

Разработка мощных KrF-лазеров с частотой повторения импульсов до 5 кГц

В.М.Борисов, А.Ю.Виноходов, В.А.Водчиц, А.В.Ельцов, А.С.Иванов

Экспериментально исследованы основные факторы, определяющие возможность увеличения частоты повторения импульсов в мощных KrF-лазерах. Рассмотрены два прототипа компактного промышленного KrF-лазера. Первый прототип позволяет получать максимальную среднюю мощность ~ 620 Вт при частоте повторения импульсов 4 кГц, во втором, более компактном, прототипе была достигнута максимальная частота повторения 5 кГц при средней мощности излучения 200 Вт.

Ключевые слова: KrF-лазер, средняя мощность генерации, частота повторения импульсов, скорость газового потока, однородность УФ предыонизации.

Введение

Экимерные KrF-лазеры с длиной волны генерации $\lambda \approx 248$ нм широко используются для различных технологических применений, например таких как микрообработка различных материалов, УФ литография, маркировка. Очевидно, что по мере увеличения средней мощности излучения лазера P и/или частоты повторения импульсов f производительность технологического процесса с использованием лазера может быть повышена, а значит, и увеличена эффективность использования лазера. Максимальная средняя мощность, достигнутая к настоящему времени в коммерческих KrF-лазерах, не превышает ~ 300 Вт [1].

Недавние работы [2–4], проведенные в ведущих лазерных компаниях по созданию лазерных источников для УФ литографии, таких как Lambda Physik [2], Komatsu [3], Sumeg [4], продемонстрировали возможности повышения частоты следования импульсов в KrF-лазере до 2 кГц. Средняя мощность генерации KrF-лазеров в этих работах составляла ~ 20 Вт при ширине спектра ~ 0.6 нм, что вполне приемлемо при использовании такого лазера в УФ литографии. Достижение частоты $f \sim 2$ кГц в [2–4] в основном определялось сравнительно малой шириной разряда $b = 3$ мм. Такая малая ширина разряда в принципе давала возможность сменить газ в разрядном объеме к началу очередного разрядного импульса при умеренных скоростях потока газа в межэлектродном промежутке.

В работе [5] нами описан KrF-лазер с мощностью $P \approx 600$ Вт, полученной при $f \sim 620$ Гц. Объем разряда в этом лазере имел размеры $d \times b \times l = 28 \times 8 \times 800$ мм, где d – межэлектродное расстояние, l – длина разряда. В настоящей работе мы продолжили исследования KrF-лазера, начатые в [5]. Цель наших исследований – поиск и создание разрядных условий, необходимых для увеличения

частоты повторения импульсов в KrF-лазере при сохранении высокой средней мощности излучения.

Результаты экспериментов

Очевидно, что увеличить частоту повторения импульсов импульсно-периодического лазера можно в первую очередь за счет разумного увеличения скорости газового потока в межэлектродном зазоре. В лазере, описанном в [5], была получена максимальная скорость газа в межэлектродном зазоре $v = 45$ м/с при межэлектродном расстоянии $d = 28$ мм.

На первом этапе исследований для увеличения v мы попробовали уменьшить d до 20 мм. Однако, как показали измерения, при $d \approx 20$ мм скорость v , наоборот, снижалась до 30 м/с, что не позволяло увеличить частоту повторения импульсов. Последнее обстоятельство объясняется тем фактом, что в лазере использовался диаметральный вентилятор с диаметром колеса 150 мм, который, как показали детальные измерения основных газодинамических характеристик контура, является неоптимальным при уменьшении d ниже 28 мм.

Следующим этапом наших исследований было уменьшение ширины разряда с 8 мм [5] до 3 мм, что достигалось за счет использования новых модифицированных электродов с более острым профилем (1-й прототип KrF-лазера). На рис.1 приведены зависимости энергии генерации E , эффективности лазера η и относительного среднеквадратичного отклонения энергии генерации от импульса к импульсу σ от зарядного напряжения U , полученные при $f \approx 100$ Гц. Ширина разряда в этих экспериментах была равна ~ 3 мм, а межэлектродное расстояние составляло ~ 28 мм. В лазере использовалась искровая УФ предыонизация. Из рис.1 видно, что энергия генерации в модифицированном лазере может достигать 160 мДж при $U = 40$ кВ, а максимальная эффективность генерации по отношению к энергии, первоначально запасенной в накопительных конденсаторах LC-генератора системы питания, $\eta = 2.8\%$. Лучшая стабильность энергии генерации ($\sigma = 2\%$) достигается в области $U = 34–38$ кВ.

ГНЦ РФ – Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Россия, 142092 Троицк Моск. обл.

Поступила в редакцию 22 марта 2000 г.

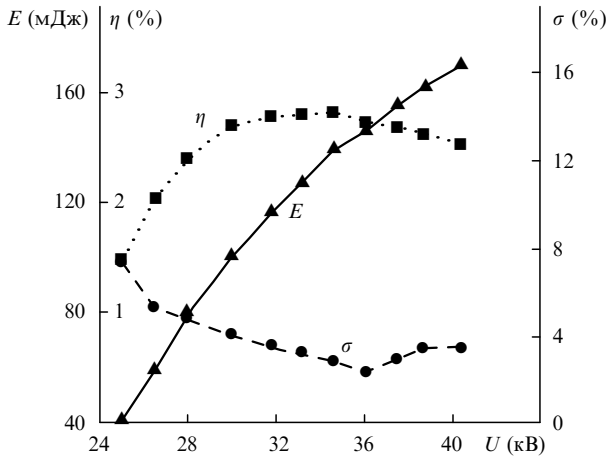


Рис.1. Зависимости $E(U)$, $\eta(U)$ и $\sigma(U)$ для 1-го прототипа КгF-лазера с искровой предыонизацией.

Полученная зависимость средней мощности P и КгF-лазера от частоты повторения импульсов приведена на рис.2. Как следует из рис.2, максимальная достигнутая частота повторения импульсов и максимальная средняя мощность составляют соответственно 4 кГц и 630 Вт. Результаты экспериментов показывают [6], что параметр σ , характеризующий стабильность энергии генерации от импульса к импульсу, является хотя и косвенной, но достаточно определенной характеристикой степени сохранения однородности объемного разряда в течение времени генерации. Поведение кривой $\sigma(f)$ (рис.2) свидетельствует о том, что однородность разряда существенно ухудшается при $f > 3500$ Гц. Это коррелирует с поведением кривой $P(f)$ на рис.2, которая иллюстрирует и тот факт, что при $f > 3500$ Гц рост P с увеличением f существенно замедляется. Кривые на рис.2 получены при максимально возможной для 1-го прототипа КгF-лазера скорости газового потока $v \approx 45$ м/с.

Следующие наши усилия были направлены на создание компактной газодинамической системы КгF-лазера для $d = 16 - 20$ мм. Новая система разрабатывалась нами с учетом рекомендаций, приведенных в работе [7]. В частности, расчеты показали, что для обеспечения высоких v при межэлектродных расстояниях $d = 16 - 20$ мм более выгодно использовать диаметральный вентилятор с диаметром колеса не более 120 мм при частоте его вращения $\omega \approx 4000$ об./мин. Многочисленные модель-

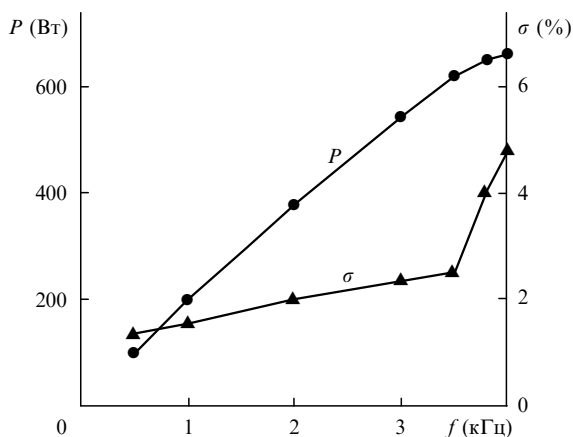


Рис.2. Зависимости $P(f)$ и $\sigma(f)$ для 1-го прототипа КгF-лазера с искровой предыонизацией.

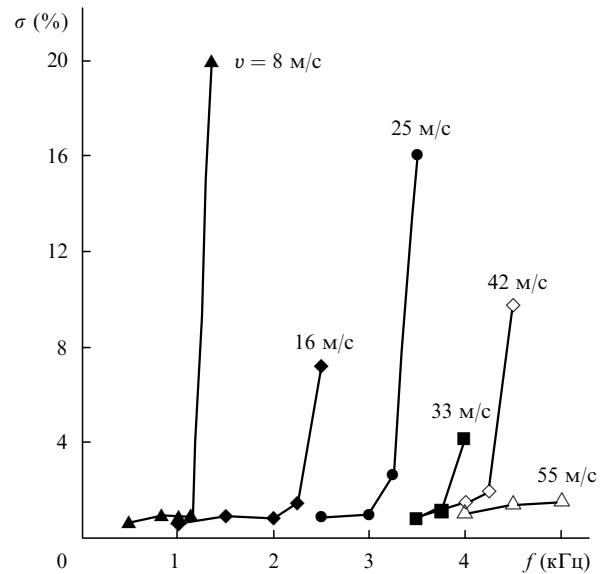


Рис.3. Зависимости $\sigma(f)$ для 2-го прототипа КгF-лазера с предыонизацией от разряда по поверхности диэлектрика для различных v .

ные эксперименты, проведенные нами, позволили выявить оптимальную с точки зрения достижения максимальной скорости конфигурацию газодинамического тракта. В результате в новом варианте КгF-лазера (2-й прототип) при $d = 16 - 20$ мм в межэлектродном промежутке достигалась скорость v до 55 м/с при $\omega \approx 4000$ об./мин. Во 2-м прототипе КгF-лазера удалось также существенно снизить габариты лазерной камеры по сравнению с 1-м прототипом. Лазерная камера 2-го прототипа была изготовлена из алюминиевой трубы с внутренним диаметром 380 мм и длиной 700 мм.

Роль скорости газа в межэлектродном промежутке v в достижении максимальной частоты повторения импульсов наглядно иллюстрирует рис.3, на котором представлена зависимость $\sigma(f)$ для разных v . Видно, что при $v = 8$ м/с отклонение σ приемлемо мало ($\sigma \leq 1\%$) только до $f \approx 1100$ Гц. При превышении этой частоты ($f \geq 1100$ Гц) σ резко возрастает, что указывает на существенное ухудшение однородности разряда. Действительно, визуальное наблюдение интегрального свечения разряда показывает, что при $f > 1100$ Гц в нем наблюдаются искровые каналы, смещенные вниз по потоку. Это означает [8], что газ, в котором возникли существенные (более 2%) флуктуации газовой плотности, вызванные током «предшествующего разряда», не полностью покинул область разрядного промежутка к моменту начала очередного разрядного импульса.

Увеличение v свыше 16 м/с позволяет (см. рис.3) продвигаться в область более высоких f . При $v = 55$ м/с происходит полная смена газа в межэлектродном промежутке к моменту начала очередного разрядного импульса даже при максимально высокой (5 кГц) частоте повторения импульсов. Достигнутая максимальная частота повторения импульсов в рассматриваемых экспериментах (~ 5 кГц) ограничивалась диапазоном стабильной работы тиратрона. Отметим, что так называемый коэффициент очистки газовой смеси $K = v/fb$ в данном эксперименте монотонно возрастал с 2.2 при $v = 8$ м/с до 3.6 при $v = 55$ м/с. Этот факт говорит о том, что чем больше частота повторения импульсов, тем дальше вниз по потоку необходимо смещать область возмущенного газа.

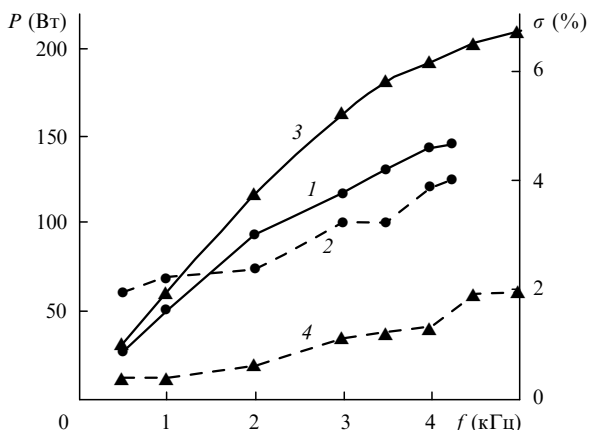


Рис.4. Зависимости $P(f)$ (1, 3) и $\sigma(f)$ (2, 4) для 2-го прототипа KгF-лазера при использовании искровой предыонизации (1, 2) и предыонизации от разряда по поверхности диэлектрика (3, 4).

На рис.4 приведены зависимости P и σ от f , полученные во 2-м прототипе KгF-лазера с искровой УФ предыонизацией. Ряд искр УФ предыонизации создавался автоматически при зарядке обострительных конденсаторов схемы накачки лазера. Искры в этом эксперименте располагались по одну сторону от разрядных электродов на расстоянии ~ 2 см друг от друга, так что новая порция газа проходила сначала область искр, а потом область объемного разряда (расположение искр «вверх по потоку газа»). Было естественным предположить, что улучшение однородности УФ предыонизации может позволить улучшить однородность распределения тока основного (объемного) разряда и тем самым уменьшить σ и увеличить максимальную частоту повторения импульсов. Однако эксперимент показал, что использование двух рядов искр, располагающихся по обе стороны электродов в шахматном порядке, не приводит к уменьшению σ или увеличению f по сравнению с использованием одного ряда искр. Более того, при $f \approx 4$ кГц возникающие сильные токовые каналы «привязываются» именно к искрам предыонизации, расположенным вниз по потоку.

С целью улучшения однородности УФ предыонизации нами была разработана система УФ предыонизации на базе скользящего разряда по поверхности диэлектрика. Такой разряд, однородно покрывающий поверхность протяженного диэлектрика [9], естественно обеспечивает высокую однородность предыонизации основного объемного разряда.

Зависимости P и σ от f для этой системы также приведены на рис.4. Сравнивая кривые 1 и 3, можно видеть, что при $f = 500$ Гц средние мощности излучения KгF-лазера с предыонизацией рядом искр и с предыонизацией скользящим разрядом одинаковы, однако УФ предыонизация скользящим разрядом позволяет в 4 раза улучшить стабильность энергии генерации (кривая 4) по сравнению с предыонизацией рядом искр (кривая 2).

Из рис.4 также видно, что по мере увеличения f скорость нарастания P в системе с искровой предыонизацией (кривая 1) значительно меньше, чем в системе с однородной предыонизацией скользящим разрядом (кривая 3). Поведение σ в этих системах (кривые 2 и 4) показывает, что и при высоких $f = 4$ кГц величина σ , полученная в системе с предыонизацией скользящим разрядом (кривая 4), остается в несколько раз меньшей, чем в системе с искровой УФ предыонизацией (кривая 2).

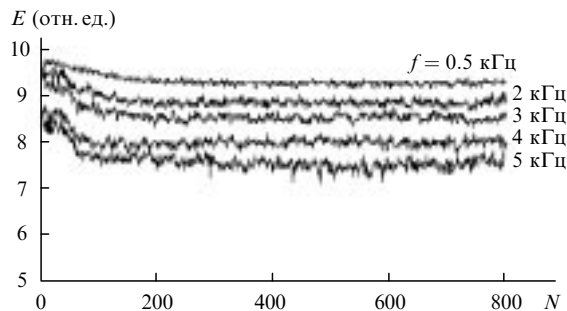


Рис.5. Изменение энергии импульсов генерации с ростом номера импульса N для 2-го прототипа KгF-лазера с предыонизацией от разряда по поверхности диэлектрика при различных f .

Итак, из рассмотрения зависимостей на рис.4 следует вывод о том, что более однородная предыонизация УФ излучением скользящего разряда способствует формированию объемного разряда, сохраняющего достаточно высокую однородность и при предельно высоких частотах повторения импульсов.

Привлекательной особенностью разрядной системы с предыонизацией скользящим разрядом является и то, что среднюю мощность излучения KгF-лазера $P \approx 200$ Вт можно получить, используя для предыонизации только малую долю ($\sim 1\%$) запасаемой в системе питания электрической энергии, в отличие от разрядной системы с искровой предыонизацией, где обычно вся запасаемая энергия проходит через искры. Таким образом, использование УФ предыонизации излучением скользящего разряда, позволяет уменьшить распыление электродов системы предыонизации и за счет этого увеличить ресурс как газовой смеси, так и всей лазерной системы в целом.

Динамика изменения энергии генерации KгF-лазера от импульса к импульсу для различных частот повторения импульсов приведена на рис.5. Из рис.5 следует, что примерно в 50 импульсах энергия генерации E остается неизменной, после чего она снижается до некоторого нового значения, которое уже может сохраняться довольно долго ($\sim 10^7$ импульсов).

Система регистрации импульсов с энергией E была устроена так, что при $f \leq 1$ кГц регистрировался каждый импульс, при $f = 2$ кГц – каждый второй импульс, при $f = 3$ кГц – каждый третий и т. д. Таким образом, как видно из рис.5, характерное время, после которого происходит снижение E , остается примерно постоянным при неизменной скорости прокачки $v = 55$ м/с. По нашим оценкам, это время совпадает со средним временем прохождения порции газа по всему газодинамическому тракту лазера и составляет ~ 30 мс. Последнее обстоятельство может означать, что первая порция газа, в которой уже произошел разряд и образовались некие продукты, отрицательно влияющие на эффективность генерации молекул KгF, через 30 мс снова попадает в разрядный промежуток, что и обуславливает заметное уменьшение энергии генерации. В дальнейшем устанавливается динамическое равновесие рождения и убывания этих продуктов, стационарная концентрация которых и определяет вид зависимостей на рис.5.

Следует отметить, что степень проявления обсуждаемого эффекта зависит от длительности как активной, так и пассивной пассивировки лазера фтором, а также от материала диэлектрика, используемого в конструкции лазера. В дальнейшем мы предполагаем исследовать

этот эффект более подробно, особенно при генерации лазера на молекуле ArF^+ , где он проявляется более резко.

Заключение

Таким образом, оптимизируя ширину объемного разряда, скорость газового потока в межэлектродном промежутке, однородность и местоположение УФ предъюстизации, можно резко повысить максимальную частоту повторения импульсов. Полученные зависимости средней мощности излучения от частоты повторения импульсов в диапазоне 1 – 5 кГц качественно не отличаются от аналогичных зависимостей, полученных нами ранее в области частот до 1 кГц, и, следовательно, могут быть объяснены в рамках представлений, развитых и изложенных, например, в [5, 8]. Тем не менее переход к частотам повторения импульсов более 1 кГц показал наличие неизвестного ранее интересного эффекта, определяющего динамику изменения энергии генерации (см. рис.5) от импульса к импульсу.

Практическим результатом нашей работы явилось создание двух прототипов KrF -лазера со средней мощностью излучения 600 и 200 Вт и максимальной частотой повторения импульсов 4 и 5 кГц. В течение длительной работы в различных режимах была продемонстрирована высокая надежность рассмотренных прототипов, позволяющая создать на их базе промышленные мощные KrF -лазеры с высокой частотой повторения импульсов.

Авторы приносят благодарность сотруднику ЦАГИ А.Г.Коровкину за консультации при создании компактных газодинамических контуров KrF -лазеров, а также Д.Бастингу и У.Штаммму (D.Basting, U.Stamm, Lambda Physik GmbH) за поддержку данной работы.

1. Stamm U. *Review of Industrial Excimer Laser. Report for XXIII Workshop «Excimer Laser for Fusion and Industrial Application»* (Erice, Sicily, 1997).
2. Bragin I., Klafit I., Kleinschmidt K., Osmanov R., Schoeder T., Vogler W., Zschocke W., Basting D. *Proc. SPIE*, **3679**, 1050 (1999).
3. Enami T., Nakano M., Watanabe T., Ohba A., Hori T., Ito T., Nishisaka T., Sumitani A., Wakabagashi O., Mizoguchi H., Nakarai H., Hisanaga N., Matsunaga T., Tanaka H., Ariga T., Sakanishi S., Okamoto T., Nondomi R., Sazuki T., Takabagashi Y., Tomaru H., Nakao K. *Proc. SPIE*, **3679**, 1025 (1999).
4. Myers D., Watson T.A., Das P.P., Partlo W.N., Hofmann T., Padmabandu G.G., Zambon P., Hysham C., Dunning R. *Proc. SPIE*, **3679**, 114 (1999).
5. Борисов В.М., Виноходов А.Ю., Водчиц В.А., Демин А.И., Ельцов А.В., Бастинг Д., Штамм У., Фосс Ф. *Квантовая электроника*, **25**, 126 (1998).
6. Борисов В.М., Виноходов А.Ю., Водчиц В.А., Демин А.И., Ельцов А.В., Бастинг Д., Штамм У., Фосс Ф. *Квантовая электроника*, **25**, 131 (1998).
7. Korovkin A.G., Savchuk V.D., Kuroles V.K. *Paper on LXXIX FVP Symposium on «Aerodynamics of Wind Tunnel Circuits and their Components»* (Moscow, Russia, 1996).
8. Баранов В.Ю., Борисов В.М., Степанов Ю.Ю. *Электроразрядные эксимерные лазеры на галогенидах инертных газов* (М., Энергоатомиздат, 1988).
9. Баранов В.Ю., Борисов В.М., Давидовский А.М., Христофоров О.Б. *Квантовая электроника*, **8**, 77 (1981).

V.M.Borisov, A.Yu.Vinokhodov, V.A.Vodchits, A.V.El'tzov, A.S.Ivanov.
Development of high-power KrF lasers with a pulse repetition rate up to 5 kHz.

An experimental investigation was made of the principal factors that determine the possibility to increase pulse repetition rates in high-power KrF lasers. Two prototypes of a low-bulk industrial KrF laser were considered. The first permits obtaining a maximum average output power of ~ 620 W for a pulse repetition rate of 4 kHz; the second, a more compact prototype, yielded a maximum pulse repetition rate of 5 kHz for an average radiation output of 200 W.