

УДК 621.373.8

Генерация в смесях инертных газов с фтором при накачке объемным диффузным разрядом

А.Н. Панченко, Н.А. Панченко*

*Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3*

Поступила в редакцию 18.12.2015 г.

Проведены исследования параметров лазерного излучения в газовых смесях He–Ar(Kr, Xe)–F₂(NF₃) и He–F₂ при возбуждении объемным разрядом, инициируемым пучком электронов лавин (ОРИПЭЛ). Показано, что ОРИПЭЛ является эффективным источником лазерного излучения на молекулах XeF* и KrF*. Впервые получена генерация в ВУФ-области спектра на переходах молекулярного фтора (157 нм). Показано, что высокая однородность формируемых в активной среде разрядов позволяет увеличить длительность лазерных импульсов на молекулах фторидов инертных газов. Полученные при накачке ОРИПЭЛ параметры лазерного излучения сопоставимы с характеристиками лазеров с возбуждением традиционным поперечным разрядом с преионизацией.

Ключевые слова: лазеры на фторидах инертных газов, диффузный объемный разряд, эффективная генерация; rare gas fluoride lasers, diffuse volume discharge, efficient lasing.

Введение

Электроразрядные эксиплексные лазеры на молекулах фторидов инертных газов находят широкое применение в составе лидарных комплексов для экологического мониторинга атмосферы [1–3], обнаружения различных радиоактивных, отравляющих и взрывчатых веществ [4, 5].

Для возбуждения лазеров на молекулах XeF*, KrF*, ArF*, F₂ обычно используется объемный поперечный разряд с предварительной ионизацией рабочей среды. При этом длительность импульса лазерного излучения в смесях инертных газов с фтором в значительной степени ограничивается контрагированием или филаментацией объемного разряда. Данные процессы обычно развиваются через время порядка 10 нс после пробоя лазерного промежутка [6, 7]. Поэтому поиск новых способов формирования и поддержания объемных разрядов в смесях с фтором является важной научной и практической задачей.

Ранее нами было показано, что диффузные разряды большой длительности могут формироваться в неоднородном электрическом поле при использовании импульсов напряжения с фронтом порядка 1 нс и амплитудой в несколько сотен киловатт и могут быть источниками эффективного лазерного излучения [8, 9]. Данные разряды получили название «объемные разряды, инициируемые пучком электронов лавин» (ОРИПЭЛ).

Цель настоящей работы заключается в исследовании параметров генерации в смесях инертных газов

с фтором и определении возможности увеличения длительности лазерных импульсов при накачке ОРИПЭЛ.

Установка и методика измерений

В экспериментах использовалась разрядная камера, подробно описанная в [8]. Для формирования ОРИПЭЛ использовались наносекундные импульсы, формируемые генератором РАДАН-220 [10]. Энергия E_0 , запасаемая в передающей линии генератора, не превышала 1,56 Дж. Разрядный промежуток был образован лезвийными электродами длиной 30 см с закругленными торцами. Расстояние между электродами составляло 1,8 см, а ширина разрядной области, как правило, не превышала 0,4 см (активный объем $V \approx 20 \text{ см}^3$). На торцах камеры располагались зеркала оптического резонатора, а в боковой стенке имелось дополнительное окно для фотографирования разряда и регистрации спектров и импульсов спонтанного излучения.

Эксперименты были выполнены при использовании плоского резонатора, состоящего из зеркала с коэффициентом отражения на лазерной длине волны $R \approx 100\%$ или алюминиевым покрытием и пластинки из MgF₂. За выходной пластинкой устанавливались зеркала с $R = 20–90\%$.

Энергия излучения измерялась калориметром ОРНИР с сенсорной головкой PE-50BV. Ток разряда измерялся омическим шунтом. Временной ход импульсов излучения на $\lambda = 193 \text{ нм}$ регистрировался скоростным фотодиодом Photek PD025 Spec. No. SPD025/S01-01, а на $\lambda = 200–800 \text{ нм}$ фотодиодом ФЭК-22 СПУ. Фотоприемники располагались вплотную к выходным зеркалам.

* Алексей Николаевич Панченко (alexsei@loi.hcei.tsc.ru); Николай Алексеевич Панченко (PanchenkoNA@vtomske.ru).

Для измерения импульсов в ВУФ-диапазоне в фотодиоде ФЭК-22 стандартный фотокатод заменялся на медную пластинку. Модифицированный фотоприемник присоединялся к выходной пластинке и вакуумировался. Тестирование данного приемника излучения проводилось импульсами N_2^- , XeF^* - и KrF^* -лазеров. Получена форма импульса KrF^* -лазера, совпадающая с формой импульса, измеренной фотодиодом ФЭК-22 СПУ. При этом излучение на $\lambda = 337$ и 351 нм фотоприемником не регистрировалось.

Спектры излучения разряда определялись спектрометром HR4000 (Ocean Optics B.V.). Интегральное свечение разряда фотографировалось с помощью цифрового фотоаппарата Sony A100. Для записи электрических сигналов применялся цифровой осциллограф TDS3054B ($0,5$ ГГц, $2,5 \cdot 10^9$ выборок/с).

Экспериментальные результаты и обсуждение

Максимальные энергии излучения в наших экспериментах достигались в смесях с буферным газом гелием. В смесях с неоном из-за низкого сопротивления разряда падали мощность накачки и энергия генерации. Использование аргона в качестве буферного газа или добавки аргона к гелию приводили к переходу ОРИПЭЛ в канальную форму.

Основные данные, описывающие режим работы XeF^* -лазера с накачкой ОРИПЭЛ, приведены на рис. 1. ОРИПЭЛ в типичной смеси XeF^* -лазера (рис. 1, а) имеет вид каналов, которые начинаются на электродах и затем быстро расширяются к центру разрядного промежутка, образуя однородное объемное свечение без признаков контракции. Подобный вид имел разряд и в смесях KrF^* -лазера.

В экспериментах использовались смеси с фтором и трифторидом азота. ОРИПЭЛ имел осциллирующий характер и продолжался до 50 нс (рис. 1, б). При этом затухание тока в смесях с фтором происходило быстрее, что говорит о более высоком сопротивлении плазмы объемного разряда в данных рабочих смесях. В смесях с фтором через $2-3$ нс после формирования разряда наблюдался короткий пик генерации в красной области на переходах атомарного фтора F1. Лазерное излучение на молекулах XeF^* продолжалось в течение $2-3$ периодов тока, и в смесях с фтором его полная длительность достигала 45 нс. Обычно длительность импульсов электроразрядных XeF^* -лазеров ограничивается развитием неоднородностей объемного разряда [6, 7] и составляет $20-30$ нс [11]. Это говорит о сохранении ОРИПЭЛ диффузной фазы горения даже после неоднократной смены направления протекания тока в лазерном промежутке. В смесях с NF_3 импульс излучения был короче на 10 нс.

Максимальная энергия излучения, полученная в смесях с NF_3 , достигала 10 мДж, что соответствует электрическому (относительно E_0) кпд XeF^* -лазера $\eta_0 = 0,65\%$, близкому к параметрам большинства электроразрядных лазеров на молекулах XeF^* [11]. Энергия излучения на молекулах XeF^* в смесях с F_2

была в 3 раза ниже. Это связано с поглощением фтора на $351-353$ нм [12] и с более чем на порядок большей константой скорости тушения фтором молекул XeF^* [13].

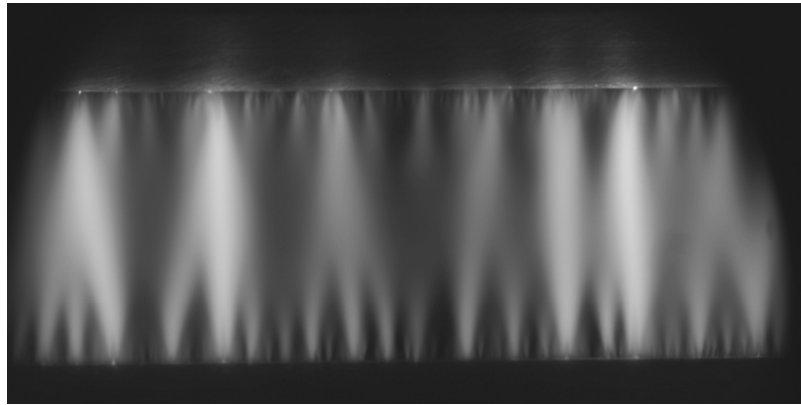
Основные результаты, полученные с использованием смесей He-Kr-F₂, иллюстрирует рис. 2. Как и в случае XeF^* -лазера, через несколько наносекунд после пробоя промежутка наблюдался короткий импульс излучения на линиях F1. Генерация на молекулах KrF^* начиналась через 10 нс после формирования ОРИПЭЛ и продолжалась в течение двух периодов колебаний тока, полная длительность лазерных импульсов достигала 30 нс. Спонтанное излучение на $\lambda = 248$ нм наблюдалось в течение всего импульса возбуждения. Это также подтверждает однородность и устойчивость ОРИПЭЛ в смесях гелия и криптона с фтором. Энергия излучения росла линейно с давлением гелия и достигала 20 мДж при пиковой мощности излучения $1,5$ МВт и кпд лазера $\eta_0 = 1,25\%$.

Оценим теперь внутренний (относительно вложенной в активную среду энергии) кпд лазера η_{int} . Вложенную энергию можно рассчитать, зная ток разряда и напряжение на лазерном промежутке U_{qs} , которое через несколько наносекунд после пробоя определяется составом и давлением активной смеси. В измерениях [14] для смеси He-Kr с 5 торр F_2 значение $U_{qs} = 2,45$ В/(см · торр). Оценка вложенной энергии E_{in} для давления смеси 4 атм и данного U_{qs} дает значение $0,64$ Дж. Отсюда внутренний кпд KrF^* -лазера с накачкой ОРИПЭЛ может достигать $\eta_{int} > 3\%$, что сопоставимо с параметрами KrF^* -лазеров с накачкой поперечным объемным разрядом с предрезонансом [15].

Таким образом, полученные результаты показывают, что накачка ОРИПЭЛ лазеров на XeF^* и KrF^* дает результаты, сравнимые с параметрами излучения лазеров с накачкой поперечным разрядом. При этом отсутствие системы подсветки и компактные лезвийные электроды значительно упрощают конструкцию лазера и снижают индуктивность разрядного промежутка при использовании возбуждения ОРИПЭЛ.

Полная длительность лазерных импульсов на молекулах AgF^* в смесях He-Ag-F₂ составила 25 нс. Энергия излучения была низкой и не превышала 1 мДж. В смесях с аргоном ОРИПЭЛ состоял из узких диффузных каналов, неравномерно распределенных по длине электродов, часто в промежутке наблюдались искровые каналы. При этом свечение остаточного объема было достаточно слабым. Низкие параметры AgF^* -лазера можно связать с неоднородностью ОРИПЭЛ в газовых смесях, содержащих аргон.

В смесях гелия с фтором получена генерация на красных линиях фтора и на переходе молекулы F_2^* в ВУФ-области спектра на $\lambda = 157$ нм. Характерными особенностями лазера на атомарных линиях фтора являются малое время запаздывания начала импульса (см. рис. 1 и 2) и широкая область генерации, достигающая 1 см с характерным провалом интенсивности в центре. В спектре излучения F1-лазера наблюдалось семь линий в области $620-760$ нм, энергия излучения не превышала $0,1$ мДж при длительности импульса до 20 нс.



a

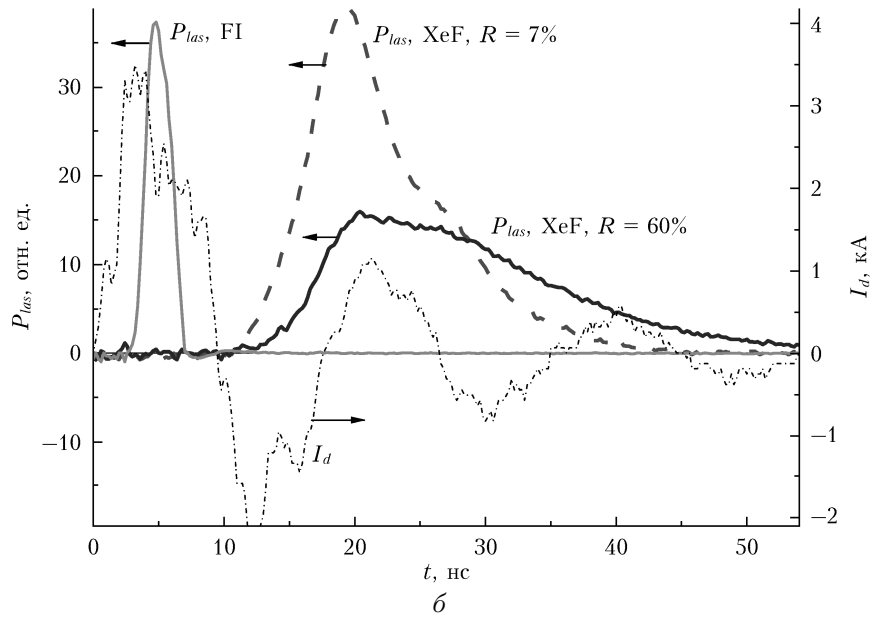


Рис. 1. Интегральная фотография разряда в смеси He:Xe:F₂ = 3 атм:15:5 торр (*a*) и характерные осциллограммы тока разряда I_d и лазерного излучения P_{las} на молекулах XeF* и линиях фтора FI для выходных зеркал с $R = 7$ и 60% в смеси He:Xe:F₂ = 3,5 атм:15:5 торр, второе зеркало имеет $R = 100\%$ (*б*)

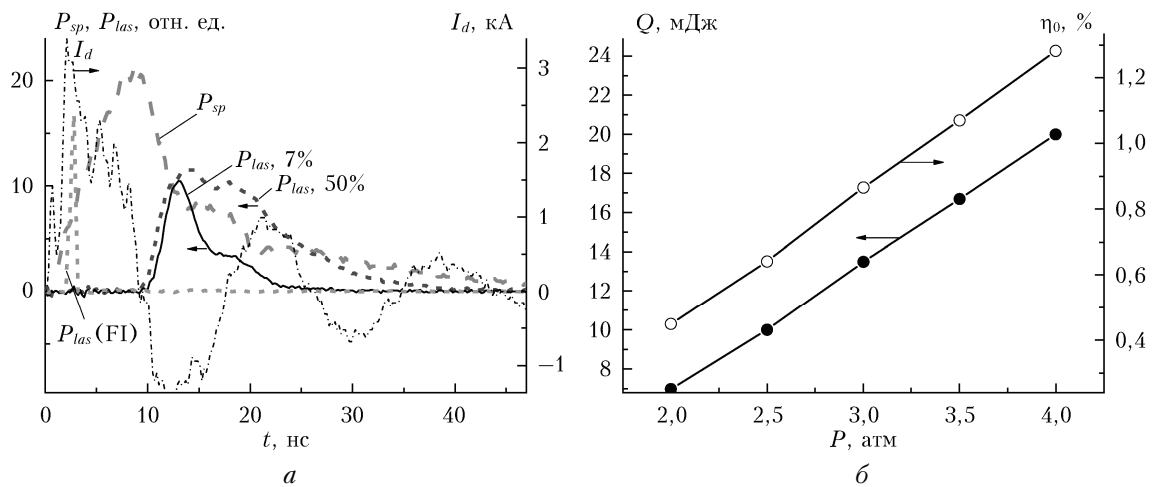


Рис. 2. Характерные осциллограммы тока разряда I_d , спонтанного P_{sp} (снятого через боковое окно на разрядной камере) и лазерного излучения на $\lambda = 248$ нм P_{las} и линиях атомарного фтора $P_{las}(FI)$ для выходных зеркал с $R = 7$ и 50% в смесях He:Kr:F₂ = 3 атм:100:5 торр (*a*) и зависимости энергии излучения и кпд KrF*-лазера от давления смеси He:Kr:F₂ = X атм:100:5 торр (*б*), второе зеркало имеет $R = 100\%$

Параметры ВУФ-лазера представлены на рис. 3. Импульс излучения на $\lambda = 157$ нм имел два ярко выраженных пика, полная длительность лазерного импульса достигала 25 нс. В течение первого полупериода тока ОРИПЭЛ генерация на переходах $F1$ и F_2^* наблюдалась одновременно. При разбюстировке алюминиевого зеркала интенсивность излучения на $\lambda = 157$ нм падала более чем в 50 раз, существенно изменялась и форма импульса излучения. Мощность и энергия ВУФ-излучения росли экспоненциально с ростом давления буферного газа, что является прямым свидетельством получения вынужденного излучения в ВУФ-области спектра при накачке ОРИПЭЛ.

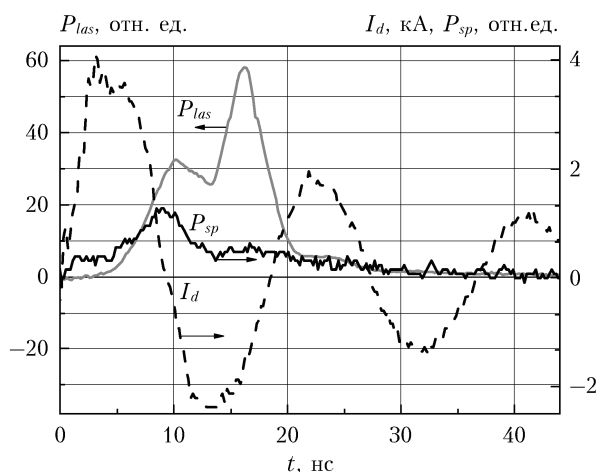


Рис. 3. Характерные осциллограммы импульсов тока ОРИПЭЛ I_d , лазерного ВУФ-излучения P_{las} , спонтанного излучения на $\lambda = 157$ нм P_{sp} , полученного при разбюстировке «глухого» алюминиевого зеркала. Смесь $He:F_2 = 3,5 \text{ атм}:5 \text{ торр}$

В условиях нашего эксперимента быстрое начало генерации на красных линиях фтора говорит о высокой концентрации F^* в плазме ОРИПЭЛ в первые несколько наносекунд после его формирования. Поэтому можно предположить, что первый пик генерации в наших экспериментах обусловлен излучением молекул F_2^* , формирующихся в столкновениях возбужденных атомов фтора с невозбужденными молекулами F_2 . Возбужденные атомы и молекулы фтора также могут формироваться в столкновениях с убегающими электронами на стадии формирования разряда.

Оценим энергию ВУФ-излучения. Согласно [16] квантовый выход фотоэлектронов из чистой меди на $\lambda = 157$ нм составляет $\sim 10^{-3}$ электронов/фотон. Расчет количества электронов по осциллограмме тока разряда излучения дает $\sim 10^{11}$ фотоэлектронов. Отсюда энергия ВУФ-излучения Q должна составить не менее $\sim 0,15$ мДж.

Заключение

Проведены исследования параметров лазерного излучения в смесях инертных газов с фтором при накачке ОРИПЭЛ. Показано, что устойчивые объ-

емные разряды большой длительности могут формироваться в смесях высокого давления с фтором в компактных разрядных системах, образованных лезвийными электродами без дополнительного источника подсветки. В этих разрядах впервые получена генерация на молекулах XeF^* и KrF^* с параметрами (кпд, длительность импульса), сопоставимыми с лазерными характеристиками, полученными при накачке традиционным поперечным разрядом с предыонизацией. Впервые в диффузных разрядах получено лазерное излучение на переходах молекулярного фтора в ВУФ-области спектра. Длительность ВУФ-импульсов составила 25 нс при энергии излучения 0,15 мДж.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 14-08-00074.

1. Heaps W.S., Burris J. Airborne Raman lidar // Appl. Opt. 1996. V. 35, N 36. P. 7128–7135.
2. Бобровников С.М., Горлов Е.В., Жарков В.И. Экспериментальная оценка чувствительности СКР-лидара при использовании среднего УФ-диапазона длин волн // Оптика атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 1. С. 70–74; Bobrovnikov S.M., Gorlov E.V., Zharkov V.I. Experimental estimation of Raman lidar sensitivity in the middle UV // Atmos. Ocean. Opt. 2013. V. 26, N 4. P. 320–325.
3. Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Невзоров А.А., Невзоров А.В., Романовский О.А., Харченко О.В. Лидарное зондирование озона в верхней тропосфере – нижней стратосфере: методика и результаты измерений // Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326, № 9. С. 124–132.
4. Набиев Ш.Ш. Современные тенденции развития методов дистанционного обнаружения радиоактивных и высокотоксичных веществ // Вестн. Российской академии естественных наук. 2012. № 1. С. 14–25.
5. Bobrovnikov S.M., Vorozhtsov A.B., Gorlov E.V., Zharkov V.I., Panchenko Yu.N., Sakovich G.V. Lidar detection the vapor of explosives in the atmosphere // Russ. Phys. J. 2015. V. 58, N 9. P. 14–21.
6. Kuscner M.J. Microarcs as a termination mechanism of optical pulses in electric-discharge-excited KrF excimer laser // IEEE Trans. Plasma Sci. 1991. V. 19, N 2. P. 387–399.
7. Mathew D., Bastiaens H.M.J., Boller K.J., Peters P.J.M. Current filamentation in discharge-excited F_2 -based excimer laser gas mixtures // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 88, N 10. P. 101502.
8. Вильтовский П.О., Ломаев М.И., Панченко А.Н., Панченко Н.А., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф. Генерация в УФ, ИК и видимой областях спектра в диффузном разряде, формируемом убегающими электронами лавин // Квант. электрон. 2013. Т. 43, № 7. С. 605–609.
9. Ломаев М.И., Панченко А.Н., Панченко Н.А. Спектральные характеристики излучения нецепных HF(DF)-лазеров с накачкой объемным разрядом // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 4. С. 341–345; Lomaev M.I., Panchenko A.N., Panchenko N.A. Spectral parameters of nonchain volume-discharge HF(DF) laser radiation // Atmos. Ocean. Opt. 2014. V. 27, N 4. P. 339–343.
10. Mesyats G.A., Korovin S.D., Rostov V.V., Shpak V.G., Yalandin M.I. The RADAN series of compact pulsed power generators and their applications // Proc. IEEE. 2004. V. 92, N 7. P. 1166–1179.

11. *Kumagai H., Obara M.* Output energy enhancement of discharge-pumped XeF(B → X) lasers with the two-component halogen donor mixtures // IEEE J. Quantum Electron. 1989. V. 25, N 8. P. 1874–1878.
12. *Mandl A., Slater R., Appel H.C.* Selective removal of F₂ impurity from NF₃/Xe/Ne, XeF laser mixtures // Rev. Sci. Instrum. 1982. V. 53, N 3. P. 301–305.
13. *Eden J.G., Waynant R.W.* Collisional deactivation studies of the XeF^{*}(B) state by He, Xe, NF₃, and F₂ // J. Chem. Phys. 1978. V. 68, N 6. P. 2850–2854.
14. *Onkels E.D., Seelig W.* Real time measurement of current and voltage in discharge pumped KrF^{*} excimer lasers // Rev. Sci. Instrum. 1997. V. 68, N 8. P. 3250–3251.
15. *Borisov V.M., Bragin I.E., Vinokhodov A.Yu., Vodchits V.A.* Pumping rate of electric-discharge excimer lasers // Quantum Electron. 1995. V. 25, N 6. P. 507–510.
16. *Физическая энциклопедия.* Т. 5 / Гл. ред. А.М. Прохоров. М.: Большая Российская энциклопедия, 1998. С. 365.

A.N. Panchenko, N.A. Panchenko. Lasing in mixtures of rare gases with fluorine pumped by volume diffuse discharge.

Laser parameters in He–Ar(Kr, Xe)–F₂ and He–F₂ gas mixtures under pumping by runaway electron preionized diffuse discharge (REP DD) are studied. It is shown that the REP DD can be a source of efficient laser emission on XeF^{*} and KrF^{*} molecules. Laser action on transitions of molecular fluorine in the VUV range at 157 nm was obtained in REP DD for the first time. It was shown that high uniformity of REP DD allows one to increase laser pulse duration on rare gas fluoride molecules. Laser parameters obtained in the REP DD are comparable with those obtained under pumping by commonly used transverse discharges with preionization.