

# Мощный высокостабильный KrF-лазер с частотой следования импульсов 4 кГц

В.М.Борисов, А.В.Ельцов, О.Б.Христофоров

*Представлены результаты создания и исследования электроразрядного KrF-лазера (248 нм) со средней мощностью излучения 300 Вт. Ряд новых конструктивных особенностей лазера обусловлен использованием лазерной камеры на основе керамической трубы из  $Al_2O_3$ . Большие значения мощности и частоты следования импульсов достигнуты за счет применения объемного разряда с боковой предьонизацией УФ излучением скользящего разряда в виде однородного плазменного листа на поверхности плоской сапфировой пластины. Исследованы различные генераторы для накачки лазера. Максимальная эффективность лазера составила 3.1%, максимальная энергия генерации – 160 мДж/имп., а длительность импульса на полувывоте – 7.5 нс. В долговременном режиме при частоте следования импульсов 4 кГц и выходной мощности 300 Вт высокая стабильность энергии излучения ( $\sigma \leq 0.7\%$ ) достигалась с использованием полностью твердотельной системы накачки.*

**Ключевые слова:** эксимерный лазер, KrF, предьонизация, скользящий разряд, керамическая лазерная камера, С–С-схема, LC-инвертор, твердотельная система накачки, высокая частота следования.

## 1. Введение

Уже более 30 лет эксимерные лазеры остаются наиболее мощными источниками узконаправленного излучения УФ диапазона спектра. Среди эксимерных лазеров электроразрядные KrF-лазеры выделяются уникальным сочетанием таких характеристик, как малая длина волны излучения, высокая для данного класса лазеров эффективность (КПД около 3%), большие энергия (до 1 Дж/имп.) и средняя мощность (~300 Вт и более) [1, 2].

В связи с этим электроразрядные KrF-лазеры находят широкое применение в различных технологических процессах. К ним относятся 3D-микрообработка материалов, формирование в оптическом волокне брэгговских решеток, которые работают как зеркала на входе и на выходе световодов [3], производство высокотемпературных сверхпроводящих лент второго поколения [4], лазерный отжиг [5] и модификация материалов, в том числе в фотовольтаике [6, 7], воздействие на биологические материалы излучения с длиной волны 248 нм, близкой к длине волны 265 нм, соответствующей максимуму кривой относительной спектральной бактерицидной эффективности УФ излучения [8]. Оптимальные длины волн излучений KrF- и ArF-лазеров (сочетание большой энергии квантов излучения с возможностью использования надежной кварцевой оптики) способствовали широкому применению этих лазеров в крупномасштабном литографическом производстве интегральных схем [1]. Долгое время узкополосные KrF-лазеры с относительно небольшой, до

10 мДж/имп., энергией генерации и высокой (4 кГц) частотой следования импульсов были основой этой технологии. В настоящее время для проекционной лазерной литографии главным образом применяются ArF-лазеры (193 нм), что позволяет производить интегральные схемы с разрешением 45 нм и менее [9, 10].

В мощных KrF-лазерах возбуждение активной среды осуществляется импульсно-периодическим объемным разрядом высокого давления в смесях инертных газов Ne и Kr с молекулярным фтором  $F_2$  при условиях ввода энергии в разряд, обеспечивающих высокую эффективность генерации лазерного излучения. Такой разряд принципиально неустойчив, и время сохранения им однородной формы обычно не превышает нескольких десятков наносекунд. При этом достижение требуемых лазерных характеристик определяется рядом факторов (находящихся в довольно сложной взаимосвязи), к основным из которых относятся условия предьонизации активного объема, режим ввода энергии в разряд, геометрия электродной системы и характеристики газового потока в ней [11–15]. Условия предьонизации включают в себя, прежде всего, достаточно высокий уровень создаваемой до начала развития основного разряда концентрации электронов и однородность их распределения в разрядном объеме.

В наиболее мощных (~600 Вт) KrF-лазерах [2, 11, 15] УФ предьонизация осуществлялась множеством дискретных искровых разрядов, расположенных по обеим сторонам длинных металлических электродов, что обеспечивало высокую концентрацию начальных электронов в активном объеме лазера. Однако такая боковая УФ предьонизация вследствие дискретности предьонизатора не обеспечивает однородность основного объемного разряда, в частности в направлении вдоль электродов. Кроме того, искровые промежутки предьонизатора характеризуются повышенной электродной эрозией. Это ограничивает время жизни газовой смеси эксимерного лазера и препятствует его высокостабильной работе в долговре-

В.М.Борисов, А.В.Ельцов, О.Б.Христофоров. АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Россия, 142190 Москва, Троицк, ул. Пушкиных, влад. 12; e-mail: borisov@triniti.ru

Поступила в редакцию 21 августа 2014 г., после доработки – 30 октября 2014 г.

менном режиме, требуемом для промышленных применений.

Для обеспечения высокого однородного уровня предыонизации нами были разработаны электродные системы мощных эксимерных лазеров с высокоэффективным УФ предыонизатором на основе завершеного скользящего разряда (СР) в виде однородного плазменного листа на поверхности сапфировой пластины, расположенной вдоль электродов лазера [12, 13].

Обеспечение большого времени жизни газовых смесей эксимерных лазеров высокого давления, содержащих такие чрезвычайно химически активные компоненты, как галогены, предъявляет жесткие требования к контактирующим с ними материалам и приводит к необходимости применения металлокерамической лазерной камеры. Нами было предложено использовать камеру новой конструкции на основе керамической трубы из  $Al_2O_3$  высокой чистоты и высокого качества, что было успешно реализовано при создании мощного (500 Вт, 300 Гц) высокостабильного компактного широкоапертурного (до  $55 \times 30$  мм) эксимерного XeCl-лазера с предыонизацией СР [16]. Ресурс использования газовой смеси в этом лазере составил  $\sim 57 \times 10^6$  импульсов при стабилизированной средней мощности лазерного излучения 450 Вт.

Цель настоящей работы – создание на основе развитых подходов мощного высокостабильного эксимерного лазера, в частности Krf-лазера, с высокой (4 кГц) частотой следования импульсов и большим временем жизни газовой смеси. Достижение высокой стабильности мощного лазера в долговременном режиме потребовало исследования его работы с генераторами накачки различного типа.

## 2. Конструкция лазера

На рис.1 показано поперечное сечение лазерной камеры эксимерного Krf-лазера с высокой частотой следования импульсов. Как и в [16], нами использовалась идея создания лазерной камеры из керамической ( $Al_2O_3$ ) трубы [17]. Лазерная камера включает в себя керамическую трубу 1 длиной 1100 мм с внутренним диаметром 360 мм и торцевые фланцы 2, скрепленные между собой балками 3. Торцевые фланцы с крепежными балками образуют металлический каркас, внутри которого размещена керамическая труба. Этот каркас обшит металлическими листами для подавления электромагнитных помех от работающего лазера. Керамическая труба имеет снизу опоры из фторопласта, при этом конструкция исключает прямой контакт металлического корпуса и керамики, повышая надежность лазерной камеры.

В лазерной камере, размещены заземленный и высоковольтный электроды 4, 5 с областью объемного разряда 6 между ними. Высоковольтный электрод 5 закреплен непосредственно на керамической трубе. Остальные элементы лазерной камеры: заземленный электрод 4, предыонизатор 7, расположенный сбоку от заземленного электрода, теплообменники 8, вентилятор 9, керамические спойлеры 10 и направляющие газового потока 11 – опираются только на торцевые фланцы, не касаясь поверхности керамической трубы. Заземленный электрод подсоединен к системе питания через прозрачные для газового потока обратные токопроводы 12, находящиеся по обе стороны от электродов. Вне лазерной камеры расположен набор распределенных вдоль нее керамических кон-

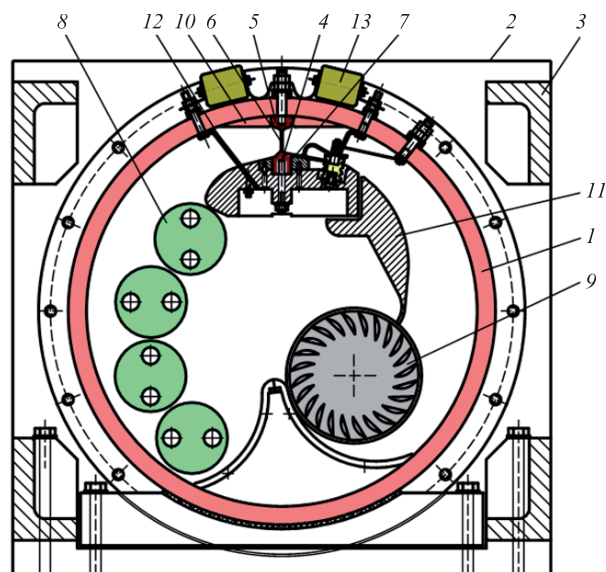


Рис.1. Конструкция лазерной камеры мощного эксимерного лазера с высокой (до 5 кГц) частотой следования импульсов:

1 – керамическая труба из  $Al_2O_3$ ; 2 – торцевые фланцы; 3 – крепежные балки; 4 – заземленный электрод; 5 – высоковольтный электрод; 6 – разряд; 7 – сапфировая пластина УФ предыонизатора; 8 – трубки теплообменника; 9 – диаметральный вентилятор; 10 – спойлеры из керамики; 11 – направляющие газового потока; 12 – газопроницаемые обратные токопроводы; 13 – керамические конденсаторы.

денсаторов 13, соединенных с электродами 4 и 5. К конденсаторам 13 подключен генератор накачки, предназначенный для их импульсной зарядки до напряжения пробоя, обеспечивающего газовый разряд между электродами для возбуждения газовой смеси лазера. Характерное оптимальное давление газовой смеси лазера  $F_2$ –Kr–Ne составляло 2.6–3.1 атм.

Следует отметить, что конструкция лазерной камеры позволяет реализовать генерацию как на Krf, так и на фторидах других инертных газов (ArF, XeF), а также на  $F_2$ .

## 3. Генераторы накачки

Характеристики лазера во многом зависят от параметров высоковольтных импульсов, формируемых генератором накачки на разрядном промежутке лазера. Зажигание объемного самостоятельного разряда с предварительной ионизацией, которым накачивается активная среда лазера, осуществляется на стадии нарастания разрядного напряжения. Чем выше скорость нарастания напряжения (или приведенной напряженности электрического поля  $E/N$ ) на разрядном промежутке, тем однороднее разряд и выше его устойчивость, в частности к пространственным неоднородностям  $E/N$ , вызываемым акустическими возмущениями концентрации газа  $N$  от предыдущих разрядных импульсов в режиме с высокой частотой  $f$  их следования. При оптимально высокой для Krf-лазера плотности мощности накачки ( $\sim 2.5$  МВт/см<sup>3</sup>) однородная форма объемного разряда сохраняется в течение характерного времени, не превышающего 60 нс [13]. Все это предъявляет жесткие требования к генераторам накачки эксимерных лазеров, которые должны иметь большие импульсную и среднюю мощности при генерации на нагрузке сильноточных высоковольтных импульсов малой длительности с высокой частотой их следования. Схемы генераторов накачки, использовавшихся в настоящей рабо-

те для исследования и оптимизации параметров эксимерного КгF-лазера, представлены на рис.2.

Для уменьшения длительности разрядного тока применялись высоковольтные сильноточные схемы перекачки заряда, наиболее простой из которых является C–C-схема, приведенная на рис.2,а. В этой схеме заряжаемая (через зарядную индуктивность  $L_c$ ) от высоковольтного зарядного устройства накопительная емкость  $C_0$  при ее коммутации тиратроном импульсно перезаряжается на емкость  $C_d$ , малоиндуктивно подсоединенную к разрядному промежутку. В такой схеме для обеспечения высокой скорости нарастания напряжения на разрядном промежутке при оптимальных режимах накачки амплитуда тока тиратрона обычно превышает допустимые номинальные значения, что приводит к уменьшению времени жизни коммутатора.

Для всех исследованных в настоящей работе схем (рис.2) предыонизация осуществлялась УФ излучением СР, автоматически зажигавшегося при зарядке конденсаторов емкостью  $C_{pr}$  ( $C_{pr} \ll C_d$ ), подсоединенных к электродам лазера через вспомогательный разрядный промежуток системы формирования заверченного СР.

Для надежной долговременной работы импульсно-периодических лазеров наиболее эффективны генераторы накачки с системой магнитного сжатия импульса (рис.2,б,в), представляющие собой цепочки последовательно соединенных контуров, которые состоят из емкостей и нелинейных насыщающихся дросселей или магнитных ключей МК. Число последовательных контуров выбирается таким, чтобы обеспечить оптимально высокие амплитуду и скорость нарастания напряжения на разрядном промежутке лазера при номинальных режимах работы коммутаторов схемы.

Схема генератора накачки, показанная на рис.2,б, представляет собой LC-инвертор с двумя ступенями сжа-

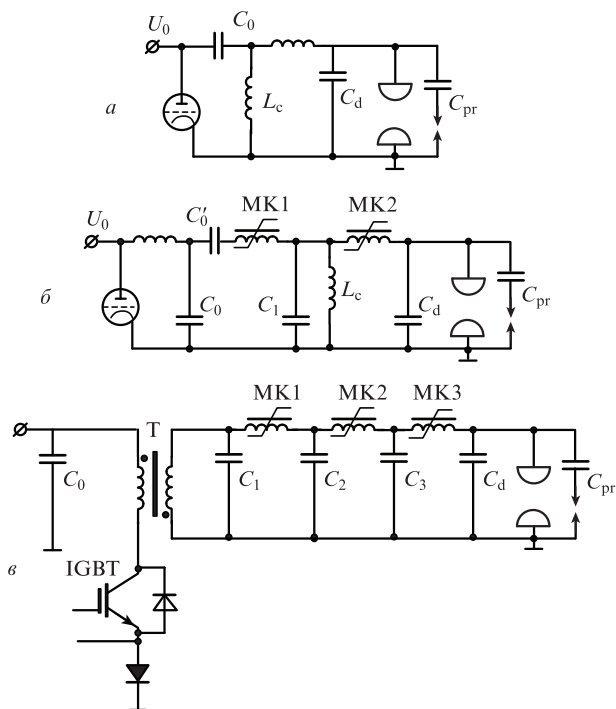


Рис.2. Схемы исследованных генераторов накачки КгF-лазера: C–C-схема (а), LC-инвертор с двухступенчатым сжатием импульса (б), полностью твердотельная схема с IGBT-коммутаторами и трехступенчатым сжатием импульса (в).

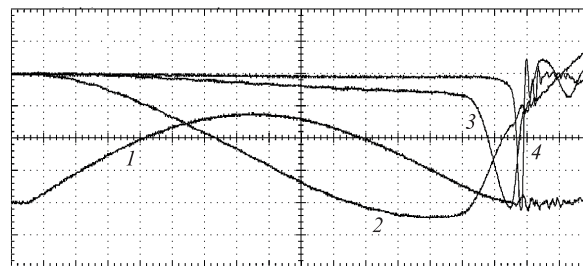


Рис.3. Осциллограммы тока тиратрона (1) и напряжений на выходе LC-инвертора (2), на промежуточном конденсаторе  $C_1$  (3) и на  $C_d$  (4) для КгF-лазера с генератором накачки на основе LC-инвертора с двухступенчатой компрессией импульса накачки. Масштаб по оси абсцисс – 200 нс/дел., по оси ординат – 200 А/дел. и 5 кВ/дел.

тия импульса. Такая схема позволяла использовать в качестве коммутатора тиратрон ТГИ 1000/25 с длительностью токового импульса  $\sim 3$  мкс, что обеспечивало паспортный срок службы тиратрона не менее  $10^9$  импульсов. На рис.3 показаны типичные осциллограммы тока тиратрона, импульсов напряжения на выходе LC-инвертора перед МК1, на промежуточном конденсаторе  $C_1$  перед МК2 и на подсоединенной к электродам лазера конденсаторной сборке последней ступени  $C_d$ . Амплитуда разрядного тока составляла  $\sim 10$  кА, длительность первой половины разрядного тока была равна  $\sim 30$  нс. Элементами 1-го и 2-го звеньев сжатия в схеме накачки служили семивитковый (МК1) и двухвитковый (МК2) магнитные ключи, определяющие суммарный коэффициент сжатия импульса накачки (отношение длительностей токов коммутатора и разряда), равный  $\sim 100$ .

Важнейшей частью генератора накачки лазера является коммутирующее устройство, в качестве которого в последнее время широко используются мощные биполярные транзисторы с изолированным затвором (Insulated-Gate Bipolar Transistor (IGBT)), имеющие практически неограниченный ресурс работы и обеспечивающие высокую стабильность параметров импульсов напряжения [3,18]. Схема генератора на основе полностью твердотельных элементов показана на рис.2,в. Полностью твердотельный генератор накачки лазера с полупроводниковыми коммутаторами (pulser) включает в себя повышающий трансформатор Т и размещен в баке с трансформаторным маслом или другой диэлектрической жидкостью, что обеспечивает его охлаждение, надежную электрическую изоляцию, подавление электромагнитных помех и компактность конструкции лазера. Для питания генератора накачки использовалось зарядное устройство с максимальным выходным напряжением 2.2 кВ и мощностью до 20 кВт, обеспечивавшее резонансную зарядку накопительной емкости  $C_0$ .

#### 4. Выходные характеристики лазера

Испытание лазера проводилось с использованием электродов длиной 95 см с радиусом закругления рабочей части 3 мм. Межэлектродное расстояние составляло 22 мм для схем на рис.2,а, б и 18 мм для схемы на рис.2,в, ширина разряда была равна 3 мм, длина – 910 мм, что отвечало активному объему 60 и 49 см<sup>3</sup> соответственно. Такая геометрия разрядного промежутка типична для эксимерных лазеров, используемых в качестве литографического источника излучения при промышленном производстве

интегральных схем. Для работы с высокой частотой следования импульсов больше подходит малая ширина разряда, что упрощает смену газа в разрядной области между очередными разрядными импульсами. Другой аспект, влияющий на выбор геометрии разрядного промежутка литографического лазера связан с тем, что ширину линии его излучения необходимо уменьшать до величины, не превышающей 1 пм. Для этого используются резонаторы с модулем сужения линии излучения. При этом размер лазерного пучка и, следовательно, ширина разряда должны быть уменьшены до величины, соизмеримой с эффективным размером (3–4 мм) апертуры модуля сужения линии. Как правило, ширина разряда литографического эксимерного лазера должна составлять ~2 мм при межэлектродном расстоянии ~20 мм или менее. Ширина разряда, равная 2 мм, реализовывалась при генерации лазера на молекулах AgF.

При высокой частоте следования лазерных импульсов регулируемая скорость газового потока между электродами, создаваемого системой циркуляции газа, составляла ~30 м/с. Ниже для всех схем на рис.2 данные экспериментов приведены для оптимизированных величин емкостей:  $C_d = 9.5$  нФ и  $C_{pr} = 0.5$  нФ.

Преимущество системы предыонизации УФ излучением завершеного СР, по сравнению с обычно используемой, в частности в литографических лазерах, предыонизацией коронным разрядом, заключается в возможности управлять в широких пределах энерговкладом во вспомогательный СР. Предыонизация излучением завершеного СР в виде однородного плазменного листа на поверхности диэлектрика (сапфировой пластины), обеспечивающая столь же высокий уровень предыонизации, как и искровая предыонизация, свободна от таких ее недостатков, как пространственная неоднородность, снижающая стабильность энергии генерации и КПД лазера при высокой частоте следования импульсов, и высокая эрозия искровых электродов, уменьшающая время жизни газовой смеси. Характерная скорость ионизации УФ излучением завершеного СР составляет  $\sim 0.5 \times 10^{18}$  электрон./с [19] при длительности импульса  $\sim 30$  нс. Процессы предыонизации в эксимерном лазере, зависящие от прилипания электронов к компонентам газовой смеси и от прикладываемого к электродам импульса напряжения, а также наиболее эффективные режимы предыонизации в эксимерном лазере рассмотрены в [20].

Экспериментально определенный, оптимальный по средней мощности излучения состав газовой смеси был следующим:  $F_2 : Kr : Ne = 3 : 70 : 2600$  мбар.

Окна лазерной камеры из  $MgF_2$  располагались под углом Брюстера к лазерной оси. Выносной резонатор был образован многослойным зеркалом с коэффициентом отражения на длине волны 248 нм более 99% и плоскопараллельной пластиной из  $CaF_2$  (без покрытия).

Для генераторов накачки с тиратронным коммутатором (рис.2,а,б) на рис.4 представлены полученные при частоте следования импульсов  $f = 100$  Гц зависимости КПД лазера  $\eta$  и энергии генерации  $W$  от зарядного напряжения  $U_0$ . Здесь и ниже КПД определяется как отношение энергии генерации лазера к электрической энергии, запасенной в накопительных конденсаторах  $C_0$  (схемы на рис.2,а и в) и  $C_0, C'_0$  (схема на рис.2,б).

В С–С-схеме с накопительной емкостью  $C_0 = 14$  нФ максимальная энергия генерации составила 120 мДж/имп., а максимальный КПД лазера был равен 3.1% (рис.4,а).

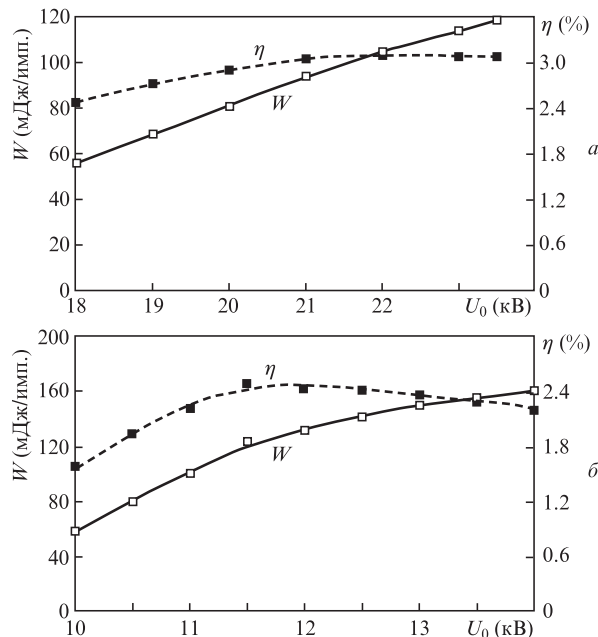


Рис.4. Зависимости энергии импульсов генерации  $W$  и КПД КгF-лазера  $\eta$  от зарядного напряжения  $U_0$  генератора накачки на основе С–С-схемы (а) и LC-инвертора (б).

В схеме с LC-инвертором (рис.2,б), в которой накопительные емкости  $C_0 = C'_0 = 35$  нФ, а энергозапас мог варьироваться за счет зарядного напряжения  $U_0$  в более широком, чем для С–С-схемы, диапазоне, максимальное значение  $W$  достигало 160 мДж/имп. Максимальный КПД лазера ( $\eta \approx 2.5\%$ ) был ниже, чем при использовании С–С-схемы, что главным образом связано с наличием магнитных ключей, поглощающих заметную часть запасаемой энергии.

Близкие к максимальным значения КПД лазера ( $\eta \approx 2.4\%$ ) были получены для другой схемы (рис.2,в) с магнитным сжатием импульса накачки, энергозапас которой был ниже, чем для схемы на рис.2,б, при этом удельный энерговклад в разряд составлял 44 Дж/л. Характеристики лазера со схемой накачки на рис.2,в мало изменялись при уменьшении межэлектродного расстояния лазера  $h$  от 22 до 18 мм, поэтому для данной схемы в дальнейшем использовалась электродная система с  $h = 18$  мм. Из рис.5 видно, что максимальное значение энергии генерации 96 Дж/имп. ограничивалось максимальным зарядным напряжением  $U_0 = 2,2$  кВ.

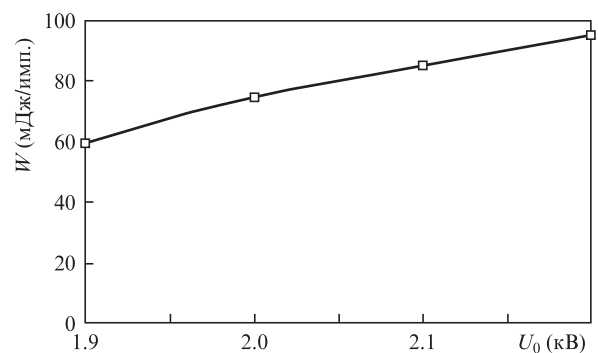


Рис.5. Зависимость энергии импульсов генерации  $W$  от зарядного напряжения  $U_0$  при использовании генератора накачки на основе полностью твердотельной схемы с полупроводниковыми коммутаторами.

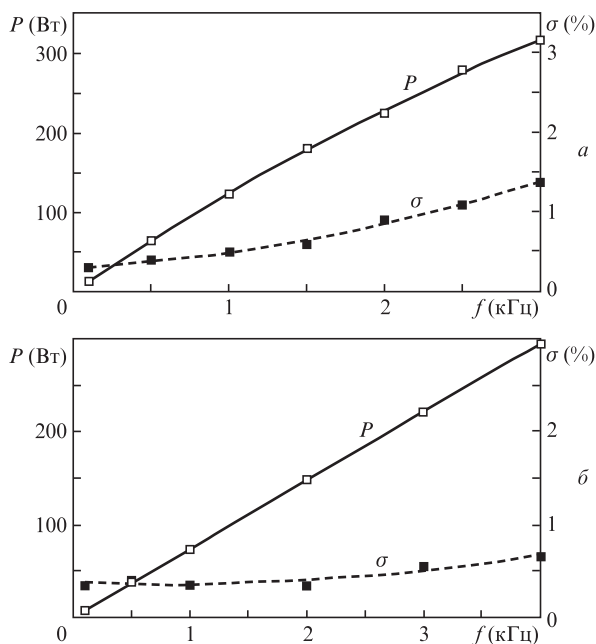


Рис.6. Зависимости средней мощности лазерного излучения  $P$  и относительной нестабильности энергии импульсов генерации  $\sigma$  от частоты следования импульсов генераторов накачки на основе  $LC$ -инвертора ( $a$ ) и полностью твердотельной схемы с полупроводниковыми коммутаторами ( $b$ ).

На рис.6 для случаев использования генераторов накачки на основе  $LC$ -инвертора и полностью твердотельной схемы представлены зависимости средней мощности лазерного излучения  $P$  и относительной нестабильности энергии генерации  $\sigma$  от частоты следования импульсов  $f$ .

Из рис.6, $a$  видно, что средняя мощность излучения 315 Вт была получена с применением генератора накачки с тиратронным коммутатором, выполненного по схеме на рис.2, $b$ , при  $f = 3$  кГц. При этом относительная нестабильность энергии генерации  $\sigma$ , монотонно возрастающая с ростом  $f$ , достигала 1.4%. Увеличение  $f$  свыше 3 кГц сопровождалось резким возрастанием нестабильности энергии генерации лазера.

Более высокая частота следования лазерных импульсов и более высокая стабильность энергии генерации достигались при использовании полностью твердотельной схемы накачки с полупроводниковыми коммутаторами (рис.6, $b$ ). Максимальная средняя мощность излучения, полученная при  $f = 4$  кГц, равнялась 295 Вт. При непрерывной многочасовой работе с частотой  $f = 4$  кГц величина  $\sigma$  не превышала 0.7%, что свидетельствует о высокой стабильности и надежности разработанного мощного эксимерного лазера.

На рис.7 показана последовательность энергий импульсов генерации, полученная при  $f = 4$  кГц и характеризующая высокую стабильность лазера. Характерная осциллограмма импульса лазерного излучения с длительностью 7.5 нс на полувысоте показана на рис.8.

Для плоскопараллельного резонатора расходимость излучения, измеренная по двум взаимно перпендикулярным направлениям (по меньшему ( $\theta_x$ ) и большему ( $\theta_y$ ) размерам лазерного пучка), составила  $\theta_x \times \theta_y = 0.6 \times 1.4$  мрад, что соответствует  $6\theta_{dx} \times 80\theta_{dy}$ , где  $\theta_{di} = 2\lambda/D_i$  ( $i = x, y$ ) – дифракционная расходимость прямоугольного пучка с апертурой  $D_x \times D_y$  [21]. Несмотря на достаточно большую расходимость излучения, лазер успешно использовался

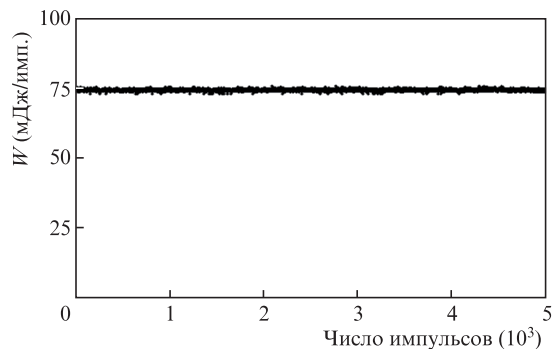


Рис.7. Последовательность значений энергии импульсов генерации при частоте их следования  $f = 4$  кГц, характеризующая высокую стабильность лазера ( $\sigma = 0.7\%$ ).

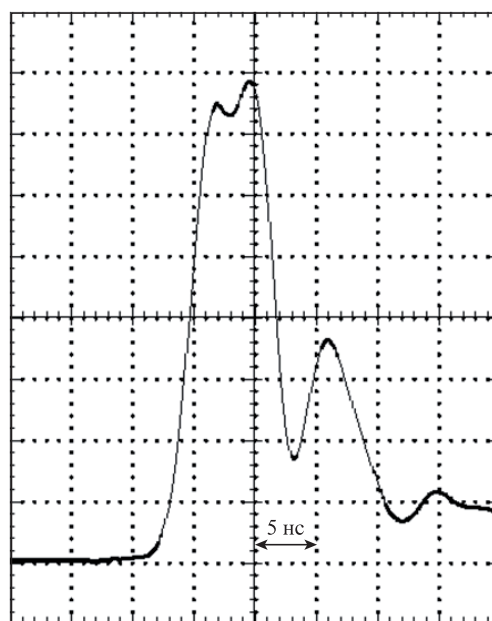


Рис.8. Осциллограмма импульса лазерного излучения.

для инициирования разряда в мощных источниках экстремального УФ излучения [22, 23], нанесения покрытий методом импульсной лазерной абляции [24] и др.

В то же время для ряда применений желательно иметь излучение с лучшей расходимостью. С этой целью нами был разработан и изготовлен ряд оптических схем, в том числе цилиндрический неустойчивый резонатор, с помощью которого мы рассчитываем улучшить расходимость  $\theta_y$  до  $1.7\theta_{dy} \approx 0.03$  мрад. Кроме того, изготовлены цилиндрические зеркальный и линзовый телескопы с увеличением  $M = 8$ . С использованием телескопа планируется увеличить горизонтальный размер расходимости пучка до 24 мм, улучшив горизонтальную расходимость  $\theta_x$  до 0.08 мрад. В целом с помощью этих оптических систем планируется обеспечить расходимость лазерного пучка  $\theta_x \times \theta_y \approx 0.08 \times 0.03$  мрад.

### 5. Заключение

Результаты проведенных исследований продемонстрировали, что предложенный и развитый подход к созданию мощных эксимерных лазеров с применением металлокерамической лазерной камеры нового типа на основе керамической трубы из  $Al_2O_3$  позволяет достичь боль-

шой мощности (300 Вт) лазерного УФ излучения (248 нм) и высокой частоты следования импульсов ( $f = 4$  кГц). Совместное использование развитой системы предыонизации на основе завершеного СР в виде однородного плазменного листа, расположенного вдоль электрода лазера, и полностью твердотельного генератора накачки с системой магнитного сжатия импульса позволило достичь высокостабильной ( $\sigma = 0.6\%$ ) долговременной работы КГГ-лазера при  $f = 4$  кГц.

- Basting D., Pippert K., Stamm U. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4426**, 14 (2002).
- Борисов В.М., Виноходов А.Ю., Водчиц В.А., Демин А.И., Ельцов А.В., Бастинг Д., Штамм У., Фосс Ф. *Квантовая электроника*, **25** (2), 126 (1998).
- Basting D., Marowsky G. (Eds) *Excimer Laser Technology* (Berlin: Springer, 2005).
- Ohmatsu K., Abiru K., Yamaguchi T., Shingai Y., Konishi M. *Techn. Rev.*, No. 73, 45 (2011).
- Limanov A.B., Borisov V.M., Vinokhodov A.Yu., Demin A.I., El'tsov A.V., Kirukhin Yu.B., Khristoforov O.B., in *Perspectives, Science and Technologies for Novel Silicon on Insulator Devices* (Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 2000, pp 55–61).
- Tetsuya S., Taihei O., Norihiro T., Kota O., Mitsuhiro H., Daisuke N., Hiroshi I., Tanemasa A., Tatsuo O. *Appl. Phys. A*, **114** (2), 625 (2014).
- Azuma H., Takeuchia A., Itoa T., Fukushima H., Motohiroa T., Yamaguchib M. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **74** (1-4), 289 (2002).
- Lawrence J., Waugh D.G. *Laser Surface Treatment of a Polymeric Biomaterial: Wettability Characteristics and Osteoblast Cell Response Modulation* (Philadelphia: Old City Publishing, 2013).
- Brown D.J.W., O'Keefe P., Fleurov V.B., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6520**, 652020 (2007).
- Asayama T., Sasaki Y., Nagashima T., Kurosu A., Hiroaki Tsushima, et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **8683**, 86831G (2013). Doi:10.1117/12.2011404.
- Борисов В.М., Виноходов А.Ю., Водчиц В.А., Ельцов А.В., Бастинг Д., Штамм У., Фосс Ф. *Квантовая электроника*, **25** (2), 131 (1998).
- Borisov V.M., Demin A.I., El'tsov A.V., Khristoforov O.B., Kirukhin Y.B., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5137**, 241 (2003).
- Борисов В.М., Христофоров О.Б. В кн.: *Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Сер. Б* (М.: Физматлит, 2005, т. 11, кн. 4, с. 503).
- Андраманов А.В., Кабаев С.А., Лажинцев Б.В., Нор-Аревян В.А., Писецкая А.В., Селемир В.Д. *Квантовая электроника*, **36**, 101 (2006).
- Борисов В.М., Виноходов А.Ю., Водчиц В.А., Ельцов А.В., Иванов А.С. *Квантовая электроника*, **30** (9), 783 (2000).
- Борисов В.М., Демин А.И., Христофоров О.Б. *Квантовая электроника*, **45**, 200 (2015).
- Borisov V.M., Khristoforov O.B. European Patent EP1525646B1, published 23.12.2009.
- Вартапетов С.К., Грязнов О.В., Малашин М.В., Мошкунев С.И., Небогаткин С.В., Хасая Р.Р., Хомич В.Ю., Ямщиков В.А. *Квантовая электроника*, **39** (8), 714 (2009).
- Борисов В.М., Христофоров О.Б. В кн.: *Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Вводный том II* (М.: Наука, 2000, кн. II, с. 350).
- Борисов В.М., Демин А.И., Ельцов А.В., Новиков В.П., Христофоров О.Б. *Квантовая электроника*, **26** (3), 204 (1999).
- Ready J.F., Farson D.F., Feeley T. (Eds) *LIA Handbook of Laser Materials Processing* (Berlin–Heidelberg–New York: Springer-Verlag, 2001).
- Борисов В.М., Виноходов А.Ю., Иванов А.С. Кирюхин Ю.Б., Мищенко В.А., Прокофьев А.В., Христофоров О.Б. *Квантовая электроника*, **39** (10), 967 (2009).
- Борисов В.М., Борисова Г.Н., Виноходов А.Ю., Захаров С.В., Иванов А.С., Кирюхин Ю.Б., Мищенко В.А., Прокофьев А.В., Христофоров О.Б. *Квантовая электроника*, **40** (8), 720 (2010).
- Борисов В.М., Кузьменко В.А. Христофоров О.Б. *Инженерная физика*, № 4, 34 (2014).