

Лазеры. Измерения. Информация



Том 4, № 1 / 2024

Новороссийск
2024

Лазеры. Измерения. Информация. 2024. Том № 04. № 01 (13)
<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 4, № 1 (13)
март 2024 г. – май 2024 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. Кугейко, 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 29.05.2024

© Филиал БГТУ им. В. Г. Шухова в г. Новороссийске, 2024

Содержание:

ЛАЗЕРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Кальчихин В. В., Кобзев А. А., Тихомиров А. А.

Возможности лазерного дисдрометра для определения кинетической энергии
 дождевых осадков

..... стр. 4

ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

Привалов В. Е., Шеманин В. Г.

Лазерная диагностика водорода. Часть 1 стр. 16

*Щукина А. А., Барыкина С. Е., Воробьева Д. А., Пестерева П. В.,
 Салимгареев Д. Д., Южакова А. А., Львов А. Е., Жукова Л. В.*

Исследование микротвёрдости оптических материалов на основе твёрдых
 растворов системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}-\text{AgI}$

..... стр. 27

ЛАЗЕРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Вальшин А. М., Першин С. М.

Вариации импеданса плазмы лампы-вспышки твердотельного лазера при
 емкостной накачке

..... стр. 36

ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

Тарасенко В. Ф., Евтушенко Г. С.

Конференция, рождённая в лихие 90-е стр. 42

ЛАЗЕРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

doi: 10.51639/2713-0568_2024_4_1_4
УДК 535.311, 551.508.77, 621.317.79
ГРНТИ 29.31.29, 37.21.03
ВАК 2.2.6, 2.2.8

Возможности лазерного дисдрометра для определения кинетической энергии дождевых осадков

Кальчихин В. В., Кобзев А. А., *Тихомиров А. А.

*Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения
Российской академии наук*

email: yvk@imces.ru, kaa@imces.ru, *tikhomirov@imces.ru

Рассмотрены методики измерения кинетической энергии (КЭ) интенсивных дождевых осадков, которые наносят ущерб сельскому хозяйству, провоцируют возникновение оползней, а также вызывают эрозию поверхности различных технических средств. Представлена методика определения КЭ на основе измерения микроструктурных характеристик осадков (размеров, количества частиц и скоростей их падения), получаемых с помощью лазерного дисдрометра. Возможности использования методики подтверждены результатами измерения характеристик сильного ливня, прошедшего в Томске летом 2023 г. Проанализировано влияние микроструктурных характеристик капель дождя на величину КЭ, приносимой на подстилающую поверхность. Проведено сравнение результатов определения КЭ с величинами, получаемыми по упрощенным методикам.

Ключевые слова: лазерный дисдрометр, дождевые осадки, кинетическая энергия, микроструктурные характеристики осадков, измерения

Введение

Измерители атмосферных осадков можно разделить на три группы [1]: а) измерители количества (суммы) выпавших осадков, Q (мм) (стандартный осадкомер О-1 [2]); б) измерители интенсивности осадков, I ($\text{мм}\cdot\text{ч}^{-1}$) (пример – измеритель челночного типа – QMR 370 фирмы Vaisala [2]); в) измерители микроструктурных характеристик осадков: вид (дождь, снег, град), форма, эффективный диаметр D (мм) и скорость падения v ($\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$) отдельных частиц [3–6].

В зарубежной литературе измерители последней группы получили наименование дисдрометры (**disdrometer** – **distribution of drop meter**). Высокая точность измерения микроструктурных характеристик осадков обеспечивает возможность на их основе вычислять интегральные характеристики жидких осадков – их интенсивность I и количество Q [4–6].

Измерение микроструктурных характеристик осадков позволяет определять их кинетическую энергию (КЭ). Высокие значения КЭ, приносимой выпадающими жидкими атмосферными осадками, наряду с их интенсивностью и продолжительностью могут спровоцировать возникновение оползней. Преимущество прогнозирования оползневой

опасности на основе контроля потоков энергии состоит в том, что вероятность оползня может возникать до окончания выпадения осадков высокой интенсивности, так как пороговое значение КЭ, передаваемой почве каплями, может быть превышено за интервал времени, меньший, чем продолжительность дождя [7]. Кроме того, интенсивные осадки вызывают эрозию почвы. Понимание механизмов, вызывающих ливневую эрозию почвы, имеет значение для уменьшения ее воздействия на сельское хозяйство и окружающую среду [8], а также для разработки методов устойчивого сохранения и планирования землепользования [9]. При этом решающее значение имеет надежная количественная оценка скорости эрозии и факторов, ее определяющих, к числу которых относится КЭ осадков. Точная оценка КЭ осадков также важна для понимания механизмов и смягчения последствий эрозии передней кромки (leading-edge erosion – LEE) лопастей ветряных электрогенераторов [10]. Эрозионные повреждения ухудшают аэродинамические характеристики лопастей, что приводит к снижению годовой выработки электроэнергии и увеличению времени простоя этих генераторов для ремонта [11]. Хотя на LEE оказывает влияние целый ряд атмосферных явлений, скорость удара капель и общее количество осадков признаются одними из основных внешних факторов эрозии [12]. В настоящей статье представлена апробация методики определения КЭ, приносимой каплями дождя на подстилающую поверхность, на основе микроструктурных характеристик осадков, которые измеряются с помощью лазерного дисдрометра [4, 5]. Также проведены оценка влияния различных параметров дождей на величину КЭ и сравнение получаемых значений КЭ с величинами, рассчитанными по упрощенным методикам.

1. Расчётные соотношения для вычисления кинетической энергии жидких осадков

КЭ дождя является суммой энергий его отдельных капель. Энергия (E_{ki}), переносимая каждой i -той каплей, вычисляется через её параметры по известной формуле:

$$E_{ki} = m_i v_i^2 / 2 = \pi \rho D_i^3 v_i^2 / 12, \quad (1)$$

где m_i – масса капли; v_i – терминальная скорость, с которой капля падает на подстилающую поверхность; ρ – плотность воды, D_i – эквивалентный диаметр сферической капли. КЭ общего числа капель (N), зарегистрированных за 1 мин, определится как сумма кинетических энергий отдельных капель:

$$E_{вр.} = \sum_i^N E_{ki}. \quad (2)$$

Поскольку микроструктурные характеристики капель, как правило, при обычных измерениях осадков не определяются [2], ранее ориентировались на более доступные параметры дождя. В частности, в ряде работ применялись эмпирические зависимости между КЭ ($E_{вр.}$) осадков и их интенсивностью (I) [10, 13–16]. Следует отметить, что КЭ дождя может быть представлена в двух формах:

- 1) КЭ, приносимая на единицу поверхности почвы при выпадении 1 мм осадков – $E_{мм}$, которая измеряется в Дж·м⁻²·мм⁻¹;
- 2) КЭ, доставляемая каплями на единицу подстилающей поверхности за единицу времени – $E_{вр.}$, измеряемая в Дж·м⁻²·мин⁻¹ [17].

Эти величины связаны друг другом следующим образом:

$$E_{вр.} = k I E_{мм}, \quad (3)$$

где k – константа, зависящая от используемых единиц времени.

Соотношение (3), оценивающее КЭ как функцию интенсивности дождя I , наиболее часто

используемое из-за его простоты, было предложено в [18]. Согласно этому соотношению, КЭ (в Дж·м⁻²) дождя интенсивностью I (в мм·ч⁻¹), падающего на единицу поверхности за временной интервал Δt (в ч), равна

$$E_I = (11,9 + 8,73 \lg I) I \Delta t. \quad (4)$$

Если предположить, что интервал Δt равен 1 мин, то, разделив значение, получаемое по формуле (3), на 60, получим $E_{вр.}$ в Дж·м⁻²·мин⁻¹:

$$E_{вр.} = E_I / 60. \quad (5)$$

В [17, 19] представлен обзор ряда эмпирических соотношений, связывающих КЭ и I . Обнаружено, что результаты расчётов КЭ, проведённых по формулам, предложенным различными авторами, значительно расходятся. Возможными причинами этого являются методологические различия в процедурах измерения I и последующих расчётах, использование данных, которые охватывают лишь небольшой диапазон интенсивности осадков, а также различия между географическими местоположениями или погодными системами регионов, в которых производился подбор параметров для конкретных эмпирических соотношений.

Существует ряд методик вычисления КЭ осадков на основе эмпирических выражений, связывающих интенсивность дождя со статистическими характеристиками распределения капель по размеру (Drop Size Distribution – DSD), среди которых выделяются две классические методики [20]. В связи с развитием в последнее время оптических дисдрометров, обеспечивающих автоматическую и непрерывную регистрацию размеров и скоростей падения капель, остановимся на второй методике работы [20], которая использует результаты измерений, получаемые с помощью этих приборов.

Как отмечено выше, дисдрометры измеряют D_i и v_i дождевых капель, по которым можно определить DSD и, соответственно, КЭ. Исходя из этого, в работе [21] сделан вывод о том, что, когда это возможно, КЭ жидких осадков следует не оценивать на основе эмпирических отношений, представляющих КЭ как функцию интенсивности дождя I , а измерять КЭ, используя соотношения (1) и (2) после измерения D_i и v_i отдельных капель.

2. Измерение КЭ с использованием дисдрометра

Разработанный в ИМКЭС СО РАН оптический измеритель характеристик осадков по принципу своей работы является лазерным дисдрометром, так как интегральные характеристики осадков (Q и L) он определяет на основе непосредственного измерения микроструктурных характеристик каждой капли). Работа прибора подробно описана в [4, 5, 22]. Измерительный канал прибора формируется излучателем, состоящим из лазерного генератора линии, который с помощью цилиндрической линзы-коллиматора выдает плоскопараллельный горизонтальный пучок света шириной около 50 мм, и приёмником, основным элементом которого является линейная ПЗС-матрица, состоящая из 768 высокочувствительных элементов размером 63×63 мкм, позволяющая регистрировать с частотой около 20 кГц теневые изображения дождевых капель, проходящих через измерительную площадку размером 48 см². Высокая частота обработки сигнала позволяет измерять характеристики даже самых мелких капель, падающих с максимально возможной для них скоростью. Поскольку в состав приёмника входит массив светочувствительных элементов, настроенных не на регистрацию степени освещённости, а на пороговое срабатывание свет–тень, прибор свободен от недостатка других дисдрометров, который связан с эффектами неравномерного распределения мощности лазерного луча [6]. Характеристики нашего лазерного дисдрометра представлены в таблице.

Характеристики лазерного дисдрометра

Характеристики	Значение
Микроструктурные	
Диапазон размеров регистрируемых частиц (D_i), мм	0,5 ... 10
Погрешность измерения размеров частиц, мм	$\pm 0,033(10 + D_i)$
Диапазон оцениваемых скоростей падения гидрометеоров (v_i), м·с ⁻¹	0,2 ... 20
Погрешность измерения скоростей частиц, м·с ⁻¹	$\pm 0,25(1 + v_i)$
Интегральные	
Погрешность измерения суточного количества жидких осадков (Q) в диапазоне от 0 до 500 мм (без учёта пространственных вариаций и погрешности, создаваемой ветром), мм	$\pm 0,1(1 + Q)$
Диапазон измеряемой интенсивности дождя, мм·ч ⁻¹	0 ... 2000
Чувствительность по количеству выпавших осадков, мм	не хуже 0,0001
Общие	
Возможность регистрации снега и града	Есть
Измерительная площадка, см ²	48
Погрешность определения начала и окончания выпадения осадков, с	± 10
Масса, кг	8

Точность измерений, производимых с помощью дисдрометров, в [13, 23] предлагалось оценивать путём сравнения выдаваемой ими величины Q с показателями стандартных измерителей осадков. Лазерный дисдрометр был установлен на метеоплощадке Геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН в непосредственной близости от стандартного осадкомера Третьякова О-1 и челночного измерителя осадков Davis Rain Collector (RC). Результаты многолетних совместных испытаний показали хорошее согласие измерительных данных всех трёх приборов и подтвердили высокую точность измерений интегральных характеристик выпадающих атмосферных осадков, выполняемых с помощью дисдрометра [24].

Оцениваемые величины КЭ осадков на основе измерительных данных дисдрометра определялись нами в трёх вариантах [26]:

1) По соотношению (1) рассчитывалась энергия, приносимая на подстилающую поверхность каждой каплей. Суммированием по всем каплям, зарегистрированным за 1 мин по формуле (2), получалось значение $E_{вр.}$, а суммированием по всем частицам N , зарегистрированным при накоплении количества осадков 1 мм, вычислялась величина $E_{мм.}$

2) С использованием упрощённой процедуры для оценки изменений получаемых значений КЭ, состоящей в применении в формуле (1) средних за минуту значений \bar{D} и \bar{v} , также выдаваемых в составе измерительных данных дисдрометра, с последующим умножением результата вычисления на число зарегистрированных за минуту капель N , вычислялась величина $E_{вр.ср.}$, определяемая как

$$E_{вр.ср.} = \pi \rho N \bar{D}^3 \bar{v}^2 / 12. \quad (6)$$

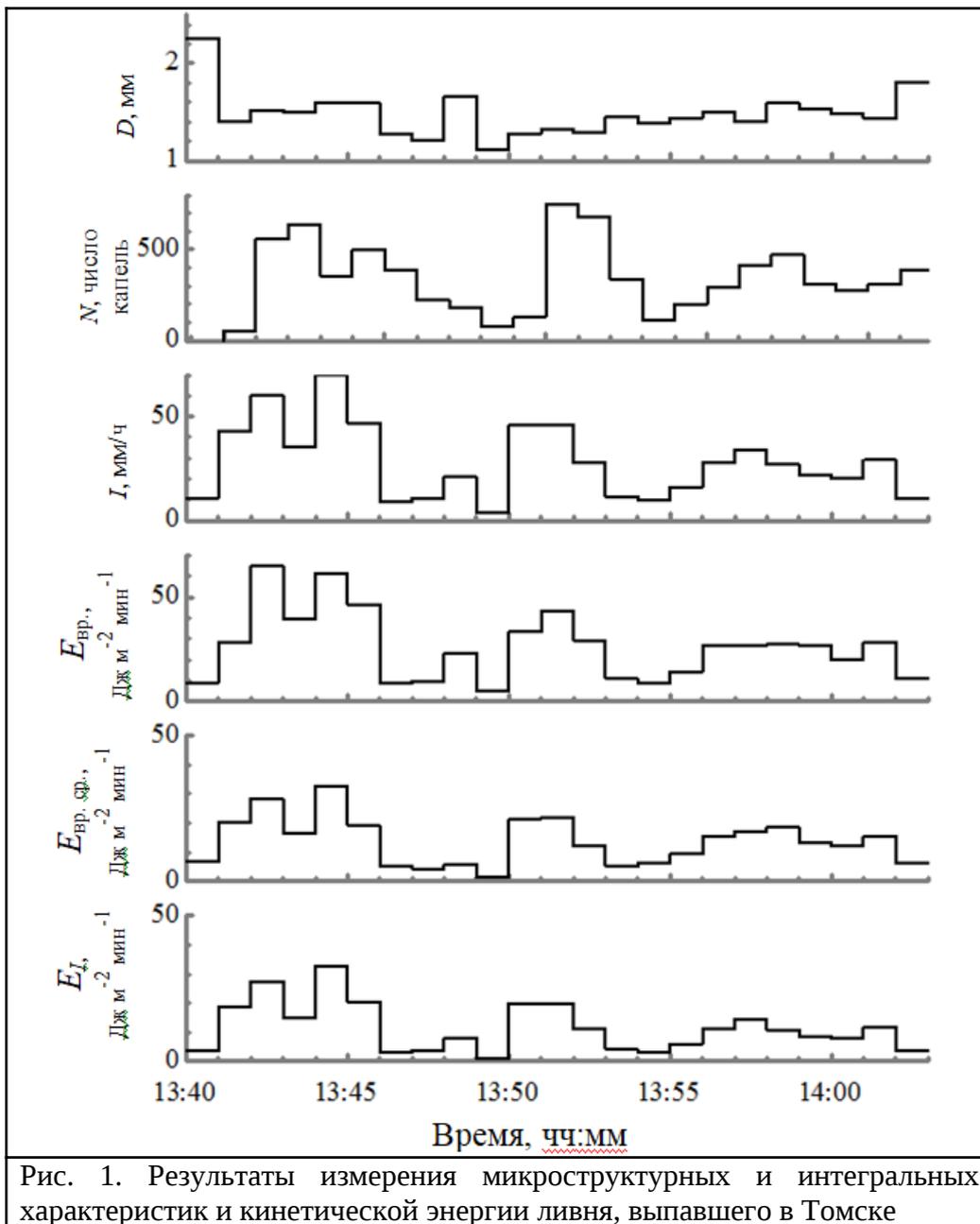
3) Применяемые при расчётах значения I за 1 мин также были измерены с помощью лазерного дисдрометра. При этом была проведена оценка КЭ с использованием эмпирической зависимости от I по формуле (4).

3. Полученные результаты и их обсуждение

Возможности лазерного дисдрометра при измерении характеристик осадков и определении на их основе параметров переносимой при выпадении дождей КЭ демонстрируются на примере ливня, прошедшего в Томске 22 июня 2023 года с 13 ч 41 мин до 14 ч 04 мин и сопровождавшегося грозовыми явлениями. За это время общее количество выпавших осадков Q , зафиксированных дисдрометром, РС и О-1, составило 12,96, 12,10 и 11,00 мм, соответственно (расхождение по результатам измерений Q не превышает 10 %). Пиковое значение I по данным ОПТИОС и РС доходило до $90 \text{ мм}\cdot\text{ч}^{-1}$. В [18] ливневый дождь с общим количеством осадков не менее 0,5 дюйма (12,7 мм) или с максимальной 15-минутной интенсивностью, превышающей $1 \text{ дюйм}\cdot\text{ч}^{-1}$ ($25,4 \text{ мм}\cdot\text{ч}^{-1}$), определяется в качестве эрозионного шторма. В анализируемом нами ливне средняя интенсивность составила $33,5 \text{ мм}\cdot\text{ч}^{-1}$, а максимальная 15-минутная – $37,3 \text{ мм}\cdot\text{ч}^{-1}$. Следовательно, выбор данного метеоявления в качестве объекта исследования с точки зрения эрозионной активности осадков, определяемой по их КЭ, представляется обоснованным.

На рис. 1 для всего периода выпадения ливня показаны рассчитанные для 1-минутных интервалов величины следующих параметров (сверху-вниз): среднего диаметра D , количества капель N , интенсивности I , и значений КЭ, рассчитанных по соотношениям (2), (6) и (4). На графике, отражающем изменение среднего диаметра выпавших за минуту капель, хорошо заметен эффект так называемой сортировки капель, вызванной тенденцией более крупных капель двигаться быстрее более мелких [19]. Это приводит к тому, что в начале ливневого дождя относительно небольшое количество крупных капель опережают большинство капель обычного размера, а затем, по мере развития явления, средний размер капель уменьшается. В [25] сделан вывод о том, что более высокая эрозионная активность дождя связана с большими размерами капель, а не с высокой интенсивностью дождя. Графики наших измерений не подтверждают данный вывод. Наоборот, хорошо просматривается наилучшая корреляция изменений КЭ с изменениями интенсивности, которые, в свою очередь, гораздо лучше коррелируют с изменениями N , чем D . Например, если сравнивать величины, измеренные за 1 минуту в 13 ч 49 мин, с измеренными в 13 ч 51 мин, видно, что в первом случае значения N , I и, соответственно, $E_{\text{вр}}$, существенно меньше полученных во втором, тогда как с диаметром D всё наоборот.

При сравнении КЭ, вычисленных по различным методикам: $E_{\text{вр}}$, $E_{\text{вр.ср}}$ и E_I (три нижних графика на рис. 1), видно, что корреляция изменений КЭ в продолжение всего ливня для всех трёх зависимостей вполне удовлетворительная.



Следует отметить, что значения E_I , полученные по соотношению (4) гораздо лучше согласуются как по ходу изменений, так и по абсолютным величинам с рассчитанными по упрощённой методике $E_{вр.ср.}$, чем с полученными из непосредственно измеренных параметров каждой капли значениями $E_{вр.}$. Это говорит о том, что использование для расчёта КЭ каких бы то ни было упрощающих процедур может сводить к уровню эмпирических оценок даже расчёты, выполненные на основе реальных измерений микроструктурных характеристик каждой капли. В нашем случае это дало практически двукратное занижение абсолютных значений $E_{вр.ср.}$ и E_I , определяющих эрозионную активность осадков. Следует отметить, что расчёты КЭ на основе дисдрометрических данных не всегда дают большие значения по сравнению с модельными расчётами на основе эмпирических зависимостей E от I . Например, в [21] расчёты по соотношению (4) постоянно давали завышенные результаты, так как это соотношение во многом определяется тем, в каком регионе и по каким методикам калибровались параметры

дисдрометров. Кроме того, важно, насколько точны показания используемого в работе дисдрометра, что должно проверяться, как было отмечено выше, во время натурных испытаний совместно со стандартными измерителями осадков.

Рассчитанные значения КЭ, принесённые исследуемым ливнем на единицу поверхности почвы ($E_{\text{мм}}$) при выпадении 1 мм осадков Q , представлены на рис. 2. Там же показано количество капель N , зарегистрированных дисдрометром при накоплении соответствующего миллиметра Q , и длительность интервала времени Δt , в течение которого это накопление произошло.

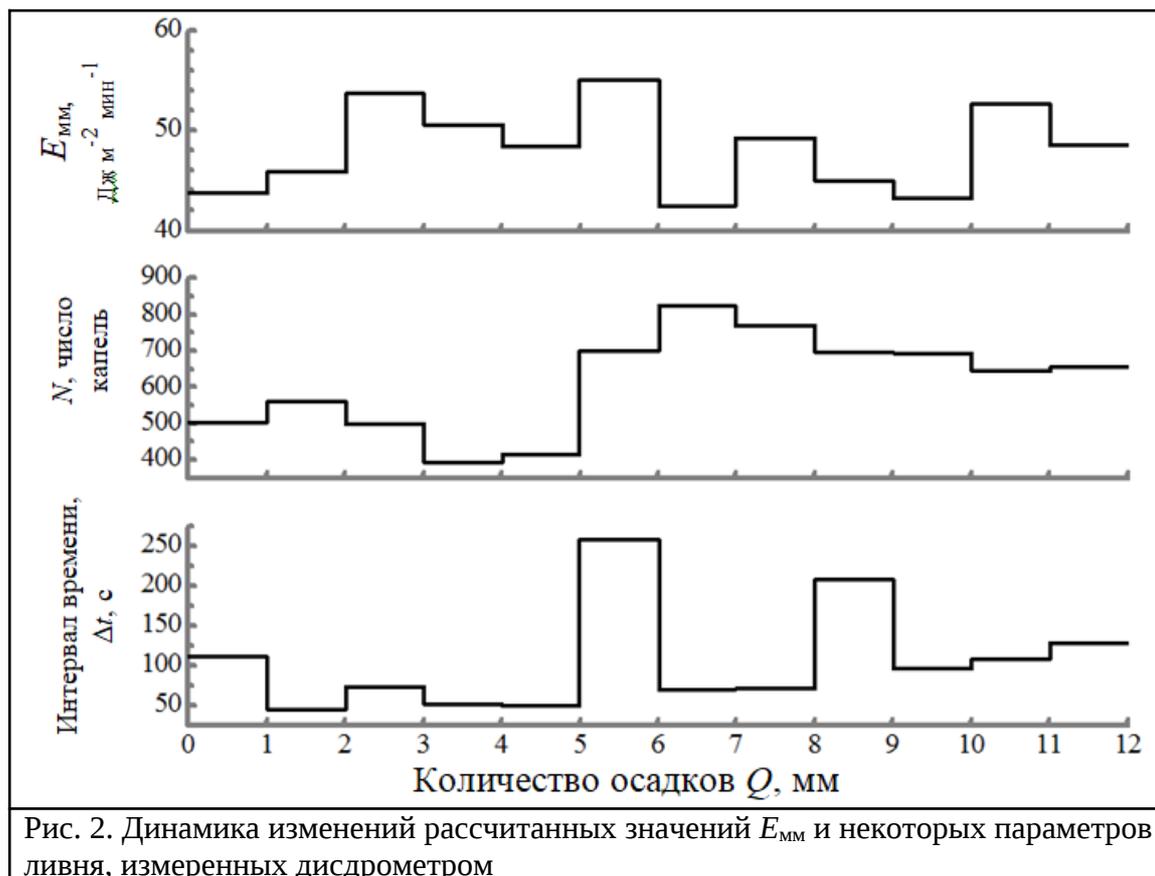


Рис. 2. Динамика изменений рассчитанных значений $E_{\text{мм}}$ и некоторых параметров ливня, измеренных дисдрометром

Из представленных на рис. 2 результатов видно, что значения $E_{\text{мм}}$ обладают гораздо меньшей изменчивостью, чем $E_{\text{вр}}$. (см. рис 1). Изменения, в основном, определяются текущим характером осадков. Например, сравнивая накопление 2-го и 3-го миллиметра Q , можно заметить, что при меньшем времени накопления 2-го миллиметра Q , (что говорит о более высокой интенсивности ливня в этот период), 3-й миллиметр был накоплен с участием меньшего количества капель. Это значит, что капли были в среднем крупнее частиц, сформировавших 2-й миллиметр Q . На графике $E_{\text{мм}}$ видно, что этот небольшой сдвиг микроструктурных характеристик в сторону увеличения привёл к заметному увеличению КЭ, принесённой на подстилающую поверхность 3-м миллиметром ливня.

Аналогично, при сравнении числа капель, сформировавших 6-й и 7-й миллиметры Q , можно прийти к выводу, что при переходе от 6-го к 7-му миллиметрам Q происходило смещение среднего размера частиц в сторону уменьшения, приведшее к ожидаемому снижению величины $E_{\text{мм}}$, несмотря на то, что уменьшение временного интервала Δt (для 7-го миллиметра) указывает на повышение интенсивности I в несколько раз. Таким образом, зависимость энергетических характеристик осадков от определяющих их

параметров достаточно сложна и должна стать предметом будущих исследований микроструктурных характеристик жидких осадков с применением дисдрометрических измерений.

Заключение

В выполненной работе представлен ряд существующих методик оценки кинетической энергии интенсивных дождевых осадков. Показана перспективность применения лазерного дисдрометра при решении задач, связанных с количественным определением энергетических характеристик жидких атмосферных осадков. При измерениях в натуральных условиях микроструктурных и интегральных характеристик сильного ливня и расчета на их основе ряда энергетических параметров продемонстрированы технические и вычислительные возможности прибора и использованных расчетных методик. На теоретическом и практическом уровнях оценён общий потенциал лазерного дисдрометра в решении данного класса задач.

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.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН (проект FWRG-2021-0006).

Список литературы

1. Кальчихин В. В., Кобзев А. А., Корольков В. А., Тихомиров А. А. Приборное обеспечение измерения параметров атмосферных осадков. Современное состояние // Известия высших учебных заведений. Физика. 2009. № 12. С. 92 (деп. в ВИНТИ 16.12.09, № 802-B2009).
2. Восканян К. Л., Кузнецов А. Д., Сероухова О. С. Автоматические метеорологические станции. Ч. 1. Тактико-технические характеристики: учебное пособие, СПб.: РГГМУ, 2016. 170 с.
3. Schönhuber M., Lammer G., Randeu W. L. Ch. 1. The 2D-Video-Disdrometer // Precipitation: Advances in Measurement, Estimation and Prediction / Ed. by Silas Michaelides. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. P. 3–32.
4. Azbukin A. A., Kalchikhin V. V., Kobzev A. A., Korolkov V. A., Tikhomirov A. A. Determination of Calibration Parameters of an Optoelectronic Precipitation Gage // Atmospheric and Oceanic Optics. 2014. V. 27. No 5. P. 432–437. DOI: 10.1134/S1024856014050066.
5. Кальчихин В. В., Кобзев А. А., Корольков В. А., Тихомиров А. А., Филатов Д. Е. Лазерный измеритель интегральных и микроструктурных характеристик атмосферных осадков ОПТИОС // Лазеры. Измерения. Информация. 2021. Т. 1. № 1. С. 23-32.
6. Angulo-Martinez M., Begueria S., Latorre B., Fernandez-Raga M. Comparison of precipitation measurements by OTT Parsivel² and Thies LPM optical disdrometers // Hydrol. Earth Syst. Sc. 2018. V. 22, iss. 5. P.2811–2837. DOI: 10.5194/hess-22-2811-2018.
7. Ferro V., Carollo F. G., Serio M. A. Establishing a threshold for rainfall-induced landslides by a kinetic energy–duration relationship // Hydrol. Process. 2020. V. 34, iss. 16. P. 3571–3581.

DOI: 10.1002/hyp.13821.

8. Angel J. R., Palecki M. A., Hollinger S. E. Storm Precipitation in the United States. Part II: Soil Erosion Characteristics // *J. Appl. Meteorol.* 2005. V. 44, No 6. P. 947–959. DOI: 10.1175/JAM2242.1.
9. Angulo-Martinez M., Barros A. Measurement uncertainty in rainfall kinetic energy and intensity relationships for soil erosion studies: An evaluation using PARSIVEL disdrometers in the Southern Appalachian Mountains // *Geomorphology.* 2015. V. 228. P. 28–40. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.07.036.
10. Jose J., Gires A., Tchiguirinskaia I., Roustan Y., Schertzer D. Scale invariant relationship between rainfall kinetic energy and intensity in Paris region: An evaluation using universal multifractal framework // *J. Hydrol.* 2022. V. 609. No 6. 127715. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.127715.
11. Keegan M. H., Nash D. H., Stack M. M. On erosion issues associated with the leading edge of wind turbine blades. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2013. V. 46, No 38. P. 383001. DOI: 10.1088/0022-3727/46/38/383001.
12. Herring R., Dyer K., Martin F., Ward C. The increasing importance of leading edge erosion and a review of existing protection solutions // *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2019. V. 115, No 11. P. 109382. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109382.
13. Fornis R. L., Vermeulen H. R., Nieuwenhuis J. D. Kinetic energy–rainfall intensity relationship for Central Cebu, Philippines for soil erosion studies // *J. Hydrol.* 2005. V. 300, iss. 1–4. P. 20–32. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.04.027.
14. Mikos M., Jost D., Petkovsek G. Rainfall and runoff erosivity in the alpine climate of north Slovenia: a comparison of different estimation methods // *Hydrolog. Sci. J.* 2006. V. 51, iss. 1. P. 115–126. DOI: 10.1623/hysj.51.1.115.
15. Lobo G. P., Bonilla C. A. Sensitivity analysis of kinetic energy-intensity relationships and maximum rainfall intensities on rainfall erosivity using a long-term precipitation dataset // *J. Hydrol.* 2015. V. 527, No 8. P. 788–793. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.05.045.
16. Sanchez-Moreno J. F., Mannaerts C. M., Jetten V., Loffler-Mang M. Rainfall kinetic energy–intensity and rainfall momentum–intensity relationships for Cape Verde // *J. Hydrol.* 2012. V. 454–455. P. 131–140. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.06.007.
17. Salles Ch., Poesen J., Torres D. S. Kinetic energy of rain and its functional relationship with intensity // *J. Hydrol.* 2002. V. 257, iss. 1–4. P. 256–270. DOI: 10.1016/S0022-1694(01)00555-8.
18. Wischmeier W. H., Smith D. D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. US Department of Agriculture Handbook, No 537, Washington DC, 1978. 60 p.
19. van Dijk A., Bruijnzeel L. A., Rosewell C. J. Rainfall intensity-kinetic energy relationships: A critical literature appraisal // *J. Hydrology.* 2002. V. 261, iss. 1–4. P. 1–23. DOI: 10.1016/S0022-1694(02)00020-3.
20. Torres D. S., Salles C., Creutin J. D., Delrieu G. Quantification of soil detachment by raindrop impact: performance of classical formulae of kinetic energy in Mediterranean storms: Proceedings of the Oslo Symposium // *Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins.* Oslo, August, 1992. IAHS Publ. no. 210, 1992. P. 115–124.
21. Angulo-Martinez M., Begueria S., Kysely J. Use of disdrometer data to evaluate the relationship of rainfall kinetic energy and intensity (KE-I) // *Sci. Total Environ.* 2016. V. 568. P. 83–94. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.05.223.
22. Kal'chikhin V. V., Kobzev A. A., Korol'kov V. A., Tikhomirov A. A. Determination of the Rate of Fall of Rain Drops in Measurements of Their Parameters by an Optical Rain Gauge // *Meas. Tech.* 2017. V. 59, No 11. P. 1175–1180. DOI 10.1007/s11018-017-1111-9.

23. Johannsen L. L., Zambon N., Strauss P., Dostal T., Neumann M., Zurn D., Cochrane T. A., Bloschl G., Klik A. Comparison of three types of laser optical disdrometers under natural rainfall conditions // *Hydrolog. Sci. J.* 2020. V. 65, No 4. P. 524–535. DOI: 10.1080/02626667.2019.1709641.
24. Kalchikhin V. V., Kobzev A. A., Tikhomirov A. A., Filatov D. E. Rainfall Measurements during Summer 2020 with the Optical Precipitation Gage // *Atmos. Ocean. Opt.* 2021. V. 34, No 3. P. 278–281. DOI: 10.1134/S1024856021030052.
25. Nyssen J., Vandenreyken H., Poesen J., Moeyersons J., Deckers J., Haile M., Salles C., Govers G. Rainfall erosivity and variability in the Northern Ethiopian Highlands // *J. Hydrol.* 2005. V. 311, iss. 1–4. P. 172–187. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.12.016.
26. Кальчихин В. В., Кобзев А. А., Тихомиров А. А. Определение энергетических характеристик дождевых осадков с помощью оптического осадкомера // *Оптика атмосферы и океана.* 2024. Т. 37. № 3. С. 262–269. DOI: 10.15372/AOO20240310.

The laser disdrometer capabilities for determining the kinetic energy of rainfall

Kalchikhin V. V., Kobzev A. A., *Tikhomirov A. A.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

10/3, Akademicheskoy Avenue, Tomsk, 634055, Russia

email: vyk@imces.ru, kaa@imces.ru, *tikhomirov@imces.ru

The methods of measuring the kinetic energy (KE) of intense rainfall, which damage agriculture, provoke landslides, and also cause erosion of the surface of various technical devices, are considered. The method for determining the KE based on measuring the microstructural characteristics of rainfall (size, number of particles and their falling velocities) were obtained using the laser disdrometer is presented. The possibilities of method used are justified by the results of measuring the characteristics of a heavy shower at Tomsk in the summer of 2023. The influence of the microstructural characteristics of raindrops on the amount of KE brought to the underlying surface is analyzed. The results of the KE determination are compared with the values obtained using simplified methods.

Keywords: laser disdrometer, rainfall, kinetic energy, microstructural characteristics of precipitation, measurements

Funding

The work was carried out within the framework of the state task of IMCES SB RAS (project FWRG-2021-0006).

References

1. Kalchikhin V. V., Kobzev A. A., Korolkov V. A., Tikhomirov A. A. Instrumentation for measurement of the parameters of atmospheric precipitation. Current state // *Russian Physics Journal.* 2009. V. 52. No 12. p. 92 (dep. In VINITI. 16.12.09, № 802-B2009). (in Russian)].
2. Voskanyan K. L., Kuznetsov A. D., Serouhova O. S. Automatic weather stations. Part 1: Performance characteristics. Tutorial. — St. Petersburg, RSHU Publishers, 2016. 170 p. (in Russian).
3. Schönhuber M., Lammer G., Radeu W. L. Ch. 1. The 2D-Video-Disdrometer // *Precipitation:*

Advances in Measurement, Estimation and Prediction / Ed. by Silas Michaelides. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. p. 3–32.

4. Azbukin A. A., Kalchikhin V. V., Kobzev A. A., Korolkov V. A., Tikhomirov A. A. Determination of Calibration Parameters of an Optoelectronic Precipitation Gage // Atmospheric and Oceanic Optics. 2014. V. 27. No 5. P. 432–437. DOI: 10.1134/S1024856014050066.

5. Kalchikhin V. V., Kobzev A. A., Korolkov V. A., Tikhomirov A. A., Filatov D. E. Laser Meter for Integral and Microstructural Characteristics of Atmospheric Precipitation OPTIOS // Lasers. Measurements. Information. 2021. V. 1. No 1. p. 23–32. (in Russian).

6. Angulo-Martinez M., Begueria S., Latorre B., Fernandez-Raga M. Comparison of precipitation measurements by OTT Parsivel² and Thies LPM optical disdrometers // Hydrol. Earth Syst. Sc. 2018. V. 22, iss. 5. p. 2811–2837. DOI: 10.5194/hess-22-2811-2018.

7. Ferro V., Carollo F. G., Serio M. A. Establishing a threshold for rainfall-induced landslides by a kinetic energy–duration relationship // Hydrol. Process. 2020. V. 34, iss. 16. p. 3571–3581. DOI: 10.1002/hyp.13821.

8. Angel J. R., Palecki M. A. Hollinger S. E. Storm Precipitation in the United States. Part II: Soil Erosion Characteristics // J. Appl. Meteorol. 2005. V. 44, No 6. p. 947–959. DOI: 10.1175/JAM2242.1.

9. Angulo-Martinez M., Barros A. Measurement uncertainty in rainfall kinetic energy and intensity relationships for soil erosion studies: An evaluation using PARSIVEL disdrometers in the Southern Appalachian Mountains // Geomorphology. 2015. V. 228. p. 28–40. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.07.036.

10. Jose J., Gires A., Tchiguirinskaia I., Roustan Y., Schertzer D. Scale invariant relationship between rainfall kinetic energy and intensity in Paris region: An evaluation using universal multifractal framework // J. Hydrol. 2022. V. 609. No 6. 127715. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.127715.

11. Keegan M. H., Nash D. H., Stack M. M. On erosion issues associated with the leading edge of wind turbine blades. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2013. V. 46, No 38. P. 383001. DOI: 10.1088/0022-3727/46/38/383001.

12. Herring R., Dyer K., Martin F., Ward C. The increasing importance of leading edge erosion and a review of existing protection solutions // Renew. Sustain. Energy Rev. 2019. V. 115, No 11. p. 109382. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109382.

13. Fornis R. L., Vermeulen H. R., Nieuwenhuis J. D. Kinetic energy–rainfall intensity relationship for Central Cebu, Philippines for soil erosion studies // J. Hydrol. 2005. V. 300, iss. 1–4. p. 20–32. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.04.027.

14. Mikos M., Jost D., Petkovsek G. Rainfall and runoff erosivity in the alpine climate of north Slovenia: a comparison of different estimation methods // Hydrolog. Sci. J. 2006. V. 51, iss. 1. p. 115–126. DOI: 10.1623/hysj.51.1.115.

15. Lobo G. P., Bonilla C. A. Sensitivity analysis of kinetic energy-intensity relationships and maximum rainfall intensities on rainfall erosivity using a long-term precipitation dataset // J. Hydrol. 2015. V. 527, No 8. p. 788–793. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.05.045.

16. Sanchez-Moreno J. F., Mannaerts C. M., Jetten V., Loffler-Mang M. Rainfall kinetic energy–intensity and rainfall momentum–intensity relationships for Cape Verde // J. Hydrol. 2012. V. 454–455. P. 131–140. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.06.007.

17. Salles Ch., Poesen J., Torres D. S. Kinetic energy of rain and its functional relationship with intensity // J. Hydrol. 2002. V. 257, iss. 1–4. p. 256–270. DOI: 10.1016/S0022-1694(01)00555-8.

18. Wischmeier W. H., Smith D. D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. US Department of Agriculture Handbook, No 537, Washington DC, 1978. 60 p.

19. van Dijk A., Bruijnzeel L. A., Rosewell C. J. Rainfall intensity-kinetic energy relationships:

- A critical literature appraisal // *J. Hydrology*. 2002. V. 261, iss. 1–4. p. 1–23. DOI: 10.1016/S0022-1694(02)00020-3.
20. Torres D. S., Salles C., Creutin J. D., Delrieu G. Quantification of soil detachment by raindrop impact: performance of classical formulae of kinetic energy in Mediterranean storms: Proceedings of the Oslo Symposium // *Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins*. Oslo, August, 1992. IAHS Publ. no. 210, 1992. p. 115–124.
21. Angulo-Martinez M., Begueria S., Kysely J. Use of disdrometer data to evaluate the relationship of rainfall kinetic energy and intensity (KE-I) // *Sci. Total Environ.* 2016. V. 568. p. 83–94. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.05.223.
22. Kal'chikhin V. V., Kobzev A. A., Korol'kov V. A., Tikhomirov A. A. Determination of the Rate of Fall of Rain Drops in Measurements of Their Parameters by an Optical Rain Gauge // *Meas. Tech.* 2017. V. 59, No 11. p. 1175–1180. DOI 10.1007/s11018-017-1111-9.
23. Johannsen L. L., Zambon N., Strauss P., Dostal T., Neumann M., Zumr D., Cochrane T. A., Blöschl G., Klik A. Comparison of three types of laser optical disdrometers under natural rainfall conditions // *Hydrolog. Sci. J.* 2020. V. 65, No 4. p. 524–535. DOI: 10.1080/02626667.2019.1709641.
24. Kalchikhin V. V., Kobzev A. A., Tikhomirov A. A., Filatov D. E. Rainfall Measurements during Summer 2020 with the Optical Precipitation Gage // *Atmos. Ocean. Opt.* 2021. V. 34, No 3. p. 278–281. DOI: 10.1134/S1024856021030052.
25. Nyssen J., Vandenreyken H., Poesen J., Moeyersons J., Deckers J., Haile M., Salles C., Govers G. Rainfall erosivity and variability in the Northern Ethiopian Highlands // *J. Hydrol.* 2005. V. 311, iss. 1–4. p. 172–187. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.12.016.
26. Kalchikhin V. V., Kobzev A. A., Tikhomirov A. A. Determination of the energy characteristics of rainfall using the optical precipitation gauge // *Opt. Atm. Okeana.* 2024. V. 37. No 3. P. 262–269. DOI: 10.15372/AOO20240310.

ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

doi: 10.51639/2713-0568_2024_4_1_16
УДК 535.8 574.56 621.373
ГРНТИ 44.41.29 29.33.51
ВАК 1.3.19

Лазерная диагностика водорода. Часть 1

^{1*} Привалов В. Е., ² Шеманин В. Г.

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

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

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

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

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

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

1 Лидары. Принцип действия и классификация

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2. Зондирование молекул водорода в атмосфере лидаром ДПР

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

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

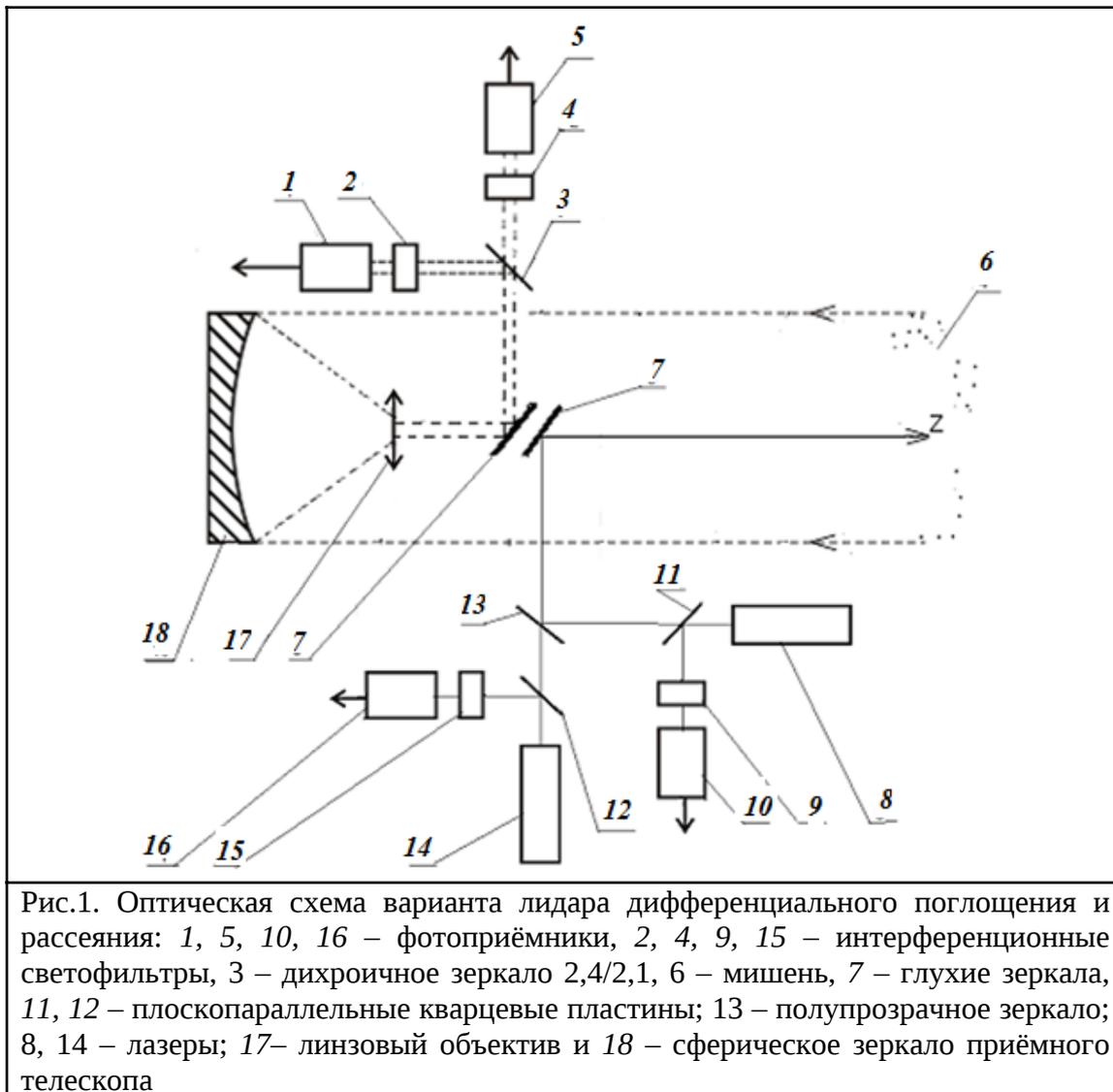
По результатам выполненных ранее исследований различных типов лидаров [12, 22, 25], предназначенных для зондирования загрязняющих веществ в газовых потоках или чистой атмосфере, можно заключить, что для обнаружения концентраций $N(z)$ загрязняющих веществ порядка 10^{15} см^{-3} и ниже в атмосфере будет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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

3. Моделирование и результаты

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

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

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

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

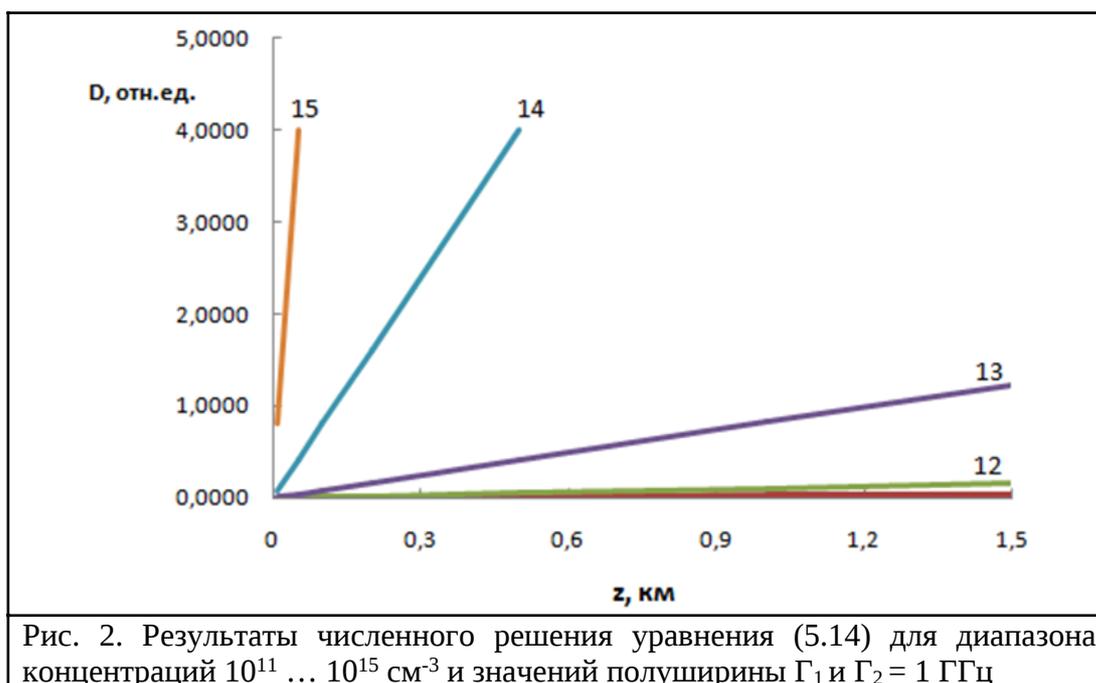
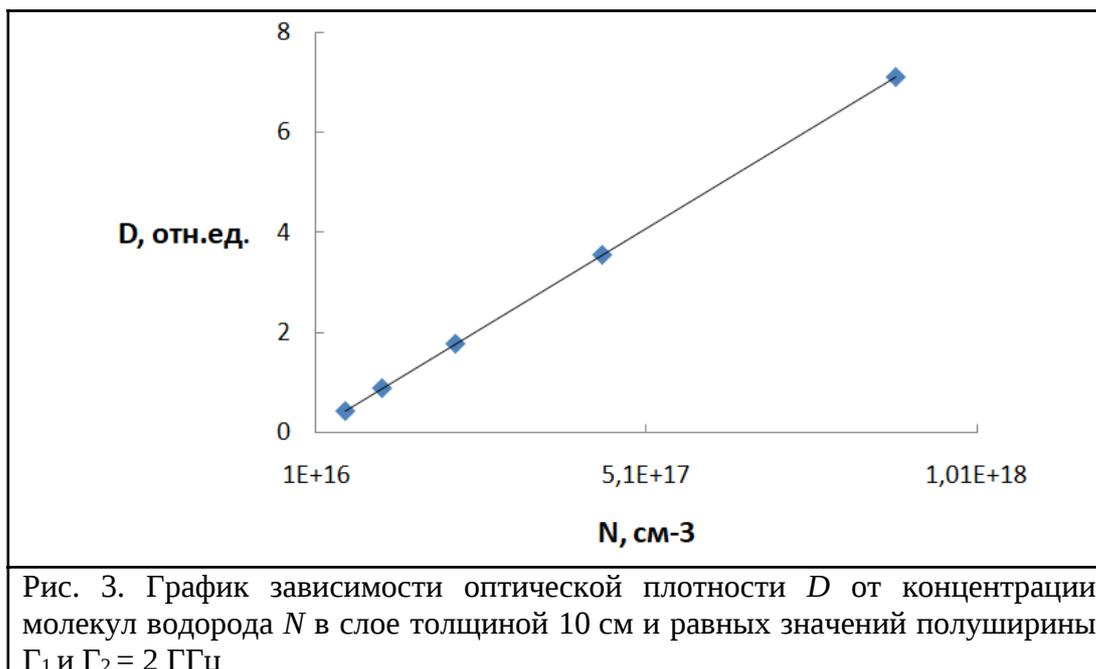


Рис. 2. Результаты численного решения уравнения (5.14) для диапазона концентраций $10^{11} \dots 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и значений полуширины Γ_1 и $\Gamma_2 = 1$ ГГц

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

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



Заключение

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

Конфликт интересов

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

Список литературы

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

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

Laser diagnostics of hydrogen. Part 1

^{1*} Privalov V.E., ² Shemanin V.G.

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

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

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

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

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

References

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

- 543

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

ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

doi: 10.51639/2713-0568_2024_4_1_27

УДК 548.55, 544.227, 544.22

ГРНТИ 29.19.13, 31.15.17

ВАК 01.04.18, 02.00.21

Исследование микротвёрдости оптических материалов на основе твёрдых растворов системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}\text{-AgI}$

Щукина А. А., Барыкина С. Е., Воробьева Д. А., Пестерева П. В., Салимгареев Д. Д.,
Южакова А. А., Львов А. Е., * Жукова Л. В.

*Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б. Н. Ельцина, 620062, Екатеринбург, Россия*

email: fisher-alexa@mail.ru, barykina.sof@gmail.com, dariavorobiova111@gmail.com,
p.v.pestereva@urfu.ru, d.d.salimgareev@urfu.ru, a.a.lashova@urfu.ru, a.e.lvov@urfu.ru,
*l.v.zhukova@urfu.ru

Оптические материалы на основе системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}\text{-AgI}$ обладают широким диапазоном пропускания, относительно низким показателем преломления, высокой фото- и радиационной стойкостью, негигроскопичностью и пластичностью, однако механические свойства, такие как микротвёрдость, ранее не были изучены. В данной работе было проведено исследование микротвёрдости по Виккерсу пяти составов образцов на основе монокристаллов 4, 8, 12, 16 и 20 мол. % AgI в $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ и составов (20, 33 мол. % AgI в $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$) на основе двухфазной оптической керамики. В монокристаллах с увеличением содержания AgI в твёрдом растворе $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ наблюдается рост значений микротвёрдости от 19,33 до 33,97, в оптической керамике – уменьшение от 33,83 до 29,52. Максимальное значение микротвёрдости для монокристаллов системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}\text{-AgI}$ составляет 33,97 в образце 16 мол. % AgI в твёрдом растворе $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$, минимальное – 19,33 для 4 мол. % AgI в твёрдом растворе $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$. Полученные данные о микротвёрдости позволяют изготавливать по методу горячего прессования оптические изделия, а также получать инфракрасные световоды методом экструзии.

Ключевые слова: галогениды серебра, микротвердость, монокристаллы, оптическая керамика

Введение

Оптические материалы на основе галогенидов серебра привлекательны для научного сообщества и оптоэлектронной промышленности за счёт исключительных оптических свойств (широкого диапазона пропускания, относительно низкого, в сравнении с халькогенидными стеклами, показателя преломления, высокой фото- и радиационной стойкости, негигроскопичности и пластичности), позволяющих изготавливать на их основе оптические изделия, включая волоконную оптику, широкого назначения. Важными характеристиками твёрдых растворов на основе галогенидов серебра являются их

механические свойства, такие как модуль упругости, коэффициент теплового расширения, температуры плавления и твёрдость, информация о которых оказывает существенное влияние на технологию изготовления оптических изделий, особенно инфракрасных световодов. Последнее из перечисленных свойств – твёрдость материала, зависит от многих факторов, включая упругие свойства, предел текучести, хрупкость, а также от приложенной нагрузки [1]. В случае твёрдых растворов на основе галогенидов серебра механические свойства характеризуются микротвёрдостью, которая отражает способность материала сопротивляться упругой и пластической деформации при взаимодействии с другим телом из более твёрдого материала (индентора) [2], а также оказывает сильное влияние на качество получаемого оптического изделия, включая окна, линзы и световоды, которые находят широкое применение в ИК-спектроскопии, тепловидении, космических исследованиях, лазерной промышленности и волоконной оптике.

В настоящее время известна микротвёрдость лишь некоторых галогенидов серебра, которая была определена по методу Кнупа и составила для AgCl – 9,5, для AgBr – 7, для твёрдого раствора $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ (называемый КРС-13) – 17 [3, 4], либо по методу Мосса, которая в случае AgI равна 2,5 [5]. Твёрдый раствор $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ показал значительно более высокие значения микротвёрдости, в сравнении с индивидуальными галогенидами серебра, такими как AgCl и AgBr , что связано с механизмом твёрдорастворного упрочнения [6, 7], наблюдающемся при образовании твёрдых растворов замещения. Для вновь полученных соединений галогенидов серебра [8], как и для твёрдых растворов системы $\text{AgCl}-\text{AgBr}$, микротвёрдость не исследовалась, что делает её изучение актуальной задачей оптического материаловедения. Помимо прочего важным является проведение статистически полного, подробного исследования ряда составов твёрдых растворов галогенидсеребряных систем, поскольку оно позволяет обнаружить взаимосвязь между микротвёрдостью материала и его составом, получить объективные фундаментальные данные и прогнозировать механические свойства промежуточных соединений. Дополнительно важное прикладное значение исследования микротвёрдости связано с разработкой технологии изготовления оптических изделий на основе твёрдых растворов галогенидов серебра, особенно волоконной оптики, что обосновано процессами горячего прессования и экструзии, на параметры которых микротвёрдость оказывает непосредственное влияние.

Данная работа посвящена исследованию микротвёрдости новых оптических материалов, а именно монокристаллов и оптической керамики на основе системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}-\text{AgI}$. Поскольку образование твёрдых растворов замещения приводит к увеличению прочности, а йодид серебра обладает высокой твёрдостью, изучение монокристаллов и оптической керамики указанной системы представляет высокую теоретическую и прикладную значимость. Исследование микротвёрдости твёрдых растворов системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}-\text{AgI}$ проводится как для монокристаллов, так и для оптической керамики по методу Виккерса со статистической обработкой данных.

Первый раздел: Монокристаллы и оптическая керамика на основе твёрдых растворов системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}-\text{AgI}$

Твёрдые растворы системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}-\text{AgI}$ были получены коллективом научной лаборатории «Волоконных технологий и фотоники» Уральского федерального университета. Ранее авторами [8] была изучена фазовая диаграмма системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}-\text{AgI}$, по которой были определены область гомогенности, где возможен рост монокристаллов, и гетерогенности, подходящей для синтеза оптической керамики. В соответствии с фазовой диаграммой авторами [8] были получены монокристаллы состава

4, 8, 12, 16, 20 мол. % AgI в $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ и оптическая керамика состава 20 и 33 мол. % AgI в $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$. Из состава 20 мол. % AgI в $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ было получено три типа оптических материалов. Состав 20 мол. % AgI в $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ был синтезирован различными методами, что позволило получить на его основе как монокристалл, так и оптическую керамику [8]. Из синтезированных образцов по методу горячего прессования [9] была изготовлена серия плоскопараллельных пластин диаметром 10...17 мм, толщиной 350 ± 5 мкм. Данные пластины обладают высокой плоскопараллельностью и низкой шероховатостью поверхности, что обеспечивается применяемой оснасткой [10, 11]. Для исследования микротвёрдости материалов были использованы полученные плоскопараллельные пластины, поскольку они обладают необходимым качеством поверхности и оптимальными геометрическими параметрами.

Второй раздел: Измерение микротвёрдости по методу Виккерса

Из всех существующих методов измерения твёрдости [1] метод Виккерса является наиболее простым, экспрессным и универсальным. В связи с этим для исследования микротвёрдости была использована установка ПМТ-ЗМ, ЛОМО (Россия), реализующая метод Виккерса.

Для проведения исследования микротвёрдости оптических материалов установка ПМТ-ЗМ была откалибрована путём определения числа твёрдости кристалла поваренной соли (NaCl) при приложенной нагрузке от 0,0196 до 4,9 Н. Прибор был откалиброван по стандартным нагрузкам прибора – 20, 50, 100, 200, 500 г. Полученные для NaCl значения соответствовали справочным данным.

Для исследования микротвёрдости галогенидсеребряных материалов была принята нагрузка 100 г (0,98 Н), поскольку она гарантирует получение отпечатка на образцах любого состава и типа материала системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}\text{-AgI}$. Измерение проводилось на образцах монокристаллов состава 4, 8, 12, 16, 20 мол. % AgI в $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ и оптической керамики 20 и 33 мол. % AgI в $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$. Поверхность пластин была очищена и обезжирена с помощью 95 % этилового спирта и безворсовых салфеток. Образцы размещались на подложке прибора таким образом, чтобы индентор ударял в центр образца для получения корректного значения числа твёрдости. Измерение микротвёрдости происходило путём вдавливания алмазной пирамиды с углом при вершине 136° в исследуемый материал под нагрузкой 0,98 Н с выдержкой 15 с. В результате были определены величины диагоналей полученного отпечатка для расчёта числа твёрдости по методу Виккерса.

Микротвёрдость образцов определялась делением нормальной нагрузки, приложенной к алмазному наконечнику, на условную площадь боковой поверхности полученного отпечатка по формуле (1):

$$H_V = 1,8544 \frac{P}{d^2}, \quad (1)$$

где H_V – число микротвёрдости по Виккерсу, гс/мкм²; P – нормальная нагрузка, приложенная к алмазному наконечнику, Н; d – среднее значение длин диагоналей, мкм. Единицы измерения согласуются за счет коэффициента 1,8544 в формуле (1). Согласно действующему ГОСТ 450–76 число микротвёрдости, полученное в гс/мкм², записывают без единиц измерения с указанием нагрузки в ньютонах, например, 33,97 H_V 0,98 (33,97 – число твёрдости; 0,98 – нагрузка). Глубина вдавливания индентора при определении микротвёрдости исследуемых монокристаллов составляет несколько микрометров при нагрузке в 100 г, в связи с чем измерение твёрдости материалов производится в гс/мкм².

По формуле (2) было рассчитано отношение среднего квадратического отклонения длины

диагоналей каждой из десяти пар отпечатков к их среднему арифметическому значению (в дальнейшем называемое коэффициентом вариации), которое не должно превышать 5 %.

$$K = \Delta d / \langle D \rangle, \quad (2)$$

где Δd – отклонение длин диагоналей десяти отпечатков; $\langle D \rangle$ – среднее арифметическое значение диагоналей отпечатка, мкм;

$$\Delta d = \pm \sqrt{\sum_1^{10} (d - \langle d \rangle)^2 / 9}, \quad (3)$$

где $\langle d \rangle$ – среднее значение диагоналей каждого отпечатка, мкм;

$$\langle D \rangle = \sum_1^{10} d_i / 10, \quad (4)$$

где d_i – среднее значение диагоналей отпечатка, мкм.

Третий раздел: результаты измерения микротвёрдости по методу Виккерса

В результате измерения микротвёрдости были получены значения, представленные в таблицах 1 (для образцов на основе монокристаллов) и 2 (для образцов на основе двухфазной керамики), а также погрешности их определения, называемые коэффициентом вариации.

Исходя из полученных данных, представленных в таблицах 1 и 2, была построена зависимость микротвёрдости материалов от их состава, как показано на рисунке 1. В образцах на основе монокристаллов с увеличением содержания AgI в твёрдом растворе $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ наблюдается тенденция к росту значений микротвёрдости, измеренной по методу Виккерса. В оптической керамике, напротив, тенденция к уменьшению значений твёрдости.

Таблица 1

Микротвёрдость монокристаллов системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75} - \text{AgI}$

Содержание AgI в $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$, мол. %	Размер диагоналей $\langle d \rangle$, мкм	Число микротвёрдости $\langle H_v \rangle$, Н	Коэффициент вариации K, %
4	98,0	19,33	2,75
8	83,0	27,00	4,42
12	80,0	28,73	0,71
16	73,0	33,97	1,29
20	78,0	30,43	2,41

Таблица 2

Микротвёрдость двухфазной керамики системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75} - \text{AgI}$

Содержание AgI в $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$, мол. %	Размер диагоналей $\langle d \rangle$, мкм	Число микротвёрдости $\langle H_v \rangle$, Н	Коэффициент вариации K, %
20 (шихта после ТЗКС [8])	77,5	30,82	1,38
20 (механическая)	74,0	33,83	1,80

смесь [8])			
33	79,0	29,52	1,48

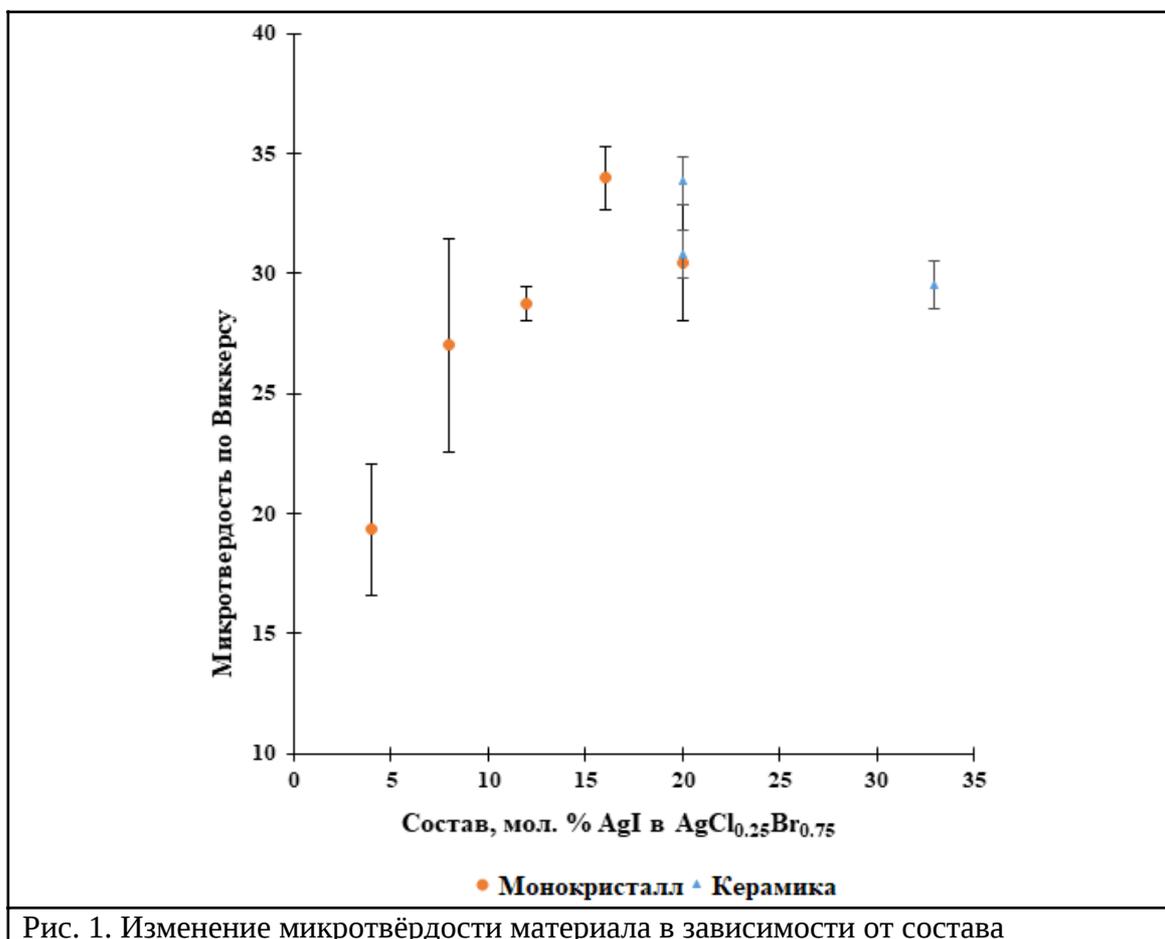


Рис. 1. Изменение микротвёрдости материала в зависимости от состава

Подобное изменение микротвёрдости материала с изменением связано, в первую очередь, со структурой. В случае монокристаллов ключевым фактором, влияющим на зависимость микротвёрдости от состава, является твёрдорастворное упрочнение [6]. С увеличением доли йодида серебра в твердом растворе $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ происходит замена ионов Cl - и Br - на более крупный по атомному диаметру ион йода, что приводит к повышению сопротивления перемещению дислокаций и росту микротвёрдости [12]. Зависимость микротвёрдости от состава является близкой к линейной для монокристаллов внутри области гомогенности фазовой диаграммы системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ -AgI, которая составляет от 0 до 16 мол. % AgI в $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ [8]. Монокристалл 20 мол. % AgI в $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ был получен из области гетерогенности фазовой диаграммы за счёт особых режимов синтеза [8], содержание йодида серебра здесь уже велико, а микротвёрдость данного образца существенно ниже. Это может быть связано как с превышением некоторого критического значения содержания йода, которое уже не приводит к упрочнению материала [6], так и со снижением сопротивления перемещению дислокаций, которое имеет место быть в поликристаллах и нанокерамиках [13].

В случае оптической керамики, которая представляет собой соединение двух кристаллических фаз, с увеличением содержания AgI в твёрдом растворе $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ наблюдается рост доли гексагональной фазы на основе β -AgI в кубической на основе $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$. Рост содержания гексагональной фазы приводит к снижению твёрдости оптической керамики, что также характерно для данных материалов [13].

Максимальное значение микротвёрдости для монокристаллов системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}\text{-AgI}$ составляет 33,97 в образце 16 мол. % AgI в твёрдом растворе $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$, минимальное – 19,33 для 4 мол. % AgI в твёрдом растворе $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$. Это говорит о существенном повышении микротвёрдости материала при легировании йодидом серебра. Тем не менее, в случае оптической керамики значение микротвёрдости также было достаточно высоким от 29,52 до 30,82. Погрешности измерения данного параметра входили в диапазон допустимых значений для галогенидов серебра и не превышают 5 %. Таким образом микротвёрдость монокристаллов и оптической керамики на основе системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}\text{-AgI}$ существенно превышает показатели твёрдого раствора $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$, следовательно, механические характеристики новых материалов являются высокими, что важно для их практического применения.

Заключение

Результаты исследования микротвёрдости монокристаллов и оптической керамики на основе твёрдых растворов системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}\text{-AgI}$ показали достижение высоких значений 29,52...30,82 (при нагрузке 0,98 Н), что указывает на высокие механические свойства и перспективность разработанных материалов для оптики и фотоники [14, 15, 16]. Значение микротвёрдости по Виккерсу для монокристаллов на основе системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}\text{-AgI}$ увеличивается при возрастании доли AgI в твёрдом растворе $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ от 19,33 до 33,97. В случае оптической керамики микротвёрдость уменьшается от 33,83 до 29,52 по мере увеличения содержания AgI в твёрдом растворе $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$. Таким образом, введение йодида серебра в кристаллическую решетку $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ позволяет увеличить микротвёрдость материала с достижением максимальных значений при наибольшем возможном содержании AgI в $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$, согласно области гомогенности фазовой диаграммы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}\text{-AgI}$. Следует отметить, что монокристаллы и оптическая керамика системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}\text{-AgI}$ обладают не только высокой микротвёрдостью, но и являются пластичными, что позволяет использовать их для изготовления по методу горячего прессования оптических изделий [11], а также для получения инфракрасных световодов методом экструзии [17].

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 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Государственный контракт № FEUZ-2023-021 (H687.42Б.325/23).

Список литературы

1. Теплоухов А.А. Измерение микротвердости поверхностных слоев материалов: метод. указания. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2017. 35 с.
2. Глазов В.М., Вигдорович В.Н. Микротвердость металлов и полупроводников: 2-е издание. Москва: Изд-во «Металлургия», 1969. 248 с.
3. Примеров Н.В. Синтез и исследование кристаллов $\text{AgCl}_x\text{Br}_{1-x}$, $\text{AgCl}_x\text{Br}_y\text{I}_{1-x-y}$,

- легированных редкими элементами, и получение световодов на их основе / Автореф. канд. дис. Екатеринбург: УрФУ, 2010.
4. Воронкова Е.М., Гречушников Б.Н., Дистлер Г.И., Петров И.П. Оптические материалы для инфракрасной техники: Справочное издание / Акад. наук СССР. Ин-т кристаллографии. Москва: Наука, 1965. 335 с.
 5. Ксензенко В.И., Стасиневич Д.С. Химия и технология брома, иода и их соединений. Москва: Химия, 1995. 431 с.
 6. Иверонова В.И. Близкий порядок в твердых растворах. Москва: Наука, 1989. 255 с.
 7. Василевич Ю.В., Неумержицкая Е.Ю., Язневич А.М., Кузменко Н.Н. Измерение твердости металлов. Минск: Белорусский национальный технический университет, 2010. 46 с.
 8. Salimgareev D. D., Lvov A. E., Yuzhakova A. A., Shatunova D. V., Pestereva P. V., Yuzhakov I. V., Korsakov A. S., Zhukova L. V. Synthesis and study of single crystals and optical ceramics based on the $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ – AgI system // Applied materials today. 2023. Vol. 32. P. 101809.
 9. Жукова Л.В., Корсаков А.С., Врублевский Д.С. Новые инфракрасные материалы: кристаллы и световоды. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. 278 с.
 10. Жолобов В.В., Зверев Г.И. Прессование металлов. Москва: Металлургия, 1971. 455 с.
 11. Львов А.Е. Технология получения кристаллических материалов системы AgBr – AgI – TlBr – TlI , высокопрозрачных в терагерцовом, инфракрасном и видимом диапазонах / Автореф. канд. дис. Екатеринбург: ХТИУрФУ, 2022.
 12. Гуляев А.П. Металловедение: Учебник для вузов. 6-е изд. Москва: Металлургия, 1986. 544 с.
 13. Бобылев С.В., Овидько И.А. Зарождение дислокаций на аморфных межзеренных границах в деформируемых нанокерамиках // Физика твердого тела. 2008. Т. 50. вып. 4. С. 617-623.
 14. Petrescu M. I. Vickers microhardness and its load size dependence in a group of twelve sulphides and sulphosalts of intermediate hardness // U.P.B. Sci. Bull. Series B. Vol. 62, No. 1-2. 2000.
 15. Казанцев С.Г., Овчаренко Т.Н. Полярная и ретикулярная анизотропия микротвердости перспективных пьезоэлектриков // Вопросы электротехники. 2011. Т. 123. С. 41-50.
 16. Ozturk O., Gokcen T., Cavdar S., Koralay H., Tasci A. T. A study on nucleation, crystallization kinetics, microstructure and mechanical properties of Ru-Bi partial substituted BSCCO glass ceramics // J Therm Anal Calorim. 2016. Vol. 123, P. 1073-1082.
 17. Жукова Л.В., Корсаков А.С., Врублевский Д.С., Шульгин Б.В. Материалы микро- и оптоэлектроники: кристаллы и световоды: учебное пособие. 1-е изд. Москва: Изд-во ЮРАЙТ, 2020. 279 с.

**STUDY OF THE MICROHARDNESS OF OPTICAL MATERIALS BASED ON THE
 $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ – AgI SYSTEM SOLID SOLUTIONS**

Shchukina A. A., Barykina S. E., Vorobyova D. A., Pestereva P. V., Salimgareev D. D.,
 Yuzhakova A. A., Lvov A. E., *Zhukova L. V.

Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg

email: fisher-alexa@mail.ru, barykina.sof@gmail.com, dariavorobiova111@gmail.com,
p.v.pestereva@urfu.ru, d.d.salimgareev@urfu.ru, a.a.lashova@urfu.ru, a.e.lvov@urfu.ru,
*l.v.zhukova@urfu.ru

Optical materials based on the $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ – AgI system have a wide transmission range, a relatively low refractive index, high photo- and radiation resistance, non-hygroscopicity, and flexibility, however, mechanical properties such as microhardness have not been studied earlier. In this paper, the Vickers' microhardness of five samples based on single crystals of 4, 8, 12, 16, and 20 mol. % AgI in $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ and compositions 20 and 33 mol.% AgI in $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ based on two-phase optical ceramics were studied. In single crystals, with an increase in the AgI content in the $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ solid solution, a rise in microhardness values from 19.33 to 33.97 is observed. In optical ceramics, with an increase in the AgI content there is a reduction of microhardness from 33.83 to 29.52. The maximum microhardness value for single crystals of the $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ – AgI system is 33.97 in a sample of 16 mol. % AgI in $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$, minimum 19.33 for 4 mol. % AgI in $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$. The received data on microhardness make it possible to manufacture optical products using the hot embossing method, as well as to obtain infrared fibers by extrusion.

Keyword: silver halides, microhardness, single crystals, optical ceramics.

Funding

Funding from Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project FEUZ-2023-0021.

References

1. Teploukhov A.A. Measurement of microhardness of surface layers materials: method. instructions. Omsk: Omsk State Technical University Publishing House, 2017. 35 p.
2. Glasov V.M., Vigdorovich V.N. Microhardness of metals and semiconductors: 2nd edition. Moscow: Publishing house "Metallurgy", 1969. 248 p.
3. Primerov N.V. Synthesis and study of $\text{AgCl}_x\text{Br}_{1-x}$, $\text{AgCl}_x\text{Br}_y\text{I}_{1-x-y}$ crystals doped with rare elements, and production of light guides based on them / Abstract. Ph.D. dis. Ekaterinburg: UrFU, 2010.
4. Voronkova E.M., Grechushnikov B.N., Distler G.I., Petrov I.P. Optical materials for infrared technology: Reference publication / Acad. Sciences of the USSR. Institute of Crystallography. Moscow: Nauka, 1965. 335p.
5. Ksenzenko V.I., Stasinevich D.S. Chemistry and technology of bromine, iodine and their compounds. Moscow: Chemistry, 1995. 431p.
6. Iveronova V.I. Short-range order in solid solutions. Moscow: Nauka, 1989. 255 p.
7. Vasilevich Yu.V., Neumerzhitskaya E.Yu., Yaznevich A.M., Kuzmenko N.N. Measuring the hardness of metals. Minsk: Belarusian National Technical University, 2010. 46 p.
8. Salimgareev D.D., Lvov A.E., Yuzhakova A.A., Shatunova D.V., Pestereva P.V., Yuzhakov I.V., Korsakov A.S., Zhukova L.V. Synthesis and study of single crystals and optical ceramics based on the $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ – AgI system // Applied material today. 2023. Vol. 32. P. 101809.
9. Zhukova L.V., Korsakov A.S., Vrublevsky D.S. New infrared materials: crystals and light guides. Ekaterinburg: Ural Publishing House. Univ., 2014. 278 p.
10. Zholobov V.V., Zverev G.I. Metal pressing. Moscow: Metallurgy, 1971. 455 p.
11. Lvov A.E. Technology for producing crystalline materials of the AgBr – AgI – TlI – TlBr system, highly transparent in the terahertz, infrared and visible ranges / Abstract. Ph.D. dis.

Ekaterinburg: KhTIUrFU, 2022.

12. Gulyaev A.P. Metallurgy: Textbook for universities. 6th ed. Moscow: Metallurgy, 1986. 544 p.
13. Bobylev S.V., Ovidko I.A. Nucleation of dislocations at amorphous grain boundaries in deformable nanoceramics // Solid State Physics. 2008. T. 50. Is. 4. PP. 617-623.
14. Petrescu M.I. Vickers microhardness and its load size dependence in a group of twelve sulphides and sulphosalts of intermediate hardness // U.P.B. Sci. Bull. Series B. Vol. 62, No. 1-2. 2000.
15. Kazantsev S.G., Ovcharenko T.N. Polar and reticular anisotropy of microhardness of promising piezoelectrics // Problems of electrical engineering. 2011. T. 123. PP. 41-50.
16. Ozturk O., Gokcen T., Cavdar S., Koralay H., Tasci A.T. A study on nucleation, crystallization kinetics, microstructure and mechanical properties of Ru-Bi partial substituted BSCCO glass ceramics // J Therm Anal Calorim. 2016. Vol. 123, P. 1073-1082.
17. Zhukova L.V., Korsakov A.S., Vrublevsky D.S., Shulgin B.V. Micro- and optoelectronics materials: crystals and light guides: textbook. 1st ed. Moscow: YURAIT PublishingHouse, 2020. 279 p.

ЛАЗЕРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

doi: 10.51639/2713-0568_2024_4_1_36
УДК 535.311, 551.508.77, 621.317.79
ГРНТИ 29.31.29, 37.21.03
ВАК 2.2.6, 2.2.8

Вариации импеданса плазмы лампы-вспышки твердотельного лазера при емкостной накачке

^{1*} Вальшин А. М., ² Першин С. М.

¹ Уфимский университет науки и технологий, 450076, Уфа

² Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской Академии Наук, 119991, Москва

e-mail: * amvals@mail.ru

Проведены измерения динамики импеданса плазмы лампы-вспышки твердотельного лазера при традиционной ёмкостной накачке. Предложен и разработан метод измерения как среднего значения импеданса плазмы импульсного разряда (2 Ом), так и его динамическое значение (0,35 Ом) при энергии накачки 20 Дж.

Ключевые слова: газоразрядная лампа, импеданс плазмы, емкостная накачка, твердотельный лазер.

Известно, что резонансная диодная накачка твердотельных лазеров позволила создать компактные эффективные генераторы. Однако накачка выходных каскадов больших лазерных комплексов осуществляется только цилиндрическими лампами-вспышками с помощью традиционной ёмкостной накачки. При этом эффективность такой накачки не превышает доли процентов, что указывает на актуальность повышения КПД накачки, особенно, каскадов оконечных усилителей.

Известно, что основным фактором повышения эффективности накачки является повышение КПД преобразования электрической энергии накопителя в оптическое излучение плазмы разряда лампы-вспышки. Для оценки эффективности необходимо провести диагностику характеристик плазмы. Важно знать зависимость импеданса плазмы от значения полного разрядного тока, напряжения на разрядном промежутке, а также размера светящихся областей плазмы. Во многих работах [1–5] ограничиваются значениями средней проводимости и средней электрической мощности в разряде. При этом значения импеданса плазмы, как правило, обозначены в виде активного сопротивления или, как активного сопротивления и индуктивности, величина которой сравнима с индуктивностью проводника (провода), заменяющей по геометрическим размерам плазменный шнур. Так, например, при токах через лампу около 1 А, в режиме дежурной дуги, импеданс плазмы составляет 60 Ом [5]. При увеличении тока импеданс плазмы уменьшается.

Целью данной работы является экспериментальные измерения среднего значения импеданса, а также динамики импеданса плазмы лампы-вспышки твердотельного лазера в зависимости от импульса тока разряда ёмкости накачки.

Методика измерения импеданса плазмы

Схема стандартной экспериментальной установки состояла из разрядного конденсатора, блока импульсного поджига, исследуемой лампы и пояса Роговского, включённые последовательно. Ток разряда в лампе измеряли с помощью пояса Роговского. Для абсолютной калибровки показаний пояса Роговского использовали схему разрядного контура, подключенной к образцовому сопротивлению 1 Ом. В процессе разряда измеряли амплитуду напряжения на образцовом сопротивлении и, одновременно, напряжение на поясе Роговского. Так сигнал с пояса Роговского составлял величину 1 В при 100 А токе разряда. На рис. 1 приведены осциллограммы импульсного тока разряда через лампу в двух режимах – в аperiodическом и колебательном, которые мы рассмотрим ниже.

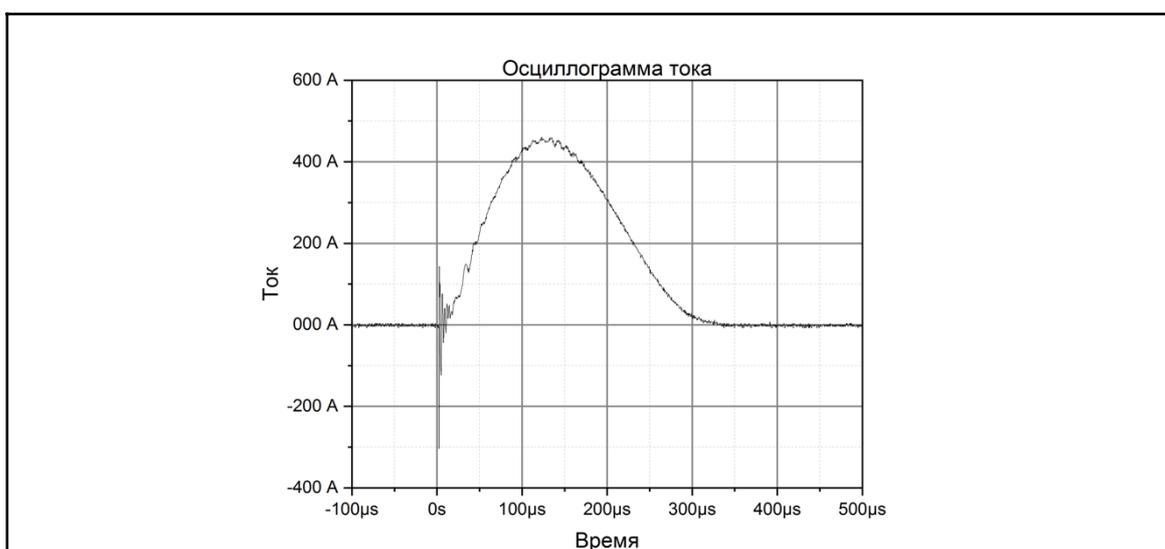


Рис. 1.а. Режим аperiodический $C = 80$ мкФ, $L = 70$ мкГ

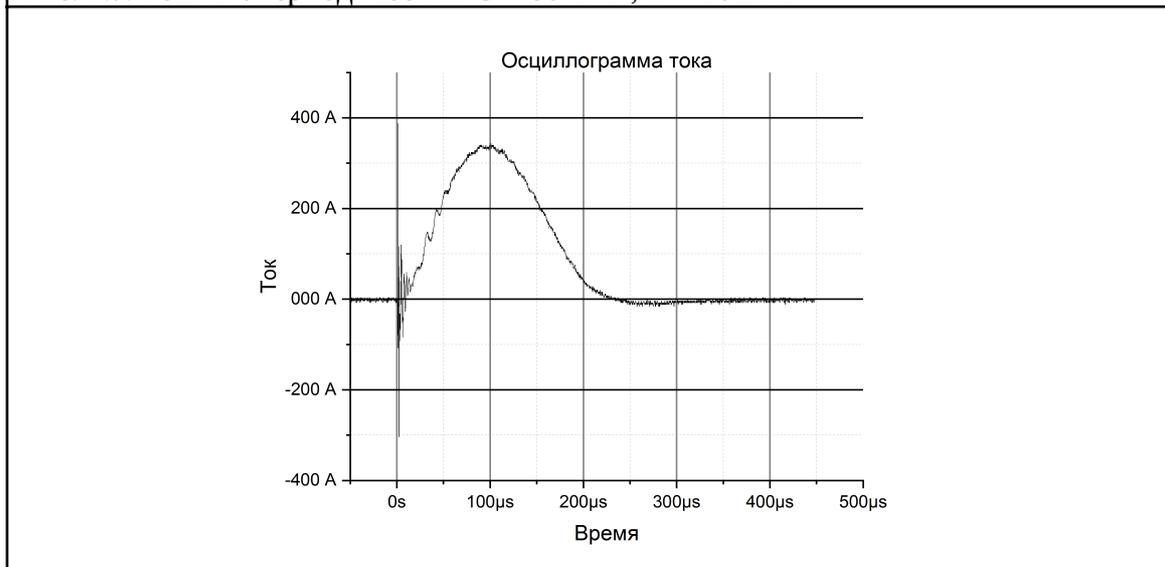


Рис. 1.б. Режим колебательный $C = 40$ мкФ, $L = 70$ мкГ

Для измерения среднего значения импеданса плазмы лампы-вспышки твердотельного лазера при традиционной ёмкостной накачке обратимся к классической задаче расчёта переходных процессов — анализ разряда конденсатора на цепь с последовательным

соединением резистора и катушки (рис. 2).

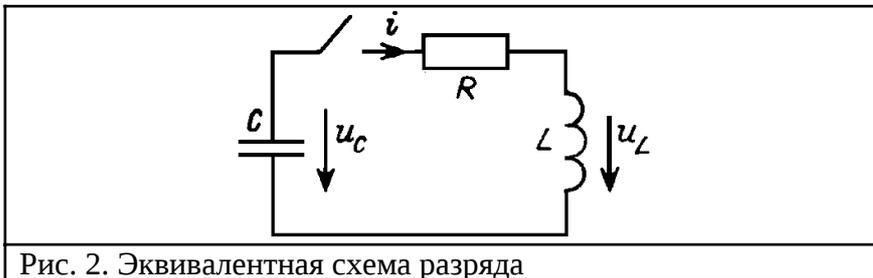


Рис. 2. Эквивалентная схема разряда

Запишем уравнения переходного процесса в контуре

$$u_C + Ri + L \frac{di}{dt} = 0,$$

$$i = C \frac{du_C}{dt}.$$

Далее исключим отсюда u_C , и придём к дифференциальному уравнению 2-го порядка относительно тока

$$LC \frac{d^2 i}{dt^2} + RC \frac{di}{dt} + i = 0.$$

Как известно, решение этого уравнения имеет вид:

$$i = \frac{U}{\omega L} \sin(\omega t) * \epsilon^{-at}, \quad (1)$$

где i – ток в разрядном контуре, U – напряжение на конденсаторе C , L – индуктивность разрядного контура, R – активное сопротивление разрядного контура. Здесь коэффициент затухания

$$a = \frac{R}{2L}.$$

При этом, УГЛОВАЯ частота ω

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} = \sqrt{a^2 - a \frac{R}{L} + \frac{1}{LC}} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}.$$

где T – период колебаний.

Из этой формулы мы можем заключить, что если

$$\frac{1}{LC} = \frac{R^2}{4L^2},$$

то период $T \rightarrow \infty$, и разряд конденсатора будет аperiодическим, при котором мы не получаем переменного тока в замкнутом контуре. Можно сделать вывод, что разряд конденсатора будет колебательным только в том случае, если выполняется условие $R < 2\sqrt{(L/C)}$.

Если подставить значения ёмкостей и индуктивностей для аperiодического и колебательного режимов, мы получим значение сопротивления контура не менее 1,9 Ом при напряжении на конденсаторе 1000 В и токе разряда 450 А для аperiодического режима, и $R < 2,6$ Ом для колебательного режима при токе разряда 350 А.

Далее оценим динамику развития импеданса плазмы в зависимости от тока непосредственно во время разряда емкости накачки. Напишем уравнение тока разряда через контур (1) с учётом начального тока I_0 поджигающего импульса:

$$i = I_0 + \frac{U}{\omega L} \sin(\omega t) * \epsilon^{-at}. \quad (2)$$

Учитывая обратную пропорциональность сопротивления лампы от тока разряда,

уравнение для сопротивления лампы перепишем в следующем виде:

$$R = \frac{KU}{I_0 + \frac{U}{\omega L} \sin(\omega t) * \epsilon^{-at}}, \quad (3)$$

где K – коэффициент пропорциональности между сопротивлением лампы и током разряда. Для определения неизвестных параметров мы исходили из следующих соображений. Среднее значение сопротивления плазмы за полупериод колебательного процесса равно около 2,5 Ом, а начальное значение сопротивления лампы после импульсного пробоя варьируется в пределах 60...100 Ом. С учетом этих значений на рис. 3 и 4 приведены графики зависимости тока разряда в контуре и динамическое сопротивления лампы за полупериод колебания контура.

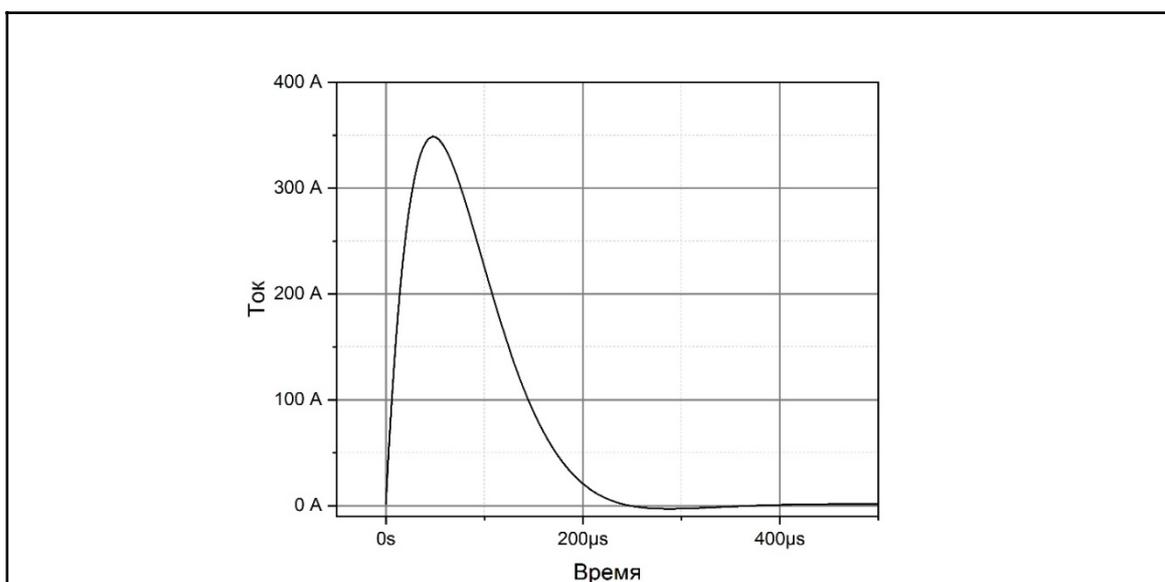


Рис. 3. Расчёт тока разряда в контуре $I_0 = 1,6$ А, $K = 100$

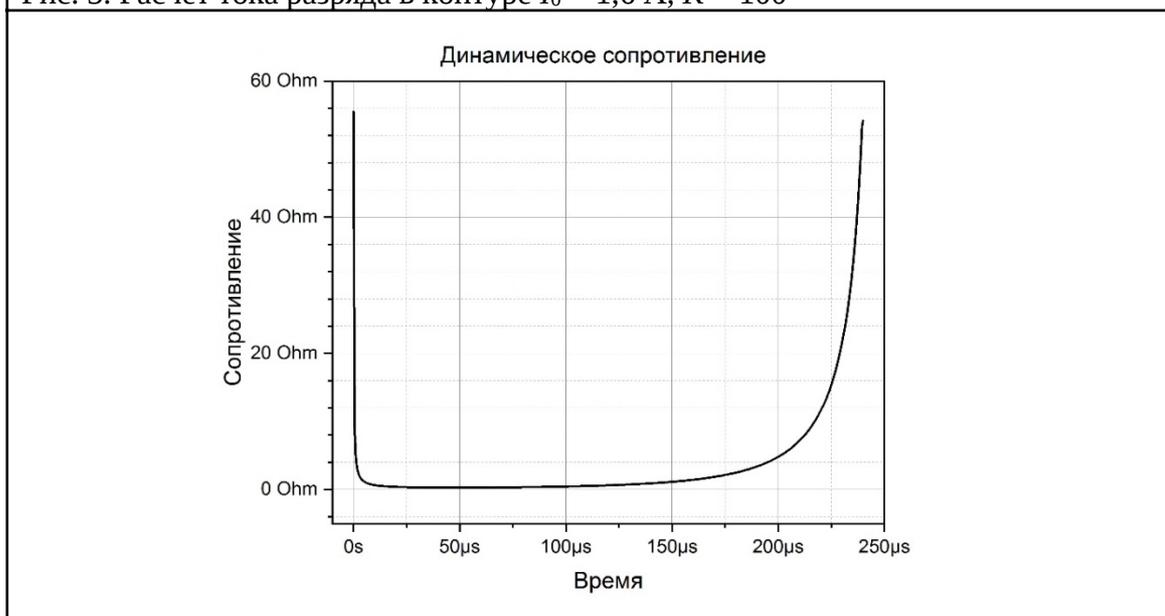


Рис. 4. Динамическое сопротивление канала разряда лампы

Как видим, график зависимости тока разряда в контуре, снятый цифровым осциллографом TDS 2024 (рис. 1), и рассчитанный программой Mathcad (рис. 3.), практически совпадают.

Полученный результат позволяет рассчитать по формуле (3) эволюцию сопротивления лампы от тока разряда ёмкости накачки. На рис. 4 представлен результат счёта за время разряда для среднего значения сопротивления за полупериод колебаний около 2,5 Ом. Из рис. 4 видно, что сопротивление лампы при максимуме тока накачки (см. рис. 3) снижается до величины $\sim 0,35$ Ом. При этом при минимальном токе, в начале и конце разряда, сопротивление возрастает до 60 Ом. Заметим, эти расчёты были проведены при ёмкости накачки 40 мкФ, заряженных до напряжения 1000 В и энергии накачки 20 Дж. С увеличением энергии накачки на два и более порядка (многопроходные усилительные каскады больших многоканальных лазерных систем, например, для лазерного термоядерного синтеза) динамическое сопротивление канала разряда лампы может уменьшиться до значений, сравнимых или меньших, чем активное сопротивление контура, что в свою очередь приводит к насыщению эффективности накачки.

Согласно работе [3] оценка потерь в активном сопротивлении контура определяется выражением $R_0 / (R_0 + R)$, (где R — эффективное сопротивление канала разряда лампы, R_0 — активное сопротивление контура). При приближении сопротивления канала разряда к активному сопротивлению контура эффективность падает до 50 %, что непременно приведет к насыщению энергии излучения лазера.

Для того, чтобы уменьшить эффект насыщения при больших энергиях накачки, необходимо, на наш взгляд, перейти к режиму комбинированной накачке, состоящей из высокочастотного поджига с его последующего высокочастотного розжига-раскачки для разряда накопительной ёмкости через лампу лазера значительно бóльшим током. В этом случае, согласно нашей работе [6], ожидается кратное снижение порога генерации и повышение КПД Nd:YAG лазера при высокочастотном (3 МГц) «розжиге» лампы-вспышки без изменения конструкции лазера.

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. 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. 478с.
4. А. А. Рухадзе, А. Ф. Александров. Физика сильноточных электроразрядных источников света. Изд. 2. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2012. 184 стр.
5. А. М. Вальшин. Измерение сопротивления канала разряда лампы-вспышки для твердотельного лазера при высокочастотной накачке в резонансном колебательном контуре // Лазеры. Измерения. Информация. 2022. Том 02. № 04 (08). с. 4–8.
6. А. М. Вальшин, В. А. Орлович, С. А. Бельков, С. М. Першин, В. И. Пузыревский. 3-кратное снижение порога генерации и 2-кратное увеличение КПД Nd³⁺:YAG лазера при ВЧ раскачке поджига лампы // Инженерная физика. № 12. 2023. с. 3–10.

Variations in the Impedance of a Solid-State Laser Flashlamp Plasma with Capacitive Pumping

^{1*} Val'shin A. M., ² Pershin S. M.

¹ Ufa University of Science and Technology, 450076, Ufa,

² A. M. Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, 119991,
Moscow

e-mail: * amvals@mail.ru

The dynamics of the impedance of a solid-state laser flashlamp plasma were measured with traditional capacitive pumping. A method for measuring both the average value of the pulsed discharge plasma impedance (2 Ohm) and its dynamic value (0.35 Ohm) at a pump energy of 20 J was proposed and developed.

Keywords: gas-discharge lamp, plasma impedance, capacitive pumping, solid-state laser.

References

1. A. G. Oreshko. Domain Model of Anomalous Plasma Resistance. *Issues of Atomic Science and Technology, Series: Plasma Electronics and New Acceleration Methods*, 2000, No. 1, pp. 13-16.
2. S. S. Anufrik, A. P. Volodenkov, K. F. Znosko. Time Dependence of Plasma Resistance in Electric-Discharge Excimer Lasers. <http://elib.bsu.by/handle/123456789/31723>
3. *Pulsed Light Sources* / edited by I. S. Marshak, 2nd ed. Moscow: Energia, 1978. 478 p.
4. A. A. Rukhadze, A. F. Aleksandrov. *Physics of High-Current Electric-Discharge Light Sources*. Publ. 2. Moscow: Knizhny Dom "LIBROKOM", 2012. 184 p.
5. A. M. Valshin. Measurement of the Discharge Channel Resistance of a Flash Lamp for a Solid-State Laser with High-Frequency Pumping in a Resonant Oscillatory Circuit // *Lasers. Measurements. Information*. 2022. Vol. 02. No. 04 (08). pp. 4–8.
6. A. M. Valshin, V. A. Orlovich, S. A. Belkov, S. M. Pershin, V. I. Puzyrevsky. 3-Fold Reduction of the Generation Threshold and 2-Fold Increase in the Efficiency of an Nd³⁺:YAG Laser with High-Frequency Pumping of the Lamp Ignition // *Engineering Physics*. No. 12. 2023. pp. 3–10.

ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

doi: 10.51639/2713-0568_2024_4_1_42

УДК 621.373.8

ГРНТИ 29.33.00

ВАК 1.3.19

Конференция, рожденная в лихие 90-е

¹Тарасенко В. Ф., ²Евтушенко Г. С.

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН, 634055, г Томск, пр. Академический, 4
²НИИ РИНКЦЭ, 127055, г. Москва, ул. Образцова 12, к.2

email: vft@loi.hcei.tsc.ru, * evtushenkogs@extech.ru

«Под лежащий камень вода не течет»

В статье приведены данные об организации и успешном проведении в 1992–2023 годах шестнадцати Международных конференций AMPL. Описана их тематика, даны ссылки на подробные программы прошедших конференций и на журналы, опубликовавшие тематические сборники с трудами конференций AMPL. Статья иллюстрирована фотографиями с участниками конференций. Показано, что несмотря на смену поколений, конференция продолжает развиваться и обогащается новыми направлениями. Приглашаем к участию в XVII Международной конференции, посвящённой лазерам и их применениям, которая состоится в Томске в сентябре 2025 года.

Ключевые слова: AMPL, импульсные лазеры, активные среды, фотоника, применения лазеров, преобразование лазерного излучения, источники спонтанного излучения, эксилампы.

История организации AMPL

Цель данной статьи – привести информацию о тематике, организации, развитии и успешном проведении шестнадцати международных конференций AMPL, а также об участниках, известных своими научными достижениями, и их публикациях.

До начала 90-ых годов в СССР, а затем в России, не было особой потребности в организации новой лазерной конференции. Регулярно проводились международные конференции такие как: «Оптика лазеров» (г. Ленинград), «Когерентная и нелинейная оптика» (различные города СССР), в которых участвовало большое число учёных, а также другие менее масштабные мероприятия. Это позволяло встречаться учёным, работающим в лазерной области, и обсуждать новые результаты. Однако в период распада СССР и резких политических изменений, деньги на развитие науки существенно уменьшились и многие конференции перестали проводиться или увеличился период между их организацией. Например, между XIV Международной конференции по когерентной и нелинейной оптике (1991 г.) и XV (1995 г.) прошло четыре года. Конференция «Оптика лазеров» была проведена в 1991 и 1993 годах. С другой стороны, большое число учёных, часто на энтузиазме, продолжали успешно работать в науке и была необходимость

встречаться и обсуждать новые результаты. При встречах и переписке, чему способствовала электронная почта, многие учёные из различных регионов, работающие в области создания лазеров, высказывали предложения о необходимости организации новых конференций.

Эта идея, в частности, была осуществлена томскими учёными из Института сильноточной электроники СО РАН (В. Ф. Тарасенко, С. В. Мельченко), Института оптики атмосферы и океана СО РАН (Г. С. Евтушенко, В. М. Климкин), Сибирского физико-технического института (Г. В. Майер, Т. Н. Копылова, А. М. Янчарина) и Томского государственного университета (А. Н. Солдатов), а также их коллегами. Вышеперечисленные три института и университет стали организаторами первой конференции, которая была проведена 7–9 сентября 1992 года. Организацию конференции своим участием поддержали коллеги из институтов, университетов и других организаций различных городов России (Москвы, Санкт-Петербурга, Ростова-на-Дону, Новосибирска, Екатеринбурга, Рязани, Сарова и др.). Сопредседателями рабочего Оргкомитета первой конференции были Г. В. Майер, А. Н. Солдатов и В. Ф. Тарасенко, а учёными секретарями (Г. С. Евтушенко и С. В. Мельченко). Отметим, что в первых конференциях среди её организаторов не было учёных занимающих высокие административные посты. Однако в первую конференцию их поддержали спонсоры, а в последующие поддерживали как спонсоры, так и научные фонды, а также руководители организаций, проводивших конференцию (директора академических институтов: Г. Г. Матвиенко, И. В. Пташник и Н. А. Ратахин, ректор ТГУ Г. В. Майер).

На сайте конференции [1] отражена информация о работе прошедших конференций, приведены программы заседаний с названиями докладов, фамилиями докладчиков и их соавторов, а также составах различных Организационных комитетов. Эта информация была подготовлена А. В. Климкиным из Института оптики атмосферы и океана СО РАН, который стал учёным секретарём конференции AMPL начиная с 2003 года и взял на себя основную работу по организации конференции и привлечению спонсоров. Все конференции проводились в старинном сибирском городе Томске. За прошедшие 32 года и 16 проведённых конференций в них участвовало большое число учёных и сотрудников из различных городов России и других стран. В среднем число участников AMPL, в числе которых были студенты томских ВУЗов было около 200 человек.

Статус международной конференции потребовал серьезной работы по привлечению ведущих иностранных ученых. За прошедшие годы в AMPL участвовали учёные из США, Франции, Германии, Великобритании, Израиля, Китая, Сербии, Японии, Италии, Австралии, Болгарии, Южной Африки, Ирана, Турции, Испании, Украины, Белоруссии, Казахстана, Киргизии, Узбекистана, Азербайджана, Литвы, Эстонии, Египта. В приглашение известных учёных из ведущих лабораторий различных стран и России значительный вклад внёс (в различные годы председатель и сопредседатель AMPL) профессор В. Ф. Тарасенко, который часто посещал Международные конференции и вместе с лабораторией оптических излучений сотрудничал с научными группами в России и за рубежом.

Также было важно найти международные научные издания, которые бы согласились на публикацию трудов конференции без оплаты. И здесь важную роль сыграл сопредседатель Международного оргкомитета с 1977 года, известный российский учёный профессор Петраш Г. Г. (Физический институт РАН, г. Москва), который решил вопрос с публикацией Трудов через Российское отделение оптических инженеров (SPIE) и лично пригласил ряд ведущих западных коллег принять участие в конференции. Многие доклады, представленные на конференциях AMPL опубликованы в сборниках SPIE. Из российских журналов следует отметить журнал «Оптики атмосферы и океана», который

после каждой из конференций посвящал один – два своих номера публикации статей, отобранных Оргкомитетом.

Название первой конференции было «Импульсные лазеры на переходах атомов и молекул», на английском языке «Pulsed Lasers on Atomic and Molecular Transitions». Оно отражало связь с конференцией, которая ранее проводилась томской школой спектроскопистов и имела название «Инверсная населённость на переходах атомов и молекул». Однако иностранные учёные (K. Little, G. Eden, F. Tittel, M. Perrone) – участники конференции, посоветовали уточнить название, чтобы оно более отвечало лазерной тематике мероприятия при его международном статусе. Поэтому, начиная с III конференции (сентябрь 1997 года) название изменилось на «Atomic and Molecular Pulsed Lasers» (AMPL). Ещё одно уточнение названия, следуя требованию времени о практическом использовании результатов исследований, было сделано в 2017 году. Новое название конференции стало «Pulsed Lasers and Laser Applications», но бренд Международной конференции – AMPL был оставлен и используется в настоящее время.

Данная конференция была организована в Томске в 1992 г. учёными, которые занимались созданием и применением лазеров, а также спектроскопией молекул и атомов. AMPL обычно проводилась в середине сентября, это время оказалось наиболее удобным для большинства участников конференции. Традицией конференции, начиная с первой, было коллективное фотографирование участников. Ниже представлены фотографии I, X и крайней XVI конференций, которая была проведена в 2023 году.



Рис. 1. Участники I международной конференции 1992 года, в том числе учёные из США, Франции, Италии и Японии



Рис. 2. Участники X международной конференции 2011 года, в том числе учёные из Китая, Франции, США, Германии, Сербии



Рис. 3. Участники XVI международной конференции 2023 года, в том числе учёные из Германии, США, Сербии, Азербайджана

Научная тематика AMPL

Тематика конференции включает в себя фундаментальные вопросы лазерной физики, физико-химические процессы в активных средах лазеров, новые типы лазеров и лазерных систем, применения лазеров в науке, технике, медицине, других областях деятельности, проблемы вывода лазерных устройств и технологий на рынок, а также фундаментальные и прикладные вопросы по созданию и применению источников спонтанного излучения

Лазеры. Измерения. Информация. 2024. Том № 04. № 01 (13)
<https://lasers-measurement-information.ru>

(эксиламп). Эти направления формировались, опираясь на работы научных групп из Института оптики атмосферы и океана СО РАН, Института сильноточной электроники СО РАН, Сибирского физико-технического института и Томского государственного университета, которые проводились в сотрудничестве с учёными из других городов России, а также из других стран. На первом этапе основное внимание уделялось исследованию лазеров различного типа, и источникам спонтанного излучения, прежде всего эксилампам УФ и ВУФ диапазонов. Пленарные доклады вначале заслушивались в Доме учёных томского Академгородка, затем, благодаря поддержке директоров ИОА СО РАН в зале для проведения конференций этого института, а при удаче с финансовой поддержкой АМРЛ, в Конгресс центре «Рубин» томского Академгородка. На рис. 4, 5 показаны пленарные заседания I и XVI конференций.



Рис. 4. Пленарное заседание 11-ой Международной конференции 2013 года в Конгресс центре «Рубин»



Рис. 4. Пленарное заседание XVI Международной конференции 2023 года в конференц-зале ИОА СО РАН

В работе конференции наряду с известными учеными учёными активно участвовали молодые сотрудники и аспиранты, а также студенты и магистры. Краткий обзор научных результатов, представленных на прошедших конференциях приведён в статье [2]. В ней показано, как, отвечая на вызовы получения новых знаний в области фотоники, а также потребностей рынка лазерной техники и технологий, постепенно расширялась и модифицировалась тематика конференции. Дан анализ современного состояния фундаментальных и прикладных исследований, обсуждаются тенденции развития лазерных технологий.

Более подробно с материалами научных докладов и итогами конференции AMPL за все годы её проведения можно ознакомиться в 20 тематических выпусках журнала «Оптика атмосферы и океана» (1993. Т. 6. № 3, 6; 1995. Т. 8. № 11; 1997. Т. 10. № 11; 1998. Т. 11. № 2–3; 1999. Т. 12. № 11; 2000. Т. 13 № 3; 2001. Т. 14. № 11; 2002. Т. 15. № 3; 2004. Т. 17. № 2–3; 2006. Т. 19. № 2–3; 2008. Т. 21. № 08; 2009. Т. 22. № 11; 2012. Т. 25. № 3; 2014. Т. 27. № 4; 2016. Т. 29. № 2; 2018. Т. 31. № 3; 2020. Т. 33. № 3; 2022. Т. 35. № 4; 2024. Т. 37. № 4), в тематической серии трудов Общества оптических инженеров Proceedings of SPIE (1995, V. 2619; 1997, V. 3403; 1999, V. 4071; 2001, V. 4747; 2003, V. 5483; 2005, V. 6263; 2008, V. 6938; 2018, V. 106140; 2019, V. 11322; 2021, V. 12086; 2023, V. 12920), в журналах «Квантовая электроника» (2000. Т. 30. № 6) и «Известия ТПУ» (2006. Т. 309. № 4; 2008. Т. 312. № 2), а также в коллективной монографии [3], которую подготовили томские ученые.

Представление и обсуждение результатов



Рис. 6. Стендовые секции X и XI Международных конференций AMPL

Представление научных результатов осуществлялось во время пленарных секций; (фотографии двух показаны на рис. 4, 5); секций с устными докладами; секций со стендовыми докладами (ряд фотографий, сделанных во время их проведения, приведены на рис. 6); на молодёжной секции, где выступали и соревновались молодые учёные, а также во время специальных тематических заседаний – круглых столов.

Активные обсуждения докладов, которые демонстрируют фотографии на рис. 7,

продолжались в перерывах между заседаниями и после завершения очередного рабочего дня.



Рис. 7. Продолжение дискуссий на XI Международной конференции AMPL, конгресс центр «Рубин», 2013 год

Кроме того, для участников конференций проводились экскурсии в научные лаборатории организаторов AMPL, одна из фотографий показаны на рис. 8.



Рис. 7. Экскурсия в Институт сильноточной электроники СО РАН

О будущем AMPL

В настоящее время происходят быстрые изменения в научной тематике и требуется внедрение полученных результатов. Конференции, прошедшие в 2019, 2021 и 2023 годах показали, что конференция AMPL имеет перспективы продолжения и развития. Её научная тематика остаётся востребованной и постоянно совершенствуется. На смену ветеранам приходят молодые учёные, которые активно работают в науке. В том числе идёт омоложение организаторов AMPL. Международный оргкомитет возглавил директор ИОА СО РАН, член-корреспондент Российской Академии Наук И. В. Пташник, который уже принял активное участие в проведении конференций AMPL-2021 и AMPL-2023. Сопредседателем Международного комитета в 2023 году стал молодой д. т. н. М. Тригуб. Организаторами Секций и Круглых столов, а также активными участниками AMPL стали доктора наук Д. А. Закревский, Э. А. Соснин, а также кандидаты В. А. Светличный, Е. И. Липатов, М. А. Герасимова, Д. А. Сорокин.

Оргкомитетом принято решение, что следующая конференция XVII AMPL будет также проведена в Томске в сентябре 2025 г. Приглашаем заинтересованных учёных, инженеров, аспирантов и студентов принять в ней участие. Следите за новостями на сайте Института оптики атмосферы СО РАН [<https://symp.iao.ru/ru>].

Лазеры. Измерения. Информация. 2024. Том № 04. № 01 (13)
<https://lasers-measurement-information.ru>

Авторы данной краткой статьи выражают искреннюю благодарность членам оргкомитетов различных лет, всем участникам проведенных АМPL, которые внесли вклад в развитие физики, техники и применения лазеров и своим участием сделали конференцию известной в мировом сообществе.

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 по написанию данной статьи была выполнена в рамках Государственного задания ИСЭ СО РАН, проект № FWRM-2021-0014 и при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания НИИ РИНКЦЭ на 2024 год №075-00698-24-00.

Список литературы

1. <https://symp.iao.ru/ru/ampl>.
2. Evtushenko Gennadii, Klimkin A. V., Levitsky M. E., Tarasenko V., Trigub M. V. (2020). AMPL international conference (1992–2019) and its role in the development of physics and technology of pulsed lasers, as well as their applications. *Innovatics and Expert Examination*. 103-110. DOI: 10.35264/1996-2274-2020-1-103-110.
3. Импульсные лазеры на переходах атомов и молекул / под ред. В. Ф. Тарасенко. Томск: STT, 2014. 439 с.

A conference born in the dashing 90s

¹Tarasenko V. F, ^{*2}Evtushenko G. S.

¹ *Institute of High Current Electronics , 634055, Russia, Tomsk, Arademicheskii avenue 4*
² *Federal research center for projects evaluation and consulting services (SRI FRCEC),127055, Russia, Moscow, Obraztsova St. 12, Bldg. 2*

email: *evt@tpu.ru, evtushenkogs@extech.ru

The article provides data on the organization and successful conduct of sixteen AMPL International Conferences from 1992 to 2023. Their topics are described, links are provided to detailed programs of past conferences and to journals that published thematic collections with proceedings of AMPL conferences. The article is illustrated with photographs of conference participants. It is shown that despite the change of generations, the conference continues to develop and is enriched with new directions. We invite you to participate in the 17-th International Conference on Lasers and Their Applications, which will be held in Tomsk in September 2025.

Keywords: AMPL, pulsed lasers, active media, photonics, laser applications, conversion of laser radiation, sources of spontaneous radiation, excilamps.

Лазеры. Измерения. Информация. 2024. Том № 04. № 01 (13)
<https://lasers-measurement-information.ru>

References

1. <https://symp.iao.ru/ru/ampl>.
2. Evtushenko Gennadii, Klimkin A. V., Levitsky M. E., Tarasenko V., Trigub M. V. (2020). AMPL international conference (1992–2019) and its role in the development of physics and technology of pulsed lasers, as well as their applications. *Innovatics and Expert Examination*. 103-110. DOI: 10.35264/1996-2274-2020-1-103-110.
3. *Pulsed lasers on transitions of atoms and molecules* / ed. V. F. Tarasenko. Tomsk: STT, 2014. 439 p.

Научное издание

Лазеры. Измерения. Информация
(ЛИИ-2024. Т. 4, № 1)

Периодическое сетевое научное издание

Гл. редактор Привалов В. Е.
Отв. редактор Шеманин В. Г.
Науч. редактирование и корректура Мкртычев О. В.
Тех. поддержка Сарычев П. И.

Подписано к публикации 22.05.24.

Опубликовано в режиме доступа для зарегистрированных пользователей.

URL: <https://lasers-measurement-information.ru/ojs/index.php/laser/index>

Издательство филиала федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова» в г. Новороссийске.
353919, г. Новороссийск, Мысхакское шоссе, 75.