

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
----------------	---

Часть первая ЛАЗЕРЫ

Глава первая

Принцип действия лазера	12
1.1. Индуцированное излучение	12
1.2. Оптический резонатор	19
1.3. Лазеры	30
Литература	31

Глава вторая

Газовые лазеры	32
2.1. Общие сведения	32
2.2. Гелий-неоновые лазеры	35
2.2.1. Общие сведения	35
2.2.2. Промышленные He-Ne-лазеры на 0,63 мкм	41
2.2.3. Другие He-Ne-лазеры	43
2.2.4. Возмущения в He-Ne-лазерах	46
2.3. Ионные газоразрядные лазеры	53
2.3.1. Общие сведения	53
2.3.2. Лазеры на ионах инертных газов	54
2.3.3. Лазеры на парах металлов	59
2.3.4. Лазеры на парах меди	62
2.4. Молекулярные лазеры	64
2.4.1. Общие сведения	64
2.4.2. Лазеры на углекислом газе	65
2.4.3. Лазеры на окиси углерода	69
2.4.4. Волноводные лазеры	70
Литература	73

Глава третья

Лазеры на основе конденсированных сред	75
3.1. Жидкостные лазеры	75
3.2. Диэлектрические лазеры	76
3.3. Полупроводниковые лазеры	84
3.4. Светодиоды	89
Литература	90

Глава четвертая

Фотоприемники	91
4.1. Общие сведения	91
4.2. Фотоэлектрические приборы	92
4.2.1. Фотосопротивления	92
4.2.2. Фотодиоды	94
4.2.3. Фототранзисторы	98
4.3. Фотоэлектронные приборы	98
4.3.1. Фотоэлементы	98
4.3.2. Фотоумножители	100
Литература	104

Глава пятая

Стабилизация мощности излучения	105
5.1. Общие сведения	105
5.2. Пассивная стабилизация параметров излучения	106
5.3. Стабилизация мощности управлением тока разряда	109
5.4. Стабилизация мощности управлением параметрами излучателя	111
5.5. Стабилизация мощности внешними регулирующими элементами	113
5.6. Роль светоделительной пластины в ССМ	117
5.7. Роль фотоприемника в ССМ	127
5.8. Комплексная ССМ	133
Литература	135

Глава шестая

Стабилизация частоты излучения	136
6.1. Общие принципы	136
6.2. Стабилизированные HE-NE-лазеры	139
Литература	145

Часть вторая**ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ***Глава седьмая*

Лидары	148
7.1. Физические основы лидарного зондирования	148
7.2. Лидар дифференциального поглощения и рассеяния	158
7.3. Лидар комбинационного рассеяния света	160
7.4. Флуоресцентный лидар	162
Литература	163

Глава восьмая

Лазерные приборы контроля радиоактивного загрязнения воздуха	165
8.1. Дистанционные методы контроля радиоактивного загрязнения атмосферы	165
8.2. Лазерное зондирование йода	168
8.3. Контроль радиоактивного загрязнения атмосферы с помощью лидаров	186
8.3.1. Лидар дифференциального поглощения и рассеяния	186
8.3.2. Лазерное зондирование радионуклидов по атомной флуоресценции	192
Литература	196

Глава девятая

Лазерное зондирование водородсодержащих молекул в атмосфере	199
9.1. Лазерное зондирование молекул водорода лидаром комбинационного рассеяния света	199
9.1.1. Измерение концентрации молекул водорода в газовых потоках	199
9.1.2. Измерение дифференциального сечения комбинационного рассеяния света молекулами водорода	200
9.1.3. Зондирование молекулярного водорода лидаром комбинационного рассеяния света	204
9.1.4. Лазерное зондирование молекулярного водорода лидаром дифференциального поглощения и рассеяния	221
9.2. Мониторинг фтороводорода в атмосфере методами лазерного зондирования	229
9.2.1. Фтороводород как загрязняющее вещество	229
9.2.2. Зондирование фтороводорода лидаром комбинационного рассеяния света	230
9.2.3. Зондирование фтороводорода лидаром дифференциального поглощения и рассеяния	233
9.3. Лидарный мониторинг молекул углеводородов	238
9.3.1. Характеристика молекул углеводородов	238
9.3.2. Зондирование молекул предельных углеводородов лидаром комбинационного рассеяния света	240
9.3.3. Лидар комбинационного рассеяния света для зондирования молекул серосодержащих углеводородов в атмосфере	248
9.3.4. Зондирование молекул углеводородов с двумя атомами углерода лидаром комбинационного рассеяния света	253
9.3.5. Зондирование молекул ароматических углеводородов в атмосфере лидаром комбинационного рассеяния света	258
9.3.6. Дифференциальная схема лидарного детектирования ультрамалых концентраций серосодержащих углеводородов	262
Литература	270

Глава десятая

Лидар комбинационного рассеяния света для зондирования молекул простых оксидов	273
10.1. Применение лидара в системе управления качеством атмосферного воздуха	273
10.2. Лазерное зондирование оксидов азота и серы в атмосфере	274
10.3. Численное моделирование лидарного уравнения для комбинационного рассеяния света молекулами простых оксидов	276
Литература	282
Заключение	283



ВВЕДЕНИЕ

Ухудшающаяся экологическая обстановка на нашей планете требует все более совершенных способов и средств диагностики окружающей среды. Одним из самых надежных, точных и информативных методов исследования атмосферы является оптическое зондирование.

История оптического зондирования атмосферы началась в 1905 году, когда наш соотечественник В. В. Кузнецов измерил ночью высоту облаков с помощью мощного прожектора. Луч был направлен вертикально вверх, а прибор, регистрирующий рассеянный облаком свет, установлен на определенном расстоянии от прожектора. Изменяя угол наблюдения, из простых геометрических соотношений он определил высоту облаков, наиболее интенсивно рассеивающих свет.

«Прожекторное» зондирование атмосферы развивалось в течение 50 лет — от простого измерения высоты облаков до определения общего содержания молекул в единице объема воздуха на различной высоте (до 70 км). Однако на этом возможности даже самого мощного прожектора оказались практически исчерпанными, хотя с помощью различных технических «ухищрений» можно было попытаться повысить пределы зондирования.

В этот период был разработан и создан целый класс приборов и устройств, позволявших с высокой точностью определять расстояние от источника оптического излучения до интересующего объекта. Эти приборы по принципу работы были аналогичны радиолокатору (радару): луч

источника оптического излучения направляется на интересующий объект, отражается от него, возвращается и улавливается высокочувствительным приемником; время отклика прямо пропорционально расстоянию до цели.

Термин «лидар» (LIDAR — английская аббревиатура Light Detection and Ranging — «свет детектирует и измеряет расстояние») для обозначения этого класса приборов по аналогии с термином «радар» (RADAR — Radio Detection and Ranging) впервые появился в 1953 году в работе Миддлтона и Спилхауса «Метеорологические инструменты» (Middleton, W. E. K. and Spilhaus, A. F. Meteorological Instruments, University of Toronto, 3rd ed., 1953) и прочно занял свое место в мировой научно-технической терминологии.

Создание лазеров (1960) и использование их в качестве источника оптического излучения в лидарах (1963) привело к качественному изменению возможностей последних как приборов, предназначенных для исследования окружающей среды.

Лазер в качестве источника оптического излучения обладает рядом неоспоримых и даже принципиальных преимуществ перед обычными источниками оптического излучения. В первую очередь — высокой монохроматичностью и когерентностью излучения, а во вторую — связанной с этим высокой спектральной плотностью излучения. К примеру, импульсный рубиновый лазер на длине волны 694,3 нм, с энергией излучения в импульсе 1 Дж, при длительности импульса 30 нс в каждом импульсе выбрасывает $3,5 \cdot 10^{18}$ фотонов. Для сравнения: солнечное излучение, приходящее на границу верхних слоев атмосферы каждые 30 нс, на длине волны излучения рубинового лазера «поставляет» всего лишь 10^8 фотонов, а у прожектора еще меньше. Использование лазеров позволило не только расширить диапазон измеряемых расстояний, но и существенно увеличить потенциальные возможности использования этих приборов для диагностики зондируемых сред.

В результате первых экспериментов по применению лидаров с лазерными излучателями для исследования ат-

мосферы (Дж. Фиокко, 1963) стало ясно, что эти приборы способны не только определять расстояние до непрозрачных отражающих целей, но и проводить **бесконтактную** диагностику прозрачной среды, рассеивающей свет, анализировать ее свойства, определять направление и скорость перемещения воздушных потоков, фиксировать и идентифицировать наличие посторонних примесей в воздушной массе в различных слоях атмосферы, измерять их концентрацию. Эти возможности лидаров обусловлены тем, что, в отличие от зондирующего излучения радиочастотного диапазона, эффективно отражающегося только от довольно крупных металлических целей, оптическое излучение, вследствие малости длины волны, отражается, поглощается и рассеивается частицами сверхмалых и малых размеров, в том числе и содержащимися в воздухе молекулами. Поэтому в данном случае появляется возможность не только определять расстояние до непрозрачных отражающих свет дискретных целей, но и с высоким пространственным разрешением фиксировать интенсивность света, поглощенного и рассеянного частицами в разных областях практически прозрачных сред. **Дистанционность** и **бесконтактность** измерений, возможность определения выбранной характеристики воздушной среды на любом направлении лазерного луча и получения всевозможных сведений о свойствах атмосферы на разной высоте, хорошее пространственно-временное разрешение, связанное с малой продолжительностью и высокой частотой повторения импульсов лазерного излучения, являются принципиальными достоинствами лазерных лидаров, их несомненными преимуществами перед альтернативными диагностическими системами.

Действительно, импульсный рубиновый лазер на длине волны 694,3 нм, с энергией излучения в импульсе 1 Дж, при длительности импульса 30 нс (а именно такой источник оптического излучения использовался в первых лазерных экспериментах по исследованию атмосферы) в каждом импульсе выбрасывает в пространство «линейку» фотонов, в которой последний фотон «отстает» от первого на 30 нс. Такой световой зонд, пространственная протяженность

которого в данном случае составляет $L = 9$ м ($L = c\tau$, где c — скорость света, $c = 3 \cdot 10^8$ мс⁻¹; τ — длительность импульса, $\tau = 3 \cdot 10^{-8}$ с), за тысячную долю секунды пролетает сквозь трехсоткилометровую толщу исследуемой среды, например атмосферы. Тогда, измеряя интенсивность света, взаимодействовавшего с определенной, малой протяженности (несколько метров) областью исследуемой среды, пришедшего на приемник лидара через определенные промежутки времени t ($t > \tau$), можно судить об изменении характеристик среды через каждые несколько метров, или, иными словами, изучать ее «тонкую» структуру.

Именно тогда (в начале 1960-х) термин «лидар» — LIDAR — возник как аббревиатура английских слов Light Identification, Detection and Ranging и стал обозначать *не просто прибор, а бесконтактную технологию получения и обработки информации* об удаленных объектах с помощью активных оптических систем, использующих явления поглощения, отражения и рассеяния света в прозрачных и полупрозрачных средах.

При дистанционном зондировании атмосферы именно молекулы газов и аэрозоли являются причиной ослабления проходящего через нее лазерного излучения. В исследуемой среде часть излучения либо поглощается, либо рассеивается на молекулах газа или аэрозольных частицах в обратном направлении (в сторону приемника лидара), либо отражается от объектов или специально установленных экранов. Некоторые вещества под действием лазерного излучения начинают флуоресцировать. «Обратный» луч проходит через ту же рассеивающую среду, что и прямой луч от источника, подвергаясь вторичному рассеянию и поглощению. Это излучение собирается с помощью приемной оптики (приемного телескопа со спектроанализатором) и направляется на фотодетектор, который преобразует его в электрический сигнал, пропорциональный интенсивности принятого оптического излучения. Принимаемый сигнал несет информацию как о плотности рассеивающих центров, их природе, физическом состоянии, так и о скорости их движения. Поскольку принимаемый сигнал является сложной суперпозицией множества про-

цессов, происходящих при взаимодействии оптического излучения с веществом, восстановление действительных параметров распределенной оптической среды — довольно сложная физическая задача, решаемая как аналитическими, так и эвристическими методами. Управление лидаром и обработка информационного сигнала с фотоприемника осуществляются специализированными электронными устройствами, работающими на линии с ПК. В этом случае лидарная установка представляет собой уже определенную лидарную систему. Выбор основных параметров такой системы определяется задачей, для решения которой данная система создается. Во многих случаях, в частности для решения различных задач экологического мониторинга и непрерывного контроля загрязнения атмосферы, лидарные системы в зависимости от типа загрязняющих веществ и особенностей наблюдаемого района могут быть представлены одним лидаром либо могут совмещать в себе несколько типов лидаров, реализующих различные методы получения полезной информации из принимаемого сигнала.

Несмотря на то что лазерное дистанционное зондирование атмосферы применяется уже почти полвека, накоплен большой опыт диагностики экологической обстановки, промышленный выпуск экологических лидаров не начат. Каждая решаемая на сегодняшнем этапе экологическая задача решается индивидуальным способом. Не выработаны или не могут быть выработаны общие алгоритмы, позволяющие наладить серийный выпуск соответствующей диагностической аппаратуры. Надеемся, что эта книга будет способствовать решению указанной проблемы.

Книга состоит из двух частей.

Первая часть посвящена лазерам, основным и наиболее совершенным источникам оптического излучения, с помощью которых возможно решение задачи экологического мониторинга атмосферы, и состоит из шести глав. В первых главах представлены общие принципы работы этих приборов, дана их классификация. Бегло рассмотрены основные типы лазеров: газоразрядные лазеры и лазеры на конденсированных средах. Проанализированы

некоторые свойства фотоприемников, входящих в системы дистанционного лазерного зондирования. Последние две главы посвящены проблеме стабилизации параметров лазерного излучения, что важно для прецизионных измерений.

Вторая часть книги (главы 7...10) содержит материалы, посвященные построению лидарных систем экологического мониторинга атмосферы. Седьмая глава знакомит с лидарными принципами анализа газовых сред. В восьмой главе представлена диагностика радиационного загрязнения воздуха с помощью лидаров. Лазерное зондирование водородосодержащих молекул в атмосфере рассмотрено подробно в девятой главе. Материалы глав 8 и 9 практически не отражены в современных монографиях и, на наш взгляд, должны особенно заинтересовать читателя.

Десятая глава знакомит с результатами лидарного зондирования молекул простых окислов. Отобраны исследования по направлениям, реже других встречающимся в литературе.

К каждой главе прилагается библиографический список. По мнению авторов, это упростит их изучение.

Книга может быть использована в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по направлениям 223200 «Техническая физика», 210100 «Электроника и микроэлектроника», 280200 «Защита окружающей среды», 280300 «Техносферная безопасность», для аспирантов по научной специальности 01.04.21 «Лазерная физика», а также будет полезна специалистам, работающим в области экологического мониторинга.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРА

1.1. ИНДУЦИРОВАННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Оптическое излучение представляет собой, как известно, электромагнитные волны и описывается уравнением Максвелла:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \\ \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; \\ \operatorname{div} \vec{D} = \rho; \\ \operatorname{div} \vec{B} = 0, \end{cases} \quad (1.1)$$

где \vec{E} и \vec{H} — векторы напряженности электрического и магнитного поля соответственно; \vec{D} и \vec{B} — векторы индукции электрического и магнитного поля соответственно; \vec{j} — вектор плотности тока проводимости; ρ — объемная плотность заряда.

Кроме уравнений (1.1) имеют место уравнения связи:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}; \quad \vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}; \quad \vec{j} = \sigma \vec{E}, \quad (1.2)$$

где ε и μ — диэлектрическая и магнитная проницаемость среды соответственно; ε_0 и μ_0 — диэлектрическая и магнитная постоянная соответственно; σ — проводимость среды.

Уравнения (1.2) следует дополнить известными соотношениями:

$$\varepsilon_0 \mu_0 = c^{-2}; \quad v = \frac{c}{n}; \quad n^2 = \varepsilon \mu, \quad (1.3)$$