

Электроразрядный газовый лазер на основе многосекционного разрядного промежутка

Б.В.Лажинцев, В.А.Нор-Аревян

Разработан электроразрядный лазер с новой конструкцией электродного узла. Созданная электроразрядная система с многосекционными пластинчатыми электродами и автоматической УФ предыонизацией позволяет формировать высокоустойчивый объемный разряд. Получена высокая эффективность генерации в N_2 - и XeF -лазерах. В N_2 -лазере без прокачки газа реализована частота следования импульсов излучения до 200 Гц.

Ключевые слова: пластинчатые электроды, высокоустойчивый объемный разряд, высокочастотный лазер.

Одной из тенденций в развитии импульсно-периодических электроразрядных газовых лазеров является повышение частоты следования импульсов. Так, например, в работе [1] сообщается о создании эксимерного $XeCl$ -лазера с частотой следования импульсов 5 кГц и средней мощностью излучения 560 Вт. Скорость газового потока в рабочем промежутке достигала 137 м/с при габаритах лазерной камеры $1.5 \times 2.5 \times 2$ м. Представляет практический интерес разработка небольших эксимерных лазеров с энергией в импульсе от нескольких единиц до нескольких десятков миллиджоулей, а также азотных лазеров с частотой следования импульсов несколько килогерц при умеренных скоростях прокачки газа. Такие лазеры могут найти применение в обработке материалов, фотолитографии, лазерной очистке поверхности, разделении изотопов и т. д.

Рассмотрим основные предпосылки, реализация которых необходима для создания высокочастотных лазеров. С увеличением частоты следования импульсов в электроразрядных лазерах наиболее существенным моментом становится устойчивость разряда к приэлектродным возмущениям и возмущениям плотности газа в рабочем объеме. Эти процессы приводят к ухудшению однородности разряда, его контрагированию и, как следствие, к срыву генерации [2]. В дальнейшем высокоустойчивым разрядом будем считать такой разряд, который даже при сильных возмущениях плотности газа ($\Delta\rho/\rho > 0.02$) в рабочем объеме не срывается в искровую фазу. Возможность достижения в лазере высокой частоты следования импульсов определяется многими факторами, в том числе геометрией разрядного промежутка, конструкцией электродов, системой предыонизации, скоростью прокачки рабочего газа, а также наличием дополнительных устройств, снижающих акустические возмущения в межэлектродном промежутке.

Наиболее просто высокочастотный режим работы электроразрядного лазера реализуется при небольшой

ширине поперечного сечения разряда накачки. В этом случае требуются более низкие скорости прокачки газа, энергозатрат на единицу длины разряда уменьшается и, соответственно, снижаются интенсивность ударных волн в рабочем объеме и длительность импульса накачки. В результате этого повышается устойчивость разряда.

В эксимерных активных средах на устойчивость разряда в значительной степени влияет также и начальная концентрация электронов, создаваемая источником предыонизации. В лазерах с наиболее часто используемой искровой УФ предыонизацией начальная электронная плотность зависит как от энерговыделения в искровых промежутках в пересчете на единицу длины разряда накачки, так и от их расстояния до активного объема. При создании лазеров с небольшой энергией излучения снижение энергии, запасаемой в накопительной емкости источника накачки, должно сопровождаться уменьшением энергозатрат в искровых промежутках. Это приводит к необходимости приближения искровых промежутков к активному объему для сохранения требуемой начальной концентрации электронов. В высокочастотном режиме приближение системы искровой предыонизации к области разряда часто провоцирует дугообразование в разрядном промежутке.

Время диффузной фазы горения разряда в плотных газах уменьшается с уменьшением межэлектродного промежутка. Так, например, характерное время существования диффузной фазы разряда при зазоре между электродами 4 мм по данным работы [3] составляет ~ 10 нс. В дальнейшем удалось существенно увеличить время устойчивого горения разряда в эксимерных KrF - и $XeCl$ -лазерах при использовании индуктивной стабилизации разряда [4]. В этой работе секционированный катод состоял из изолированных сегментов, каждый из которых подсоединялся к общей шине с помощью индуктивностей. УФ предыонизация осуществлялась через сетчатый анод, расположенный на расстоянии 2.5 мм от катода. Время устойчивого горения разряда составило несколько десятков наносекунд.

Одним из основных результатов работы [4] является реализация импульсно-периодического режима работы лазера с частотой следования импульсов несколько десятков герц без прокачки газовой смеси. Характерная

Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, Россия, 607190 Саров, Нижегород. обл., просп. Мира, 37; тел.: (83130) 4 55 84, факс: (83130) 4 53 84, эл. почта: selemir@vniief.ru

частота следования импульсов в лазерах без индуктивной стабилизации разряда существенно ниже [3].

Следует отметить, что возмущение плотности рабочего газа в активном объеме, связанное с тепловыделением, в лазере без прокачки газа, работающем с частотой более десятка герц, значительно выше, чем в лазере с прокачкой газа. Это связано с тем, что в лазере с прокачкой смеси нагретый газ выносятся из рабочего промежутка за время между импульсами. В режиме без прокачки газа реализация диффузного разряда в лазерном устройстве при частоте следования импульсов в несколько десятков герц свидетельствует о достижении высокой устойчивости разряда. При использовании в аналогичном лазерном устройстве прокачки газа возможно достижение высокой частоты следования импульсов при небольших коэффициентах сменности газа без применения сложных устройств, снижающих акустические возмущения. В связи с этим разработка и исследование таких лазерных устройств имеют принципиальное значение для существенного продвижения в дальнейшем по частоте следования импульсов вплоть до 5–10 кГц.

В настоящей работе исследуется новый вариант электродного узла [5] пластинчатой конструкции с УФ предыонизацией, разработанный для малогабаритных высокочастотных лазеров. На рис.1 представлена принципиальная схема электроразрядного лазера с пластинчатыми электродами. В экспериментах использовалась разрядная камера из алюминиевого сплава с внешним диаметром 24 см и длиной 38 см, в которой с помощью трех проходных изоляторов располагался электродный узел из двух идентичных пластинчатых электродов. Каждый электрод состоял из 49 (в некоторых опытах из 37) изолированных друг от друга латунных пластин толщиной 1 мм с радиусом рабочей кромки 60 мм, расположенных с шагом 5 мм. Электроды устанавливались таким образом, чтобы каждая пластина катода располагалась в плоскости соответствующей пластины анода, причем расстояние между рабочими кромками анодных и катодных пластин могло варьироваться в диапазоне 8–15 мм.

Каждая пара пластин, находящихся в одной плоскости, подсоединена к одному либо двум конденсаторам с общей емкостью C_i , расположенным внутри камеры вблизи электродных пластин, как показано на рис.1, и образует электродную секцию. За счет этого достигалась минимальная индуктивность разрядного контура. Характерный период колебаний тока разряда в электродных секциях $2\pi\sqrt{LC} \leq 20$ нс. Каждая электродная секция соединена с источником накачки через стабилизирующую

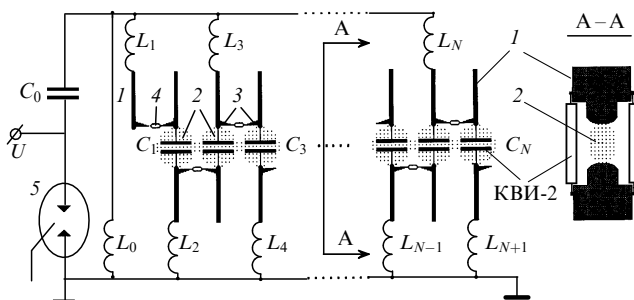


Рис.1. Принципиальная схема экспериментальной установки:

C_0 – накопительная емкость; C_1, \dots, C_N – обострительные емкости; L_1, \dots, L_{N+1} – индуктивности развязки; L_0 – зарядная индуктивность; 1 – электродные пластины; 2 – область объемного разряда; 3 – острия предыонизатора; 4 – искровые промежутки; 5 – разрядник.

щую индуктивность L_i (200–400 нГн) и искровой промежутком, который обеспечивает УФ предыонизацию.

Разряд в межэлектродном промежутке возбуждался высоковольтным генератором, собранным по двухконтурной (C – C) схеме с коммутатором на основе разрядника РУ-73. Накопительная емкость источника разряда C_0 была собрана из конденсаторов КВИ-3 (0.68 нФ, 20 кВ), соединенных последовательно-параллельно и расположенных снаружи разрядной камеры. Накопительная емкость C_0 почти во всех экспериментах выбиралась равной суммарной обострительной емкости: $C_0 \approx \sum_{i=1}^N C_i$, где $N = 49$ либо 37. В качестве обострительных емкостей в экспериментах использовались конденсаторы КВИ-2 (20 пФ, 30 кВ; 33 пФ, 20 кВ; 47 пФ, 20 кВ). После включения разрядника 5 к межэлектродному промежутку прикладывалось напряжение с фронтом нарастания, определяемым временем перезарядки накопительной емкости C_0 и суммарной обострительной емкости. Зеркала плоскопараллельного резонатора лазера располагались на фланцах лазерной камеры и являлись одновременно торцевыми окнами разрядной камеры.

В качестве модели для исследования устойчивости разряда к температурным возмущениям плотности газа в частотном режиме в настоящей работе в большинстве экспериментов использовался лазер на азотной рабочей смеси. Азотный лазер работает в широком интервале давлений азота и добавок различных буферных газов. В качестве критерия, характеризующего устойчивость разряда, была выбрана предельная частота f_{in} , при которой сохраняется практически линейный рост средней мощности излучения с частотой.

Однородный безыскровой разряд наблюдался вдоль оптической оси азотного лазера в широком диапазоне давлений рабочей смеси. При наблюдении сбоку разряд представлял собой отдельные бочкообразные диффузные плазменные образования между анодными и катодными пластинами, лежащими в одной плоскости, не перекрывающиеся в центральной части разряда.

На рис.2 представлены зависимости средней мощности генерации и КПД лазера при частоте следования импульсов 10 Гц от напряжения зарядки U накопительной емкости C_0 для высот разрядных промежутков $h = 10$ и 15 мм. Видно, что КПД лазера существенно возрастает (более чем в 1.3 раза) с увеличением высоты разрядного промежутка. Это, по-видимому, связано с лучшим согласованием источника накачки с нагрузкой и с увеличением энергии, перебрасываемой в обострительную емкость. Максимальный КПД для азотного лазера с высотой разрядного промежутка $h = 10$ мм составил 0.055 %, а при $h = 15$ мм – 0.075 %. Характерные КПД азотных элект-

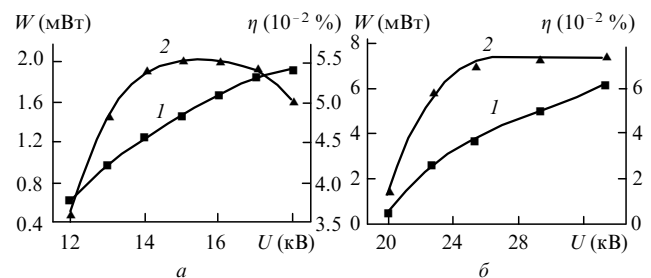


Рис.2. Зависимости мощности генерации W (1) и КПД азотного лазера η (2) от напряжения зарядки U накопительной емкости C_0 для высот разрядного промежутка $h = 10$ (а) и 15 мм (б), $C_0 = 2.2$ (а) и 2 нФ (б), $C_i = 66$ (а) и 40 пФ (б) при давлении азота 91 (а) и 114 Тор (б).

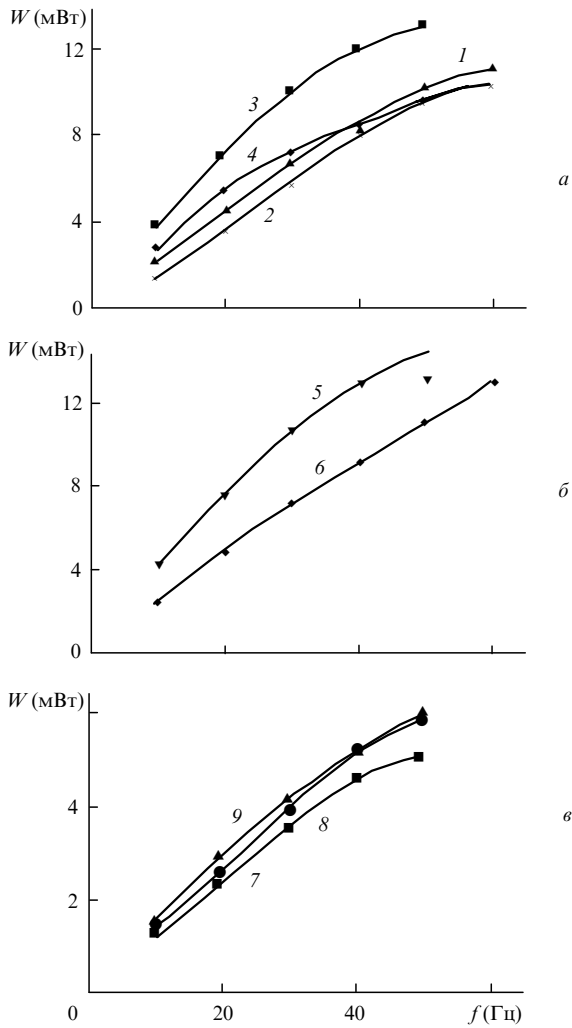


рис.3. Зависимости средней мощности генерации азотного лазера W от частоты следования импульсов f при $h = 10$ мм, $C_0 = 4.7$ нФ, $C_i = 94$ пФ, $U = 16$ (1, 2) и 22 кВ (3, 4), давления азота 91 (1), 114 (2, 3) и 152 Тор (4) (а), $h = 10$ мм, $C_0 = 4.7$ нФ, $C_i = 94$ пФ, $U = 22$ кВ, давления азота 91 Тор (5) для смеси состава $N_2:He = 46:1000$ Тор (6) (б), $h = 8.8$ мм, $C_0 = 2.35$ нФ, $C_i = 47$ пФ, $U = 22$ кВ, давления азота 91 (7) и 114 Тор (8) для смеси состава $N_2:He = 46:760$ Тор (9) (в).

роразрядных лазеров обычно равны 0.05–0.1 %. Следует отметить, что КПД лазера при частоте следования импульсов 10 Гц практически совпадает с КПД лазера в режиме редко повторяющихся импульсов.

В [6] приведена зависимость средней мощности генерации азотного лазера без УФ предыонизации от частоты следования импульсов. Удельная энергия накачки на единицу длины активного объема (вдоль оптической оси) составляла ~ 0.1 Дж/см. В качестве активной среды использовался чистый азот. Линейный рост мощности излучения лазера наблюдался до $f_{lin} \approx 10$ Гц. В работе [7] более высокая частота следования импульсов ($f_{lin} \sim 20-25$ Гц) получена в азотном лазере с УФ предыонизацией на смеси азота с гелием; конструкция лазера обеспечивала самопрокачку газа. Удельная энергия накачки составляла ~ 0.15 Дж/см. Аналогичные результаты получены в [7] и для эксимерного лазера на смеси $He-Xe-HCl$.

В нашей работе основное внимание уделено исследованию зависимости средней мощности излучения азотного лазера от частоты следования импульсов. Характерный диапазон удельных энергий накачки составлял $\sim 0.02-0.05$ Дж/см. Результаты экспериментов даны на

рис.3. При удельной энергии накачки ~ 0.05 Дж/см линейный рост средней мощности излучения в чистом азоте имел место до $f_{lin} \sim 20-30$ Гц (кривые 3–5 на рис.3), причем при неоптимальном давлении рабочей смеси наблюдается более медленный рост мощности излучения с увеличением частоты следования импульсов (кривая 4). Снижение удельной энергии накачки до ~ 0.026 Дж/см за счет уменьшения либо накопительной емкости, либо напряжения зарядки приводит к увеличению f_{lin} до 40–50 Гц (кривые 1, 7, 8). При уменьшении в экспериментах удельной энергии накачки до ~ 0.01 Дж/см был реализован безыскровой диффузный разряд с частотой следования импульсов 200 Гц при мощности лазерного излучения 6 мВт. При этом КПД лазера снизился в ~ 1.5 раза. Дальнейшее увеличение частоты следования импульсов ограничивалось возможностями системы зарядки.

Наиболее существенное увеличение f_{lin} имеет место при добавлении к азоту буферного газа He (рис.3, кривая б). В этом случае при удельной энергии накачки ~ 0.05 Дж/см получены $f_{lin} > 60$ Гц и средняя мощность излучения 13 мВт. Очевидно, это связано со снижением возмущений плотности активной среды за счет существенного увеличения теплоемкости рабочего газа при добавлении гелия. При удельной энергии накачки ~ 0.026 Дж/см добавление к азоту He при давлении 1 атм (кривая 9) не дает увеличения f_{lin} ($f_{lin} \sim 40$ Гц). Это, по-видимому, связано с незначительным превышением порога генерации при уменьшении энергии накачки и с увеличением потерь лазерного излучения при повышении частоты следования импульсов.

Надо отметить более быстрый, чем линейный, рост средней мощности излучения с увеличением частоты следования импульсов от 10 до 60 Гц при давлении азота 114 Тор (рис.3, кривая 2). Это связано с тем, что с увеличением частоты следования импульсов заметно снижается плотность рабочей смеси в рабочем промежутке за счет разогрева газа и в результате плотность газа в области разряда становится близкой к оптимальной (оптимальное давление азота при работе в режиме редко повторяющихся импульсов составляет ~ 90 Тор). Из оценок следует, что в активной среде лазера имеют место существенные флуктуации плотности газа ($\Delta\rho/\rho \sim 0.1-0.2$).

Было проведено также исследование параметров эксимерного XeF-лазера с добавкой NF_3 в качестве донора фтора и буферными газами Ne и He при давлении до 2 атм. Во всех случаях имел место безыскровой диффузный разряд. Измерялись энергия генерации одиночных импульсов и средняя мощность излучения при частоте следования импульсов 10 Гц.

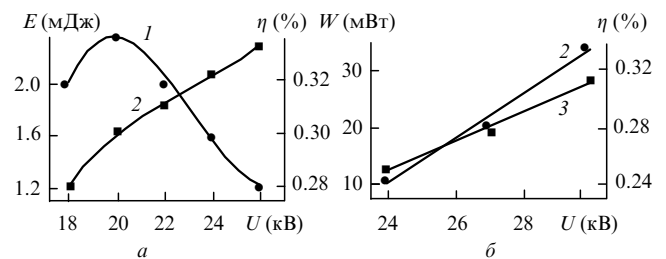


рис.4. Зависимости энергии E (1) и КПД η (2) генерации, а также средней мощности излучения W при частоте следования импульсов 10 Гц (3) эксимерного XeF-лазера от напряжения зарядки U накопительной емкости C_0 для рабочих смесей состава $NF_3:Xe:Ne = 6:15:760$ Тор при $h = 10$ мм, $C_0 = 2.2$ нФ, $C_i = 66$ пФ (а) и $NF_3:Xe:Ne = 5:10:760$ Тор при $h = 15$ мм, $C_0 = 2$ нФ, $C_i = 40$ пФ (б).

На рис.4 приведены характерные зависимости энергии одиночного импульса, средней мощности генерации, а также КПД лазера от напряжения зарядки накопительной емкости для высот разрядных промежутков 10 и 15 мм. Видно, что максимальный КПД лазера на смесях состава $\text{NF}_3:\text{Xe}:\text{Ne} = 6:15:760$ и $5:10:760$ при полном давлении порядка 1 атм превышает $\sim 0.34\%$. Такая эффективность является типичной для XeF-лазера на основе NF_3 с коротким импульсом накачки (см., напр., [8]). Следует отметить, что детальная оптимизация XeF-лазера в настоящей работе не проводилась.

Линейное возрастание средней мощности излучения XeF-лазера с увеличением частоты следования импульсов имело место до $f_{\text{lin}} \sim 30$ Гц. Однородный диффузный разряд наблюдался во всем исследованном диапазоне частот следования (до 60 Гц) и давлений рабочей смеси (до 2 атм). В экспериментах удельная энергия накачки составляла $\sim 0.02-0.04$ Дж/см. В этих условиях обеспечивалась необходимая начальная концентрация электронов.

Таким образом, лазер с пластинчатыми электродами и индуктивно-емкостной стабилизацией обладает высокой устойчивостью разряда к возмущениям плотности рабочего газа. Electrodes такой конструкции можно использовать при создании высокочастотных электроразрядных лазеров и эксимерных ламп. Большим преимуществом пластинчатых электродов является также возможность прокачки газовой рабочей среды через электроды. В этом случае, с нашей точки зрения, можно существенно снизить коэффициент сменности газа (ниже 1.5) в импульсно-периодическом режиме работы лазера.

При малой удельной энергии накачки ~ 0.01 Дж/см в случае, если не требуется получение расходимости излучения, близкой к дифракционной, возможно создание электроразрядных лазеров, при прокачке активной среды которых коэффициент сменности газа будет значительно меньше единицы. В результате открывается перспектива создания относительно простых высокочастотных (5–10 кГц) эксимерных ламп и электроразрядных лазеров с невысокой скоростью прокачки газа порядка 10–20 м/с.

1. Goto T., Kakizaki K., Takagy S., Okamoto N., Sato S., Kosugi S., Ohishi T. *Rev.Sci.Instrum.*, **66**, 5162 (1995).
2. Баранов В.Ю., Борисов В.М., Степанов Ю.Ю. *Электроразрядные эксимерные лазеры на галогенидах инертных газов* (М., Энергоатомиздат, 1988).
3. Sze R.C., Seegmiller E. *IEEE J.Quantum Electron.*, **17**, 81 (1981).
4. Sze R.C. *J.Appl. Phys.*, **54**, 1224 (1983); US Patent № 4601039 (1986).
5. Лажинцев Б.В., Нор-Аревян В.А. Патент России № 2089981 (5 января 1996); *БИ*, № 25, 355 (1996).
6. Антонов В.С. *Квантовая электроника*, **5**, 915 (1978).
7. Ломаев М.И., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. *Изв. АН. Сер. физич.*, **58**, 55 (1994).
8. Wang C.P. *Appl.Phys.Letts*, **29**, 103 (1976).

B.V.Lazhintsev, V.A.Nor-Areвяn. Electric-discharge gas laser based on a multisectional discharge gap.

An electric-discharge laser with an electrode unit of novel design was developed. An electric-discharge system made employs multisectional plate-like electrodes and an automatic UV preionisation that makes it possible to form a highly stable volume discharge. High-efficiency lasing in N_2 and XeF lasers was obtained. A pulse repetition rate up to 200 Hz was realised in the N_2 laser without recourse to gas transport.