ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ МОЩНЫХ ЛАЗЕРОВ

Сапаев Усман Каландарович

Филиал Российского Государственного Университета нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина в городе Ташкенте, заведующий кафедрой, д.ф-м.н, доцент

E-mail: usapaev@gmail.ru

Турдиев Мухиддин Шукурович

Филиал Российского Государственного Университета нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина в городе Ташкенте, заведующий лабораторией

E-mail:gorovli54@gmail.com

Annotatsiya. Lazer nurlanishining atmosfera tarkibiy qismlari bilan o‘zaro ta’siri fizik prinsiplari batafsil ko‘rib chiqildi. Unda Reley molekulyar sochilishi, Mia erodisperssochilishi, gaz komponentlari tomonidan yutilish jarayonlari hamda suv bug‘ining ta’siri tahlil qilindi. Ko‘rsatildiki, 1.0–1.1 mkm to‘lqin uzunligiga ega itterbiy tolali lazerlar hozirgi kunda eng istiqbolli texnologik yechim bo‘lib, bu diapazonda atmosferaning yuqori shaffofligi va record darajadagi chiqish quvvati o‘rtasida optimal muvozanatni ta’minlaydi. Lidar tizimlari uchun nurlanish manbalarining rivojlanish bosqichlari — dastlabki eksperimental qurilmalardan tortib zamonaviy tijoriy tizimlargacha — tahlil qilindi. Shuningdek, turli lazer texnologiyalarining energetic samaradorligi, xizmat muddati, texnik xizmat ko‘rsatish talablari va egalik qilish qiymati kabi ekspluatatsion ko‘rsatkichlar bo‘yicha batafsil taqqoslas ham amalga oshirildi.

Kalit so‘zlar:atmosferani zondlash, lazer turlari, to‘lqin uzunligi, spectral diapazon.

Аннотация. Подробно рассмотрены физические принципы взаимодействия лазерного излучения с атмосферными компонентами, включая молекулярное рассеяние Рэлея, аэрозольное рассеяние Ми, поглощение газовыми компонентами и влияние водяного пара. Показано, что иттербиевые волоконные лазеры с длиной волны 1.0–1.1 мкм на сегодняшний день являются наиболее перспективным технологическим решением, обеспечивающим оптимальный баланс между высокой прозрачностью атмосферы в данном спектральном диапазоне и рекордной выходной мощностью. Проанализированы ключевые исторические этапы развития источников излучения для лидарных систем — от первых экспериментальных установок до современных коммерческих образцов. Проведено подробное сравнение основных лазерных технологий по

ISSN 3030-3907

совокупности эксплуатационных характеристик, включая энергетическую эффективность, ресурс работы, требования к обслуживанию и стоимость владения.

Ключевые слова: атмосферное зондирование, типы лазеров, длина волны, спектральный диапазон.

Abstract. The physical principles governing the interaction of laser radiation with atmospheric components are examined in detail, including Rayleigh molecular scattering, Mie aerosol scattering, absorption by gaseous constituents, and the influence of water vapor. It is shown that ytterbium fiber lasers operating at wavelengths of 1.0–1.1 μm represent the most promising technological solution, providing an optimal balance between high atmospheric transparency in this spectral region and record output power. Key historical stages in the development of radiation sources for lidar systems — from the earliest experimental setups to modern commercial implementations — are analyzed. A comprehensive comparison of major laser technologies is presented based on their operational characteristics, including energy efficiency, lifetime, maintenance requirements, and total cost of ownership.

Keywords: atmospheric sensing, laser types, wavelength, spectral range.

Введение

Лазерное зондирование атмосферы, или лидарная технология (LightDetectionandRanging), прошло впечатляющий путь развития от первых лабораторных экспериментов до мощных коммерческих систем, используемых по всему миру для решения широкого круга научных и прикладных задач. С момента создания первых рубиновых и неодимовыхлидаров в 1960–1970-х годах прошло более полувека, и за это время технологии претерпели колоссальные изменения, превратившись из экзотического научного инструмента в неотъемлемую часть современной метеорологии, экологии, климатологии и промышленного мониторинга [1-3]. Фундаментальный принцип лидарного зондирования основан на анализе обратного рассеяния лазерного импульса на различных компонентах атмосферы — молекулах газов, аэрозольных частицах, каплях воды и кристаллах льда, что позволяет получать информацию о концентрации примесей, температуре, влажности, скорости ветра и других параметрах на расстояниях от нескольких метров до десятков километров. Атмосфера Земли представляет собой сложную оптическую среду, характеристики которой существенно изменяются в зависимости от длины волны. На рисунке 1 показаны основные окна прозрачности атмосферы, обусловленные минимальным поглощением водяным паром и углекислым газом. Самым широким и прозрачным является диапазон 0.9 мкм–1.2 мкм, где суммарный

ISSN 3030-3907

коэффициент ослабления достигает минимальных значений. В центре этого диапазона находится длина волны иттербиевых волоконных лазеров (1.03 мкм–1.10 мкм), что обеспечивает им фундаментальное преимущество перед другими источниками излучения. Важность правильного выбора длины волны становится особенно очевидной при рассмотрении уравнения лидарного сигнала, которое описывает мощность принятого сигнала как функцию расстояния [4-6]:

$$P(r) = P_0 \frac{c\tau}{2} \frac{A}{r^2} \beta(r) \exp\left(-2 \int_0^r \alpha\,(r')dr'\right)$$

Где P_0 — мощность излучения, c — скорость света, τ — длительность импульса, A — площадь приемной апертуры, $\beta(r)$ — коэффициент обратного рассеяния, $\alpha(r)$ — коэффициент ослабления. Из этого уравнения следует, что экспоненциальный член, зависящий от интегрального коэффициента ослабления, оказывает решающее влияние на дальность зондирования, что делает минимизацию $\alpha(r)$ через оптимальный выбор длины волны критически важной задачей.

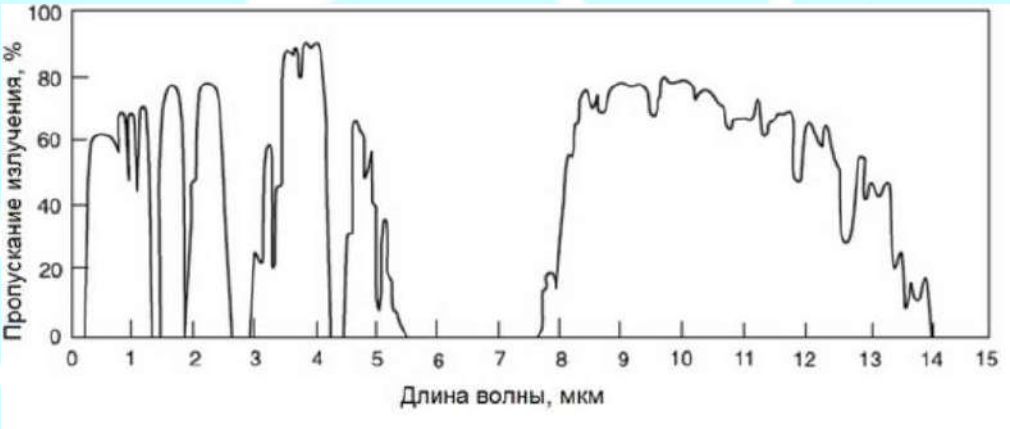


Рис. 1. Окна прозрачности атмосферы Земли в диапазоне 0.3 мкм–5 мкм. Показаны основные полосы поглощения атмосферных газов (H_2O, CO_2, O_3). Самое широкое окно прозрачности около 1 мкм идеально подходит для иттербиевых волоконных лазеров, обеспечивая минимальное ослабление сигнала и максимальную дальность зондирования.

Современные требования к лидарным системам постоянно растут, что связано с необходимостью решения все более сложных задач: мониторинга климатических изменений, контроля выбросов парниковых газов, прогнозирования экстремальных погодных явлений, обеспечения безопасности авиаполетов и оптимизации работы ветроэнергетических установок. Эти задачи требуют не только увеличения дальности и точности зондирования, но и повышения надежности, снижения эксплуатационных расходов и автоматизации процессов измерений. В этом контексте

ISSN 3030-3907

иттербиевые волоконные лазеры открывают новые возможности для создания следующего поколения лидарных систем, способных работать в автономном режиме продолжительное время без необходимости сложного обслуживания.

Исторический обзор источников излучения

1960–1980-е годы: рубиновые и неодимовые лазеры

Эпоха лазерного зондирования атмосферы началась практически одновременно с изобретением самого лазера в 1960 году. Первые лидары работали на основе твердотельных лазеров, использующих в качестве активной среды рубин ($Al_2O_3:Cr^{3+}$) с длиной волны излучения 0.694 мкм и неодим (Nd^{3+}) в различных матрицах (стекло, YAG) с длиной волны 1.064 мкм[1-3]. Рубиновые лазеры, несмотря на свою историческую значимость, имели серьезные ограничения для атмосферных измерений. Длина волны 0.694 мкм попадала в область сильного рэлеевского рассеяния, интенсивность которого пропорциональна λ^{-4}, что приводило к быстрому ослаблению сигнала и ограничивало дальность зондирования несколькими километрами даже при использовании мощных импульсов. Кроме того, эта длина волны находится в области максимальной чувствительности человеческого глаза, что создавало серьезные проблемы безопасности при работе в населенных районах. Неодимовые лазеры на $YAG:Nd^{3+}$ представляли собой значительный шаг вперед благодаря более длинной волне 1.064 мкм, которая попадала в окно прозрачности атмосферы и обеспечивала значительно меньшее рэлеевское рассеяние.

1970–1990-е годы: химические лазеры

Период 1970–1990-х годов ознаменовался появлением химических лазеров, которые продемонстрировали рекордные энергетические характеристики, но остались в основном в рамках военных программ. Химические лазеры на фтористом водороде (HF) с длиной волны 2.7 мкм и дейтерофториде (DF) с длиной волны 3.8 мкм использовали энергию экзотермических химических реакций для генерации излучения. Эти системы могли выдавать импульсы мегаваттной мощности и обеспечивать дальность зондирования до 100 km и более. Физический принцип работы химических лазеров основан на инверсии населенностей колебательных уровней молекул, образующихся в результате химической реакции. Например, в DF-лазерах реакция $F_2 + D_2 \rightarrow 2DF$ приводит к образованию возбужденных молекул DF, которые затем излучают фотоны при переходе на нижние колебательные уровни. Несмотря на впечатляющие характеристики, химические лазеры имели фатальные недостатки, препятствовавшие их широкому применению в гражданских лидарных системах: использование

ISSN 3030-3907

токсичных и коррозионно-активных реагентов (фтора, дейтерия), необходимость в сложных системах подачи и утилизации химических веществ, огромные габариты установки (занимали целые здания) и чрезвычайно высокая стоимость эксплуатации.

1990–2010-е годы: эрбиевые волоконные лазеры (1.55 мкм)

Революционным прорывом в лидарных технологиях стало появление в 1990-х годах эрбиевых волоконных лазеров, работающих на длине волны 1.55 мкм. Развитие этих лазеров было тесно связано с бурным ростом телекоммуникационной индустрии, где эта длина волны стала стандартом для волоконно-оптических линий связи благодаря минимальному поглощению в кварцевом волокне [7]. Эрбиевые лазеры имели неоспоримое преимущество — полную глазобезопасность, поскольку длина волны 1.55 мкм сильно поглощается в роговице и водянистой влаге глаза, не достигая сетчатки. Это позволяло использовать их в городских условиях и на аэродромах без ограничений по мощности. Кроме того, волоконная архитектура обеспечивала высокую надежность, компактность и простоту юстировки системы. Однако эрбиевые лазеры имели и существенные ограничения для лидарных применений. Коэффициент ослабления в окне 1.55 мкм в 3-5 раз выше, чем в окне 1 мкм, что связано с остаточным поглощением водяным паром и более сильным рэлеевским рассеянием. Более серьезной проблемой было ограничение по габаритным размерам.

Иттербиевые волоконные лазеры — новый «золотой стандарт»

Иттербиевые волоконные лазеры, излучающие в диапазоне 1.01 мкм–1.12 мкм, представляют собой качественно новый этап в развитии лидарных технологий [1-3,8]. Этот диапазон попадает в центр самого широкого и прозрачного атмосферного окна, где суммарный коэффициент ослабления достигает минимальных значений 0.02 km^{-1} в ясной атмосфере. Физические основы превосходства иттербиевых лазеров заключаются в уникальных свойствах ионов Yb^{3+} в стекловидной матрице. Простая двухуровневая схема энергетических уровней Yb^{3+} исключает процессы безызлучательной релаксации и перекрестной релаксации, что обеспечивает квантовый КПД, близкий к теоретическому пределу (91% для длины волны накачки 915 nm).

ISSN 3030-3907

Таблица1.

Сравнение источников излучения для атмосферного лидара по ключевым параметрам

Тип лазера	**Длина волны**	**Прозрачность атмосферы**	**Средняя мощность**	**Глазобезопасность**	**Компактность**
Рубиновый	0.694 мкм	плохая ($\alpha > 0.1$ км$^{-1}$)	низкая (< 10 Вт)	нет	—
Неодимовый (YAG)	1.064 мкм	очень хорошая ($\alpha \approx 0.03$ км$^{-1}$)	до 100 Вт	нет	+/-
Эрбиевый волоконный	1.55 мкм	хорошая ($\alpha \approx 0.05$ км$^{-1}$)	до 100 Вт	да	++
Иттербиевый волоконный	**1.03–1.10 мкм**	**отличная ($\alpha < 0.02$ км$^{-1}$)**	**киловатты**	**условно***	+++
Химический DF	3.8 мкм	хорошая ($\alpha \approx 0.04$ км$^{-1}$)	мегаватты	нет	—

Большое время жизни верхнего лазерного уровня (1 ms) позволяет эффективно накапливать энергию и генерировать мощные импульсы. Широкая полоса усиления (80 nm) обеспечивает возможность генерации как непрерывного, так и импульсного излучения с различными длительностями. Важным преимуществом является минимальная концентрационная квазивырожденность, что приводит к низкому порогу нелинейных эффектов даже при высоких мощностях излучения, что отображена в таблице 1.

— при энергии импульса < 10 мДж и расходимости > 1 мрад система относится к классу 1M (безопасно для глаза на расстоянии > 100 м).

Преимущества иттербиевых волоконных лазеров

Современные иттербиевые волоконные лазеры превосходят все предыдущие источники излучения по совокупности характеристик, что делает их идеальным выбором для лидарных систем:

1. Максимальная прозрачность атмосферы — коэффициент ослабления в диапазоне 1.03 мкм–1.10 мкм в 2-5 раз ниже, чем в окне 1.55 мкм, что

ISSN 3030-3907

позволяет увеличить дальность зондирования на 30-50% при той же мощности излучения [8-10]. Это преимущество особенно проявляется при зондировании на больших расстояниях (>10 km), где экспоненциальное ослабление сигнала становится критическим фактором.

2. Рекордная выходная мощность — современные промышленные системы дают среднюю мощность более 2-5 кВт в непрерывном режиме и пиковую мощность сотен мегаватт в импульсном режиме [11]. Такие характеристики достигаются благодаря применению больших модовых площадей (LMA) волокон, эффективных систем охлаждения и оптимальной геометрии резонатора.

3. Высокий КПД (до 40 % и выше) по сравнению с 3-5% у традиционных твердотельных лазеров [12-14]. Это позволяет использовать компактные системы воздушного или водяного охлаждения и значительно снижает эксплуатационные расходы. Высокий КПД также уменьшает тепловые Lens-эффекты и улучшает стабильность параметров излучения.

4. Отличное качество пучка ($M^2 < 1,2$ даже при киловаттной мощности) обеспечивается благодаря волноводной природе волоконного лазера и возможности управления профилем показателя преломления активного волокна. Это позволяет формировать узкий пучок с малой расходимостью, что критически важно для дальнего зондирования.

5. Исключительная долговечность> 50 000 часов наработки на отказ, что на порядок превышает ресурс ламповых твердотельных лазеров. Волоконная архитектура исключает необходимость в периодической юстировке и замене расходных материалов.

6. Экономическая эффективность и универсальность — это, возможно, самый важный практический фактор, делающий их оптимальным выбором. Их относительная доступность обусловлена не только физико-химическими свойствами иттербия, но и, в первую очередь, их доминирующей ролью в промышленности. Иттербиевые волоконные лазеры стали рабочей лошадкой для таких массовых применений, как резка, сварка, клеймение и гравировка металлов [12-14]. Огромный промышленный рынок стимулирует массовое производство компонентов (активных волокон, диодных накачек, волоконных Брэгговских решеток), что приводит к резкому снижению их стоимости, повышению надежности и ускорению технологического совершенствования. Таким образом, научное сообщество, использующее эти лазеры для лидарных систем, получает «бесплатный» бонус в виде доступных, зрелых и сверхнадежных технологий, разработанных и отлаженных для нужд тяжелой промышленности.

ISSN 3030-3907

7. Гибкость управления параметрами излучения — возможность генерации как непрерывного излучения, так и импульсов различной длительности (от наносекунд до фемтосекунд) с широким диапазоном энергий и частот повторения.

Примеры современных иттербиевыхлидаров

Рынок лидарного оборудования активно осваивает преимущества иттербиевых лазеров. Ветроэнергетическая индустрия переходит на иттербиевые доплеровские лидары для профилирования ветра на высотах до 200 m. Системы WindCube (Leosphere) в новых модификациях используют иттербиевые источники вместо эрбиевых, что позволяет увеличить точность измерений при слабых ветрах. В области атмосферного мониторинга компании IPG Photonics, Raycus, нТц «Лазеры и аппаратура» предлагают коммерческие киловаттные источники на основе иттербиевого волокна, специально оптимизированные для лидарных применений. Российские научные центры, включая ИПФ РАН и ИОА СО РАН, разработали уникальные импульсные иттербиевыелидары с энергией до 10 mJ и частотой до 10 кГц, способные работать в режиме сканирования для построения трехмерных полей аэрозолей и облаков [1-3]. В системах дистанционного обнаружения утечек метана и других газов иттербиевые лазеры используются как накачка для параметрических генераторов света, работающих в среднем ИК-диапазоне.

Перспективные направления развития

Развитие лидарных технологий на основе иттербиевых лазеров продолжается в нескольких перспективных направлениях [1]:

1.Создание полностью волоконных лидарных систем без свободного пространства в оптическом тракте. Такие системы будут иметь повышенную виброустойчивость, меньшие габариты и не потребуют периодической юстировки. Ключевой задачей является разработка эффективных волоконных акустооптических модуляторов и сканеров.

2.Интеграция иттербиевых источников с фотонно-кристаллическими волокнами для прямой генерации излучения в диапазоне 2 мкм–5 мкм. Это позволит упростить архитектуру систем среднего ИК-диапазона и повысить их надежность.

3.Разработка гибридных систем «иттербий + ОПГ» мощностью более 100 Вт в среднем ИК-диапазоне для дистанционного мониторинга парниковых газов на больших расстояниях. Важным направлением является повышение КПД преобразования и расширение спектрального диапазона [15].

ISSN 3030-3907

4.Применение адаптивной оптики для компенсации атмосферных искажений при киловаттных мощностях излучения. Это позволит увеличить разрешение и дальность зондирования в условиях турбулентной атмосферы.

5.Разработка квантовых лидаров на сжатых и запутанных состояниях света в окне 1 мкм. Квантовые методы могут превзойти классический предел чувствительности и обеспечить обнаружение сверхслабых сигналов.

6.Интеграция с искусственным интеллектом для обработки больших объемов лидарных данных в реальном времени, прогнозирования погодных условий и автоматической калибровки систем.

Миниатюризация лидарных систем для применения на беспилотных летательных аппаратах и спутниках, что требует разработки сверхкомпактных иттербиевых источников с массой менее 1 кг.

Выводы и предложения

В заключение следует отметить, что современные вызовы, связанные с появлением неопознанных беспилотных аппаратов, требуют нового уровня технических решений. Лазерные методы зондирования атмосферы демонстрируют значительный потенциал для обеспечения точного обнаружения и классификации таких объектов. Поэтому дальнейшее развитие мощных лазерных систем и алгоритмов обработки данных является важным направлением повышения безопасности и стабильности в условиях непрерывно усложняющейся воздушной обстановки.

На сегодняшний день иттербиевые волоконные лазеры с длиной волны 1.03 мкм–1.10 мкм стали оптимальным источником излучения практически для всех задач лазерного зондирования атмосферы. Их уникальное сочетание максимальной прозрачности атмосферы в этом спектральном диапазоне, рекордной мощности излучения, исключительной надежности, высокого КПД и экономической эффективности делает их незаменимым инструментом для решения широкого круга научных и прикладных задач. Важно подчеркнуть, что их оптимальность определяется не только физическими параметрами, такими как длина волны, но и целым комплексом эксплуатационных и экономических факторов. Ключевым фактором является их универсальность и доминирующее положение в промышленности, где они являются основным инструментом для резки, сварки и обработки металлов [16,17]. Этот огромный рынок создает эффект масштаба: массовое производство для промышленности приводит к резкому снижению цен, повышению надежности и технологической зрелости компонентов, что делает высокотехнологичные лидарные системы доступными для научных и коммерческих организаций. Таким образом, оптимальность иттербиевых лазеров — это результат синергии их идеальных

ISSN 3030-3907

физических характеристик для атмосферных измерений и их коммерческого успеха в других сферах. Дальнейшее развитие технологий иттербиевых лазеров, включая увеличение мощности, улучшение качества пучка, расширение спектрального диапазона через нелинейное преобразование и интеграцию с передовыми методами обработки данных, откроет новые возможности для мониторинга окружающей среды, климатических исследований и обеспечения безопасности. Переход к иттербиевымлидарным системам уже происходит в большинстве областей применения, и в ближайшие годы мы можем ожидать появления нового поколения интеллектуальных лидарных комплексов, способных работать в полностью автономном режиме и предоставлять в реальном времени детальную информацию о состоянии атмосферы на региональном и глобальном уровнях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Henderson S. W., et al. Atmospheric lidar using high-power fiber lasers // Applied Optics. 2004. Vol. 43, No. 3. P. 548–556.
2. Chen J., et al. High-power Yb-doped fiber laser transmitter for long-range atmospheric lidar // Optics Express. 2016. Vol. 24, No. 15. P. 17284–17293.
3. Li X., et al. Eye-safe fiber lasers for atmospheric remote sensing // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2017. Vol. 23, No. 2. Article 1500109.
4. Bohren C. F., Huffman D. R. Absorption and Scattering of Light by Small Particles. Wiley, 1983.
5. Van de Hulst H. C. Light Scattering by Small Particles. Dover Publications, 1981.
6. Mishchenko M. I., et al. Multiple scattering of light by particles // Physics Reports. 2000. Vol. 342. P. 1–63.
7. Measures R. M. Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications. Wiley, 1984.
8. Smith A. V., Smith J. W. Fiber lasers for lidar applications // Optics Express. 2013. Vol. 21. P. 109–125.
9. Limpert J., Tünnermann A. High-energy and high-power fiber lasers // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2011. Vol. 17. P. 39–51.
10. Shirakawa A., et al. High-power narrow-linewidth fiber lasers for coherent lidar // Optical Fiber Technology. 2015. Vol. 22. P. 83–92.
11. Petrov V. Frequency down-conversion sources for the mid-infrared // Progress in Quantum Electronics. 2012. Vol. 36. P. 275–370.
12. Jauregui C., Limpert J., Tünnermann A. High-power fiber lasers // Nature Photonics. 2013. Vol. 7. P. 861–867.

ISSN 3030-3907

13. Jeong Y., et al. Kilowatt-class ytterbium fiber laser // Optics Express. 2004. Vol. 12. P. 6088–6092.
14. Eidam T., et al. Femtosecond fiber CPA delivering >1 kW average power // Optics Letters. 2011. Vol. 36. P. 1572–1574.
15. Schunemann P. G., et al. Advances in nonlinear crystals for mid-IR OPOs // Optical Materials Express. 2017. Vol. 7. P. 4053–4068.
16. Schunemann P. G., et al. Nonlinear materials for mid-IR generation // Optical Materials Express. 2016. Vol. 6. P. 232–252.
17. Vodopyanov K. L. Broadband mid-IR sources via difference-frequency generation // Optics Express. 2004. Vol. 12. P. 6509–6519.

ISSN 3030-3907