

УДК 621.373.8

Лазеры УФ-, видимого и ИК-диапазонов с накачкой диффузным разрядом, формируемым убегающими электронами

А.Н. Панченко, Н.А. Панченко, М.И. Ломаев, В.Ф. Тарасенко*

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

Поступила в редакцию 28.03.2013 г.

Проведены исследования лазеров на смесях различных газов с SF₆ и NF₃ при накачке объемным (диффузным) разрядом, формируемым в неоднородном электрическом поле за счет генерации убегающих электронов. Получена эффективная генерация на молекулах HF ($\lambda = 2800\text{--}3200$ нм), DF (3800–4200 нм) и N₂ (337,1 нм). Исследована генерация на переходах атомов неона ($\lambda = 585,3$ нм), аргона (750,3 нм), фтора (712,8 и 731,1 нм) и на молекулах XeF* ($\lambda = 351$ и 353 нм). Показано, что использование объемного разряда, инициируемого пучком электронов лавин в газовых смесях с SF₆, является эффективным способом накачки лазеров на молекулах HF, DF и N₂.

Ключевые слова: лазеры ИК-, видимого и УФ-диапазонов, объемный разряд, инициируемый пучком электронов лавин; pulsed IR, visible, UV lasers, volume discharge initiated by run-away electrons (REP DD).

Введение

Импульсные электроразрядные лазеры на плотных газах представляют большой класс лазеров, работающих на различных газовых смесях, с длинами волн от ВУФ- до дальнего ИК-диапазона. Для создания эффективных лазеров данного класса необходимо сформировать в газовой среде высокого давления объемный самостоятельный разряд. Это достигается при использовании профилированных электродов, предыонизации активной среды и подаче на лазерный промежуток импульсов высокого напряжения. Исследованию газовых лазеров посвящено большое число оригинальных работ, обзоров и монографий (см., например, [1, 2] и ссылки в них).

В работах [3–5] была показана возможность формировать объемные диффузные разряды без источника дополнительной ионизации разрядного промежутка. Для этого необходимо использовать электроды с малым радиусом кривизны и подавать на лазерный промежуток импульсы высокого напряжения с крутым фронтом (~1 нс). Данный тип разряда формируется за счет предыонизации убегающими электронами и получил название «объемный разряд, инициируемый пучком электронов лавин» (ОРИПЭЛ) [3–5]. При накачке различных газовых смесей данным разрядом получена генерация

на атомарных переходах ксенона в ИК-диапазоне [6] и на второй положительной системе азота [7], однако эффективность генерации оставалась низкой.

В настоящей статье описаны созданные нами импульсные газовые лазеры различных спектральных диапазонов с накачкой ОРИПЭЛ и определены перспективные газовые смеси для создания эффективных газовых лазеров.

Установка и методика измерений

В экспериментах использовалась разрядная камера, которая могла откачиваться и заполняться различными газами. Электроды были выполнены в виде лезвий с закругленными торцами. Расстояние между электродами составляло 18 мм. Длина разрядной области равнялась 20 см. На торцевых стенках разрядной камеры устанавливались плоские зеркала резонатора. Эксперименты проводились с использованием алюминиевого зеркала и плоскопараллельных пластинок из CaF₂, Ge, КРС-5 или КРС-6. Возбуждение осуществлялось генератором наносекундных импульсов РАДАН-220. Данный генератор формирует на согласованной нагрузке 20 Ом импульсы с амплитудой до 220 кВ. Длительность импульса напряжения на полувысоте при согласованной нагрузке составляла ~2 нс, а длительность фронта импульса напряжения в передающей линии ~0,5 нс. При подключении разрядной камеры увеличивались длительность фронта импульса напряжения до ~2 нс и его длительность на полувысоте. Энергия, запасаемая в передающей

* Алексей Николаевич Панченко (alexei@loi.hcei.tsc.ru); Николай Алексеевич Панченко (PanchenkoNA@vtomske.ru); Михаил Иванович Ломаев (Lomaev@loi.hcei.tsc.ru); Виктор Федотович Тарасенко (VFT@loi.hcei.tsc.ru).

линии генератора, составляла 1,2–1,4 Дж [8]. Длительность импульса тока разряда зависела от давления и сорта газа и при низких давлениях могла достигать в колебательном режиме нескольких сотен наносекунд.

Лазерные импульсы в ИК-диапазоне регистрировались фоторезистором ФСГ-22, охлаждаемым жидким азотом, а в УФ- и видимом диапазонах – фотодиодом ФЭК-22. Энергия излучения измерялась калориметром ОРНИР с сенсорами на различные диапазоны спектра. Спонтанное излучение в ВУФ-области спектра регистрировалось с помощью вакуумного монохроматора VM-502. Временные характеристики излучения в ВУФ-диапазоне определялись с помощью монохроматора VM-502 и ФЭУ (ЕМ1 9781 В), а в ИК-, УФ- и видимом диапазонах использовались монохроматор МДР-12 и ФСГ-22 или ФЭК-22. Для регистрации электрических сигналов применялся осциллограф TDS-3054В.

Экспериментальные результаты

Азотный лазер на длине волны $\lambda = 337,1$ нм. Заселение верхнего лазерного уровня азотного лазера на полосе ($\lambda = 337,1$ нм) осуществляется прямым электронным ударом при значении параметра E/p на разрядном промежутке не менее ~ 100 В/(см · мм рт. ст.). При накачке самостоятельным разрядом напряжение спадает на несколько наносекунд после пробоя лазерного промежутка. Соответственно, для повышения эффективности генерации на азоте необходимы короткие длительности импульса напряжения и тока разряда. Поэтому используемый в экспериментах генератор импульсов оптимален для накачки азотного лазера, а использование смесей азота с SF_6 позволяет согласовать сопротивление разряда с импедансом генератора и увеличить мощность накачки и энергию УФ-излучения. При этом диффузный разряд без предварительной ионизации разрядного промежутка был сформирован в чистом азоте и в смесях азота с SF_6 до давлений в несколько атмосфер. Полученные результаты иллюстрирует рис. 1.

При накачке ОРИПЭЛ наблюдалась одновременная генерация на первой (P_{IR}) (длины волн 865–1048 нм) и второй (P_{UV}) (длина волны 337,1 нм) положительных системах азота. При этом мощность УФ-излучения достигала 0,6 МВт. Максимальная энергия УФ-излучения составила 2,5 мДж при электрическом (относительно запасенной в передающей линии генератора) кпд $\eta_0 = 0,2\%$. Полученная эффективность близка к предельному расчетному кпд азотного лазера и максимальным значениям эффективности генерации на 337,1 нм, полученной в экспериментах [9].

Нецепные химические HF(DF)-лазеры. Интересной особенностью смесей на основе SF_6 является возможность формирования в них объемного разряда без предыонизации. Наиболее легко объемный разряд без подсветки реализуется при использовании смесей SF_6 с углеводородами [10]. Замена углеводородов на H_2 или D_2 приводит к быстрому

развитию контракции объемного разряда. Поэтому максимальная эффективность HF(DF)-лазеров без использования подсветки получена при коротких (~ 20 нс) импульсах накачки [11].

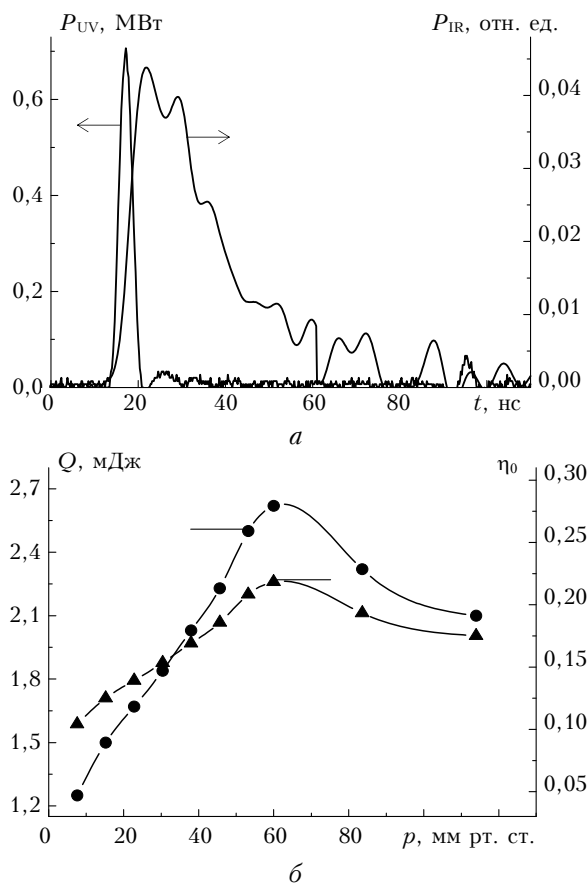


Рис. 1. Осциллограммы импульсов генерации в смеси $N_2 : SF_6 = 300 : 45$ мм рт. ст. (а) и зависимости энергии излучения на 337,1 нм и электрического кпд азотного лазера от содержания добавки SF_6 в азот при давлении 300 мм рт. ст. (б); момент времени $t = 0$ соответствует началу тока разряда

В наших экспериментах длительность тока разряда составила 10 нс. Измеренный энерговклад в активную среду лазера был равен 0,5 Дж. При активном объеме 8–10 см³ это соответствует удельной энергии накачки 50–60 Дж/л, что является оптимальной величиной для нецепного электроразрядного химического лазера [12].

Полученные результаты иллюстрирует рис. 2. Максимальная энергия излучения HF-лазера составила 55 мДж, что соответствует предельному внутреннему (относительно вложенной энергии) η_{int} кпд генерации на молекулах HF $\approx 10\%$, энергия излучения DF-лазера составила 40 мДж, что также соответствует предельному кпд 8% [12]. Подобно [12] в спектре нецепных лазеров с накачкой ОРИПЭЛ наблюдались интенсивные каскадные переходы, а максимальная энергия излучения зарегистрирована на полосе P_1 . Каскадные переходы увеличивают эффективность извлечения энергии из активной среды нецепного химического лазера, поскольку

одна колебательно-возбужденная молекула $\text{HF}^*(\nu)$ ($\nu = 1-3$ — колебательное квантовое число) может произвести до 3 фотонов.

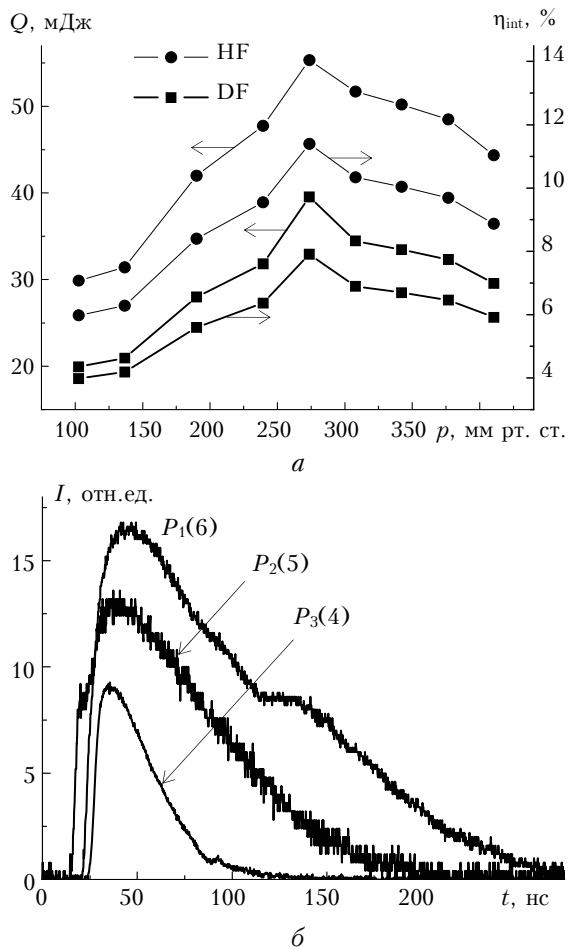


Рис. 2. Зависимости энергии излучения и внутреннего кпд HF- и DF-лазеров от давления смеси $\text{SF}_6 : \text{H}_2(\text{D}_2) = 8 : 1$ (а); каскадные переходы в спектре HF-лазера $P_3(4) \rightarrow P_2(5) \rightarrow P_1(6)$ (б)

Кроме того, за счет мощного импульса накачки генерация на отдельных линиях начиналась через 15–20 нс после пробоя разрядного промежутка с разбросом около 5 нс, что снижает потери энергии на достижение порога генерации. Данные факторы обеспечивают высокий кпд нецепного лазера с накачкой ОРИПЭЛ.

Лазер на смесях $\text{Ne}-\text{NF}_3$. Генерация в данной смеси на длине волны 585,3 нм (переход атома $\text{Ne } 3p-3s$) ранее была получена при накачке поперечным разрядом, однородность которого обеспечивалась за счет предыонизации от дополнительных искровых промежутков [13]. Применение ОРИПЭЛ позволило нам увеличить оптимальное давление рабочей смеси, а также давление электроотрицательного газа NF_3 .

В зависимости от давления смеси можно было наблюдать импульсы генерации, состоящие из одного или двух пиков. Генерация двух пиков излучения наблюдалась во всем межэлектродном про-

межутке при давлении смеси менее 100 мм рт. ст. и отсутствии ярких искровых каналов в промежутке. Второй пик генерации имел меньшую мощность, запаздывал относительно первого на ~10 нс. Появление второго пика можно объяснить увеличением мощности накачки во время второго полупериода тока разряда. Длительность первого (основного) пика генерации составляла при оптимальных давлениях ~3,5 нс на полувысоте. Исчезновение второго пика генерации при увеличении давления можно объяснить контрагированием разряда, о чем говорит рост интенсивности излучения, регистрируемой через боковое окно после первого пика, а в лазерном промежутке видны яркие искровые каналы.

Лазер на смесях $\text{Ar}-\text{NF}_3$. В данной смеси на длине волны 750,3 нм (переход $4p-4s$) генерация наблюдалась ранее в [13] при накачке поперечным разрядом с искровой предыонизацией, подобно смеси $\text{Ne}-\text{NF}_3$. ОРИПЭЛ позволил увеличить оптимальное давление рабочей смеси и давление электроотрицательного газа NF_3 в смеси. В смеси $\text{Ar} : \text{NF}_3 = 30 : 30$ мм рт. ст. также наблюдалась генерация двух пиков излучения. При оптимальных давлениях длительность импульса генерации в первом пике, который имел большую мощность, составляла ~5 нс на полувысоте.

Лазер на смесях $\text{He}-\text{NF}_3$. В смеси $\text{He}-\text{NF}_3$ порог генерации на переходе атома гелия $3s-2p$ ($\lambda = 706,5$ нм) не был достигнут. Однако при накачке ОРИПЭЛ в области 620–760 нм стабильно регистрировалась генерация на атомарных линиях фтора. Число линий генерации при увеличении давления гелия достигало семи. Также с увеличением давления увеличивалась мощность генерации. Наибольшую интенсивность имели линии атомарного фтора с длинами волн 712,8 и 731,1 нм. Длительность импульса генерации на всех линиях зависела от давления и в смеси $\text{He} : \text{NF}_3 = 12 : 1$ при давлении 100 мм рт. ст. составила ~10 нс.

XeF -лазер. Получена генерация на молекулах XeF^* при возбуждении ОРИПЭЛ смесями $\text{He}(\text{Ne})-\text{Xe}-\text{NF}_3$. Максимальная мощность излучения достигала 30 кВт. При давлении смеси 4 атм и ниже мощность излучения в смеси с буферным газом гелием была выше, чем с буферным газом неонем. При больших давлениях измерения не проводились из-за ограничения по давлению смеси для данной установки. Длительность импульса генерации на полувысоте уменьшалась от 8,5 до 5,5 нс при увеличении давления смеси от 1 до 4 атм. Спектр генерации зависел от состава рабочей смеси. В смеси $\text{He}-\text{Xe}-\text{NF}_3$ лазерное излучение наблюдается преимущественно на 351 нм, а в смеси $\text{Ne}-\text{Xe}-\text{NF}_3$ на 351 и 353 нм. При этом мощность излучения на 353 нм была в 2 раза больше.

ВУФ-излучение в аргоне и криптоне с добавками ксенона. Во всех тяжелых инертных газах (аргоне, криптоне и ксеноне) при давлении 0,3–1,2 атм был получен диффузный разряд. В чистых газах (аргоне, криптоне и ксеноне) при повышенных давлениях в спектре излучения доминируют

димеры инертных газов. Наиболее интересный результат был получен при возбуждении аргона и криптона с малыми примесями ксенона (~0,01%). При добавках ксенона было зарегистрировано интенсивное излучение на длине волны ~147 нм. Интенсивность этой полосы была наибольшей в аргоне при давлении ~0,9 атм и в криптоне при давлении 0,3 атм. Мощность накачки при давлении газов более 1 атм составляла ~100 МВт/см³. Разряд имел форму диффузного конуса или однородных диффузных струй, которые могли перекрываться. Яркие пятна видны только на катоде, и их размер не превышал 1 мм. При уменьшении длины промежутка мог происходить переход от объемного к искровому разряду. Однако и при малых длинах промежутка объемная стадия разряда опережала искровую. Это говорит о возможности получения лазерного ВУФ-излучения в смесях инертных газов при накачке ОРИПЭЛ.

Заключение

Проведенные исследования показали перспективность применения ОРИПЭЛ для накачки различных газовых лазеров. Установлено, что ОРИПЭЛ наиболее эффективен для накачки лазеров, в состав рабочей смеси которых входит SF₆. Добавки SF₆ увеличивают напряжение на промежутке с электродами в виде лезвий и повышают мощность накачки. В этих условиях реализованы предельные КПД азотного и нецепных химических лазеров на молекулах HF и DF. Получена генерация в видимой и УФ-областях спектра на переходах атомов неона, аргона, фтора и молекулы XeF*. Рассмотрена возможность использования ОРИПЭЛ для получения лазерного ВУФ-излучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 13-08-00609.

1. Гудзенко Л.И., Яковленко С.И. Плазменные лазеры. М.: Атомиздат, 1978. 253 с.
2. Mesyats G.A., Osipov V.V., Tarasenko V.F. Pulsed gas lasers. Washington: SPIE Press, 1995. 374 p.
3. Тарасенко В.Ф., Бахит Е.Х., Бураченко А.Г., Костыря И.Д., Ломаев М.И., Рыбка Д.В. Диффузные разряды в неоднородном электрическом поле при по-

вышенных давлениях, инициируемые убегающими электронами // Ж. техн. физ. 2010. Т. 80, вып. 2. С. 51–59.

4. Тарасенко В.Ф., Костыря И.Д., Рыбка Д.В. Пробой в воздухе атмосферного давления при наносекундной длительности импульса напряжения за счет убегающих электронов // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 1. С. 103–108.
5. Ломаев М.И., Сорокин Д.А., Тарасенко В.Ф. Излучение в ВУФ-области спектра бинарных смесей аргона и гелия с ксеноном при диффузном наносекундном разряде в неоднородном электрическом поле // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 3. С. 226–229.
6. Алексеев С.Б., Губанов В.П., Костыря И.Д., Орловский В.М., Скакун В.М., Тарасенко В.Ф. Объемный импульсный разряд в неоднородном электрическом поле при высоком давлении и коротком фронте импульса напряжения // Квант. электрон. 2004. Т. 34, № 11. С. 1007–1010.
7. Тарасенко В.Ф., Тельминов А.Е., Бураченко А.Г., Рыбка Д.В., Бахит Е.Х., Ломаев М.И., Панченко А.Н., Вильтовский П.О. Генерация из области столкновения волн ионизации, формируемых за счет концентрации электрического поля на электродах с малым радиусом кривизны. // Квант. электрон. 2011. Т. 41, № 12. С. 1098–1103.
8. 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 application // Proc. IEEE. 2004. V. 92, N 7. P. 1166–1179.
9. Бычков Ю.И., Лосев В.Ф., Савин В.В., Тарасенко В.Ф. Повышение эффективности N₂-лазера // Квант. электрон. 1975. Т. 2, № 9. С. 2047–2053.
10. Аполлонов В.В., Белевцев А.А., Казанцев С.Ю., Сайфуллин А.В., Фирсов К.Н. Самоиницирующий объемный разряд в нецепных HF-лазерах на смесях SF₆ с углеводородами // Квант. электрон. 2000. Т. 30, № 3. С. 207–214.
11. Midorikawa K., Sumida S., Sato Y., Obara M., Fujioka T. Efficient operation of a low-impedance Blumlein discharge initiated HF/DF chemical laser // IEEE J. Quantum. Electron. 1979. V. QE-15, N 3. P. 190–194.
12. Панченко А.Н., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф. Спектральные характеристики нецепных электроразрядных HF- и DF-лазеров в эффективных режимах возбуждения // Квант. электрон. 2004. Т. 34, № 4. С. 320–324.
13. Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф. Генерация в инертных газах при накачке поперечным разрядом // Квант. электрон. 1988. Т. 15, № 10. С. 1978–1981.

A.N. Panchenko, N.A. Panchenko, M.I. Lomaev, V.F. Tarasenko. UV, visible, and IR lasers pumped by the diffuse discharge formed by run-away electrons.

Laser action in gas mixtures of different gases with NF₃ and SF₆ pumped by a volume diffuse discharge formed in nonuniform electric field by run-away electrons (REP DD) is studied. Efficient lasing on HF(DF) and nitrogen molecules was demonstrated. Laser action on atomic transitions of Ne ($\lambda = 585,3$ nm, Ar ($\lambda = 750,3$ nm), F ($\lambda = 712,8$ и $731,1$ nm), and on XeF* molecules ($\lambda = 351$ и 353 nm) was studied, as well. It was shown that the volume discharge initiated by run-away electrons (REP DD) in gas mixtures with SF₆ is a source for efficient excitation of gas lasers on HF, DF, и N₂ molecules.