

04; 07; 12

О ВЛИЯНИИ ЭЛЕКТРОДНОЙ СИСТЕМЫ НА РАВНОМЕРНОСТЬ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА ТЕА CO_2 ЛАЗЕРА

Д. А. Горячкин, В. М. Иртуганов, В. П. Калинин

Проведены экспериментальные и теоретические оценки влияния неоднородностей в распределении электрического поля и начальных электронов на равномерность самостоятельного разряда ТЕА CO_2 лазера. Рассмотрены вопросы экспериментальной оптимизации профиля электродов, обоснованы достаточно жесткие требования к необходимой точности их взаимной установки в разрядной камере.

Одним из важных вопросов, который необходимо решать при создании ТЕА CO_2 лазера, возбуждаемого самостоятельным разрядом, является вопрос выбора и изготовления электродов оптимального профиля, использование которых позволило бы с наибольшей однородностью вложить в активный объем лазера предельную энергию накачки. Профилирование электродов согласно рекомендациям известных работ [1, 2] является достаточно трудоемкой и высокоточной технологической операцией. Полученные в результате расчетов профили задают крупногабаритные электроды, что в условиях лазеров больших объемов крайне неудобно конструктивно. Наконец, трудно бывает учесть в расчете влияние предыонизатора, узлов крепления в конструкции разрядной камеры на распределение поля в промежутке. Все это приводит к тому, что на практике электроды таких лазеров выбираются обычно с разумными габаритами, а профиль их подбирается, исходя из опыта исследователя и имеющегося технологического оборудования.

В настоящей работе делается попытка обобщения экспериментальных и численных данных, полученных на базе нескольких разрядных модулей фотоионизационных ТЕА CO_2 лазеров с размерами активных сред $3 \times 3 \times 80$, $6 \times 10 \times 100$ и $10 \times 10 \times 100$ см³ [3, 4], о влиянии неравномерностей в распределении поля и начальных электронов на однородность разряда. В экспериментах однородность оценивалась по интегральным фотографиям свечения разряда в поперечном по отношению к оси лазерного излучения направлении. Для фотосъемки использовалась первая из указанных выше камер с предыонизацией коронным разрядом с помощью проволочек, натянутых симметрично с обеих сторон вдоль основных профилированных электродов [5]. В одинаковых условиях (смесь $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 1 : 3$, энерговклад ~ 200 Дж/л) анализировалась работа трех пар сменных профилированных по-разному электродов. Фотографии светящихся зон и соответствующие распределения напряженности электростатического поля в промежутке, приближенно рассчитанные методом сеток [6], приведены на рис. 1. Горизонтальные ряды цифр на рисунках соответствуют значениям ординат кривых электродных профилей в миллиметрах с шагом вдоль оси абсцисс 5 мм.

Первоначально (рис. 1, а) форма поперечного сечения каждого из электродов имела вид двух состыкованных в середине профилей Брюса [2] в точках, соответствующих выходу касательных к ним на горизонталь, плоской части электрод практически не имел. В результате в центральной зоне напряженность становилась наибольшей, причем (рис. 1, а) превышение ее более чем

на 2 % относительно среднего уровня ($\delta = (E - E_{cp})/E_{cp} \geq 2\%$) приводило к локализации наиболее яркого свечения в этой области.

Форма оптимизированного профиля (рис. 1, б) отличалась от предыдущей наличием почти плоского среднего участка, близкого по ширине к расчетному размеру разрядной области. Зоны с наибольшей напряженностью в этом случае уже начинали перемещаться из центра к краям при величине неоднородностей δ , не превышающей 1—2 %. Применение третьей пары электродов, отличающихся более крутыми краями и соответственно большими δ в этих областях (рис. 1, в), привело уже к перемещению яркого свечения из центра в краевые области.

Сходные результаты, свидетельствующие о необходимости «доработки» первоначально применяемого профиля Чанга [1], были получены и при реализации разряда в объеме $10 \times 10 \times 100 \text{ см}^3$ с применением искровой подсветки из-под катода. Ниже приведены (в безразмерных единицах) координаты профиля скругления краевых областей электродов, с использованием которых удавалось получить наиболее равномерный разряд. Анализ проведен по экспериментам в обеих разрядных камерах.

x/x_0	1.0	1.4	1.6	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.45	2.5
y/y_0	0.005	0.015	0.03	0.07	0.1	0.14	0.19	0.28	0.37	0.55	0.67	1.0

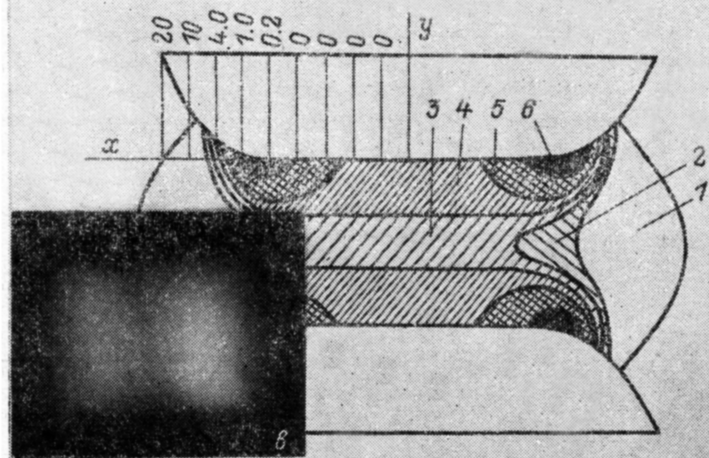
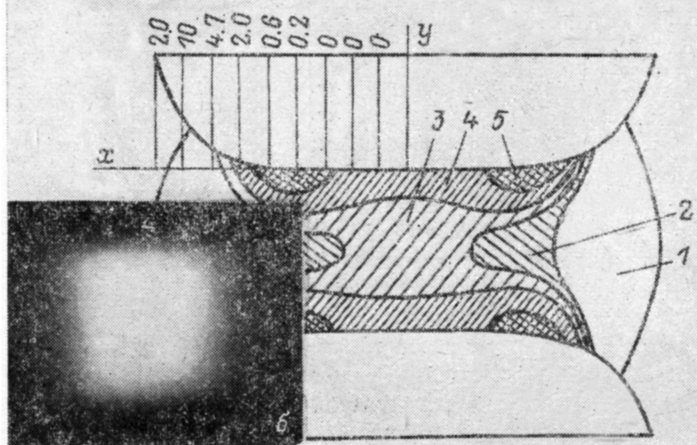
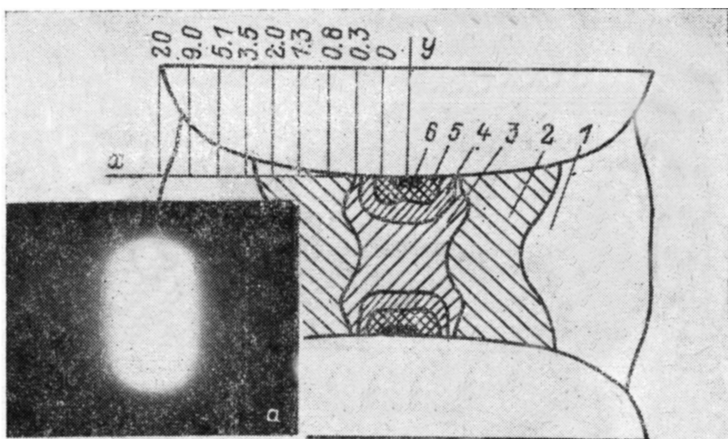
Положение осей координат соответствует показанному на рис. 1 (x_0 и y_0 — требуемые полуширина и полувысота разрядного промежутка).

Чтобы представить, к каким неоднородностям тока и энерговклада могут привести указанные выше характерные «допустимые» неравномерности поля в промежутке ($\sim 1-2\%$), а также сделать практически важные оценки необходимой точности установки электродов (с требуемым профилем) в разрядных модулях, приведем результаты численных расчетов, моделирующих развитие разряда при заданных простейшим образом исходных неравномерностях в распределениях поля и начальных электронов в зазоре. Для этого модель [4, 7], рассматривающая развитие разряда в однородном приближении совместно с источником питания, была модифицирована следующим образом. Предполагалось, что источник разряжается на два включенных параллельно независимых полуобъема с одинаковыми площадями электродов, но с различными зазорами d_1 и d_2 (или с разным количеством начальных электронов с плотностями n_{01} и n_{02}). Тогда, задавая $\Delta d = d_1 - d_2$ (или $\Delta n_0 = n_{01}/n_{02}$), можно было в первом случае моделировать неоднородности напряженности электрического поля, величина которых $\delta = \Delta E/E_{cp} = (d_{cp} \Delta d)/(d_1 d_2) \approx \Delta d/d_{cp}$, а во втором — неоднородности подсветки, обеспечиваемой источником предионизации.

Расчет проводился в условиях того же, что и в [4], ТЕА лазера, но для промежутка, разделенного на два полуобъема ($6 \times 10 \times 50 \text{ см}^3$ каждый) с различными зазорами при $d_{cp} = 60 \text{ мм}$ (рис. 2). Вычислялись относительные разности амплитуд токов $K_I = \Delta I/I_{cp}$ и энерговкладов $K_W = \Delta W/W_{cp}$ в рассматриваемых областях. Из приведенных на рис. 3 результатов видно, что для получения однородного энерговклада со степенью неоднородностей $K_W, K_I \leq 10\%$ необходимо было поддерживать разность зазоров на уровне $\Delta d/d_{cp} \leq 0.2\%$, что соответствовало $\Delta d = 0.12 \text{ мм}$. Поскольку расчетная модель соответствовала реальной ситуации с перекосом плоских частей анода и катода относительно друг друга (в продольном направлении), то полученный результат можно рассматривать как оценку необходимой точности установки электродов в ТЕА CO_2 лазерах.

Неоднородности напряженности электрического поля $\delta = 1-2\%$, вводимые в данную модель, вызывали завышенные неравномерности энерговкладов $K_W \geq 50\%$. Точное описание влияния локальных неоднородностей требует усложнения расчетной модели, по крайней мере более мелкого разбиения разрядного объема на независимые (по току) элементы.

Указанные на рис. 3 величины K_I и K_W были получены при равномерном по объему распределении начальных электронов, соответствующем типичным для источников УФ подсветки величинам $n_{01} = n_{02} = 10^8 \text{ см}^{-3}$ [8]. В случае



увеличения их количества, например, до 10^{10} см^{-3} разряд в расчете становился равномернее, снижались требования к точности взаимной установки электродов (рис. 3, кривые 3). На практике увеличение концентрации начальных электронов, обеспечиваемых фотоионизацией, труднодостижимо и возможно лишь в определенных условиях, например при добавлении в рабочую смесь легкоионизируемой присадки. В этом случае, как отмечалось в [9], требования к форме разрядных электродов и их установке действительно переставали быть столь же жесткими, как в случае применения «чистых» смесей. Вместе с тем известно, что большинство органических легкоионизируемых добавок ядовито, вызывает загрязнение лазерных камер и другие нежелательные эффекты.

Эффект выравнивания неоднородностей тока и энерговклада при развитии разряда в неоднородном поле, как показал расчет, оказывало хорошо известное подключение к электродам дополнительного $L-C$ контура (рис. 2). Его параметры выбирались в соответствии с типичными значениями: $C_A = 0.2C_x$, $L_A = 0.7L$. Меньшая чувствительность устройства к неравномерностям поля (рис. 3) связана, по-видимому, с более плавным нарастанием напряженности в промежутке на переднем фронте импульса при одновременном сокращении полной длительности разряда [4].

Несколько слов о влиянии неоднородностей в распределении начальных электронов в промежутке. Отметим, что необходимость доработки расчетных

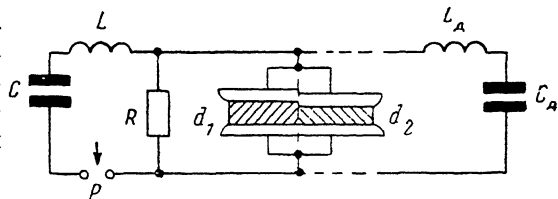


Рис. 2. Схема разрядной цепи, используемая в расчетах.

$C = 0.15 \text{ мкФ}$, $L = 400 \text{ нГ}$, $R = 1 \text{ К}$, P — безынерционный разрядник. В ряде случаев рассматривалось возбуждение разряда при подключении к электродам дополнительного контура C_A-L_A .

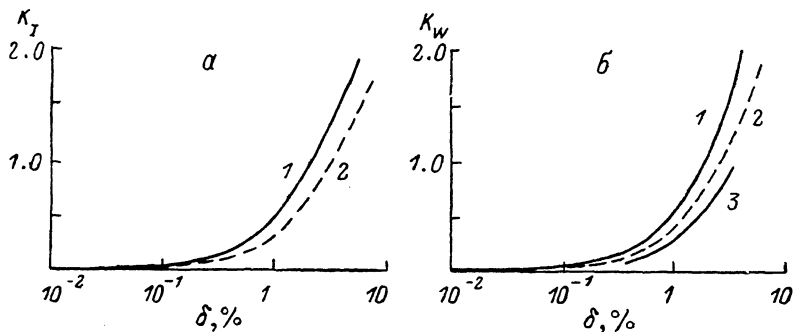


Рис. 3. Неоднородности тока (а) и энерговклада (б) при возбуждении разряда в неравномерном поле при $n_{01} = n_{02} = 10^8$ (1, 2) и 10^{10} см^{-3} (3).

(Дополнительный контур отсутствовал (1, 3) и был подключен (2) к электродам.

профилей до кривой, описываемой в выводе, была продемонстрирована выше в опытах с различным расположением источника предыонизации, а значит, при существенно разном распределении начальных электронов в промежутках (см. также [10]). В демонстрационном эксперименте наиболее сильная неравномерность подсветки создавалась при отключении питания от одной из проволок коронного разряда. При этом условия существования однородного разряда все еще не нарушались, хотя он и смещался в сторону светящейся проволоочки (рис. 1, з).

Рис. 1. Свечения разряда и распределение электростатического поля между электродами, профилированными различным образом.

Неоднородности напряженности поля: 1 — $0.9 > \delta > 0.6$, 2 — $0.98 > \delta > 0.9$, 3 — $1 > \delta > 0.98$, 4 — $1.01 > \delta > 1$, 5 — $1.02 > \delta > 1.01$, 6 — $\delta > 1.02$. В случае з применялись электроды, соответствующие распределению б, но одна из проволок-предыонизаторов отключалась.

Чтобы иметь возможность сопоставления влияния δ и Δn_0 на степень равномерности разряда, мы моделировали неоднородности в распределении начальных электронов и в расчете. Приведем некоторые результаты. Так, весьма значительное двухкратное превышение начальной концентрации в одном из полуобъемов ($n_{01}=2 \cdot 10^8$, $n_{02}=10^8$ см⁻³) приводило к появлению неоднородностей энерговклада $K_W \approx 0.19$, сравнимых с вызываемым перекосом электродов $\Delta d=0.3$ мм ($\delta \approx 0.5$ %). Еще пример. Чтобы «скомпенсировать» влияние неоднородного поля при $\Delta d=0.5$ мм и получить одинаковые энерговклады и в этом случае, потребовалось пятикратное увеличение плотности начальных электронов в полуобъеме с большим зазором ($n_{01}=5 \cdot 10^8$, $n_{02}=10^8$ см⁻³).

В заключение отметим, что в данной работе приведены рекомендации по профилированию разрядных электродов для ТЕА СО₂ лазеров и результаты их проверки в условиях различной конфигурации типичных источников УФ предыонизации. В результате численных расчетов получены оценки необходимой точности взаимной установки электродов $\Delta d/d_{cp} \leq 0.2$ %. Требования к установке электродов и однородности поля в промежутке могут быть снижены при увеличении эффективности предыонизатора или с применением дополнительного L—C-контура в источнике питания лазера. Сравнительные оценки влияния неоднородностей в распределениях поля и начальных электронов на равномерность энерговклада показали, что, вообще говоря, требования к однородности поля, т. е. к профилированию и установке основных электродов, превалируют и являются при создании ТЕА СО₂ лазеров основополагающими.

Литература

- [1] Чанг Т. // Приборы для научных исследований. 1973. Т. 44. № 4. С. 44—46.
- [2] Вгисе Ф. М. // J. Inst. Electr. Eng. II. 1947. Vol. 94. N 38. P. 138—149.
- [3] Ананьев Ю. А., Горячкин Д. А., Иртуганов В. М. и др. // Квантовая электрон. 1978. Т. 5. № 6. С. 1381—1383.
- [4] Горячкин Д. А., Иртуганов В. М., Калинин В. П. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1982. Т. 46. № 10. С. 1877—1885.
- [5] Lamberton H. M., Pearson P. R. // Electron. Lett. 1971. Vol. 7. N 5. P. 141—142.
- [6] Говорков В. А. // Электрические и магнитные поля. М.: Энергия, 1968. 487 с.
- [7] Бычков Ю. И., Осипов В. В., Савин В. В. // Газовые лазеры. Новосибирск: Наука, 1977. С. 252—271.
- [8] Seguin H. J., Tulip J. // Appl. Phys. Lett. 1973. Vol. 23. N 6. P. 344—346.
- [9] Аполлонов В. В., Васильковский Ю. М., Жаворонков М. И. и др. // Квантовая электрон. 1985. Т. 12. № 1. С. 5—9.
- [10] Denes L. J., Kline L. E. // Appl. Phys. Lett. 1977. Vol. 30. N 4. P. 197—199.

Поступило в Редакцию
23 мая 1988 г.