

## ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

doi: 10.51639/2713-0568\_2023\_3\_3\_12

УДК 535.8:574.56:621.373

ГРНТИ 44.41.29 29.33.51

ВАК 01.04.21

### Что такое лазер?

<sup>1\*</sup> Привалов В. Е., <sup>2</sup> Шеманин В. Г.

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет  
195257, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

<sup>2</sup> Филиал Белгородского государственного технологического университета  
им. В. Г. Шухова в Новороссийске, 353919, Новороссийск, ул. Мысхакское шоссе, 75

e-mail: \* [vaevpriv@yandex.ru](mailto:vaevpriv@yandex.ru)

В работе рассмотрены методы и приборы для лазерных измерений и сделаны оценки их потенциальных возможностей. Развитие энергетики обеспечивает научно-технический прогресс, но и требует новых видов топлива. Расширение перспектив использования водорода как нового вида экологически чистого топлива 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 для лазерного мониторинга водорода в атмосфере. В результате лазер нужен не только в измерениях и информатике. Появилась ещё энергетика. В итоге появляется более длинная строка: лазеры – измерения – информация – энергетика.

*Ключевые слова:* энергетика, молекула водорода, лидар, лазер, мониторинг, концентрация, время измерения, расстояние зондирования.

Излучение каждого генератора обладает энергетическими характеристиками и когерентностью. Различают пространственную и временную когерентности. Пространственная когерентность описывает расходимость излучения, т. е. его направленность. Временная – монохроматичность, т.е. ширину спектральной линии. Самой высокой когерентностью обладает излучение оптического квантового генератора (ОКГ). Часто используется английская аббревиатура – ЛАЗЕР. Две гласных создают впечатление самостоятельного слова и широко используется в нашей литературе. Расходимость излучения лазера может составлять одну угловую минуту и меньше. Ширина спектральной линии в идеале может составлять доли Гц. Учитывая, что время измерения часто составляет заметно больше 1 с., в паспорте маломощных лазеров часто пишут от нескольких Гц до кГц. Излучение газоразрядных лазеров обладает наибольшей когерентностью: низкая плотность активной среды. Наиболее распространённым среди них является He-Ne лазер. Он работает на многих длинах волн видимого и ИК диапазона. Чаще других используются 0,63, 1,15 и 3,39 мкм.

Линейно-угловые измерения наиболее распространены в науке и технике. Их объём превосходит все остальные измерения на планете, вместе взятые. Оптические методы измерения постепенно вытеснили штриховые меры, а с появлением лазеров оказались вне конкуренции (см., например, [1]). Использование гетеродинных методов сделали их недостижимыми.

Наиболее точно измеряется частота. И здесь квантовые генераторы оказались вне конкуренции. Основу государственного первичного эталона (ГПЭ) единицы частоты составляет группа водородных мазеров и цезиевых стандартов частоты. Воспроизводимость единицы частоты сегодня определяется в 14 знаке. Предельные возможности водородных мазеров оцениваются 15 знаком. Поэтому позднее в состав ГПЭ единицы частоты был введён He-Ne лазер, стабилизированный по поглощению в метане (сейчас воспроизводимость – в 14 знаке, а предельная оценивается 17 знаком). В связи с изложенным большинство измерительных комплексов в качестве последнего блока содержат частотомер. Вышеизложенное ставит лазеры в особое положение и постепенно многие прецизионные измерения стали ассоциироваться с лазерами. Кроме того, высокая пространственная когерентность лазерного излучения обеспечила хорошую возможность эффективной связи и, в целом, передачи информации.

Учёные различных специальностей стали изучать и развивать перечисленные направления. Мы старались не отставать и с 1991 года в Санкт-Петербурге, проводили ежегодную конференцию «Лазеры. Измерения. Информация» (ЛИИ). Конференция привлекала учёных различных специальностей, менялись места проведения, названия. Большой интерес к указанной тематике стали проявлять представители наук о жизни. У нас появилась ещё одна конференция «Лазеры для медицины и биологии» (1992 г.). В 2007 году конференция стала проводиться в Новороссийске, опять менялись названия, в настоящее время конференция проводится под названием «Лазерно-информационные технологии» (ЛИТ). В 2015 году мы объединили конференции, оставив последнее название. Этот исторический экскурс необходим, чтобы лучше понять трансформацию некоторых событий вокруг лазера. Образовалась устойчивая связка - Лазеры. Измерения. Информация, определяющая основные научные направления, в которых лазер является важным, может быть, основным инструментом. В нынешнем году проходила 31-я конференция ЛИТ в Новороссийске. Интерес к тематике не ослабевает. Набирает силу ещё одно направление, к которому лазер стал иметь отношение – энергетика.

Дело в том, что технический прогресс на нашей планете стал набирать обороты, которые меняют условия жизни на Земле не в лучшую сторону. Ухудшается экология, меняется климат. Причины ухудшения кроются в типе энергетике. Она (по названию основных видов топлива) сегодня является углеводородной. В атмосфере растёт концентрация вредных веществ, ухудшается здоровье заметного процента населения, что, естественно вызывает озабоченность последнего. В числе вредных веществ оксиды углерода, азота и др. Уменьшается объём чистого кислорода, который привлекается в образующиеся оксиды, и живым организмам становится трудно дышать. Естественно, это недопустимо. Следует менять энергетiku, которая является основной причиной отмеченных здесь затруднений. Энергетика имеет огромный объём и развитие её набрало обороты, которые трудно остановить. Нужны принципиальные изменения и совершенные инструменты, которые помогут это сделать, не разрушая цивилизацию. Оказывается, и здесь лазер может сыграть важную роль. Попробуем это объяснить.

Топливом в углеводородной энергетике много веков служили и служат дрова, уголь, торф, нефтепродукты, включая газ пропан-бутан. Эти виды топлива, по крайней мере, ещё десятилетия, будут служить основой энергетике. К такой энергетике есть претензии. Теплотехника и механика характеризуются, как правило, низким коэффициентом

полезного действия (КПД). Сжигание указанных видов топлива характеризуется вредными выбросами, что резко ухудшает экологическую обстановку. Поэтому взгляды энергетиков сосредоточены на других энергоносителях и другом энергообмене (например, превращении химической энергии прямо в электрическую). Появляются международные проекты, предполагающие к 2050 году исключить ископаемые энергоносители из энергетики [2]. Разумеется, к реальным физическим причинам примешиваются интересы конкретных стран, плохая обеспеченность энергоресурсами и, наконец, чисто политические мотивы.

Наиболее распространённым элементом таблицы Д. И. Менделеева является, по-видимому, водород (например, [3]). Водородом в газовой фазе заполнен космос. В виде плазмы он составляет значительную массу звезд, включая Солнце. Космические лучи, в том числе, корпускулярное излучение Солнца, в большой мере состоит из ядер водорода (протонов). Водород составляет примерно 1 % массы земной коры. В составе самого распространенного на Земле вещества – воды масса водорода составляет более 11 %. Водород самое легкое и энергоёмкое топливо. Поэтому одним из первых кандидатов на замену углеводородам был выдвинут водород. Ему в связи с приближением новой эпохи в энергетике посвящено много работ, некоторые из них: [4–8]. Перечисленные работы посвящены диагностике водорода.

Именно большие перспективы использования водорода как чистого топлива требуют 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) [9] или  $1,345 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Поэтому дистанционный контроль и измерение концентраций на таких уровнях представляет большую проблему [6].

Ранее было показано, что для дистанционного зондирования молекул водорода в атмосфере возможно использование лидарных методов, основанных на КРС и ДПР [6, 10]. Так как сечение поглощения обычно значительно превышает как эффективное (с учетом тушения) сечение флуоресценции, так и сечение КРС, то на основе ослабления лазерного излучения с соответствующим образом подобранной частотой можно создать чувствительный метод определения средней концентрации выбранных молекул. 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 [6, 9]. 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 [11]. 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 дает требуемую величину дифференциального поглощения. Благодаря этому, метод ДПР обладает наилучшей чувствительностью при зондировании некоторых молекулярных составляющих атмосферы на больших расстояниях. А повышение чувствительности инфракрасных детекторов придадут методу ДПР более универсальный характер [9]. Именно поэтому в

последнее время получили широкое распространение лидары ДПР, которые используются во всех видах лазерной дистанционной техники, основанной на резонансном поглощении. По результатам выполненных ранее исследований [10, 12, 13], можно заключить, что для обнаружения концентраций  $N(z)$  загрязняющих веществ порядка  $10^{13} \text{ см}^{-3}$  и ниже в атмосфере будет наиболее предпочтительным использование систем дифференциального поглощения. Оптическая плотность слоя молекул водорода в атмосфере определяется соотношением лидарных сигналов на двух выбранных длинах волн. При известном сечении резонансного поглощения  $\sigma_0$  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 [14]. В нашем варианте [12] 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  $\text{H}_2$  [12]. 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 [15] и которое излучает второй параметрический генератор в ИК диапазоне на частоте  $\nu_2 = 142,9 \text{ ТГц}$ .

Рассмотрим оптическую схему такого варианта лидара ДПР [12], приведенную на рис. 1.

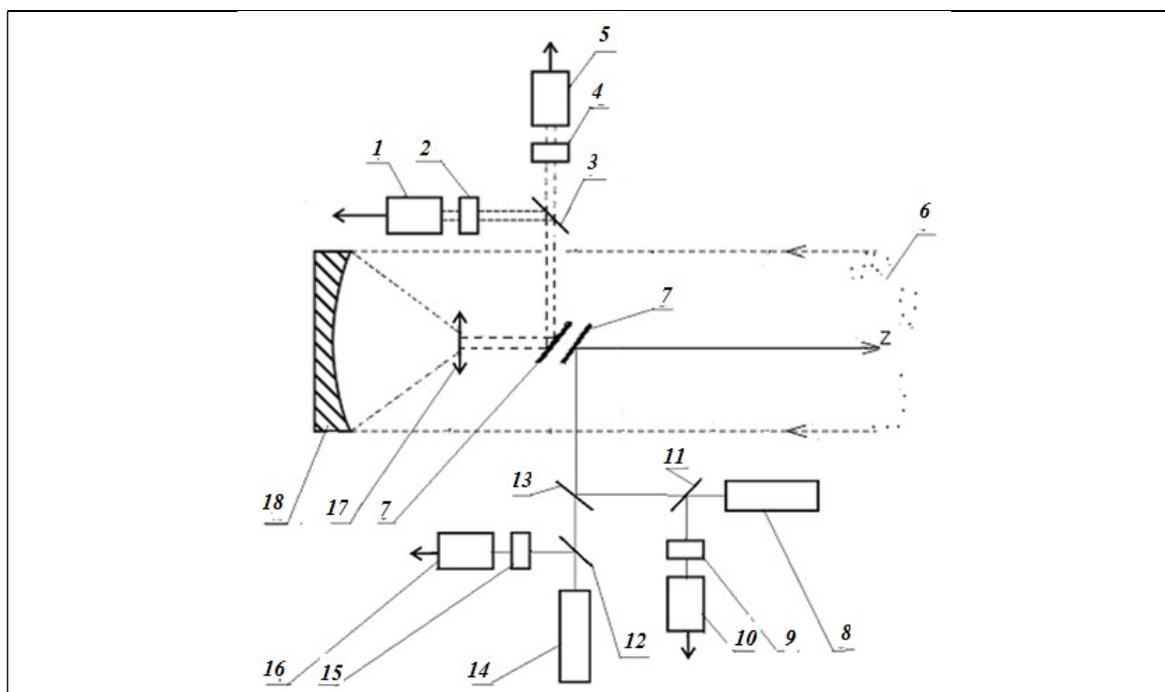


Рис. 1. Оптическая схема варианта лидара дифференциального поглощения и рассеяния: 1, 5, 10, 16 – фотоприемники, 2, 4, 9, 15 – интерференционные светофильтры, 3 – дихроичное зеркало 2,4/2,1, 6 – мишень, 7 – глухие зеркала, 11, 12 – плоскопараллельные кварцевые пластины; 13 – полупрозрачное зеркало; 8, 14 – лазеры; 17 – линзовый объектив и 18 – сферическое зеркало приёмного телескопа

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 ( $\nu_1$ ) равна 15 мДж, а второго – 20 мДж на длине волны 2,1 мкм ( $\nu_2$ ). Площадь приёмной апертуры телескопа 18  $S_0 = 0,125 \text{ м}^2$ .

Интенсивность лазерного излучения на длине волны 2,4 мкм, прошедшего сквозь слой атмосферы с молекулами водорода заданной концентрации туда и обратно, уменьшалась за счёт поглощения в молекулярном водороде [14, 16] 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. Оптические оси лазеров и приемного телескопа направлены вдоль одной оси  $z$  [17]. 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  $\rho(\pi, \nu)$  [9].

Следуя логике работ [18, 19], возьмем лидарные уравнения для упругого рассеяния на двух выбранных длинах волн и как в [20] разделим одно на другое. Информация о концентрации молекул водорода содержится в множителе  $T(\nu, z)$  в уравнении из [18], а коэффициент ослабления в атмосфере  $k(\nu, z)$  определяется соотношением вида [6, 19]. Будем считать, что атмосфера однородна, и контур полосы поглощения молекул водорода аппроксимируем функцией Лоренца [9]. В итоге, как и ранее в [20], переходя к оптической плотности получим уравнение для ДПР в виде:

$$D = \ln \frac{P(\nu_2, z)}{P(\nu_1, z)} = \ln \left[ \frac{E_2 G_2(z) \rho(\pi, \nu_2) \operatorname{erf} \left( \frac{\sqrt{\Gamma_1^2 + \Gamma_a^2}}{\sqrt{2\Gamma_a}} \right)}{E_1 G_1(z) \rho(\pi, \nu_1) \operatorname{erf} \left( \frac{\sqrt{\Gamma_2^2 + \Gamma_a^2}}{\sqrt{2\Gamma_a}} \right)} \sqrt{\frac{\Gamma_1^2 + \Gamma_a^2}{\Gamma_2^2 + \Gamma_a^2}} - \right. \\ \left. - 2k_0(\nu_2)z + 2k_0(\nu_1)z + \sigma_0(\nu_1) \int_0^z N(z') dz' \right] \quad (1)$$

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.

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 –  $10^{-7}$  [21]. Энергия  $E = \tau P$  в импульсе длительностью 10 нс лазерного излучения на длине волны 2,4 мкм ( $\nu_1$ ) равна 15 мДж, а на длине волны 2,1 мкм ( $\nu_2$ ) – 20 мДж. Полуширины линий генерации двух лазеров  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$  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 [6] и равна 100 ГГц. Значения коэффициентов

ослабления в атмосфере были взяты из [15] и равны соответственно  $k(\nu_1) = 0,08 \text{ км}^{-1}$ ,  $k(\nu_2) = 0,09 \text{ км}^{-1}$ . Для полосы поглощения водорода максимальное значение сечения поглощения на длине волны 2,4 мкм по данным [10]  $\sigma_0(\nu_1) = 0,8 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$ , а полуширина этой полосы -  $\Gamma_3 = 45,5 \text{ ГГц}$  [16, 22]

Выполним компьютерное моделирование лидарного уравнения (1) для значений полуширин  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2 = 2 \text{ ГГц}$ , расстояний зондирования в диапазоне 10...1500 м, диапазона концентраций от  $10^{12} \text{ см}^{-3}$  до  $10^{15} \text{ см}^{-3}$  и приведенных выше остальных параметров задачи. Результаты моделирования уравнения (1) представлены на рис. 2 для приведенных выше параметров, диапазона концентраций  $10^{12} \dots 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и расстояния зондирования до 1,5 км. Ограничение по величинам концентраций и расстояний связано с тем, что метод спектроскопии дифференциального поглощения [9, 14], имеет ограничения снизу и сверху на диапазон возможных значений произведений величин концентраций на толщины слоев, которые определяются оптической схемой и фотоприемником лидара.

Результаты для той же ситуации и значений полуширины  $\Gamma_1 = 5 \text{ ГГц}$  и  $\Gamma_2 = 10 \text{ ГГц}$  при значении полуширины аппаратной функции  $\Gamma_a = 100 \text{ ГГц}$  дают уменьшение всего в 0,996 от полученных ранее на рисунке 2.

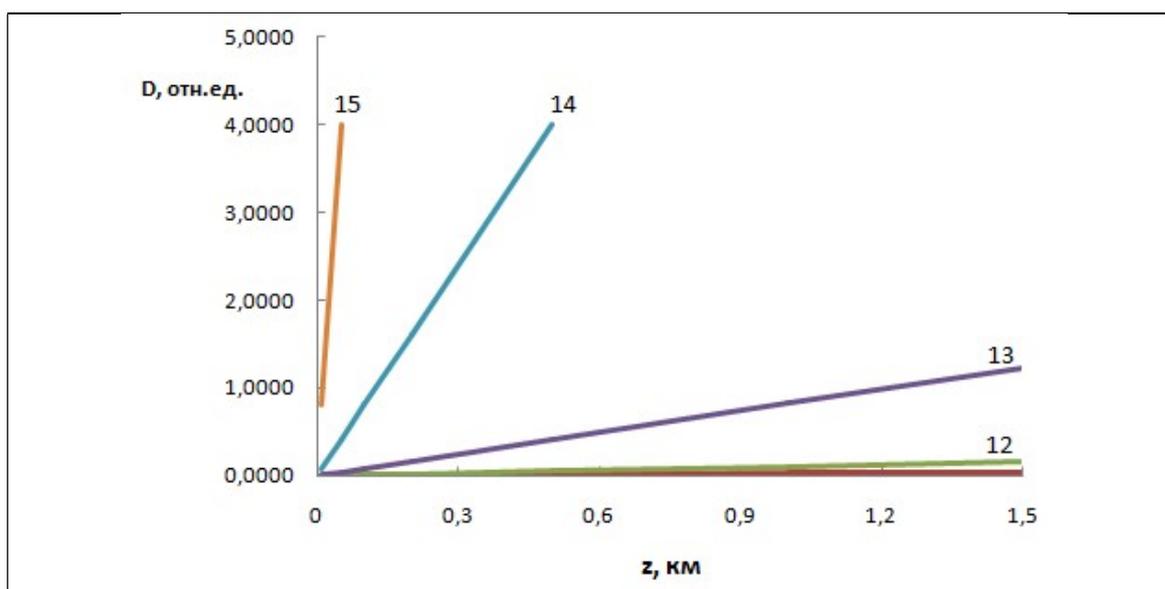


Рис. 2. Результаты численного решения уравнения (1) для диапазона концентраций  $10^{12} \dots 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и значений полуширины  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2 = 1 \text{ ГГц}$

Это незначительное уменьшение оптической плотности связано с тем, что  $\Gamma_a$  значительно больше, чем  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$ , т. е. их влияние на результат моделирования очень мало.

Анализ графиков на рис. 2 позволяет заключить, что таким лидаром можно зондировать молекулы  $\text{H}_2$  с концентрациями порядка  $10^{15} \text{ см}^{-3}$  на расстоянии зондирования до 50 м, с концентрациями порядка  $10^{14} \text{ см}^{-3}$  на расстоянии зондирования до 500 м, с концентрациями порядка  $10^{13} \text{ см}^{-3}$  на расстоянии зондирования до 1500 м, а с концентрациями порядка  $10^{12} \text{ см}^{-3}$  на расстоянии зондирования начиная с 500 м. Дополнительно, результаты моделирования показывают, что учёт конечной ширины линии генерации лазера и аппаратной функции лидара при зондировании молекул водорода в атмосфере лидаром ДПР проявляется в незначительном уменьшении оптической плотности при условии  $\Gamma_a \gg \Gamma_1$  и  $\Gamma_2$ . Поэтому решающим становится выбор

полуширины интерференционных светофильтров при оптимальной ширине линий генерации лазеров.

Однако, самым важным вопросом является его производство. Самый чистый водород получается электролизом воды. Но энергетически это производство нерентабельно. Появились другие предложения [23, 24]. Они получили развитие [25, 26]. В двух последних патентах существенную роль играет лазер. В результате лазер нужен не только в измерениях и информатике. Появилась ещё энергетика. В итоге появляется более длинная строка: лазеры – измерения – информация – энергетика. Лазеры являются важным, возможно, задающими элементами в трёх отраслях. Развитие данной линейки поможет развитию метрологии, информатики и энергетики. В свою очередь, по мере развития указанных 3-х направлений выявятся новые возможности лазеров [27–29].

Усовершенствуется лазерная физика и химия, а на их плечах и лазерная техника. Надеемся, что она ускорит переход на новую энергетику, а, может быть, на несколько видов экологических энергетик. Будем работать!

### **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. Привалов В. Е. Квантовая электроника и новое определение метра. Л.:Изд. «Знание», 1987, 31 с.
2. Щукин П. В России нашли альтернативу газу и углю. [Электронный ресурс] [Rhttps://lenta.ru/news/2021/04/15/vodor/?utm\\_referrer=https%3A%2F%2Fzen.yandex.com&utm\\_campaign=dbr](https://lenta.ru/news/2021/04/15/vodor/?utm_referrer=https%3A%2F%2Fzen.yandex.com&utm_campaign=dbr) (02.05.2021).
3. Роговая М. Водород: перспективы энергетического перехода. Журнал "Коммерсантъ Наука" №23. [Электронный ресурс] URL: <https://zen.yandex.ru/media/kommersant/vodorod-perspektivyenergeticheskogo-perehoda-60d49ea701c59234cb830a0b> (02.05.2021).
4. Воронина Э. И., Привалов В. Е., Шеманин В. Г.. Зондирование молекул водорода на лабораторном лидаре КР. //Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. № 5. С. 14–17.
5. Privalov V. E., Shemanin V. G. Accuracy of lidar measurements of the concentration of hydrofluoride molecules in the atmospheric boundary layer. //Measurement Techniques. 2020. V. 63. No. 7. P. 543–548. URL: <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01821-0>
6. Привалов В. Е., Фотиади А. Э., Шеманин В. Г. Лазеры и экологический мониторинг атмосферы.СПб.: Лань, 2013. 288 с.
7. Долгих Г. И., Привалов В. Е., Лазерная физика. Фундаментальные и прикладные исследования. Рея. Владивосток. 2016, 351 с.
8. Привалов В. Е., Фотиади А. Э., Шеманин В. Г. Лидарное зондирование молекулярного водорода. Политех-Пресс. Санкт-Петербург. 2023, 95 с.
9. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М. Мир. 1987. 550 С. 34.
10. Лазерный контроль атмосферы. Под. ред. Э. Д. Хинкли. М: Мир, 1979, 416 с.
11. 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

12. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Оптимизация лидара дифференциального поглощения и рассеяния для зондирования молекулярного водорода в атмосфере. // Журнал технической физики. 1999. Т. 69. Вып. 8. С. 65–68.
13. Шеманин В. Г., Привалов В. Е. Измерение концентрации молекул водорода в атмосфере. Компьютерное моделирование лидарного уравнения для дифференциального поглощения и рассеяния. //Измерительная техника. 2022. № 11. С. 38–43. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-11-38-43>
14. 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.
15. Справочник по лазерам. Под ред. Прохорова А. М. Т. 1. М.: Советское радио. 1978. 504 с.
16. Зуев В. Е., Кауль Б. В., Самохвалов И. В., Кирков К. И., Цанев В. И. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей. Новосибирск: Наука. 1986. 186 С.
17. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Уравнение лазерного зондирования для реального аэрозольного лидара. // Фотоника. 2013. №2(38), С. 72-78
18. Privalov V. E., Shemanin V. G. The Lidar Equation Solution Depending on the Laser Radiation Line Width Studies // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2013. V. 22, No. 4. P. 244–249. DOI: 10.3103/S1060992X13040073
19. 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.
20. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Мониторинг молекул сероводорода в атмосферном пограничном слое лидаром дифференциального поглощения и рассеяния из космоса. // Оптический журнал. 2018. Т. 85. Вып. 4. С. 49–52
21. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Параметры лидаров для дистанционного зондирования газовых молекул и аэрозоля в атмосфере. С-Пб.: Балт. ГТУ “ВОЕНМЕХ”. 2001. 56 с.
22. Privalov V. E., Shemanin V. G.. Raman lidar system for the hydrogen molecules remote sensing in atmosphere. // Optics and Spectroscopy. 2022. V. 132. No. 3. P. 363–367. DOI: 10.21883/OS.2022.03.52168.2707-21
23. Stanley A. Meyer. US Patent № 4826581.
24. Stanley A. Meyer. The Birthday of new technology, Water fuel cell, Technical brief, Hydrogen fracturing process, Crove City, Ohio. 1995.
25. В. Е. Привалов Устройство для разложения воды. Патент России №165752, БИ №31, 2016
26. В. Е. Привалов Устройство для разложения воды. Патент России №180441, БИ № 17, 2018
27. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Лазеры и энергетика. // Лазеры. Измерения. Информация. – 2023. – Т. 3. – № 1. – С. 4–32 <https://lasers-measurement-information.ru/ojs/index.php/laser/issue/view/9>
28. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Пути в экологичную энергетiku. // Лазеры. Измерения. Информация. – 2022. – Т. 2. – № 4. – С. 9–14. <https://lasers-measurement-information.ru/ojs/index.php/laser/article/view/47>
29. Привалов В. Е., Туркин В. А., Шеманин В. Г. Лазеры и зелёная энергетика. // Лазеры. Измерения. Информация. – 2022. – Т. 2. – № 1. – С. 5–11 <https://lasers-measurement-information.ru/ojs/index.php/laser/article/view/28>

## What is a laser?

Privalov V. E., Shemanin V. G.

*St. Petersburg Polytechnic University, 195257, St. Petersburg, st. Politekhnikeskaya, 29  
 Branch of the Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov in  
 Novorossiysk, 353919, Novorossiysk, st. Myshakskoye Highway, 75*

The paper examines methods and instruments for laser measurements and assesses their potential capabilities. Energy development ensures scientific and technological progress, but also requires new types of fuel. Expanding the prospects for the use of hydrogen as a new type of environmentally friendly fuel requires the creation of systems to control its emissions and leaks from storage tanks and pipelines. However, remote monitoring and measurement of the concentrations of hydrogen molecules poses a big challenge. The potential capabilities of lidar sensing methods are considered. Computer modeling of the operating modes of modern differential absorption and scattering lidars for laser monitoring of hydrogen in the atmosphere has been carried out. As a result, the laser is needed not only in measurements and computer science. More energy has appeared. As a result, a longer line appears: lasers – measurements – information – energy.

*Key words:* energy, hydrogen molecule, lidar, laser, monitoring, concentration, measurement time, sensing distance.

## References

1. Privalov V. E. Quantum electronics and a new definition of the meter. L.: Ed. "Knowledge", 1987, 31 p.
2. Shchukin P. In Russia they have found an alternative to gas and coal. [Electronic resource] R[https://lenta.ru/news/2021/04/15/vodor/?utm\\_referrer=https%3A%2F%2Fzen.yandex.com&utm\\_campaign=dbr](https://lenta.ru/news/2021/04/15/vodor/?utm_referrer=https%3A%2F%2Fzen.yandex.com&utm_campaign=dbr) (02.05.2021).
3. Rogovaya M. Hydrogen: prospects for the energy transition. Magazine "Kommersant Science" No. 23. [Electronic resource] URL: <https://zen.yandex.ru/media/kommersant/vodorod-perspektivyenergeticheskogo-perehoda-60d49ea701c59234cb830a0b> (02.05.2021).
4. Voronina E. I., Privalov V. E., Shemanin V. G.. Probing of hydrogen molecules using a laboratory lidar KR. //Letters to ZhTF. 2004. T. 30. No. 5. P. 14–17.
5. Privalov V. E., Shemanin V. G. Accuracy of lidar measurements of the concentration of hydrofluoride molecules in the atmospheric boundary layer. //Measurement Techniques. 2020. V. 63. No. 7. P. 543–548. URL: <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01821-0>
6. Privalov V. E., Fotiadi A. E., Shemanin V. G. Lasers and environmental monitoring of the atmosphere. St. Petersburg: Lan, 2013. 288 p.
7. Dolgikh G.I., Privalov V.E., Laser physics. Basic and applied research. Rhea. Vladivostok. 2016, 351 p.
8. Privalov V. E., Fotiadi A. E., Shemanin V. G. Lidar sensing of molecular hydrogen. Polytech-Press. Saint Petersburg. 2023, 95 p.
9. Mezheris R. Laser remote sensing. M. Mir. 1987. 550 P. 34.
10. Laser control of the atmosphere. Under. ed. E. D. Hinckley. M: Mir, 1979, 416 p.
11. 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

12. Privalov V. E., Shemanin V. G. Optimization of a differential absorption and scattering lidar for sensing molecular hydrogen in the atmosphere. // *Journal of Technical Physics*. 1999. T. 69. Issue. 8. pp. 65–68.
13. Shemanin V. G., Privalov V. E. Measuring the concentration of hydrogen molecules in the atmosphere. Computer simulation 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>
14. 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.
15. *Handbook of lasers*. Ed. Prokhorova A. M. T. 1. M.: Soviet radio. 1978. 504 p.
16. 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.
17. Privalov V. E., Shemanin V. G. Laser sensing equation for a real aerosol lidar. // *Photonics*. 2013. No. 2(38), pp. 72-78
18. Privalov V. E., Shemanin V. G. The Lidar Equation Solution Depending on the Laser Radiation Line Width Studies // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. 2013. V. 22, No. 4. P. 244–249. DOI: 10.3103/S1060992X13040073
19. 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. pp. 170–180.
20. Privalov V. E., Shemanin V. G. Monitoring of hydrogen sulfide molecules in the atmospheric boundary layer with a differential absorption and scattering lidar from space. // *Optical journal*. 2018. T. 85. Issue. 4. pp. 49–52
21. Privalov V. E., Shemanin V. G. Lidar parameters for remote sensing of gas molecules and aerosol in the atmosphere. St. Petersburg: Balt. GTU “VOENMEKH”. 2001. 56 p.
22. Privalov V. E., Shemanin V. G.. Raman lidar system for the hydrogen molecules remote sensing in the atmosphere. // *Optics and Spectroscopy*. 2022. V. 132. No. 3. P. 363–367. DOI: 10.21883/OS.2022.03.52168.2707-21
23. Stanley A. Meyer. US Patent No. 4826581.
24. Stanley A. Meyer. The Birthday of new technology, Water fuel cell, Technical brief, Hydrogen fracturing process, Crove City, Ohio. 1995.
25. V. E. Privalov Device for water decomposition. Russian Patent No. 165752, BI No. 31, 2016
26. V. E. Privalov Device for water decomposition. Russian Patent No. 180441, BI No. 17, 2018
27. Privalov V. E., Shemanin V. G. Lasers and energy. // *Lasers. Measurements. Information*. – 2023. – T. 3. – No. 1. – P. 4–32 <https://lasers-measurement-information.ru/ojs/index.php/laser/issue/view/9>
28. Privalov V. E., Shemanin V. G. Paths to environmentally friendly energy. // *Lasers. Measurements. Information*. – 2022. – T. 2. – No. 4. – P. 9–14. <https://lasers-measurement-information.ru/ojs/index.php/laser/article/view/47>
29. Privalov V. E., Turkin V. A., Shemanin V. G. Lasers and green energy. // *Lasers. Measurements. Information*. – 2022. – T. 2. – No. 1. – P. 5–11 <https://lasers-measurement-information.ru/ojs/index.php/laser/article/view/28>