

Азотный лазер с частотой повторения импульсов 11 кГц и расходимостью излучения 0.5 мрад

В.В.Атежев, С.К.Вартапетов, А.К.Жигалкин, К.Э.Лапшин, А.З.Обидин

Создан высокочастотный импульсно-периодический УФ азотный лазер с генератором сжатия импульсов накачки на магнитных звеньях. Исследованы особенности работы лазера при частоте повторения импульсов до 11 кГц. Получена генерация со средней мощностью излучения 1.4 Вт при расходимости излучения менее 0.5 мрад.

Ключевые слова: азотный лазер, импульсный разряд, генератор высоковольтных импульсов, высокая частота следования импульсов.

1. Введение

Лазеры УФ диапазона со средней мощностью излучения 1–10 Вт находят все более широкое применение при решении прикладных и научно-исследовательских задач. Обычно источниками УФ излучения служат эксимерные лазеры или твердотельные лазеры с преобразованием частоты генерации. Однако в данном диапазоне выходной мощности альтернативой указанным лазерам вполне может быть электроразрядный лазер на молекулярном азоте, N₂-лазер, который генерирует короткие ($\tau < 10$ нс) импульсы на длине волны $\lambda = 337$ нм. Благодаря относительной простоте и надежности конструкции он может быть существенно дешевле других лазеров УФ диапазона. Азотные лазеры используются при изготовлении и ретушировании фотошаблонов, для микромаркировки, накачки лазеров на красителях и т. д. Применение N₂-лазеров особенно целесообразно при использовании УФ излучения в условиях экологически чистых производств и в медицинских целях, где предъявляются повышенные требования к безопасности и чистоте окружающей среды.

В различных работах продемонстрирована возможность генерации одиночных импульсов в азотных лазерах с энергией несколько десятков миллиджоулей [1], а также достижения частот повторения в несколько килогерц и средней мощности до 20 Вт [2–4]. Использование азотных лазеров часто ограничивается малой средней мощностью и высокой расходимостью излучения. Увеличение энергии импульсов излучения азотных лазеров не эффективно, т. к. вследствие низкого КПД лазера резко возрастают его габаритные размеры, а также сложности при конструировании низкоиндуктивных разрядных цепей. Кроме того, увеличение габаритов разрядной системы

приводит, как правило, к увеличению расходимости излучения.

Более рациональным с точки зрения роста средней мощности излучения азотных лазеров представляется увеличение частоты следования импульсов генерации. Известно, что оно достигается путем роста скорости обновления газа в разрядном промежутке, уменьшения размера разрядной зоны в направлении газового потока, обеспечения высокой однородности объемного разряда накачки, снижения удельных энергозатрат в разряд [5], а также демпфирования акустических колебаний в объеме накачки, вызванных предыдущим разрядом [6]. Тем не менее решены далеко не все проблемы, связанные с работой импульсных газовых лазеров (азотных, эксимерных, СО₂) при высоких частотах следования.

Целью настоящей работы было создание УФ азотного лазера с малой расходимостью, частотой следования импульсов $f \geq 10$ кГц и средней мощностью излучения $P > 1$ Вт, а также исследование выходных параметров и режимов работы в данном частотном диапазоне.

2. Конструкция лазера

Газоразрядная камера сконструирована по традиционной схеме ТЕА-лазера с замкнутым контуром прокачки газа и расположена в цилиндрическом корпусе из алюминиевого сплава с внутренним диаметром 240 мм и длиной 180 мм (рис. 1). Высоковольтный катод 1 и заземленный анод 2 имеют простую в изготовлении цилиндрическую рабочую поверхность радиусом 1.5 мм, ширину 3 мм и длину 120 мм. Электроды установлены на легко снимающейся крышке из изоляционного материала и образуют разрядный промежуток $d = 8$ мм. Для снижения напряженности электрического поля в зоне выхода газа из разрядного промежутка обратный токопровод, соединяющий анод с внешними обостряющими конденсаторами 3, расположен только в конфузурной части контура прокачки. Для снижения потерь кинетической энергии потока газа на выходе из разрядного промежутка диффузор имеет угол раскрытия 15° на длине 120 мм, а в местах поворота потока установлены направляющие газового потока 7 [7].

В.В.Атежев, С.К.Вартапетов, А.К.Жигалкин, К.Э.Лапшин, А.З.Обидин. Центр физического приборостроения Института общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 142190 Троицк, Московская обл.; тел.: (095) 334 02 12, факс: (095) 334 02 16; http://www.pic.troitsk.ru, e-mail: kos@pic.troitsk.ru

Поступила в редакцию 1 апреля 2004 г., после доработки – 21 июня 2004 г.

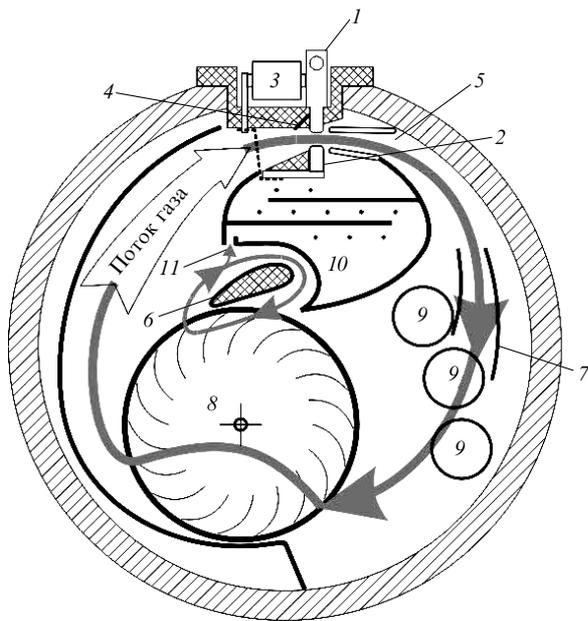


Рис.1. Поперечное сечение газоразрядной камеры: 1 – высоковольтный катод; 2 – заземленный анод; 3 – обостряющая емкость; 4 – ножевой предыонизатор; 5 – диффузор; 6 – вихреобразователь диаметального вентилятора; 7 – направляющие потока; 8 – крыльчатка диаметального вентилятора; 9 – радиаторы охлаждения; 10 – электростатический фильтр; 11 – вход газа в электростатический фильтр.

Источником предыонизации служил импульсный коронный разряд от ножевой кромки предыонизатора 4, короткозамкнутого с высоковольтным катодом. Ножевая кромка расположена в плоскости поверхности диэлектрической стенки газопрокачного контура и поэтому не нарушает течения газового потока. Предыонизатор такой конструкции потребляет доли процента энергии, вкладываемой в разряд накачки, и не создает ударных волн, ухудшающих однородность основного разряда. Его электроды практически не распыляются и не загрязняют рабочую смесь.

Прокачка газа осуществлялась с помощью диаметального вентилятора диаметром 110 мм. Аэродинамическая схема контура прокачки была разработана авторами совместно с филиалом ЦАГИ [8]. В отличие от обычной схемы прокачки, данная схема содержит вихреобразователь 6 в выходном патрубке. Аэродинамическая характеристика такого вентилятора имеет примерно в три раза большее относительное давление в области малых производительностей. Вращение крыльчатки вентилятора 8 осуществляется от асинхронного электродвигателя через герметизирующую магнитную муфту, при этом возможно постепенное изменение частоты вращения. Для отвода тепла в расширенной части контура установлены трубные пластинчато-ребристые водоохлаждаемые радиаторы 9 с общей площадью теплоотвода по газу 0.36 м².

Для очистки газа от пыли, образующейся в результате эрозии электродов, в центральной зоне газопрокачного контура установлен электростатический фильтр 10. Вход газа в фильтр 11 расположен в выходном патрубке вентилятора – зоне наибольшего давления в контуре.

Известно, что для эффективного возбуждения азотного лазера требуется как можно более мощная и достаточно быстрая накачка активной среды, осуществляемая

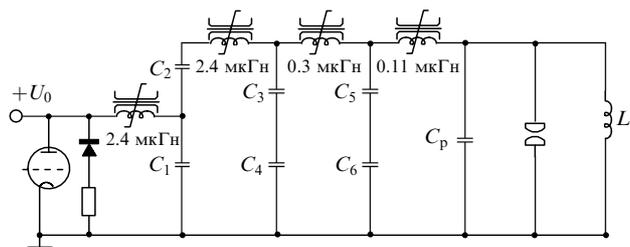


Рис.2. Схема высоковольтного генератора накачки N₂-лазера с тремя звеньями сжатия; C₁₋₆ = 1 нФ, C_p = 0.57 нФ.

вблизи максимума разрядного напряжения U_m [6]. В этом случае существенная доля запасенной электрической энергии вкладывается в активную среду при повышенной приведенной напряженности поля $E/p > 100 \text{ В} \times \text{см}^{-1} \cdot \text{Тор}^{-1}$, необходимой для эффективного возбуждения верхнего лазерного уровня C^3P_u . Чтобы реализовать подобные условия возбуждения при высокой частоте следования импульсов в настоящей работе использовался описанный ранее высоковольтный генератор [9] с магнитными звеньями сжатия импульсов напряжения, в котором коммутатором служил тиратрон.

В настоящей работе исследовалось несколько вариантов схем высоковольтного генератора накачки с использованием магнитных звеньев сжатия. Число звеньев сжатия варьировалось от одного до четырех. На рис.2 изображена схема высоковольтного генератора с тремя звеньями сжатия, которая по результатам исследований была выбрана как наиболее эффективная. Емкости конденсаторов C₁ – C₆ одинаковы и равны 1 нФ. Емкость обострительного конденсатора C_p = 0.57 нФ. Приведенные на схеме индуктивности магнитных звеньев сжатия соответствуют насыщенному состоянию сердечников. Каждый нелинейный индуктивный элемент представляет собой последовательно-параллельное соединение из нескольких индуктивностей, выполненных на ферритовых кольцах. Все элементы генератора накачки, кроме обострительного конденсатора и тиратрона, помещены в охлаждаемое трансформаторное масло. Такая конструкция компактна и обеспечивает необходимый тепловой режим ферритовых сердечников. Обратное перемагничивание всех сердечников звеньев сжатия осуществляется током заряда накопительного конденсатора C₂, проходящего от импульсного высоковольтного источника питания последовательно через все катушки звеньев сжатия.

В табл.1 приведены параметры четырех исследованных схем генератора накачки, полученные при напряже-

Табл.1.

Параметр	Схемы генератора накачки с различным числом звеньев сжатия			
	1	2	3	4
Длительность тока тиратрона (нс)	70	150	150	450
Амплитуда тока тиратрона (А)	500	250	250	80
Амплитуда напряжения на обострительном конденсаторе (кВ)	13.6	13.6	13.7	13.1
Длительность фронта напряжения на обострительном конденсаторе (нс)	24	24	14	14
КПД генератора накачки (%)	36	36	37	34
Энергия генерации лазера (мкДж)	105	111	139	126
КПД лазера (%)	0.075	0.08	0.1	0.09

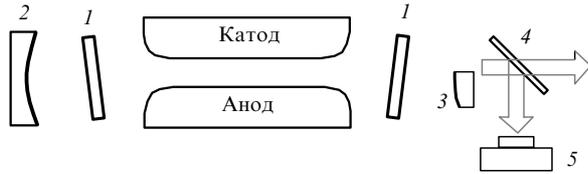
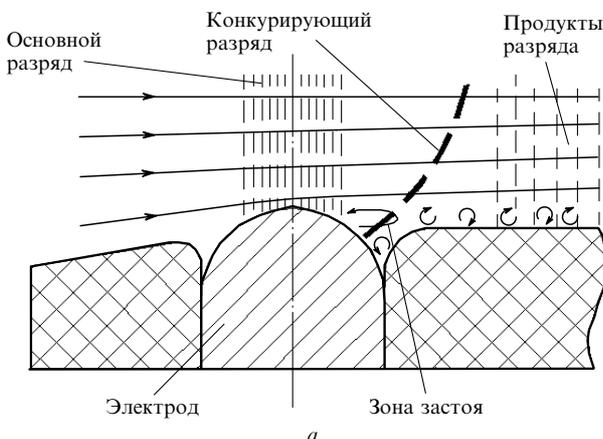


Рис.3. Схема резонатора N_2 -лазера: 1 – переднее и заднее герметизирующие окна из кварца; 2 – вогнутое зеркало; 3 – выпуклое зеркало со стороны выхода излучения; 4 – делительная пластина; 5 – измеритель энергии и мощности ИМО-2.

нии питания $U_0 = 12$ кВ, частоте следования импульсов накачки $f = 2$ кГц и давлении азота в разрядной камере лазера 170 мбар. КПД генератора определялся как отношение энергии, накопленной в конденсаторе C_p в момент пробоя разрядного промежутка, к энергии, запасенной в емкости $C_1 + C_2$.

Из приведенных экспериментальных данных следует, что эффективность лазера зависит от мощности, выделяемой на начальной стадии разряда ($\sim U_m^2 L^{-1/2}$) [3]. Причем чем больше напряжение U_m , формируемое на емкости C_p , и меньше индуктивность L (индуктивность последнего звена сжатия в насыщенном состоянии сердечника), через которую емкость заряжается, тем выше КПД. Максимальный полный КПД лазера, равный 0.1%, реализуется в схеме генератора с тремя магнитными звеньями сжатия. Из данных табл.1 видно, что даже относительно небольшое сжатие фронта напряжения, достигаемое в третьем звене, ведет к заметному росту эффективности накачки. Схема с четырьмя звеньями сжатия существенно уменьшает амплитуду тока тиратрона и снижает стартовые потери при некотором снижении полного КПД лазера. Таким образом, четырехзвенная схема генератора предпочтительнее только с точки зрения повышения ресурса тиратрона.

Для получения излучения с малой расходимостью в лазере использовался неустойчивый резонатор, оптическая схема которого приведена на рис.3. Конструктивной особенностью резонатора является то, что выходное зеркало представляет собой фрагмент сферической поверхности с характерным размером ~ 1.5 мм, смещенный от оси резонатора к краю разрядного промежутка. При таком расположении выходного зеркала резонатора выходной пучок излучения имеет достаточно равномерное распределение интенсивности по сечению, в котором отсутствует центральное темное пятно.



3. Экспериментальные результаты

Средняя скорость потока в разрядном промежутке измерялась микроманометром ММН-2400-1.0 при заполнении газоразрядной камеры лазера атмосферным воздухом. Пересчитанная по критерию подобия Рейнольдса [10], средняя скорость v рабочего газа (азот при давлении 200–300 мбар) при максимальной частоте вращения крыльчатки вентилятора 5800 об./мин составляла более 55 м/с.

Поперечное сечение разряда было равно 1.6×8 мм. С увеличением частоты следования импульсов до некоторого предельного значения f_{lim} наблюдался рост средней мощности генерации. Затем (при $f > f_{lim}$) начинался резкий спад выходной мощности, вызванный возникновением конкурирующего электрического пробоя, который шунтировал разряд накачки. Величина f_{lim} линейно росла с увеличением частоты вращения крыльчатки вентилятора и достигала 6.1 кГц при максимальной частоте вращения. Пробой развивался между боковыми поверхностями электродов лазера со стороны выхода газового потока из разрядного промежутка на расстоянии от разряда накачки $d \leq 5$ мм. При этом на данной частоте поток сносит основной объем газа, отработанного в предыдущем импульсе накачки, на расстояние $\Delta = v/f_{lim} > 9$ мм, что значительно превышает 5 мм и не может являться основной причиной возникновения конкурирующего пробоя.

Ограничения f_{lim} могут быть связаны с рядом факторов. В импульсных ТЕА-лазерах обеспечение плавного сопряжения электродного профиля со стенками газового канала без искажения электрического поля, формирующего разряд накачки, представляет значительные трудности. Вследствие этого за электродами может возникать обратное течение потока, масштабы которого возрастают с увеличением скорости газа [11].

Кроме того, скорость потока вблизи стенок канала существенно меньше средней скорости потока; при этом продукты воздействия сильного тока разряда на газовую среду и материал электродов концентрируются в приэлектродных слоях. Наиболее вероятно, что конкурирующий пробой инициируется высокоионизованными продуктами разряда, оставшимися от предыдущего импульса в приэлектродных зонах (рис.4,а). Действительно, концентрацию электронов в азоте после импульса возбуждения можно определить по формуле (1) из [10]:

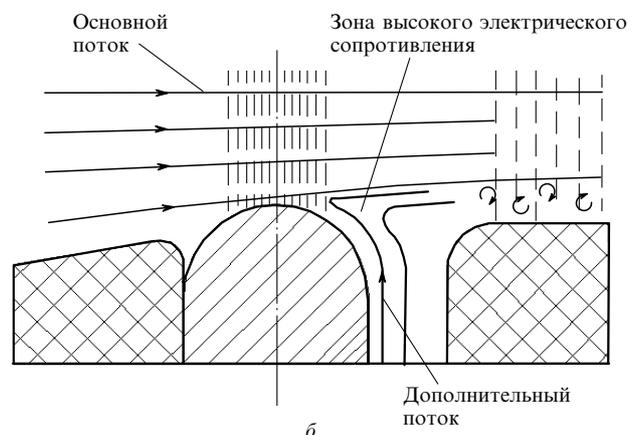


Рис.4. Поперечный разрез приэлектродной зоны – схема образования конкурирующего разряда (а) и схема замещения ионизованного газа нейтральным с помощью дополнительного потока (б).

$$n_e = \frac{n_0}{1 + \beta n_0 t} \approx \frac{1}{\beta t},$$

где β – коэффициент диссоциативной электрон-ионной рекомбинации. Для азота $\beta \approx 2 \times 10^{-7} \text{ см}^3/\text{с}$, $n_0 \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ – концентрация плазмы, созданная в результате ионизационного размножения электронов в разрядном промежутке. Для интервала между импульсами $t = f^{-1} < 1.7 \times 10^{-4} \text{ с}$ ($f > 6 \text{ кГц}$) получим $n_e > 10^{11} \text{ см}^{-3}$. Это означает, что продукты предыдущего разряда к моменту последующего импульса сохраняются в виде плазмы с концентрацией электронов, намного превышающей их начальную концентрацию ($n_e < 10^8 \text{ см}^{-3}$ [12]), обеспечиваемую предыонизацией разрядного промежутка.

Известно [13], что в результате поляризации плазма экранирует электрическое поле внутри занимаемого ею объема и усиливает его снаружи. Этот процесс имеет характерное время $\tau = (4\pi\mu en_e)^{-1}$, где μ и e – соответственно подвижность и заряд электрона. Для рассматриваемых условий (давление азота $p \approx 200 \text{ мбар}$, $\mu \approx 2.2 \times 10^3 \text{ см}^2 \times \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ [14]) $\tau \approx 2.5 \times 10^{-9} \text{ с}$, что много меньше длительности фронта напряжения на разрядном промежутке (см. табл. 1). Следовательно, влияние высокоионизованной плазмы на условия пробоя разрядного промежутка подобно влиянию проводника, имеющего форму занимаемого плазмой объема, и тем самым может искажать формируемое электродами поле и инициировать конкурирующий пробой.

Для уменьшения негативного влияния рассмотренных ранее факторов газопрокачной контур был усовершенствован введением дополнительного канала шириной около 1.5 мм вдоль всей боковой поверхности каждого электрода со стороны выхода газа из разрядного промежутка (рис.4,б). Через эти каналы в зону разряда подавался газ, прошедший через систему охлаждения и устройство электростатической очистки [15]. При этом не требовалось дополнительных средств прокачки, т. к. входы и выходы каналов размещались соответственно в зонах высокого и низкого давлений газопрокачного контура. Это позволило повысить электрическую прочность газа в приэлектродных зонах и тем самым увеличить частоту следования импульсов генерации f_{lim} до 11 кГц.

В ходе экспериментов состав и давление рабочей смеси оптимизировались по максимуму средней мощности излучения через каждые 500 Гц (рис.5). Выходная мощность лазера при $f \leq 3 \text{ кГц}$ была максимальна на безгелиевой смеси при давлении чистого азота 200 мбар.

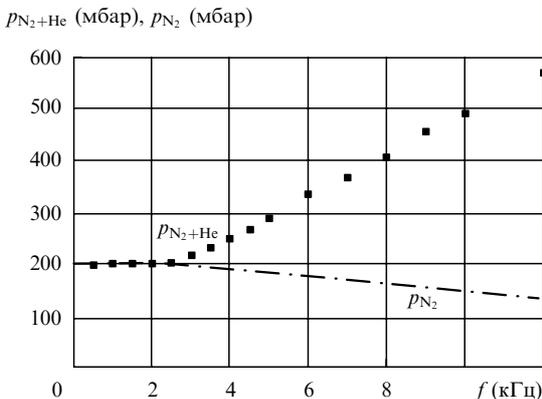


Рис.5. Зависимости оптимального давления азота p_{N_2} и давления смеси азот-гелий p_{N_2+He} от частоты следования импульсов f .

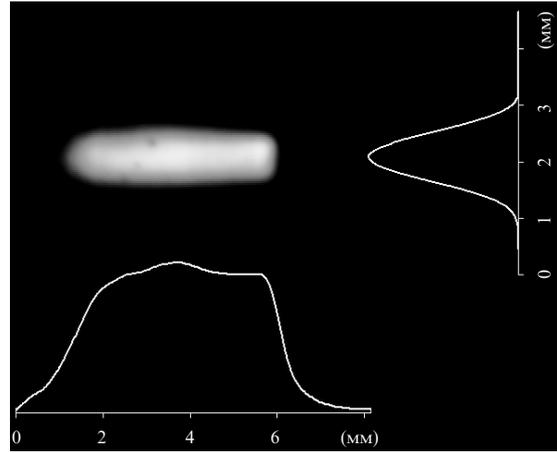


Рис.6. Распределение интенсивности в выходном пучке лазера, измеренное на расстоянии 30 см от выходной апертуры.

Дальнейшее увеличение f при сохранении энергии импульсов достигается при работе на рабочей смеси с добавлением гелия N_2-He . Для $f = 11 \text{ кГц}$ оптимальной является смесь, содержащая азот при парциальном давлении 140 мбар (общее давление смеси 560 мбар). Увеличение теплопроводности рабочего газа (теплопроводность гелия в 6 раз выше теплопроводности азота) сдвигает вверх по частоте начало критического роста неоднородностей в объеме разряда накачки. На оптимизированной рабочей газовой смеси при максимальной частоте следования импульсов лазер работает стабильно со средней мощностью излучения 1.4 Вт.

Пучок генерации имел прямоугольное сечение размером $1.5 \times 6 \text{ мм}$. Для расстояния между зеркалами 230 мм наибольшая энергия получена на неустойчивом телескопическом резонаторе с коэффициентом увеличения $M = 3.8$ (сравнивались результаты с $M = 2.9, 3.8, 5.6$ и 7.5). На рис.6 приведено распределение интенсивности в выходном пучке лазера, а на рис.7 – результаты измерения расходимости методом фокального пятна. Угловая расходимость выходного излучения, измеренная по уровню 50% полной энергии, составила 0.4 мрад. Форма импульса генерации приведена на рис. 8. Длительность лазерного импульса по полувысоте составила 3.5 нс.

Продолжительная эксплуатация показала, что средняя мощность излучения непрерывно работающего лазера уменьшалась примерно на 1% через каждый миллион импульсов (без замены рабочего газа). При частичной замене газовой смеси, осуществляемой малыми порциями (по 15 мбар), лазер выходил на стационарный режим

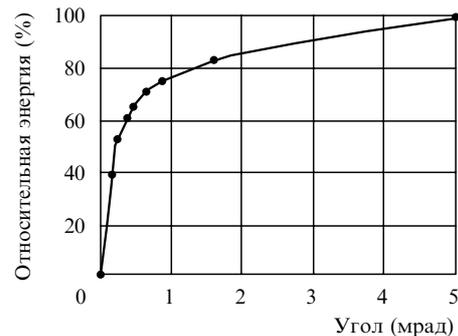


Рис.7. Результаты измерения расходимости методом фокального пятна.

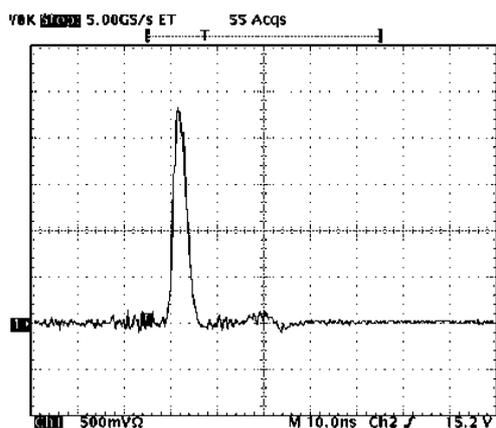


Рис.8. Форма импульса генерации.

после 3×10^6 импульсов и работал с постоянной выходной мощностью непрерывно в течение всего рабочего дня. Применение электростатического фильтра для очистки рабочего газа от продуктов распыления электродов обеспечивало ресурс выходных окон более 10^8 импульсов.

4. Заключение

Таким образом, создан УФ азотный лазер с выходной средней мощностью 1.4 Вт и расходимостью излучения менее 0.5 мрад. Установлено, что при использовании генератора с магнитным сжатием импульсов схема с тремя звеньями является наиболее эффективной для накачки импульсно-периодического N_2 -лазера.

Показано, что увеличению частоты следования лазерных импульсов препятствует высокоионизованная плазма, остающаяся от предшествующего разряда накачки, которая из-за плохообтекаемой формы электродов находится вблизи разрядного промежутка и провоцирует возникновение конкурирующего пробоя. Вытеснение про-

дуктов предыдущего разряда нейтральным газом, подаваемым через дополнительные газовые каналы, способствует повышению электрической прочности газа в приэлектронных зонах и повышению пороговой частоты f_{lim} до 11 кГц. Кроме того, для обеспечения стабильной работы лазера на высоких частотах требуется увеличивать теплопроводность рабочего газа с помощью добавок гелия.

Результаты, изложенные в данной статье, получены в ходе работы по созданию УФ лазера для титрования киноплёнки, проведенной авторами по инициативе и при поддержке фирмы «Cinema magnetique communication», Франция.

1. Armandilo E., Kearsley A.J. *Appl. Phys. Lett.*, **41** (7), 611 (1982).
2. Папакин В.Ф., Сонин А.Ю. *Квантовая электроника*, **5**, 1580 (1978).
3. Goldort V.G., Ischenko V.N., Kochubei S.A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3574**, 649 (1998).
4. Kozlov B. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3574**, 643 (1998)
5. Dzakovic G.S., Wutzke S.A. *J. Appl. Phys.*, **41** (11), 5061 (1979).
6. Борисов В.М., Борисов А.В., Брагин И.Е., Виноходов А.Ю. *Квантовая электроника*, **22** (5), 446 (1995).
7. Идельчик И.Е. *Справочник по гидравлическим сопротивлениям* (М.: Машиностроение, 1975).
8. Коровкин А.Г., Климова Т.А., Феофилактов А.Н. *Промышленная аэродинамика* (М.: Машиностроение, 1991, с.327).
9. Агеев В.П., Атежев В.В., Букреев В.С., Вартапетов С.К. и др. *ЖТФ*, **56**, 1387 (1981).
10. Солоухин Р.И., Якоби Ю.А., Вязович Е.И., Вагин С.П. *Инж. физ. ж.*, **36** (1), 62 (1979).
11. Краснов Н.Ф., Данилов А.Н., Захарченко В.Ф., Кошевой В.Н. *Основы прикладной аэрогазодинамики. Кн. 2* (М.: Высшая школа, 1991, с.43).
12. Королев Ю.Д., Месяц Г.А. *Физика импульсного пробоя газов* (М.: Наука, 1991).
13. Райзер Ю.П. *Основы современной физики газоразрядных процессов* (М.: Наука, 1980).
14. Мак-Даниэль И. *Процессы столкновений в ионизованных газах* (М.: Мир, 1962).
15. Атежев В.В. Патент РФ № 2132104С1 (1997).