

Компактный ХеF-лазер с частотой следования импульсов 4 кГц и многосекционным разрядным промежутком

А.В.Андрюманов, С.А.Кабаев, Б.В.Лажинцев, В.А.Нор-Аревян, В.Д.Селемир

Разработан электроразрядный ХеF-лазер с частотой следования импульсов f до 4 кГц. Электродный узел лазера выполнен на основе пластинчатых электродов с индуктивно-емкостной стабилизацией разряда. В качестве буферных газов использовались He и Ne, донором фтора служил NF_3 . Реализован узкий (~ 1 мм) разряд, удельный энерговыход на единицу длины активного объема достигал 2 Дж/м. Максимальная энергия импульса генерации составляла ~ 3 мДж для смесей NF_3 -He-Ne и NF_3 -He-Ne при полном давлении 0.8 и 1.2 атм соответственно, максимальный КПД лазера был равен ~ 0.73 %. Максимальная скорость газа в рабочем промежутке достигала 19 м/с. Энергия импульсов лазерного излучения при увеличении частоты следования импульсов до 4 кГц практически совпадала с энергией импульсов лазерного излучения в режиме редко повторяющихся импульсов. Средняя мощность лазерного излучения при $f = 4$ кГц достигала 12 Вт, а среднеквадратичное отклонение σ энергии лазерных импульсов составляло ~ 2.5 %.

Ключевые слова: электроразрядный ХеF-лазер, пластинчатые электроды, индуктивно-емкостная стабилизация, частота следования импульсов, стабильность импульсов излучения.

1. Введение

В последнее время интенсивно развиваются необходимые для технологических применений эксимерные лазеры с высокой (несколько килогерц) частотой следования импульсов [1–3], достигаемой в этих работах путем снижения ширины разряда в направлении движения газового потока до нескольких миллиметров. Вследствие этого в [1] при скорости прокачки газа $V_g \approx 55$ м/с в ХеF-лазере получена частота следования импульсов излучения $f = 5.5$ кГц. Для разрядного объема $550 \times 14 \times 2.8$ мм наилучшие лазерные характеристики достигнуты в работе [1] на газовой смеси F_2 :He:Ne = 3.2:16:2700 мбар при накопительной емкости 4.6 нФ. Средняя мощность лазерного излучения составила 35 Вт, удельный энерговыход на единицу длины активного объема равен ~ 1.5 Дж/м.

В связи с этим в работах [4–6] для получения высоких частот следования импульсов излучения предлагается реализовать предельно узкий разряд за счет применения пластинчатых электродов. В этих работах также впервые предложено использовать многосекционный разрядный промежуток в сочетании с индуктивно-емкостной стабилизацией разряда для получения устойчивого разряда в активной среде электроразрядного лазера. Так, достигнутая в [6] частота следования импульсов излучения в азотном лазере без прокачки газовой смеси превысила 200 Гц. Ширина лазерного пучка в ближней зоне составляла ~ 1.3 мм.

Целью настоящей работы является создание на основе нового электродного узла компактного эксимер-

ного лазера с частотой следования импульсов несколько килогерц при скорости прокачки газовой смеси 19 м/с. В его конструкции используется пластинчатый электродный узел и индуктивно-емкостная стабилизация разряда.

2. Экспериментальные результаты

Прокачной ХеF-лазер разработан на основе рабочей камеры серийного эксимерного лазера CL-5000 (ЦФП ИОФ РАН, Троицк) и нового электродного узла с многосекционным разрядным промежутком. Длина алюминиевого корпуса камеры составляла 430 мм, внутренний диаметр был равен 175 мм. Зеркала резонатора ($R_1 = 100$ %, $R_2 = 30$ %) закреплялись на торцевых фланцах камеры, расстояние между зеркалами резонатора составляло 50 см. Внутри камеры размещались диаметральный вентилятор с диаметром колеса 60 мм, который вращался с помощью магнитной муфты электрическим двигателем постоянного тока с мощностью 80 Вт, и теплообменник, охлаждаемый водой. В верхней части камеры располагался электродный блок с источником накачки лазера.

Разрядный промежуток был образован двадцатью пятью парами анодных и катодных пластин, расположенных в вертикальной плоскости, проходящей через оптическую ось лазера. Высота и полная длина разрядного промежутка составляли 12 и 260 мм соответственно. Предыонизация осуществлялась 25 искровыми разрядами, находящимися с одной стороны разрядного промежутка (вниз по газовому потоку).

Схема импульсной накачки лазера содержала накопительную емкость C_s (3.3 нФ), обострительную емкость C_p (2.35 нФ) и емкость предыонизации C_{pr} (0.5 нФ). Энергопитание лазера осуществлялось от импульсного источника (ЦФП ИОФ РАН). Накопительная емкость заряжалась с помощью устройства резонансно-диодной зарядки за время 240 мкс (фильтрующая емкость составляла 0.22 мкФ). Возможности схемы резонансно-диодной за-

А.В.Андрюманов, С.А.Кабаев, Б.В.Лажинцев, В.А.Нор-Аревян, В.Д.Селемир. Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, Россия, 607188 Саров, Нижегородская обл., просп. Мира, 37; e-mail: mailbox@ntc.vniief.ru

Поступила в редакцию 16 сентября 2004 г., после доработки – 6 декабря 2004 г.

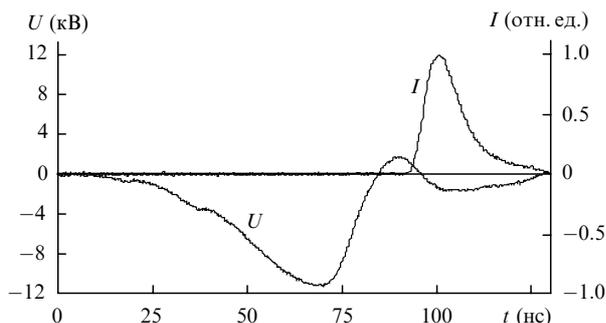


Рис.1. Форма импульсов напряжения на обострительной емкости и лазерного излучения при зарядном напряжении 18 кВ для смеси состава NF_3 : Xe : $\text{He} = 3:6:600$ Тор.

рядки и определяли предельную частоту следования импульсов (4 кГц). При коммутации тиратроном ТГИ-1000/25 накопительной емкости по двухконтурной (С–С) схеме заряжалась обострительная емкость. Для реализации индуктивно-емкостной развязки к каждой паре электродных пластин подсоединялась своя обострительная емкость $C_p^i = 0.094$ нФ. При достижении определенного напряжения на обострительных емкостях происходил пробой искровых промежутков предыонизатора и начиналась зарядка его емкости.

В экспериментах использовалась активная среда $\text{He}(\text{Ne})\text{--Xe--NF}_3$. Полное давление активной смеси достигало 1.2 атм. Типичная осциллограмма импульса напряжения на обострительной емкости и импульса генерации для активной смеси с буферным газом He приведена на рис.1. Фронт нарастания импульса напряжения составляет около 40 нс, амплитуда импульса напряжения достигает 11.4 кВ. Длительность импульса генерации на полувысоте равна ~ 12 нс. При снижении зарядного напряжения накопительной емкости до 16 кВ амплитуда напряжения на обострительной емкости практически не изменяется.

Оптическая схема экспериментов для исследования параметров XeF -лазера приведена на рис.2. Профиль распределения удельного энерговклада по сечению активного объема определялся по свечению разряда в видимой области спектра. Для регистрации свечения разряда использовался цифровой фотоаппарат Olympus C-4040Zoom. Лазерное излучение устранялась за счет разъюстировки зеркал резонатора 3, 6 и использования светофильтра 2. Для увеличения глубины резкости съемка проводилась в параллельных лучах с использованием линзы 4 с фокусным расстоянием 1000 мм, фокальная плоскость которой находилась в центре разрядного промежутка. Объектив фотоаппарата настраивался на бесконечность. Типичная фотография свечения разряда приведена на рис.3,а, интегральное распределение интен-

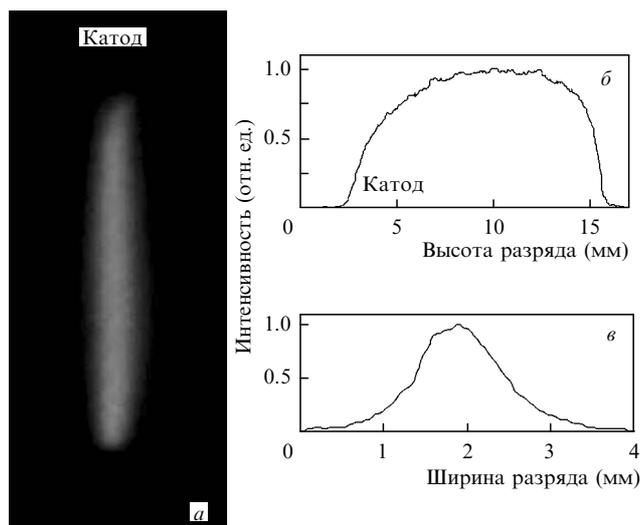


Рис.3. Фотография свечения разряда (а), интегральное распределение интенсивности I излучения по высоте разряда (б) и распределение интенсивности излучения по его ширине (в).

сивности излучения по высоте и распределение интенсивности по ширине разряда – на рис.3,б и в соответственно.

Ширина разряда по уровню половинной интенсивности излучения составляет 1.1 мм (рис.3,в). Следует отметить, что измеренная ширина разряда несколько больше его реальной ширины. Это связано с неточностью установки электродных пластин, которые на самом деле не лежат в одной плоскости. В результате плазменные образования, возникающие между анодно-катодными парами пластин, сдвинуты относительно друг друга по ширине разрядного промежутка. Полученная малая ширина разряда (~ 1 мм) представляет интерес для реализации предельно высоких частот следования импульсов в электроразрядных лазерах с поперечной прокачкой газовой смеси.

Энергия одного импульса излучения при работе в режиме редко повторяющихся импульсов ($f \leq 20$ Гц) определялась с помощью пирозлектрического калориметра 8 ORIEL № 70271 (см. рис.2). Энергия пакета лазерных импульсов (несколько десятков или сотен импульсов) при высокой частоте следования импульсов ($f \geq 1$ кГц) измерялась с помощью термпарного калориметра 9 ORIEL № 70263, имеющего постоянную времени 2.5 с, либо калориметра ИМО-2 с постоянной времени 5 с.

Было установлено, что оптимальное давление NF_3 составляет 2.5–3.5 Тор. В дальнейшем в экспериментах давление NF_3 было равно 3 Тор, а варьировалось давление Xe и буферного газа He (Ne). Энергия импульсов излучения измерялась при $f = 20$ Гц. Результаты этих экспериментов приведены на рис.4.

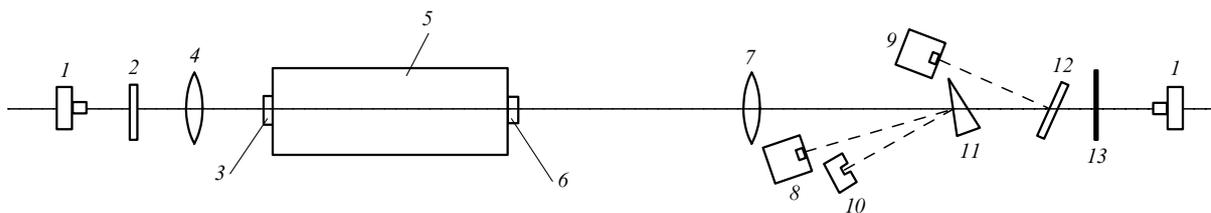


Рис.2. Схема экспериментов для исследования параметров XeF -лазера:

1 – цифровой фотоаппарат; 2 – светофильтр; 3 – глухое зеркало; 4, 7 – линзы; 5 – лазерная камера; 6 – выходное зеркало; 8 – пирозлектрический калориметр; 9 – термпарный калориметр; 10 – измеритель энергии ПИМ-М; 11 – оптический клин; 12 – светоделительная пластина; 13 – люминофор.

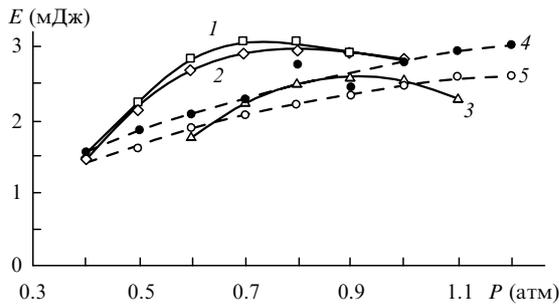


Рис. 4. Зависимости энергии генерации E от полного давления активной смеси состава $\text{NF}_3\text{-Xe-Ne}$ (1, 2, 3) и $\text{NF}_3\text{-Xe-Ne}$ (4, 5); давление NF_3 – 3 Тор, Xe – 7.5 Тор (1), 9 Тор (2, 4) и 6 Тор (3, 5), зарядное напряжение накопительной емкости 18 кВ.

Максимальная энергия генерации E для смесей с буферными газами Ne и Ne была практически одинакова и равна ~ 3 мДж, максимальный КПД по запасенной в накопительной емкости энергии составлял $\sim 0.57\%$. Оптимальное давление для исследованных смесей на основе Ne лежало в диапазоне 0.7–0.9 атм, для смесей на основе Ne рост энергии генерации продолжался до давления 1.2 атм. Более высокое оптимальное давление Ne в активной смеси связано, по-видимому, в основном с меньшей электропрочностью Ne (пробивное напряжение в Ne ниже, чем в Xe). В результате требуется более высокое давление Ne, чтобы обострительная емкость зарядилась до такого же напряжения. Оптимальное давление Xe составляло в опытах 7.5–9 Тор (см. кривые 1, 2 на рис. 4).

На рис. 5 приведены зависимости энергии генерации E и эффективности XeF-лазера η от зарядного напряжения U . Увеличение энергии генерации происходит при повышении зарядного напряжения и сопровождается небольшим снижением КПД. Максимальное КПД (0.73%) имеет место при зарядном напряжении 14 кВ (кривые 4 и 6). На смеси $\text{NF}_3\text{:Xe:Ne}$ с повышенным содержанием неона (кривая 5) максимальный КПД (0.66%) реализуется при зарядном напряжении 16 кВ.

Возможно, что снижение КПД при увеличении зарядного напряжения связано с высокой удельной мощностью накачки. Удельный энергозатрат в активный объем шириной 1 мм при зарядном напряжении 18 кВ составлял ~ 0.09 Дж·см $^{-3}$ (~ 0.11 Дж·см $^{-3}$ ·атм $^{-1}$ для гелиевой смеси), а удельная мощность накачки была равна 9 МВт/см 3 . Эти значения существенно превышают удельные энергозатраты и мощности накачки (~ 0.03 Дж·см $^{-3}$, 0.011 Дж·см $^{-3}$ ·атм $^{-1}$, 3 МВт/см 3), достигнутые в [1]. В работе

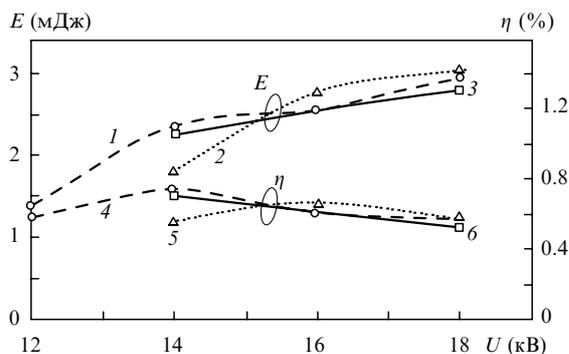


Рис. 5. Зависимости энергии генерации E (1, 2, 3) и эффективности XeF-лазера η (4, 5, 6) от зарядного напряжения U для смесей состава $\text{NF}_3\text{:Xe:Ne} = 3\text{:}9\text{:}600$ Тор (1, 4), $\text{F}_3\text{:Xe:Ne} = 3\text{:}9\text{:}900$ Тор (2, 5) и $\text{NF}_3\text{:Xe:Ne} = 3\text{:}9\text{:}770$ Тор (3, 6).

2 Квантовая электроника, т. 35, № 4

[1] наблюдалось снижение эффективности XeF-лазера при удельной мощности накачки, превышающей 5 МВт/см 3 . Увеличение эффективности лазера при снижении зарядного напряжения отчасти может быть связано и с тем, что в обострительную емкость до момента пробоя разрядного промежутка перебрасывается большая доля энергии, запасенной в накопительной емкости.

Максимальная энергия генерации на смесях с неоном и гелием составляла 3 мДж, а максимальный КПД при зарядном напряжении 14 кВ был равен 0.73%. Дальнейшее увеличение КПД XeF-лазера можно ожидать при использовании устойчивого резонатора со сферическим зеркалом, в котором снижаются дифракционные потери для узких (~ 1 мм) разрядов, а также при увеличении длины разрядного промежутка и соответственно коэффициента заполнения резонатора. Действительно, при использовании в качестве глухого зеркала сферического Al-зеркала с радиусом кривизны отражающей поверхности 4 м энергия излучения увеличивалась на 10%. Требуется также оптимизация системы предьонизации по времени появления искры и величине электрической емкости.

Следующий этап исследований был связан с изучением частотного режима работы лазера. На рис. 6 представлена зависимость энергии пакета лазерных импульсов излучения (100 первых импульсов) от частоты их следования. С увеличением f до 2 кГц для активной смеси на основе Ne имеет место рост энергии пакета импульсов и соответственно КПД от 0.57% до 0.61% (кривая 1). При дальнейшем увеличении f до 4 кГц КПД снижается до 0.55%, что незначительно отличается от эффективности лазера в режиме редко повторяющихся импульсов.

При снижении зарядного напряжения накопительной емкости до 14 кВ (кривая 2, рис. 6) КПД лазера возрастает от 0.61% (при $f = 500$ Гц) до 0.69% (3.5 кГц). При $f = 4$ кГц эффективность лазера составляет 0.67%, что примерно в 1.2 раза выше, чем при зарядном напряжении 18 кВ (кривая 1, рис. 6). Для активной смеси на основе Ne (при полном давлении 1 атм) в диапазоне частот 1.5–3.5 кГц имеет место незначительное снижение энергии пакета импульсов и эффективности лазера (кривая 3, рис. 6). При $f = 4$ кГц наблюдается резкое (примерно в 1.5 раза) падение КПД. При снижении напряжения на накопительной емкости до 14 кВ характер спада на этой смеси сохраняется, а с увеличением полного давления Ne до 1.2 атм падение эффективности лазера наступает при $f = 3$ кГц. Это можно объяснить уменьшением скорости газа в разрядном промежутке, поскольку вентилятор не обеспечивает ее сохранения при повышении давления Ne.

Таким образом, при высокой частоте следования импульсов целесообразно использовать активную смесь на

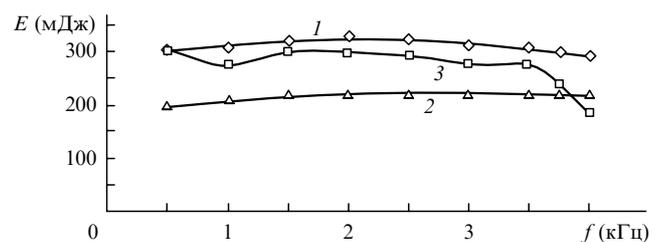


Рис. 6. Зависимости энергии генерации E пакета из 100 импульсов излучения от частоты следования импульсов f для смесей состава $\text{NF}_3\text{:Xe:Ne} = 3\text{:}9\text{:}600$ Тор (1, 2) и $\text{NF}_3\text{:Xe:Ne} = 3\text{:}9\text{:}760$ Тор (3) при зарядном напряжении накопительной емкости 18 (1, 3) и 14 кВ (2).

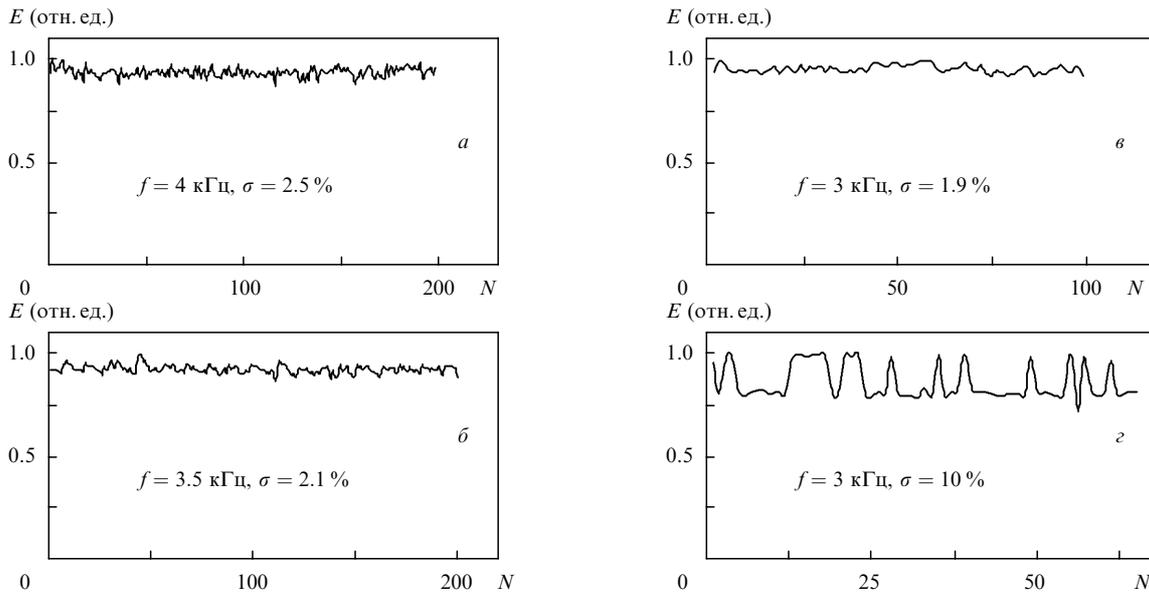


Рис.7. Зависимости энергии импульсов излучения E от номера импульса N для смесей состава $\text{NF}_3 : \text{Xe} : \text{Ne} : \text{He} = 3 : 7.5 : 76 : 520$ Тор ($a, б, г$) и $\text{NF}_3 : \text{Xe} : \text{Ne} = 3 : 6 : 900$ Тор ($в$) при зарядном напряжении накопительной емкости 18 кВ.

основе гелия. При $f = 4$ кГц максимальная средняя мощность излучения лазера составила 11.7 Вт.

Зависимость энергии импульсов излучения от частоты следования измерялась с помощью измерителя энергии ПИМ-М, подключенного к персональному компьютеру (см. рис.2). Он позволял регистрировать энергию импульсов в относительных единицах с $f \leq 5$ кГц. Максимальное число импульсов, которое может зарегистрировать этот прибор, составляет 1000. Информация об энергии каждого импульса в пакете автоматически передается с ПИМ-М на персональный компьютер. Для каждого пакета, обычно состоящего из несколько сотен импульсов, строился график зависимости энергии импульса излучения от его номера и рассчитывалось среднеквадратичное отклонение σ энергии импульсов излучения.

Результаты экспериментов по измерению стабильности энергии импульсов излучения при частотах следования импульсов в диапазоне 3–4 кГц приведены на рис.7. Лучшая стабильность энергии импульсов излучения (при

этом $\sigma = 2.5\%$) в случае $f = 4$ кГц достигнута на смеси состава $\text{NF}_3 : \text{Xe} : \text{Ne} : \text{He} = 3 : 7.5 : 76 : 520$ Тор (рис.7, a). Небольшая добавка Ne улучшает стабильность энергии импульсов излучения. При снижении частоты следования импульсов до 3.5 кГц стабильность улучшается ($\sigma = 2.1\%$, рис.7, $б$). Для смеси на основе неона среднеквадратичное отклонение σ энергии импульсов излучения при $f = 3$ кГц составляет 1.9% (рис.7, $в$). Снижение скорости прокачки газа приводит к срыву устойчивого режима работы лазера и значительному ухудшению стабильности энергии импульсов излучения ($\sigma = 10\%$, рис.7, $г$).

На рис.8 приведены распределения плотностей энергии излучения J по сечению лазерного пучка в ближней и дальней зонах. Визуализация лазерного излучения осуществлялась с помощью люминофора (см. рис.2), излучение с которого фотографировалось цифровым фотоаппаратом. Для регистрации распределения лазерного излучения в ближней зоне с помощью линзы на люминофоре строилось изображение центральной области разрядного промежутка. Это позволяет более точно, без ис-

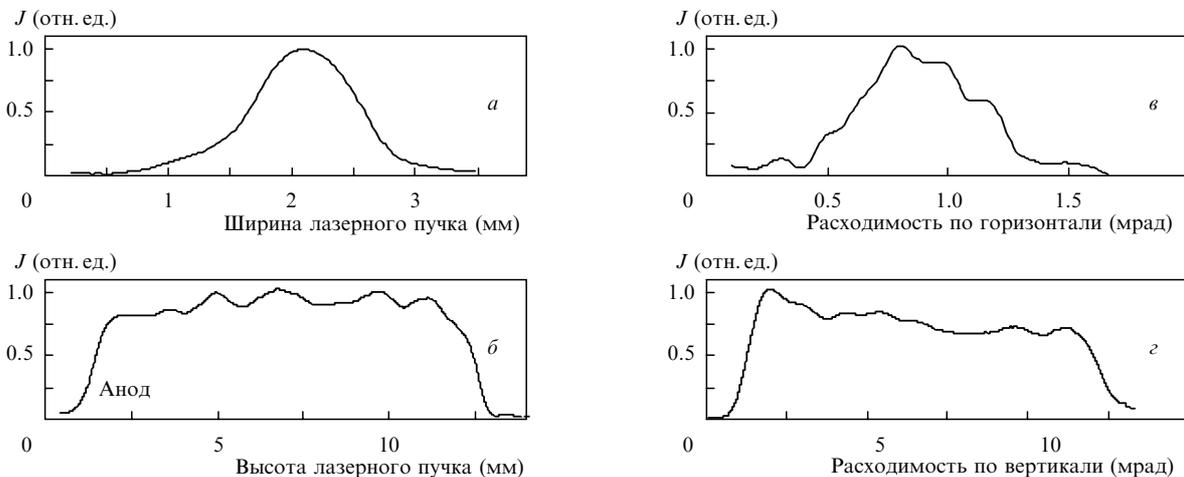


Рис.8. Распределения плотностей энергии излучения J по сечению лазерного пучка в ближней зоне для плоскопараллельного резонатора ($a, б$) и в дальней зоне для резонатора со сферическим зеркалом ($в, г$).

кажения вследствие расходимости излучения, определить область генерации. На рис.8,а приведено распределение плотности энергии излучения по ширине лазерного пучка, а на рис.8,б – интегральное распределение плотности энергии излучения по его высоте. Характерные размеры пучка по ширине и высоте составляют 1×12 мм. Таким образом, ширина лазерного пучка в ближней зоне равна ~ 1 мм, что примерно в два-три раза меньше, чем в XeF-лазере, рассмотренном в работе [1].

Для регистрации излучения лазера со сферическим зеркалом с $R_1 = 100\%$ в дальней зоне люминофор располагался в фокальной плоскости линзы с фокусным расстоянием 2131 мм. Распределение плотности излучения по горизонтали приведено на рис.8,в, а интегральное распределение плотности излучения по вертикали – на рис.8,г. Расходимость лазерного излучения по уровню половинной интенсивности составила 0.6×10 мрад.

3. Заключение

Проведенные исследования показали, что использование пластинчатых электродов позволяет сформировать «узкий» разряд и в результате достичь высокой частоты следования импульсов при небольшой скорости газового потока и небольшой мощности, затрачиваемой на его создание (80 Вт). Высокая стабильность энергии импульсов излучения ($\sigma = 2\% - 2.5\%$) реализуется в значительной мере благодаря индуктивно-емкостной стабилизации раз-

ряда. Дальнейшее повышение стабильности энергии импульсов излучения возможно при устранении неточности установки электродных пластин, улучшении формы их рабочей поверхности, увеличении длины и высоты разрядного промежутка, улучшении стабильности источника энергопитания лазера, оптимизации резонатора и т. д.

Дальнейшая оптимизация параметров лазера и применение дросселя с меньшей индуктивностью в схеме резонансно-диодной зарядки накопительной емкости позволили увеличить частоту следования импульсов до 5 кГц. При зарядном напряжении 14 кВ и $f = 5$ кГц средняя мощность излучения XeF-лазера составила 11.5 Вт, а КПД достиг 0.71 %.

1. Борисов В.М., Виноходов А.Ю., Водчиц В.А., Ельцов А.В. *Квантовая электроника*, **30**, 881 (2000).
2. Myers D., Watson T.A., Das P.P., Partlo W.N., Hofmann T., Padmabandu G.G., Zambon P., Hysham C., Dunning R. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3679**, 1038 (1999).
3. Saito T., Sazuki T., Yoshino M., Wakabagashi O., Matsunaga T., Fujimoto J., Kakizaki K., Yamazaki T., Inoue T., Terashima K., Enami T., Inoue H., Sumitani A., Tomaru H., Mizoguchi H. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5040**, 1704 (2003).
4. Лажинцев Б.В., Нор-Аревян В.А. Патент России №2089981 от 5 января 1996; *БИ*, №25, 355 (1996).
5. Лажинцев Б.В., Нор-Аревян В.А. *Квантовая электроника*, **30**, 3 (2000).
6. Андраманов А.В., Кабаев С.А., Лажинцев Б.В., Нор-Аревян В.А., Селемир В.Д. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4747**, 64 (2002).