

02; 07; 12

© 1991 г.

## ИМПУЛЬСНЫЙ $\text{CO}_2$ ЛАЗЕР С ИНДУКТИВНОЙ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ РАЗРЯДА

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

Описан импульсный  $\text{CO}_2$  лазер, для стабилизации поперечного разряда в котором используется секционированный электрод с плотностью секций  $\sim 2 \cdot 10^2$  шт./см<sup>2</sup>. Секциями электрода служат торцы проводов в диэлектрической изоляции, плотно уложенные рядом друг с другом на поверхности электрода. Провода одновременно являются балластными индуктивными нагрузками в электрической цепи питания газового разряда. УФ предыонизация осуществляется с помощью вспомогательного разряда, происходящего между парами соседних секций на поверхности электрода. Удельный энергосъем достигает 60 Дж/л·атм при величине активного объема лазера  $\sim 0.1$  л. Предложенный способ стабилизации объемного разряда может быть использован для создания компактных, надежных импульсно-периодических газовых лазеров с частотой повторения импульсов излучения  $\sim 10^2$ — $10^3$  Гц.

### Введение

Самостоятельный электрический разряд в плотных газах широко используется для накачки импульсных и импульсно-периодических газовых лазеров. При этом продолжают исследования, направленные на улучшение известных и поиск новых схем организации объемных самостоятельных разрядов в газовых лазерах [1–3]. Замена резисторов в схеме Болье [4] балластными индуктивными нагрузками (БИН) [3] позволяет исключить потери энергии на нагрев балластной нагрузки, что приводит к увеличению КПД лазеров. Увеличение давления активной среды и выходной энергии лазеров с УФ предыонизацией достигается благодаря увеличению начальной концентрации электронов и однородности предыонизации лазерной газовой смеси УФ излучением вспомогательных разрядов [2].

В ряде работ [3, 5] описаны комбинированные схемы стабилизации объемной фазы газового разряда, в которых наряду с предыонизацией газовой смеси использовались балластные резисторы [5] либо БИН [3]. В эксимерном ХеСl лазере с УФ предыонизацией применение БИН вместо балластных резисторов позволило повысить в несколько раз частоту повторения импульсов излучения и мощность генерации, а также увеличить длительность импульсов излучения [3].

Нами уже сообщалось о создании  $\text{CO}_2$  лазера с индуктивной стабилизацией разряда, действующего без предварительной ионизации лазерной газовой смеси при давлении до 0.7 атм [6]. В настоящей работе представлены результаты исследований характеристик  $\text{CO}_2$  лазера, объемный разряд в котором осуществляется с использованием вспомогательного разряда по поверхности секционированного электрода, каждая секция которого соединена с источником питания через БИН. В разделе 1 рассмотрены общие принципы организации объемного разряда с помощью предлагаемой схемы. Раздел 2 содержит описание экспериментальной установки. В разделе 3 представлены полученные результаты и их обсуждение. Основные выводы сформулированы в Заключение.

## 1. Индуктивная стабилизация объемного самостоятельного разряда с УФ предыонизацией

Метод индуктивной стабилизации объемного газового разряда состоит в следующем. Один или оба электрода, с помощью которых осуществляется поперечный газовый разряд, выполняются в виде набора электрически изолированных друг от друга секций, каждая из которых соединена с импульсным источником электрического питания через БИН. Формирование токопроводящего шнура при контрагировании разряда на некотором участке разрядного промежутка сопровождается ростом тока через соответствующую БИН, что вызывает уменьшение электрического напряжения на данном участке разрядного промежутка и приводит к подавлению неустойчивости либо увеличению времени ее развития. Таким образом, БИН является элементом цепи отрицательной обратной связи, демпфирующей неустойчивость объемной фазы газового разряда.

В работах [1, 6] было показано, что увеличение плотности секций на поверхности электродов позволяет улучшить характеристики схем резистивной и индуктивной стабилизации разряда. Максимальная плотность секций ( $n_{\text{макс}}$ ) при этом определяется величиной начального диаметра шнура контрагированного разряда ( $d_{\text{шн}}$ ) [6]  $n_{\text{макс}} \sim d_{\text{шн}}^{-2}$ .

В предлагаемой схеме применяются электроды с плотностью секций, близкой к максимальной [7, 8]. В качестве БИН использовались отрезки проводов в диэлектрической изоляции, плотно уложенные упорядоченными слоями. Скрепленные между собой торцы проводов являлись секциями электрода. Вспомогательный разряд осуществлялся по поверхности электрода между парами секций с помощью импульсного источника питания, подключенного к противоположным концам отрезков проводов. Величина индуктивности БИН в каждой секции пропорциональна длине отрезка провода, что позволяет варьировать величину БИН в зависимости от параметров газового разряда. Условие индуктивной стабилизации, согласно которому импеданс БИН в каждой секции должен существенно превышать импеданс шнура контрагированного разряда, в предлагаемой схеме является условием, что длина отрезков проводов должна превышать некоторую минимальную величину. Поскольку индуктивность шнура контрагированного разряда линейно увеличивается с увеличением расстояния между электродами, то условие эффективной стабилизации объемного разряда с помощью БИН состоит в том, что длина отрезков проводов значительно превышает величину расстояния между электродами. Другое условие на минимальную величину длины отрезков проводов может быть получено из требования независимости разрядов в различных каналах, включенных параллельно друг другу.

Ограничение сверху на длину отрезков проводов обусловлено требованием, чтобы суммарный импеданс набора параллельно включенных БИН был значительно меньше импеданса объемного газового разряда, что необходимо для осуществления эффективного вклада энергии в активную область лазера.

Таким образом, конструкция электрода в виде плотно уложенных отрезков проводов, служащих БИН, позволяет выбрать оптимальные параметры схемы индуктивной стабилизации. Высокая плотность секций позволяет осуществлять однородный вспомогательный разряд по поверхности электрода непосредственно в разрядном промежутке. При этом секции электрода попарно «закорочены» между собой плазмой вспомогательного разряда, если вспомогательный разряд существует одновременно с основным. В режиме предыонизации вспомогательный разряд обычно осуществляется на переднем фронте импульса основного разряда. В таком режиме секции электрода электрически изолированы друг от друга, что обеспечивает включение БИН последовательно с каждым участком разрядного промежутка, соответствующего данной секции электрода.

## 2. Экспериментальная установка

На рис. 1 показана электрическая схема газового лазера с УФ предыонизацией и индуктивной стабилизацией объемного разряда. Разрядный промежуток образован электродами 1 и 2, которые расположены в лазерной камере, изго-

товленной из оргстекла. Один из электродов 2 секционирован, причем секциями электрода 3 служат торцы отрезков проводов в диэлектрической изоляции, уложенных плотно рядом друг с другом и являющихся БИН 4. Нечетные и четные слои электрода 2 подключены к клеммам конденсаторов  $C_n$  и  $C_p$ , вторые клеммы которых подключены к электроду 1. Параллельно конденсатору  $C_p$  через управляемый разрядник УР подключен конденсатор  $C_0$ , заряжаемый от источника постоянного напряжения ИП через зарядное сопротивление  $R$ . После запуска управляемого разрядника УР конденсатор  $C_0$  разряжается по цепи предыонизации, содержащей БИН, микроразряды по поверхности электрода, конденсатор  $C_n$ , а также по цепи основного разряда, содержащей обостряющий конденсатор  $C_p$ , БИН и разрядный промежуток. Цепь предыонизации имеет меньшую индуктивность по сравнению с цепью основного разряда, что позволяет осуществлять основной разряд с временной задержкой относительно вспомогательного разряда. Величина задержки зависит от отношения индуктивностей в цепях предыонизации и основного разряда, а также от отношения емкостей конденсаторов  $C_0$ ,  $C_p$  и  $C_n$ . Оптимальные отношения  $C_0/C_p$  и  $C_p/C_n$  были установлены экспериментально и лежат в диапазоне от 2 до 3.

При изготовлении секционированного электрода использовался провод в шелковой изоляции (ПЭШО) диаметром 0.35 мм. Провод наматывался на барабан диамет-

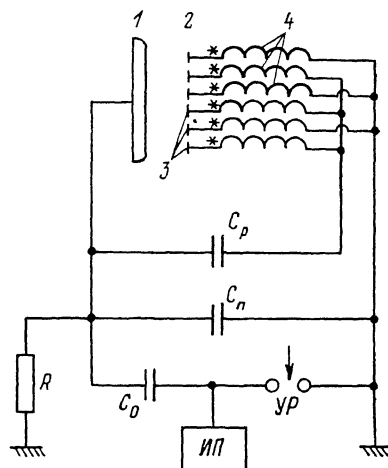


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема лазера.

1 — анод, 2 — катод, 3 — секции электрода, 4 — балластные индуктивные нагрузки;  $C_0=60$  нФ,  $C_p=25$  нФ,  $C_n=15$  нФ,  $R=1$  кОм; УР — управляемый разрядник, ИП — источник питания.

ром 50 см упорядоченными слоями, которые склеивались между собой эпоксидной смолой. Катушка разрезалась по направляющей цилиндра, после чего одна из поверхностей среза шлифовалась и использовалась в дальнейшем в качестве секционированного электрода, а вторые концы проводов запаивались послойно между собой, после чего четные и нечетные слои проводов включались в электрическую цепь питания согласно схеме, представленной на рис. 1.

Секционированный электрод имел размеры  $8 \times 340$  мм и состоял из 7 склеенных между собой слоев проводов. Каждый слой содержал около 680 секций. Концы проводов, образующих секции электрода, лежали на поверхности электрода в одной плоскости. Плотность секций на поверхности электрода составляла  $\sim 2 \cdot 10^2$  шт./см<sup>2</sup>. Длина проводов, которые использовались в качестве БИН, составляла 150 см.

Секционированный электрод вклеивался в пластину из оргстекла толщиной 20 мм, которая вакуумно плотно соединялась с лазерной камерой, изготовленной из оргстекла. В лазерной камере располагался второй электрод, изготовленный из алюминия в виде пластины с закругленными краями. Расстояние между электродами составляло 38 мм. Лазерная камера была снабжена окнами для вывода лазерного излучения, на которые были установлены два зеркала резонатора: вогнутое «глухое» медное зеркало с радиусом кривизны 2.5 м и плоское выходное зеркало с многослойным диэлектрическим покрытием, имеющим коэффициент отражения  $\sim 70\%$  на длине волны 10.6 мкм.

Описанный электрод обладал высокой механической прочностью. На поверхности электрода не обнаружено следов повреждений после  $\sim 10^4$  импульсов и  $\sim 10^3$  стримерных пробоев разрядного промежутка при давлении газа в кювете  $\sim 1$  атм. Электрод предлагаемой конструкции может быть изготовлен с использованием керамики, стекла и других неорганических веществ, с помощью кото-

рых могут быть скреплены между собой концы проводов, образующих поверхность электрода. Для изготовления электрода могут быть использованы выпускаемые промышленностью провода в стеклянной изоляции, концы которых, образующие секции электрода, могут быть спечены между собой. Совершенствование технологии изготовления электрода по указанным направлениям позволит осуществлять импульсно-периодический разряд в среде химически агрессивных газов.

### 3. Результаты экспериментов и их обсуждение

Применение балластных индуктивных нагрузок в цепи разряда позволяло осуществлять самостоятельный объемный разряд без предварительной ионизации разрядного промежутка при давлениях, достигающих 0.7—0.8 атм. Максимальная энергия излучения  $\text{CO}_2$  лазера наблюдалась при этом в диапазоне давлений 0.3—0.5 атм. Использование наряду с индуктивной стабилизацией УФ предыонизации разрядного промежутка излучением вспомогательных микрозарядов по поверхности электрода позволяло увеличить энергию излучения лазера и давление активной среды. На рис. 2 представлена зависимость удельной энергии излучения  $\text{CO}_2$  лазера от давления активной среды без предыонизации (кривая 1) и с УФ предыонизацией (кривая 2) разрядного промежутка. Для выключения вспомогательного разряда в электрической схеме, показанной на рис. 1, отключался конденсатор  $C_n$  и индуктивности 4 присоединялись к клемме конденсатора  $C_p$ . В обоих случаях использовались газовые смеси  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 1 : 8$  с добавлением легкоионизируемой присадки.

При включении схемы предыонизации энергосъем с активной среды лазера возрастал в 4 раза, а максимум энергии излучения смещался в диапазон давлений 0.6—0.7 атм. Энергия излучения и КПД генерации лазера с УФ предыонизацией достигали 2.2 Дж и 5 % соответственно. Активный объем лазера не превышал величины  $\sim 0.1$  л, так как площадь сечения лазерного луча, измеренная вблизи выходного зеркала, равнялась 3.0  $\text{cm}^2$ . Максимальный удельный энергосъем с активной среды лазера при этом составлял 22 Дж/л или  $\sim 30$  Дж/л·атм. Уменьшение энергии излучения с ростом давления в обоих случаях связано с тем, что допустимая величина электрического напряжения на накопительном конденсаторе не превышала 40 кВ. Генерация в лазере с УФ предыонизацией наблюдалась при максимальном давлении активной среды 1.1 атм, причем предельное давление может быть увеличено при соответствующем выборе параметров электрической схемы.

Следует отметить важное преимущество лазера с УФ предыонизацией по сравнению с лазером, в котором не использовался вспомогательный разряд. Добавление легкоионизируемой присадки в газовую смесь лазера, накачиваемого разрядом без предыонизации, приводило к увеличению в  $\sim 2.2$  раза выходной энергии и расширению диапазона давлений устойчивого горения разряда [6], в то время как в лазере с УФ предыонизацией с помощью предлагаемой схемы легкоионизируемая присадка практически не влияла на выходные энергетические характеристики. Это означает, что высокий энергосъем в лазере с УФ предыонизацией может быть достигнут без использования легкоионизируемой присадки. Расположение источника УФ излучения в предлагаемой схеме непосредственно в разрядном промежутке на поверхности катода позволяет эффективно использовать излучение вспомогательных зарядов и достичь однородной ионизации прикатодного слоя.

Оптимизация состава газовых смесей в лазере с УФ предыонизацией позволила увеличить выходную энергию и КПД лазера до 2.5 Дж и 6.5 % соответственно. На рис. 3 представлены зависимости энергии излучения и КПД генерации лазера от величины энергии, запасенной в накопительной емкости на единицу объема активной среды для лазерных смесей  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He}$  с соотношением компонент 1 : 4 : 5 (кривые 1, 2) и 1 : 1 : 3 (кривые 3, 4). Давление активной среды в обоих случаях составляло  $\sim 0.4$  атм, КПД лазера определялся по отношению к энергии, запасенной в накопительной емкости.

Как уже отмечалось, индуктивная стабилизация объемного газового разряда обладает существенным преимуществом по сравнению со схемами с рези-

стивной стабилизацией, заключающимся в том, что применение балластных индуктивностей позволяет исключить потери энергии на нагрев балластных нагрузок. В связи с этим представляет интерес сравнить выходные характеристики лазера с индуктивной и резистивной схемами стабилизации разряда.

Характеристики  $\text{CO}_2$  лазера с радиоизотопной предыонизацией и эффективной схемой стабилизации объемного разряда с помощью балластных резисторов описаны в работе [1]. С целью уменьшения потерь энергии в схеме стабилизации балластные нагрузки выполнялись в виде волоконных микрорезисторов

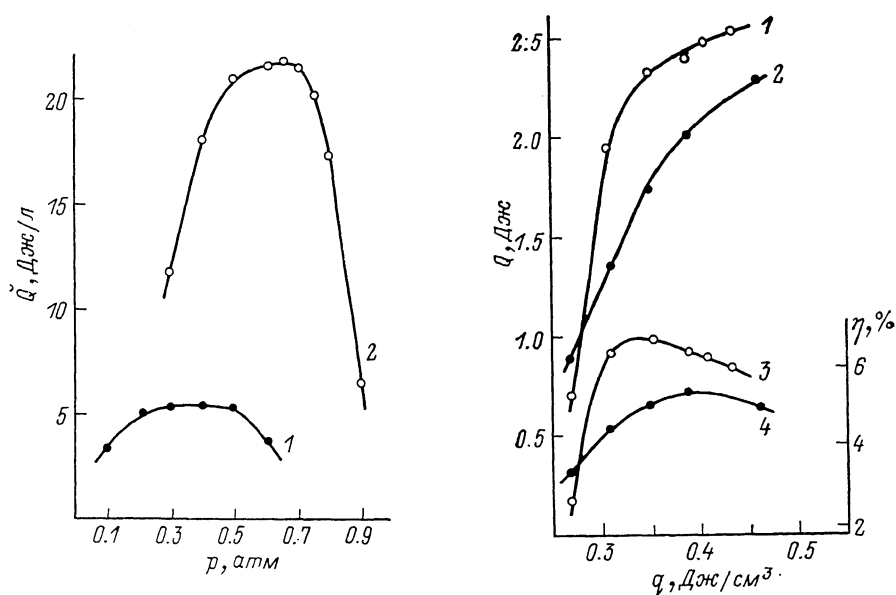


Рис. 2. Зависимость максимальной удельной энергии генерации  $\tilde{Q}$  от давления  $p$ . 1 — без вспомогательного разряда по поверхности катода, 2 — со вспомогательным разрядом.

Рис. 3. Зависимость энергии генерации  $Q$  (1, 2) и КПД генерации  $\eta$  (3, 4) от величины удельной запасенной энергии  $q$ .

1, 3 — смесь  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 4 : 5$ ; 2, 4 — смесь  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 1 : 3$ .

с плотностью упаковки  $450 \text{ см}^{-2}$  на рабочей поверхности электрода. Несмотря на уникальную конструкцию схемы резистивной стабилизации, потери энергии на балластных нагрузках составляли 15—20 % от энергии, вкладываемой в активную среду, и уменьшались до 2—3 % при малых величинах энерговклада. КПД генерации лазера при этом монотонно уменьшался с увеличением энерговклада.

Как видно из рис. 3 (кривые 3, 4), КПД лазера с индуктивной стабилизацией разряда возрастает при увеличении энерговклада и ограничивается, по-видимому, из-за перегрева активной среды в процессе накачки. Максимальный удельный энергосъем в 2 раза превышает энергосъем, достигаемый в лазере с резистивной стабилизацией [1], и составляет 25 Дж/л или 60 Дж/л·атм.

### Заключение

Таким образом, эффективная стабилизация объемного самостоятельного газового разряда достигается с помощью секционированного электрода, секциями которого являются торцы проводов в диэлектрической изоляции, плотно уложенных рядом друг с другом на поверхности электрода. Провода одновременно служат БИН в электрической цепи питания основного разряда. Вспомогательный разряд осуществляется между парами соседних секций по поверхности катода непосредственно в разрядном промежутке. При этом эффективно используется УФ излучение равномерно распределенного по поверхности электрода вспомогательного разряда, что позволяет уменьшить тепловую нагрузку на

устройство предыонизации. Применение БИН в цепи основного разряда исключает резистивные потери энергии в схеме стабилизации. КПД генерации и удельный энергопотребление с активной среды импульсного  $\text{CO}_2$  лазера с предлагаемой схемой индуктивной стабилизации достигает 6.5 % и 60 Дж/л·атм соответственно. Совокупность указанных характеристик особенно важна для создания мощных импульсно-периодических лазеров с высокой частотой повторения импульсов излучения ( $\sim 10^2$ — $10^3$  Гц).

#### Список литературы

- [1] *Лагренюк В. Е., Подмошенский И. В.* // Квантовая электроника. 1986. Т. 13. № 11. С. 2351—2353.
- [2] *Атанасов П. А., Зарослов Д. Ю., Карпов Н. В. и др.* // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. Вып. 15. С. 928—932.
- [3] *Sze R. C.* // J. Appl. Phys. 1983. Vol. 54. N 3. P. 1224—1227.
- [4] *Beaulieu A. L.* // Appl. Phys. Lett. 1970. Vol. 16. P. 504—505.
- [5] *Баранов В. Ю., Борисов В. М., Стрельцов А. П.* // ПТЭ. 1973. № 5. С. 188—190.
- [6] *Лыткин А. П., Романов А. В., Сучков А. Ф.* // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 10. С. 54—57.

Физический институт  
им. П. Н. Лебедева АН СССР  
Москва

Поступило в Редакцию  
3 апреля 1990 г.