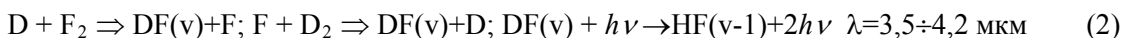
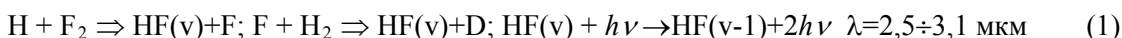


МОЩНЫЕ НЕЦЕПНЫЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ HF(DF) ЛАЗЕРЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

С. Ю. Казанцев, И. Г. Кононов, С. В. Подлесных, К. Н. Фирсов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук», Россия, Москва

Химические лазеры – устройства для прямого преобразования энергии химической реакции в энергию когерентного электромагнитного поля [1, 2]. Отличительной особенностью химических лазеров является возможность получения лазерной энергии с эффективностью выше 100 %, т. е. излучаемая лазерная энергия может в несколько раз превышать энергию, затраченную на инициирование химической реакции. Классическим примером такого лазера является цепной HF(DF) лазер, в котором генерация в среднем ИК диапазоне возникает на колебательно-вращательных переходах молекулы HF(DF).



Энергетические характеристики ХЛ являются рекордными среди всего класса газовых лазеров. Важным дополнительным фактором, который стимулировал развитие исследований HF(DF) лазера, являлось то, что излучение DF лазера мало поглощается атмосферными газами (попадает в окно прозрачности атмосферы). Поэтому к началу этого века уже были созданы лазерные комплексы мегаваттного уровня, в том числе и в мобильном исполнении [3]. Главным недостатком цепных HF(DF) лазеров, сильно ограничивающим их область применений, является высокая токсичность и взрывоопасность исходных компонентов. Именно из-за этого работать с цепными HF(DF) лазерами возможно только на специально оборудованных площадках. Другим большим недостатком цепных лазеров является сложности реализации импульсно-периодического режима, особенно, когда для ряда приложений требуются работа с высокой частотой следования импульсов (100 Гц и более).

Лишены перечисленных выше недостатков лазеры на нецепных реакциях [1]. Эффективность и энергетические параметры нецепных HF(DF) лазеров не такие высокие, как у цепных аналогов, но спектр генерации практически такой же ($\lambda = 2,6\div 3$ мкм для HF лазера и $\lambda = 3,6\div 4,1$ мкм для DF лазера), при этом они безопасны и более удобны в работе.

Лазер называется нецепным потому, что возникающие в процессе химических реакций активные атомы и радикалы не реагируют с компонентами среды. Исходная среда нецепных лазеров химически инертна – это смесь газов, один из которых является донором фтора, а другой – донором водорода. Обычно, это смесь SF₆ с водородом (дейтерием). Элегаз (SF₆) – это нетоксичное, химически стабильное соединение, которое используют как газ-пламегаситель, а в высоковольтной технике широко применяется в качестве газовой электроизоляции [4]. Реакции в этой газовой смеси SF₆:H₂(D₂) становятся возможными только после того, как за счет внешнего источника энергии молекулы SF₆ диссоциируют с образованием атомов фтора.

Принципиальная схема импульсно-периодического нецепного HF(DF) лазера показана на рис. 1. Поток не реагирующих газов прокачивается через лазерную зону 2, где от внешнего источника энергии иницируется нецепная химическая реакция. Протекание реакций в этой смеси, возможно только пока идет наработка атомов фтора. После лазерной зоны смесь прокачивается через фильтр 3, на котором осаждаются молекулы HF(DF), а смесь снова поступает в лазерную зону. Степень диссоциации в лазерной зоне, как правило, не превышает 10 %, поэтому расход газа в процессе работы незначителен (следует также учесть значительное превышение объема лазерной камеры по сравнению с объемом лазерной зоны).

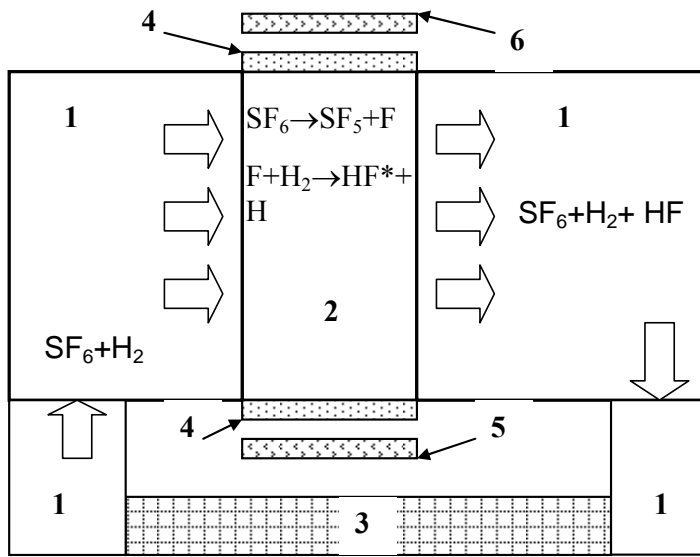


Рис. 1. Схема импульсно-периодического нецепного HF(DF) лазера: 1 – камера; 2 – лазерная зона, где с помощью внешнего источника энергии вызывают диссоциацию фторсодержащего компонента; 3 – фильтр для связывания HF(DF); 4 – окна для вывода излучения в резонатор; 5, 6 – резонаторные зеркала

Существует несколько способов инициирования нецепной реакции в HF лазере, но наибольшее распространение получил поперечный объемный самостоятельный разряд [1]. Было найдено, что лучшие параметры нецепного HF лазера реализуются при зажигании ОСР в рабочих смесях SF₆:H₂, либо SF₆:C₂H₂. В литературе такой тип лазеров называют электрохимическим [2].

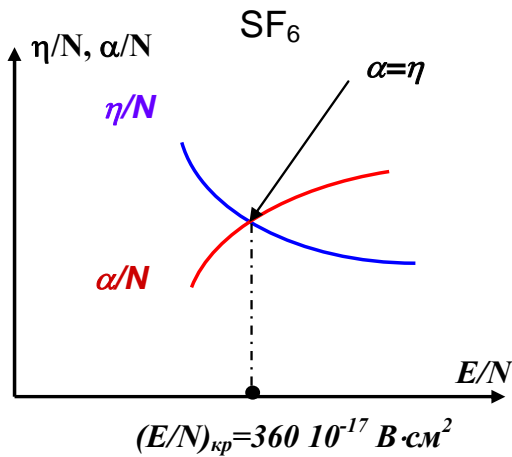


Рис. 2. Зависимость коэффициента ионизации и коэффициента прилипания электронов в SF₆ от параметра E/N (при комнатной температуре)

Следует пояснить, почему именно объемный самостоятельный разряд в газовых смесях, содержащих в качестве донора атомов фтора – SF₆, оказался наиболее эффективным способом инициирования химической реакции в нецепных HF(DF) лазерах. При протекании электрического тока в газе основным параметром, который определяет среднюю энергию электронов, константы ионизации, прилипания и т. п. – является параметр E/N, где E – величина напряженности электрического поля, а N – число частиц газа в единице объема [5]. Действительно, набор энергии электроном в разрядном промежутке определяется не только величиной электрического поля, но расстоянием, которое он успеет пройти до соударения с молекулой газа, а длина свободного пробега обратно пропорциональна плотности частиц (N). На рис. 2. показано как приблизительно выглядят зависимости коэффициентов ионизации (α) и прилипания (η) от E/N в SF₆. Точка пересечения этих кривых определяет приведенное критическое поле (E/N)_{кр}, которое в течение разрядного импульса ОСР остается приблизительно постоянным. Это значение (E/N)_{кр} задает и среднюю энергию электронов в разряде [5]. Примечательно, что за счет сильной электроотрицательности SF₆, размножение электронов происходит при очень высоком значении параметра (E/N)_{кр} и средняя энергия электронов в самостоятельном разряде составляет почти 10 эВ, при этом больше 80 % энергии идет на диссоциацию SF₆ с образованием атомов фтора. Значение параметра (E/p)_{кр} = 370 Тд (1Тд =

10^{-17} В·см²), которое устанавливается в разряде, близко к оптимальному для диссоциации SF₆. В результате, энергетическая цена образования атомов фтора в SF₆ оказывается самой низкой среди стабильных и нетоксичных фторидов – $E_F \approx 4$ эВ [6].

Заметим, что в каком-то отношении нецепной HF лазер с электроразрядным иницированием оказался много проще, чем другие лазеры, возбуждаемые объемным самостоятельным разрядом. Например, для CO₂ лазера значение $(E/p)_{кр}$, устанавливающееся в самостоятельном разряде, выше оптимального, а в азотном наоборот ниже и приходится прибегать к различным ухищрениям, чтобы повысить эффективность этих лазеров [7]. В нашем случае ничего делать не надо – необходимо лишь получить однородный разряд. Однако до 1995 года энергия излучения подобных лазеров не превышала 11 Дж, несмотря на то, что к этому времени прогресс в развитии других газовых лазеров был значителен. Так например, уже давно был достигнут килоджоульный уровень энергии на ТЕА – CO₂ лазерах [8], и в ряде лабораторий мира уже были созданы эксимерные лазеры с энергией излучения более 100 Дж [9]. Низкий прогресс в области увеличения выходных характеристик нецепных электрохимических HF лазеров большинством исследователей связывалось с трудностью получения (в больших разрядных объемах) однородного объемного самостоятельного разряда в смесях газов на основе SF₆. Действительно, традиционный подход к зажиганию ОСР в плотных газах, который сложился к 90-м годам прошлого века и стал уже классическим [10], предполагает создание объемной предыонизации газа (УФ, мягкое рентгеновское излучение) с последующим приложением к разрядному промежутку с однородным электрическим полем высоковольтного импульса [7, 10]. В рабочих смесях нецепного HF(DF) лазера возможности выполнения этих требований ограничены сильной электроотрицательностью SF₆, обуславливающей большие потери начальных электронов независимо от типа ионизатора. Кроме того, наиболее простые источники УФ излучения в данном случае вообще не эффективны из-за сильного поглощения УФ излучения в SF₆, а источники мягкого рентгеновского излучения с большой площадью излучающей поверхности довольно сложны. Дополнительные сложности при увеличении апертуры и объема активной среды нецепных лазеров возникают в связи с необходимостью специального профилирования электродов для обеспечения однородности электрического поля в разрядном промежутке, поскольку это ведет к увеличению габаритов лазера и индуктивности разрядного контура при крайне ограниченной длительности устойчивого горения ОСР в смесях газов, содержащих SF₆.

Поэтому в ИОФ РАН был предложен альтернативный подход к проблеме увеличения рабочего объема в нецепных электрохимических HF(DF) лазерах [11]. Было обнаружено, что в SF₆ и смесях на его основе, при давлениях $P \leq 150$ мм рт. ст., при наличии на поверхности катода мелкомасштабных, ~50 мкм, неоднородностей, объемный самостоятельный разряд развивается в форме самоиницирующегося объемного разряда (СИОР) – объемного самостоятельного разряда без предыонизации газа (в том числе и в разрядных промежутках с высоким краевым усилением электрического поля) [12]. По всем своим характеристикам (внешний вид, осциллограммы тока и напряжения) самоиницирующийся объемный разряд не отличается от объемного разряда, полученного с применением УФ или рентгеновской предыонизации. Очень интересна оказалась динамика формирования СИОР. СИОР развивается в форме диффузных каналов (прорастающих из катодных пятен), плотность которых увеличивается по мере того, как в течение разрядного импульса растет энергия, вводимая в газоразрядную плазму. Перекрытие большого количества диффузных каналов образует видимое однородное свечение. Возможность получения разряда в форме СИОР обусловлена существованием в ряде сильно электроотрицательных газов, в том числе и в SF₆, механизмов ограничения плотности тока в диффузном канале из-за нелинейного роста потерь электронов с ростом вводимой в газоразрядную плазму электрической энергии [12–16].

Именно благодаря существованию механизмов ограничения плотности тока с увеличением энергии, вводимой в плазму, вместо трансформации диффузного канала в искровой канал происходит образование новых диффузных каналов.

Применение катодов с грубой поверхностью, на микронеровностях которой возникают области с высоким усилением электрического поля и использование газовых смесей $SF_6:C_2H_6$, вместо $SF_6:H_2$ позволяет ускорить образование новых диффузных каналов, в результате чего скорость заполнения плазмой разрядного объема увеличивается и формируется более однородный разряд. Данное утверждение иллюстрирует рис. 3., на котором показаны зависимости числа диффузных каналов на единицу поверхности катода, образовавшихся в газовом разряде, от парциального давления этана, полученные при использовании катода с грубой поверхностью и катода с полированной поверхностью.

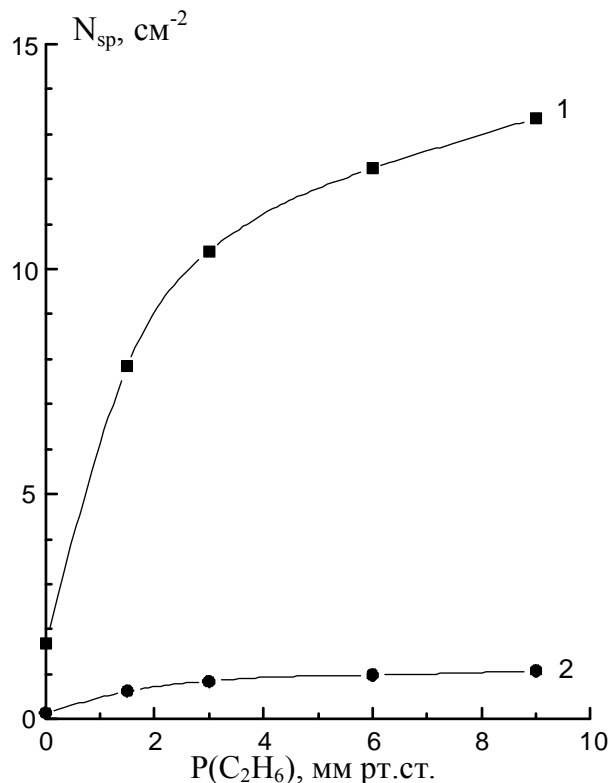


Рис. 3. Зависимость поверхностной плотности диффузных каналов, образующихся в объемном разряде в газовой смеси $SF_6:C_2H_6$ от парциального давления этана (энерговклад и давление SF_6 оставались постоянными): 1 – использовался катод с грубой поверхностью; 2 – катод, подвергся механической полировке

приводит к локальному снижению параметра E/N , а это, в свою очередь, к увеличению скорости прилипания электронов к нейтральным молекулам и уменьшению частоты актов ионизации:

$$j \uparrow \rightarrow N \uparrow \rightarrow E/N \downarrow \rightarrow \eta(E/N) \uparrow \rightarrow n_e \downarrow \rightarrow j \downarrow \quad (3)$$

$$j \uparrow \rightarrow N \uparrow \rightarrow E/N \downarrow \rightarrow \alpha(E/N) \downarrow \rightarrow n_e \downarrow \rightarrow j \downarrow. \quad (4)$$

Таким образом, более благоприятные условия для протекания тока оказываются в области, еще не занятой разрядом – происходит распространение разряда от точки инициирования на всю поверхность катода. Конечно, все выше сказанное происходит, когда условия ввода электрической энергии не сильно отклоняются от оптимальных значений. При достаточно больших удельном энерговкладе и времени ввода энергии в плазму в плазме объемного разряда развиваются плазменные неустойчивости и происходит контракция объемного разряда. Контрагированная форма разряда (искра) категорически не подходит для лазерных применений. Поэтому установлению границ устойчивости СИОР, исследованию механизмов развития плазменных неустойчивостей и поиску методов повышения стабильности и однородности разряда был посвящен целый цикл работ [13–16]. В результате были установлены основные законы масштабирования характеристик нецепных электрохимических HF(DF) лазеров [11], исследованы механизмы развития неустойчивости СИОР в рабочих смесях HF(DF) лазеров [16], и получен ряд новых и интересных результатов в области

физики газового разряда и электрофизики. В частности, было обнаружено, что температурная зависимость электрической прочности элегаза имеет особенность, которую не заметили исследователи, десятилетиями занимавшиеся изучением электрофизических свойств этого газа. Оказалось, что критическое приведенное поле $(E/N)_{кр}$ в SF_6 зависит не только от температуры, но и от времени за которое был произведен этот нагрев [17].



Рис. 4. Фотография СИОР в нецепном HF лазере, межэлектродное расстояние $d = 27$ см, разрядный объем ~ 60 л. Смесь $SF_6:C_2H_6 = 20:1$ при общем давлении 76 мм рт. ст.

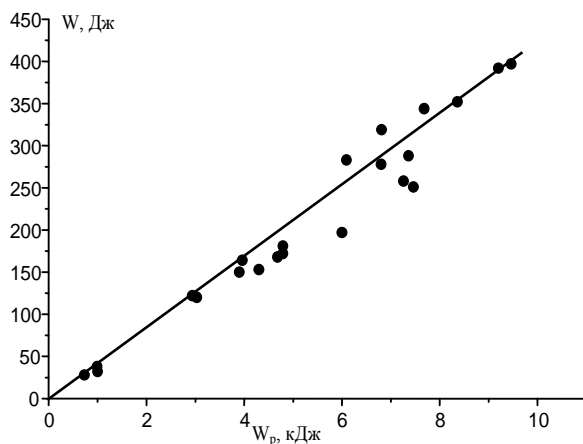


Рис. 5. Зависимость энергии излучения нецепного HF лазера W от энергии W_p запасаемой в генераторе накачки

Закономерности СИОР, установленные вначале для SF_6 и смесей на его основе, в дальнейшем были исследованы и в других газовых смесях. По-видимому, разработанные нами методики исследований газоразрядной плазмы СИОР будут еще не раз успешно применяться при создании плазмохимических реакторов, рабочие среды которых содержат сильно электроотрицательные газы [18].

Сегодня, анализируя литературу по нецепным электрохимическим HF(DF) лазерам, можно констатировать, что обнаружение эффекта СИОР позволило в ~ 40 раз увеличить энергию генерации этих лазеров. Самый мощный в мире нецепной электрохимический HF(DF) лазер был создан в ИОФ РАН – в одном импульсе энергия излучения составляла ~ 410 Дж на HF и 325 Дж на DF при электрическом КПД соответственно 4,3 и 3,4 %, длительность лазерного импульса составила при этом ~ 250 нс. На рис. 4. и рис. 5. приведены соответственно фотографии СИОР в HF(DF) лазере с активным объемом 67 л и зависимость энергии излучения HF лазера W от энергии, запасаемой в источнике накачки. На график рис. 5 нанесены точки, полученные в течение нескольких лет на установках ИОФ РАН с разными объемами активной среды [11].

В России на сегодняшний день созданы и работают самые мощные импульсно-периодические нецепные электрохимические HF(DF) лазеры [19–21]. Средняя мощность некоторых установок превышает 1,3 кВт. Другие могут работать с частотой следования более 1 кГц [22], при этом они являются экологически безопасными и удобными в работе. С нецепными электрохимическими HF(DF) лазерами можно работать, и в обычных физических лабораториях, и даже в медицинских центрах. Приведем несколько наиболее интересных, по нашему мнению, примеров применения HF(DF) лазеров в научных исследованиях, которые проводились в ИОФ РАН.

1. *Оптическая накачка кристаллов – $Fe^{2+}:ZnS$, $Fe^{2+}:ZnSe$, $Fe^{2+}:CdSe$, $Fe^{2+}:ZnTe$ и т. п.* [23–25]. Эти работы выполнены при частичной поддержке гранта РФФИ №15-13-10028 (в части разработки технологии и изготовления образцов лазерных поликристаллов) а, также, грантами РФФИ № 15-02-06005 и № 15-08-02562 в части разработки экспериментальных методик и проведения лазерных исследований.

Спектр генерации HF(DF) лазера попадает в полосы поглощения кристаллов $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnS}$, $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$, $\text{Fe}^{2+}:\text{CdSe}$, $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnTe}$ и может быть эффективно преобразован в более длинноволновое излучение среднего ИК диапазона спектра. Такие характеристики нецепных электрохимических HF(DF) лазеров, как высокая импульсная мощность, возможность генерации с высокой частотой следования импульсов, высокое качество излучения и короткая длительность лазерного импульса позволили отработать технологии роста высококачественных поликристаллических образцов $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnS}$, $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ с большими поперечными размерами и получить рекордные характеристики $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnS}$ и $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ – лазеров. На рис. 6 и рис. 7 приведены, соответственно, зависимости выходной энергии $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnS}$ и $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ от энергии нецепного HF лазера, поглощенной в кристаллах. Как видно из этих графиков, несмотря на то, что эксперименты проводились при комнатной температуре, эффективность преобразования излучения нецепного HF лазера в поликристаллических образцах очень высокая, в настоящее время получены следующие результаты: Fe:ZnSe лазер – энергия 1,53 Дж; дифференциальный КПД – 53 %; полный КПД по поглощенной энергии – 48 % (в спектральном диапазоне 4,3–4,8 мкм); Fe:ZnS лазер – энергия 660 мДж; дифференциальный КПД – 36 %; полный КПД по поглощенной энергии – 26 % (в спектральном диапазоне 3,7–4,0 мкм).

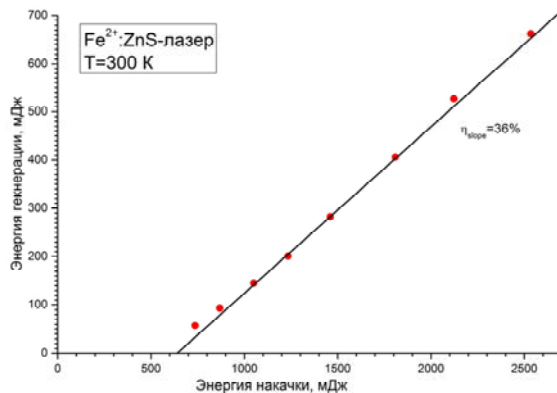
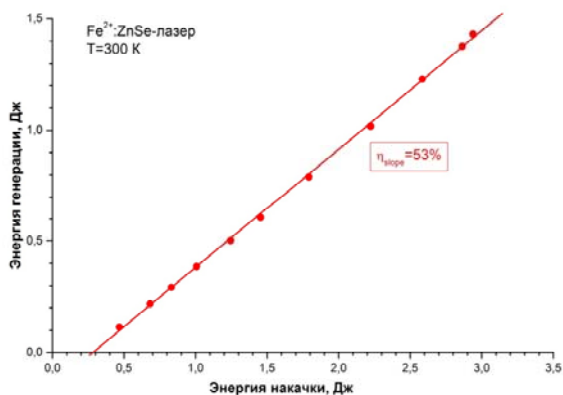


Рис. 6. Зависимость энергии генерации $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ лазера от энергии HF лазера, поглощенной в кристалле [23] Рис. 7. Зависимость энергии генерации $\text{ZnS}:\text{Fe}^{2+}$ лазера от энергии HF лазера, поглощенной в кристалле [24]

В [25] был исследован мощный импульсно-периодический $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ – лазер, возбуждаемый излучением HF лазера, на котором была получена энергия генерации 1,67 Дж при КПД по поглощенной в кристалле энергии $\sim 43\%$ и продемонстрирована работа в импульсно-периодическом режиме без использования специальных систем охлаждения кристалла. При частоте следования импульсов 20 Гц, получена средняя мощность излучения лазера ~ 20 Вт с энергией в отдельном импульсе ~ 1 Дж и полным КПД по поглощенной в кристалле мощности $\sim 40\%$ [25].

2. *Взаимодействие излучения нецепного HF лазера с водой.* Благодаря тому, что коэффициент поглощения в воде и других гидроксилсодержащих жидкостях для линий излучения HF лазера является чрезвычайно большим ($\sim 10^4 \text{ см}^{-1}$), при воздействии излучения HF лазера на эти жидкости, достаточно легко обеспечить высокую скорость нарастания и величину удельного энерговклада, что приводит к появлению целого ряда эффектов, представляющих как практический, так и общефизический интерес [26–28]. Например, можно исследовать физику взрывного вскипания жидкости, генерации электрических сигналов [26, 28], или на основе анализа акустических сигналов изучать свойства вещества в сверхкритическом состоянии [28]. Основные преимущества применения нецепного HF лазера в этих исследованиях – это простота экспериментальной установки и легкость управления условиями нагрева. Непосредственное воздействие лазерного излучения на поверхность жидкости дает возможность полностью исключить влияние на результаты исследований материала стенок сосуда, что, в свою очередь, позволяет обеспечить высокую воспроизводимость экспериментальных результатов.

3. *Лазерный поджиг горючих газовых смесей.* Применение нецепного HF лазера для инициирования горения метан воздушных и метан кислородных смесей, позволило исследовать динамику

горения в этих смесях. Был обнаружен ряд эффектов, приводящих к многократному увеличению скорости горения [29, 30]. Поиск методов интенсификации горения горючих газовых смесей является актуальной задачей в связи с проблемой создания эффективных и безопасных детонационных двигателей [29].

Перечисленный выше список применений нецепного HF(DF) лазера в научных исследованиях далеко не полный. Он основан лишь на нашем собственном опыте. Назовем еще несколько известных из литературы применений HF(DF) лазеров:

4. *Оптическая накачка CO₂, N₂O лазерных смесей высокого давления с целью получения сверхкоротких и мощных лазерных импульсов в спектральной области 10 мкм* [31].

5. *Генерация терагерцового излучения на основе эффекта сверхизлучения* [32].

6. *Дистанционная диагностика примесей в атмосфере* [33].

В заключение отметим несколько направлений исследований, касающихся, в основном, технических аспектов проблемы создания эффективных и удобных в эксплуатации нецепных электрохимических HF(DF) лазеров.

Во-первых, это проработка компактных и эффективных генераторов импульсов напряжения на основе твердотельных коммутаторов для зажигания однородных объемных разрядов в газе [7, 19, 21]. Успехи в данном направлении позволят существенно простимулировать развитие целого класса газоразрядных приборов. Во-вторых, это разработка новых микроструктурированных материалов для создания катодов, подавляющих развитие плазменных неустойчивостей [18, 34]. Лазер с такими электродами может устойчиво работать при более высоких давлениях, что позволяет уменьшить габариты установки и увеличить импульсную мощность лазера. Развитие аддитивных технологий позволяет надеяться, что в скором времени электрод с нужными свойствами можно будет напечатать на 3D-принтере. В-третьих, разработка надежных и компактных систем хранения и регенерации рабочих газовых смесей. Присутствие в установке сосудов под высоким давлением создает дополнительные риски и требует обслуживания квалифицированным персоналом. Поэтому устранение из состава лазерной установки баллонов, содержащих газ под высоким давлением, может существенно расширить сферу применений газовых лазеров. На сегодняшний день решение этой проблемы известно – газ может надежно храниться в картриджах, заполненных специальным адсорбентом. При этом масса газа, связанного в картридже с адсорбентом, может более чем в 2 раза превышать массу газа в баллоне под давлением (подразумевается, что баллон имеет такой же объем, как картридж).

Очевидно, что успешная практическая реализация перечисленных выше замечаний в конструкции нецепных HF(DF) лазеров сделает их еще более востребованными и значительно расширит их сферу применения. Имея значительный задел в области нецепных HF(DF) лазеров, можно надеяться на успехи в смежных областях, где требуются мощные и удобные в работе источники когерентного излучения в спектральной области 2,5–4 мкм.

Список литературы

1. Башкин А. С., Игошин В. И., Ораевский А. Н., Щеглов В. А. Химические лазеры. М.: Наука, 1982.
2. Аблеков В. К., Денисов Ю. Н., Прошкин В. В. Химические лазеры. М.: Атомиздат, 1980.
3. Борейшо А. С. // Квантовая электроника, 2005. 35, 393–406.
4. Бортник И. М. Физические свойства и электрическая прочность элегаза. М.: Энергоатомиздат, 1998.
5. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. 2-е изд. М.: Наука, 1991. С. 536.
6. Гордон Е. Б., Матюшенко В. И., Репин П. Б., Сизов В. Д. // Химическая физика, 1989. 8 (9) 1212.
7. Хомич В. Ю., Ямщиков В. А. Основы создания систем электроразрядного возбуждения мощных CO₂, N₂ и F₂-лазеров. М.: Физматлит, 2015. С. 168.
8. Аполлонов В. В., Бункин Ф. В., Бычков Ю. И., Коновалов И. Н., Лосев Ф. В., Месяц Г. А., Прохоров А. М., Тарасенко В. Ф., Фирсов К. Н. // Квантовая электроника, 1981. 8 1331–1333.
9. Месяц А. Г., Осипов В. В., Тарасенко В. Ф. Импульсные газовые лазеры. М.: Наука, 1991.

10. Месяц Г. А., Королев Ю. Д. // УФН. 1986. Т. 148. № 1. С. 101.
11. Аполлонов В. В., Казанцев С. Ю., Орешкин В. Ф., Сайфулин А. В., Фирсов К. Н. // Известия РАН. Сер. Физическая, 2000. 64 1439–1443.
12. Аполлонов В. В., Белевцев А. А., Казанцев С. Ю., Сайфулин А. В., Фирсов К. Н. // Квантовая электроника, 2000. 30 (3) 207–214.
13. Belevtsev A. A., Firsov K. N., Kazantsev S. Yu, Kononov I. G. Podlesnykh S. V. // J. Phys. D. 2011. 44 505502.
14. Аполлонов В. В., Белевцев А. А., Казанцев С. Ю., Сайфулин А. В., Фирсов К. Н. // Квантовая электроника, 2002. 32. 95–100.
15. Белевцев А. А., Казанцев С. Ю., Кононов И. Г., Лебедев А. А., Подлесных С. В., Фирсов К. Н. // Квантовая электроника, 2011. 41 (8). 703–708.
16. Belevtsev A. A., Firsov K. N., Kazantsev S. Yu., Kononov I. G. // J. Phys. D. 2009. 42, № 21. 215205.
17. Belevtsev A. A., Firsov K. N., Kazantsev S. Yu., Kononov I. G. // J. Phys. D: 41 045201 (2008).
18. Аксинин В. И., Казанцев С. Ю., Кононов И. Г., Кудрявцев Е. М., Орлов А. А., Подлесных С. В., Фирсов К. Н., Хорозова О. Д. // Успехи прикладной физики, 2014. 2 (1), 24–30.
19. Великанов С. Д., Гаранин С. Г., Домажиров А. П. и др. // Квантовая электроника, 2010. 40 393.
20. Булаев В. Д., Гусев В. С., Казанцев С. Ю., Кононов И. Г., Лысенко С. Л., Морозов Ю. Б., Познышев А. Н., Фирсов К. Н. // Квантовая электроника, 2010. 40 615.
21. Великанов С. Д., Домажиров А. П., Зарецкий Н. А. и др. // Квантовая электроника, 2015. 45 989.
22. Буцыкин И.Л., Великанов С.Д., Евдокимов П.А. и др. // Квантовая электроника, 2001. 31. 957–961.
23. Dormidonov A. E., Firsov K. N., Gavrishchuk E. M. et al. // Applied Physics B, 2016. 122:8 211.
24. Firsov K. N., Gavrishchuk E. M., Ikonnikov V. B., et al. // Laser Physics Letters, 2016.13(4) 045004.
25. Великанов С. Д., Гавришук Е. М., Зарецкий Н. А. и др. // Квантовая электроника, 2017. 47, 303–307.
26. Andreev S. N., Il'ichev N. N., Firsov K. N. et al. // Laser Physics, 2007. Vol. 17, No. 8, p.1041.
27. Андреев С. Н., Казанцев С. Ю., Кононов И. Г., Пашинин П. П., Фирсов К. Н. // Квантовая электроника, 2009. 39 (2), 179–184.
28. Andreev S. N., Firsov K. N., Kazantsev S. Yu., Kononov I. G., and Samokhin A. A. // Laser Physics, 2007. 17 834.
29. Казанцев С. Ю., Кононов И. Г., Косый И. А., Тарасова Н. М., Фирсов К. Н. // Физика плазмы, 2009. 35, 281–288.
30. Artem'ev K. V., Berezhetskaya N. K., Kazantsev S. Yu., Kononov I. G., Kossyi I. A., Popov N. A., Tarasova N. M., Filimonova E. A., Firsov K. N. // Philosophical Transactions, 2015. A 373 20140334.
31. Васильев Г. К., Макаров Е. Ф., Чернышев Ю. А. // Квантовая электроника, 2005. 35 987–992.
32. Желязняков В. В. // Соросовский Образовательный Журнал, 1997. № 4. 52–57.
33. Великанов С. Д., Елутин А. С., Кудряшов Е. А., Пегоев И. Н., Синьков С. Н., Фролов Ю. Н. // Квантовая электроника, 1997. 24 279–282.
34. Казанцев С. Ю., Кононов И. Г., Подлесных С. В., Фирсов К. Н. // Квантовая электроника, 2010. 40 397–399.