

$$\frac{L}{\pi} \frac{d\Phi}{dy} = 2\delta_1 \cos x + \frac{\Delta\epsilon\epsilon_{\parallel}^{1/2}}{2\epsilon_{\parallel}} \frac{\sin^2\beta}{1 - \frac{\Delta\epsilon}{\epsilon_{\parallel}} \sin^2\beta} \cdot \frac{\operatorname{tg} \Omega \cos \Phi}{\cos \alpha_0},$$

$$x = \frac{\pi y}{L}.$$

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Золотько А. С. и др. Письма в ЖЭТФ, 1980, 32, с. 170. [2] Золотько А. С. и др. Особенности переориентации молекул НЖК в поле световой волны обыкновенного типа. Препринт ФИАН № 225. М., 1983. [3] Золотько А. С. и др. ЖЭТФ, 1984, 87, с. 859. [4] Чандрасекар С. Жидкие кристаллы. Гл. 3. М.: Мир, 1980. [5] Аракелян С. М., Караян А. С., Чилингарян Ю. С. Квант. электроника, 1982, 9, с. 2481. [6] Зельдович Б. Я., Табирян Н. Ф. ЖЭТФ, 1982, 82, с. 1126. [7] Зельдович Б. Я. и др. Письма в ЖЭТФ, 1983, 37, с. 563. [8] Золотько А. С., Китаева В. Ф., Соболев Н. Н., Сухоруков А. П. ЖЭТФ, 1981, 81, с. 933. [9] Цлаф Л. Я. Вариационное исчисление и интегрирование уравнения. М.: Наука, 1966. [10] Золотько А. С., Китаева В. Ф., Купомиян В. А., Соболев Н. Н. Письма в ЖЭТФ, 1982, 36, с. 66.

Поступила в редакцию  
20.07.84

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1985, Т. 26, № 5

УДК 621.373.826

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ МОЛЕКУЛ

М. С. Джиджоев, А. В. Чугунов

(кафедра общей физики и волновых процессов)

В последние годы большое внимание уделяется исследованию селективного воздействия на молекулы [1, 2]. Интерес к процессам многофотонного возбуждения и диссоциации (МФВ и МФД) молекул связан с актуальными проблемами лазерного разделения изотопов, управления химическими реакциями, с необходимостью понимания процессов, происходящих в верхних слоях атмосферы, и т. п.

Традиционным инструментом для исследования процессов МФВ и МФД молекул служат ТЕА СО<sub>2</sub>-лазеры. Применение наряду с ИК-лазерными импульсами перестраиваемого УФ-излучения открывает дополнительные возможности для изучения процессов в молекулах, находящихся как в основном, так и в электронно-возбужденных состояниях.

Современный эксперимент в этой области требует, как правило, проведения огромного количества измерений с вариацией ряда параметров. Использование сразу нескольких лазеров, работающих с частотой повторения, необходимость одновременной регистрации большого количества параметров приводят к неизбежности создания автоматизированных лазерных систем.

В настоящей работе описан лазерный комплекс с автоматизированной системой регистрации, предназначенный для исследования процессов в молекулах в условиях одно-(ИК, УФ), двух-(ИК—ИК, ИК—УФ) и трехчастотного (ИК—ИК—УФ) воздействия при плотностях мощности до 10 ГВт/см<sup>2</sup> для ИК- и до 100 МВт/см<sup>2</sup> для УФ-импульсов. Комплекс (рис. 1) включает в себя источники излучения (I);

систему запуска и синхронизации (II), приемно-регистрирующую часть (III), автоматизированную измерительную (IV) и контрольно-калибровочную (V) системы, программное обеспечение.

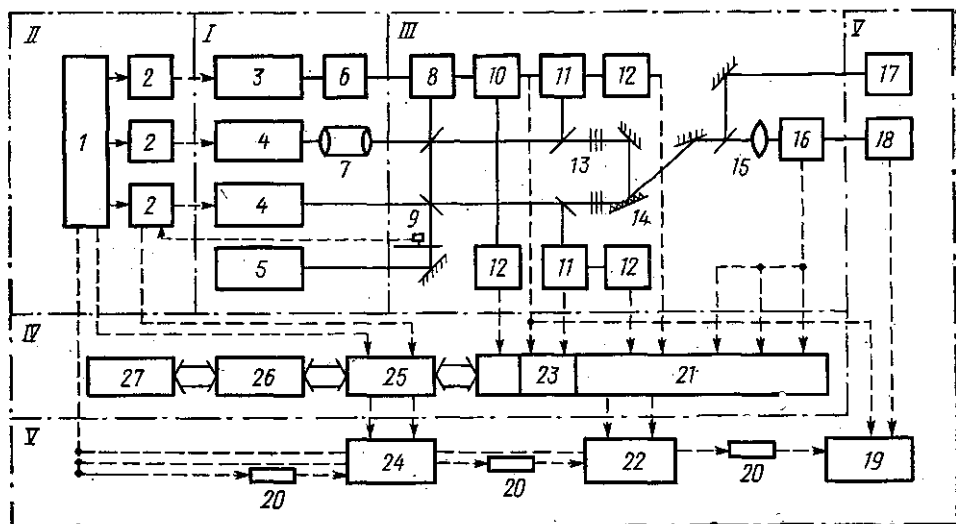


Рис. 1. Блок-схема автоматизированного лазерного комплекса: 1 — генератор запускающих импульсов; 2 — регулируемые линии задержки и высоковольтные блоки запуска; 3 — эксимерный лазер; 4 — TEA CO<sub>2</sub>-лазеры; 5 — непрерывный CO<sub>2</sub>-лазер; 6 — перестраиваемый лазер на красителе; 7 — кювета для укорочения ИК-импульса; 8 — кювета для ИК—УФ-экспериментов; 9 — модулятор излучения непрерывного лазера; 10 — ФЭК; 11 — приемники GeAu с усилителями-формирователями; 12 — пироэлектрические приемники с усилителями; 13 — ослабители; 14 — дифракционная решетка; 15 — линза; 16 — кювета оптоакустического детектора с усилителем; 17 — калиброванный измеритель мощности; 18 — приемник на увеличении электронов фотонами; 19 — осциллограф С9-4; 20 — регулируемые линии задержки; 21 — блок аналого-цифровых преобразователей; 22 — осциллограф С8-13; 23 — система измерения времени; 24 — осциллограф С1-75; 25 — интерфейс и схема формирования стробов; 26 — микро-ЭВМ «Электроника ДЗ-28»; 27 — термопечатающее устройство

В качестве источников ИК-излучения в комплексе использованы два TEA CO<sub>2</sub>-лазера (см. рис. 1, 4) и непрерывный CO<sub>2</sub>-лазер 5. Импульсные TEA CO<sub>2</sub>-лазеры обеспечивают широкий набор частот генерации. При перестройке, например, в 9P-ветви на <sup>12</sup>C<sup>16</sup>O<sub>2</sub>-газе получена генерация на линиях от 9P2 до 9P50. Использование изотопзамещенных молекул углекислоты (<sup>13</sup>C<sup>16</sup>O<sub>2</sub> и <sup>12</sup>C<sup>18</sup>O<sub>2</sub>) позволило существенно расширить спектр генерируемых частот. Длительность импульсов лазеров составляет 75 нс по полувысоте. Практически полное отсутствие «хвостов» у импульсов обеспечивается подбором рабочей смеси (малая концентрация N<sub>2</sub>) и выбором высокого отношения  $E/p$  ( $E$  — напряженность поля в разрядном промежутке,  $p$  — давление смеси). При необходимости легко получаются импульсы длительностью 1,5 мкс и 30 нс. Укорочение импульса производится путем оптического пробоя при фокусировке во вспомогательной кювете 7 (см. рис. 1). Энергия в импульсе на выходе одного из лазеров при многомодовом режиме составляет 5 Дж. Кроме того, предусмотрена возможность работы одного из модулей в качестве усилителя. При частоте следования импульсов 1 Гц установка позволяет производить до 5000 выстре-

лов с сохранением 80% первоначальной мощности. Вывод излучения из резонаторов лазеров осуществляется через нулевой порядок дифракционной решетки, а использование в выходном узле уголковых отражателей обеспечивает полное отсутствие смещения луча при перестройке по линиям генерации. Наличие непрерывного CO<sub>2</sub>-лазера дает возможность с помощью инъекции излучения получать одночастотную генерацию любого из ТЕА CO<sub>2</sub>-лазеров.

Источником УФ-излучения служит перестраиваемый лазер на красителе 6 (см. рис. 1) с поперечной накачкой от эксимерного лазера 3. При работе эксимерного лазера на молекуле XeCl энергия в импульсе составляет 300 мДж при длительности 20 нс. При использовании в лазере на красителе раствора паратерфина в этаноле энергия перестраиваемого УФ-импульса равна 5 мДж, длительность его совпадает с длительностью импульса накачки.

Система запуска и синхронизации (СЗС) обеспечивает автоматический запуск лазеров при работе в импульсно-периодическом режиме с плавно регулируемой частотой. Предусмотрена также работа в режиме однократного импульса и внешней синхронизации. Максимальная частота работы комплекса ограничивается величиной 3 Гц из-за отсутствия прокачки рабочей смеси в импульсных лазерах. Повышение частоты без прокачки приводит к перегреву смеси в разрядном промежутке и снижению энергии импульсов. СЗС позволяет получать плавно регулируемую задержку между импульсами генерации лазеров от 0 до 1 мс при синхронизации по низковольтным импульсам запуска. Стабильность задержки при этом составляет 50 нс. При необходимости более жесткой синхронизации со стабильностью запуска ~10 нс используется синхроразрядник, производящий синхронизацию по высоковольтному импульсу запуска. При этом генерация лазеров осуществляется с произвольно выбираемой, но фиксированной задержкой в пределах от 0 до 1 мкс. Кроме того, СЗС синхронизирует работу импульсных лазеров с работой механического модулятора, управляющего лучом непрерывного лазера в режиме с инъекцией. СЗС производит также запуск в соответствующие моменты времени всех блоков измерительной и контрольно-калибровочной систем.

В приемно-регистрирующей части комплекса производится совмещение лучей ТЕА CO<sub>2</sub>-лазеров с помощью либо вспомогательной дифракционной решетки 14 (см. рис. 1), либо пластинки из Ge. Использование для совмещения лучей отражательного элемента (дифракционной решетки) позволяет избежать двойных отражений, возникающих при использовании полупрозрачных пластин. С помощью тонких делительных пластин из NaCl 10% излучения в канале каждого из лазеров отводится для контроля параметров генерации. Энергия ИК- и УФ-излучения измеряется с помощью пирозлектрических датчиков 12, чувствительность которых не зависит от длины волны в диапазонах перестройки каждого из лазеров. Усиленные и проинтегрированные импульсы излучения с пирозлектриков поступают в измерительную часть. Калибровка датчиков производится по прибору ИМО-2Н. Для контроля временного положения ИК-импульсов использованы охлаждаемые фоторезисторы GeAu 11, а для контроля УФ-импульсов — ФЭК 10. По переднему фронту импульса, поступающего с каждого из этих приемников, усилитель, работающий в лавинно-ключевом режиме, формирует стандартный импульс с длительностью фронта ~10 нс. Сформированные импульсы поступают в измерительную часть для определения времени задержки между импульсами генерации.

При проведении исследований в предельно достижимых ИК-полях

( $\sim 10$  ГВт/см<sup>2</sup>) для регистрации поглощенной энергии используется методика оптоакустического детектора (ОАД) с высоким пространственным разрешением [1]. Сигнал с ОАД 16 после усиления также поступает в измерительную систему.

Измерительная часть включает 5 каналов для измерения аналоговых сигналов с временем обработки 8 мкс. Каждый канал содержит контрольную схему и стандартный АЦП Ф-7077/1. В случае переполнения одного из каналов (слишком большой входной сигнал) соответствующая схема контроля подает световой сигнал «переполнение» и блокирует поступление данных со всех каналов в машину. Раздельный запуск и индивидуальное стробирование каналов позволяют независимо от временного положения импульсов генерации измерять энергию лазеров и параметры ОА-сигнала с точностью не хуже 5%. Шестой канал предназначен для измерения времени задержки между импульсами генерации с точностью 18 нс.

Вся система через специальный интерфейс замкнута на микро-ЭВМ «Электроника ДЗ-28». Для обеспечения работы комплекса на языке машины разработаны универсальные программы, производящие отбор, накопление и обработку данных. В используемых программах предусмотрен контроль массивов данных на наличие случайных (ошибочных) величин. С этой целью перед окончательной обработкой для каждого массива (падающая энергия, поглощенная энергия и т. п.) вычисляется предварительное среднее и устанавливаются границы динамических ворот. Затем происходит сравнение всех величин массива с установленными границами и, таким образом, отбрасываются значения с максимальным отклонением от среднего. При обнаружении случайных величин в одном из массивов из рассмотрения исключается весь выстрел, т. е. во всех массивах отбрасываются значения, полученные в том же выстреле. После этого производится нормировка величин поглощенной энергии на значение падающей энергии для каждого выстрела, а затем вычисление истинного среднего и среднеквадратичного отклонения. В случае двухчастотного ИК—ИК-эксперимента автоматически происходит сравнение одно- и двухчастотного воздействия. Все полученные результаты и контрольные величины (среднее, дисперсия, число выстрелов, число учтенных выстрелов и т. д.) выводятся на печать в виде таблиц в зависимости от задержки, энергии или других параметров. При исследовании зависимости поглощения от задержки между лазерными выстрелами автоматически происходит построение графика  $E_{\text{погл}}(\tau_{\text{зад}})$  в выбранном машиной или заданном оператором масштабе.

При создании автоматизированных комплексов на базе мощных электроразрядных лазеров приходится принимать ряд мер по преодолению интенсивных электромагнитных наводок. В нашем случае эффективным средством борьбы с наводками оказалось использование двойных экранирующих кожухов и кустовой системы заземления. Принятие таких мер приводит к существенному снижению влияния наводок, но не к полному их исчезновению. Так, например, при измерении сигнала с ОАД наличие наводок приводит к заметному смещению нулевого уровня для наиболее чувствительного диапазона измерений. Поэтому для определения величины поглощения оказывается недостаточным измерять напряжение  $U$  в одной точке  $t_2$  (рис. 2, а). В комплексе производится измерение в точках  $t_1$  и  $t_2$ , а искомое поглощение вычисляется в ЭВМ как величина, пропорциональная  $U(t_2) - U(t_1)$ . Две точки измерения необходимы для учета погрешности, вносимой наводкой. В общем случае при работе с ОАД приходится

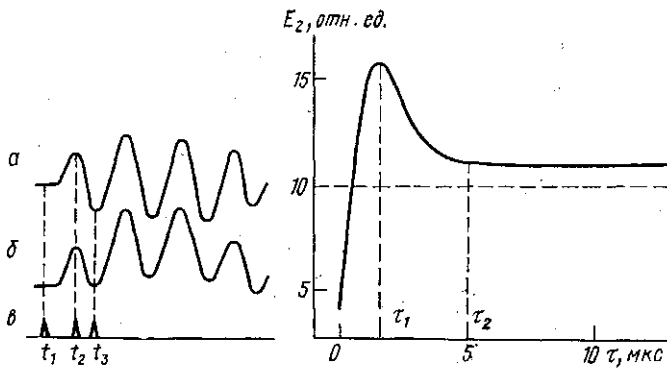


Рис. 2. Осциллограммы сигнала с ОАД (а), сигнала с ОАД при слабом натяжении мембраны (б), стробирующих импульсов измерительного комплекса (в). Ось времени на осциллограммах общая

Рис. 3. Зависимость поглощенной энергии второго лазера от времени задержки при ИК—ИК-возбуждении озона ( $p = 3 \text{ Тор}$ )

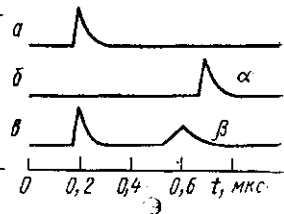


Рис. 4. Осциллограммы импульсов генерации TEA  $\text{CO}_2$ -лазеров при наличии оптической связи: импульс первого (а), второго (б) и обоих (в) лазеров. Ось времени на осциллограммах общая

производить измерение напряжения в трех точках. При получении максимальной чувствительности ОАД (слабонатянутые мембраны) сигнал приобретает форму, показанную на рис. 2, б. Для учета влияния медленной составляющей на амплитуду первого пика производится дополнительное измерение сигнала в точке  $t_3$ .

В качестве иллюстрации работы комплекса приведем данные, полученные при исследовании поглощения в озоне ( $p = 3 \text{ Тор}$ ) на линии 9P28  $\text{CO}_2$  при облучении газа двумя последовательными ИК-импульсами. Характерная зависимость поглощенной энергии второго импульса ( $E_2$ ) от времени задержки  $\tau$  относительно первого представлена на рис. 3. Пунктиром показан уровень поглощения второго лазера ( $E_{02}$ ) в невозбужденной среде (случай моноимпульсного облучения).

При нулевой задержке, что эквивалентно увеличению плотности энергии  $\Phi$  первого лазера, в случае моноимпульсного облучения до величины  $\hat{\Phi}_1 = \Phi_1 + \Phi_2$ , оказывается  $E_2(0) = 0,4E_{02}$ . При вычислении  $E_2$  принято  $E_1 = E_{01}$  ( $E_{01}$  — поглощенная энергия первого лазера в случае одного импульса). В рассматриваемом эксперименте  $\Phi_1 \approx \Phi_2$  и соответственно  $E_{01} \approx E_{02}$ . Такой результат ( $E_2(0) \approx 0,4E_{02}$ ) хорошо соответствует закону поглощения  $E_{\text{погл}} \sim \sqrt{\Phi}$ , выполняющемуся в рассматриваемом диапазоне плотностей энергии [3, 4]. При  $t \geq \tau_2$  кривая выходит на стационарный уровень  $E_2 \approx 1,1E_{02}$ . Изменение поглощения  $\Delta E \approx 0,1E_{02}$  связано с процессами, характерное время которых больше 100 мкс·Тор (например, VT-релаксация). Исследование процессов с такими большими временами релаксации требует использования вместо оптикоакустического других методов измерения поглощенной энергии. Кроме того, при исследовании таких медленных процессов с помощью двойного ИК—ИК-возбуждения необходимо учитывать процесс диффузии колебательно возбужденных частиц из объема взаимодействия. Выбор в сторону увеличения поглощения на кривой (см. рис. 3) связан с возникающей паразитной оптической связью резонаторов и, как следствие этого, изменением формы второго импульса. На рис. 4 приведены осциллограммы импульсов: отдельно первого (а), второго (б) и сразу двух (в) лазеров при наличии оптической связи. Колебания

Энергии и временного положения импульсов регистрируются автоматической измерительной системой, в то время как форма импульса не учитывается. Дополнительно проведенные исследования показали, что при равных энергиях импульс  $\beta$  поглощается заметно лучше импульса  $\alpha$  (см. рис. 4), что и приводит к величине  $E_2(\tau_1) \approx 1,5E_{02}$ . При больших временах задержки оптическая связь исчезает. Для устранения паразитной оптической связи плоскость поляризации в одном из лазеров была повернута на  $90^\circ$  и в канале первого лазера была использована вспомогательная кювета (см. рис. 1, 7), производящая отсечку хвоста импульса за счет оптического пробоя в газе. Несмотря на все принятые меры, импульс второго лазера после включения первого изменял свою форму и временное положение (см. рис. 4). Таким образом, в экспериментах с использованием нескольких лазеров при совпадении частот генерации или при наличии в одном из лазеров неселективного резонатора может возникать паразитная оптическая связь, приводящая к существенному изменению поглощения.

Пробные эксперименты, проведенные на представленном ИК—ИК—УФ-комплексе, показали перспективность применения такого рода систем для проведения комплексных исследований по нелинейной лазерной спектроскопии и кинетике сильновозбужденных молекул газа.

В заключение авторы выражают благодарность В. К. Попову и А. Ю. Шаронову за помощь при создании экспериментальной установки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Баграташвили В. Н., Летохов В. С., Макаров А. А., Рябов Е. А. Многофотонные процессы в молекулах в инфракрасном лазерном поле. М.: Изд. ВИНТИ, 1980. [2] Летохов В. С. Нелинейные селективные фотопроецессы в атомах и молекулах. М.: Наука, 1983. [3] Гордиенко В. М. и др. Квант. электроника, 1982, 9, с. 2204. [4] Джиджоев М. С., Попов В. К., Платоненко В. Т., Чугунов А. В. Квант. электроника, 1984, 11, с. 1357.

Поступила в редакцию  
05.11.84

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1985, Т. 26, № 5

УДК 539.186.3

#### СПИНОВЫЙ СТАБИЛИЗАТОР НА ОРИЕНТИРОВАННЫХ ОБМЕННЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ ЯДРАХ $^{129}\text{Xe}$

З. Б. Искандаров, Л. С. Корниенко, А. Л. Коткин, Р. М. Умарходжаев  
(НИИЯФ)

Поляризация ядер изотопа  $^{129}\text{Xe}$  обменным взаимодействием с оптически ориентированными атомами  $^{133}\text{Cs}$  рассмотрена в работах [1—3]. Ориентированные ядра  $^{129}\text{Xe}$  характеризуются большими временами спиновой релаксации и могут использоваться в магнетометрии в качестве рабочего вещества при создании спиновых генераторов и стабилизаторов.

В настоящем сообщении приводятся результаты экспериментального исследования спинового стабилизатора на ориентированных ядрах  $^{129}\text{Xe}$ , работающего в магнитных полях  $H_0$  малой напряженности ( $5\div 500$  нТл). Блок-схема стабилизатора представлена на рис. 1: 1 — ячейка с рабочим веществом; 11 — радиочастотные катушки; 10 — генератор частоты  $\rho$ ; 3, 5—7 — измерительное устройство, включающее в себя генератор частоты  $\omega$  3, фотоприемник 5, селективный усилитель 6 и синхронный детектор 7; 8 — усилитель цепи обратной связи; 9 — второй синхронный детектор, сигнал с выхода которого «управляет» либо частотой радиочастотного генера-