

04

© 1991 г.

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ И ЛОКАЛИЗАЦИЯ НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНОГО РАЗРЯДА С ПОМОЩЬЮ СПИРАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ

М. Ф. Данилов, Е. А. Зобов, А. Н. Малинин, Ю. П. Никонов

Экспериментально показана возможность повышения устойчивости и локализации разряда электроионизационного лазера за счет использования конструкции электродов в виде плоских спиральных элементов. Разработана математическая модель и выполнены расчеты потенциала анода, обладающего распределенной индуктивностью.

Постановка задачи

Исследования свойств несамостоятельного газового разряда, поддерживаемого пучком быстрых электронов, играют важную роль для повышения эффективности электроионизационных лазеров (ЭИЛ). Локализация разряда в заданном объеме, достижение более высокой степени однородности и повышение

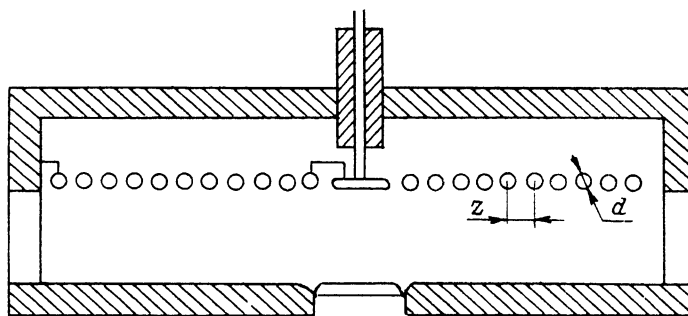


Рис. 1. Схема разрядного устройства.

устойчивости разряда относятся к наиболее актуальным задачам, решаемым при разработке систем накачки газовых лазеров. Для оптимизации параметров разряда наряду с другими мерами широко используются различные усовершенствования конструкции газоразрядной камеры и электродной системы. Локализация разряда ЭИЛ осуществляется, например, за счет воздействия на быстрые электроны пучка аксиального магнитного поля [1] или при помощи резистивного анода [2]. Проблемы устойчивости и однородности объемного разряда решаются с помощью секционированных [3, 4] и специальным образом профилированных [5] электродов.

В данной работе экспериментально показана возможность повышения устойчивости и локализации разряда ЭИЛ за счет использования конструкции электродов в виде плоских спиральных элементов. Для исследования влияния конструктивных параметров электрода на его работу и последующей их оптимизации была разработана математическая модель и выполнены расчеты потенциала спирального анода.

Как известно, развитие неустойчивости разряда начинается с роста шнуров от электрода (как правило, от катода) и заканчивается пробоем разрядного промежутка по одному из них. Причем существенную роль здесь играет конструкция электродов, определяющая электродинамические неоднородности, связанные со сгущением линий тока на краях электродов [8]. Эту причину в значительной степени можно устранить, заменив внешнюю часть электродов на спиральные элементы, как показано на рис. 1. Тогда в течение переднего фронта импульса тока, когда $dI/dt > 0$ и $dU/dt > 0$, в спиральной части анода, обладающей индуктивностью, будет действовать эдс электромагнитной индукции, которая приведет к падению потенциала вдоль витков спирали в направлении от центра к краю. В спиральной части катода соответственно появится разность потенциалов обратного знака. Это должно привести к уменьшению напряженности электрического поля во внешней части системы электродов со спиральными элементами по сравнению с аналогичной величиной для сплошных электродов. Дополнительное падение потенциала, которое будет способствовать однородности и устойчивости разряда, можно получить, если спираль будет сделана из материала с большим удельным сопротивлением, например из нихрома. На заднем фронте импульса тока, когда $dI/dt < 0$, наличие индуктивности вызовет обратный эффект, который, однако, уже не сможет оказать

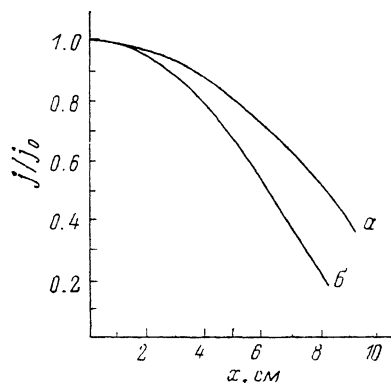


Рис. 2. Распределение интенсивности свечения разряда в поперечном направлении.

а — сплошной анод, б — спиральный.

существенного влияния на развитие разряда и вклад энергии в активную среду. Кроме перечисленных обстоятельств, влияющих на устойчивость разряда, необходимо отметить то, что спиральный элемент служит также индуктивной развязкой, препятствующей стягиванию тока в шнур с участков электрода большой площади.

Необходимость локализации разряда ЭИЛ обусловлена тем, что рассеяние быстрых электронов на фольге выходного окна ускорителя электронов приводит к значительному увеличению области ионизации по сравнению с размерами выходного окна ускорителя и неоднородному вкладу энергии в межэлектродном зазоре. Вследствие этого в объеме разрядной камеры, охваченном генерируемым излучением, выделяется лишь 60—70 % энергии, вкладываемой в разряд [2]. Можно ожидать, что уменьшение напряженности электрического поля вблизи кромки электродов приведет к ослаблению газоразрядных процессов, протекающих за пределами объема, ограниченного размерами электродов, т. е. локализации разряда.

Экспериментальные исследования

Эксперименты по исследованию макета спирального электрода проводились с использованием электронной пушки с выходным окном 10×10 см. Импульсный электронный пучок с энергией 180 кэВ поступал в разрядный промежуток длиной 10 см через катодную решетку, состоящую из стержней диаметром 2 мм, расположенных параллельно с шагом 20 мм. Разряд формировался в смеси газов $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 2 : 3$, типичной для ЭИЛ при атмосферном давлении. Напряжение на электроды подавалось от линейного импульсного модулятора с длительностью импульса 25 мкс. Путем фотографирования разряда (на один кадр снималось 5—10 импульсов) с последующим фотометрированием на расстоянии 25 мм от поверхности анода были получены зависимости распределения свечения разряда в поперечном направлении для случая плоского анода и спирального анода, имеющего сплошную центральную часть диаметром 85 мм и периферийную часть из медного провода диаметром 1.5 мм, расположенного на ди-

электрической плоскости в виде спирали с шагом 2.5 мм вокруг центральной части. Внешний диаметр обоих электродов составлял 400 мм. На рис. 2 приведены результаты фотометрирования для этих двух электродов, из которых видно, что ширина свечения разряда в случае со спиральным электродом на 15—20 % меньше, чем со сплошным, причем спад интенсивности свечения, а следовательно, и плотности тока на краю разряда в случае спирального электрода происходит быстрее. Результаты получены при напряжении 35 кВ. При этом ток разряда для сплошного анода составил 0.6 кА, для спирального — 0.55 кА.

В разрядных устройствах с потоком газа через разрядный промежуток в целях формирования однородного по скорости и плотности потока газа в разрядной зоне необходимо исключить «карманы» между электродами и стенками газохода, т. е. необходимы стенки, являющиеся продолжением электродов. приме-

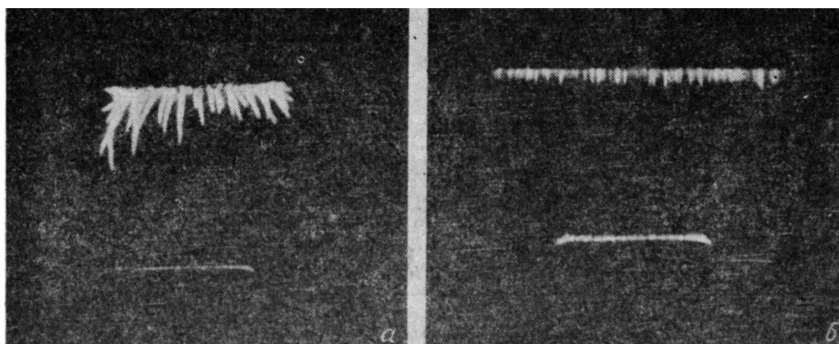


Рис. 3. Фотографии разряда.

нение для этих целей диэлектрических материалов приводит к возникновению больших градиентов электрического поля на границе металл—диэлектрик. На поверхности диэлектрика появляются токи, связанные с зарядом поверхности под действием электронного пучка, что приводит к снижению предельных энерговкладов. На рис. 3 приведены фотографии разряда для металлического электрода, продолженного оргстеклом (а) и для электрода со спиральной периферийной частью (б), полученные при напряжении 40 кВ. Видно, что длина стримеров приблизительно одинакова по всей рабочей площади спирального электрода, что подтверждает достаточно плавное распределение напряженности электрического поля, в то время как для электрода с диэлектрическим продолжением их длина значительно больше и очень непостоянна. При этом пробойное напряжение для электрода с оргстеклом составляет 43 кВ, а для спирального — 48 кВ (пробой в конце импульса).

Для выбора оптимальной конструкции газоразрядной камеры с учетом перечисленных выше особенностей работы ЭИЛ была проведена серия экспериментов с различными конструкциями спиральных электродов. Изменялись форма и размеры электродов, число витков спирали, материал и форма поперечного сечения провода спирали и т. д. В частности, при увеличении размеров витка спирали были зарегистрированы межвитковые пробои, нарушающие работу спирального электрода. Чтобы избавиться от этого недостатка и одновременно удовлетворить ряду других требований, необходимо оценить влияние большого числа конструктивных параметров электрода. Для этого была разработана математическая модель, учитывающая индуктивные, емкостные характеристики и сопротивление спирали электрода в процессе формирования его потенциала.

Математическая модель спирального анода

Рассмотрим уравнения, описывающие процесс протекания переменного тока в спиральном аноде, обладающем распределенной индуктивностью. Первое уравнение — это закон Ома для участка цепи с эдс электромагнитной индукции

$$\int_0^{s_{\max}} M(s, \bar{s}) \frac{\partial I(t, \bar{s})}{\partial t} d\bar{s} = - \frac{\partial V(t, s)}{\partial s} - r_s \cdot I(t, s), \quad (1)$$

где $I(t, s)$, $V(t, s)$ — величины тока и потенциала соответственно; s — криволинейная координата, отсчитываемая вдоль оси провода от одного из его концов; t — время; $M(s, \bar{s})$ — взаимная индуктивность двух элементов тока с координатами s и \bar{s} ; r_s — погонное сопротивление провода.

Второе уравнение следует из выражения для потенциала электрического поля, создаваемого зарядом, распределенным вдоль витков спирали

$$\frac{\partial V(t, s)}{\partial t} = \int_0^{s_{\max}} P(s, \bar{s}) \frac{\partial \rho(t, \bar{s})}{\partial t} d\bar{s}, \quad (2)$$

здесь $P(s, \bar{s})$ — потенциал в точке s , создаваемый единичным точечным зарядом, находящимся в точке \bar{s} ; $\rho(t, s)$ — линейная плотность электрического заряда.

И третье — уравнение непрерывности

$$\frac{\partial \rho(t, s)}{\partial t} + \frac{\partial I(t, s)}{\partial s} - I_s(t, s) + \frac{V(t, s)}{r_k} + \text{div}_A \left(\frac{\Delta V(t, s)}{r_p} \right) = 0, \quad (3)$$

где $I_s(t, s)$ — линейная плотность тока, подводимого от источника питания (в частном случае, который будет рассматриваться в дальнейшем, $I_s(t, s) = I_0(t) \cdot \delta(s)$, где $\delta(s)$ — дельта-функция Дирака); r_k и $V(t, s)/r_k$ — сопротивление и ток столба разряда, опирающегося на участок спирали единичной длины; r_p , $\Delta V(t, s)/r_p$ — сопротивление и ток утечки между двумя участками соседних витков единичной длины.

В этом уравнении предполагается, что потенциал катода равен нулю.

В дальнейшем будем использовать в качестве дивергенции межвиткового тока утечки ее разностный аналог

$$\text{div}_A \left(\frac{\Delta V(t, s)}{r_p} \right) \equiv \frac{V(t, s+L) - 2 \cdot V(t, s) + V(t, s-L)}{r_p},$$

где L — длина витка спирали.

Подставляя (3) в (2), получим

$$\frac{\partial V(t, s)}{\partial t} = \int_0^{s_{\max}} P(s, \bar{s}) \left[I_s(t, \bar{s}) - \frac{\partial I(t, \bar{s})}{\partial s} - \frac{V(t, \bar{s})}{r_k} - \text{div}_A \left(\frac{\Delta V(t, \bar{s})}{r_p} \right) \right] d\bar{s}. \quad (4)$$

Уравнения (1) и (4) образуют систему интегродифференциальных уравнений в частных производных для тока и потенциала, описывающих электротехническую систему с распределенными параметрами. Решить ее даже численными методами чрезвычайно трудно, это потребует больших затрат машинного времени. Поэтому введем необходимые упрощения. Примем $M(s, \bar{s}) = M(s - \bar{s})$ и $P(s, \bar{s}) = P(s - \bar{s})$, что эквивалентно замене спирального электрода на винтовой (соленоидальный), который имеет постоянную длину витка, т. е. $L \neq L(s)$. Это условие дополним заменой конечного интервала интегрирования $[0, s_{\max}]$ на бесконечный $(-\infty, \infty)$, т. е. будем рассматривать винтовую линию бесконечной длины. Тогда из (1) и (4) получим систему уравнений

$$\int_{-\infty}^{\infty} M(s - \bar{s}) \frac{\partial I(t, \bar{s})}{\partial t} d\bar{s} = - \frac{\partial V(t, s)}{\partial s} - r_s \cdot I(t, s), \quad (5)$$

$$\frac{\partial V(t, s)}{\partial t} = \int_{-\infty}^{\infty} P(s - \bar{s}) \left[I_s(t, \bar{s}) - \frac{\partial I(t, \bar{s})}{\partial s} - \frac{V(t, \bar{s})}{r_k} - \text{div}_A \left(\frac{\Delta V(t, \bar{s})}{r_p} \right) \right] d\bar{s}. \quad (6)$$

Эта система уравнений была решена численно с использованием метода интегральных преобразований [7]. Применяя двойное дискретное преобразование Фурье [8] по времени t и координате s , получим уравнения для спектров функ-

ций $I(t, s)$ и $V(t, s)$. Решая эти уравнения и применяя обратное преобразование Фурье, получим периодические по t и s решения уравнений (5), (6). Периодичность решений обусловлена свойствами дискретного преобразования Фурье и предполагает периодичность функции $I_s(t, s)$ по времени и координате.

Модель винтового анода (5), (6), являющегося аналогом спирального элемента в реальной конструкции, позволяет исследовать влияние индуктивности, тока разряда и межвитковых токов утечки на формирование потенциала электрода. Отличия винтового анода от спирального заключаются в следующем. Во-первых, спиральный анод имеет витки переменного радиуса, винтовой — постоянный радиус витков. Во-вторых, в спиральном аноде при подводе напряжения к центральной точке спирали ток в спирали протекает в одном направлении, например от центра к краю. В винтовом ток протекает в противоположных

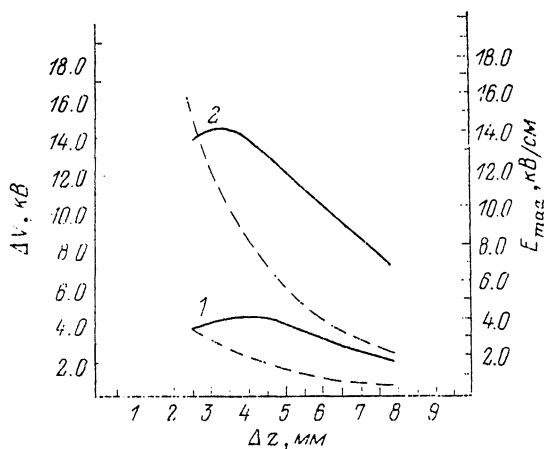


Рис. 4. Зависимости разности потенциалов и напряженности электрического поля от расстояния между витками.

направлениях от точек подвода напряжения (здесь подразумевается периодичность функции $I_s(t, s)$ по координате s). Применение модели (5), (6) для исследования процессов в спиральном аноде оправдано тем, что приведенные выше отличия могут частично компенсировать друг друга. Влияние токов противоположного направления в витках, примыкающих к точкам подвода напряжения в винтовом аноде, эквивалентно уменьшению индуктивности этих витков, что в свою очередь можно трактовать как уменьшение радиуса витков. Таким образом, можно выбрать радиус витка винтового электрода такой величины, чтобы эквивалентная индуктивность первых витков, примыкающих к точкам подвода напряжения, была равна индуктивности первого витка спирального электрода. Покажем это на примере электрода, изготовленного из провода, радиус которого r много меньше радиуса витка R . Используя выражение для собственной индуктивности и взаимной индуктивности двух круговых витков [9], получим

$$R_b \approx \frac{\ln \frac{R}{r} + 0.33}{\ln \frac{\Delta z}{r} + 0.25} R_1,$$

где Δz — шаг между витками.

Затем, подставляя в эту формулу значения параметров макета спирального анода, приведенные выше, получим $R_b \approx 12.7 \text{ см} \approx 3 \cdot R_1$, что приблизительно совпадает со средним радиусом витков спирального электрода $R_{cp} \approx 12 \text{ см}$.

Расчеты проводились для проводов круглого и прямоугольного сечения. Конструктивные параметры спирали — размеры и форма сечения провода, радиус и шаг витка, материал провода учитывались при расчете функций $M(s - \bar{s})$, $P(s - \bar{s})$, значений сопротивлений r_s , r_k , r_v . Величина удельного сопротивления среды принималась всюду одинаковой и использовалась для оценки сопротивлений r_k и r_v .

Решения уравнений (5), (6) имеют монотонную зависимость от координаты z на отрезке $[0, S_{\max}]$. соответствующем одному пространственному периоду, поэтому в дальнейшем будем рассматривать разность потенциалов $\Delta V = V(0) - V(S_{\max})$, которая может служить одной из характеристик работы спирального элемента. При превышении пороговой величины средней напряженности поля $E_0 \approx 4$ кВ/см развиваются процессы пробоя. Поэтому в качестве другой характеристики выберем максимальную величину тангенциальной составляющей напряженности электрического поля, возникающей вследствие появления разности потенциалов на участках соседних витков. Величину поля при этом можно оценить по формуле

$$E_{\max} = (V_i - V_{i+1})_{\max} / (\Delta z - d),$$

где V_i, V_{i+1} — значения потенциалов в наиболее близко расположенных точках двух соседних витков; d — диаметр провода.

На рис. 4 представлена зависимость разности потенциалов ΔV и максимального значения тангенциальной составляющей напряженности поля E_{\max} от шага между витками Δz . Расчеты выполнены для следующих значений параметров электрода: радиус витка $R_b = 35$ см, спираль изготовлена из нихромовой ленты толщиной 1 мм, шириной $l = 2-10$ мм и так, что широкой стороной витки обращены друг к другу. Максимальная величина импульса тока, приходящегося на спиральную часть электрода, равна 500 А, длительность переднего фронта импульса тока 4 мкс. Кривая 1 получена для $l = 10$ мм, кривая 2 — для $l = 2$ мм. Зависимости получены для максимального значения dI/dt на переднем фронте импульса тока при условии постоянства пространственного периода модели анода вдоль оси z , т. е. число витков, приходящихся на один период, изменяется обратно пропорционально межвитковому расстоянию $N = Z_0 / \Delta z$. Это необходимо, чтобы обеспечить соответствие между реальной конструкцией электрода и моделью.

Как видно, функция $\Delta V(\Delta z)$ при заданных значениях конструктивных параметров имеет максимум в точке $\Delta z \approx 4$ (кривая 1) и 3,5 мм (кривая 2). в то время как E_{\max} монотонно убывает. Существование максимума у функции $\Delta V(\Delta z)$ объясняется наличием двух противодействующих причин. При малых значениях Δz существенную роль играют межвитковые токи утечки, они уменьшают ΔV . При больших значениях Δz токи утечки малы, они не оказывают сколько-нибудь существенного влияния. С другой стороны, увеличение Δz ведет к уменьшению числа витков, приходящихся на один пространственный период, и, как следствие, к уменьшению индуктивности и снижению разности потенциалов ΔV .

Расчеты показывают, что значения параметров $l = 10$ мм и $\Delta z = 4$ мм близки к оптимальным. Они обеспечивают $\Delta V \approx 4$ кВ и $E_{\max} \approx 2$ кВ/см, что гарантирует устойчивую работу электрода. Как видно из сравнения зависимостей для $l = 10$ и 2 мм, при уменьшении l необходимо увеличивать Δz , чтобы обеспечить условие $E_{\max} < E_0$. Но, с другой стороны, большая величина расстояния между витками спирали может вызвать снижение однородности разряда и газового потока.

Заключение

Испытания электрода, разработанного в соответствии с рекомендациями, полученными на основе экспериментальных и численных исследований, показали отсутствие межвитковых пробоев, устойчивую и эффективную работу спирального анода в газоразрядной камере ЭИЛ. Таким образом, предложенный конструктивный вариант исполнения электродной системы в проточном электролизационном лазере с импульсным питанием позволяет повысить электрическую прочность разрядного промежутка за счет выравнивания градиента потенциала электрического поля, решает проблему перехода от края электрода к стенке газового тракта. Эта конструкция достаточно просто стыкуется со средствами подавления ударных и акустических волн в газовом тракте. Кроме того, данная конструкция электрода выгодно отличается от предложенного в [2] резистивного анода отсутствием активных потерь в токоограничивающих резисторах, т. е. большим КПД. При этом отпадает необходимость в системах охлаждения, что особенно важно в мощных ЭИЛ.

Список литературы

- [1] Гитт В. Д., Письменный В. Д., Рахимов А. Т. и др. Деп. в ВИНТИ. № 1487-81. М., 1981.
- [2] Востриков В. Г., Лобойко А. И., Напартович А. П. и др. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 2. С. 268—272.
- [3] Райзер Ю. П. Основы современной физики газоразрядных процессов. М.: Наука, 1980.
- [4] Велихов Е. П., Голубев В. С., Пашкин С. В. // УФН. 1982. Т. 137. № 1. С. 117—150.
- [5] Горячкин Д. А., Иртуганов В. М., Калинин В. П. // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 6. С. 46—50.
- [6] Журавлев Б. В., Накартович А. П., Паль А. Ф. и др. // Физика плазмы. 1988. Т. 14. № 2. С. 233—240.
- [7] Вычислительные методы в физике плазмы / Под ред. Б. Олдера. М.: Мир, 1974.
- [8] Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц. М.: Мир, 1987.
- [9] Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей. Л.: Энергия, 1970. 415 с.

Поступило в Редакцию
6 февраля 1991 г.
В окончательной редакции
25 июня 1991 г.