

Многочастотные планарные лазеры среднего ИК диапазона с импульсной СВЧ накачкой

А.П.Минеев, С.М.Нефедов, П.П.Пашинин, П.А.Гончаров,
В.В.Киселев, О.М.Стельмах

Исследованы и оптимизированы характеристики излучения импульсно-периодических планарных HF-, DF-, HF-DF-, Хе- и HF-DF-Хе(Kr)-лазеров, возбуждаемых СВЧ разрядом (2.45 ГГц), с диффузионным охлаждением в зависимости от длительности (10–40 мкс) и частоты следования (50–400 Гц) импульсов накачки, состава и давления смеси рабочих газов (30–200 Тор) при малых (до 0.6 л/с) скоростях прокачки газа. В газоразрядном HF-DF-Хе-лазере впервые продемонстрирована одновременная работа как химического молекулярного HF-DF-лазера, так и рекомбинационного лазера на переходах атома ксенона, генерирующего широкополосное (октава) излучение в диапазоне 2.0–4.2 мкм с выходной средней мощностью излучения 43 мВт и КПД 0.9%. При замене ксенона на криптон в HF-DF-Kr-лазере получена генерация на длинах волн 2.52–4.15 мкм. В HF-DF-лазере осуществлена генерация одновременно в двух спектральных диапазонах: 2.7–2.9 мкм и 3.6–4.2 мкм с выходной мощностью излучения ~50 мВт. Установлено, что уменьшение длительности импульсов накачки при увеличении частоты их следования (ЧСИ) для сохранения среднего энергетического запаса приводит к росту средней выходной мощности и КПД лазера. При небольших ЧСИ (50–100 Гц) и малой скорости прокачки смеси газов возможна эффективная замена буферного газа гелия на неон. Генерация Хе-лазера получена в спектральном диапазоне 2.03–3.65 мкм; средняя выходная мощность излучения при длительности импульса накачки 20 мкс и ЧСИ до 10 кГц составила 580 мВт при максимальном КПД 0.55%. Полученные экспериментальные результаты демонстрируют возможность создания широкополосного HF-DF-Хе-лазера в области частот излучения 2–4 мкм с заданным соотношением интенсивностей в различных спектральных диапазонах.

Ключевые слова: планарный HF-DF-Хе-лазер, газовый разряд, спектральные характеристики, многочастотная генерация.

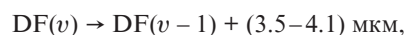
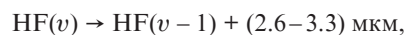
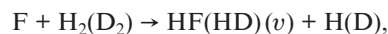
1. Введение

Разработка широкополосных источников лазерного излучения среднего ИК диапазона представляет большой интерес для спектроскопии, при мониторинге газовых и аэрозольных примесей в атмосфере, в химических технологиях, для разделения изотопов и других применений. Спектр излучения лазера в данном случае должен обеспечивать большое число линий генерации в широком диапазоне длин волн. Один из перспективных путей освоения новых спектральных диапазонов связан с параметрическим преобразованием частоты излучения существующих лазеров методами нелинейной оптики, в частности путем генерации суммарных и разностных частот [1].

В качестве источников излучения среднего ИК диапазона могут применяться импульсные химические лазеры, генерирующие одновременно на переходах нескольких колебательно-возбужденных молекул. В результате химических реакций может возбуждаться целый ряд молекул. Большинство химических лазеров генерирует излучение на переходах между колебательными уровнями двухатомных молекул. Излучение этих лазеров находится в ИК области спектра от 1 до 10 мкм.

Молекулы HF (DF) могут образовываться из молекулярного F₂ и H₂(D₂) в газовых электрических разрядах,

причем в качестве донора атомарного фтора используется инертная молекула SF₆, что исключает опасность, связанную с работой с молекулярным фтором. В результате реализуются стандартные условия для работы химических лазеров. Помимо этого, газовая смесь содержит в качестве разбавителя большое количество гелия, обеспечивающего условия для поддержания разряда и прокачки смеси газов. В химическом лазере атомарный фтор реагирует с молекулярным водородом, образуя колебательно-возбужденные молекулы HF*(DF*) согласно следующим реакциям:



где v – колебательный уровень молекулы.

Фторид дейтерия ведет себя аналогично HF. Большая масса дейтерия обеспечивает генерацию на более длинных волнах. При этом следует иметь в виду, что сложная структура колебательно-вращательных переходов в этих молекулах при сильном колебательном возбуждении позволяет получить генерацию на многих линиях. Для осуществления оптимальных условий генерации необходима быстрая смена рабочей среды за время между импульсами, поскольку импульс генерации в галогеноводородных лазерах ограничен во времени накоплением продуктов реакции. Отработанный газ откачивается из разрядной камеры и после отделения HF может использоваться сно-

А.П.Минеев, С.М.Нефедов, П.П.Пашинин, П.А.Гончаров, В.В.Киселев, О.М.Стельмах. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: mineev@kapella.gpi.ru

Поступила в редакцию 29 октября 2019 г., после доработки – 21 ноября 2019 г.

ва. Вращательные энергетические уровни расположены неэквидистантно, спектр генерации лазера состоит из множества колебательно-вращательных линий, лежащих в широком спектральном диапазоне: 2.6–3.3 мкм для HF-лазера и 3.5–4.1 мкм для DF-лазера.

В работе [2] получена генерация HF- и DF-лазеров при возбуждении в мощном импульсном СВЧ разряде. Лазерная головка состояла из кварцевой трубки с окнами, установленными под углом Брюстера, помещенной в прямоугольный СВЧ волновод. Активная лазерная среда формировалась в СВЧ разряде при взаимодействии импульса магнетронного генератора мощностью ~ 5 кВт с импульсом накачки длительностью 3.5 мкс при ЧСИ 1 кГц с эффективностью 0.1%. В эксперименте наблюдалась лазерная генерация мощностью 6 и 1 мВт в смесях с H_2 и D_2 на длинах волн 2.7 и 3.8 мкм соответственно. В работе [3] сообщалось о получении генерации HF- и DF-лазеров в планарной структуре при возбуждении разряда импульсным ВЧ генератором с частотой 30 МГц. Энергия генерации составила 10 мкДж при эффективности 0.1%. В работе [4] получена генерация HF- и DF-лазеров в волноводной структуре сечением 2×3 мм при возбуждении газового разряда импульсным ВЧ генератором с частотой 150 МГц. Достигнутый КПД $\approx 5\%$ при ЧСИ накачки 100 Гц и длительности импульса 2 мкс.

Известно, что химические фтороводородные лазеры (ХФЛ) хорошо работают на обоих изотопах водорода H_2 и D_2 , причем энергетический выход лазеров, работающих на молекулах HF*, превышает энергетический выход DF*-лазеров. Однако среди обширной литературы, посвященной исследованиям HF- и DF-лазеров, имеется немного экспериментальных работ, сообщающих о получении лазерной генерации одновременно на молекулах HF* и DF* (см. напр., [5]). В [6] этот эффект описан при работе фотоиницируемого химического фтороводородного лазера. В [7] приведены данные о спектральном составе излучения, свидетельствующие об одновременном возбуждении колебательно-вращательных переходов HF* и DF* (диапазоны 2.6–3.0 мкм и 3.7–4.1 мкм соответственно) в лазере на смеси газов $SF_6-H_2-D_2$.

Лазер на атомарных переходах ксенона считается в настоящее время одним из перспективных источников излучения в ближнем ИК диапазоне ввиду возможности использования рабочей среды большого объема, КПД более 1% и низкого порога генерации. Генерация Хе-лазера получена в интервале длин волн 1.73–3.6 мкм в широком диапазоне давлений газовой смеси (0.05–14.0 атм), удельных мощностей накачки (от 1 Вт/см³ до 10 кВт/см³), при длительностях накачки от 10 нс до непрерывной [8–10]. Наибольшие успехи при создании таких лазеров достигнуты при их возбуждении электронным пучком (максимальная эффективность составила 4.5% [11]), ядерными реакциями с энергией импульса лазерного излучения 500 Дж (эффективность 3% [12]), электроионизационным способом (КПД 3.2% [13]), а также СВЧ разрядом [14, 15]. Так, в работе [14] описана генерация в мощном импульсном СВЧ разряде при формировании активной лазерной среды путем взаимодействия импульса магнетронного генератора мощностью ~ 500 кВт с газом при давлении до 1 атм. В эксперименте наблюдалась генерация на длинах волн 1.73 и 2.03 мкм по центру газоразрядной трубки вне области скин-слоя, средняя мощность излучения составила 17 мВт.

Цель настоящей работы – исследование характеристик излучения многочастотных планарных лазеров на

смесях HF, DF и Хе(Кг), возбуждаемых СВЧ разрядом на частоте 2.45 ГГц, с диффузионным охлаждением в диапазоне средних давлений рабочей смеси газов. Повышенный интерес к применению СВЧ разряда для накачки лазеров связан главным образом с доступностью магнетронов, излучающих на частоте 2.45 ГГц, которые широко используются в СВЧ печах [16, 17]. Кроме того, применение СВЧ разряда в диапазоне частот 2–10 ГГц для накачки лазеров имеет ряд преимуществ перед разрядами постоянного и ВЧ токов, а именно: высокий КПД (более 70%) и киловаттный уровень мощности магнетронов – СВЧ источников; компактность магнетронов, их низкая стоимость и возможность работы в импульсном режиме.

2. Конструкция планарного лазера с СВЧ возбуждением

На рис.1 представлена фотография экспериментальной установки. В качестве источника возбуждения активной среды лазера использовался импульсный СВЧ разряд. Применялся магнетрон 2М-130 с выходной импульсной мощностью до 8 кВт. Форма импульса лазерного излучения контролировалась ИК детектором PVR-10.6 с временным разрешением 2 нс и двухканальным цифровым осциллографом LeCroy-432 с полосой пропускания 350 МГц. Мощность лазерного излучения измерялась прибором NOVA-2 (OPHIR). Спектральные исследования проводились с помощью монохроматора MS-2004 с решеткой 150 штр./мм и неохлаждаемой пироэлектрической линейкой HPL-256-500.

Экспериментально исследовались параметры излучения планарного лазера с импульсно-периодической СВЧ накачкой и длиной разрядного канала 250 мм. Оптический резонатор был образован «глухим» зеркалом с золотым покрытием (коэффициент отражения 98%, радиус кривизны 3 м). В качестве выходного зеркала использовалась плоскопараллельная пластина из ZnSe с диэлектрическим покрытием с пропусканием около 50% на длинах волн 2–4 мкм.

Прямоугольный волновод (рис.1) с размерами $90 \times 45 \times 500$ мм образует объемный СВЧ резонатор 6, который с одной стороны ограничивается и настраивается короткозамыкающим плунжером 8. Со стороны ввода СВЧ мощности согласование магнетрона 1 с СВЧ резонатором осуществляется с помощью согласующего трехштырькового трансформатора 4 через волноводный переход 5.

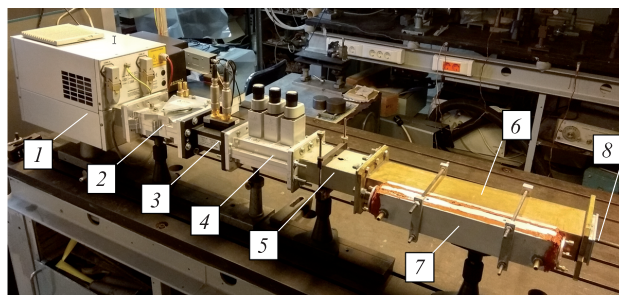


Рис.1. Фотография экспериментальной установки: 1 – магнетрон 2М-130 с блоком питания РМ-740Т и блоком охлаждения; 2 – изолятор с нагрузкой; 3 – направленный ответвитель с измерителем прямой и отраженной мощности WR340-WDC0-2.0; 4 – согласующий трехштырьковый трансформатор АГ340М3; 5 – волноводный переход; 6 – СВЧ резонатор; 7 – лазерный излучатель; 8 – короткозамыкающий плунжер.

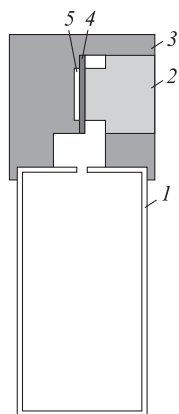


Рис.2. Поперечное сечение планарного лазера с СВЧ накачкой: 1 – прямоугольный волновод сечением 90 × 45 мм; 2 и 3 – профилированные алюминиевые пластины; 4 – кварцевая пластина 2 × 30 × 300 мм; 5 – разрядный канал 2 × 25 × 250 мм.

Контроль вкладываемой и отраженной СВЧ мощности осуществляется измерителем мощности WR340-WDC0-2.0 с направленным ответвителем 3. Защита магнетрона (в случае рассогласования) от отраженной мощности обеспечивается с помощью изолятора с поглощающей нагрузкой 2. СВЧ мощность выводится из объемного резонатора через протяженную щель в узкой стенке волновода (аналог щелевой антенны) и поступает в лазерный излучатель 7.

Поперечное сечение планарного лазерного излучателя (рис.2) представляет собой газоразрядную структуру, образованную двумя профилированными алюминиевыми пластинами 2 и 3, которые прижимают кварцевую пластинку 4 боковой стороной к щели СВЧ резонатора. Разрядный канал 5 с размерами 2 × 25 × 250 мм образован зазором между отполированной алюминиевой и кварцевой пластинами. В конструкции предусмотрено водяное охлаждение алюминиевых пластин. Использование планарного разряда обеспечивает преимущества по эффективности отвода тепла со стенок, компактности, а также невысокое напряжение пробоя, хорошее качество выходного пучка и высокую выходную мощность лазерного излучения, снимаемую с единицы объема.

В данной конструкции электрическое поле в разрядной области перпендикулярно поверхности диэлектрической пластинки. Поскольку СВЧ мощность поступает в разрядную область только с одной стороны, разрядный ток замыкается через алюминиевую пластину с другой стороны. Поэтому СВЧ разряд не сосредоточен только вблизи поверхности диэлектрической пластинки, а распределен равномерно по всей толщине разрядной области. Объем активной среды составил 12.5 см³, что позволяло обеспечить плотность вкладываемой импульсной мощности до 640 Вт/см³. Конструкция лазерного излучателя подробно описана в работах [16, 17].

3. Экспериментальные результаты

3.1. HF- и DF-лазеры

В наших экспериментах для получения атомарного фтора и инициирования химической реакции в рабочей смеси газов применялся поперечный СВЧ разряд. В результате предварительных опытов было определено оптимальное соотношение компонентов рабочей смеси га-

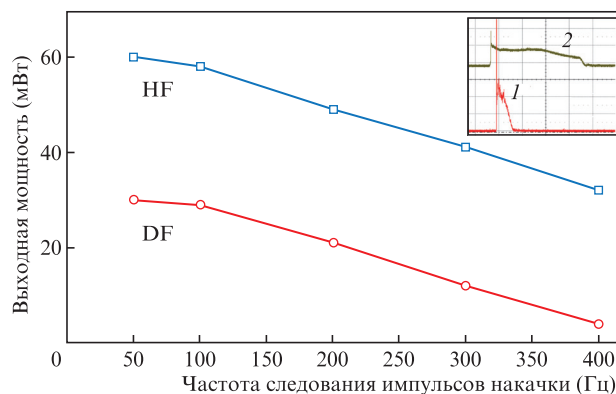


Рис.3. Зависимости средней выходной мощности HF- и DF-лазеров от частоты следования импульсов накачки длительностью 20 мкс с импульсной мощностью 5 кВт в рабочих смесях H₂(D₂):SF₆:He = 1 : 10 : 89 при давлении газа 150 Тор. На вставке показаны осциллограммы импульсов: лазерного излучения длительностью 5 мкс (1) и СВЧ накачки для HF-лазера (2).

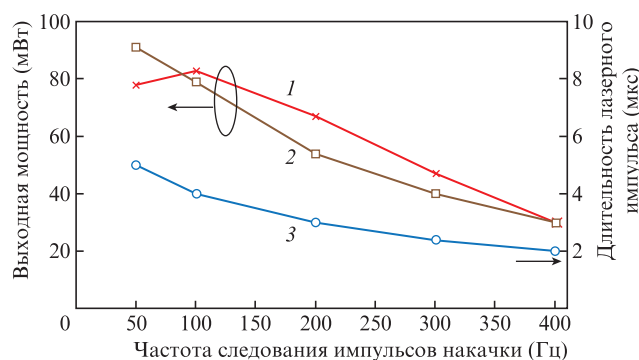


Рис.4. Средняя выходная мощность HF-лазера для рабочих смесей H₂:SF₆:He = 2 : 10 : 88 (1), H₂:SF₆:He = 2 : 10 : 88 (2) и длительность импульса лазерной генерации (3) в зависимости от частоты следования импульсов накачки длительностью 10 мкс с импульсной мощностью 5 кВт при давлении газа 150 Тор.

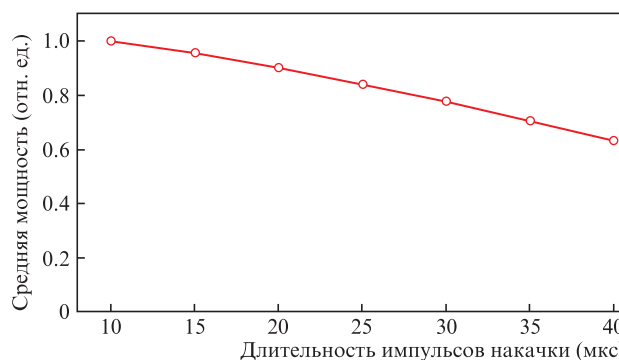


Рис.5. Зависимость средней выходной мощности лазера от длительности импульсов накачки при ЧСИ 100 Гц и импульсной мощности 5 кВт. Состав рабочей смеси газов H₂:SF₆:He = 1 : 10 : 89 при давлении 150 Тор.

зов H₂(D₂):SF₆:He = 1 : 10 : 89, причем изменение парциальной доли водорода (в пределах 1 – 3) незначительно сказывалось на величине выходной мощности.

Особенность кинетики химических лазеров определяется тем, что практически все они связаны с молекулами галогеноводородов, которые являются эффективными тушителями возбуждения для многих молекул и прежде всего для самих себя. Поэтому для повышения выходной мощности и КПД лазера необходимо уменьшать дли-

тельность импульса накачки и увеличивать скорость прокачки рабочей смеси газов. Импульс генерации в галогеноводородных лазерах отстает от импульса накачки на время ~ 1.5 мкс (время задержки определяется скоростью химической реакции) и ограничен сверху временем накопления продуктов реакции, поскольку дезактивация невозбужденными молекулами HF(DF) тушит генерацию прежде, чем закончится импульс накачки. Отметим, что выходная мощность лазерного импульса уменьшается с увеличением частоты следования и длительности импульсов накачки (рис.3–5). При скорости прокачки рабочей смеси газов ~ 0.6 л/с и объема активной среды 12.5 см³ полная смена рабочей среды происходит за время ~ 20 мс (50 Гц). На основании полученных нами экспериментальных данных и результатов, приведенных в работе [4], можно предположить, что при таких условиях эксперимента оптимальная длительность импульса накачки должна лежать в пределах 2–3 мкс; это позволит увеличить частоту импульсов накачки и, следовательно, выходную мощность и КПД лазера. Так, при минимальной длительности импульсов накачки 10 мкс, что было ограничено техническими параметрами используемого СВЧ генератора, получена средняя мощность лазерного излучения 83 мВт с КПД 1.7% при ЧСИ 100 Гц, а при замене в смеси газов гелия на неон и ЧСИ 50 Гц достигнута мощность лазера 91 мВт с КПД 3.6% (см. рис.4).

Специфика горения СВЧ разряда в используемой планарной структуре обладает особенностью, связанной с тем, что с повышением давления разряд теряет необходимую однородность, стягивается к максимуму напряженности электрического поля (пучности) в волноводном резонаторе и не заполняет весь разрядный промежуток [17] (рис.6).

Фторид дейтерия в химическом смысле ведет себя аналогично HF. Преимущество DF-лазера (масса атома дейтерия больше массы водорода) связано с тем, что излучение генерируется на более длинных волнах, при которых поглощение в парах воды в атмосфере значительно меньше, а спектр излучения значительно шире. Отличие DF-лазеров от HF-лазеров состоит в том, что энергия, накопленная в молекулах DF, распределяется по большему числу колебательных уровней, чем в молекулах HF. Средняя мощность излучения DF-лазера составила 40 мВт при ЧСИ накачки 100 Гц и 48 мВт при замене гелия на неон и ЧСИ 50 Гц. Уменьшение (почти в два раза) мощности излучения DF-лазера по сравнению с HF-лазером можно объяснить меньшими константами скорости реакции накачки DF-лазера.

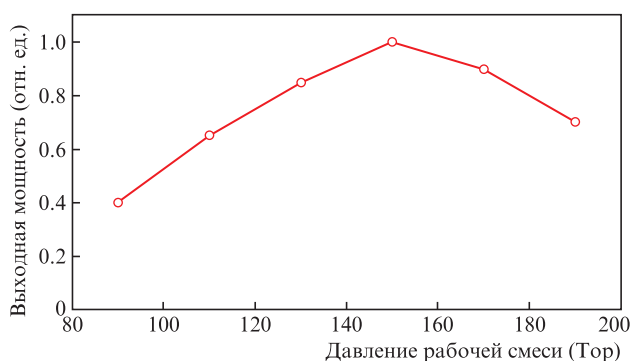


Рис.6. Зависимость выходной мощности HF-лазера от давления рабочей смеси газов $H_2:SF_6:He = 1:10:89$ при средней мощности накачки 10 Вт с длительностью импульсов 20 мкс и ЧСИ 100 Гц.

3.2. HF–DF-лазер

В настоящей работе получена генерация HF–DF-лазера одновременно в двух спектральных диапазонах для рабочей смеси газов $H_2:D_2:SF_6:He = 1:1:10:88$ при давлении 150 Тор, длительности импульса накачки 10 мкс, ЧСИ накачки 100 Гц и импульсной мощности накачки 5 кВт. Средняя мощность лазерного излучения составила 45 мВт. При рабочей смеси газов $H_2:D_2:SF_6:He = 1:1:10:88$ и ЧСИ 50 Гц средняя мощность лазерного излучения составила 51 мВт.

Анализ результатов экспериментов (как и в работе [5]) показывает, что при совместном течении химические реакции, приводящие к образованию возбужденных молекул HF* и DF*, влияют друг на друга и идут взаимозависимо, что связано как с конкуренцией реакций, так и с тушащими HF*- и DF*-процессами.

3.3. Хе-лазер

При увеличении длительности импульсов накачки в ряде работ было обнаружено снижение мощности генерации Хе-лазера и даже ее срыв задолго до окончания импульса накачки. Теоретические представления о процессах в активной среде лазера с накачкой жестким ионизатором, а также конкретные численные расчеты свидетельствуют о том, что основной причиной является рост концентрации и температуры электронов во время действия импульса накачки, увеличивающий электронное перемешивание возбужденных уровней в атоме Хе [14, 15]. Как известно, для лазеров на атомарных переходах ксенона важна чистота исходных газов, поэтому для уменьшения влияния десорбции газов из стенок камеры в процессе разряда применяется небольшая прокачка рабочей смеси газов со скоростью ~ 0.5 л/мин. Средняя выходная мощность Хе-лазера составила 580 мВт при длительности импульсов накачки 20 мкс и ЧСИ до 10 кГц (рис.7).

Из осциллограмм на вставке к рис.7 видно, что небольшая добавка SF_6 в рабочую смесь газов приводит к увеличению длительности импульса генерации лазера до длительности импульса накачки (20 мкс), что существенно увеличивает среднюю выходную мощность Хе-лазера. Этот эффект, вероятно, обусловлен охлаждением электронов (понижением электронной температуры), что уве-

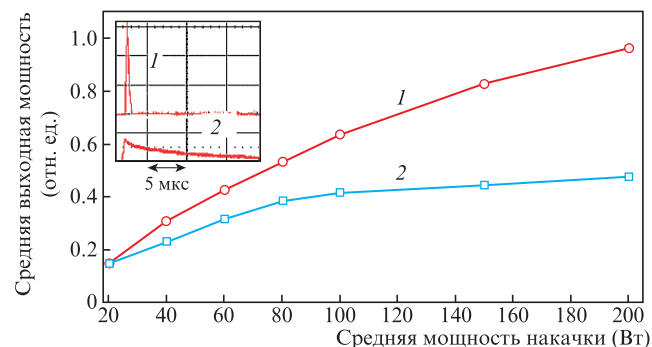


Рис.7. Зависимости средней выходной мощности Хе-лазера от средней мощности накачки при изменении ЧСИ от 0.1 до 1 кГц и длительности импульсов 20 мкс (1), а также при изменении длительности импульсов накачки от 20 до 200 мкс и ЧСИ 1 кГц (2). Импульсная мощность СВЧ накачки 1 кВт, смесь газов Хе: SF_6 :He = 1:0.2:99, давление 90 Тор. На вставке показаны осциллограммы импульсов излучения Хе-лазера на смеси газов Хе:He = 1:99 (1) и Хе: SF_6 :He = 1:1:98 (2) при длительности импульсов накачки 20 мкс.

личивает скорость рекомбинации и, возможно, скорость очистки нижнего лазерного уровня в Хе [18].

3.4. HF–DF–Хе(Кг)-лазеры

К особенностям работы Хе-лазера (линия генерации 2.03 мкм) с СВЧ накачкой следует отнести почти линейное увеличение средней выходной мощности с увеличением ЧСИ накачки, в отличие от падения мощности излучения HF–DF-лазера (2.8 и 3.8 мкм) с увеличением ЧСИ, при данной скорости прокачки рабочей смеси газов. Поэтому существуют оптимальные ЧСИ накачки и давление газовой смеси с точки зрения получения равномерного распределения средней выходной мощности по спектру излучения в области длин волн 2–4 мкм.

На рис.8 представлены результаты исследования величины и формы импульсов лазерного излучения Хе-, HF- и HF–Хе-лазеров при одинаковых основных параметрах: давлении смеси газов, длительности, ЧСИ и мощности импульсов возбуждающего СВЧ разряда. Полученные результаты свидетельствуют о возможности реализации одновременной и сравнимой по выходной мощности лазерной генерации в молекулярном HF-лазере и атомарном Хе-лазере.

В настоящей работе впервые продемонстрирована работоспособность HF–DF–Хе-лазера, генерирующего широкополосное излучение в диапазоне 2–4 мкм (октава), и HF–DF–Кг-лазера, генерирующего излучение в области 2.5–4 мкм. Средняя мощность генерации HF–DF–Хе-лазера на смеси газов Хе:Н₂:D₂:SF₆:He = 1:1:1:4:93 составила 43 мВт при длительности импульсов накачки 10 мкс и ЧСИ 100 Гц. В рабочей смеси газов Кг:D₂:Н₂:SF₆:He = 3:1:1:1:94 при давлении 100 Тор, длительности импульсов накачки 10 мкс и ЧСИ 100 Гц с импульсной мощностью СВЧ накачки 5 кВт получена средняя выходная мощность лазерного излучения 18 мВт. Для лазера на смеси с Кг мощность генерации быстро падает с увеличением процентного содержания SF₆.

В табл.1 представлены значения средней выходной лазерной мощности и КПД, достигнутые при длительности импульсов накачки 10 мкс и импульсной мощности СВЧ накачки 5 кВт.

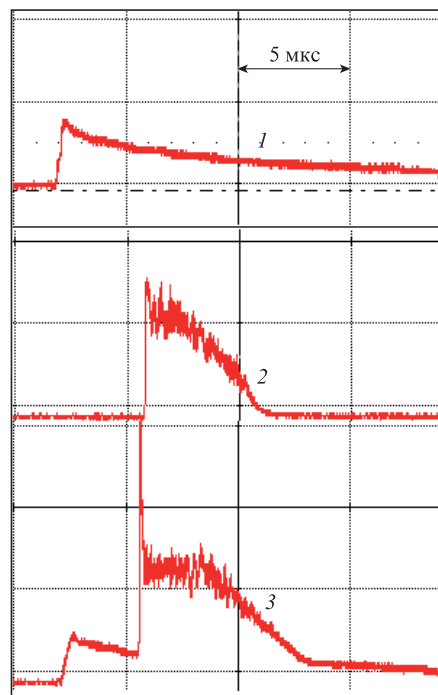


Рис.8. Осциллограммы импульсов лазерного излучения: 1 – Хе-лазер на смеси газов Хе:SF₆:He = 1:1:98; 2 – HF-лазер (Н₂:SF₆:He = 1:4:95); 3 – HF–Хе-лазер (Хе:Н₂:SF₆:He = 1:1:4:94). Давление газа 150 Тор, длительность импульсов накачки 20 мкс, ЧСИ 100 Гц, импульсная мощность накачки 5 кВт.

3.5. Спектральные характеристики лазеров

При исследовании импульсных ИК лазеров (на Хе, СО, HF, DF и т.п.), работающих одновременно на многих линиях, часто необходимо «одномоментное» измерение спектрального состава излучения. Для решения подобных задач в средней и дальней ИК областях был использован разработанный нами прибор с неохлаждаемой пирозлектрической линейкой HPL-256-500 (Heimann Sensor GmbH) и монохроматором MS-2004 с решеткой 150 штр./мм.

Экспериментально было установлено (рис.9), что спектр излучения HF-лазера состоит из 9 сильных линий, соот-

Табл.1.

Состав рабочей смеси газов	Длины волн (мкм); лазерные колебательные $v-(v-1)$ -переходы и атомарные $nd-(n+1)p$ -переходы	Частота следования импульсов (Гц)	Средняя выходная лазерная мощность (мВт)	КПД (%)
H ₂ :SF ₆ :He = 1:10:89	2.6–3.0; (1–0, 2–1)	100	83	1.6
D ₂ :SF ₆ :He = 2:10:88	3.7–4.1; (1–0, 2–1, 3–2)	100	40	0.8
H ₂ :SF ₆ :Ne = 2:10:88	2.6–3.0; (1–0, 2–1)	50	91	3.6
D ₂ :SF ₆ :Ne = 2:10:88	3.7–4.1; (1–0, 2–1, 3–2)	50	48	1.9
H ₂ :D ₂ :SF ₆ :He = 1:1:10:88	2.6–3.0 и 3.7–4.1; (1–0, 2–1, 3–2)	100	45	0.9
H ₂ :D ₂ :SF ₆ :Ne = 1:1:10:88	2.6–3.0 и 3.7–4.1; (1–0, 2–1, 3–2)	50	51	2.0
Хе:Н ₂ :D ₂ :SF ₆ :He = 1:1:1:4:93	2.6–3.0 и 3.7–4.1; (1–0, 2–1, 3–2); 2.03; 5d[3/2] ₀ –6p[3/2] ₁ Хе	100	43	0.86
Кг:D ₂ :Н ₂ :SF ₆ :He = 3:1:1:1:94	2.6–3.0 и 3.7–4.1; (1–0, 2–1, 3–2); 2.52; 4d[1/2] ₀ –5p[3/2] ₂ Кг	100	18	0.36

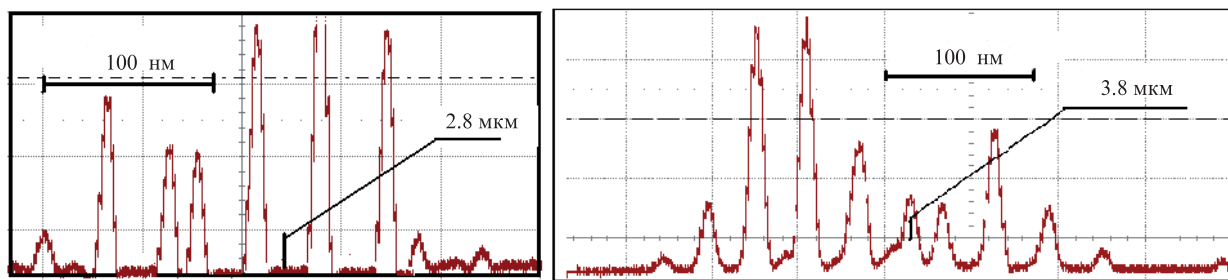


Рис.9. Спектры излучения HF-лазера (2.8 мкм) и DF-лазера (3.8 мкм) (рабочая смесь газов $H_2(D_2):SF_6:He = 1:10:89$ при давлении 150 Тор, длительность импульсов накачки 20 мкс, ЧСИ 100 Гц, импульсная мощность накачки 5 кВт).

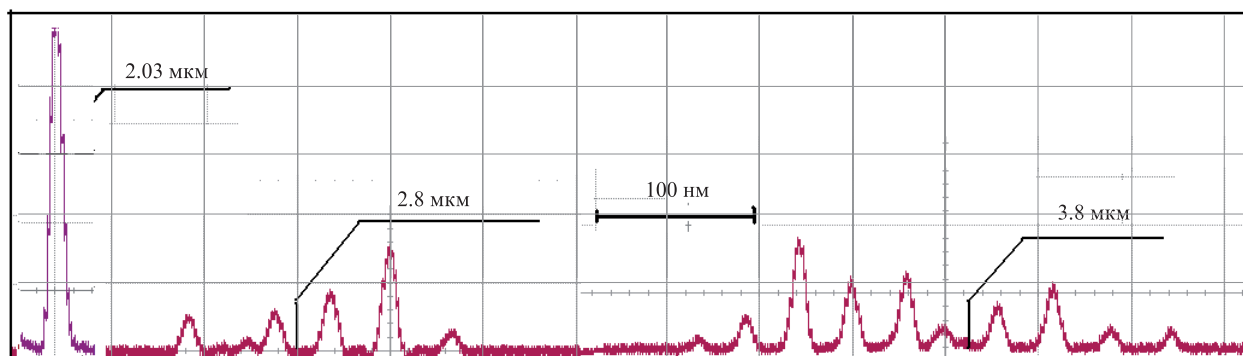


Рис.10. Спектр излучения HF-DF-Xe-лазера (рабочая смесь газов $D_2:H_2:Xe:SF_6:He = 1:1:1:5:92$ при давлении 100 Тор, длительность импульсов накачки 20 мкс, ЧСИ 100 Гц, импульсная мощность накачки 5 кВт).

ветствующих колебательным переходам 1–0 и 2–1, а спектр DF-лазера – из 11 сильных линий, соответствующих колебательным переходам 1–0, 2–1 и 3–2. Для достижения порога генерации на высоких переходах (с большим числом линий) необходим резонатор с высокой добротностью. В нашем случае пропускание выходного зеркала оптического резонатора лазеров составило 50%. Для сравнения на рис.10 приведен спектр излучения HF-DF-Xe-лазера.

В Хе-лазере на смесях с Аг и Не генерация происходит в основном на переходах 5d–6p и 7p–7s. Так, при импульсной мощности СВЧ накачки 1 кВт, ЧСИ 1 кГц и длительности импульсов 20 мкс получены следующие значения средней мощности лазерного излучения \bar{P} при постоянном давлении 90 Тор и различном составе рабочих смесей газов:

- 1) Хе:Не:SF₆ = 1:99:0.2 – $\bar{P} = 110$ мВт и нормированные мощности лазерного излучения $P_{\text{norm}} = 0.59:0.26:0.03:0.12$ на длинах волн генерации 2.03:3.43:3.51:3.65 мкм;
- 2) Аг:Хе:Не:SF₆ = 50:1:49:0.2 – $\bar{P} = 52$ мВт, $P_{\text{norm}} = 0.52:0.28:0.20$ на длинах волн 2.03:2.65:3.51 мкм;
- 3) Аг:Хе:SF₆ = 99:1:0.2 – $\bar{P} = 25$ мВт, $P_{\text{norm}} = 0.08:0.92$ на длинах волн 2.03:2.65 мкм.

Согласно принятому в литературе механизму генерации, в Хе первоначально заселяется уровень 5d[3/2]₀, который является верхним лазерным уровнем для наиболее интенсивных линий 1.73, 2.03 и 2.65 мкм при использовании различных буферных газов (Не, Аг или смесей Не–Аг). Спектры генерации и энергетические параметры лазера зависят от скоростей столкновительного тушения нижних лазерных уровней атомами буферного газа Аг и Не. Генерация на длине волны 2.65 мкм происходит на переходе 5d[3/2]₀–6p[1/2]₀, а на длине волны 2.03 мкм – на переходе 5d[3/2]₀–6p[3/2]₁. Увеличение доли генерации на

длине волны 2.03 мкм и отсутствие генерации на 1.73 мкм при наличии Не в рабочей смеси газов обусловлены большей скоростью столкновительной очистки гелием уровня 6p[3/2]₁, нижнего для этого перехода, и тем, что этот уровень располагается выше состояния 6s¹, откуда эффективно заселяется нижний рабочий уровень 6p[5/2]₂ линии 1.73 мкм [19]. В смеси Хе–Не наблюдаются линии генерации 3.43 и 3.65 мкм, принадлежащие переходам 7p–7s атома Хе. Появление этих линий, возможно, связано с заселением уровня 7p в результате процессов ударно-радиационной и тройной рекомбинации [20].

Видно, что для смеси Хе:Не:SF₆ = 1:99:0.2 основная мощность излучения приходится на длины волн 2.03, 3.43 и 3.65 мкм; для смеси Аг:Хе:Не:SF₆ = 50:1:49:0.2 – на длины волн 2.03, 2.65 и 3.51 мкм, а для смеси Аг:Хе:SF₆ = 99:1:0.2 – на длину волны 2.65 мкм. Таким образом, изменяя состав рабочей смеси газов, можно перераспределять мощность излучения между линиями генерации. Эффективность Хе-лазера составила 0.55%.

4. Заключение

Исследованы характеристики излучения импульсных планарных лазеров с различным составом рабочего газа лазера, возбуждаемого СВЧ разрядом на частоте 2.45 ГГц с диффузионным охлаждением. Лазерная генерация осуществлена при различных составах рабочей смеси газов в диапазоне средних давлений 30–200 Тор. Впервые продемонстрирована работоспособность химического HF-DF-лазера и рекомбинационного лазера на атомарных переходах ксенона и криптона, одновременно генерирующего широкополосное (октава) излучение в диапазоне 2–4 мкм. При средней мощности накачки 5 Вт соответствующая мощность излучения HF-DF-Xe-лазера составила 43 мВт.

В HF–DF-лазере осуществлена генерация одновременно в двух спектральных диапазонах с выходной мощностью ~ 50 мВт. Проведенные эксперименты с заменой ксенона на криптон (линия генерации 2.52 мкм) показали возможность генерации HF–DF–Kr-лазера на длинах волн 2.52–4 мкм. Дальнейшее увеличение средней выходной мощности излучения и КПД лазера возможно при использовании импульсов накачки длительностью менее 10 мкс. При небольших ЧСИ накачки (и малой скорости прокачки смеси газов – порядка 0.6 л/с) возможна эффективная замена гелия неонаом. Полученные экспериментальные результаты демонстрируют возможность создания широкополосного HF–DF–Xe-лазера (2–4 мкм) с заданным соотношением интенсивностей в заданном спектральном диапазоне. Генерация Xe-лазера осуществлена в спектральном диапазоне 2.03–3.65 мкм со средней мощностью 580 мВт при длительности импульса накачки 20 мкс и ЧСИ до 10 кГц. Максимальный КПД лазера составил 0.55%. Эти величины не являются предельными, т.к. не проведена оптимизация по ширине разрядного зазора, по длительности импульса накачки и пропусканию выходного зеркала оптического резонатора лазера.

1. Андреев Ю.М., Ионин А.А., Киняевский И.О., Климачев Ю.М., Козлов А.Ю., Котков А.А., Ланский Г.В., Шайдуко А.В. *Квантовая электроника*, **43**, 139 (2013) [*Quantum Electron.*, **43**, 139 (2013)].
2. Brandelik J.E., Schuebel W.K., Paulson R.F. *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-14**, 411 (1978).
3. Christensen C.P., Powell F.X., Djeu N. *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-16**, 949 (1980).
4. Wang J.H.S., Paranto J.N., Lovejoy C.M. *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-20**, 276 (1984).
5. Великанов С.Д., Елутин А.С., Запольский, А.Ф. Конкин Д.В., Куликов С.М., Новиков В.Н., Синицын М.В., Сухарев С.А. *Квантовая электроника*, **18**, 186 (1991) [*Sov. J. Quantum Electron.*, **21**, 165 (1991)].
6. Котра К.Л., Pimentel G.C. *Chem. Phys.*, **47**, 857 (1967).
7. Rudko R.I., Drozdowicz Z., Linhares S. *Rev. Sci. Instrum.*, **53**, 452 (1982).
8. Илюхин Б.И., Очкин В.Н., Цхай С.Н., Кочетов И.В., Напартович А.П., Витteman В.Я. *Квантовая электроника*, **25**, 512 (1998) [*Quantum Electron.*, **28**, 497 (1998)].
9. Минеев А.П., Нефедов С.М., Пашинин П.П., Гончаров П.А., Киселев В.В., Дроздов А.П. *Вестник Казанского технологического университета*, №15, 40 (2011).
10. Минеев А.П., Дроздов А.П., Нефедов С.М., Пашинин П.П., Гончаров П.А., Киселев В.В. *Квантовая электроника*, **42**, 575 (2012) [*Quantum Electron.*, **42**, 575 (2012)].
11. Заярный Д.А., Семенова Л.В., Устиновский Н.Н., Холин И.В., Чугунов А.Ю. *Квантовая электроника*, **25**, 493 (1998) [*Quantum Electron.*, **28**, 478 (1998)].
12. Загидулин А.В., Бочков Ф.В., Мироненко В.В., Софиенко Г.С. *Письма в ЖТФ*, **38**, 31 (2012).
13. Холин И.В. *Квантовая электроника*, **33**, 129 (2003) [*Quantum Electron.*, **33**, 129 (2003)].
14. Ваулин В.А., Слинко В.Н., Сулакшин С.С. *ЖТФ*, **60**, 88 (1990).
15. Gorden C.L., Feldman V., Christensen C.P. *Opt. Lett.*, **13**(2), 114 (1988).
16. Минеев А.П., Нефедов С.М., Пашинин П.П. *Квантовая электроника*, **37**, 950 (2007) [*Quantum Electron.*, **37**, 950 (2007)].
17. Минеев А.П., Нефедов С.М., Пашинин П.П. *Квантовая электроника*, **41**, 115 (2011) [*Quantum Electron.*, **41**, 115 (2011)].
18. Бункин Ф.В., Держиев В.И., Месяц Г.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **12**, 874 (1985) [*Sov. J. Quantum Electron.*, **15**, 575 (1985)].
19. Карелин А.В., Симакова О.В. *Квантовая электроника*, **34**, 129 (2004) [*Quantum Electron.*, **34**, 129 (2004)].
20. Войнов А.М., Мельников С.П., Синянский А.А. *ЖТФ*, **60**, 100 (1990).