

# Генерация молекулярного газового HCl-лазера в области $\lambda = 4$ мкм при оптическом возбуждении в третий колебательный обертона перестраиваемым лазером на центрах окраски

Т.Т.Басиев, М.Е.Дорошенко, С.Б.Кравцов, В.В.Скорняков,  
П.Г.Зверев, С.В.Васильев, С.С.Алимов, С.М.Никифоров, Г.Хагер

*Исследованы характеристики газового лазера на молекулах HCl при оптическом возбуждении в третий колебательный обертона. Для оптической накачки газа использовался одночастотный перестраиваемый лазер на кристалле LiF с  $F_2^-$ -центрами окраски. При накачке молекулярного газа на переходе (3–0) R(3) (длина волны 1.189 мкм) получена лазерная генерация на переходе (3–2) P(5) (3.881 мкм), а также каскадная генерация на переходах (3–2) P(5) и (2–1) P(6) (3.769 мкм). Экспериментально реализованный дифференциальный КПД генерации молекулярного лазера достигал 2%.*

**Ключевые слова:** молекулярный газовый лазер, средний инфракрасный диапазон, узкополосная оптическая накачка, одночастотный перестраиваемый лазер на центрах окраски.

## 1. Введение

В последнее время возник и устойчиво развивается интерес к лазерам среднего ИК диапазона (4–5 мкм). Одним из способов получения лазерной генерации в указанном диапазоне длин волн является оптическая накачка колебательных переходов различных газов [1]. В настоящее время созданы газовые лазеры с оптической накачкой на молекулах HCl, HBr, CO и др. [2–5]. Определенной проблемой, возникающей при практической реализации таких лазеров является необходимость применения для накачки импульсных перестраиваемых лазеров с малой шириной линии излучения (300–500 МГц). При оптической накачке двухатомных молекул обычно используется возбуждение во второй колебательный обертона 2–0 с помощью параметрического генератора света (ПГС) [2, 4, 5], при этом эффективность конверсии излучения накачки достигает 25%.

Перспективным представляется осуществление каскадной генерации на переходах 3–2 и 2–1, что может позволить удвоить квантовую эффективность лазера. Однако реализация такой схемы затруднена из-за малого сечения поглощения излучения при накачке в третий обертона 3–0, которое примерно на два порядка меньше, чем при накачке во второй обертона. О получении лазерной генерации при накачке в третий колебательный обертона HCl алмазным лазером с рамановским преобразователем частоты упоминалось в работе [2], однако в ней не приведены выходные характеристики лазера и его КПД.

В настоящей работе исследуются спектроскопические и лазерные характеристики молекулярного газа HCl при накачке в третий колебательный обертона с помощью разработанного уникального узкополосного перестраиваемого лазера на основе кристалла LiF с  $F_2^-$ -центрами окраски. В лазерах на центрах окраски сочетаются сравнительная простота конструкции, высокая энергия выходного импульса, возможность плавной перестройки частоты и узкополосная генерация [6, 7], что делает перспективным их применение для оптической накачки молекулярных газов.

## 2. Экспериментальная установка

Схема установки для проведения экспериментов по оптической накачке молекул HCl показана на рис.1. Установка состояла из лазерной системы на кристаллах YLiF<sub>4</sub>:Nd<sup>3+</sup>, узкополосной перестраиваемой лазерной системы на кристаллах LiF с  $F_2^-$ -центрами окраски и

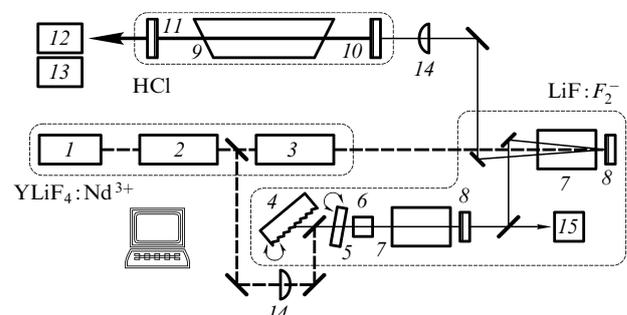


Рис.1. Схема экспериментальной установки, состоящей из лазерных систем на кристаллах YLiF<sub>4</sub>:Nd<sup>3+</sup> (траектории пучков показаны толстым пунктиром) и LiF:F<sub>2</sub><sup>-</sup> (тонкие сплошные линии), а также HCl-лазера (толстые сплошные линии):

1 – задающий генератор; 2, 3 – усилители; 4 – дифракционная решетка; 5 – эталон; 6 – расширитель пучка; 7 – кристалл LiF:F<sub>2</sub><sup>-</sup>; 8 – зеркала обратной связи; 9 – газовая кювета; 10 – дихроичное зеркало; 11 – выходное зеркало; 12 – монохроматор; 13 – Ge:Au-фотодетектор; 14 – фокусирующие линзы; 15 – измеритель длин волн.

Т.Т.Басиев, М.Е.Дорошенко, С.Б.Кравцов, В.В.Скорняков, П.Г.Зверев, С.В.Васильев. Научный центр лазерных материалов и технологий Института общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

С.С.Алимов, С.М.Никифоров. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

Г.Хагер. Air Force Research Laboratory, Directed Energy Laser Concepts, Kirtland AFB, 87117-5776 NM, USA

Поступила в редакцию 29 июля 2002 г.

собственно молекулярного HCl-лазера. Для настройки частоты LiF: $F_2^-$ -лазера использовался измеритель длины волны LM-01, построенный на базе четырех интерферометров Физо. Погрешность измерений прибора составляла около  $0.002 \text{ см}^{-1}$  [8]. Длина волны и энергетические характеристики HCl-лазера контролировалась с помощью 25-сантиметрового решеточного монохроматора и охлаждаемого жидким азотом фотосопротивления на основе Ge:Au. Ниже приведено подробное описание основных компонентов лазерной системы.

### 2.1. YLiF<sub>4</sub>:Nd<sup>3+</sup>-лазер

Лазерная система на кристаллах YLiF<sub>4</sub>:Nd<sup>3+</sup> ( $\lambda = 1.047$  мкм) состояла из задающего генератора (ЗГ) и двух усилительных ступеней. В резонаторе ЗГ был установлен пассивный модулятор добротности на кристалле LiF: $F_2^-$ . Длительность лазерных импульсов составляла 25–30 нс при частоте следования 3 Гц. Энергия лазерного импульса была равна 120 мДж, при этом часть излучения с выхода первой ступени усиления использовалась для накачки ЗГ LiF: $F_2^-$ -лазера.

### 2.2. LiF: $F_2^-$ -лазер

Узкополосная перестраиваемая лазерная система на кристаллах LiF с  $F_2^-$ -центрами окраски также была построена по схеме ЗГ–усилитель. Как в ЗГ, так и в усилителе применялась продольная схема накачки. Для получения узкополосной генерации лазера на центрах окраски использовался селективный резонатор с дифракционной решеткой, работающей в автоколлимационном режиме. Перед решеткой был установлен миниатюрный расширитель пучка. Ширина линии ЗГ составляла при этом  $0.3\text{--}0.4 \text{ см}^{-1}$  (одновременная генерация двух-трех продольных мод). Для достижения одночастотного режима генерации применялся внутррезонаторный эталон. Он был изготовлен из кварцевого стекла, имел толщину 1 см и коэффициент отражения покрытий 60%. На рис.2 показан спектр излучения ЗГ при работе в одночастотном режиме, полученный с помощью измерителя длин волн LM-01. Видно, что ширина лазерной линии не превышает  $0.015 \text{ см}^{-1}$ .

Плавное сканирование частоты ЗГ осуществлялось согласованным поворотом решетки и эталона при помощи шаговых двигателей. Процесс сканирования частоты контролировался компьютером. Максимальный диапазон плавного, без перескока моды, сканирования

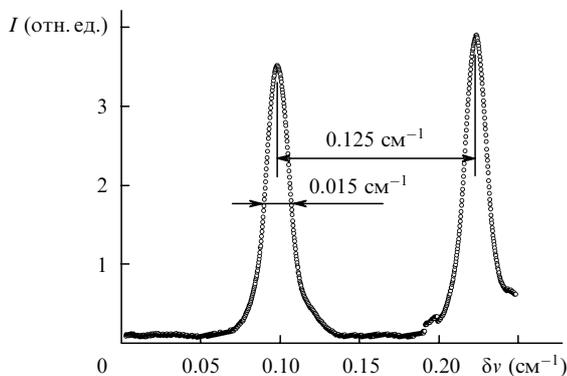


Рис.2. Интерферограмма излучения одночастотного наносекундного LiF: $F_2^-$ -лазера, полученная с помощью интерферометра Физо с межмодовым интервалом  $0.125 \text{ см}^{-1}$  и зарегистрированная ПЗС-линнейкой;  $I$  — интенсивность излучения.

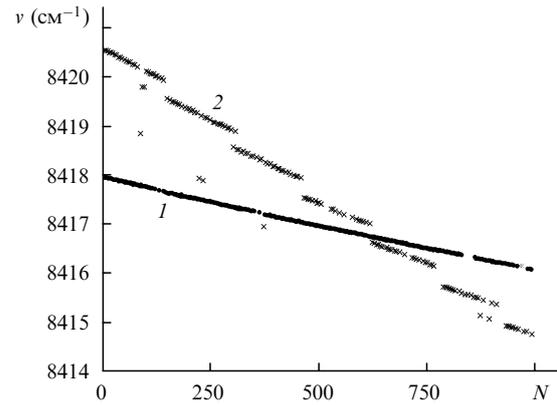


Рис.3. Частота излучения LiF: $F_2^-$ -лазера  $\nu$  в зависимости от числа отсчетов программы сканирования  $N$  при плавном сканировании (1) и сканировании с перескоком моды (2).

частоты лазера составлял  $\sim 1 \text{ см}^{-1}$ . Пример зависимости частоты лазера  $\nu$  от числа отсчетов программы сканирования  $N$  показан на рис.3. Точки соответствуют согласованному, а крестики — несогласованному повороту эталона и решетки. Разрывы в зависимостях отвечают скачкам лазерной моды.

Лазерный усилитель на кристалле LiF: $F_2^-$  был реализован по двухпроходной схеме, что обеспечило коэффициент усиления до 50 при эффективности конверсии излучения YLiF<sub>4</sub>:Nd<sup>3+</sup>-лазера 25–35%. Выходная энергия лазерной системы на центрах окраски в основном была ограничена энергией лазера накачки и составляла 50 мДж в центре полосы люминесценции кристалла LiF: $F_2^-$  (1.15 мкм) и 30 мДж на длине волны (1.188 мкм), необходимой для накачки HCl-лазера.

### 2.3. HCl-лазер

В экспериментах использовалась газовая кювета из алюминия длиной 65 см. Изготовленные из CaF<sub>2</sub> окна кюветы были ориентированы под углом Брюстера к ее оси. К кювете подсоединялась охлаждаемая жидким азотом ловушка, что позволяло оперативно изменять давление в газовой кювете, не демонтируя ее и не нарушая юстировку всей оптической системы. Резонатор газового лазера был образован двумя зеркалами с максимумами пропускания в области длины волны накачки и достаточно высокими коэффициентами отражения на длине волны ожидаемой генерации. Одно из зеркал было сферическим с радиусом кривизны 10 м и имело коэффициент отражения в области 3.5–4 мкм порядка 98% и коэффициент пропускания на длине волны накачки 88%. Другое зеркало было плоским и на длине волны генерации имело коэффициент отражения 87%. Длина резонатора равнялась 70 см. Если система фокусировки пучка накачки в газовой кювете не использовалась, то средний диаметр зоны накачки в ней составлял около 5 мм, а при фокусировке пучка накачки с помощью линзы с фокусным расстоянием 100 см он уменьшался до 2 мм.

## 3. Результаты экспериментов

На первом этапе экспериментов, для точного определения положения линий поглощения HCl, был записан спектр поглощения молекулярного газа при сканировании длины волны LiF: $F_2^-$ -лазера. Предварительная регистрация линий поглощения проводилась при высоком,

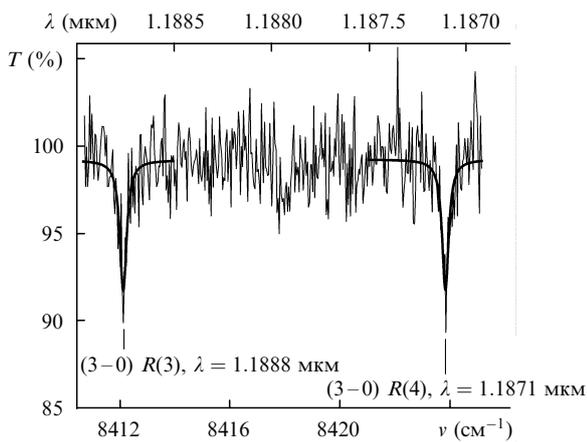


Рис.4. Коэффициент пропускания газовой кюветы  $T$  в зависимости от частоты  $\nu$  (длины волны  $\lambda$ ) излучения  $\text{LiF}:F_2^-$ -лазера при давлении  $\text{HCl}$ , равном 350 Тор; тонкая кривая – экспериментальные результаты, толстые кривые – аппроксимация контуром Фойгта.

около 350 Тор, давлении газа в кювете. Для обеспечения непрерывного сканирования в широком диапазоне длин волн (1.08 – 1.28 мкм)  $\text{LiF}:F_2^-$ -лазер работал без внутрирезонаторного эталона (ширина линии около  $0.3 \text{ см}^{-1}$ ). Из рис.4 видно, что в исследованном диапазоне спектра поглощения  $\text{HCl}$  расположены две близкие по интенсивности линии поглощения, отвечающие переходам  $R(4)$  и  $R(3)$  с нулевого на третий колебательный уровень молекулы  $\text{HCl}$ . Измеренные положения максимумов этих линий поглощения хорошо согласуются с данными программы Nitran (1.18712 и 1.18877 мкм соответственно). Отличие в  $2 \times 10^{-5}$  мкм наших экспериментальных данных от табличных значений обусловлено погрешностью калибровки измерителя длин волн.

После определения точного положения линий поглощения внутрь резонатора  $\text{LiF}:F_2^-$ -лазера был установлен эталон и линия поглощения (3–0)  $R(3)$  была прописана с высоким разрешением (ширина линии генерации не превышала  $0.015 \text{ см}^{-1}$ ). Полученные результаты приведены на рис.5. Кривым 1 соответствует давление газа 350 Тор. При доплеровском уширении  $0.017 \text{ см}^{-1}$  (500 МГц) рассчитанное столкновительное уширение составило  $0.12 \text{ см}^{-1}$  (константа столкновительного уширения

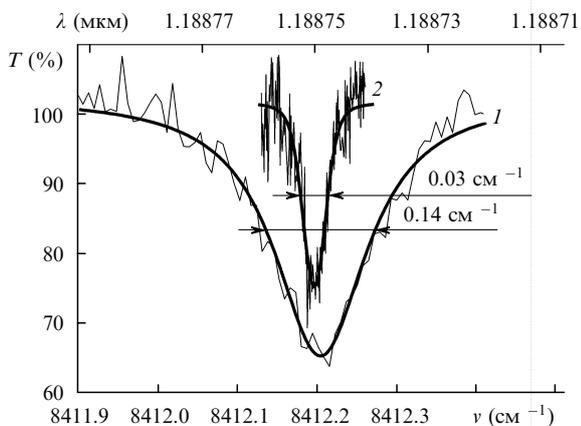


Рис.5. Коэффициент пропускания газовой кюветы  $T$ , измеренный в трехпроходной схеме, в зависимости от частоты  $\nu$  (длины волны  $\lambda$ ) излучения  $\text{LiF}:F_2^-$ -лазера при давлении  $\text{HCl}$ , равном 350 (1) и 30 Тор (2); тонкие кривые – экспериментальные результаты, толстые – аппроксимация контуром Фойгта.

10 МГц/Тор), что хорошо согласуется с данными, опубликованными в [2]. С помощью охлаждаемого жидким азотом ловушки давление в кювете снижалось примерно на порядок, и линия поглощения (3–0)  $R(3)$  прописывалась повторно. Для улучшения отношения сигнал-шум использовалась трехпроходная схема регистрации. Полученный в результате этого эксперимента спектр поглощения приведен на рис.5 (кривые 2). Видно, что снижение давления в кювете привело к сужению линии поглощения до  $0.03 \text{ см}^{-1}$ . В дальнейших экспериментах использовалась кювета, в которой давление газа составляло 20 Тор.

Для наблюдения лазерной генерации в  $\text{HCl}$  газовая кювета помещалась в оптический резонатор (см. п.2.3), при этом использовалась однопроходная схема накачки газа  $\text{LiF}:F_2^-$ -лазером. Первоначально дополнительная фокусировка излучения накачки в кювете не проводилась, и диаметр пучка накачки в ней составлял около 5 мм. После настройки резонатора молекулярного лазера частота лазера накачки сканировалась вблизи максимума линии поглощения газа (3–0)  $R(3)$ . Импульсы генерации газового лазера контролировались охлаждаемым жидким азотом  $\text{Ge}:\text{Au}$ -фотодетектором. Для «отсечки» излучения накачки перед детектором был установлен германиевый фильтр, а также дихроичное зеркало с максимумом пропускания на длине волны генерации и высоким коэффициентом отражения на длине волны накачки. Зависимость выходного сигнала генерации молекулярного  $\text{HCl}$ -лазера от длины волны излучения накачки приведена на рис.6. Длина волны излучения газового лазера измерялась с помощью монохроматора и охлаждаемого жидким азотом фотосопротивления на основе  $\text{Ge}:\text{Au}$ . В спектре излучения  $\text{HCl}$ -лазера была обнаружена одна линия с  $\lambda = 3.881 \pm 0.004$  мкм, что соответствует переходу (3–2)  $P(5)$  в молекулах  $\text{HCl}$ .

Для измерения энергетических и временных характеристик молекулярного  $\text{HCl}$ -лазера энергия лазера накачки ступенчато изменялась с помощью набора нейтральных фильтров. Для повышения точности измерений использовалось одновременная регистрация амплитуд импульса накачки ( $\text{Ge}$ -фотодиодом) и импульса генерации (охлаждаемым жидким азотом  $\text{Ge}:\text{Au}$ -фотосопротивлением). Измерения проводились как для нефокусирован-

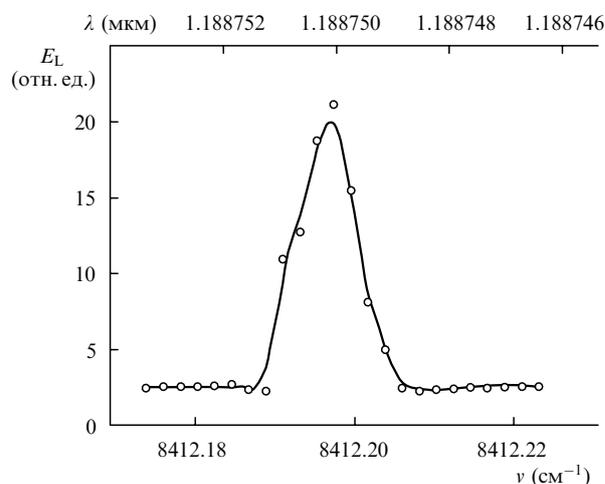


Рис.6. Энергия импульса  $\text{HCl}$ -лазера в зависимости от частоты  $\nu$  (длины волны  $\lambda$ ) излучения  $\text{LiF}:F_2^-$ -лазера при давлении газа 20 Тор и однопроходной схеме накачки.

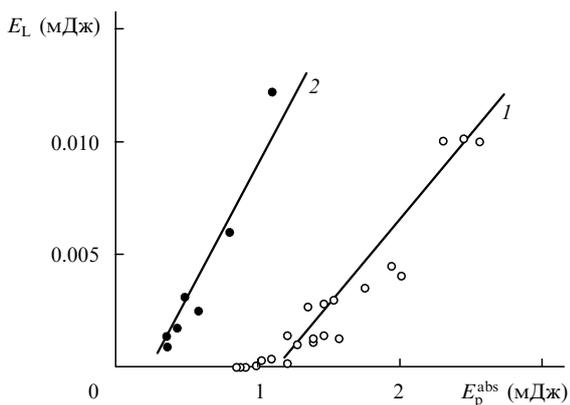


Рис.7. Энергия импульса HCl-лазера  $E_L$  в зависимости от поглощенной энергии накачки  $E_p^{abs}$  при поперечном диаметре зоны накачки 5 (1) и 2 мм (2).

ной накачки, так и при фокусировке пучка накачки с помощью линзы (средний по длине газовой кюветы поперечный диаметр зоны накачки равнялся 5 и 2 мм соответственно). Зависимости энергии генерации HCl-лазера от поглощенной энергии накачки приведены на рис.7 (кривая 1 отвечает нефокусированной накачке, а кривая 2 – сфокусированной). Видно, что дифференциальный КПД генерации молекулярного газового лазера составил около 1 % для нефокусированной накачки и 2 % для сфокусированной. Кроме того, при фокусировке накачки происходит двукратное снижение порога генерации и существенное улучшение стабильности работы молекулярного HCl-лазера.

Временные формы импульсов генерации HCl-лазера приведены на рис.8. При нефокусированной накачке (рис.8,а) задержка между импульсами накачки и генерации составляла порядка 50 нс, а при уменьшении энергии импульса накачки на 30 % (с помощью нейтрального фильтра) задержка возрастала до 75 нс. При фокусировке излучения накачки (рис.8,б), во-первых, значительно (в пять раз) уменьшалась задержка в развитии генерации молекулярного лазера, во-вторых, импульс HCl-лазера приобретал ярко выраженную двугорбую форму. Такая форма может быть объяснена тем, что при увеличении интенсивности накачки возникает каскадная лазерная генерация сначала на переходе (3–2) P(5), а затем на

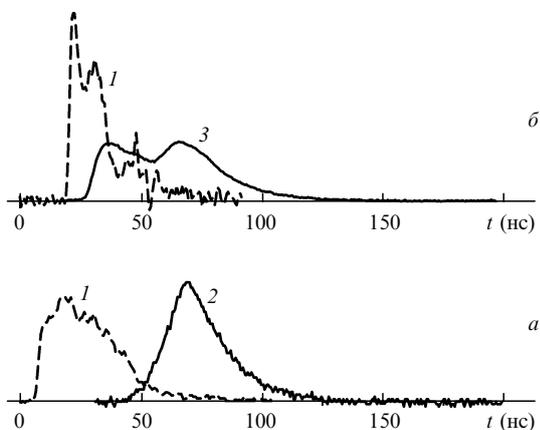


Рис.8. Временные формы импульса накачки на переходе (3–0) R(3) (1), импульса генерации HCl-лазера на переходе (3–2) P(5) (2) и импульса каскадной генерации HCl-лазера на переходах (3–2) P(5) – (2–1) P(6) (3) при поперечном диаметре зоны накачки 5 (а) и 2 мм (б).

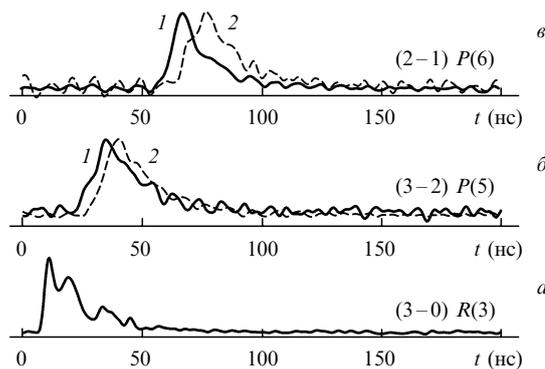


Рис.9. Временные формы импульса накачки (а) и импульсов генерации HCl-лазера, спектрально разрешенных с помощью монохроматора, на переходах (3–2) P(5) (б) и (2–1) P(6) (в) при энергии накачки  $\sim 30$  (1) и  $\sim 20$  мДж (2).

переходе (2–1) P(6), при этом излучение генерации на переходе 3–2 фактически является накачкой для перехода 2–1. Для проверки этого предположения спектральный состав излучения молекулярного HCl-лазера был исследован с помощью монохроматора и охлаждаемого жидким азотом фотосопротивления на Ge: Au. Измерения показали, что спектр излучения этого лазера имел две выраженные линии генерации с длинами волн  $\lambda_1 = 3.881 \pm 0.004$  мкм и  $\lambda_2 = 3.769 \pm 0.004$  мкм, что соответствует указанным выше переходам в молекулах HCl.

Осциллограммы для импульса накачки и спектрально разрешенных импульсов генерации HCl-лазера приведены на рис.9. Измерения проводились для максимальной энергии накачки (около 30 мДж) и энергии накачки, уменьшенной на  $\sim 30$  % с помощью нейтрального светофильтра. Была измерена задержка импульсов генерации HCl-лазера по отношению к импульсу накачки в зависимости от энергии импульса накачки, которая изменялась с помощью набора нейтральных фильтров. Результаты этих измерений приведены на рис.10. Поскольку установка монохроматора привела к увеличению оптического пути в канале регистрации излучения HCl-лазера, задержка импульса генерации относительно импульса накачки увеличилась. Из рис.9, 10 видно, что для обоих лазерных переходов времена развития импульса лазерной генерации увеличиваются при уменьшении энергии импульса накачки, при этом вблизи порога генерации задержка растет быстрее.

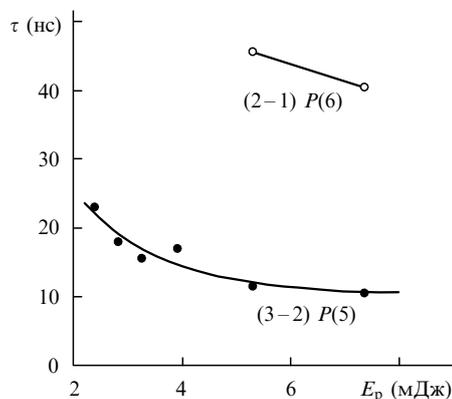


Рис.10. Задержка импульсов генерации HCl-лазера  $\tau$  на переходах (3–2) P(5) и (2–1) P(6) в зависимости от энергии импульса накачки  $E_p$ .

#### 4. Заключение

Таким образом, разработана узкополосная лазерная система на кристалле LiF с  $F_2^-$ -центрами окраски, пере-страиваемая в диапазоне 1.08–1.28 мкм. При накачке  $YLiF_4:Nd^{3+}$ -лазером с энергией импульса 120 мДж максимальная выходная энергия лазерной системы на центрах окраски составляла 50 мДж. ЗГ лазерной системы и усилители устойчиво работали в одночастотном режиме (ширина линии не превышала 300 МГц), механизм сканирования ЗГ позволял плавно, без перескока продольной моды, изменять частоту лазера в пределах одного обратного сантиметра.

Данная лазерная система использовалась для экспериментов по оптической накачке молекулярного газа HCl на переходе  $(3-0) R(3)$ . Были оптимизированы условия оптической накачки и получена каскадная генерация молекулярного HCl-лазера на переходах  $(3-2) P(5)-(2-1) P(6)$ . Дифференциальный КПД этого лазера составлял около 2%. Проведены измерения энергетических и

временных характеристик HCl-лазера при различных условиях оптической накачки.

Настоящая работа была выполнена при поддержке НЦЛМТ ИОФАН, EOARD и ISTC в рамках Партнерского проекта № 1697р.

1. Jones C.R. *Laser Focus*, **14**, 68 (1978).
2. Miller H.C., McCord J.E., Hager G.D., Davis S.J., Kessler W.J., Oakes D.B. *J. Appl. Phys.*, **84**, 3467 (1998).
3. Shimoji Y., Djeu N. *Appl. Phys. Lett.*, **49** (1), 1 (1986).
4. Miller H.C., Radzykewycz D.T., Hager G. *IEEE J. Quantum Electron.*, **30**, 2395 (1994).
5. McCord J.E., Miller H.C., Hager G., et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, **35**, 1602 (1999).
6. Basiev T.T., Mirov S.B., Osiko V.V. *IEEE J. Quantum Electron.*, **24**, 1052 (1988).
7. Basiev T.T., Mirov S.B. In: *Laser Science & Technology Book Ser.* Ed. by V.S.Letokhov, C.V.Shank, Y.R.Shen, H.Walter (New York: Harwood Acad. Publ., 1994, v. 16).
8. Волков С.Ю., Пелипенко В.И., Смирнов В.В. *Квантовая электроника*, **9**, 620 (1982).