

ИНДУКТИВНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РАЗРЯДА В ПЛОТНЫХ ГАЗАХ

А. П. Лыткин, А. В. Романов, А. Ф. Сучков

Введение

Объемная фаза самостоятельного электрического разряда в плотных газах существует в определенном диапазоне длительностей импульса возбуждения, который сокращается с ростом давления газа и при увеличении энерговклада в активную область разряда. Длительность существования объемной фазы самостоятельного разряда определяется временем развития неустойчивостей и составляет для атмосферного давления $\sim 10^{-7}$ с в условиях возбуждения активной среды молекулярных лазеров и $\sim 10^{-8}$ с для разряда в благородных газах. Стабилизация самостоятельного разряда путем ограничения разрядного тока позволяет увеличить время существования объемной фазы разряда и, как следствие, повысить энерговклад.

Распространенным методом стабилизации разряда в плотных газах является секционирование электродов и ограничение величины разрядного тока, протекающего через каждую секцию, с помощью балластных резисторов, включенных последовательно с разрядным промежутком [1]. Другой метод стабилизации состоит в использовании электродов из полупроводящего материала, так называемых резистивных электродов [2]. В работах [3-5] предложен способ стабилизации объемного разряда с помощью анизотропно-резистивных электродов, образованных плотно уложенными и изолированными друг от друга минирезисторами, причем плотность укладки минирезисторов на рабочей поверхности электродов составляла $\sim 10^8$ см $^{-2}$. Было показано, что использование анизотропно-резистивных электродов позволяет в 2-3 раза увеличить рабочее давление и в 2 раза энерговклад в объемный самостоятельный разряд по сравнению с использованием изотропно-резистивных электродов [5].

Однако использование балластной омической нагрузки для ограничения разрядного тока связано с потерями энергии на балластных сопротивлениях. При импульсно-периодическом режиме возбуждения ограничение средней входимой мощности связано в таких схемах с перегревом балластной нагрузки, который может приводить к разрушению балластной нагрузки и тепловыделению от нее в область разряда.

Другим методом стабилизации объемного разряда, свободным от указанного недостатка, является использование не омической, а индуктивной балластной нагрузки [6].

1. Принцип индуктивной стабилизации

При больших плотностях электрического тока неустойчивости газового разряда зарождаются в прикатодном слое [7]. В результате развития неустойчивостей образуются токопроводящие каналы, распространяющиеся по направлению к аноду. Достигнув анода, токопроводящий канал начинает быстро расширяться, сопротивление его уменьшается и канал шунтирует разрядный промежуток, прекращая объемную фазу горения разряда. Суть метода индуктив-

ной стабилизации состоит в секционировании катода и подавлении шнурования за счет падения напряжения на балластных индуктивностях, подключенных к секциям катода последовательно с разрядным промежутком.

В устройствах с резистивной стабилизацией разряда в плотных газах необходимо увеличивать плотность секций на рабочих поверхностях электродов, так как при этом увеличивается регулирующее действие каждого резистора [3]. Однако для разряда с индуктивной стабилизацией увеличение плотности секций может приводить, кроме того, к увеличению магнитной связи между балластными индуктивностями. С другой стороны, при возникновении неустойчивостей в какой-либо секции разрядного промежутка облегчается развитие неустойчивостей в соседних секциях, что может быть связано, например, с УФ подсветкой от токопроводящего канала. Подавление развития таких неустойчивостей

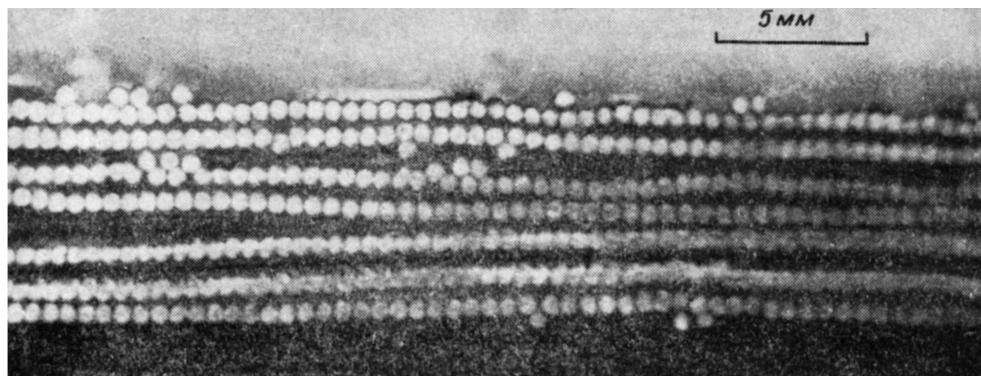


Рис. 1. Часть рабочей поверхности секционированного катода.

может осуществить взаимоиндуктивность между балластными индуктивностями. Следовательно, некоторая оптимальная величина магнитной связи между балластными индуктивностями может улучшить стабилизирующие свойства разрядного контура.

Оценим максимальную допустимую величину плотности секций на поверхности электрода. Если расстояние между соседними секциями на поверхности электрода меньше начального диаметра шнура контрагированного разряда, то гасящее действие на возникшую в объеме разряда неустойчивость будет оказывать не одна, а две и более балластные индуктивности, подключенные параллельно друг другу. В этом случае уменьшится величина суммарной гасящей индуктивности и ухудшится эффективность подавления неустойчивости. Следовательно,

$$n \leq d_{\text{шн}}^{-2} \approx (16 D_a \cdot \tau_{\text{губ}})^{-1},$$

где n — плотность секций на поверхности электрода, $d_{\text{шн}}$ — начальный диаметр шнура контрагированного разряда, D_a — коэффициент амбиполярной диффузии, $\tau_{\text{губ}}$ — характерное время гибели электронов в разряде.

Для рекомбинационного механизма гибели электронов

$$\tau_{\text{губ}} = (\beta \cdot N_e)^{-1},$$

а для прилипательного

$$\tau_{\text{губ}} = (c \cdot N^-)^{-1},$$

где β и c — эффективные коэффициенты рекомбинации и прилипания соответственно, N_e и N^- — плотности электронов и электроотрицательных молекул соответственно [8].

Характерная величина предельной плотности секций на поверхности электрода составляет 10^2 — 10^5 см⁻² для смесей благородных и молекулярных газов при давлении 0.1—5 атм.

2. Экспериментальная установка

Разрядная камера, изготовленная из органического стекла, имела полированную прозрачную стенку, через которую наблюдалось свечение разряда. В камере помещались сплошной анод и либо сплошной, либо секционированный катод. Сплошные электроды были выполнены в виде алюминиевых пластин со скругленными краями. Секционированный катод содержал на рабочей поверхности металлические секции диаметром 0.35 мм, равномерно расположенные с плотностью $\sim 200 \text{ см}^{-2}$. На рис. 1 приведена часть поверхности секционированного катода. Активный объем разрядной камеры составлял $0.8 \times 3.7 \times 35 \text{ см}$ (ширина \times высота \times длина).

На рис. 2 представлена электрическая схема установки с секционированным катодом. К каждой секции секционированного катода подсоединялась бал-

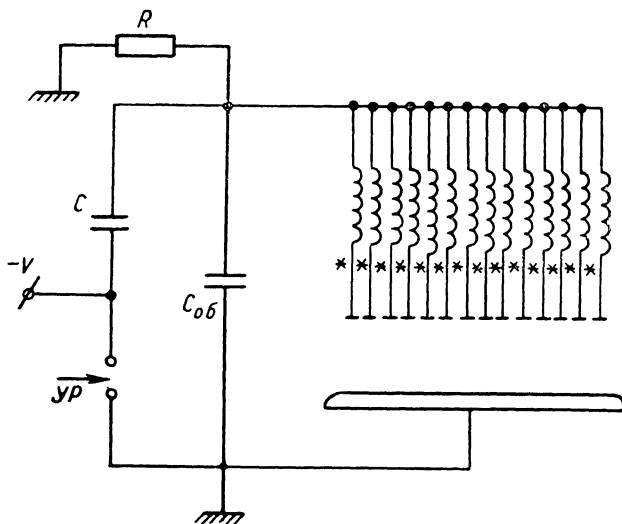


Рис. 2. Электрическая схема установки.

$C=15 \text{ нФ}$, $C_{об}=6.7 \text{ нФ}$, $R=1 \text{ кОм}$; $УР$ — управляемый разрядник.

ластная индуктивность $\sim 3 \text{ мкГн}$. Между балластными индуктивностями, подключенными к соседним секциям, имелась взаимная индуктивность $\sim 2 \text{ мкГн}$. Знак взаимной индуктивности показан на рисунке звездочками. Полная индуктивность разрядного контура составляла 0.4 мкГн .

На двух противоположных торцах разрядной камеры имелись отверстия, в которых были закреплены зеркала оптического резонатора — вогнутое «глухое» с радиусом кривизны 2 м и полупрозрачное выходное с диэлектрическим отражающим покрытием.

Проводилось сравнение характеристик разряда с индуктивной стабилизацией с характеристиками разряда со сплошными электродами в одинаковых условиях возбуждения и в одинаковой геометрии разрядного промежутка, эксперименты проводились для смеси газов CO_2 , N_2 и He в диапазоне давлений $0.08\text{—}0.7 \text{ атм}$.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

1. На рис. 3 представлены характерные фотографии свечения разряда в смеси $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He}=1 : 1 : 8$, полученные в схеме с индуктивной стабилизацией и в схеме со сплошными электродами. На всех фотографиях катодом является нижний электрод. Разряд с секционированным катодом представляет собой большое количество диффузных каналов, равномерно распределенных во всем объеме между электродами. Причем при увеличении начальной приведенной напряженности электрического поля E_0/N не образуется искровой пробой, а возрастает количество диффузных каналов. Структура этого разряда

аналогична так называемому сильноточному диффузному разряду [7, 9], который обычно имеет место в смесях благородных газов с галогенами. Следует отметить, что подобный характер разряда наблюдался также в работе [2] в смеси CO_2 , N_2 и He с использованием резистивных электродов.

В схеме со сплошными электродами объем разрядной области, занятой диффузными каналами, при давлениях 0.08—0.2 атм меньше, чем в схеме со стабилизацией разряда, и кроме диффузного свечения каналов наблюдались яркие шнуры искрового разряда. При давлениях, больших 0.2 атм, разряд в схеме со сплошными электродами носит только искровой характер, в то время как в схеме с секционированным катодом разряд продолжает быть диффузным вплоть до давлений 0.7 атм.

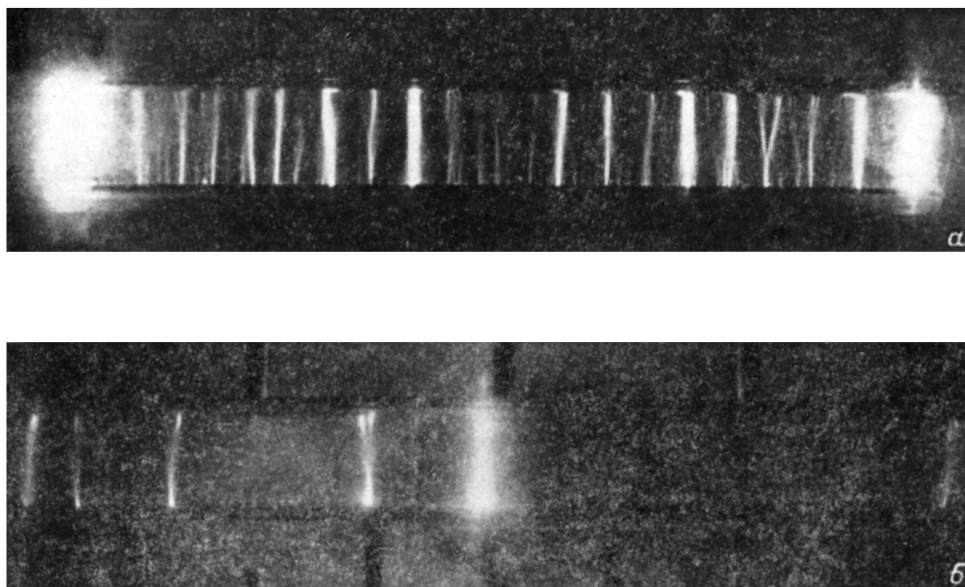


Рис. 3. Свечение разряда в смеси $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 1 : 8$ в схеме с индуктивной стабилизацией (а) и в схеме со сплошными электродами (б).

Давление газовой смеси 0.4 атм, полная индуктивность разрядного контура 0.4 (а), 0.2 мкГн (б).

Описанный характер свечения разряда в схеме со сплошными электродами наблюдался при полной индуктивности разрядного контура минимальной для конструкции разрядной камеры (0.2 мкГн). При увеличении полной индуктивности разрядного контура равномерность диффузных каналов ухудшается и уменьшается давление, при котором происходит искровой пробой разрядного промежутка.

Добавление в рабочую смесь легкоионизируемой присадки, в качестве которой использовался о-ксилол, приводило к увеличению количества и диаметра диффузных каналов при использовании всех описанных выше схем организации разряда.

Для иллюстрации стабилизирующих возможностей схемы с индуктивной стабилизацией в разрядный промежуток была введена неоднородность в виде металлического острья высотой 10 мм, помещенного на рабочей поверхности катода и направленного к аноду. На рис. 4 представлена фотография свечения стабилизированного разряда в этих условиях. Несмотря на яркий шнур, проходящий через острие, равномерный диффузный разряд занимает большую часть объема области между электродами. В схеме со сплошными электродами и острием в разрядном промежутке областей с диффузным разрядом не наблюдалось даже при уменьшении давления до 0.08 атм.

2. Одним из практических применений самостоятельного разряда с индуктивной стабилизацией может быть накачка газовых лазеров высокого давления.

На рис. 5 представлена удельная энергия генерации, полученная в схеме с индуктивной стабилизацией и в нестабилизированной схеме разряда, в зависимости от давления смеси $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 1 : 8$. Максимальный энергосъем был получен с выходным зеркалом с коэффициентом отражения 90 % на длине

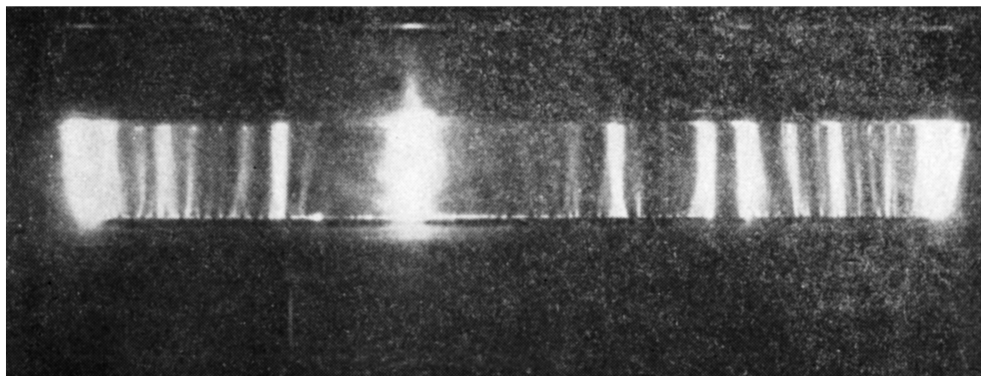
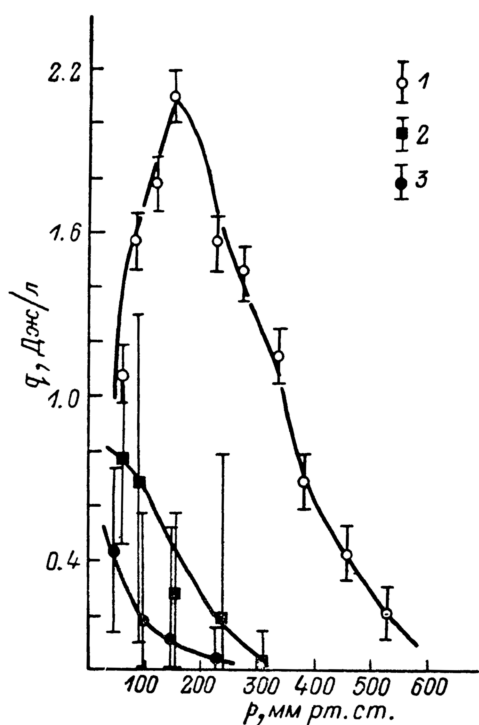


Рис. 4. То же, что на рис. 3, а, при помещении на рабочую поверхность катода металлического острья.

Давление газовой смеси 0.14 атм

волны 10.6 мкм для всех схем. Большой разброс экспериментальных данных для нестабилизированной схемы разряда отражает низкую воспроизводимость величины энергии генерации, полученную в этих условиях возбуждения.



Из рис. 5 видно, что индуктивная стабилизация разряда позволила расширить диапазон безыскрового горения разряда по давлению в 2—3 раза, увеличить энергию генерации в 3—4 раза и существенно улучшить воспроизводимость характеристик разряда.

Как известно, для накачки газовых лазеров требуется однородное возбуждение всего объема активной среды. На фотографиях, приведенных в предыдущем разделе, показана неоднородная структура разряда с индуктивной стабилизацией, которая мало пригодна для накачки лазера. Однако представленные интегральные фотографии не отражают динамику процессов в разрядном объеме. По-видимому, на переднем фронте разрядного тока существует однородная

Рис. 5. Зависимость удельной энергии генерации от давления для секционированного катода (1) и сплошных электродов (2, 3).

Смесь $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 1 : 8$; полная индуктивность разрядного контура 0.4 (1, 3), 0.2 мкГн (2), коэффициент отражения выходного зеркала резонатора 90 %.

объемная фаза разряда. Длительность существования объемной фазы определяет величину полезного энерговклада и, следовательно, энергосъема с активного объема газового лазера. Доказательством существования объемной фазы разряда с индуктивной стабилизацией может служить относительно высокая удельная энергия генерации 1.3 Дж/л при техническом КПД 2 %.

Добавление в лазерную смесь ~ 10 Тор о-ксилола (давление насыщенных

паров при комнатной температуре позволило увеличить энерговклад в 1.3 раза, при этом энергосъем возрос до 5 Дж/л, а технический КПД в условиях максимального энергосъема до 3.5 %. Оптимальный коэффициент отражения выходного зеркала был 70 %. В зависимости энергии генерации от давления смеси с добавлением легкоионизируемой присадки имелось плато в диапазоне давлений 0.2—0.5 атм, а при давлениях вне этого диапазона энергия генерации была меньшей. Такая зависимость объяснялась ограничением конструкции лазера, не позволявшей увеличить зарядное напряжение на накопительном конденсаторе более 40 кВ.

Заключение

Индуктивная стабилизация импульсного газового разряда, таким образом, позволяет значительно расширить диапазон давлений, при котором в разряде существует объемная фаза. Важными параметрами схемы стабилизации являются величина взаимной магнитной индукции между балластными нагрузками и плотность секций на поверхности электрода, которая в оптимальном случае определяется величиной начального диаметра шнура контрагированного разряда, зависящего в свою очередь от давления и состава газовой смеси в разрядном промежутке. При увеличении рабочего давления газовой смеси необходимо увеличивать плотность секций на поверхности электрода.

Использование в экспериментах электрода с плотностью секций 200 см^{-2} , в каждую из которых включалась индуктивная балластная нагрузка величиной $\sim 3 \text{ мкГн}$, позволило реализовать объемный разряд в смеси газов CO_2 , N_2 . Не при давлении до 0.7 атм. Удельный энергосъем с активной среды CO_2 лазера, накачиваемого таким разрядом, достигал 5 Дж/л при техническом КПД 3.5 %. При этом не осуществлялась предварительная ионизация разрядного промежутка, обычно применяемая в ТЕА лазерах с самостоятельным разрядом. Известно, что основным препятствием для реализации импульсно-периодического режима работы фотоионизационных лазеров является ограниченный ресурс УФ предионизаторов, действующих с высокой частотой повторения импульсов (10^2 — 10^3 Гц) [10]. Отсутствие предионизатора и потерь энергии на балластных нагрузках в описанной схеме осуществления разряда позволит значительно увеличить частоту повторения импульсов накачки и повысить среднюю мощность излучения, а также ресурс работы импульсно-периодических газовых лазеров.

Следует отметить, что полученные выходные характеристики импульсного CO_2 лазера не являются предельными и могут быть увеличены при оптимизации таких параметров, как величина балластной нагрузки и взаимной индуктивности между нагрузками, плотность секций на поверхности электрода и геометрия разрядного промежутка.

Список литературы

- [1] *Beaulieu A. L.* // Appl. Phys. Lett. 1970. Vol. 16. N 2. P. 504—505.
- [2] *Johns T. W., Nation J. A.* // Rev. Sci. Instrum. 1973. Vol. 44. N 2. P. 169—171.
- [3] *Великин А. А., Гуревич Д. Б., Канатенко М. А., Подмошенский И. В.* // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 6. С. 1222—1224.
- [4] *Лаврентюк В. Е., Подмошенский И. В.* // Квантовая электрон. 1986. Т. 13. № 11. С. 2351—2353.
- [5] *Глушченко Ю. В., Лаврентюк В. Е., Подмошенский И. В.* // Тез. IV Всесоюз. конф. по физике газового разряда. Махачкала. 1988. Ч. 2. С. 118.
- [6] *Sze R. C.* United States Patent. 1986. N 4601039. J. Appl. Phys. 1983. Vol. 54. N 3. P. 1224—1227.
- [7] *Бычков Ю. И., Королев Ю. Д., Месяц Г. А.* // УФН. 1978. Т. 126. № 3. С. 451—477.
- [8] *Райзер Ю. П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 592 с.
- [9] *Козырев А. В., Королев Ю. Д., Месяц Г. А.* и др. // ЖТФ. 1981. Т. 51. Вып. 9. С. 1817—1826.
- [10] *Ананьев Ю. А., Анисимова Т. Е., Горячкин Д. А.* и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1980. Т. 44. № 10. С. 2113—2115.