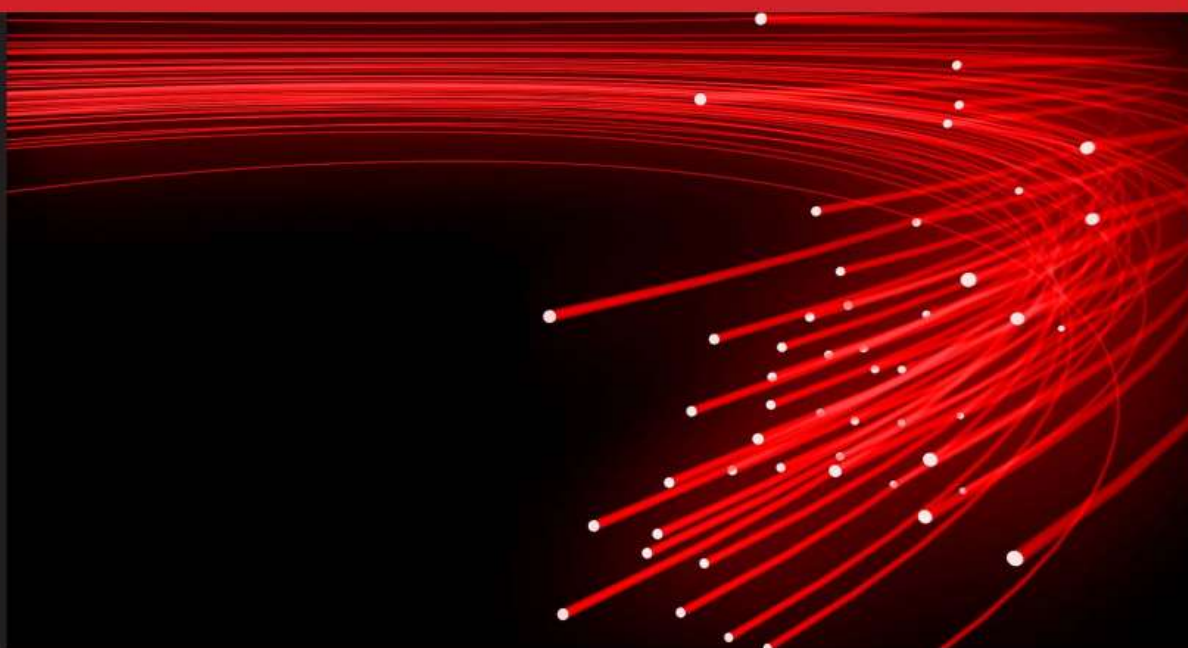


Лазеры. Измерения. Информация



Том 2, № 4 / 2022

Новороссийск
2022

Лазеры. Измерения. Информация. 2022. Том № 02. № 04 (08)

<https://lasers-measurement-information.ru>

Лазеры. Измерения. Информация

Научный сетевой журнал

Издаётся с марта 2021 года

Выходит 4 раза в год

ISSN 2713-0568

Том 2, № 4 (8)

декабрь 2022 г. - февраль 2023 г.

Главный редактор: В. Е. Привалов

Ответственный редактор: В. Г. Шеманин

Редакционная коллегия: А. Н. Власов, В. Н. Дёмкин, Г. С. Евтушенко, И. Г. Иванов, М. М. Кутейко, Г. П. Михайлов, Л. А. Русинов, А. Л. Соколов, А. Н. Солдатов, В. А. Степанов, А. А. Тихомиров, С. А. Филист, А. Э. Фотиади, Е. Г. Чуляева

Учредитель: ФГБОУ ВО БГТУ им. В. Г. Шухова

Издатель: Филиал БГТУ им. В. Г. Шухова в г. Новороссийске

Адрес редакции:

353919, Россия, Новороссийск, Мысхакское шоссе 75

Тел. +78617221333

<https://lasers-measurement-information.ru>

e-mail: editor-laser@nb-bstu.ru

Свидетельство о регистрации: серия Эл № ФС77-81070 от 02 июня 2021 г.

Опубликовано 27.12.2022

© Филиал БГТУ им. В. Г. Шухова в г. Новороссийске, 2022

Содержание:

ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА*Вальшин А. М.*

Измерение сопротивления канала разряда лампы-вспышки для твёрдотельного лазера при высокочастотной накачке в резонансном колебательном контуре ... стр. 4

Привалов В. Е., Шеманин В. Г.

Пути в экологичную энергетику стр. 9

ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ*Дьяченко В. В., Шеманин В. Г.*

Лидарный мониторинг парниковых газов в атмосфере стр. 15

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ*Веденин Е. И., Сарычев И. А., Чартий П. В.*

Алгоритм работы аэрозольной лазерной системы дифференциального ослабления в реальном времени стр. 30

ЛАЗЕРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ*Шеманин В. Г., Мкртычев О. В.*

Определение параметров оптических покрытий эллипсометрическими методами стр. 38

ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

doi: 10.51639/2713-0568_2022_2_4_4

УДК 535.621(075.7)

ГРНТИ 29.31.26

Измерение сопротивления канала разряда лампы-вспышки для твёрдотельного лазера при высокочастотной накачке в резонансном колебательном контуре

Вальшин А. М.

*Уфимский университет науки и технологий
 450076, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Заки Валиди, дом 32*

e-mail: amvals@mail.ru

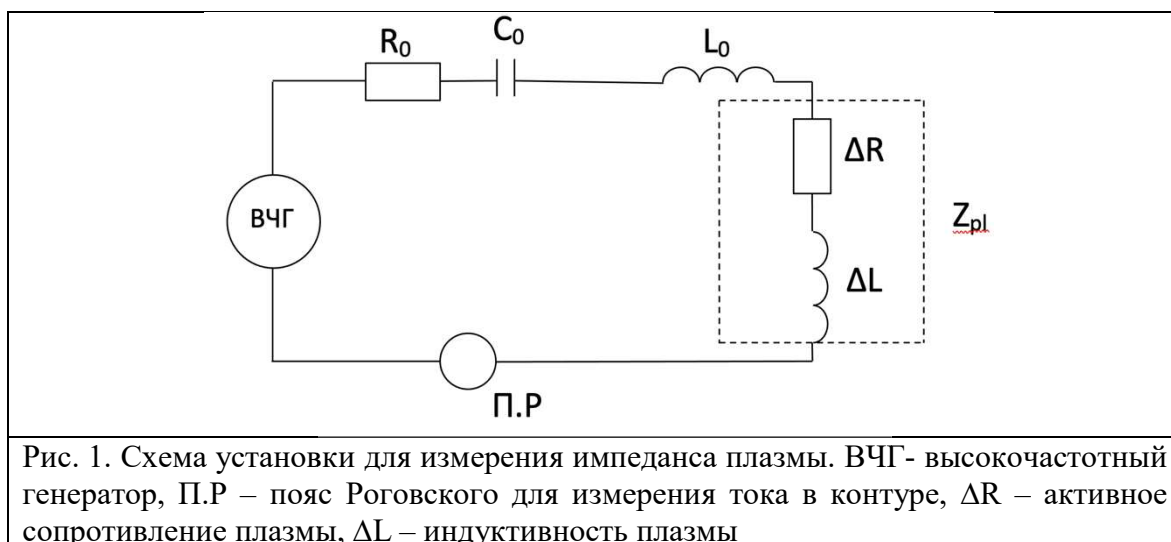
Проведены экспериментальные измерения импеданса плазмы лампы-вспышки твёрдотельного лазера при высокочастотной накачке. Оценено значение импеданса плазмы (60 Ом) после пробоя и уменьшение этого значения по мере увеличения тока разряда.

Ключевые слова: импеданс плазмы, высокочастотная накачка, газоразрядная лампа, твёрдотельный лазер.

Для диагностики и измерения характеристик плазмы необходимо знать зависимость импеданса плазмы от таких параметров, как значения полного разрядного тока, напряжения на разрядном промежутке (т. е. вольт-амперная характеристика разряда) размера светящихся областей плазмы. Во многих работах ограничиваются значениями средней проводимости и средней электрической мощности в разряде. В работах [1–5] рассмотрены различные варианты импеданса плазмы. Значения импеданса плазмы, как правило, обозначены в виде чистого активного сопротивления, или как активного сопротивления и индуктивности, величина которой сравнима с индуктивностью проволоки, заменяющей по геометрическим размерам плазменный шнур. Целью данной работы является экспериментальные измерения импеданса плазмы лампы-вспышки твёрдотельного лазера в зависимости от тока непосредственно после пробоя лампы высокочастотными импульсами.

Методика измерения импеданса плазмы.

Методика измерения импеданса плазмы заключается в следующем. Необходимо собрать последовательный колебательный контур индуктивностью L_0 , ёмкостью C_0 , активным сопротивлением контура R_0 , высокочастотным генератором ВЧГ, а также последовательно включенным импедансом плазмы $Z_{pl} = \Delta R + \Delta L$. При настройке частоты ВЧГ генератора на собственную частоту колебательного контура происходит резонанс напряжения. Далее, измеряя резонансную характеристику контура при зажженной плазме и в отсутствии плазмы (замена плазмы накоротко проводом) определяются и уточняются как параметры контура, так и параметры плазмы. На рис. 1 приведена схема установки.



Полная формула Томсона определяет зависимость собственной частоты колебательного контура от индуктивности, ёмкости и коэффициента затухания

$$\frac{1}{f_1} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{L_0 C_0} - \frac{r^2}{4L_0^2}}},$$

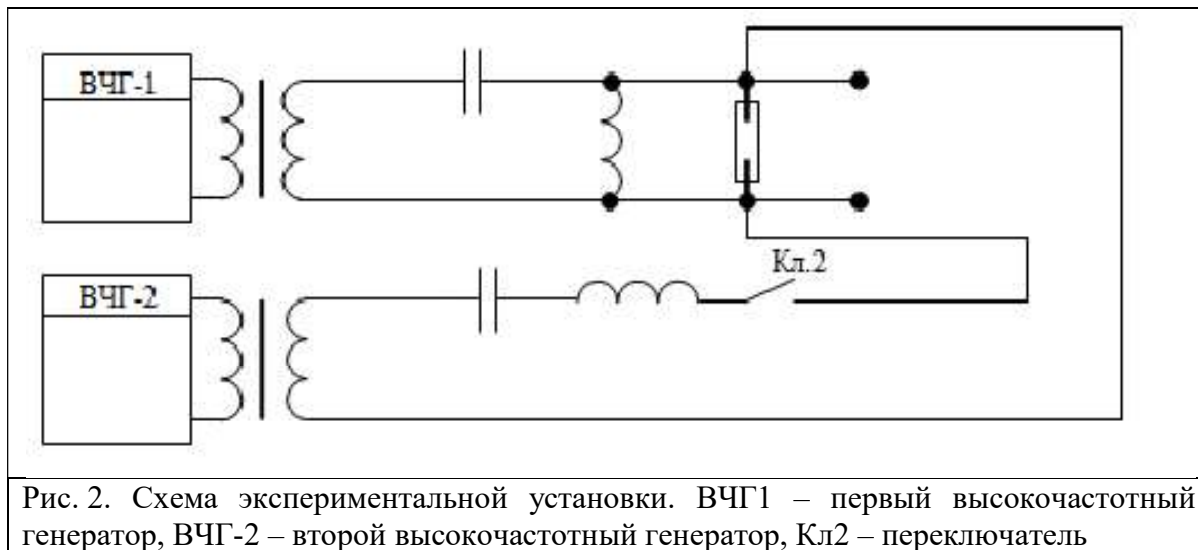
где r – активное сопротивление контура, а величина $\frac{r^2}{4L_0^2}$ определяет коэффициент затухания контура ($r = R_0 + \Delta R$).

В первых своих работах [6] мы ошибочно оценивали индуктивность плазмы, полагая, что изменения резонансной частоты связаны с изменением индуктивности плазмы. А на самом деле необходимо было учитывать коэффициент затухания. Действительно, если индуктивность плазмы оценивается как индуктивность провода, с размерами, совпадающими с размерами плазмы внутри импульсной лампы [5], оценка величины индуктивности плазмы составляет величину порядка 50 нГн, что существенно меньше индуктивности колебательного контура (на два порядка). Согласно расчетам по этой формуле, даже если происходит уширение канала разряда в лампе на два порядка, это приведет к изменению индуктивности в 1,7 раза, т.е. изменение индуктивности ΔL не повлияет на резонансную частоту, что подтверждает о необходимости учитывать коэффициент затухания, а не индуктивность плазмы. Поэтому главным фактором, влияющим на изменение резонансной частоты контура, является изменение коэффициента затухания, который зависит непосредственно от сопротивления плазмы.

Экспериментальные результаты

Экспериментальная установка приведена на рис. 2 и включает в себя два блока: блок дежурной дуги (ВЧГ-1) и блок ВЧ накачки (ВЧГ-2). Для этих целей мы использовали модернизированный и улучшенный, чем в работах [7–9] ВЧГ-2 генератор собственной разработки с выходным активным сопротивлением около 1 Ома, частоту которого могли перестраивать от 1 до 3,2 МГц. При этом стабильность частоты во всём диапазоне перестройки была не хуже 0,1 кГц. Достигнутая нами стабильная работа ВЧ генератора с низкоомным выходом позволила отказаться от специального согласующего устройства в трубке лампы для создания плазмы. Исследуемая лампа подключалась параллельно

ёмкости. В случае резонанса в последовательном колебательном контуре путём настройки частоты ВЧ генератора на собственную частоту колебательного контура, при высокой добротности контура ВЧ напряжение в конденсаторе увеличивается до значений пробоя и зажигания лампы. Как только зажигается разряд в лампе, добротность контура резко падает и напряжение в контуре соответственно тоже падает, также падает ток в контуре. В блоке высокочастотной дежурной дуги вырабатываются ВЧ колебания амплитудой более 6кВ, достаточные для пробоя лампы и зажигания дежурной дуги.



После зажигания дуги мы включаем ВЧГ-2 к лампе, при этом выход ВЧГ-2 подключается к лампе через последовательный колебательный контур, т. е. колебательный контур состоит из последовательно соединённых известной ёмкости, индуктивности и импеданса плазмы лампы. Настроив частоту колебательного контура на резонанс при зажжённой лампе и без лампы (заменяя лампу на коротко замкнутый провод) определяем резонансные частоты:

$$\frac{1}{f_0} = 2\pi\sqrt{L_0 C_0},$$

$$\frac{1}{f_1} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{L_0 C_0} - \frac{r^2}{4L_0^2}}}.$$

После несложных преобразований находим величину активного сопротивления контура, состоящего из сопротивления плазмы и контура.

$$\frac{T_1^2}{T_0^2} = \frac{4\pi^2}{\frac{1}{L_0 C_0} - \frac{r^2}{4L_0^2}} \cdot \frac{1}{4\pi^2 L_0 C_0} = \frac{4L_0^2 L_0 C_0}{4L_0^2 - r^2 L_0 C_0} \cdot \frac{1}{L_0 C_0} = \frac{4L_0^2}{4L_0^2 - r^2 L_0 C_0} = \left(\frac{T_1}{T_0}\right)^2 = \frac{f_0^2}{f_1^2}$$

$$4L_0^2 - r^2 L_0 C_0 = 4L_0^2 \frac{f_1^2}{f_0^2} r^2 = 4 \frac{L_0}{C_0} \left(1 - \frac{f_1^2}{f_0^2}\right) r = 2 \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \sqrt{1 - \frac{f_1^2}{f_0^2}}.$$

Резонансная частота контура с зажженной лампой оказалось равной 797 кГц. Далее, при включении вместо лампы коротко замкнутого провода резонансная частота была равна 890 кГц. Подставляя эти значения, а также значения индуктивности и ёмкости контура мы вычисляем активное сопротивление плазмы. Оно оказалось равным 60 Ом при амплитудном значении тока 3 А.

Таким образом, наш эксперимент показывает, что при значениях тока единиц ампер активное сопротивление плазмы достаточно большое (60 Ом), и оно влияет на резонансную частоту колебательного контура. При этом индуктивное сопротивление плазмы несущественно по отношению к активному сопротивлению плазмы (практически на два порядка меньше).

Конфликт интересов

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

Список литературы

1. А. Г. Орешко. Доменная модель аномального сопротивления плазмы. Вопросы атомной науки и техники, серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения, 2000, № 1, стр. 13–16.
2. С. С. Ануфрик, А. П. Володенков, К. Ф. Зноско. Зависимость сопротивления плазмы от времени в электроразрядных эксимерных лазерах.
<http://elib.bsu.by/handle/123456789/31723>
3. Импульсные источники света / под общей редакцией И. С. Маршака, 2 изд. М.: Энергия, 1978. 478 с.
4. Н. Кролл, А. Трайвелпис. Основы физики плазмы. М.: Издательство «Мир» 1975, 525 стр.
5. А. А. Рухадзе, А. Ф. Александров. Физика сильноточных электроразрядных источников света / Изд.2.М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2012. 184 стр.
6. А. М. Вальшин. Измерение реактивной составляющей импеданса плазмы лампы-вспышки для твердотельного лазера ЛИИ 2021, Т. 1, № 4, с. 18–21.
7. Вальшин А. М., Першин С. М., Михеев Г. М. Ограничение кратного снижения порога пробоя коммерческой лампы-вспышки лазера при кГц-накачке // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2019. № 6. С. 8–16.
8. Valshin A. M., Pershin S. M., Mikheev G. M. Increase in the efficiency of energy injection into discharge plasma and the luminous efficiency of luminescent lamps during high-frequency pumping // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2017. V. 44. No 8. P. 228–231.
9. А. М. Вальшин, С. В. Гарнов, С. А. Бельков, С. М. Першин. Высоочастотное (МГц) зажигание коммерческих ламп-вспышек для твердотельных лазеров // Доклады Российской Академии Наук. Физика, технические науки, 2022, том 502, с. 19–24.

Measurement of the resistance of the discharge channel of a flash lamp for a solid-state laser with high-frequency pumping in a resonant oscillatory circuit

A. M. Valshin

*Ufa University of Science and Technology
 450076, Republic of Bashkortostan, Ufa, st. Zaki Validi, house 32*

Experimental measurements of the plasma impedance of a solid-state laser flash lamp under high-frequency pumping have been carried out. The value of the plasma impedance (60 ohms) after breakdown and the decrease of this value as the discharge current increases are estimated.

Key words: plasma impedance, high-frequency pumping, gas-discharge lamp, solid-state laser.

ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

doi: 10.51639/2713-0568_2022_2_4_9

УДК 535.33, 621.039.533.6: 535.13

ГРНТИ 44.31.19, 29.33.49

Пути в экологичную энергетику

^{*1} Привалов В. Е. , ² Шеманин В. Г.

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Россия,
 г. Санкт-Петербург

² Филиал Белгородского государственного технологического университета
 имени В.Г. Шухова в г. Новороссийске
 353912, Россия, г. Новороссийск, Мысхакское шоссе 75

e-mail: * vaevpriv@yandex.ru, vshemanin@mail.ru

Интерес к экологии у человечества является повсеместным. Поэтому вопрос обсуждают, в том числе в печати, представители различных специальностей и уровней подготовки. Это будоражит общественное мнение и сбивает многих с толку. Декларируется явная чушь и неявная. Встречаются полезные мнения. Нужна концепция. Её могут создать только люди, способные с разных точек зрения увидеть проблему. Авторы понимают, что не все разделяют их точку зрения, но пытаются сделать её доступной. Рассмотрены различные виды топлив. Сопоставляются их достоинства и недостатки. Авторы предлагают не заикливаться на одном виде энергетики и помнить, что истина всегда конкретна.

Ключевые слова: экология, виды топлива, производство топлива и его диагностика, лазеры, лидары, погрешность измерения концентрации, особенности водорода.

Введение

Экологичность энергетики обычно определяют объёмом вредных отходов. С этой точки зрения самой опасной энергетикой является атомная. Некоторые страны по этой причине свёртывают эту отрасль энергетики, закрывают или приостанавливают работу АЭС. Об этой отрасли ниже поговорим подробнее. И не только о ней. Экологичность довольно ёмкий термин и не только она определяет опасность и полезность энергетики. Этому и посвящена наша статья.

Ядерная энергетика

Ядерная физика зародилась на стыке XIX и XX веков и в середине последнего появилось сначала ядерное оружие, а вскоре и электростанции, энергия которых получалась при расщеплении ядер веществ, которые служили топливом: уран, плутоний и др. В нашей стране ведущей организацией в этой отрасли является «Росатом». Название «атомная энергетика», которое чаще используется, мягко говоря, не очень точное: для получения энергии расщепляют не атом, а его часть – ядро. Безусловно, отрасль опасная, аварии на её предприятиях становятся предметом внимания и соседних стран и всего мира. Идут

встречные процессы: ряд стран продолжают строить новые электростанции, некоторые – сворачивают и сейчас, когда Запад организовал энергетический кризис, начинают оживлять эту отрасль. Наша страна продолжает развивать отрасль и не только у себя. Например, новые станции продолжают строиться в Иране, Венгрии, Турции и др. Лазеры используются, как при строительстве, так и при эксплуатации станций. Главной опасностью ядерной энергетики является захоронение отходов; есть опасность и в процессе эксплуатации станций. Считается, что люди, работающие с радиацией, подрывают своё здоровье и долго не живут. Нам неизвестна статистика, но известны даты жизни отдельных людей. И. Халатников – непосредственный участник работы в 1940 гг. – годах над бомбой, которую по привычке называют атомной, умер в 2021 г. на 102 году жизни. Известны другие долгожители. У ядерной энергетики много достоинств. В частности, она позволяет снизить выбросы углекислого газа на планете. Например, ядерная энергетика позволила сократить выбросы CO₂ в 2010 году на 4 млрд тонн в год (16 % всего годового техногенного вброса). Надо ещё помнить, что CO₂ поглощают наши экосистемы (леса, болота, степи и т. д. питаются этим газом), т. е. надо соблюдать равновесие.

Угледородная энергетика

Человек начал сжигать дерево почти одновременно со своим появлением на планете. Потом начали сжигать торф, уголь, нефть и нефтепродукты, бытовой газ (смесь пропана и бутана), другие, менее распространённые сегодня в технике газы и смеси. Наиболее опасным считаются газы: утечки могут привести к отравлению, взрывам, пожарам и т.п. Лазеры здесь могут существенно помочь (диагностика утечек, причём, дистанционная). Подробнее об этом далее. Жидкие топлива менее опасны, но их испарения и протечки могут создать трудности. Твёрдые менее опасны, но отходов – больше: обгоревшие остатки и выбросы, прежде всего, окислов углеродов и азота.

Сегодня эта энергетика наиболее распространена, поэтому её замена вызовет больше трудностей. Западные санкции это доказали. Всё надо делать постепенно, не нарушая сложившегося за долгие годы равновесия. Угледородная энергетика будет нужна человечеству ещё долго. Способы добычи различных топлив освоены и совершенствуются. Ветряные и фотоэлектрические генераторы энергии следует совершенствовать, но сегодня они ещё полноценной заменой традиционных энергетик служить не могут.

Водородная энергетика

1. Водород в природе и технике

Водород, по-видимому, самый распространенный элемент в Солнечной системе. В виде плазмы он составляет около половины массы Солнца и большинства звезд. Из водорода в основном состоят газы межзвездной среды и газовые туманности. Корпускулярное излучение Солнца и космические лучи в значительной мере состоят из протонов – ядер атомов водорода. Содержание водорода в земной коре – 1 % по массе и 16 % по числу атомов. В атмосфере планеты находится примерно 2,5 миллиардов тонн водорода. Он уходит в космос по 250 тысяч тонн в год. Источником восполнения является водородное «дыхание» Земли», то есть водородная дегазация. После завершения процесса формирования планеты, радиогенный разогрев вещества планеты приводил к разложению гидридов с выделением водорода [1]. В. И. Вернадский [2] считал, что термодинамические и химические условия глубин Земли позволяют предполагать возникновение среды,

благоприятной для наличия водорода, с ростом глубины. Активность химических реакций уменьшается, исчезает кислород, начинают преобладать металлы, растёт количество водорода. При этом температура и давление растут. Это должно привести к появлению соединений водорода, в том числе растворённого в металлах. Водородная дегазация планеты – явление выделения водорода в смеси с другими газами (чаще всего углеводородами, гелием и радоном) в рифтовых зонах, при извержениях вулканов, из разломов земной коры, кимберлитовых трубок, некоторых шахт, и скважин.

Все процессы на Земле следует рассматривать с учётом водородной дегазации [3]. Землетрясения тектонического происхождения сопровождаются увеличением содержания водорода в воздухе. До поверхности нашей планеты водород доходит в виде углеводородов, воды и в виде газа H_2 . Единственным объяснением водородной дегазации Земли является наличие достаточно больших запасов водорода в недрах, а также круговорот водорода в системе – недра-поверхность-недра. К возможным источникам водорода относят и вулканы [4]. Существует предположение, что абиогенная нефть и природный газ образуются из неорганических веществ в мантии Земли при условии достаточной концентрации водорода во флюидном потоке и мигрируют в земную кору. Особенно хорошо это наблюдается в современных осях расширения океанов [1].

Практически весь земной водород связан в соединения. Очень редко в минимальных количествах встречается свободный водород в вулканических и других природных газах. Крайне незначительно его содержание и в атмосфере Земли (0,0001 % по числу атомов, если не считать, конечно, водорода водяных паров). В составе воды – самого распространённого на Земле вещества – водорода 11,19 % по массе. Все водородсодержащие молекулы, начиная с воды и кончая белками и ферментами (сложными биополимерами), содержат водород в связанном виде. То есть, все многообразие молекул углеводородов – это разнообразные гидриды различного атомного состава.

В соединениях водород обычно проявляет степень окисления (валентность) + 1, т. е. ведёт себя подобно щелочным металлам. Однако в гидридах – соединениях водорода с металлами – ион водорода отрицательно одновалентен (1-). Этим объясняется двойственное положение водорода в таблице элементов: его помещают одновременно и в I и в VII группу. Водород обладает ярко выраженными восстановительными свойствами, но при обычных условиях химическая активность молекулярного водорода в отличие от щелочных металлов вполне умеренна. Без нагрева он реагирует лишь с фтором (даже в темноте) и с хлором (на свету). Реакция синтеза воды (водород плюс кислород) при нормальных условиях идёт очень медленно. Нагревание, естественно, ускоряет её. При температуре выше 550 °C она носит характер взрыва.

С неметаллами водород, как правило, взаимодействует активнее, чем с металлами. Из последних предпочитает химически активные – щелочные и щелочноземельные. В этих реакциях образуются гидриды. Далеко не все соединения водорода с металлами построены так просто, как гидриды щелочных и щелочноземельных металлов: валентность водорода -1, металла – +1 или + 2, состав соединений соответственно MeH или MeH_2 . Эти гидриды – их называют солеобразными, – образованы классическими ионными связями. Они хорошо изучены и довольно широко применяются в технологиях. Гидрид кальция, например, CaH_2 используют в порошковой металлургии, с его помощью получают титан, тантал, ниобий, цирконий.

Чтобы удалить с металла окисную пленку, иногда применяют слабый, 1,5...2 %-ный раствор гидрида натрия в едком натре. Этот же гидрид (и гидрид лития) используют, получая бороводороды. Но вот строение бороводородов в рамки классических представлений о валентности не укладывается. Эти гидриды, так же как гидриды гелия и

элементов IV, V, VI и VII групп (главных подгрупп), называют летучими гидридами. Химическая связь в них – ковалентная или полярная.

Бурное развитие химии и технологии соединений фтора привело к появлению многочисленных фторсодержащих продуктов. Фтор в последнее время стал основой ряда крупномасштабных производств, выпускающих соединения, без которых сейчас не обходится ни одна отрасль промышленности. Фтористый водород HF занимает исключительное место в промышленной химии фтора. Он служит исходным сырьём для получения подавляющего большинства неорганических и органических фторсодержащих соединений, и спрос на него в последнее время постоянно растёт. Около половины потребления HF приходится на производство органических соединений, в первую очередь хлорфторуглеродов и фторполимеров. Большие количества его расходуются на производство фторида алюминия AlF_3 и синтетического криолита. Большое значение имеют также такие области применения, как обработка поверхности металлов, каталитическое алкилирование в нефтехимической промышленности, производство газообразного фтора и травление поверхности полупроводников для электронных устройств. Газообразный HF – бесцветный газ с резким запахом, очень вредно действующий на дыхательные органы и слизистые оболочки. Его предельно-допустимая концентрация (ПДК) составляет $0,005 \text{ мг/м}^3$ или $9 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Но особенно большие концентрации фтороводорода выделяются при нанесении гальванических покрытий (при фосфатировании) на изделия (концентрация HF в отводимом воздухе достигает $1,2 \dots 15 \text{ г/м}^3$).

Есть ещё гидриды металлические (металлообразные). Как правило, это твёрдые растворы водорода в металле. По свойствам и характеру химической связи эти гидриды сходны с металлами. К гидридам этой группы относится, в частности, двойной гидрид переменного состава TiFeX_x его применяют в экспериментальных автомобильных двигателях, для которых горючим служит выделенный из гидрида водород.

2. Производство водорода

Основным способом производства наиболее чистого водорода считается электролиз воды (например, [5, 6]). Этот водород называют «зелёным». Есть водород других «цветов»: серый, голубой и т. д. – они менее чистые, чем зелёный, и считаются бесперспективными для экологичной энергетики. Ведутся споры. «Зелёный» водород требует для своего производства больше энергии, чем выделит водород при сгорании. Идут поиски. Постоянный ток заменили переменным. Есть другие предложения (например, с применением лазеров [7, 8]).

3. Лазерная диагностика

Лазеры могут использоваться при производстве водорода. Но они незаменимы и при обнаружении мест дегазации и утечек водорода [9, 10]. Причём, они могут работать дистанционно, в том числе, со спутников Земли. Эти лазерные приборы называются лидарами по аналогии с радарами. О них можно почитать не только в книгах [9, 10], но и многих работах, в которых описаны конкретные приборы, результаты измерений с ними, расчёты, новые эффекты, например [11–15]. В список включены работы с водородом и его соединениями. Мы давно занимаемся лидарами. В прошлом веке выпустили препринт [16] для занимающихся диагностикой водорода. В настоящее время подготовлена более ёмкая работа, существенно расширяющая возможности исследователя и инженера, ведущего диагностику водорода.

Лидары могут быть использованы для дистанционной диагностики различных элементов, их соединений и ситуаций. В библиографии мы не ограничились водородом. В [17] рассмотрена возможность контролировать радиационную обстановку, в [18,19] – качества воздуха.

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. С. Лобанов. Водород. Назад в будущее. // Наука. Политех. 2021, № 3 С. 44–57.
2. Вернадский В. И. 1960 Избранные сочинения. Том 4. Кн. 2 (Москва: Издательство Академии наук СССР) 13–14.
3. Ларин В. Н. Наша Земля. Происхождение, состав, строение и развитие изначально гидридной Земли (Москва: Агар) 2005, 248 с.
4. Портнов А. Вулканы – месторождения водорода // Промышленные ведомости 2010 с. 10–12.
5. Григорьев С. А., Погребмский В. И., Фатеев В. Н. и др. «Получение водорода электролизом воды: ...» Транспорт на альтернативной основе 2008, № 3, 3.
6. В. Болдырев «Водородная энергетика» Промышленные ведомости 2006, № 5.
7. Привалов В. Е. Патент России 165752, БИ № 31, 2016.
8. Привалов В. Е. Труды 26 -й конференции «Лазерно-информационные технологии» 2018 Новороссийск, с. 40–41.
9. Межерис Р. «Лазерное дистанционное зондирование» (Москва: Мир) 1987, 550 с.
10. Привалов В. Е., Фотиади А. Э., Шеманин В. Г. «Лазеры и экологический мониторинг атмосферы» Санкт-Петербург. Изд-во «Лань» 2013, 288 с.
11. Воронина Э. И., Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Зондирование молекул водорода на лабораторном лидаре КР // Письма в ЖТФ. 2004. Том 30, с. 514–17.
12. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Лидарное уравнение с учётом конечной ширины линии генерации лазера // Известия РАН. Серия физическая 2015. Том 79, № 2, с. 170–180.
13. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. «Лазерная диагностика сероводорода» Труды 26 конференции «Лазерно-информационные технологии» 2018, Новороссийск, с. 53–54.
14. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. «Лазерное зондирование смеси H₂S и CH₄» Материалы конференции по люминесценции и лазерной физике, Иркутск 2019. с. 72–73.
15. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Лидарная система комбинационного рассеяния света для зондирования молекул водорода в атмосфере // Оптика и спектроскопия 2022, № 3, с. 395–399.
16. Привалов В. Е., Смирнов В. Б., Шеманин В. Г. «Расчёт параметров дистанционного лазерного зондирования молекул водорода» препринт НИИ Российский центр лазерной физики, 1998
17. Привалов В. Е. Патент России 110549, БИ № 32, 2011.
18. Аблязов Э. К., Шеманин В. Г. Патент России 101836, БИ № 3, 2011.
19. Привалов В.Е Патент России 113846, БИ №6, 2012.

Pathways to green energy

^{*1} V. E. Privalov, ² V. G. Shemanin.

¹ *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 195251, Russia, St. Petersburg*

² *Branch of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov in
Novorossiysk*

353912, Russia, Novorossiysk, Myskhakskoe Highway 75

Human interest in ecology is ubiquitous. Therefore, the issue is discussed, including in the press, by representatives of various specialties and levels of training. This excites public opinion and confuses many. Declared obvious nonsense and implicit. There are helpful comments. Need a concept. It can only be created by people who can see the problem from different points of view. The authors understand that not everyone shares their point of view, but try to make it accessible. Various types of fuels are considered. Their advantages and disadvantages are compared. The authors suggest not to get hung up on one type of energy and remember that the truth is always concrete.

Key words: ecology, fuel types, fuel production and diagnostics, lasers, lidars, concentration measurement error, hydrogen features.

ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

doi: 10.51639/2713-0568_2022_2_3_34

УДК 535.621(075.8)

ГРНТИ 29.33.49

Лидарный мониторинг парниковых газов в атмосфере

¹ Дьяченко В. В., ^{*1,2} Шеманин В. Г.

¹ Новороссийский политехнический институт (филиал) Кубанского государственного технологического университета, 353900, Россия, Новороссийск, ул. К. Маркса, 12

² Филиал БГТУ им. В. Г. Шухова в г. Новороссийске
 353919, Россия, Новороссийск, Мысхакское шоссе 75,

e-mail: v-v-d@mail.ru, ^{*} shemanin-v-g@nb-bstu.ru

Выполнен анализ возможности применения лидарных технологий для дистанционного измерения концентраций климатически активных газов на карбоновых полигонах для их фонового мониторинга. Компьютерное моделирование лидарного уравнения для измерения концентрации молекул карбонового цикла на уровне от фонового и выше (в диапазоне от $4,1 \cdot 10^{15}$ до $1,0 \cdot 10^{25}$ мол./м⁻³) лидаром комбинационного рассеяния света в атмосфере на расстояниях зондирования до 100 м в режиме синхронного счета фотонов показало такую возможность. По результатам моделирования определены оптимальные параметры такого лидара. Получено, что при зондировании лидаром комбинационного рассеяния света атмосферы с использованием лазерного излучения на длине волны 405 нм можно зарегистрировать концентрацию всех исследованных молекул в газовой смеси с учётом их доли в атмосфере в диапазоне времен измерения от 0,77 мкс до 1009 с.

Ключевые слова: парниковые или климатически активные газы, лидар комбинационного рассеяния света, концентрация молекул, расстояние зондирования, длина волны лазерного излучения, карбоновый полигон.

1. Введение

Обостряющиеся проблемы загрязнения окружающей среды и очевидное изменение глобального климата актуализируют наблюдения за динамикой техногенных выбросов и разработку мер по их снижению. Это тем более важно, что данные вопросы всё больше переходят в экономическую плоскость. Например, в ближайшее время будет введён налог на не экологичную продукцию. Компании-экспортеры многих отраслей вынуждены будут платить млрд. долл. карбонового налога ежегодно.

Поэтому, важно обеспечить объективность расчётов и прозрачность этих налогов. Этому поможет, во-первых, определение масштабов «карбонового следа» различных технологий и предприятий, то есть выбросов ими климатически активных газов (КАГ), а во-вторых, оценка баланса этих газов в различных биогеоценозах страны-производителя товаров в целом.

Чтобы это осуществить, необходимы системы контроля эмиссии парниковых газов и организация полигонов для определения углеродного баланса различных биогеоценозов.

Эти системы, с одной стороны, будут служить для определения баланса КАГ и мониторинга климата, а с другой – исполнения Парижского соглашения Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК).

В 2021 г. вышло распоряжение правительства России, утверждающее перечень КАГ с пересчетом их вклада в парниковый эффект через условные углеродные единицы, то есть с оценкой степени влияния одной молекулы вещества. Данный перечень необходимо использовать и при организации карбоновых полигонов, так как документов и отдельного перечня, контролируемых веществ нет. Однако, многие из этих веществ имеют преимущественно техногенное происхождение и вдали от источников загрязнения имеют крайне низкие концентрации. Для их мониторинга понадобится большое количество разнообразных приборов. Потому их определение технически сложная и не актуальная задача для карбоновых полигонов, назначение которых – наблюдение за фоновыми характеристиками «дыхания» биогеоценозов. Также надо учитывать необходимость метрологической сходимости оборудования на разных полигонах и сопоставимости получаемых ими данных.

Как осуществлять внешний контроль и сходимость результатов измерений в различных регионах? Практика нашей научной деятельности показывает, что наиболее перспективными для решения этих задач являются лазерные методы дистанционного зондирования.

Целью настоящей работы является оценка возможности применения лазерных технологий для дистанционного определения основных КАГ. Для этого рассмотрим лидарные системы, в которых источник излучения – лазер, а сам лидар – созданный на его основе прибор. Эта технология в разном аппаратном оформлении способна решить обе задачи – контроль выбросов на предприятиях и мониторинг КАГ на эталонных участках (карбоновых полигонах) различных биогеоценозов, причем, не только стационарными установками, но и их мобильными вариантами [1].

2. Определение объектов и методов исследований

В указанном выше распоряжении о перечне КАГ, подлежащих учёту в выбросах предприятий и ведению кадастра парниковых газов, содержится 33 наименования. Среди них как газы – макрокомпоненты атмосферы, давно признанные в качестве парниковых – CH_4 , CO_2 , N_2O , NF_3 и SF_6 . А также более двух десятков экзотических газов под общим названием гидрофторуглероды и перфторуглероды).

Гидрофторуглероды имеют преимущественно техногенное происхождение и применяются в холодильном оборудовании, в кондиционерах, машинах, в системах пожаротушения, в медицине и даже в индустрии красоты. Однако какую бы пользу они не приносили промышленности, многие признаны опасными для озонового слоя нашей планеты. Поэтому по «Монреальскому протоколу» был запрещён ряд веществ разрушающих озоновый слой, в которые вошли и некоторые гидрофторуглероды. Сейчас они применяются только в средствах для тушения пожаров. Вредоносность гидрофторуглеродов определяется наличием в них трёх веществ – хлора, фтора, водорода. Наиболее безопасным является тот фреон, в котором меньше атомов водорода, так как они очень медленно разрушаются. Чем больше содержание атомов хлора в соединении, тем более токсичным оно становится и тем большей способностью к разрушению озонового слоя оно обладает.

Так как основной целью статьи является разработка лазерных систем для контроля КАГ в фоновом режиме на карбоновых полигонах, рассмотрим возможность мониторинга самых распространенных гидрофторуглеродов, с наибольшим парниковым эффектом. Остальные

газы целесообразно контролировать только на источниках эмиссии, где их концентрация гораздо выше и эту проблему необходимо рассмотреть в рамках отдельной работы, ввиду специфического аппаратного оформления и размещения.

Карбоновые полигоны – это территории, на которых проводятся комплексные исследования по мониторингу уровня содержания парниковых газов в атмосфере, исследования по углеродному обмену (атмосфера / почва / вода) параллельно с измерением параметров окружающей среды (температура, влажность, освещенность, скорость и направление ветра и другие). Сеть полигонов должна охватить все представительные сухопутные и аквальные биогеоценозы страны, а объективность полученной информации зависит от правильности выбора мест их размещения. Территории с одинаковыми ландшафтообразующими факторами (ландшафты, биогеоценозы) имеют сходную геохимическую структуру и ландшафты, отличающиеся хотя бы одним (фактором), закономерно отличаются условиями миграции, концентрациями и соотношениями химических элементов в почвах, растениях, почвообразующих горных породах, грунтовых водах, а также устойчивостью, ассимиляционным потенциалом и реакцией на внешнее воздействие [3]. Эти факторы во многом определяют эмиссию и секвестрацию КАГ или, образно выражаясь – параметры «дыхания» (атмогеохимию) ландшафта.

В связи с этим необходимо разработать систему мониторинга КАГ на таких карбоновых полигонах, где будут изучаться конкретные экосистемы, набираться аргументы и цифры, которые помогут обосновать количественные параметры регионального или ландшафтного баланса КАГ для производства расчетов карбонового следа, государственного учета выбросов парниковых газов и ведения кадастра парниковых газов. Причем это необходимо сделать как с точки зрения пространственного, точнее биогеоценотического охвата территории страны, так и технологического.

По нашему мнению такие площадки должны иметь 2–3 уровня измерения. Первый (основной) уровень – установка с датчиками на высоте 2 м.

Второй уровень – в закрытой траншее (рядом или даже под первым уровнем) глубиной 30...40 см и длиной не менее 15 м для отслеживания «дыхания» почвы, которая является поставщиком многих газов.

Третий уровень необходим в лесных экосистемах над кронами деревьев, то есть на вышке высотой 30...35 м.

Рассмотрим возможности лазерных технологий для организации таких полигонов.

3. Лидарное зондирование КАГ

Для мониторинга КАГ техногенных и природных циклов парниковых газов, в настоящее время, необходимо применение нескольких приборов для каждого вещества. Они могут быть построены на разных физических принципах и требуют различных условий размещения и регламентов обслуживания. Всё это очень усложняет аппаратное оформление карбонового полигона, снижает оперативность измерений и повышает стоимость, как всего комплекта приборов, их монтажа, так и их эксплуатации.

Одним из наиболее перспективных методов мониторинга КАГ в контроле техногенных и природных циклов парниковых газов может быть лазерное зондирование исследуемых молекул для дистанционного измерения концентрации молекул карбонового цикла в атмосфере с уровнем концентраций порядка фоновой и выше. В качестве параметра концентрации будем рассматривать значение предельно-допустимой концентрации ПДК (максимально разовой) из [4, 5]. Использование лазерного зондирования позволяет

обеспечить оперативность, хорошее пространственно-временное разрешение и потенциальную возможность определения всех компонентов одним прибором [4].

Выполненные ранее исследования [4, 6–9] свидетельствуют о том, что для дистанционного измерения концентрации молекул на уровне десятков и сотен ПДК целесообразно использование лидара комбинационного рассеяния света (КРС). Нам же потребуется определять значительно более низкие концентрации. Для оценки возможности этого было выполнено компьютерное моделирование лидарного уравнения для КРС молекулами КАГ. В работах [7, 10, 11] было предложено лидарное уравнение для КРС газовыми молекулами в атмосфере с учетом конечной ширины линии генерации. Используя его и уточнив решение [10, 11], оценим возможность измерений лидаром КРС концентраций исследуемых молекул в атмосфере на заданном уровне и на расстояниях зондирования до 100 м в режиме синхронного счета фотонов для выбора оптимальных параметров такого лидара. Учёт конечной ширины линии генерации реального лазера, соотношения полуширин полос комбинационного рассеяния света и аппаратной функции лидара позволят повысить точность решения лидарного уравнения для измерения концентрации исследуемых молекул по спектрам их комбинационного рассеяния света.

4. Параметры молекул карбонового цикла

Рассмотрим газовые молекулы, дающие основной вклад в карбоновый цикл, с учётом их содержания в атмосфере [12]. Основные параметры исследуемых молекул по данным [4, 5, 13–16] сведены в таблицу 1. Молекула азота используется как репер, относительно интенсивности полосы КРС которой и производится нормирование всех измерений для учета изменения пропускания атмосферы на трассе зондирования. Концентрации N_2 и CO_2 взяты как фоновые в атмосфере. ПДК, частоты собственных колебаний молекул $\tilde{\nu}$ и дифференциальные сечения колебательного комбинационного рассеяния света исследуемыми молекулами ($d\sigma/d\Omega$) взяты из [4, 5, 13–16].

Для определения реальности зондирования рассмотрим самый сложный вариант – в атмосфере присутствуют сразу все 10 исследуемых молекул, а молекула азота используется в качестве репера, как и в [4].

На первом этапе рассчитаем спектр комбинационного рассеяния света этой смеси молекул с учетом доли в атмосфере и их дифференциальных сечений колебательного КРС для оценки возможности лидара зондировать все молекулы одновременно.

5. Лидар комбинационного рассеяния света

Оптическая схема лидара комбинационного рассеяния света построена как и в [4, 6, 7] и приведена на рис. 1.

В качестве зондирующего – используется излучение третьей и второй гармоники YAG: Nd-лазера с накачкой полупроводниковым лазером с длинами волн 355 и 532 нм и полупроводниковых лазеров с длинами волн 405 и 785 нм с длительностью импульсов 10 нс и энергиями в импульсе до 1 мДж при частоте следования лазерных импульсов f до 1 МГц [13, 17]. Излучение лазера I направляется параллельно оси приемного телескопа на расстоянии 250 мм, как и в [4, 13], а излучение комбинационного рассеяния исследуемыми молекулами в атмосфере в направлении назад собирается приемным телескопом типа Ньютона со сферическим зеркалом 9 диаметром 200 мм и фокусируется линзовым объективом 8 в волоконный ввод 6 микро-спектрометра 7 типа FSD-8, работающего на линии с персональным компьютером (ПК).

Часть лазерного излучения направляется стеклянной пластиной 5 и глухим зеркалом 4 через интерференционный светофильтр 3 на фотоприёмник 2, напряжение U_0 с которого записывается платой сбора данных в ПК, для контроля энергии лазерного импульса и формирования начала отсчёта времени измерения.

Таблица 1

Параметры молекул карбонового цикла

Наименование молекул	ПДК, мг/м ³	ПДК ¹ , мол/м ⁻³	Частота собственных колебаний молекул, $\tilde{\nu}$, см ⁻¹	Дифференциальное сечение колебательного КРС молекул, $(d\sigma/d\Omega) \cdot 10^{30}$ см ²	НВ, см ⁻¹	Углеродные единицы
Азот (N ₂)	-	-	2330,7	3,5	0,2	-
Диоксид углерода (CO ₂)	-	-	1388	4,2	0,095	1
Метан (CH ₄)	7000	2,6 · 10 ²³	2914	32,2	0,33	25
Моноксиддиазота (N ₂ O)	0,4	8 · 10 ¹⁸	1877	1,5	0,13	298
Гексафторид серы (SF ₆)	0,001	4,1 · 10 ¹⁵	775	12,0	0,03	22800
Трифторид азота (NF ₃)	0,2	1,7 · 10 ¹⁸	1033		0,06	17200
ГФУ-23-трифторметан	10,0	8,6 · 10 ¹⁹	1137		0,062	14800
ПФУ-116–гексафторэтан 138	20,0	8,7 · 10 ¹⁹	807	7,3	0,031	12200
ПФУ-318 октафторциклобутан	20,0	9,6 · 10 ¹⁸	699	7,5	0,022	10300
ПФУ-14 – тетрафторметан	20,0	2,2 · 10 ¹⁹	908	5,3	0,06	7390

¹ количество молекул газа в м³ при концентрации газа, равной ПДК

Выполним компьютерное моделирование спектра колебательного КРС по данным табл. 1. Различие интенсивностей полос учтём значениями дифференциальных сечений КРС исследуемых молекул, а их полуширины определим, как и в [18], для нормальных условий в атмосфере. Все данные для моделирования спектра сведены в четвёртом, пятом и шестом столбцах табл. 1.

По этим данным была выполнена компьютерная реконструкция спектра КРС молекулами газовой смеси в предположении, что полосы можно описать функцией Гаусса в виде:

$$I(\nu) = C \cdot N(H) \cdot \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right) \cdot 1/\Gamma \exp[-(\nu - \nu_0)^2 / 2\pi^2]$$

в котором $I(\nu)$ – интенсивность полосы КРС в относительных единицах, ν – волновое число, ν_0 – волновое число в максимуме полосы, Γ – полуширина полосы, C – константа, $N(H)$ – концентрация исследуемых молекул и $(d\sigma/d\Omega)$ – дифференциальное сечение КРС исследуемыми молекулами.

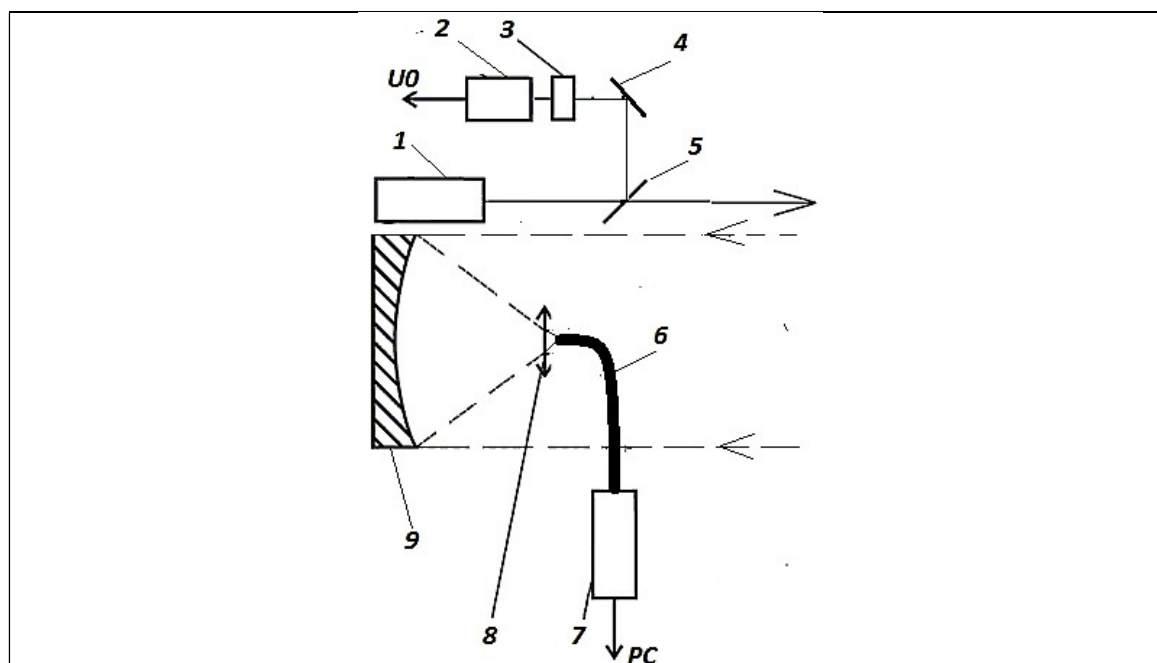


Рис. 1. Оптическая схема лидара комбинационного рассеяния света: 1 – лазер, 2 – фотоприемник, 3 – интерференционный светофильтр, 4 – глухое зеркало, 5 – стеклянная пластина, 6 – волоконный ввод, 7 – микро спектрометр, 8 – линзовый объектив. 9 – сферическое зеркало приёмного телескопа

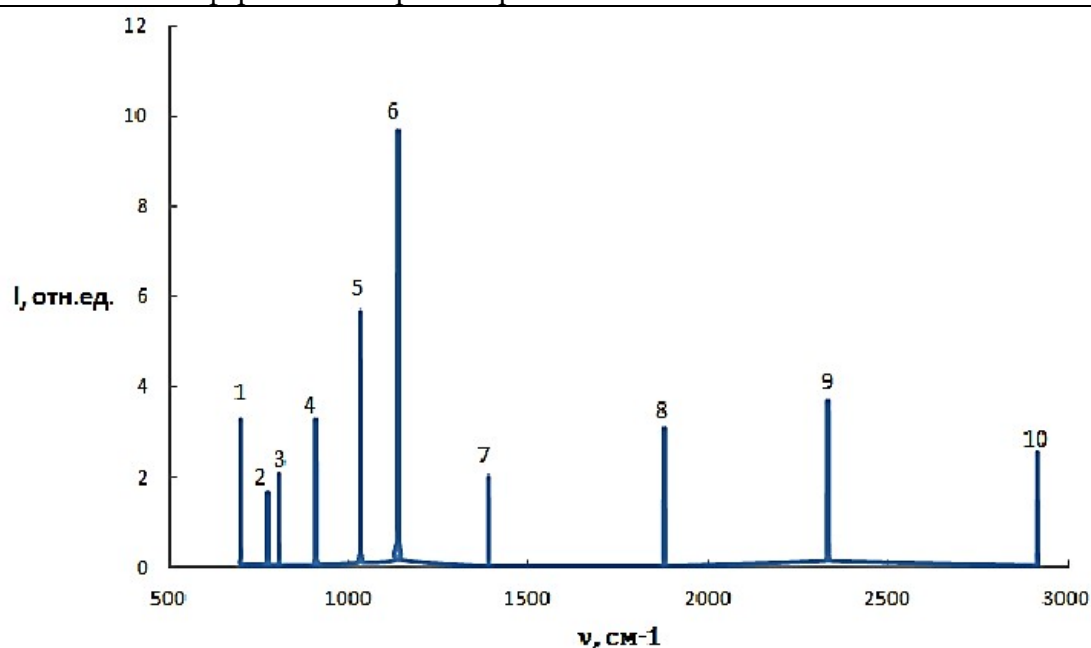


Рис. 2. График реконструированного спектра КРС газовой смеси всех молекул с учетом доли в атмосфере и их дифференциальных сечений КРС ($d\sigma/d\Omega$) из таблицы 1: ПФУ318 - 699 см^{-1} (1), SF₆ 775 см^{-1} (2), ПФУ116 - 807 (3), ПФУ114 - 908 (4), NF₃ - 1033 (5), ГФУ23- 1137 (6), CO₂ - 1388 (7), N₂O - 1877 (8), N₂ - 2330,7 (9) и CH₄ - 2914 (10)

Реконструкция спектра КРС исследуемых молекул с учетом их доли из таблицы 1 представлена на рис. 2. Значения интенсивностей полос КРС исследуемых молекул уменьшены в $10 \dots 10^6$ раз, чтобы их можно было представить одновременно с полосой SF₆

775 см^{-1} , которая условно взята за единицу. Для ПФУ318 интенсивность КРС уменьшена на три порядка по сравнению с интенсивностью полосы $\text{SF}_6 - 775 \text{ см}^{-1}$, интенсивность которой взята за единицу. Для ПФУ116 интенсивность уменьшена на четыре порядка, ПФУ114 – на три порядка, для NF_3 и для N_2O интенсивность уменьшена в 10 раз, для ГФУ23 – в 100 раз, для CO_2 – в 10^5 раз, для N_2 – интенсивность уменьшена в 10^6 раз и для CH_4 уменьшена на семь порядков.

6. Лидарное уравнение для КРС

Лазер лидара будем характеризовать числом фотонов n_0 в импульсе посылаемого в атмосферу лазерного излучения длительностью τ_0 , а линию генерации лазера будем считать Гауссовой с максимумом на частоте ν_0 и полушириной Γ_0 . Тогда число фотонов $n(\nu, z)$ излучения КРС исследуемыми молекулами с концентрацией $N(z)$ на фотоприёмнике лидара можно получить из лидарного уравнения в направлении назад в режиме счёта фотонов в виде [6, 9] как интеграл в интервале от $(\nu_0 - \Gamma_0)$ до $(\nu_R - \Gamma_R)$ [10]:

$$n(\nu, z) = n_0 c \tau_1 G(z) f t S_0 N(z) (d\sigma/d\Omega) \int_{\nu_0 - \Gamma_0}^{\nu_R + \Gamma_R} \frac{T_0(\nu_0, z) \cdot T(\nu_R, z) \cdot \Phi(\nu) A(\nu)}{2z^2} d\nu, \quad (1)$$

где $n(\nu, z)$ – число фотонов, зарегистрированное фотоприёмником лидара на частоте ν_R КРС с расстояния зондирования z ; n_0 – число фотонов на частоте ν_0 лазерного излучения. Кроме того, обозначены S_0 – площадь приемной апертуры телескопа; $G(z)$ – геометрическая функция лидара [4, 10, 13]. Эта функция определяется параметрами оптической схемы лидара [13] и лежит в пределах $0 < G(z) < 1$. Следующие величины: $N(z)$ – концентрация исследуемых молекул; t – время измерения или накопления сигнала и $(d\sigma/d\Omega)$ – дифференциальное сечение КРС исследуемыми молекулами. А два сомножителя – пропускание атмосферы, как и в [4, 13] равны соответственно:

$$T_0(\nu_0, z) = \exp\left[-\int_0^z \alpha(\nu_0, r) dr\right] \quad \text{и} \quad T(\nu_R, z) = \exp\left[-\int_0^z \alpha(\nu_R, r) dr\right],$$

где $\alpha(\nu_0, r)$ и $\alpha(\nu_R, r)$ – коэффициенты ослабления на частотах лазерного излучения и КРС исследуемыми молекулами. Учитывая эти выражения и считая, что $\Phi(\nu)$ – функция распределения фотонов лазерного излучения в линии генерации [10, 11, 18] в нашем случае – Гауссова. Кроме того, будем считать, что аппаратная функция или спектральный коэффициент пропускания приемной системы лидара $A(\nu)$ [4, 11, 13] так же имеет Гауссову форму и настроена точно на частоту ν_R полосы КРС молекулами КАГ с полушириной Γ_a , которая больше чем Γ_R и Γ_0 , K_1 – лидарная константа на частоте ν_0 лазерного излучения, измеренная экспериментально в [14], а $\xi(\nu_R)$ – относительная спектральная чувствительность фотоприемника на частоте ν_R излучения комбинационного рассеяния света. Тогда перепишем уравнение (2) в виде

$$n(\nu, z) = \frac{B}{z^2} N(z) t I(\nu, z). \quad (2)$$

В этом выражении обозначена константа B как

$$B = \frac{c \tau_1}{2} S_0 f \quad (3)$$

и некоторая функция $I(\nu, z)$, используя интеграл ошибок [10, 11], может быть представлена в виде:

$$I(\nu, z) = G(z) n_0 (d\sigma/d\Omega) \cdot 0.34 K_1 \xi(\nu) T_0(\nu_0, z) \cdot T(\nu_R, z) \quad (4)$$

при условии, что $\Phi(\nu) = 1$, когда полуширина линии генерации много меньше, чем полуширина аппаратной функции лидара. Также считаем, что дифференциальное сечение КРС можно считать постоянным внутри интервала интегрирования по частоте, как и коэффициенты ослабления на частотах лазерного излучения и КРС молекулами КАГ [19].

$$t = \frac{n(v,z)z^2}{BI(v,z)N(z)}. \quad (5)$$

Далее будем рассматривать однократное КРС и однородную атмосферу [4, 14, 19]. Значения максимумов полос валентных NO, OH, NN, и CO колебаний молекул КАГ собраны из [4, 13–16] в табл. 1 и для этих полос валентных колебаний всех молекул значения дифференциального сечения колебательного КРС на длине волны лазерного излучения 337,1 нм взяты из [13, 15]. Значения дифференциальных сечений КРС для всех молекул ($d\sigma/d\Omega$) и выбранных длин волн лазерного излучения 355, 532, 405 и 785 нм были определены по данным, измеренным в [13, 15] при комнатной температуре и нормальном давлении на длине волны излучения азотного лазера 337 нм и рассчитаны с учетом зависимости $1/\lambda^4$ для интересующих нас длин волн [14]. Все эти значения приведены в табл. 2. Здесь же собраны значения коэффициентов ослабления для этих частот $\alpha(v_0, z)$ и $\alpha(v, z)$ из [20].

Поперечное сечение зеркала приемного телескопа лида было $0,12 \text{ м}^2$, а шаг по расстоянию – 7,5 м для времени одного измерения 50 нс, за которое может быть зарегистрировано 200 фотонов [17].

Таблица 2

Основные параметры исследуемых молекул, атмосферы и фотоприёмника

Длина волны, λ , нм	Частота, ν , ГГц	Дифференциальное сечение КРС ($d\sigma/d\Omega$) 10^{30} см^2	Коэффициент ослабления $\alpha(v_0, r)$, км^{-1}	Коэффициент ослабления $\alpha(v_R, r)$, км^{-1}	Относительная спектральная чувствительность фотоприемника $\xi(v)$
<i>ПФУ 318</i>		$\nu = 699 \text{ см}^{-1}$		<i>ПДК</i> = 20.0 мг/м^3 ($9,6 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$)	
405	740.7	3,6	0,2319		
416,8	719.8			0,2254	0.70
450	666.7	2,36	0,2091		
464,6	645.7			0,2027	0.85
532	563.9	1,2	0,1775		
552,5	543.5			0,171	0.94
785	382,2	0.25	0,1303		
830,6	361,2			0,1271	0,4
337	890.2	7,5			
<i>Гексафторид серы (SF₆)</i>		$\nu = 775 \text{ см}^{-1}$		<i>ПДК</i> = 0.001 мг/м^3 ($4.1 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}$)	
405	740.7	9,01	0,2319		
418,1	631.9			0,2247	0.84
450	666.7	3,77	0,2091		
466,3	643.4			0,202	0.86
532	563.9	1,3	0,1775		
554.9	454.3			0,1703	0.92
785	382,2	2.21	0,1303		
835,9	358,9			0,1268	0.40
337	890.2	12			
<i>ПФУ 116</i>		$\nu = 807 \text{ см}^{-1}$		<i>ПДК</i> = 20.0 мг/м^3 ($2,2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$)	
405	740.7	3,5	0.24		
418,7	716.5			0.22	0.71
450	666.7	2,3	0.21		
467,0	642.4			0.18	0.85
532	563.9	1,2	0.18		
555,9	539.7			0.16	0.95

785	382,2	0,25	0,15		
838,1	358.0			0.12	0.39
337	890.2	7,3			

ПФУ 114		$\nu = 908 \text{ см}^{-1}$		ПДК = 1.5 мг/м^3 ($8,5 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$)	
405	740.7	2,5	0,2319		
420,5	713.4			0,2244	0.72
450	666.7	1,67	0,2091		
469,2	639.4			0,2017	0.87
532	563.9	0,9	0,1775		
559,0	536.7			0,1700	0.96
785	382,2	0.18	0,1303		
845,2	719.8			0,1267	0.37
337	890.2	5,3			
Трифторид азота (NF_3)		$\nu = 1033 \text{ см}^{-1}$		ПДК = 0.2 мг/м^3 ($1,7 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$)	
405	740.7	1,7	0,232		
422,7	676.4			0,2124	0.81
450	666.7	1,13	0,2091		
471,9	635,7			0,1996	0.87
532	563.9	0,6	0,1775		
626,7	478.7			0,1679	1.00
785	382,2	0.12	0,1303		
854,7	719.8			0,1256	0.36
337	890.2	3.6			
ГФУ 23		$\nu = 1137 \text{ см}^{-1}$		ПДК = 10.0 мг/м^3 ($8,6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$)	
405	740.7	2,0	0,2319		
424,6	727.4			0,2214	0.63
450	666.7	1,32	0,2091		
474,3	632.5			0,1986	0.88
532	563.9	0,7	0,1775		
566,3	550.7			0,1669	0.94
785	382,2	0.14	0,1303		
861,9	348.1			0,1251	0.36
337	890.2	4,2			
Диоксид углерода (CO_2)		$\nu = 1388 \text{ см}^{-1}$		Фон – $2.2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$	
405	740.7	2,0	0,2319		
429,1	699.1			0,2191	0.75
450	666.7	2,36	0,2091		
480,0	625.0			0,1963	0.87
532	563.9	0,7	0,1775		
573,4	523.2			0,1649	0.98
785	382,2	0.14	0,1303		
881,0	340.5			0,124	0.30
337	890.2	4.2			
Монооксид диазота (N_2O)		$\nu = 1877 \text{ см}^{-1}$		ПДК = 0.4 мг/м^3 ($8 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$)	
405	740.7	0,7	0,2319		
438,3	684.5			0,2146	0.79
450	666.7	0,47	0,2091		
491,5	610.4			0,1918	0.88
532	563.9	0,2	0,1775		

591,0	528.3			0,1601	0.99
785	382,2	0.05	0,1303		
920,7	325,8			0,1216	0.20
337	890.2	1.5			

Молекула азота (N_2)		$\nu = 2330,7 \text{ см}^{-1}$		$\Phi_{\text{он}} = 1.0 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$	
405	740.7	2,9	0,2319		
447,2	670.8			0,2104	0.74
450	666.7	1,1	0,2091		
502,7	820.8			0,1876	0.9
532	563.9	0,6	0,1775		
607,3	494.0			0,1559	1.00
785	382,2	0.12	0,1303		
960,8	719.8			0,1194	0.15
337	890.2	3,5			
Метан (CH_4)		$\nu = 2914 \text{ см}^{-1}$		ПДК = 7000 мг/м^3 ($2,6 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$)	
405	740.7	15,4	0,2319		
459,2	653.3			0,205	0.81
450	666.7	10,13	0,2091		
517,9	579.3			0,1822	0.92
532	563.9	5,2	0,1775		
629,6	476.5			0,1505	0.99
785	382,2	1.09	0,1303		
1017,8	294.8			0,1165	0.07
337	890.2	32.2			

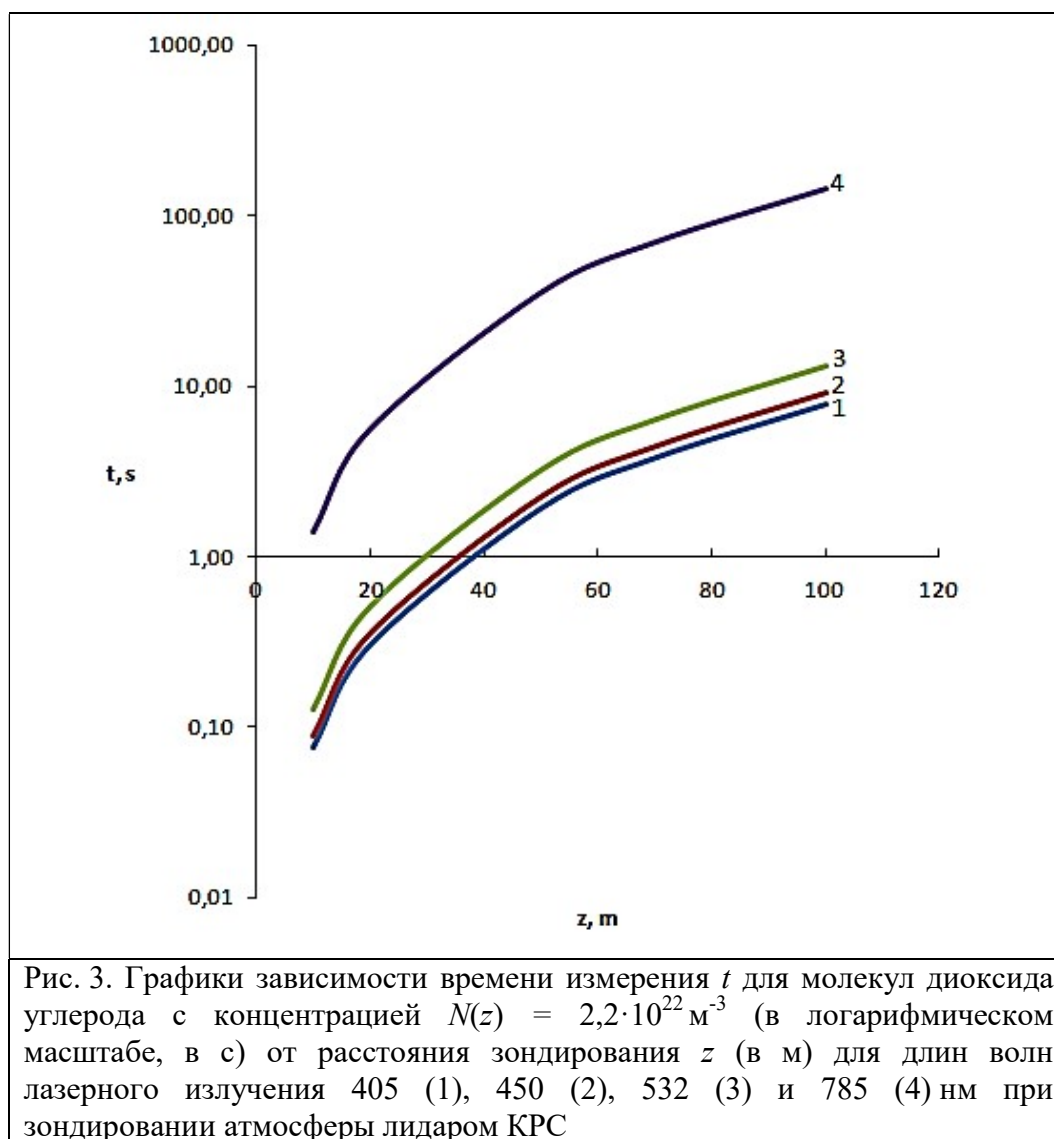
7. Решение лидарного уравнения

Чтобы оценить возможности предложенного варианта лидара КРС зондировать все интересующие нас молекулы рассмотрим компьютерное моделирование уравнения (5), полагая, что $G(z)$ в нашем случае равно 1, и концентрация исследуемых молекул $N(z)$ равна величинам из третьего столбца табл. 1. Выполним решение уравнения (5) для четырех значений длин волн лазерного излучения 405, 450, 532 и 785 нм с частотой следования лазерных импульсов 1 кГц, энергии в импульсе 1 мДж и диапазона расстояния зондирования от 10 м до 100 м. Результаты решения уравнения (5) для исследуемых молекул CO_2 представлены на рис. 3 в качестве примера зависимости времени измерения t от расстояния зондирования z для четырех длин волн.

На рис. 3 очевидно увеличение времени измерения в ряду длин волн лазерного излучения 405–450–532–785 нм за счёт спектральной зависимости величин, входящих в уравнение (5). При этом время измерения на длине волны 405 нм на расстоянии 100 м нарастает с 0,08 с до 7,82 с, т.е. примерно на два порядка, а на длине волны 785 нм – нарастает с 1, с до 142,92 с. В итоге, как следует из уравнения (5), время измерения t убывает обратно пропорционально концентрации исследуемых молекул $N(z)$ и растёт примерно на порядок с увеличением расстояния зондирования z .

Далее рассмотрим численное решение уравнения (5) для всех исследуемых молекул с концентрациями равными половине ПДК, а для молекул азота и углекислого газа взята половина их фоновой концентрации в атмосфере. Эти значения были рассчитаны по числу Лошмидта $N_L = 2,69 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ с учётом их фоновых значений. Выполним решение уравнения (5) для длины волн лазерного излучения 405 нм как наилучший вариант по

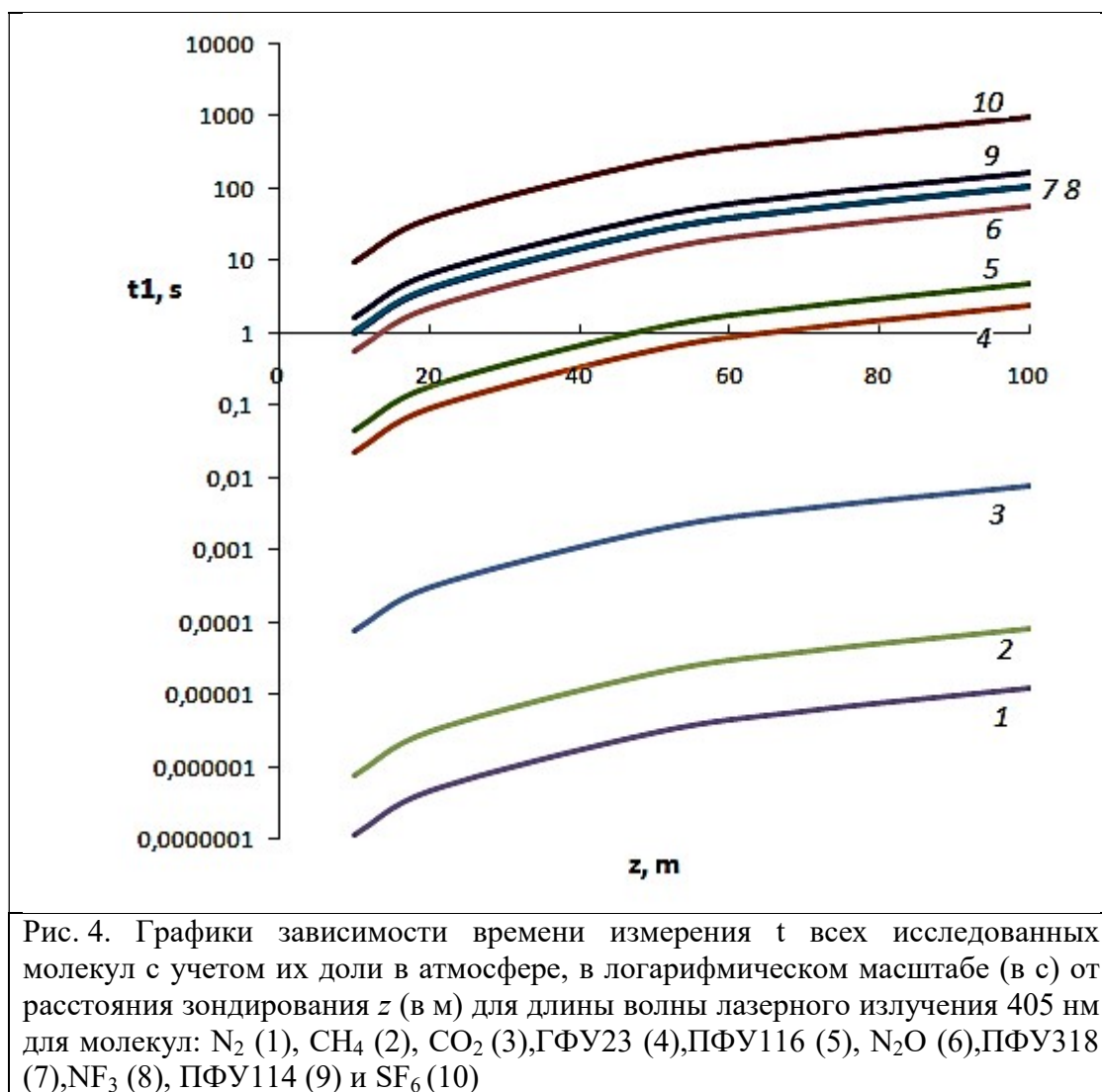
данным рис. 3. Результаты моделирования времени измерения для всех молекул представлены на рис. 4.



8. Обсуждение результатов моделирования

По результатам моделирования наименьшее время измерения определено для молекул CH_4 и CO_2 , но для углекислого газа значения концентрации взято фоновое значение. Для молекулы метана время измерения возрастает с 0,77 мкс на расстоянии 10 м до 80 мкс — на 100 м. Далее идут молекулы ГФУ23 и ПФУ116, для которых максимальные значения времени измерения составили 2,4 и 4,7 с. Для молекулы N_2O это значение ещё больше — 59 с. Для молекул ПФУ318 и NF_3 результаты практически совпали — 108 и 111 с. Далее следует молекула ПФУ114, для которой время измерения уже 171 с. Чтобы зарегистрировать заданные концентрации всех этих молекул достаточно частоты следования лазерных импульсов 1 МГц. И последняя в этом ряду молекула SF_6 , для измерения которой требуется время порядка 1009 с из-за низкого уровня ПДК и поэтому необходимо взять частоту следования лазерных импульсов 10 МГц.

Кроме изменения уровней концентраций исследуемых молекул, параметры лидара для их измерения обусловлены спектральной зависимостью дифференциальных сечений колебательного КРС полос этих молекул, коэффициентами ослабления в атмосфере на этих длинах волн и относительной спектральной чувствительностью фотоприёмника. Во всех расчётах время одного измерения составляет 50 нс или шаг по расстоянию $\Delta z = 7,5$ м. Очевидно, что дальнейшее уменьшение измеряемой концентрации молекул возможно за счет увеличения времени измерения – t , частоты следования лазерных импульсов – f или увеличения их энергии – E_0 . Как следует из рис. 4 минимальное время измерения на длине волны лазерного излучения 405 нм получено для молекулы CH_4 – 80 мкс (в диапазоне расстояний до 100 м), а максимальное – для молекулы SF_6 – 1009 с.



9. Заключение

Выполненные ранее исследования, анализ литературы и результаты моделирования позволяют сделать следующие выводы.

1. Задачи выполнения фонового мониторинга и определения баланса КАГ диктуют необходимость двух- или трёхуровневого съёма информации, в зависимости от биогеоценоза места размещения.

2. Для фонового мониторинга газовых молекул из перечня контролируемых веществ Распоряжения Правительства Российской Федерации № 2979-р, целесообразно взять имеющие природное происхождение и с наибольшим вкладом в парниковый эффект (в соответствии с их ролью согласно условным углеродным единицам).
3. Существует возможность подбора оптимальных параметров лазера и лидара КРС для одновременного зондирования в атмосфере всех рассмотренных молекул карбонового цикла.
4. Все необходимые компоненты можно определять на расстоянии до 100 м. При этом диапазон времени измерений становится очень широким – от 0,77 мкс до 1009 с, что усложняет одновременную запись спектров КРС всех молекул. Для преодоления этой проблемы необходимо менять время измерения в процессе записи лидарных сигналов, что можно реализовать в одном лидаре и доказано конкретными экспериментами [4, 6, 21]. Подбирая время измерения, частоту и энергию импульсов можно снизить величину измеряемой концентрации исследуемых молекул (предел обнаружения), тем же самым лидаром КРС и увеличить расстояние зондирования.
5. Выполненные исследования и результаты моделирования свидетельствуют о возможности создания лазерной системы с низким потреблением электроэнергии и долговременной автономной работой.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 19-42-230004 и 19-45-230009).

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. Дьяченко В. В. Лазерные системы в экологическом мониторинге окружающей среды и контроле технологической деятельности предприятий. [Текст] / В. В. Дьяченко, В. Г. Шеманин // Экология и промышленность России, 2021. Т. 25. № 10. С. 36–42. DOI: 10.18412/1816-0395-2021-10-36-42
2. <https://minobrnauki.gov.ru/action/poligony/>, 2021.
3. Дьяченко В. В. Науки о земле: Уч. [Текст] / Дьяченко В. В., Дьяченко Л. Г., Девисилов В. А. Под ред. Девисилова В. А. - М.: НИЦ ИНФРА, 2019. 345 с.
4. Привалов В. Е. Лазеры и экологический мониторинг атмосферы. [Текст] / В. Е. Привалов, А. Э. Фотиади, В. Г. Шеманин. СПб.: Лань, 2013. 288 с.
5. Гигиенические нормативы ГН 2.1.6.3492-17 (с изменениями на 31 мая 2018 года). Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений. 51 с.
6. Privalov V. E. Hydrogen Sulfide Molecules Lidar Sensing in the Atmosphere [Текст] / V. E. Privalov, V. G. Shemanin // Optical Memory and Neural Networks, 2018. V. 27(2), 120–131. DOI: 10.3103/S1060992X18020091

7. Privalov V. E. Accuracy of lidar measurements of the concentration of hydrofluoride molecules in the atmospheric boundary layer. [Текст] / V. E. Privalov, V. G. Shemanin // Measurement Techniques. 2020. V. 63. No. 7. P. 543–548. DOI 10.1007/s11018-020-01821-0
8. Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere. [Текст] / Ed. C. Weitkamp, SSOS, vol. 102, New-York, Springer Science+ Business Media Inc, 2005, 455 p. <https://doi.org/10.1007/b106786>
9. Борейшо А. С. Лазеры. Применения и приложения. [Текст] / А. С. Борейшо, И. М. Евдокимов, С. В. Ивакин. Под ред. А.С. Борейшо. СПб.: Лань, 2016. 520 с.
10. Privalov V. E. A lidar equation with allowance for the finite width of the lasing line. [Текст] / V. E. Privalov, V. G. Shemanin // [Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics](#). 2015. V. 79. No. 2. P. 149–159.
11. Privalov V. E. Taking the line width of the laser radiation into account in the lidar equation for Raman scattering of light [Текст] / V. E. Privalov, V. G. Shemanin // J. Opt. Technology. 2015. V. 82. No. 9. P. 582–586. <https://doi.org/10.1364/JOT.82.000582>
12. Воробьев А. Е. Основы природопользования: экологические, экономические и правовые аспекты [Текст] / А. Е. Воробьев, В. В. Дьяченко, О. В. Вильчинская, А. В. Корчагина. Под редакцией В. В. Дьяченко. Уч. пособие (гриф УМО).– Изд. Феникс, Ростов-на-Дону, 2007. 542 с.
13. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. [Текст] / Р. Межерис. – М.: Мир, 1987 – 550 с.
14. Привалов В. Е. Параметры лидаров для дистанционного зондирования газовых молекул и аэрозоля в атмосфере. [Текст] / В. Е. Привалов, В. Г. Шеманин. С-Пб.: Балт. ГТУ. 2001. 56 с.
15. Лазерный контроль атмосферы. [Текст] / Под. ред. Э. Д. Хинкли. М.: Мир, 1979 416 с.
16. Свердлов Л. М. Колебательные спектры многоатомных молекул. [Текст] / Л.М. Свердлов М. А. Ковнер Е. П. Крайнов. М.: Наука, 1970. 560 с.
17. Долгих Г. И. Лазеры. Лазерные системы. [Текст] / Г. И. Долгих, В. Е. Привалов - Владивосток: Изд. Дальнаука. 2009. 202 с.
18. Зуев В. Е. Спектроскопия атмосферы. [Текст] / В. Е. Зуев, Ю. С. Макушкин, Ю. Н. Пономарев. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 247 с.
19. Донченко В. А. Атмосферная электрооптика. [Текст] / В. А. Донченко, М. В. Кабанов, Б. В. Кауль, И. В. Самохвалов. Томск: Изд. НТЛ, 2010. 220 с.
20. Справочник по лазерам. [Текст] / Под ред. А. М. Прохорова Т. И. – М.: Советское Радио, 1978. 591 с.
21. Dyachenko V. V. Laser Systems for the Pollutants Control in the Oil and Gas Industry [Текст] / V. V. Dyachenko, P. V. Chartyi, V. G. Shemanin // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. 272–032003 – 6 pp. IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/272/3/032003

Greenhouse molecules in the atmosphere lidar monitoring

¹ Vladimir V. Dyachenko, ^{1,2} Valery G. Shemanin

¹ *Novorossiysk Polytechnic Institute of Kuban State Technological University, Novorossiysk, Russia*

² *353919, Russia, Novorossiysk, st. Myskhakskoe highway, 75, branch of the Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov in Novorossiysk*

The possibility of using lidar technologies to remotely measure the concentrations of climatically active gases at the carbon polygons for their background monitoring was analyzed. Computer simulations of the lidar equation to measure the concentration of carboxylic cycle molecules from the background and above (in the range from $4.1 \cdot 10^{15}$ to $1.0 \cdot 10^{25}$ mol./m³) by lidar of Raman scattering of light in the atmosphere at probing distances up to 100 m in synchronous photon counting mode showed this possibility. Based on the results of modeling, the optimal parameters of such lidar were determined. It is obtained that when lidar probes the Raman scattering of atmospheric light using laser radiation at a wavelength of 405 nm, it is possible to record the concentration of all the studied molecules in the gas mixture taking into account their proportion in the atmosphere in the measurement time range from 0.77 μ s to 1009 s.

Key words: greenhouse or climatically active gases, Raman lidar, molecules concentration, ranging distance, laser radiation wavelength, carbon polygon

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

doi: 10.51639/2713-0568_2022_2_4_30

УДК 504.064.37

ГРНТИ 87.15.15, 87.17.15

ВАК 05.11.13

Алгоритм работы аэрозольной лазерной системы дифференциального ослабления в реальном времени

* Веденин Е. И., Сарычев И. А., Чартий П. В.

*Новороссийский политехнический институт (филиал) Кубанского государственного
технологического университета, 353900, Россия, Новороссийск, ул. К. Маркса, 12*

e-mail: * svetokdojdei@mail.ru

Загрязнение окружающей среды и экономические издержки промышленного производства, к которым приводят аэрозольные выбросы, делают актуальной задачу по контролю в реальном времени параметров аэрозолей, таких как массовая концентрация и средний объемно-поверхностный диаметр частиц. Наиболее подходящими для решения указанной задачи являются методы лазерного зондирования. Целью работы является разработка устройства лазерной системы на основе метода дифференциального ослабления, позволяющая измерять сигналы ослабления на трех длинах волн с последующим расчетом параметров аэрозольных выбросов. В работе разработано устройство и принцип действия лазерной системы, позволяющей контролировать массовую концентрацию и средний объемно-поверхностный диаметр частиц. Описан принцип действия системы, согласно которому последовательно осуществляются одновременная регистрация сигналов ослабленного и опорного лазерного излучения фотоприемниками, обработка сигналов в блоке формирования, регистрации и обработки сигнала, расчёт контролируемых параметров по измеренным сигналам в ПК.

Ключевые слова: лазерная система, массовая концентрация, средний объёмно-поверхностный диаметр, аэрозольные выбросы.

Введение

Аэрозольные выбросы вносят значительный вклад в загрязнение окружающей среды. Поступая в атмосферу в составе выбросов промышленного производства, аэрозоли не только наносят вред природе и здоровью человека, но и влекут значительные экономические потери для предприятий. Издержки производства складываются из потерь производимого сырья, выбрасываемого в атмосферу в виде аэрозольных выбросов, штрафов и увеличения платы за негативное воздействие на окружающую среду. Контроль параметров аэрозольных выбросов в реальном времени позволяет уменьшить негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека и сократить издержки производства за счёт оперативного обнаружения выброса. Наиболее информативными параметрами аэрозольных выбросов являются массовая концентрация и средний объёмно-поверхностный диаметр частиц.

Для контроля указанных параметров в реальном времени наиболее подходящим является способ лазерного зондирования на основе метода дифференциального ослабления. Преимуществами данного метода являются простота технической реализации и юстировки, возможность зондирования высокотемпературных аэрозольных потоков большой оптической плотности, малая чувствительность к вибрациям [1–5]. Целью работы является разработка устройства и алгоритма действия лазерной системы на основе метода дифференциального ослабления, позволяющая измерять сигналы ослабления на трёх длинах волн с последующим расчётом параметров аэрозольных выбросов.

Метод дифференциального ослабления

В основе метода дифференциального ослабления лежит решение обратной задачи для уравнения [6], которое можно представить в следующем виде:

$$\tau_{\lambda} = \frac{\pi \cdot C_n \cdot l}{4} \cdot \int_0^{\infty} d^2 \cdot Q(d, \lambda, m) \cdot f(d) dd, \quad (1)$$

где τ_{λ} – оптическая плотность;

C_n – счётная концентрация частиц;

λ – длина волны зондирующего излучения;

Q – фактор эффективности ослабления для одиночных частиц;

l – оптическая длина зондирования;

d – диаметр частиц;

m – комплексный показатель преломления материала частиц.

Усреднённый фактор эффективности ослабления рассчитывается выражением:

$$\bar{Q}(d, \lambda, m) = \frac{\int_0^{\infty} d^2 \cdot Q(d, \lambda, m) \cdot f(d) dd}{\int_0^{\infty} d^2 \cdot f(d) dd}. \quad (2)$$

Массовая концентрация взвешенных частиц через счётную выражается формулой:

$$C_m = C_n \frac{\pi \cdot \rho_p}{6} \cdot \int_0^{\infty} d^3 \cdot f(d) dd. \quad (3)$$

При замене в уравнении (1) счётной концентрации на массовую получаем выражение:

$$\tau_{\lambda} = \frac{1,5 C_m \cdot l \cdot \bar{Q}(d, \lambda, m)}{\rho_p \cdot d_{32}}, \quad (4)$$

где ρ_p – плотность материала частиц.

Массовая концентрация из (4) по рассчитанным значениям среднего объёмно-поверхностного диаметра частиц и усреднённого фактора эффективности и по измеренным оптическим плотностям вычисляется по формуле:

$$C_m = \frac{\tau_{\lambda i} \cdot \rho_p \cdot d_{32}}{1,5 l \cdot \bar{Q}(d, \lambda, m)}. \quad (5)$$

Физическая модель метода дифференциального ослабления основана на взаимодействии монохроматического излучения с полидисперсной средой по теории Ми и сохранении инвариантности усреднённого фактора эффективности ослабления относительно вида функции распределения частиц по размерам [6].

Средний объёмно-поверхностный диаметр аэрозольных частиц вычисляется, исходя из того, что отношение измеренных оптических плотностей на двух длинах волн равно отношению рассчитанных усреднённых факторов эффективности ослабления и выражает функцию среднего размера частиц [6]:

$$\frac{\tau_{\lambda_i}}{\tau_{\lambda_j}} = \frac{\bar{Q}(d, \lambda_i, m)}{\bar{Q}(d, \lambda_j, m)} = F_{ij}(d_{32}). \quad (6)$$

Измеренные значения оптических плотностей на разных длинах волн позволяют по формуле (6) рассчитать функцию распределения частиц по размерам $F(d_{32})$. Информация о зависимости отношений усреднённых факторов эффективности от значений среднего объёмно-поверхностного диаметра на длинах волн зондирующего излучения и

рассчитанные значения $F(d_{32})$ дают возможность определить средний объёмно-поверхностный диаметр.

Схема и алгоритм работы лазерной системы

Оптическая схема лазерной системы представлена на рис. 1. Лазерная установка имеет следующее устройство и принцип действия. Источники лазерного излучения 1 генерируют лазерное излучение на трёх длинах волн: 405, 1064, 650 нм. На пути прохождения лазерных лучей установлены светофильтры 2, светоделительные стекла 4, зеркало 3, диафрагма 10, система зеркал 9, расположенных параллельно друг относительно друга. Напротив лазеров установлен фотоприёмник ослабленного излучения 8. Светоделительные стекла 4 и зеркало 3 направляют излучение, не прошедшее через измерительный объём аэрозольного потока 7, на опорный фотоприёмник 5. Также в состав лазерной системы входит блок формирования, регистрации и обработки сигналов, состоящий из измерительных и опорных синхронных детекторов, усилителя мощности и генератора импульсов [1].

Лазер 16 генерирует излучение на длине волны 532 нм, проходящее сквозь измерительный объём аэрозольного потока 7 под малым углом $\theta \approx 0^\circ$ к оси телескопа 12, расположенного с лазером 16 по одну сторону от аэрозольного потока. В фокусе телескопа 12 расположен выход световода 13, который последовательно подключён к спектрометру 14, подключенному к ПК 15.

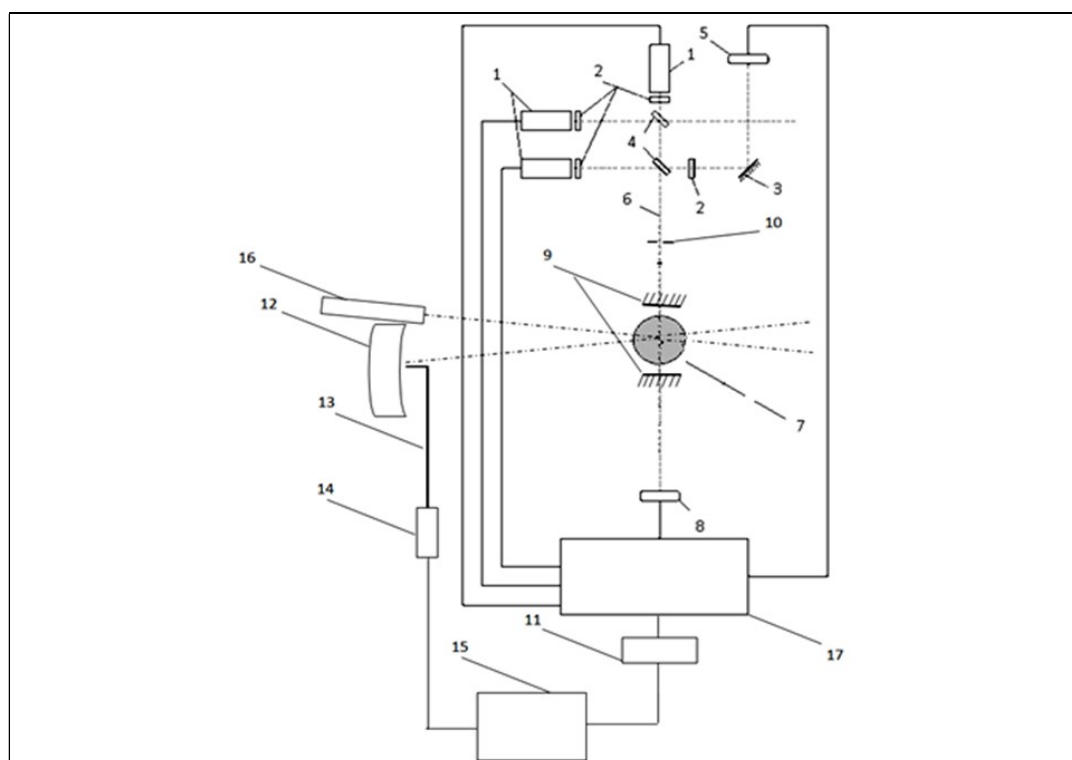
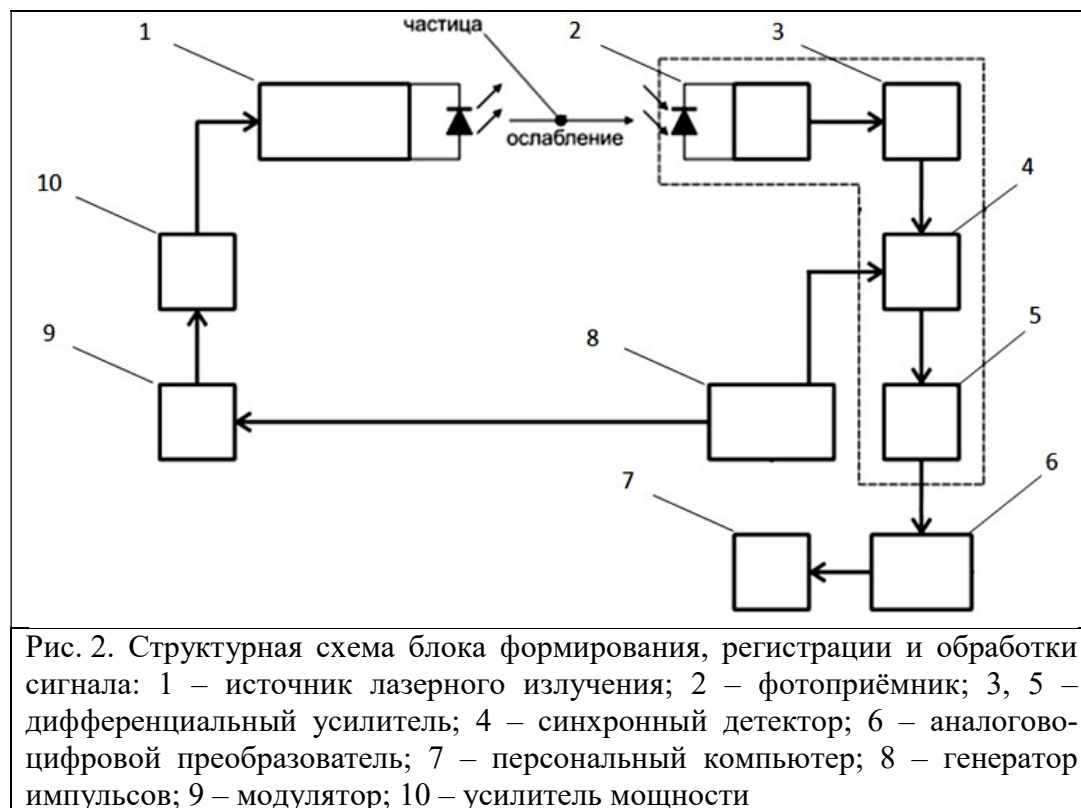


Рис. 1. Оптическая схема лазерной системы: 1 – лазеры на длине волны 650, 1064, 405 нм; 2 – светофильтры; 3 – зеркало; 4 – светоделительные стекла; 5 – опорный фотоприёмник; 6 – лазерный пучок; 7 – аэрозольный поток; 8 – фотоприёмник ослабленного излучения; 9 – система зеркал; 10 – диафрагма; 11 – АЦП; 12 – телескоп; 13 – световод; 14 – Спектрометр; 15 – ПК; 16 – лазер на длине волны 532 нм; 17 – блок формирования, регистрации и обработки сигнала

Структурная схема блока формирования, регистрации и обработки сигнала представлена на рис. 2.



Алгоритм работы лазерной системы заключается в следующем.

Лазерами 1 генерируется излучение на трёх длинах волн (405 нм, 1064 нм, 650 нм) с частотой $5 \dots 10^3$ Гц. На пути прохождения лазерных лучей размещены светофильтры 2, посредством которых выделяется излучение на нужных длинах волн. Лазерные излучения проходят через светоделительные стекла 4. При этом часть прошедшего через светоделительные стёкла 4 излучения, отразившись от зеркала 3, поступает на опорный фотоприёмник 5, часть излучения, поступающая на систему зеркал 9, проходит сквозь измерительный объём аэрозольного потока 7.

Перед системой зеркал 9, расположенных параллельно друг относительно друга, установлена диафрагма, предназначенная для отсекаания лучей, возникающих в результате многократного отражения при прохождении лучами светоделительных стёкол 4.

Многократное отражение лазерных лучей от параллельно расположенных зеркал приводит к увеличению оптического пути проходимого лучами и увеличивает ослабление лазерного излучения регистрируемого фотоприёмником ослабленного излучения 8.

Проходящее сквозь аэрозольный поток излучение ослабляется и поступает на фотоприёмник ослабленного излучения 8, где регистрируется.

Зарегистрированное фотоприёмником 8 излучение в форме электрических сигналов последовательно проходит через дифференциальный усилитель, синхронный детектор, повторное усиление дифференциальным усилителем. Таким образом, в лазерной системе реализуется двойное синхронное детектирование, предназначенное для повышения чувствительности фотоприёмного устройства [1]. Электрический сигнал со второго дифференциального усилителя поступает на АЦП. Блок обработки сигналов использует

шесть каналов АЦП. В АЦП электрический сигнал преобразуется в цифровой, после чего поступает на обработку в ПК.

Лазер 16 модулирует излучение на длине волны 532 нм. Проходящее сквозь в измерительный объем лазерное излучение, рассеявшись в аэрозольном потоке, попадает в телескоп 12. Отраженное в фокус телескопа излучение попадает на вход световода 13, через который передается на спектрометр 14, где преобразовывается в цифровой сигнал и по отдельному от сигналов ослабления каналу поступает на обработку в ПК 15.

Рассмотрим порядок расчёта массовой концентрации и среднего объёмно-поверхностного диаметра частиц в ПК.

Исходя из закона Бугера-Ламберта-Бера:

$$I = I_0 e^{-kcl}, \quad (7)$$

где I – интенсивность ослабленного излучения;

I_0 – интенсивность падающего излучения;

k – коэффициент ослабления;

c – массовая концентрация, г/м³;

l – оптическая длина зондирования, м.

Массовая концентрация рассчитывается по формуле:

$$c = \frac{\ln \frac{I_0}{I}}{kl}. \quad (8)$$

Для расчёта концентрации по измеренным сигналам ослабления необходимо вычислить коэффициенты ослабления для каждой длины волны зондирующего излучения.

Из формулы (8) получаем:

$$kcl = \ln \frac{I_0}{I}. \quad (9)$$

При умножении обеих частей равенства на объёмный расход (V) получаем:

$$kclV = V \ln \frac{I_0}{I} \quad (10)$$

Проинтегрировав обе части уравнения по времени t , получаем:

$$\int_{t_1}^{t_2} kclV dt = V \int_{t_1}^{t_2} \tau dt. \quad (11)$$

Исходя из того, что масса вещества определяется по формуле:

$$m = V \int_{t_1}^{t_2} c dt, \quad (12)$$

получаем:

$$klm = V \int_{t_1}^{t_2} \tau dt, \quad (13)$$

откуда:

$$k = \frac{V \int_{t_1}^{t_2} \tau dt}{ml}. \quad (14)$$

Таким образом, по измеренным сигналам ослабления и опорному сигналу, известному оптическому пути и рассчитанным значениям коэффициентов ослабления для длин волн зондирующего излучения с помощью формулы (8) возможно рассчитывать значения массовой концентрации.

Средний объёмно-поверхностный диаметр частиц можно определить, исходя из зависимости усреднённого фактора эффективности ослабления от среднего объёмно-поверхностного диаметра [7]. Кривые зависимости усредненного фактора эффективности ослабления на трёх длинах волн зондирующего излучения (405, 650, 1064 нм) от среднего объёмно-поверхностного диаметра, представлены на рис. 3.

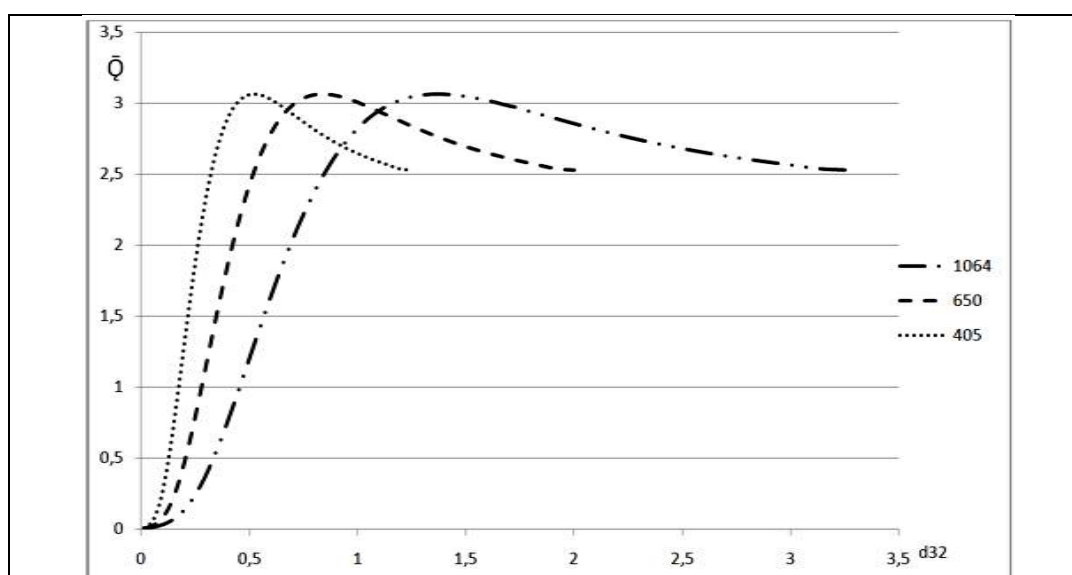


Рис. 3. Зависимость среднего объёмно-поверхностного диаметра от усреднённых факторов эффективности

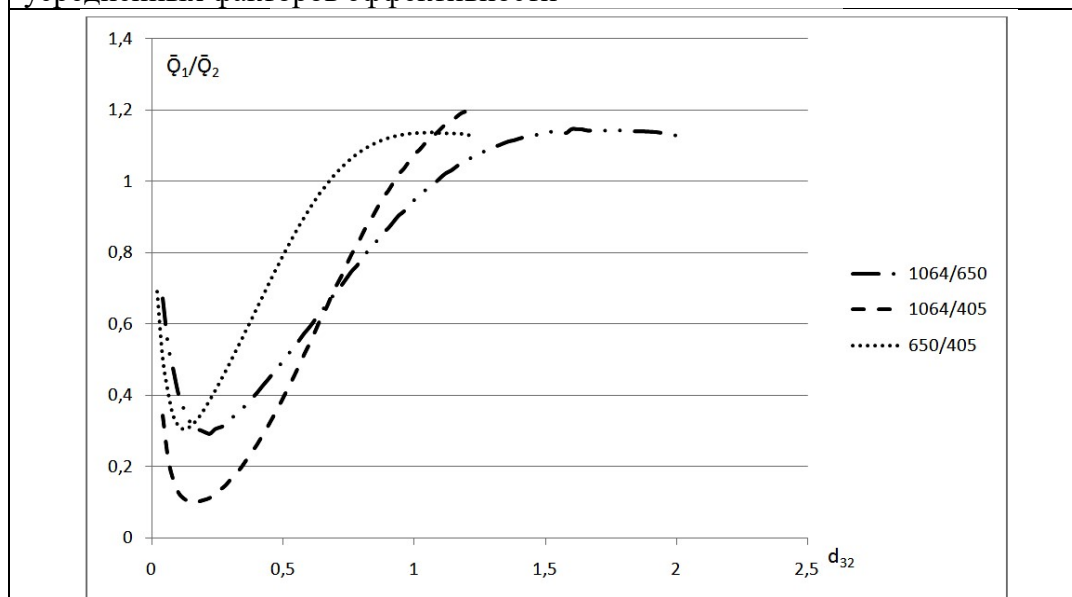


Рис. 4. Зависимость среднего объёмно-поверхностного диаметра от отношения усреднённых факторов эффективности на двух длинах волн

Известные зависимости усреднённого фактора эффективности ослабления на трёх длинах волн от среднего объёмно-поверхностного диаметра позволяют построить кривые зависимости отношения усреднённых факторов эффективности на двух длинах волн от среднего объёмно-поверхностного диаметра (рис. 4).

Исходя из формулы (6), отношения усреднённых факторов эффективности на двух длинах волн равны отношениям оптических плотностей на этих же длинах волн. По отношениям оптических плотностей, рассчитанных по измеренным сигналам ослабления, и построенным графическим зависимостям на рис. 4 определяется средний объёмно-поверхностный диаметр частиц.

Таким образом, по измеренным на трёх длинах волн сигналам ослабления можно рассчитать значение среднего объёмно-поверхностного диаметра частиц.

Заключение

Разработано устройство лазерной системы, которая позволяет измерять сигналы ослабления лазерного излучения методом дифференциального ослабления на трех длинах волн. Зарегистрированные фотоприемником сигналы ослабления проходят обработку в блоке формирования, регистрации и обработки сигнала. По измеренным сигналам с помощью известных зависимостей в ПК рассчитываются контролируемые параметры аэрозольных выбросов: массовая концентрация и средний объемно-поверхностный диаметр частиц.

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.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ, проект 19-42-230004 и проект 19-45-230009.

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. Веденин Е. И., Сарычев И. А., Чартий П. В., Чербачи Ю. В., Шеманин В. Г. Лазерная система для исследования аэрозольных потоков методом дифференциального ослабления и рассеяния в видимой и ближней ИК области // Лазеры. Измерения. Информация. 2021. Т. 1. № 2(2). С. 17–25.
2. Веденин Е. И., Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Лазерная система дифференциального ослабления для измерения среднего объемно-поверхностного диаметра аэрозольных частиц // XI Международная конференция по фотонике и информационной оптике. Сборник научных трудов. (г. Москва, 26–28 января 2022 г.). г. Москва, 2022. С. 357–358.
3. Веденин Е. И., Дьяченко В. В., Закалова Е. Ю., Чартий П. В. Измерение среднего объемно-поверхностного диаметра частиц при осуществлении автоматизированного непрерывного контроля аэрозольных выбросов цементного производства // Лазерно-информационные технологии – 2021. Труды XXIX Международной Конференции. (г. Новороссийск, 13–18 сентября 2021 г.). г. Новороссийск, 2021. С. 195–197.
4. Веденин Е. И. Исследование промышленных аэрозольных потоков методами лазерного зондирования под различными углами // Материалы конференции ВНКСФ-25. (Крым, 19-26 апреля 2019 г.). Крым, 2019 г., С. 446–447.
5. Веденин Е. И., Дьяченко В. В., Чартий П. В., Шеманин В. Г. Лазерный контроль среднего объемно-поверхностного диаметра частиц для оценки параметров аэрозольного

загрязнения атмосферы // Безопасность в техносфере. 2017. № 6(69) ноябрь-декабрь. С. 3–11.

6. Архипов В. А. Модифицированный метод спектральной прозрачности измерения дисперсности аэрозолей // Оптика атмосферы и океана. 2007. № 1 С. 48-52.

7. Половченко С. В., Шеманин В. Г., Чартий П. В. Восстановление функции распределения модифицированным методом спектральной прозрачности // АИНР : сб. доклад 22 международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация 2012». Санкт-Петербург : Изд-во. Политехн. ун-та, 2012. Т. 1. С. 313–321.

Operation algorithm of aerosol laser system for differential relaxation in real time

Vedenin E. I., Sarychev I. A., Chartiy P. V.

*Novorossiysk Polytechnic Institute of Kuban State Technological University
353900, Novorossiysk, 20 Karl Marx St.*

Environmental pollution and industrial production economical costs, which are caused by aerosol emissions, make actual the task of control aerosol parameters, such as mass concentration and middle volume-surface particles diameter. The most suitable to solving this task are laser sensing methods. The work purpose is development arrangement of laser system based by differential attenuation method, which allow to measure attenuation signals at three wavelengths with following counting aerosol emissions parameters. In the work is developed arrangement and operation principle of laser system, which allow to control mass concentration and average volume-surface particles diameter. The principle of operation of the system is described, according to which simultaneous registration of attenuated and reference laser radiation signals by photo detectors, signal processing in the signal generation, registration and processing unit, calculation of controlled parameters based on measured signals in a PC are carried out sequentially.

Key words: laser system, mass concentration, volume-surface diameter, aerosol emissions

ЛАЗЕРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

doi: 10.51639/2713-0568_2022_2_4_38

УДК 535.24

ГРНТИ 29.33.43

Определение параметров оптических покрытий эллипсометрическими методами

Шеманин В. Г., * Мкртычев О. В.

Филиал БГТУ им. В. Г. Шухова в г. Новороссийске
 353919, Россия, Новороссийск, Мысхакское шоссе 75,

е-mail: shemanin-v-g@nb-bstu.ru, * mkrtychev-o-v@nb-bstu.ru

Расширение области применения наноразмерных покрытий в современных технологиях, в том числе и полимерных, ставит вопросы об определении параметров таких покрытий (например, при использовании таких материалов в качестве покрытий силовой оптики). Приводятся результаты экспериментальных исследований определения оптических и геометрических параметров наноразмерных оптических покрытий. В данной статье даны значения величин показателя преломления и толщины плёнок из диоксидов кремния и титана, нанесённых на стеклянную подложку.

Ключевые слова: эллипсометрия, оптические материалы.

Вопросы определения различных параметров тонкоплёночных покрытий представляют сейчас большой практический интерес для многих технологических областей [1–12]. Авторы данной статьи также проводили исследования и эксперименты по этой теме [13–18]. Образцы для исследования представляли листовое флоат-стекло с нанесённым на него оксидным одно- или многослойным покрытием из диоксидов кремния и титана. На поверхность подготовленного стекла наносились с двух сторон функциональные покрытия, подготовленные из однокомпонентных растворов. Поскольку покрытия из коллоидных растворов – золей – наносятся на холодное стекло, то для закрепления плёнки изделие подвергалось непродолжительному обжигу при температуре ниже температуры начала деформации стеклянной подложки.

В таблице 1 указаны параметры, характеризующие процесс изготовления некоторых образцов: $T_{\text{л}}$, $T_{\text{и}}$ – пропускание образца на лицевой и изнаночной стороне, C – концентрация раствора покрытия, ν – скорость вывода образца из золя и η – вязкость золя.

Таблица 1

Параметры, характеризующие процесс изготовления исследуемых образцов

№ обр	$T_{\text{л}}, \%$	$T_{\text{и}}, \%$	$C, \%$	$\nu, \text{мм} \cdot \text{с}^{-1}$	$\eta, 10^{-3} \text{Па} \cdot \text{с}$
1	76,7	76,7	2,5	3,8	4,76
2	76,1	79,2	2,5	5,8	4,76
3	67,1	72,5	2,5	17,3	4,76
4	69,7	70,7	5,0	3,8	2,97
5	66,8	74,4	5,0	5,8	2,97
6	73,0	72,1	5,0	17,3	2,97
7	69,8	-	5,0	3,8	-

Рентгенофазовый анализ позволил более точно определить соотношение элементов и их оксидов в исследуемой системе (табл. 2, 3).

Таблица 2

Значения фаз основных элементов (масс. %)

образец	Si	Na	Ca	K	Ti
1	33,96	1,86	1,80	0,21	0,01
	0,10	0,05	0,05	0,01	0,01
2	34,10	2,44	0,545	0,22	0,01
	0,10	0,06	0,03	0,01	0,01
3	34,35	2,42	0,55	0,20	0,02
	0,10	0,06	0,03	0,01	0,01
4	33,90	2,24	0,53	0,22	1,03
	0,10	0,06	0,03	0,01	0,04
5	33,57	2,60	0,57	0,03	0,77
	0,11	0,06	0,03	0,01	0,03
6	33,70	2,02	0,59	0,03	0,99
	0,10	0,05	0,03	0,01	0,03
7	33,55	2,31	0,54	0,04	1,53
	0,11	0,06	0,03	0,01	0,05

Таблица 3

Значения фаз некоторых оксидов (масс. %)

образец	SiO ₂	Na ₂ O	CaO	TiO ₂
1	71,25	14,49	8,57	0,02
	0,21	0,18	0,15	0,01
2	74,55	13,17	8,19	0,03
	0,25	0,15	0,13	0,02
3	70,49	12,39	8,26	0,01
	0,20	0,16	0,13	0,01
4	71,78	9,05	9,38	0,02
	0,23	0,15	0,13	0,01
5	71,64	12,55	9,34	1,39
	0,21	0,13	0,12	0,06
6	73,01	11,37	9,19	1,44
	0,24	0,14	0,13	0,04
7	72,00	10,97	9,97	3,05
	0,24	0,16	0,15	0,10

Обработка и расчёт данных, определение концентраций элементов осуществлялось с помощью специализированного программного обеспечения. Съёмка дифрактограммы и последовательный анализ элементов на рентгенофлуоресцентном спектрометре образцов проводились с полной системой дифракции XRD 12-ти позиционным магазином при следующих параметрах: дифрактометр – ARL X TRA, трубка рентгеновская – (Cu),

напряжение на трубке – 40 кВ, анодный ток – 35 мА, детектор – Пелтье, скорость сканирования – 8 град·мин⁻¹.

Далее полученные образцы исследовались методами эллипсометрии и спектрофотометрии на предмет определения показателей преломления и толщин плёнок покрытия. Измеренные данные описывались с помощью той или иной модели. Было рассмотрено несколько моделей с дисперсионными формулами. В их числе новая дисперсионная формула для аморфных материалов и формулы Коши, Брио, Хартманна, Конради, Селлмейера.

Новая дисперсионная формула для аморфных материалов имеет вид

$$n(\omega) = n_{\infty} + \frac{B_j(\omega - \omega_j) + C_j}{(\omega - \omega_j)^2 + \Gamma_j^2}, \quad j=1, 2, 3,$$

где $B_j = \frac{f_j}{\Gamma_j} [\Gamma_j^2 - (\omega_j - \omega_g)^2]$, $C_j = 2f_j\Gamma_j(\omega_j - \omega_g)$, f_j – описывает амплитуду коэффициента экстинкции, эВ (обычно $0 < f_j < 1$); Γ_j – описывает ширину пика абсорбции, эВ (обычно $0,2 < \Gamma_j < 8$); ω_j – близко к значению энергии в максимуме коэффициента экстинкции, эВ (обычно $1,5 < \omega_j < 10$); ω_g – энергия запрещённой зоны, эВ (всегда $\omega_g < \omega_j$).

Эмпирические дисперсионные формулы Коши:

для прозрачных материалов:

$$\begin{cases} n(\lambda) = A + \frac{10^4 B}{\lambda^2} + \frac{10^9 C}{\lambda^4}, \\ k(\lambda) = 0 \end{cases}$$

для материалов с поглощением:

$$\begin{cases} n(\lambda) = A + \frac{10^4 B}{\lambda^2} + \frac{10^9 C}{\lambda^4} \\ k(\lambda) = 10^{-5} D + \frac{10^4 E}{\lambda^2} + \frac{10^9 F}{\lambda^4} \end{cases}$$

где A – безразмерная величина, при этом $n(\lambda) \xrightarrow{\lambda \rightarrow \infty} A$; B – описывает кривизну и амплитуду показателя преломления на средних длинах волн видимого диапазона, нм²; C – описывает кривизну и амплитуду показателя преломления для малых длин волн ультрафиолетового диапазона, нм⁴. Обычно $0 < |C| < |B| < 1 < A$. Величины D , E и F имеют аналогичный смысл. Таблица 4 показывает используемые в программном обеспечении DeltaPsi2 величины эмпирических параметров формулы Коши.

Таблица 4

Параметры для формулы Коши в случае прозрачных материалов

Материал	A	B	C	D	E	F	Оптический диапазон (эВ)
SiO ₂	1,447	3660	0	0	0	0	от 1 до 6
TiO ₂	2,374	1,932	6.855	0	0	0	от 1,5 до 6

Эмпирические дисперсионные формулы Брио:

$$\begin{cases} n^2(\lambda) = A_0 + 10^{-2} A_1 \lambda^2 + \frac{10^{-2} A_2}{\lambda^2} + \frac{10^{-4} A_3}{\lambda^4} + \frac{10^{-6} A_4}{\lambda^6} + \frac{10^{-7} A_5}{\lambda^8}, \\ k(E) = 0 \end{cases}$$

где коэффициенты разложения Лорена имеют размерности: A_0 – безразмерная величина, A_1 – нм⁻², A_2 – нм², A_3 – нм⁴, A_4 – нм⁶, A_5 – нм⁸.

Эмпирические дисперсионные формулы Хартманна для прозрачных материалов:

$$\begin{cases} n(E) = A + \frac{C}{\lambda(E) - B}, \\ k(E) = 0 \end{cases}$$

$A > 1$ – безразмерная величина, при этом $n(\lambda) \xrightarrow{\lambda \rightarrow \infty} A$; B – резонансная длина волны при которой $n(\lambda) \xrightarrow{\lambda \rightarrow B} \infty$, нм; C – определяет амплитуду показателя преломления для длин волн стремящихся к B , нм.

В таблице 5 приводятся используемые в программном обеспечении DeltaPsi2 величины эмпирических параметров формулы Хартманна для оксидов кремния и титана.

Таблица 5

Параметры для формулы Хартманна в случае прозрачных материалов

Материал	A	B	C	Оптический диапазон (эВ)
SiO ₂	1,429	1124,312	8,335	от 0,7 до 6
TiO ₂	1,890	178,621	203,804	от 1,5 до 4

Эмпирические дисперсионные формулы Конради для прозрачных материалов:

$$\begin{cases} n(\lambda) = A + \frac{10^2 B}{\lambda} + \frac{10^9 C}{\lambda^{3,5}}, \\ k(E) = 0 \end{cases}$$

A – безразмерная величина, при этом $n(\lambda) \xrightarrow{\lambda \rightarrow \infty} A$; B – описывает кривизну и амплитуду показателя преломления на средних длинах волн видимого диапазона, нм; C – описывает кривизну и амплитуду показателя преломления для малых длин волн ультрафиолетового диапазона, нм^{3,5}. Обычно $0 < |C| < |B| < 1 < A$. Примерные величины, используемые в программном обеспечении DeltaPsi2, эмпирических параметров формулы Конради для оксидов кремния и титана приведены в таблице 6.

Таблица 6

Параметры модели Конради для прозрачных материалов

Материал	A	B	C	Оптический диапазон (эВ)
SiO ₂	1,427	0,111	0,00513	от 0,7 до 6
TiO ₂	2,500	-1,148	0,731	от 1,5 до 4

Эмпирические дисперсионные формулы Селлмейера:

$$\begin{cases} n^2(\lambda) = A + B \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_0^2}, \\ k(\lambda) = 0 \end{cases}$$

$A \geq 1$ – безразмерная величина, такая что $n(\lambda) \xrightarrow[\substack{\lambda \rightarrow \infty, \\ B \sim 0}]{\lambda \rightarrow \infty} A$ (она представляет собой вклад УФ-диапазона в формулу); $B(A \leq B)$ – безразмерная величина, определяющая форму показателя преломления в видимом диапазоне спектра; λ_0 – резонансная длина волны при которой $n^2(\lambda) \xrightarrow{\lambda \rightarrow \lambda_0} \infty$, нм².

Программное обеспечение обрабатывало данные и выбирало формулу, которая наилучшим образом удовлетворяла заданному критерию. В таблице 7 и на рис.1 показаны результаты работы и моделирования поверхности для некоторых образцов.

Таблица 7

Значения показателей преломления и толщин плёнок

Состав плёнки	SiO ₂				TiO ₂		
n	1,46	1,46	1,47	1,47	1,97	1,97	1,99
d , нм	94	99	87	91	243	207	230

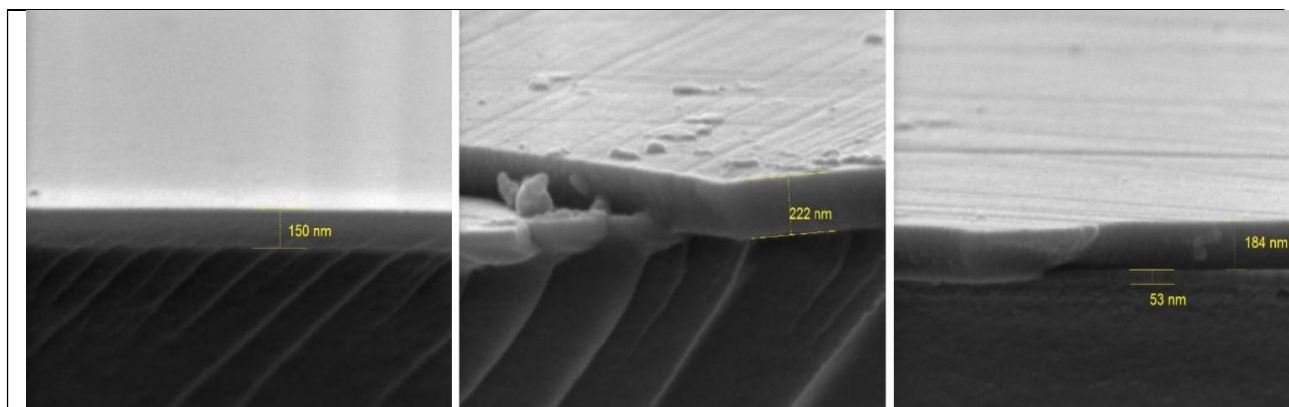


Рис. 1 Слева – однослойная плёнка диоксида кремния с толщиной 150 нм, в центре – однослойная плёнка диоксида титана с толщиной 222 нм, справа – двухслойная плёнка с верхним слоем диоксида титана с толщиной 184 нм и нижним слоем диоксида кремния с толщиной 53 нм

Таким образом, были обработаны результаты экспериментальных исследований и получены величины показателей преломления и величины толщин однослойных и многослойных плёнок из диоксидов кремния и титана, нанесённых на стеклянную подложку.

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. Мажукин А. В., Королёва О. Н. Расчёт оптических характеристик алюминия // Математическое моделирование. 2010. Т. 22. № 5. С. 15–28.
2. Королева О. Н., Мажукин В. И. Математическое моделирование лазерного плавления и испарения многослойных материалов // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2006. Т. 46. № 5. С. 887–901.
3. Mazhukin V. I., Mazhukin A. V., Demin M. M., Shapranov A. V. Nanosecond laser ablation of target al in a gaseous medium: explosive boiling // Applied Physics A: Materials Science & Processing. 2018. Т. 124. № 3. Р. 237.
4. Фёдоров А. В., Рождественский Ю. В. Отражение и рассеяние света от трёхслойной структуры с двумя шероховатыми границами раздела // ЖТФ. 1993. Т. 63. Вып. 3. С. 1–13.
5. Ивлев Г. Д., Нуприенок И. С., Чапланов А. М., Шибко А. Н. Влияние наносекундного лазерного нагрева на фазовый состав и электрофизические характеристики тонкоплёночной системы Ti–Si // ЖТФ. 1993. Т. 63. Вып. 7. С. 87–92.
6. Дианов Е. М., Коряковский А. С., Марченко В. М., Лебедев В. Ф., Пименов В. Г., Прохоров А. М. Очистка и легирование кварцевого стекла при лазерной аэрозольной дистилляции // ЖТФ. 1993. Т. 63. Вып. 11. С. 196–200.
7. Куликов К. Г. Моделирование тепловых процессов, вызываемых воздействием лазерного излучения на органические среды // ЖТФ. 2009. Т. 79. Вып. 2. С. 96–103.
7. Садыков Н. Р., Скоркин Н. А. Математическое моделирование процесса взаимодействия излучения с наночастицами // ЖТФ. 2009. Т. 79. Вып. 9. С. 83–88.

8. Сетейкин А. Ю., Красников И. В. Анализ тепловых эффектов, возникающих при взаимодействии лазерного излучения с многослойными покрытиями // Известия вузов. Физика. 2006. № 10. С. 90–94.
9. Болотов В. В., Давлеткильдеев Н. А., Коротенко В. Е., Росликов В. Е., Стенькин Ю. А. Исследование слоёв нанокompозита пористый кремний – оксид олова с помощью метода спектральной эллипсометрии // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 11. С. 52–57.
10. Биленко Д. И., Сагайдачный А. А., Галушка В. В., Полянская В. П. Определение оптических свойств и толщины нанослоёв по угловым зависимостям коэффициента отражения // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 10. С. 89–94.
11. Царькова О. Г. Оптические и теплофизические свойства металлов, керамик и алмазных плёнок при высокотемпературном лазерном нагреве // Труды ИОФ РАН. 2004. Т. 60. С. 30–82.
12. Воронина Э. И., Ефремов В. П., Привалов В. Е., Чартий П. В., Шеманин В. Г. Оптическая прочность полимерных материалов при их лазерной абляционной деструкции. // Журнал технической физики. – 2009. – Т. 79. – № 5. – С. 143–145.
13. Аткарская А. Б., Мкртычев О. В., Шеманин В. Г. Изменение показателя преломления наноразмерных пленок при модифицировании стеклянных подложек. // Известия вузов. Физика. – 2012. – Т. 55. – № 8/2. – С. 238–239.
14. Atkarskaya A. B., Mkrtychev O. V., Privalov V. E., Shemanin V. G. Laser Ablation of the Glass Nanocomposites Studies. // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2014. – V. 23. – No. 4. – p. 265–270.
15. Привалов В. Е., Шеманин В. Г., Мкртычев О. В. Метод оценки прочности облучаемой поверхности при лазерной абляции. // Измерительная техника 2018, № 7, С. 34–37.
16. Kolpakova E. V., Atkarskaya A. B., Mkrtychev O. V., Shemanin V. G. SiO₂ barrier layer influence on the glass composites with oxide nano films laser ablation destruction. // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics, 2019, 10 (6), P. 632–636. DOI 10.17586/2220-8054-2019-10-6-632-636.
17. Mkrtychev O. V., Privalov V. E., Shevtsov Yu. V., Shemanin V. G. Study of Laser Ablative Destruction of Composites with Nanoscale Coatings of Hafnium and Zirconium Dioxides. // Optical Memory and Neural Networks, 2020, Vol. 29, No. 2, pp. 142–146. © Allerton Press, Inc., 2020. DOI: 10.3103/S1060992X20020095.
18. Мкртычев О. В., Шеманин В. Г. Способ определения оптической прочности материалов при однократном облучении // Патент на изобретение RU 2694073 C1, 09.07.2019. Заявка № 2018110756 от 26.03.2018.

Determination of parameters of optical coatings by ellipsometric methods

Shemanin V. G., Mkrtychev O. V.

*353919, Russia, Novorossiysk, st. Myskhakskoe highway, 75,
 branch of the Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov in
 Novorossiysk*

The expansion of the field of application of nanoscale coatings in modern technologies, including polymer ones, raises questions about determining the parameters of such coatings (for example, when such materials are used as coatings for power optics). The results of experimental studies of the determination of optical and geometrical parameters of nanosized optical coatings

are presented. This article presents the results of determining the refractive index and thickness of silicon and titanium dioxide films deposited on a glass substrate.

Key words: ellipsometry, optical materials.