимума диссипации энергии. В применении к нашему простейшему примеру он звучит так: через сопротивления  $r_1$  и  $r_2$  устанавливаются токи  $i_{10}$  и  $i_{20}$  соответствующие минимальной энергии, диссипируемой в них. Функция диссипации энергии записывается в виде:  $P = r_1 \cdot i_1^2 + r_2 \cdot i_2^2$ . Ее вид показан на рисунке слева.



Решение, соответствующее минимуму функции  $P(i_1, i_2)$  и определяемое выражениями  $\partial P / \partial i_1 = 0$ ;  $\partial P / \partial i_2 = 0$ , тривиально, токи  $i_1$  и  $i_2$  равны нулю. Для получения нетривиального решения мы должны присоединить «необходимое условие связи»:  $i_1 + i_2 = I$ . Исключив, например,  $i_2$  получим  $P = r_1 \cdot i_1^2 + r_2 \cdot (I - i_1)^2$ . Вид функции  $P(i_1)$  на рисунке справа. Условие минимума  $dP/di_1 = 0$  дает распре-

деление токов, соответствующее закону Кирхгофа, а вторая производная -  $d^2P/di_1^2 = 2(r_1 + r_2)$  определяет кривизну функции  $P(i_1)$  в точке минимума и характеризует устойчивость распределения токов. Другое условие, равенство падений напряжений в ветвях, «необходимым» не является, оно не изменит полученного распределения токов. Если же его, все-таки, использовать, система оказывается «жестко определенной», не позволяя определить устойчивость системы при случайных отклонениях от вычисленных значений.



Катодный элемент мощного технологического  $CO_2$  лазера с поперечным разрядом и поперечной прокачкой газа (прототип). 1 - «ножевой» катод, 2 – керамика, 3 – трубки подвода и отвода охлаждающей воды, 4 – место концентрации термонапряжений и появления трещин.

Причина возможных отклонений токов от вычисленных значений не важна. Устойчивость распределения токов

характеризует «иммунитет» системы по отношению к любым внешним обстоятельствам, выводящим систему из равновесного состояния распределения токов. Совершенно ясно, что при увеличении абсолютных значений активных балластных сопротивлений устойчивость распределения токов увеличивается, но при этом растут и потери мощности в них.

В техническом решении, рассматриваемом в качестве прототипа, использовались специально разработанные катодные элементы (см. рисунок).

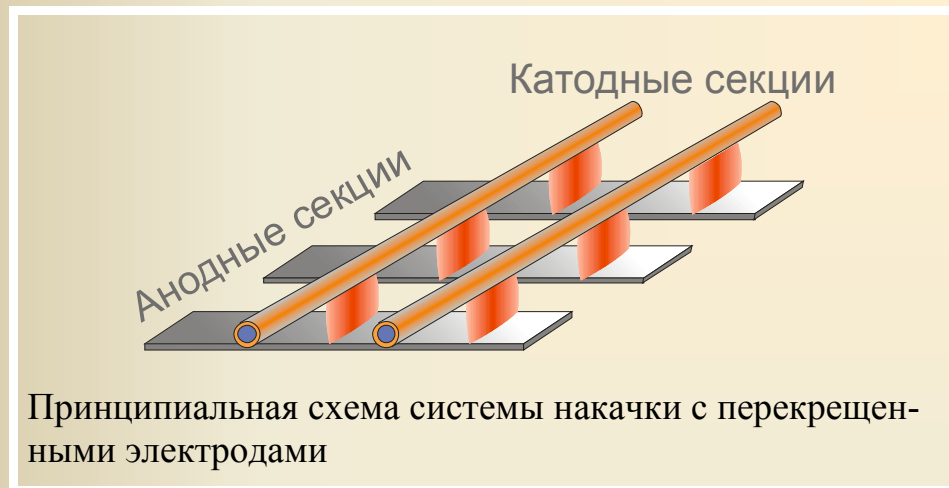
Потребность в разработке новой системы накачки была связана с большим количеством принципиальных технических недостатков прототипа, его сложностью и неэффективностью. Перечислим их, с тем, чтобы проследить за способами их устранения в новой системе накачки.

### Технические проблемы системы накачки прототипа

- ✓ Катодный элемент является сложным «трехмерным» металлокерамическим изделием. Он имеет «слабое место» (4), где, в результате концентрации термонапряжений, появляются трещины.
- ✓ В 5-кВт лазере используется более 300 таких катодных секций. При их монтаже надо обеспечить вакуумные уплотнения более 600 ножек. Нужно подвести воду не допустив течи в 600 соединениях.
- ✓ К катодным секциям электрически присоединяются 300 активных балластных сопротивлений. Потери мощности в них составляют 30 кВт, что составляет около 40% от подводимой мощности.

- ✓ Для отвода мощности от балластных сопротивлений используется масляная система охлаждения. Далее тепло передается воде, через теплообменник масло-вода.
- ✓ Один из электродов заземлен, в то время, как ко второму подводится высокое напряжение. Это недостаток, так как в альтернативном варианте заземляется средняя точка.
- ✓ Источник питания традиционный, с повышающим трансформатором на сетевой частоте 50 Гц. Такое решение (без использования промежуточной высокой частоты) приводит к большим габаритам и весу источника питания.

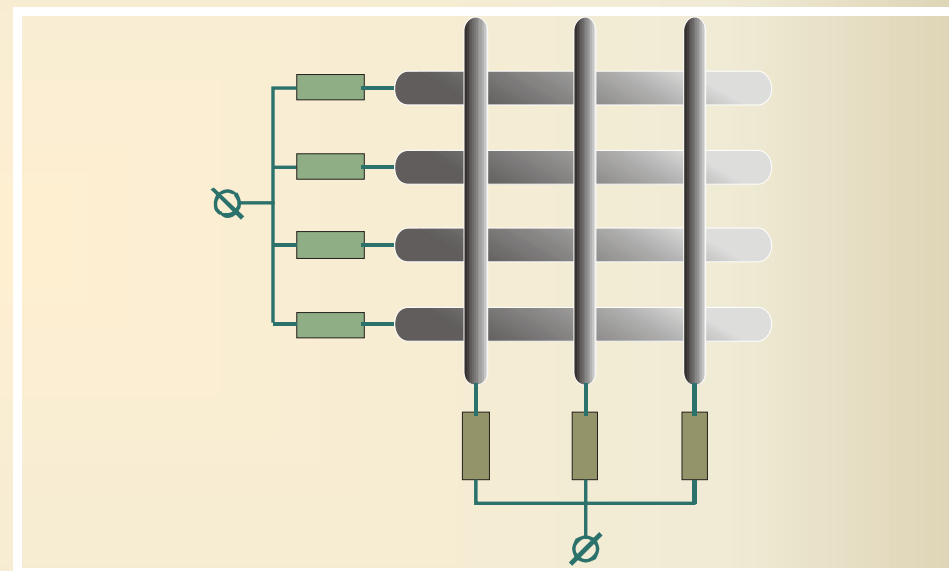
### Электродная система с перекрещенными электродами



В чисто техническом смысле электродная система с перекрещенными электродами выглядит весьма привлекательной. В этом случае секционированными выполняются

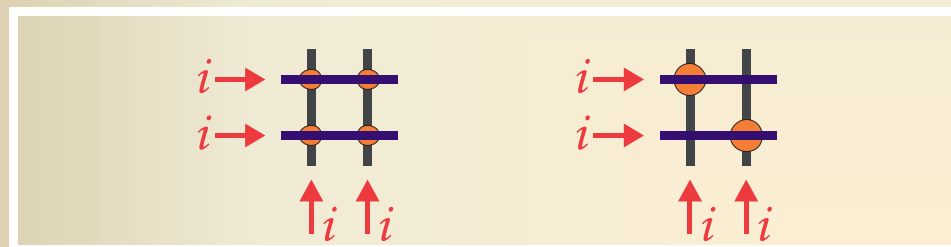
и анод и катод, секции являются протяженными, разряд горит в перекрестьях катодных и анодных секций. Для организации того же количества разрядов (~300) требуется на порядок меньшее число секций. Надо, однако, ответить на два вопроса, типичных для секционированных разрядов:

- Каково распределение токов по перекрестьям?
- Какова устойчивость этого распределения?

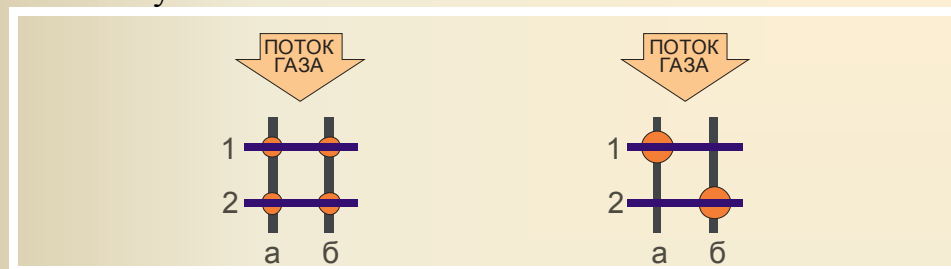


На первый взгляд такая электродная система не может обеспечить высокой устойчивости распределения токов по перекрестьям. Действительно, в приведенном на рисунке примере всего 7 активных сопротивлений, включенных в секции электродов, не могут эффективно стабилизировать разряд в 12 перекрестьях, вне зависимости от

величины этих сопротивлений. Даже в простейшей системе электродов из двух пар секций, при их питании от источников тока с бесконечным внутренним сопротивлением может наблюдаться не только равномерное распределение токов по перекрестьям (слева), но и неравномерное, как показано на рисунке справа.



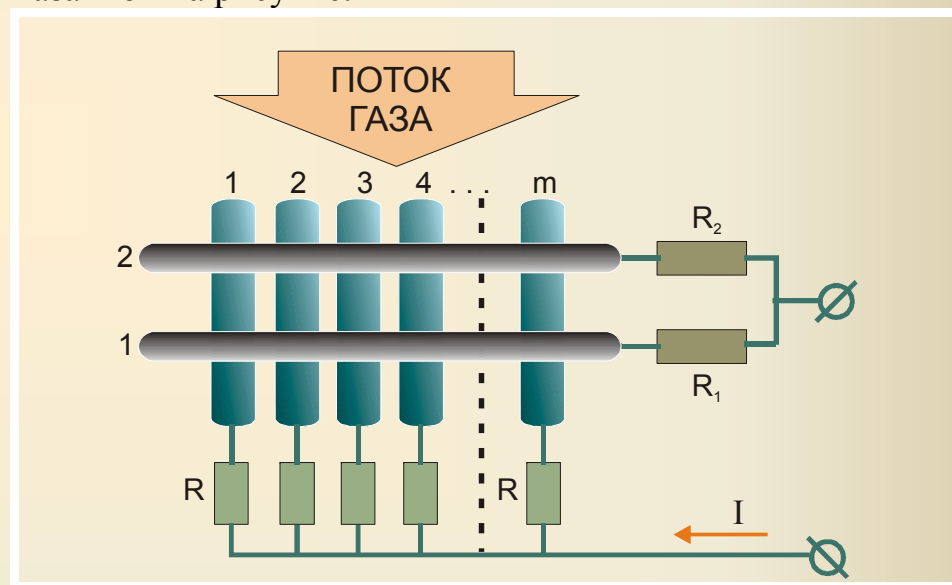
Однако, обратная отрицательная связь, препятствующая неоднородному распределению токов по перекрестьям, все-таки есть, и связана она с влиянием разрядов, находящихся вверх по потоку на разряды, расположенные ниже по потоку газа.



При ожидаемом однородном распределении токов, показанном слева, разряды 1а и 1б будут влиять на разряды 2а и 2б соответственно. Основные факторы влияния – предионизация и нагрев газа. Оба эти фактора приводят к некоторому снижению напряжения на разрядах 2а и 2б.

Если же распределение токов станет неоднородным (справа), то перекрестие 2а будет получать «двойную поддержку», что способствует поджигу разряда здесь. Ток через перекрестие 2б больше, чем при равномерном распределении, но он вообще лишился «поддержки» со стороны разряда 1б (ток там отсутствует). Оба эти фактора стремятся вернуть систему к состоянию равномерного распределения токов (слева).

Эти качественные соображения можно перевести на язык строгой теории. Расчеты проводились для схемы, показанной на рисунке.



Для анализа работы этой схемы применим принцип минимума диссипации энергии. Напомним, что теория должна ответить на два вопроса:

- Распределение токов в такой системе,

- Устойчивость этого распределения токов.

Физический смысл устойчивости (вторая производная от функции диссипации по токам) - это «эффективное сопротивление» с которым система будет реагировать на отклонения токов от стационарного значения. Величина «эффективного сопротивления» будет определяться не только реальными активными балластниками, включенными в цепи секций, но и особенностями построения электродной системы, влиянием одних разрядов на другие. Функция диссипации включает четыре группы слагаемых:  $P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$ .

- ✓ Диссипация энергии в разрядах верхнего по потоку газа ряда:  $P_1 = \sum_{k=1}^m u_{1k} i_{1k} = \sum_{k=1}^m (u_0 + r_{i_{1k}}) i_{1k}$ . Линейное представление вольтамперной характеристики разряда вполне оправдано при рассмотрении небольших отклонений от рабочей точки.
- ✓ Диссипация энергии в разрядах нижнего по потоку газа ряда:  $P_2 = \sum_{k=1}^m u_{2k} i_{2k} = \sum_{k=1}^m (u_{0k} + r_{i_{2k}}) i_{2k}$ . Влияние верхних по потоку разрядов на нижние представляется в виде:  $u_{0k} = u_0 (1 - \alpha \cdot u_{1k} i_{1k})$ . Такая запись в линейном приближении отражает экспериментально наблюдаемый факт, что энерговыделение в разряде с индексами 1k приводит к снижению напряжения горения разряда с индексами 2k. Параметр этого влияния обозначен как  $\alpha$ , он легко определяется из экспериментов.

- ✓ Диссипация энергии в активных балластных сопротивлениях R:  $P_3 = R \sum_{k=1}^m (i_{1k} + i_{2k})^2$ .

- ✓ Диссипация энергии в активных балластных сопротивлениях  $R_1$  и  $R_2$ :  $P_4 = R_1 \left( \sum_{k=1}^m i_{1k} \right)^2 + R_2 \left( \sum_{k=1}^m i_{2k} \right)^2$ .

Далее возникает вопрос о «необходимых условиях связи», вместе с которыми надо решать задачу. «Условия связи» - это  $2m$  соотношений между токами, вытекающими из известных законов Кирхгофа для разветвленных цепей:

$$I = \sum_{k=1}^m (i_{1k} + i_{2k}) \quad (1)$$

$$u_{1k} - u_{2k} + u_{R_1} - u_{R_2} = 0; \quad k = 1, 2, 3 \dots m \quad (2)$$

$$u_{11} - u_{1k} + u_{1R} - u_{kR} = 0; \quad k = 2, 3, 4 \dots m \quad (3)$$

$u_{R_1}$  и  $u_{R_2}$  - падения напряжений на сопротивлениях  $R_1$  и  $R_2$ .

$u_{kR}$  - падение напряжение на сопротивлении  $R_1$  в k-секции.

$u_{1R}$  - падение напряжение  $u_{kR}$  при  $k=1$ .

Если мы используем все эти соотношения, система окажется «жестко определенной». Такой метод расчета распределения токов не дает никакой информации об устойчивости распределения токов. Однако не все из упомянутых выше «условий связи» являются «необходимыми», с точки зрения присоединения к функции диссипации энергии. «Необходимыми» являются лишь те, которые определяющим образом влияют на распределение токов. Типичный пример – условие ненулевого общего тока (1). При

$\alpha=0$  это единственное «необходимое условие связи». Однако, учет влияния верхних по потоку разрядов на нижние по потоку разряды приводит к необходимости включения в рассмотрение также условий (2).

Условия (3) не являются «необходимыми» с точки зрения рассмотрения задачи таким методом, поскольку их подключение не изменяет распределения токов.

Распределение токов, отвечающее условному минимуму функции  $P(i_{1k}, i_{2k})$ , с учетом условий (1) и (2), может быть найдено методом неопределенных лагранжевых коэффициентов. Решение не зависит от индекса  $k$ .

$$i_1 = i_{1k} = \frac{1}{m} \frac{M}{M+N}; \quad i_2 = i_{2k} = \frac{1}{m} \frac{N}{M+N} \quad (4)$$

$$M = 1 + mR_2/r; \quad N = 1 + \beta + mR_1/r; \quad \beta = \alpha u_0^2/r$$

После подстановки  $i_{1k} = i_1 + \Delta i_{1k}$ ;  $i_{2k} = i_2 + \Delta i_{2k}$  «необходимые условия связи» (1) и (2) принимают вид:

$$\sum_{k=1}^m \Delta i_{1k} = 0; \quad \sum_{k=1}^m \Delta i_{2k} = 0; \quad \Delta i_{2k} = (1 + \beta) \Delta i_{1k} \quad (5)$$

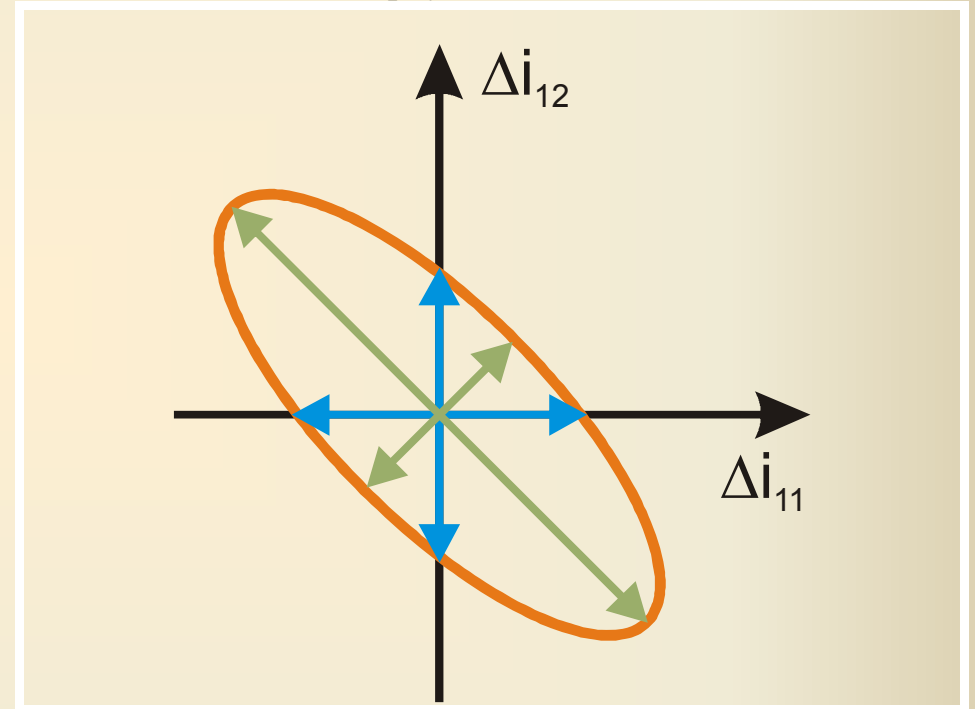
Сделав эту же подстановку в  $P(i_{1k}, i_{2k})$  и сократив число независимых переменных согласно (5) приходим к следующему выражению:

$$P = P_d + P_b + 2 \left[ R(2 + \beta)^2 + r(2 + \beta) \right] \sum_{k=1}^{m-1} \sum_{j=1}^{m-1} \xi_{kj} \Delta i_{1k} \Delta i_{1j}. \quad (6)$$

Здесь  $P_d$  и  $P_b$  – мощность, рассеиваемая в разрядах и балластных сопротивлениях при токах в разрядах, определяемых формулами (4).  $\xi_{kj} = \begin{cases} 1 & k = j \\ 0.5 & k \neq j \end{cases}$

Последний член в выражении (6) представляет собой квадратичную форму «общего вида». Ее свойства поясним на простейшем примере только двух независимых переменных ( $m=3$ ):  $F = \sum_{k=1}^{m-1} \sum_{j=1}^{m-1} \xi_{kj} \Delta i_{1k} \Delta i_{1j} = \Delta i_{11}^2 + \Delta i_{11} \Delta i_{12} + \Delta i_{12}^2$

Легко убедиться, что при  $F = \text{Const.}$  в координатах  $\Delta i_{11}, \Delta i_{12}$  мы имеем эллипс, повернутый на  $45^\circ$  к осям.



Физическая логика здесь следующая. Под флуктуацией тока, устойчивости к которой мы исследуем, надо понимать любую линейную комбинацию из независимых переменных  $\Delta i_{11}, \Delta i_{12}$ . Если, например, изменяется один ток,



$\Delta i_{11}$ , или  $\Delta i_{12}$ , вторая производная берется по одному из направлений, показанных синими стрелками. Мы имеем определенную кривизну функции  $F$ , характеризующую устойчивость распределения токов к флуктуациям тока именно такого рода.

По отношению к флуктуациям, представляющим одновременное и равное изменение обоих токов  $\Delta i_{11}, \Delta i_{12}$  устойчивость распределения токов максимальна. Если  $\Delta i_{11}, \Delta i_{12}$  равны, но противоположны по знаку, устойчивость минимальна (зеленые стрелки).

Логика дальнейших вычислений понятна из рисунка. Необходимо повернуть систему координат, направив новые координатные оси вдоль осей эллипса. Тогда, из матрицы преобразований координат будет ясен вид флуктуаций, к которым система наиболее чувствительна. Устойчивость системы именно к этим флуктуациям будет характеризовать устойчивость распределения токов в целом.

Математическая технология дальнейшей работы с выражением (6) включает вычисление собственных значений матрицы вторых производных функции  $P$  по флуктуациям токов  $\lambda_k$ , нахождение собственных векторов, их ортогонализацию, составление единичной матрицы преобразований координат  $\Delta i_{ik}$  в координаты  $\delta_k$ , осуществляющую диагонализацию квадратичной формы.

После такого преобразования в каноническом виде выражение (6) имеет вид:

$$P = P_d + P_b + 2 \left[ R(2 + \beta)^2 + r(2 + \beta) \right] \sum_{k=1}^{m-1} \lambda_k \delta_k$$

$$\lambda_1 = m; \lambda_k = 1 \quad (k = 2, 3, \dots, m-1)$$

Устойчивость распределения токов по отношению к флуктуациям произвольного типа имеет максимальное и минимальное значение, соответствующее двум значениям  $\lambda_k$ :

$$2 \left[ R(2 + \beta)^2 + r(2 + \beta) \right] < R_p < 2m \left[ R(2 + \beta)^2 + r(2 + \beta) \right]$$

Устойчивость системы в целом должна оцениваться по минимальному значению  $R_p$ .

$$R_p = 2 \left[ R(2 + \beta)^2 + r(2 + \beta) \right] \quad (7)$$

Можно вывести формулу, определяющую  $\beta$  через параметры разряда:

$$\beta = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{(E/p)^2 p \cdot d}{r_0 \cdot V}$$

Здесь  $\gamma$  - постоянная адиабаты,  $E$  - напряженность электрического поля,  $p$  - давление газа,  $d$  - межэлектродный зазор,  $r_0$  - дифференциальное сопротивление разряда, нормированное на единицу длины разряда,  $V$  - скорость потока газа. Для типичных значений:  $E/p=15$  В/см·Торр,  $\gamma=1.4$ ,  $pd=120$  см·Торр,  $V=100$  м/с,  $r_0=50$  Ом·м, получаем  $\beta=1.15$ .

Общий вывод проведенных расчетов таков, что устойчивость распределения токов по перекрестьям высока и

система перекрещенных электродов имеет большое практическое значение.

## БЕЗБАЛЛАСТНАЯ СИСТЕМА НАКАЧКИ ЛАЗЕРА С ПЕРЕКРЕЩЕННЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Резкое снижение числа секций электродов позволило создать безбалластную систему питания секционированных электродов постоянным током.

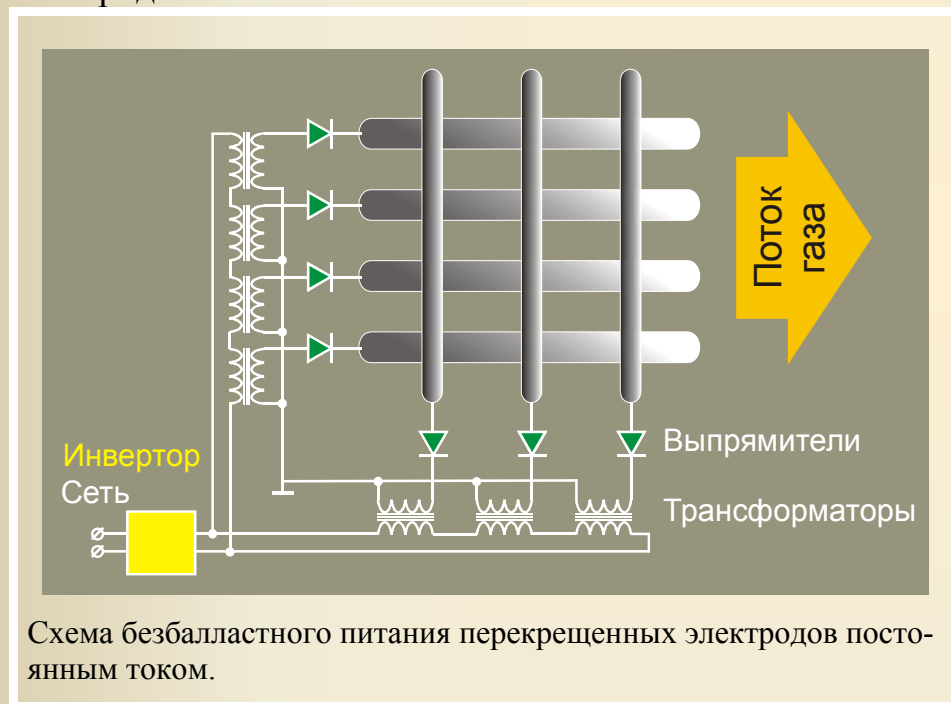


Схема безбалластного питания перекрещенных электродов постоянным током.

Инвертор преобразует низкую частоту сети (50 Гц) в высокую. В наших экспериментах на выходе инвертора была частота 5 кГц (можно использовать и выше). Далее

по схеме применяется группа повышающих трансформаторов по числу секций электродов. Их габариты (для частоты 5 кГц) гораздо меньше, чем для сетевой частоты. Особая схема включения трансформаторов обеспечивает строго одинаковую величину тока в одноименных секциях (анодных, или катодных), поскольку по первичным обмоткам трансформаторов секции включены последовательно. Это эквивалентно питанию секций источниками тока с очень высоким внутренним сопротивлением  $R \rightarrow \infty$ .

Что касается распределения тока по перекрестьям (4), то устойчивость этого распределения зависит и от  $R$  (7), то есть, также очень высока,  $R_p \rightarrow \infty$ .

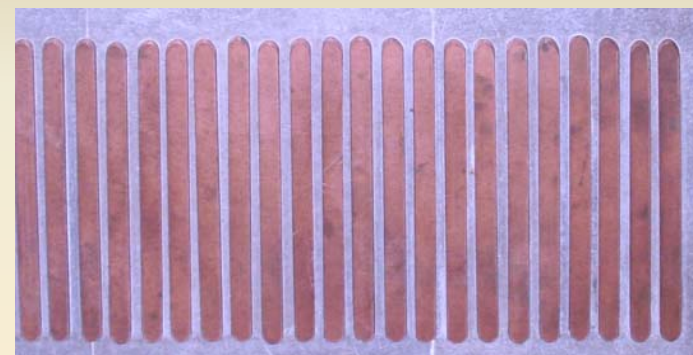
### Преимущества предложенной системы накачки по сравнению с прототипом (стр.4-5)

- ✓ Электродные элементы просты по конструкции.
- ✓ В 5-кВт лазере суммарное количество секций электродов около 30. Нет технических проблем с монтажом электродов.
- ✓ Нет активных балластных сопротивлений и потерь мощности, связанных с ними.
- ✓ Нет сложной системы охлаждения балластников (масло-вода). Расход охлаждающей воды гораздо ниже.
- ✓ Схема питания имеет среднюю заземленную точку, что снижает напряжение на электродах, понижает эксплуатационные требования к схеме питания.
- ✓ Весогабаритные характеристики источника питания при использовании инвертора гораздо лучше.

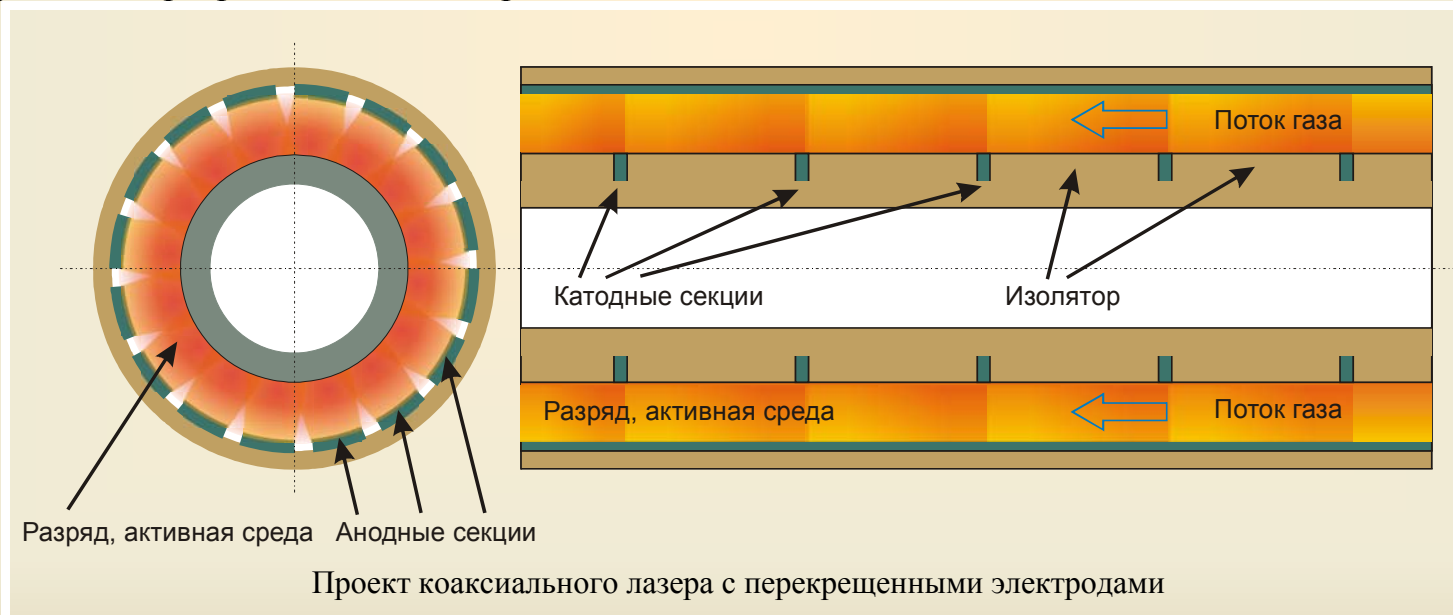
Удельный вклад энергии в разряд определяется «внутренними» свойствами разряда постоянного тока, протекающего через одну секцию, типичная величина  $2 \text{ Вт/см}^3$  и ограничивается контракцией. Разработанная система накачки позволяет сохранить, поддерживать этот параметр и при накачке больших объемов активной среды. Найденные технические решения для решения этой задачи эффективны и рациональны.

Все решения были экспериментально проверены на технологическом  $\text{CO}_2$  лазере выходной мощностью 5 кВт.

На рисунках показана конструкция анодной платы и проект мощного лазера с поперечной прокачкой, коаксиальной конструкции с перекрещенными электродами

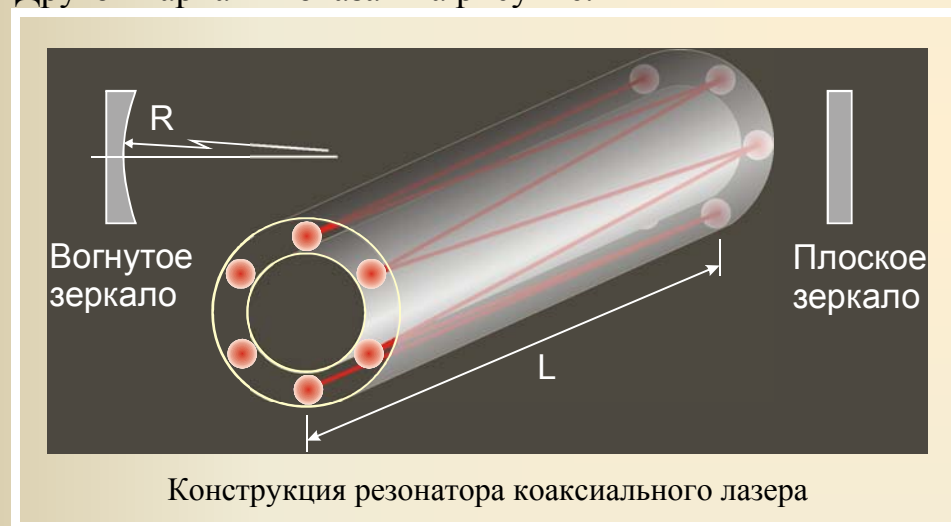


Конструкция секционированного анода



Оценим размеры газоразрядной камеры для лазера такой конструкции с выходной мощностью 50 кВт. Пусть вкладываемая мощность 500 кВт, тогда при удельном вкладе 2 кВт/л, требуемый объем активной среды 250 литров. Пусть межэлектродный зазор 5 см, а длина камеры 4 м. Диаметр кольца активной среды равен 40 см.

Практический опыт по конструкции резонатора при такой форме активной среды уже имеется. Компания Trumpf выпускает целевой лазер коаксиальной конструкции. Другой вариант показан на рисунке.



### Основные публикации по теме презентации

1. Низьев В.Г., Кортунов В.Н., Новодворский О.А., Сагдеев Р.Я. Принципы построения секционированных электродных систем. Газоразрядный CO<sub>2</sub>-лазер с новой системой накачки. Препринт НИЦТЛ. Шатура: НИЦТЛ, 1991, 77, 43 с.
2. Niziev V.G., Panchenko V.Ya. Rational pumping system for high-power industrial CO<sub>2</sub> laser. Proceeding of Int.Conf. USA SPIE, v.2987, p.216-226, (1997).
3. Niziev V.G., Kortunov V.N., Novodvorsky O.A., Sagdeev R.Ya. Gas Discharge CO<sub>2</sub> Laser with New Pumping System. Plasma Devices and Operations, 1992, 5, p.89-98.

Презентация выполнена:  
В.Г. Низьевым  
[www.laser.ru/personal/niziev](http://www.laser.ru/personal/niziev)  
[niziev@mail.ru](mailto:niziev@mail.ru)



*Тундра  
зимой*



*Узбекистан  
летом*