

ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

doi: 10.51639/2713-0568_2024_4_1_16

УДК 535.8 574.56 621.373

ГРНТИ 44.41.29 29.33.51

ВАК 1.3.19

Лазерная диагностика водорода. Часть 1

^{1*} Привалов В. Е., ² Шеманин В. Г.

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет,
195257, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

² Филиал Белгородского государственного технологического университета
имени В. Г. Шухова в Новороссийске, 353919, Новороссийск, ул. Мысхакское шоссе, 75

e-mail: * vaevpriv@yandex.ru, shemanin-v-g@nb-bstu.ru

В работе рассмотрены перспективы использования водорода как нового вида экологически чистого топлива. Это требует создания систем для контроля его выбросов и утечек из емкостей хранения и трубопроводов. Однако дистанционный контроль и измерение концентраций молекул водорода представляет большую проблему. Рассмотрены потенциальные возможности методов лидарного зондирования. Выполнено компьютерное моделирование режимов работы современных лидаров дифференциального поглощения и рассеяния позволяет найти оптимальный вариант для дистанционного измерения концентрации молекул водорода в атмосфере.

Ключевые слова: энергетика, молекула водорода, лидар, дифференциальное поглощение и рассеяния, лазер, мониторинг, концентрация, расстояние зондирования.

В 2020 году правительство России утвердило энергетическую стратегию Российской Федерации на период до 2035 года и ключевые меры развития водородной энергетики [1]. Сегодня в РФ появляются отдельные пилотные проекты с использованием водородной энергетики, но до массового внедрения дело пока не дошло. Например, в конце 2019 года в Санкт-Петербурге был запущен трамвай на водородном топливе, а ОАО «Газпром» и ОАО «РЖД» в качестве пилотного проекта обсуждают возможность запуска поезда на Сахалине на топливных водородных элементах. Всё это свидетельствует о том, что развитие водородной энергетики продолжится, а это потребует совершенной диагностики водорода. Работы в этом направлении ведутся [2] и они легли в основу нашего обзора. Лазерной диагностикой водорода мы занимаемся с прошлого века. Выпустили десятки работ и в этом обзоре, предполагаем систематизировать некоторые результаты, поскольку без подробного знакомства с библиографией, проникнуть в суть задач и методы их решения будет трудно.

1 Лидары. Принцип действия и классификация

Основой методов лазерного зондирования служат оптические явления, возникающие при взаимодействии лазерного излучения с газовыми молекулами и аэрозолем атмосферы: Рэлеевское рассеяние, комбинационное рассеяние света (КРС), рассеяние Ми на

аэрозольных частицах, флуоресценция и поглощение. Экспериментально наблюдаемые диапазоны сечений каждого из процессов приведены в [3]. Как следует из данных [3] сечение рассеяния Ми может быть настолько большим, что даже незначительное количество дисперсных частиц соответствующих размеров может дать сигнал рассеянного излучения полностью перекрывающий сигналы Рэлеевского или КРС. Это свойство дисперсных частиц широко используется для регистрации малых концентраций частиц [4].

Хотя резонансное рассеяние, называемое атомной или резонансной флуоресценцией, также имеет большое сечение, тушение при столкновениях с более распространенными составляющими атмосферы обычно приводит к сильному ослаблению резонансного сигнала. Поэтому наиболее эффективно этот метод может работать при исследованиях малых составляющих в разреженной атмосфере [5]. Широкополосная природа молекулярной флуоресценции является причиной низкого значения отношения сигнала к шуму, при этом основной вклад в шум дает фоновое излучение [6]. С ростом длительности сигнала флуоресценции падает и пространственное разрешение метода.

КРС можно рассматривать как неупругий процесс, при котором лазерное излучение вызывает переход молекулы на виртуальный уровень с последующим мгновенным (порядка 10 фс) излучением на длине волны, отличной от лазерной. Разность энергий падающего и испущенного фотонов является характеристикой рассеивающей молекулы и обычно соответствует изменению колебательного квантового числа на единицу. Чувствительность этого метода низка из-за незначительной величины сечения КРС.

Поэтому наиболее вероятным представляется применение КРС для дистанционного контроля дымовых шлейфов труб, концентрации составляющих в которых могут быть 10...100 ppm по сравнению со значениями 0,1...5,0 ppm, типичными для малых составляющих в атмосфере [7]. Некоторое увеличение сечения (до трёх порядков) возможно в тех случаях, когда возбуждающая частота близка к частоте разрешённого перехода. Однако, в [8] показано, что такого повышения чувствительности при резонансном рассеянии не удаётся реализовать из-за сильного поглощения лазерного и рассеянного излучения. Метод КРС позволяет определить отношение концентрации любой составляющей к концентрации некоторой стандартной компоненты (например, азота) по отношению сигналов КРС при условии, что отношение сечений рассеяния известно [9].

Сечение поглощения обычно значительно превышает как эффективное (с учётом тушения) сечение флуоресценции, так и сечение КРС. Следовательно, на основе ослабления лазерного излучения с соответствующим образом подобранной частотой можно создать чувствительный метод определения средней концентрации выбранной составляющей. Для того, чтобы выделить вклад поглощения интересующей молекулы в ослабление лазерного луча, обычно применяется метод дифференциального поглощения. В этом методе предполагается использование двух длин волн лазерного излучения: одной – в центре полосы поглощения молекулы, а другой – в крыле этой полосы. Большинство полос поглощения молекул, представляющих интерес для дистанционного зондирования, лежит в инфракрасной области спектра и соответствует колебательно – вращательным переходам [10, 11]. К основным недостаткам этого метода относятся низкое пространственное разрешение и недостаточная чувствительность инфракрасных детекторов. Высокие чувствительность и пространственное разрешение могут быть достигнуты при сочетании дифференциального поглощения с рассеянием (ДПР). Этот метод впервые был предложен для дистанционного определения содержания водяного пара в атмосфере [12]. Он основан на сравнении рассеянных назад лазерных сигналов: одного – в максимуме линии поглощения молекулы, а другого – на крыле линии. В этом

случае пространственное разрешение и мощные сигналы на используемых длинах волн обуславливаются большим сечением рассеяния Ми, а отношение сигналов даёт требуемую величину дифференциального поглощения. Благодаря этому, метод ДПР обладает наилучшей чувствительностью при зондировании некоторых молекулярных составляющих атмосферы с больших расстояний. Хотя чувствительность фотодетекторов делает методы, основанные на флуоресценции и ДПР, более пригодными для зондирования молекул, имеющих полосы поглощения в видимой и ближней ультрафиолетовой областях спектра, повышение чувствительности инфракрасных детекторов придает методу ДПР более универсальный характер [3]. Именно поэтому в последнее время получили широкое распространение лидары ДПР, которые используются во всех видах лазерной дистанционной техники, основанной на резонансном поглощении. Использование коротковолновых лазеров позволяет расширить спектр приложений лидаров за счёт возможности использования индуцированной лазерным излучением флуоресценции. Это привело к разработке новой лазерной системы дистанционного зондирования, получившей название лазерного флуориметра [3]. Однако его применение возможно только для измерения концентрации атомов водорода по регистрации индуцированной лазером резонансной флуоресценции [13].

Следовательно, для дистанционного зондирования молекул водорода в атмосфере возможно использование методов, основанных на ДПР и КРС.

Именно создание лазеров привело к разработке большого класса лазерных систем дистанционного зондирования [14]. Главными и определяющими в дистанционном зондировании являются лазеры, которые способны генерировать спектрально-ограниченные импульсы излучения наносекундной длительности высокой мощности и небольшой угловой расходимости. В тех случаях, когда сигнал является очень слабым, необходима также высокая частота повторения импульсов. Все многообразие лазеров, которые могут быть применены для зондирования газовых молекул, представлены в ряде монографий, например [15, 16]. Ещё более широкие возможности по применению лазеров открываются при использовании генерации высших гармоник, параметрической конверсии или комбинационного сдвига и перестраиваемых лазеров на красителях. Применение модуляции добротности даёт возможность получать пиковую мощность до 50 МВт при длительности импульса порядка 10 нс. Приемлемыми обычно являются углы расходимости пучка порядка 1 мрад, а частота повторения импульсов до 10 кГц. Часто оказывается необходимым преобразование основного излучения лазера во вторую, третью и четвёртую гармоники, как в случае АИГ:Nd-лазера. Это связано с тем, что основная длина волны излучения такого лазера, равная 1,064 мкм, представляет интерес для тех приложений, в которых используется рассеяние Рэлея и Ми. Удвоение или утроение частоты достигается за счёт применения соответствующих нелинейных кристаллов, причём эффективность преобразования зависит от оптического качества кристалла, рабочей длины волны, интенсивности и степени когерентности лазерного пучка. Верхний предел КПД преобразования может достигать 70 % [17].

Класс газовых лазеров является наиболее многообразным: в него входят самые коротко- и длинноволновые лазеры, лазер с самым высоким КПД и наиболее мощный непрерывный аргоновый лазер [17]. CO₂-лазер низкого давления генерирует импульсы с энергией до 10 Дж и частотой повторения до 10 Гц и может достигать КПД 20 %. Для дистанционного зондирования могут представлять интерес эксимерные лазеры, так как длины волн их излучения лежат в УФ области спектра (менее 308 нм), длительности импульсов 10...20 нс с энергией до 0,5 Дж.

К главным достоинствам полупроводниковых лазеров следует отнести небольшие размеры и эксплуатационную надежность конструкции, прямое электрическое

возбуждение с возможной быстрой перестройкой длины волны за счет изменения плотности тока, высокий КПД (до 50 %) и широкий спектральный диапазон (0,6–34 мкм). Однако их отличает небольшая пиковая мощность (до 100 Вт) и большая расходимость луча [17].

По результатам выполненных ранее исследований различных типов лидаров [9–12, 14–16, 18, 19], предназначенных для зондирования газовых потоков или газовых молекул в атмосфере, можно предположить, что для обнаружения концентраций молекул порядка 10^{13} см^{-3} и выше в атмосфере будет наиболее предпочтительным использование систем ДПР. Это объясняется тем, что сечение поглощения значительно превышает эффективное (с учётом тушения) сечение флуоресценции и КРС [3]. Поэтому на основе ослабления лазерного излучения с соответствующим подбором длины волны можно создать чувствительный метод измерения концентрации молекул водорода в атмосфере.

2. Зондирование молекул водорода в атмосфере лидаром ДПР

Большие перспективы использования водорода как чистого топлива требует создания систем для контроля его утечки из баллонов и трубопроводов, особенно в местах эксплуатации и перекачки. В реальной атмосфере доля молекул H_2 составляет $5 \cdot 10^{-7}$ мольных доли (0,5 ppm) [3] или $1,345 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Поэтому дистанционный контроль и измерение концентраций на таких уровнях представляет большую проблему [19].

В настоящее время используется стандартное оборудование, которое позволяет проводить лишь импактные измерения с предварительным отбором, подготовкой пробы и ее анализом [20]. Это может быть газовая хроматография [21] или спектрофотометрия в вакуумном ультрафиолете [20]. Недостатком этих способов является низкое быстродействие при проведении анализа (около 10 мин.), что усложняет их применение при проведении газовой съёмки наибольших площадях.

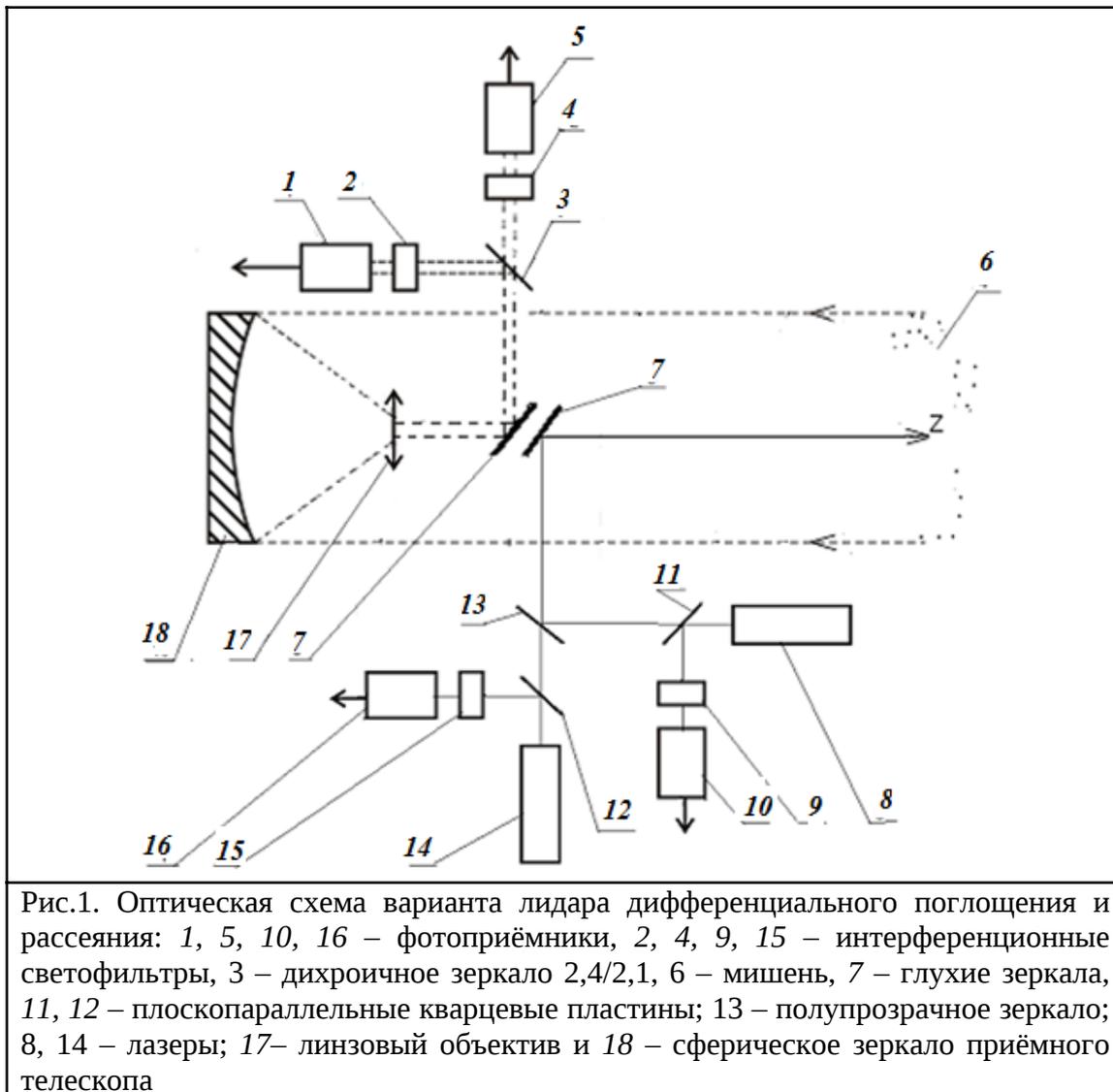
По результатам выполненных ранее исследований различных типов лидаров [12, 22, 25], предназначенных для зондирования загрязняющих веществ в газовых потоках или чистой атмосфере, можно заключить, что для обнаружения концентраций $N(z)$ загрязняющих веществ порядка 10^{15} см^{-3} и ниже в атмосфере будет наиболее предпочтительным использование систем дифференциального поглощения. На основе ослабления лазерного излучения с соответствующим подбором длины волны можно создать чувствительный метод измерения концентрации загрязняющих веществ в атмосфере.

Оптическая плотность слоя молекул водорода в атмосфере определяется соотношением лидарных сигналов на двух выбранных длинах волн. При известном сечении резонансного поглощения σ_0 молекулами водорода можно довольно эффективно использовать зависимость оптической плотности от концентрации молекул при дистанционных измерениях их концентрации в атмосфере.

Вариант лидара ДПР предполагает использование двухволнового излучателя: одна длина волны лазерного излучения попадает в центр полосы поглощения молекулы, а другая – вне этой полосы [23]. В качестве такого излучения можно использовать, например, две гармоники YAG-Nd-лазера на длинах волн 1064 и 532 нм как в [19]. В нашем варианте [22] для зондирования молекул водорода используется лазерное излучение на длине волны 2,4 мкм (или частоте $\nu_1 = 125 \text{ ТГц}$), которое попадает в максимум полосы поглощения молекул H_2 [24]. Его излучает параметрический генератор в ИК диапазоне, который накачивается излучением второй гармонике лазера на АИГ:Nd на длине волны 532 нм. Лазерное излучение вне этой полосы поглощения было взято на длине волны 2,1 мкм, чтобы попасть в область прозрачности атмосферы [17]. Для экспериментальной реализации такого варианта в качестве опорного канала в схеме дифференциального

поглощения использовался импульсный лазер на активном элементе YAG-Cr-Ho [24] (или частоте $\nu_2 = 142,9$ ТГц).

Рассмотрим оптическую схему такого варианта лидара ДПР, приведённую на рис. 1.



Передающая система лидара состоит из двух лазеров 14 и 8, энергия лазерного излучения первого в импульсе длительностью 10 нс на длине волны 2,4 мкм (ν_1) равна 15 мДж, а второго – 40 мДж на длине волны 2,1 мкм (ν_2). Площадь приёмной апертуры телескопа 18 $S_0 = 0,125$ м². Интенсивность лазерного излучения на длине волны 2,4 мкм, прошедшего сквозь слой атмосферы с молекулами водорода заданной концентрации туда и обратно, уменьшается за счёт поглощения в молекулярном водороде [19, 22] и через интерференционный светофильтр 2 направлялось на фотоприёмник 1. Одновременно дихроичным зеркалом 3 лазерное излучение на длине волны 2,1 мкм через интерференционный светофильтр 4 направлялось на фотоприёмник 5 для измерения его интенсивности. Оно также прошло сквозь толщу атмосферы и служило в качестве опорного сигнала в дифференциальной схеме измерения. Импульсы напряжений с двух одинаковых фотоприёмников 1 и 5 вводились в измерительную систему и записывались в ПК. Кварцевые пластины 11 и 12 отводили часть лазерного излучения на длинах волн

2,4 мкм и 2,1 мкм через светофильтры 9 и 15 на фотодиоды 10 и 16 для контроля энергии лазерных импульсов и синхронизации работы всего лидара. Кварцевая линза 17 использовалась для создания параллельного пучка из рассеянного излучения на обеих длинах волн.

Далее, оптические оси лазеров и приёмного телескопа направлены вдоль оси z [25]. Оптические характеристики атмосферы на трассе зондирования z зададим коэффициентом ослабления $k(\nu, z)$, а свойства топографической мишени – коэффициентом отражения или суммарным коэффициентом упругого рассеяния M и молекулярного рассеяния Рэлея $\rho(\pi, \nu)$ [3].

Следуя логике работ [19, 25], возьмём лидарные уравнения для упругого рассеяния на двух выбранных длинах волн и разделим одно на другое.

Информация о концентрации молекул водорода содержится в сомножителе $T(\nu, z)$ в уравнении из [19], а коэффициент ослабления в атмосфере $k(\nu, z)$ определяется соотношением вида [19, 25]. Будем считать, что атмосфера однородна, и контур полосы поглощения молекул водорода аппроксимируем функцией Лоренца [3]. В итоге, как и ранее в [25], переходя к оптической плотности получим уравнение для ДПР в виде:

$$D = \ln \frac{P(\nu_2, z)}{P(\nu_1, z)} = \ln \left[\frac{E_2 G_2(z) \rho(\pi, \nu_2) \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{\Gamma_1^2 + \Gamma_a^2}}{\sqrt{2}\Gamma_a} \right)}{E_1 G_1(z) \rho(\pi, \nu_1) \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{\Gamma_2^2 + \Gamma_a^2}}{\sqrt{2}\Gamma_a} \right)} \sqrt{\frac{\Gamma_1^2 + \Gamma_a^2}{\Gamma_2^2 + \Gamma_a^2}} \right] - \quad (1)$$

Таким образом, лидарное уравнение (1) позволяет найти концентрацию исследуемых молекул, если известны остальные параметры задачи. Значит, задавая диапазон искомым концентраций молекул водорода, можно оценить параметры требуемого варианта лидара.

3. Моделирование и результаты

Рассмотрим параметры этой задачи для нашей экспериментальной ситуации. Будем считать, что для нашего лидара $G_1(z) = G_2(z)$, а коэффициенты отражения $\rho(\pi, \nu)$ для обоих каналов примерно одинаковы и равны для суммарного упругого рассеяния в атмосфере – 10^{-7} [6]. Энергия $E = tP$ в импульсе длительностью 10 нс лазерного излучения на длине волны 2,4 мкм (ν_1) равна 15 мДж, а на длине волны 2,1 мкм (ν_2) – 20 мДж. Полуширины линий генерации двух лазеров Γ_1 и Γ_2 будут изменяться в диапазоне 1...5 ГГц. Будем считать, что полуширина аппаратной функции на порядок больше, чем полуширина линии генерации лазера, что вполне допустимо для промышленных лазеров и интерференционных светофильтров в качестве спектроанализаторов лидара [19] и равна 100 ГГц. Значения коэффициентов ослабления в атмосфере были взяты из [17] и равны соответственно $k(\nu_1) = 0,08 \text{ км}^{-1}$ и $k(\nu_2) = 0,09 \text{ км}^{-1}$. Для полосы поглощения водорода максимальное значение сечения поглощения на длине волны 2,4 мкм по данным [19] $\sigma_0(\nu_1) = 0,8 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$, а полуширина этой полосы – $\Gamma_3 = 45,5 \text{ ГГц}$ [22, 25].

Выполним численное решение уравнения (1) для значений полуширин Γ_1 и $\Gamma_2 = 2 \text{ ГГц}$, расстояний зондирования в диапазоне 10...1500 м, диапазона концентраций от 10^{11} см^{-3} до 10^{17} см^{-3} и приведённых выше остальных параметров задачи. Результаты решения уравнения (1) представлены на рис. 2 для приведённых выше параметров, диапазона концентраций $10^{11} \dots 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и расстояния зондирования до 1,5 км. Ограничение по величинам концентраций и расстояний связано с тем, что метод спектроскопии дифференциального поглощения [3, 23], имеет ограничения снизу и сверху на диапазон

возможных значений произведений величин концентраций на толщины слоёв, которые определяются оптической схемой и фотоприёмником лидара. Для значений оптической плотности D больше 4,5 расчёты не проводились, так как динамический диапазон фотоприёмников был выбран, как и ранее 10^4 в соответствии с [18, 19].

Результаты решения уравнения (1) для той же ситуации, что на рис.2, но для значений полуширины $\Gamma_1 = 5$ ГГц и $\Gamma_2 = 10$ и значения полуширины аппаратной функции $\Gamma_a = 100$ ГГц дают значения в 0,996 от полученных ранее на рис. 2. Это незначительное уменьшение оптической плотности связано с тем, что Γ_a значительно больше, чем Γ_1 и Γ_2 , т. е. их влияние на результат моделирования очень мало.

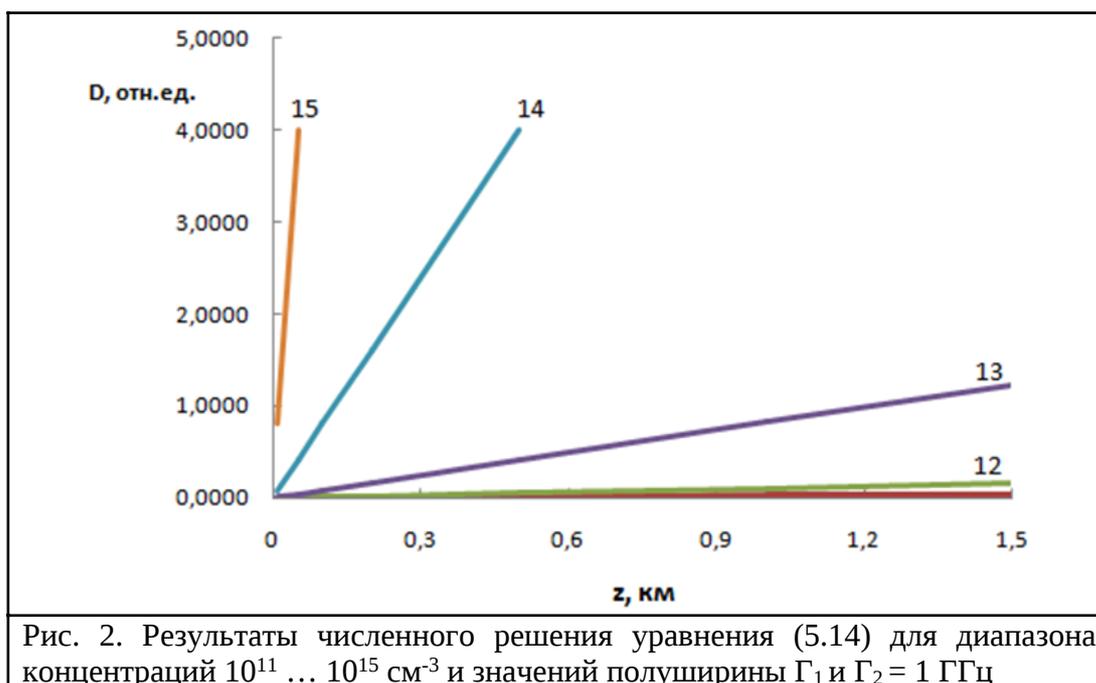
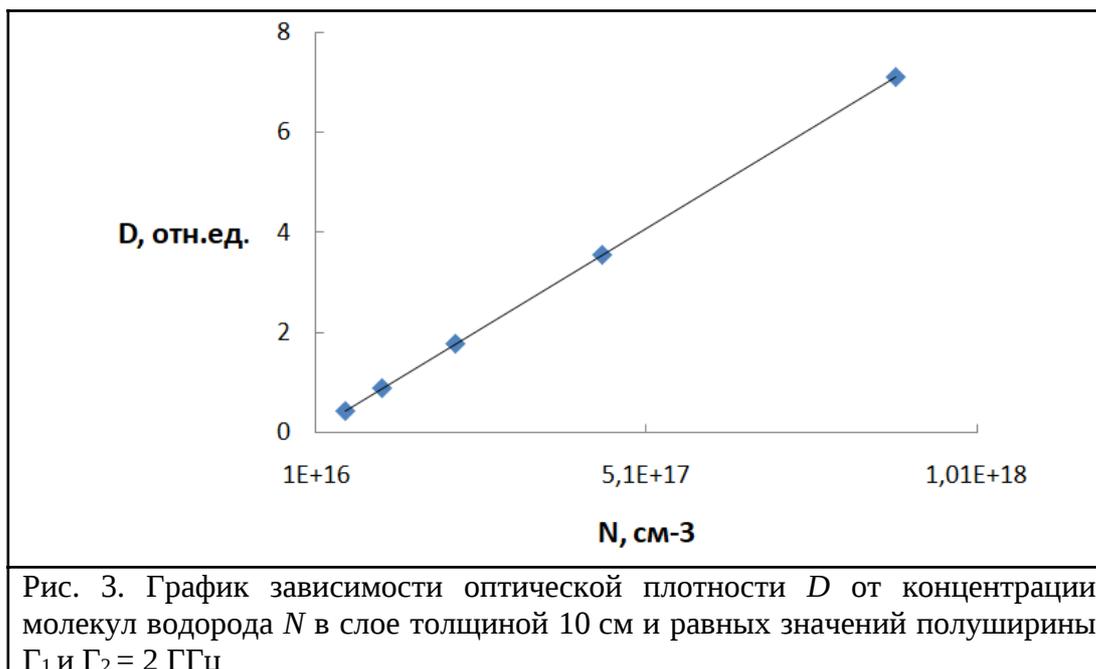


Рис. 2. Результаты численного решения уравнения (5.14) для диапазона концентраций $10^{11} \dots 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и значений полуширины Γ_1 и $\Gamma_2 = 1$ ГГц

Далее выполним проверку полученных результатов. Для этого рассчитаем значение сечения поглощения молекул водорода для нашего лабораторного лидара дифференциального поглощения из [19, 22]. Полученный график зависимости оптической плотности D от концентрации молекул водорода N в слое толщиной 10 см представлен на рис. 3. Такая маленькая толщина слоя в 10 см связана с большими значениями концентрации водорода, которые получались из чистого водорода разбавлением до значений 10^{17} см^{-3} .

Обработка этого графика согласно [19] для значений полуширины $\Gamma_1 = 1$ и 5 ГГц и таких же двух значений полуширины $\Gamma_2 = 1$ и 5 ГГц позволила получить значение сечения резонансного поглощения молекул водорода на длине волны 2,4 мкм равное $\sigma_0(\nu_1) = (5,2 \pm 1,3) \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$, которое оказалась в удовлетворительном согласии с полученным в работе [19, 22] значением $\sigma = 0,8 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$.



Заключение

Таким образом, показано, что учёт конечной ширины линии генерации лазера и аппаратной функции лидара при зондировании молекул водорода в атмосфере лидаром дифференциального поглощения и рассеяния проявляется в незначительном уменьшении оптической плотности при условии $\Gamma_a \gg \Gamma_1$ и Γ_2 . Поэтому решающим становится выбор полуширины интерференционных светофильтров при минимальной ширине линий генерации лазеров.

Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют, что у них нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами на момент подачи статьи в редакцию журнала, и им ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц.

Список литературы

1. Роговая М. Водород: перспективы энергетического перехода // Журнал "[Коммерсантъ Наука](https://zen.yandex.ru/media/kommersant/vodorod-perspektivy-energeticheskogo-perehoda-60d49ea701c59234cb830a0b)" №23 /Коммерсантъ 24 июня 2021 г. <https://zen.yandex.ru/media/kommersant/vodorod-perspektivy-energeticheskogo-perehoda-60d49ea701c59234cb830a0b>
2. Воронина Э.И., Привалов В.Е., Шеманин В.Г. Зондирование молекул водорода на лабораторном лидаре КР. // Письма в Журнал технической физики. 2004. Т.30. вып.5. С.14-17
3. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М. Мир. 1987. 550 С.
4. Зуев В.Е., Кауль Б.В., Самохвалов И.В., Кирков К.И., Цанев В.И. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей. Новосибирск: Наука. 1986. 186 С.
5. Gibson A.J., Sanford M.C.W. Daytime measurement of the atmospheric sodium layer // Nature. 1972. V.239. No.2. P. 509 - 511
6. Byer R.L. Remote air pollution measurement // Optical and Quantum Electronics. 1975. V.7. No. 1. P.147 - 177

7. Аршинов Ю.Ф., Бобровников С.М., Шумский В.К., Попов А.Г., Сериков И.Б. Дистанционное определение состава, скорости истечения и температуры выбросов из труб предприятий КР –лидаром // Оптика атмосферы. 1992. Т. 5. N7. С. 726 - 733
8. Hochenbleicher J.G., Kiefer W., Brandmuller J.A laboratory study for resonance Raman lidar system // Appl. Spectroscopy. 1976. V.30. No. 2.P. 528 - 531
9. Fouche D.G., Chang R.K. Relative Raman cross-section for O₂, CH₄, C₂H₆, NO, NO₂ and H₂// Appl. Phys. Lett. 1972. V.20. No.2. P.256 - 257
10. Inaba H., Kobayasi T. Laser - Raman radar //Opto - electronics. 1972.V.4. No.1. P. 101 – 123
11. Merfi S.H., Lawrence J.D., Jr., McCormik M.P. Observation of Raman scattering by water vapour in the atmosphere // Appl. Phys. Lett. 1969. V. 15. No. 2. P. 295 - 297.
12. Murray E.R., Hake R.D., Jr., Van der Laan J.E., Hawley J.G. Atmospheric water vapour measurement with a 10 micrometer DIAL system // Appl. Phys. Lett. 1976. V. 28. No. 4. P. 542 - 543
13. А.В. Горбунов, Е.Е. Мухин, А.В. Скрылевидр. Измерение концентрации водорода методом лазерной индуцированной флуоресценции. //Conference Paper 2017. <https://www.researchgate.net/publication/315109364>
14. She C.Y. Remote measurement of atmospheric parameters: new applications of physics with lasers // Contemporary Physics. 1990. V. 31. No. 4. P. 247 -260
15. Жильцов В.И., Козинцев В.И., Константинов Б.А., Никифоров В.Г. Лидары для контроля параметров атмосферы //Электронная промышленность. 1983. No. 7. С. 3 - 7
16. Poultney S.K. Laser radar studies of upper atmosphere dust layer // Space Research. 1972. V. 12. No. 3. P. 403 - 421
17. Справочник по лазерам. Под ред. Прохорова А.М. Т. 1. М.: Советское радио. 1978. 504 с.
18. Привалов В.Е., Шеманин В.Г. Оптимизация лидара дифференциального поглощения и рассеяния для зондирования молекулярного водорода в атмосфере //ЖТФ. 999. Т. 69. No. 8.С. 65–68.42.
19. Привалов В.Е., Фотиади А.Э., Шеманин В.Г. Лазеры и экологический мониторинг атмосферы.СПб.: Лань, 2013. 288 с.
20. Бронштейн Д.Л., Александров Н.Н. Современные средства измерения загрязнения атмосферы.Л. : Гидрометеоиздат, 1989. С. 97–98.
21. Измерения в промышленности : справ. В 3 кн. Кн. 2 / Под ред. П.Профоса. М. : Металлургия, 1990. 344 с.
22. В.Г. Шеманин, В.Е. Привалов. [Измерение концентрации молекул водорода в атмосфере: компьютерное моделирование лидарного уравнения для дифференциального поглощения и рассеяния.](https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-11-38-43)//Измерительная техника. 2022. № 11. С. 38-43. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-11-38-43>
23. Зуев В.В., Катаев М. Ю.,Макогон М. М., Мицель А. А. Лидарный метод дифференциального поглощения. Современное состояние исследований. // Оптика атмосферы и океана.1995. Т. 8. № 8.
24. Sigimoto N., Sims N., Chan K., Killinger D.K.// Optics Lett. 1990. V. 15. No.8. P.302 - 304.
25. Привалов В.Е., Шеманин В.Г. Лидарное уравнение с учетом конечной ширины линии генерации лазера // Известия РАН. Серия Физическая. 2015. Т. 79. № 2. С. 170-180.

Laser diagnostics of hydrogen. Part 1

^{1*} Privalov V.E., ² Shemanin V.G.

¹ St. Petersburg Polytechnic University,
 195257, St. Petersburg, 29 Politechnicheskaya str.,

² Branch of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov in Novorossiysk,
 353919, Novorossiysk, 75 Myskhakskoe shausse str.

e-mail: * vaevpriv@yandex.ru, shemanin-v-g@nb-bstu.ru

The paper considers the prospects of using hydrogen as a new type of environmentally friendly fuel. This requires the creation of systems to control its emissions and leaks from storage tanks and pipelines. However, remote monitoring and measurement of concentrations of hydrogen molecules is a big problem. The potential possibilities of lidar sensing methods are considered. Computer simulation of the operating modes of modern differential absorption and scattering lidar allows us to find the best option for remote measurement of the concentration of hydrogen molecules in the atmosphere.

Keywords: energy, hydrogen molecule, lidar, differential absorption and scattering, laser, monitoring, concentration, sensing distance.

References

1. Rogovaya M. Hydrogen: prospects for the energy transition // Journal "Kommersant Science" No. 23 / Kommersant June 24, 2021 <https://zen.yandex.ru/media/kommersant/vodorod-perspektivy-energeticheskogo-perehoda-60d49ea701c59234cb830a0b>
2. Voronina E.I., Privalov V.E., Shemanin V.G. Probing of hydrogen molecules using a laboratory lidar of the Kyrgyz Republic. // Letters to the Journal of Technical Physics. 2004. T.30. Issue 5. P.14-17
3. Mezheris R. Laser remote sensing. M. Mir. 1987. 550 S.
4. Zuev V.E., Kaul B.V., Samokhvalov I.V., Kirkov K.I., Tsanev V.I. Laser sensing of industrial aerosols. Novosibirsk: Science. 1986. 186 pp.
5. Gibson A.J., Sanford M.C.W. Daytime measurement of the atmospheric sodium layer // Nature. 1972. V.239. No.2. P. 509 - 511
6. Byer R.L. Remote air pollution measurement // Optical and Quantum Electronics. 1975. V.7. No. 1. P.147 - 177
7. Arshinov Yu.F., Bobrovnikov S.M., Shumsky V.K., Popov A.G., Serikov I.B. Remote determination of the composition, flow rate and temperature of emissions from pipes of enterprises of the Kyrgyz Republic - lidar // Atmosphere Optics. 1992. T. 5. N7. pp. 726 - 733
8. Hochenbleicher J.G., Kiefer W., Brandmuller J.A laboratory study for resonance Raman lidar system // Appl. Spectroscopy. 1976. V.30. No. 2.P. 528 - 531
9. FoucheD.G., Chang R.K. Relative Raman cross-section for O2, CH4, C2H6, NO, NO2 and H2 // Appl. Phys. Lett. 1972. V.20. No.2. P.256 - 257
10. Inaba H., Kobaysi T. Laser - Raman radar //Opto - electronics. 1972.V.4. No.1. P. 101 – 123
11. Murphy S.H., Lawrence J.D., Jr. ,McCormik M.P. Observation of Raman scattering by water vapor in the atmosphere // Appl. Phys. Lett. 1969. V. 15. No. 2. P. 295 - 297.
12. Murray E.R., Hake R.D., Jr., Van der Laan J.E., Hawley J.G. Atmospheric water vapor measurement with a 10 micrometer DIAL system // Appl. Phys. Lett. 1976. V. 28. No. 4. P. 542

- 543

13. A.V. Gorbunov, E.E. Mukhin, A.V. Skrylevidr. Measurement of hydrogen concentration by laser-induced fluorescence. //Conference Paper 2017. <https://www.researchgate.net/publication/315109364>
14. She C.Y. Remote measurement of atmospheric parameters: new applications of physics with lasers // Contemporary Physics. 1990. V. 31. No. 4. P. 247 -260
15. Zhiltsov V.I., Kozintsev V.I., Konstantinov B.A., Nikiforov V.G. Lidars for monitoring atmospheric parameters //Electronic industry. 1983. No. 7. pp. 3 - 7
16. PoultneyS.K. Laser radar studies of upper atmosphere dust layer // Space Research. 1972. V. 12. No. 3. P. 403 - 421
17. Handbook of lasers. Ed. Prokhorova A.M. T. 1. M.: Soviet radio. 1978. 504 p.
18. Privalov V.E., Shemanin V.G. Optimization of a differential absorption and scattering lidar for sensing molecular hydrogen in the atmosphere // ZhTP. 999. T. 69. No. 8.S. 65–68.42.
19. Privalov V.E., Fotiadi A.E., Shemanin V.G. Lasers and environmental monitoring of the atmosphere. St. Petersburg: Lan, 2013. 288 p.
20. Bronshtein D.L., Aleksandrov N.N. Modern means of measuring air pollution.L. : Gidrometeoizdat, 1989. pp. 97–98.
21. Measurements in industry: reference book. In 3 books. Book 2 / Ed. P.Profos. M.: Metallurgy, 1990. 344 p.
22. V.G. Shemanin, V.E. Privalov. Measuring the concentration of hydrogen molecules in the atmosphere: computer modeling of the lidar equation for differential absorption and scattering. //Measuring technology. 2022. No. 11. P. 38-43. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-11-38-43>
23. Zuev V.V., Kataev M. Yu., Makogon M. M., Mitsel A. A. Lidar method of differential absorption. Current state of research. // Optics of the atmosphere and ocean. 1995. T. 8. No. 8.
24. Sigimoto N., Sims N., Chan K., Killinger D.K.// Optics Lett. 1990. V. 15. No. 8. P.302 - 304.
25. Privalov V.E., Shemanin V.G. Lidar equation taking into account the finite width of the laser generation line // Izvestia RAS. Series Physical. 2015. T. 79. No. 2. P. 170-180.