

# Экимерный лазер с высокой когерентностью

В.В.Атежев, С.К.Вартапетов, А.Н.Жуков, М.А.Курзанов, А.З.Обидин

*Проведен цикл экспериментальных исследований, направленных на оптимизацию неустойчивого резонатора электро-разрядного ArF-лазера. Предложен и исследован ряд оптических схем неустойчивого резонатора для одномодульного лазера. Показано, что лазер, созданный на основе рассмотренных схем, обладает высокой когерентностью (длина пространственной когерентности 1–10 мм, длина временной когерентности 0.5–30 мм при энергии импульса 40–290 мДж).*

**Ключевые слова:** экимерный лазер, неустойчивый резонатор, временная и пространственная когерентность.

## 1. Введение

Экимерные лазеры находят все более широкое применение в качестве мощных источников УФ излучения в научных исследованиях и различных технологиях. Характеристики этих лазеров, такие как диапазон длин волн 157–351 нм, высокие пиковая и средняя мощности, эффективность порядка нескольких процентов, возможность быстрой смены активной среды и значительный ресурс, делают их весьма перспективными для использования в микротехнологиях, фотолитографии, лазерной медицине и ряде других областей. В частности, в настоящее время интенсивно развивается новая область лазерных технологий – фотонная индустрия, где особое место занимают работы по записи брэгговских структур в волоконных и планарных световодах [1]. При решении ряда технологических задач предъявляются все более жесткие требования к характеристикам излучения экимерного лазера. В то же время известно, что традиционные экимерные лазеры имеют сравнительно низкое качество пучка. Прежде всего, это низкая монохроматичность и высокая расходимость пучка, превышающая дифракционную более чем на два порядка. Указанные свойства экимерных лазеров связаны с малым временем существования инверсной населенности ( $\sim 10$  нс), недостаточным для формирования пучка из-за ограниченного числа проходов излучения по резонатору. На качество пучка влияют также неоднородности в разряде, ведущие к искажениям волнового фронта. Очевидно, что улучшение характеристик излучения и возможность управления параметрами лазеров данного типа расширяет диапазон их применения.

Необходимые характеристики могут быть получены при использовании специальных селективных и/или неустойчивых резонаторов. В зависимости от требований к ширине спектра генерации, расходимости и энергии им-

пульса используются либо лазеры на основе одного разрядного модуля, либо системы генератор – усилитель с двумя разрядными модулями. В системе генератор – усилитель излучение маломощного задающего генератора, в котором сформированы пространственные и спектральные характеристики, инжектируется и усиливается в регенеративном усилителе. Системы задающий генератор – регенеративный усилитель являются, безусловно, технически более сложными, но позволяют чрезвычайно гибко и в широких пределах изменять и формировать пространственные и спектральные характеристики излучения при высоких энергиях импульса генерации. В рамках этого подхода был реализован ряд схем для сужения спектра [2–8], компенсации фазовых искажений при помощи оптического согласования фаз (метод ОВФ) [9–14] и сжатия импульса излучения экимерных лазеров на основе XeCl ( $\lambda = 308$  нм), KrF (248 нм) и ArF (193 нм) [15–19].

Системы с одним разрядным модулем, несомненно, существенно проще, надежнее и дешевле, однако высокие пространственные и спектральные характеристики достигаются в ущерб энергии импульса излучения. Тем не менее такие системы представляют интерес для практического применения. При этом одномодульные системы наряду с большими пространственными и спектральными параметрами излучения должны иметь характеристики на уровне, требуемом для решения современных технологических задач: высокие частоты повторения импульсов (100–1000 Гц), стабильность энергии излучения (квадратичное отклонение энергии в импульсах  $\sigma < 1\%$ – $2\%$ ), стабильность длины волны и ширины спектра генерации.

В данной работе представлены результаты экспериментов по исследованию одномодульного ArF-лазера с различными оптическими схемами неустойчивого резонатора (НР).

## 2. Экспериментальное оборудование

Экспериментальные работы по созданию и исследованию экимерных лазеров с высокой когерентностью проводились на промышленных образцах лазеров серии CL, разработанных и производимых в Центре физи-

В.В.Атежев, С.К.Вартапетов, А.Н.Жуков, М.А.Курзанов, А.З.Обидин. Центр физического приборостроения Института общей физики им. А.Н.Прохорова РАН, Россия, 142092 Троицк, Московская обл.; тел.: (095) 334-08-95, факс: (095) 334-02-16, e-mail: info@lasersys.ru, web site: www.pic.troitsk.ru

Поступила в редакцию 23 января 2003 г.

Табл.1.

Параметр	CL-5000	CL-7000
Разрядный объем (см <sup>3</sup> )	12	110
Зарядное напряжение (кВ)	10–20	20–30
Плотность энергии накачки (Дж/см <sup>3</sup> )	0.26	0.17
Плотность мощности накачки (МВт/см <sup>3</sup> )	15	4
КПД КгF-лазера (%)	2–2.5	3.5–4
Длительность импульса генерации КгF-лазера (нс)	9–11	19–23
Энергия импульса КгF-лазера (мДж)	70	500
Максимальная частота повторения импульсов (Гц)	1000	1000

ческого приборостроения Института общей физики им. А.М.Прохорова (ЦФП ИОФАН). Новое поколение эксимерных лазеров представлено моделями серий CL-5000 с активным объемом  $V_0 \approx 12 \text{ см}^3$  (межэлектродное расстояние  $l = 1 \text{ см}$ , длина разрядного промежутка  $L = 20 \text{ см}$ ) и CL-7000 с  $V_0 \approx 110 \text{ см}^3$  ( $l = 2.2 \text{ см}$ ,  $L = 60 \text{ см}$ ). Все лазеры серии CL генерируют излучение на длинах волн от 157 до 351 нм с характерными энергиями в импульсе в случае КгF-лазера ( $\lambda = 248 \text{ нм}$ ) 50 мДж для серии CL-5000 и 500 мДж для серии CL-7000. Основные энергетические характеристики лазеров серии CL приведены в табл.1.

Эксимерные лазеры серии CL имеют керамическую разрядную камеру, изготовленную из высококачистой (99.5 %)  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -керамики. Внутри разрядной камеры лазера отсутствуют детали из пластмасс, все уплотняющие элементы выполнены из резины на основе фторкаучуков и металла. Возбуждение разряда осуществляется с помощью разрядного *СС*-контура с коммутацией высоковольтным тиратроном. В ряде случаев для увеличения скорости нарастания напряжения на разрядном промежутке используется разрядный *LC*-контур. В зависимости от требований к характеристикам лазеров серии CL используется либо искровая предыонизация межэлектродного промежутка, либо коронная предыонизация по сапфировым трубкам. Тип предыонизации существенно влияет на такие параметры, как плотность мощности накачки, ресурс газовой смеси, стабильность энергии импульсов генерации, однородность распределения интенсивности в пучке излучения.

Разрядный контур лазера, давление и состав смеси были оптимизированы с целью получения максимальной эффективности лазера. В разработанных лазерах она достигает 4 % при генерации в случае КгF-лазера и около 2 % – в случае АгF-лазера (рис.1). Конструкция лазера, выбранные конструкционные материалы, оптимизиро-

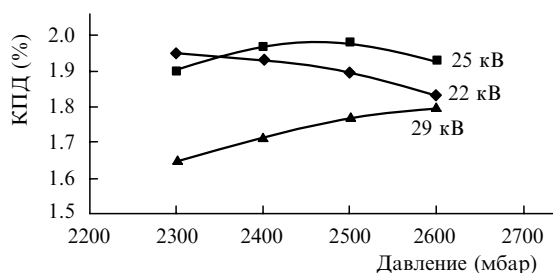


Рис.1. Зависимости КПД АгF-лазера (модель CL-7000) от давления смеси при разных зарядных напряжениях.

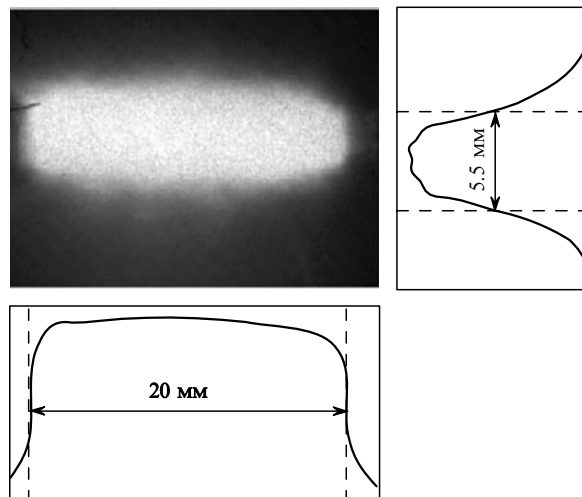


Рис.2. Распределение интенсивности на расстоянии 50 см от выходной апертуры АгF-лазера.

ванный разрядный контур и электродная система лазера в совокупности обеспечивают большой КПД лазера, высокий ресурс газовой смеси и оптических компонентов лазера, а также однородное распределение усиления по апертуре разряда. Ресурс газовой смеси АгF-лазера превышает  $3 \times 10^6$  импульсов (при уменьшении начальной энергии на 50 %).

Для достижения высокой пространственной и временной когерентности излучения необходимо обеспечить однородность разряда и параметров усиливающей среды. В лазерах серии CL за счет оптимизации электродной системы излучение имеет однородное пространственное распределение интенсивности в диапазоне частот повторения импульсов до 1000 Гц (рис.2).

В данной работе эксперименты проводились на АгF-лазерах серии CL-7000. В стандартном режиме с устойчивым резонатором лазер генерирует импульсы с энергией 350 мДж и длительностью  $\sim 20 \text{ нс}$  по полувысоте. На рис.3 представлены формы импульса излучения лазера для ряда типичных конфигураций его резонатора. В экспериментах энергетические параметры оптических импульсов измерялись пироэлектрическим измерителем энергии OPHIR PE-25BB, а их временные характеристики – фотодетектором ФК-22 (постоянная времени  $\sim 0.6 \text{ нс}$ ) и осциллографом TDS-430A. Профиль пучка и интерференционные структуры анализировались УФ чувствительной CCD-камерой СОНУ-4812. Оценка спектральной ширины излучения проводилась при помощи интерферометра Фабри–Перо с базой 60 мкм, 138 мкм и 2.5 мм.

### 3. Экспериментальные результаты

Измерения пространственной когерентности излучения эксимерных лазеров проводились для двух оптических схем, представленных на рис.4,а,б. Они существенно различаются тем, что схема на рис.4,б сочетает в себе свойства устойчивого и неустойчивого резонатора. В плоскости рис.4,б этот резонатор является неустойчивым, а в плоскости, перпендикулярной ей и проходящей через образующую цилиндра, – устойчивым. Указанное свойство позволяет использовать в таком резонаторе различные сочетания селектирующих элементов (призм

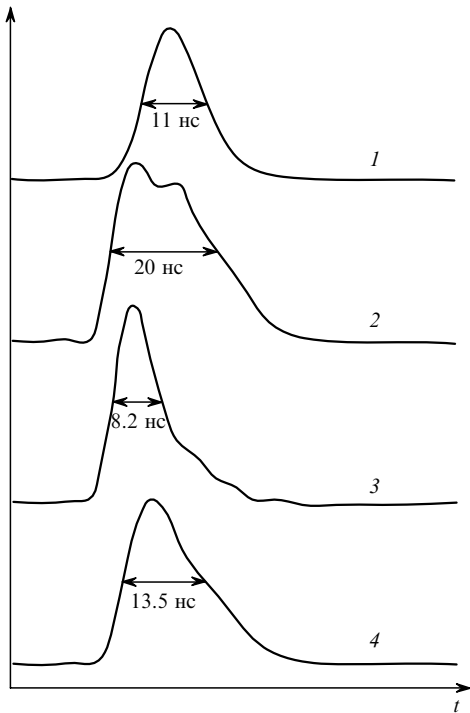


Рис.3. Формы импульсов спонтанного излучения (1) и излучения ArF-лазера серии CL-7000 с устойчивым резонатором (2), телескопическим НР (3) и НР типа цилиндр – плоскость (4).

и дифракционных решеток), располагая их так, чтобы плоскости главного сечения призм и плоскость дисперсии решетки совпадали с плоскостью устойчивости резонатора.

Таким образом, в лазере с подобным резонатором можно одновременно достаточно сильно спектрально сузить линию излучения и достичь расходимости пучка, характерной для НР. Конструктивной особенностью обоих резонаторов (рис.4,а,б) является также то, что выходные зеркала представляют собой фрагменты сферической или цилиндрической поверхности с характерным размером ~1.5 мм, смещенные от оси резонатора к краю разрядного промежутка. При таком расположении выходного зеркала НР выходной пучок излучения имеет достаточно равномерное распределение интенсивности по сечению, в котором отсутствует центральное темное пятно.

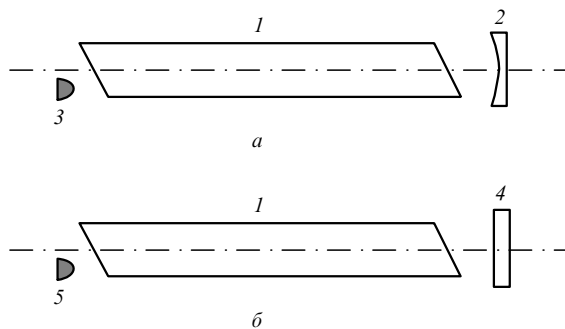


Рис.4. Схемы телескопического НР (а) и НР типа цилиндр – плоскость (б) для ArF-лазера:

1 – активные модули; 2 – сферическое зеркало; 3 – отражатель со сферической поверхностью; 4 – плоское зеркало; 5 – отражатель с цилиндрической поверхностью; все зеркала и отражатели имеют коэффициент отражения ~100 % на  $\lambda = 193$  нм.

Пространственная когерентность в эксперименте измерялась двумя способами: по схеме Юнга с двумя щелями и при частичном или полном перекрытии двух половин пучка с помощью бипризмы либо двух зеркал, наклоненных под различными углами к оси пучка. Обе методики показали хорошее совпадение результатов.

Степень пространственной когерентности определялась по степени видности при регистрации видеокамерой картины интерференции. Известно [20], что при определенных условиях, которые обычно выполняются в экспериментах с лазерным излучением, видность  $V = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$  и степень когерентности  $\gamma_{12}$  связаны соотношением

$$\gamma_{12} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \frac{I_1 + I_2}{I_1 I_2}, \quad (1)$$

где  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$  – максимальная и минимальная интенсивности в интерференционной картине;  $I_1$  и  $I_2$  – интенсивности двух интерферирующих пучков. Величины  $I_{\max}$ ,  $I_{\min}$ ,  $I_1$  и  $I_2$  определялись в эксперименте. При условии  $I_1 = I_2$  получаем

$$\gamma_{12} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = V. \quad (2)$$

Как и ожидалось, длина пространственной когерентности (расстояние между точками волнового фронта, интерференционная картина от которых имеет видность  $V \geq 0.5$ ) растет вместе с коэффициентом увеличения резонатора  $M$ , что согласуется с результатами более ранних работ [21, 22]. Так, для телескопического резонатора лучший результат был достигнут при  $M = 27$  (максимальном в наших экспериментах). Полученное распределение  $\gamma_{12}$  показано на рис.5. Видно, что в этом случае длина пространственной когерентности равна ~1 мм.

Для второй схемы (рис.4,б) максимальная длина пространственной когерентности была получена также при максимальном коэффициенте увеличения  $M = 120$  (рис.5). Видно, что длина пространственной когерентности в случае НР с цилиндрическим зеркалом при  $M = 120$  превышает 10 мм. В качестве примера на рис.6 приведена фотография интерференционной картины, образованной при интерференции двух частей одного пучка излучения эксимерного лазера (интерферирующие пучки соответствуют точкам волнового фронта, отстоящим друг от друга на 10 мм).

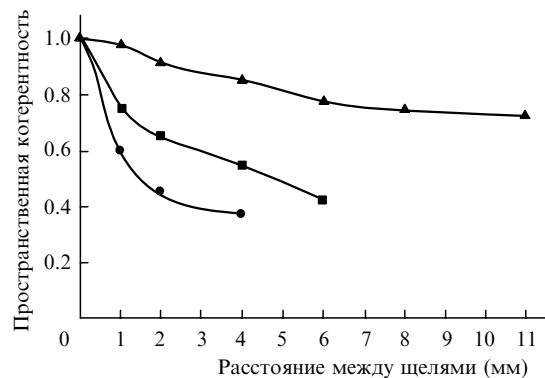


Рис.5. Степень пространственной когерентности в выходном пучке лазера с НР типа цилиндр – плоскость (▲, ■) и телескопическим резонатором (●) при коэффициентах увеличения  $M = 120$  (▲), 40 (■) и 27 (●).

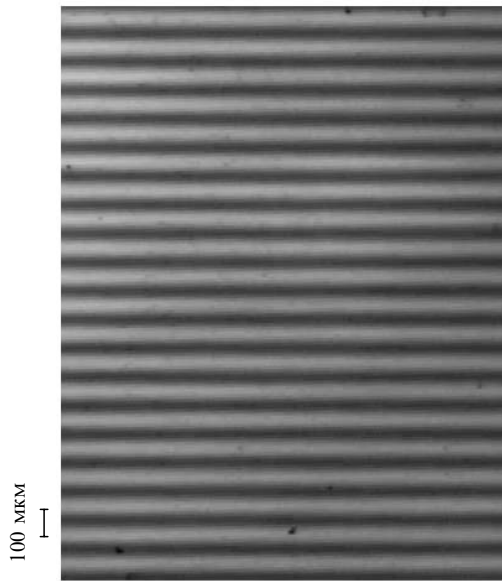


Рис.6. Интерференционная картина при расстоянии между интерферирующими пучками 10 мм.

При использовании лазера в технологических целях для создания периодических микроструктур (брэгговские решетки в волокнах или планарные структуры) под действием интерферирующих пучков эксимерного лазера, кроме ширины спектра, чрезвычайно важное значение имеет угловая стабильность пучка генерации. На рис.7 сравниваются распределения интенсивности в интерферограмме для одного импульса и интерферограмме, усредненной по 100 импульсам (НР с  $M = 40$ ). В данном случае интерферируют пучки, соответствующие расстоянию между точками волнового фронта 6 мм. При усреднении по 100 импульсам видность картины снижается, но незначительно. Это свидетельствует о том, что разброс положений максимумов структуры не превышает ее полупериода, и по нашим оценкам можно заключить, что амплитуда отклонений от оси пучка лазера в эксперименте находилась в пределах 15 мкрад.

Для сужения спектра генерации было использовано несколько типов селективных резонаторов: НР с призмным селектором (рис.8,а), НР с призмным селектором и дифракционной решеткой (рис.8,б) и телескопический НР со сферической дифракционной решеткой (рис.8,в). Все исследованные схемы селективных НР, кроме схемы на рис.8,в, были выполнены на основе НР с выпуклым цилиндрическим выходным зеркалом. При использовании призмного селектора (рис.8,а) число призм варьировалось от одной до четырех. В зависимости от числа призм и при их оптимальной установке в резонаторе данная конфигурация позволяет получать длину временной когерентности в выходном пучке в пределах 0.5–10

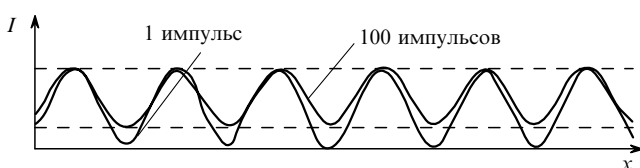


Рис.7. Сравнение распределений интенсивностей в интерферограмме для одного импульса и в интерферограмме, усредненной по 100 импульсам (НР с  $M = 40$ ).

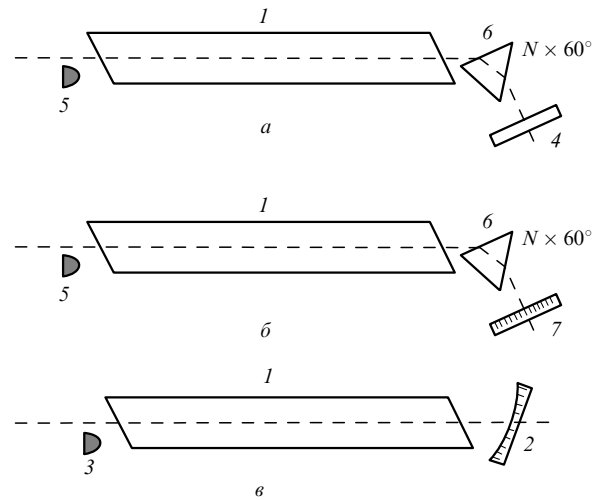


Рис.8. Схемы дисперсионных резонаторов:

1 – активные модули; 2 – сферическая дифракционная решетка (1800 штр./мм); 3 – отражатель со сферической поверхностью; 4 – плоское зеркало; 5 – отражатели с цилиндрической поверхностью; 6 – набор 60-градусных призм (число призм  $N = 1 - 4$ ); 7 – плоская решетка; все отражатели и зеркало имеют коэффициент отражения  $\sim 100\%$  на  $\lambda = 193$  нм.

мм (ширина спектра  $\Delta\lambda = 75 - 3.75$  пм). Энергия импульса для схемы с наиболее узким спектром ( $\Delta\lambda = 3.75$  пм) составила 65 мДж, что равно 19% от энергии импульса при работе лазера с устойчивым резонатором. На рис.9 показана интерферограмма излучения лазера с НР и двумя призмами, полученная с помощью интерферометра Фабри–Перо с базой 138 мкм. Длина временной когерентности в этом случае равна 1.5 мм ( $\Delta\lambda = 25$  пм).

При использовании резонатора с дифракционной решеткой 1200 штр./мм (рис.8,б) в зависимости от числа призм была получена длина временной когерентности в пределах 1–30 мм ( $\Delta\lambda = 3.75 - 1.25$  пм). Энергия импульса в этой конфигурации при длине временной когерентности 30 мм ( $\Delta\lambda = 1.25$  пм) составила 40 мДж или 11% от энергии импульса лазера с устойчивым резонатором. Для минимизации потерь в резонаторе при сужении спектра генерации была исследована схема НР со сферической дифракционной решеткой 1800 штр./мм (рис.8,в) [23]. В такой схеме дифракционная решетка одновременно работает как заднее зеркало телескопического НР и как дисперсионный элемент, что позволяет повысить энергетическую эффективность резонатора. Полученная длина временной когерентности составила примерно 0.5 мм ( $\Delta\lambda = 75$  пм), длина пространственной когерентности превысила 1 мм, максимальная энергия импульса при этих параметрах резонатора равнялась 250 мДж.

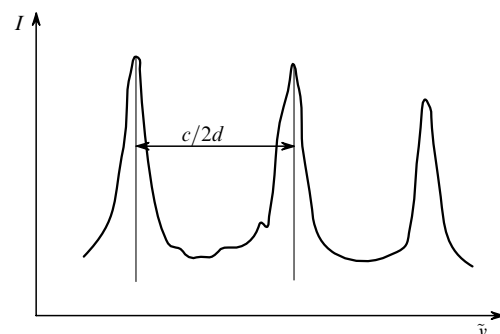


Рис.9. Интерферограмма для НР с двумя призмами, полученная с помощью интерферометра Фабри–Перо с базой  $d = 138$  мкм.

Наряду с измерениями при помощи интерферометров Фабри–Перо длина пространственной когерентности измерялась по видности интерферограммы при контролируемом изменении разности хода интерферирующих пучков. Оба способа показали хорошее совпадение результатов.

Рассмотренные схемы соответствуют широкому диапазону требований к характеристикам излучения эксимерного ArF-лазера в различных технологических и исследовательских задачах. При разделении плоскостей, в которых проводится оптимизация пространственных и спектральных характеристик выходного пучка, можно получить практически любое сочетание длин пространственной и временной когерентности.

Разработанные эксимерные лазеры с управляемыми параметрами пространственной и временной когерентности были использованы в экспериментах по формированию микроструктур на поверхности материала с помощью интерферометрических методик. В частности, применялась конфигурация резонатора с двумя призмами (длина временной когерентности ~ 2 мм, длина пространственной когерентности более 10 мм) для абляции органического стекла при суперпозиции двух половин пучка. На рис.10 показана микрофотография рельефа обработанной поверхности плоского образца с периодом структуры 1.8 мкм.

Созданный в настоящей работе лазер был успешно использован, в частности, при изготовлении брэгговских решеток в оптическом волокне по методу фазовой маски для двухкаскадного рамановского конвертера в фосфоросиликатном волокне [24]. Эффективность рамановского конвертера существенно зависит от качества записанных в волокне решеток, которое, в свою очередь, зависит от характеристик излучения эксимерного лазера. При экспозиции волокна УФ излучением в его объеме наряду с модифицированным коэффициентом преломления наводятся также потери. Эти потери могут быть сравнимы с потерями на длине остальных, необработанных участков конвертера. Наведенные потери сильно зависят от дозы УФ излучения, необходимой для создания брэгговской решетки: чем больше доза, тем больше потери. Сама доза определяется качеством излучения лазера, т. е. его пространственной когерентностью и однородностью. Исследование конвертера, созданного с использованием методов формирования пространственной когерентности, описанных в настоящей работе, показало, что его энергетическая эффективность равна 45 %. Насколько нам из-



Рис.10. Фотография поверхности пластины ПММА с периодом структуры 1.8 мкм.

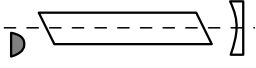
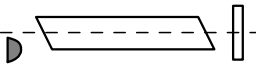
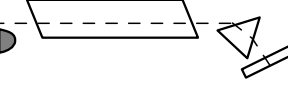
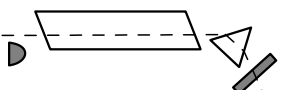
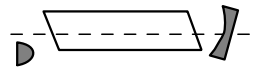
вестно, это наилучшая эффективность для фосфоросиликатных конвертеров на момент наших экспериментов. Полученные данные свидетельствуют о низком уровне наведенных потерь в решетках конвертера и оптимальном для конкретной методики качестве излучения лазера.

#### 4. Заключение

Таким образом, были изучены несколько оптических схем НР для одномодульного эксимерного ArF-лазера. Эти схемы обладают широким диапазоном характеристик лазерного пучка: длина пространственной когерентности 1 – 10 мм, длина временной когерентности 0.5 – 30 мм при энергии импульса 40 – 250 мДж. Результаты проведенных исследований обобщены в табл.2.

Тот факт, что возможно любое сочетание пространственных и спектральных характеристик в указанных пределах, позволяет сделать вывод о том, что одномодульный эксимерный лазер может быть эффективным инструментом в многочисленных применениях. Экспериментально показано, что разработанные лазеры и оптические схемы позволяют создавать брэгговские решетки в волокне и интерференционные планарные структуры с микронным и субмикронным периодами.

Табл.2.

Конфигурация резонатора	$E$ (мДж)	$l_{sp}$ (мм)	$l_t$ (мм)	$E_u/E_s$ (%)
Телескопический НР, $M = 10 - 30$	260 – 290	> 1	–	74 – 83
				
НР типа цилиндр – плоскость, $M = 20 - 120$	150 – 260	> 10	–	43 – 74
				
Селективный НР с набором призм	65 – 230	> 10	0.5 – 10	18.5 – 65
				
Селективный НР с набором призм и плоской дифракционной решеткой	40 – 210	> 10	1 – 30	11 – 60
				
Телескопический НР со сферической дифракцион- ной решеткой	200	~ 2	0.5	57
				

Примечание:  $E$  – максимальная энергия импульса;  $l_{sp}$  – максимальная длина пространственной когерентности;  $l_t$  – длина временной когерентности;  $E_u$  и  $E_s$  – энергии импульса лазера с неустойчивым и устойчивым резонаторами.

Авторы хотят отметить, что все работы по эксимерным лазерам в ЦФП ИОФАНа всегда находились под пристальным вниманием Александра Михайловича Прохорова и пользовались его постоянной поддержкой.

1. Herman P.R., Chen K.P., Corkum P., Naumov A., Sandy N., Zhang J. *RIKEN Review*, **32**, January, 31 (2001).
2. Goldhar J., Rapoport W.R., Murray J.R. *IEEE J. Quantum Electron.*, **16**, 235 (1980).
3. Pasala T.J., McDermid I.S., Laudenslager J.V. *Appl. Phys. Lett.*, **40**, 1 (1984).
4. Bigio I.J., Slatkine M. *IEEE J. Quantum Electron.*, **19**, 1426 (1983).
5. Букреев В.С., Вартапетов С.К., Веселовский И.А., Обидин А.З. *Кр. сообщ. физ. ФИАН*, № 2, 3 (1990).
6. Джиджоев М.С., Долгий С.В. и др. *Квантовая электроника*, **17**, 697 (1990).
7. Алимпиев С.С., Букреев В.С., Вартапетов С.К. и др. *Квантовая электроника*, **18**, 89 (1991).
8. Бычков Ю.И., Иванов Н.Г. и др. *Квантовая электроника*, **19**, 133 (1992).
9. Slatkine M., Bigio I.I., Feldman B.J., Fisher R.A. *Opt. Lett.*, **7**, 108 (1982).
10. Osborne M.R., et al. *Appl. Phys. B*, **48**, 351 (1989).
11. Sugii M., Okabe M., Watanabe A., Sasaki K. *IEEE J. Quantum Electron.*, **24**, 2264 (1989).
12. Kurnit N.A., Thomas A.J. *IEEE J. Quantum Electron.*, **25**, 421 (1989).
13. Алимпиев С.С. и др. *Кр. сообщ. физ. ФИАН*, № 12, 11 (1989).
14. Алимпиев С.С. и др. *Квантовая электроника*, **17**, 338 (1990).
15. Muray J.R., Goldhar J., Eimerl D., Szoke A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **15**, 342 (1979).
16. Damzen M.J., Hutchinson H. *IEEE J. Quantum Electron.*, **19**, 7 (1983).
17. Fedosejevs R., Offenberger A.A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **21**, 1558 (1985).
18. Alimpiev S.S., Vartapetov S.K., Veselovsky I.A., Kusakin V.I., Likhanskii S.V., Obidin A.Z. *Laser Phys.*, **1**, 3 (1991).
19. Алимпиев С.С., Вартапетов С.К., Веселовский И.А., Лиханский С.В., Обидин А.З. *Квантовая электроника*, **20**, 3 (1993).
20. Борн М., Вольф Э. *Основы оптики* (М.: Наука, 1973, с. 464).
21. Park I., Maitland A. *J. Modern Opt.*, **35**, 587 (1988).
22. Ананьев Ю.А., Аникичев С.Г. и др. *ЖТФ*, **59** (7), 100 (1989).
23. Вартапетов С.К., Обидин А.З. Патент РФ 2177196 C1 (2000).
24. Bufetov I.A., Bubnov M.M., et al. *Proc. CLEO-2002* (Long Beach, Cal, USA, 2002, p. 480).