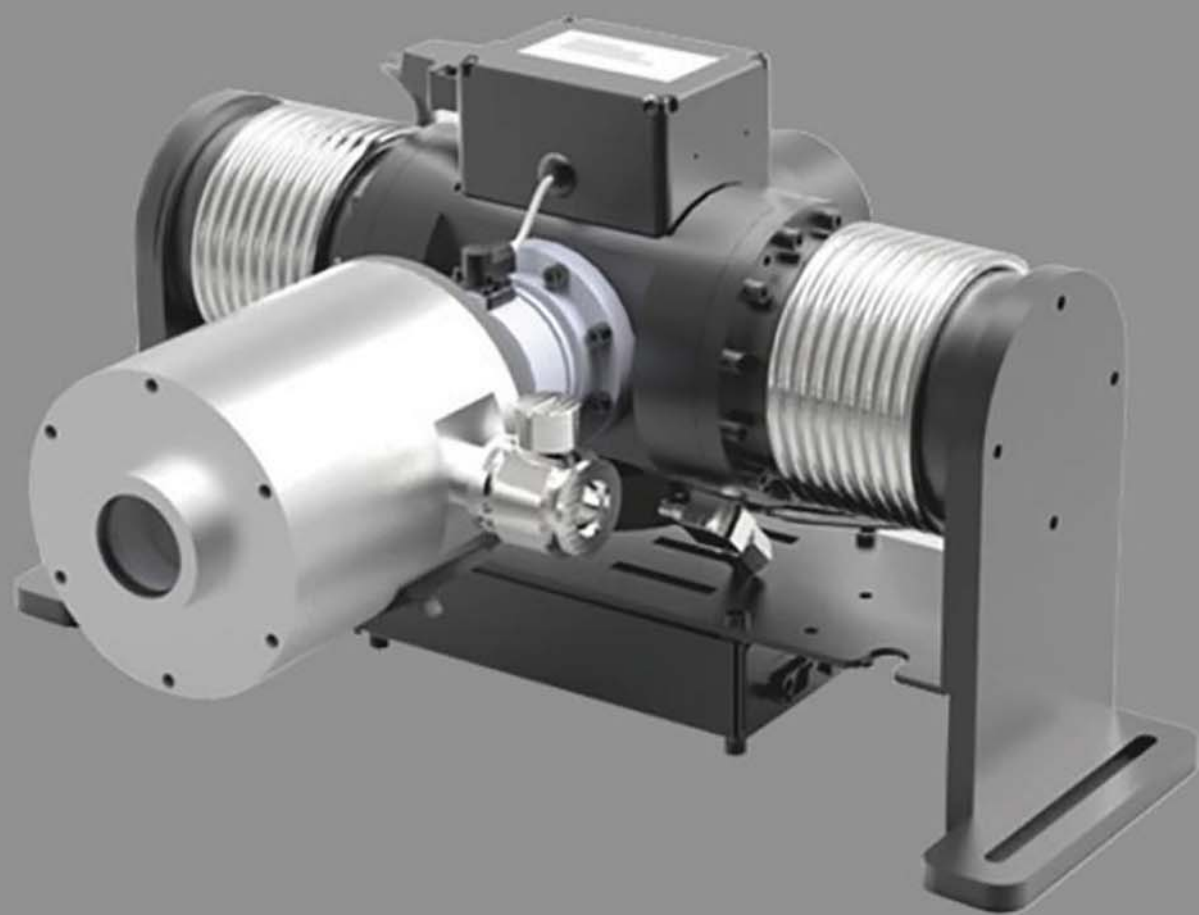


СКВОРЦОВ Л.А.

ПРИМЕНЕНИЕ КВАНТОВО-КАСКАДНЫХ ЛАЗЕРОВ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ



ТЕХНОСФЕРА

УДК 621.373.8

ББК 32.86

С42

Рецензенты:

Егоров А.Ю. – д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН, технический директор ООО «Коннектор Оптикс»

Шкуринов А.П. – д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН, директор Института проблем лазерных и информационных технологий РАН, профессор МГУ им. М.В. Ломоносова

С42 Скворцов Л.А.

Применение квантово-каскадных лазеров: состояние и перспективы
М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. – 270 с. ISBN 978-5-94836-608-1

Кратко рассмотрены основные физические принципы работы квантово-каскадных лазеров (ККЛ), работающих от средневолнового диапазона инфракрасного спектра до терагерцевого диапазона частот. Обсуждаются уникальные свойства излучения ККЛ, являющиеся обоснованием наиболее предпочтительных областей их применения. Приводятся многочисленные примеры применения ККЛ и приборов на их основе в различных сферах деятельности. Анализируются проблемы, еще требующие своего решения для расширения областей применения этих лазеров.

Книга рассчитана на широкий круг специалистов, работающих в области обороны, безопасности, связи, медицины и биологии, экологического мониторинга и спектроскопии, лазерной физики, а также может быть полезна преподавателям, аспирантам и студентам старших курсов соответствующих специальностей.

Ключевые слова: квантово-каскадные лазеры, оптико-электронное противодействие, обнаружение и идентификация следов сложных химических соединений, имиджинговые досмотровые системы, ККЛ в медицине и биологии, экологический мониторинг, атмосферные оптические линии связи.

УДК 621.373.8

ББК 32.86

© Скворцов Л.А., 2020

© АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление, 2020

ISBN 978-5-94836-608-1

Содержание

Содержание	3
Предисловие	8
Глава 1. Общие сведения о физических принципах работы ККЛ	10
1.1. Физические основы ККЛ.....	10
1.2. Основные отличительные особенности ККЛ от биполярных лазерных диодов. Свойства излучения ИК ККЛ.....	15
Глава 2. Общие закономерности прохождения лазерного излучения через атмосферу. Влияние длины волны излучения	18
2.1. Поглощение. Окна прозрачности атмосферы.....	18
2.2. Рассеяние света. Эмпирическая модель Крузе.....	20
2.3. Атмосферная турбулентность.....	22
Глава 3. Квантово-каскадные лазеры в области обороны	25
3.1. Источники лазерного излучения для функционального подавления чувствительных элементов инфракрасных фотоприемных устройств.....	25
3.1.1. Газовые лазеры.....	25
3.1.2. Параметрические генераторы света.....	26
3.1.3. Квантово-каскадные лазеры среднего ИК-диапазона спектра.....	26
3.1.3.1. Особенности дизайна гетероструктуры ККЛ для разных областей длин волн в среднем ИК-диапазоне.....	26
3.1.3.2. Пути увеличения мощности излучения ИК ККЛ.....	28
3.2. Направленные ИК-системы противодействия.....	30
3.2.1. Основные задачи оптико-электронного противодействия.....	30
3.2.2. Средства ИК-противодействия.....	31
3.2.3. Концепция направленного инфракрасного противодействия (DIRCM).....	32
3.2.4. Практическая реализация концепции DIRCM на примере инфракрасных головок самонаведения.....	34
3.2.5. Программа CIRCM и пример ее реализации.....	35
3.3. Подавление тепловизионных систем наблюдения, прицеливания и разведки.....	37
3.3.1. Особенности подавления тепловизионных средств наблюдения, прицеливания и разведки (ТПС).....	37
3.3.2. Оценка энергии лазерного излучения для необратимого подавления ТПС традиционными средствами (ближний ИК-диапазон).....	38

3.3.3. Функциональное подавление ТПС лазерным излучением.....	39
3.3.4. Эффект «ослепления» и его особенности.....	40
3.3.5. Оценка величины средней мощности лазера для инфракрасных систем противодействия.....	42
3.4. Выводы.....	44

Глава 4. Применение инфракрасных квантово-каскадных лазеров в области безопасности.....

4.1. Введение.....	46
4.2. Общие вопросы, связанные с обнаружением следов взрывчатых веществ на поверхности удаленных объектов в средневолновом (MWIR) и длинноволновом (LWIR) инфракрасном диапазонах спектра.....	49
4.2.1. Особенности дистанционного детектирования молекул, принадлежащих к классу ВВ.....	49
4.2.2. Спектральные особенности (<i>fingerprints</i>) молекул, принадлежащих к классу ВВ.....	53
4.2.3. Проблема интерференции колебательно-вращательных спектров молекул.....	54
4.2.4. Лазеры для дистанционного спектрального анализа.....	55
4.3. Лазерная фототермическая спектроскопия.....	57
4.3.1. Физические основы и особенности фототермических методов.....	57
4.3.2. Standoff лазерная фотоакустическая спектроскопия для детектирования следов ВВ.....	59
4.3.3. Standoff лазерная дефлекционная спектроскопия и примеры ее применения.....	63
4.4. Методы формирования спектральных изображений (Spectral Imaging).....	66
4.4.1. Мульти- и гиперспектральные изображения.....	66
4.4.2. Пассивный и активный методы формирования спектральных изображений.....	68
4.4.3. Общие вопросы обработки гиперспектральных данных.....	71
4.4.3.1. Особенности систем и методов распознавания в задачах тематической обработки данных.....	72
4.4.3.2. Дифференциация системы распознавания по полноте исходной информации.....	74
4.4.4. Применение активных методов для standoff-детектирования ВВ.....	75
4.4.4.1. Формирование гиперспектральных изображений в рассеянном свете.....	75
4.4.4.2. Формирование изображений в спектре теплового излучения с помощью резонансной ИК фототермической спектроскопии.....	84

4.4.4.3. Гиперспектральные изображения, полученные с помощью rump-probe фототермической спектроскопии.....	92
4.4.4.4. Рамановские гиперспектральные изображения.....	95
4.5. Выводы.....	97
Глава 5. Применение методов терагерцевой спектроскопии и активного имиджинга в области безопасности.....	99
5.1. Введение.....	99
5.2. Микроокна прозрачности атмосферы в ТГц-диапазоне частот.....	102
5.3. Спектральные особенности взрывчатых веществ в терагерцевом диапазоне частот.....	103
5.4. Основные виды источников и приемников терагерцевого излучения.....	106
5.5. Импульсная терагерцевая спектроскопия и активное формирование спектральных изображений.....	116
5.5.1. Введение.....	116
5.5.2. Импульсная терагерцевая спектроскопия.....	117
5.5.3. Активное формирование спектральных изображений в терагерцевом диапазоне частот.....	119
5.6. Standoff-детектирование взрывчатых веществ с помощью импульсной терагерцевой спектроскопии и активного имиджинга.....	120
5.6.1. Введение.....	120
5.6.2. Детектирование ВВ с помощью импульсной терагерцевой спектроскопии.....	121
5.6.3. Детектирование с помощью активных имиджинговых систем на основе квантово-каскадных лазеров, работающих в терагерцевом диапазоне частот.....	126
5.7. Выводы.....	134
Глава 6. Досмотровые системы в условиях массового пассажиропотока.....	136
6.1. Введение.....	136
6.2. Пассивные многоканальные досмотровые системы.....	136
6.3. Многоканальная досмотровая система MUTIVIS-EU.....	138
6.4. Проблема выбора источника излучения для активной досмотровой системы.....	139
6.5. Фотоприемные устройства для досмотровых систем.....	142
6.6. Выводы.....	144
Глава 7. Применение ККЛ для обеспечения экологической и химической безопасности.....	145
7.1. Введение.....	145
7.2. Классификация дистанционных методов зондирования.....	146

7.3. Лидарный метод дифференциального поглощения.....	147
7.4. Спектральные особенности поглощения ОВ.....	150
7.5. Выбор оптимальных длин волн ДП-лидара для обнаружения ОВ в атмосфере.....	151
7.6. Результаты численного моделирования дальности зондирования СО ₂ -лидара.....	152
7.7. Лидары на основе полупроводниковых ККЛ.....	155
7.8. Дистанционное детектирование ОВ на поверхности тел.....	158
7.9. Выводы.....	160
Глава 8. Применение ККЛ для дистанционного обнаружения наркотических веществ.....	161
8.1. Введение.....	161
8.2. Физические методы обнаружения наркотических веществ.....	162
8.3. Физико-химические методы обнаружения НВ.....	163
8.3.1. Введение.....	163
8.3.2. Спектрометрия ионной подвижности.....	164
8.4. Обоснование выбора методов дистанционного обнаружения НВ.....	167
8.5. Тактико-технические характеристики методов и оборудования для обнаружения наркотиков и психотропных веществ во внелабораторных условиях.....	169
8.6. Выводы.....	171
Глава 9. Квантово-каскадные лазеры в атмосферных оптических линиях связи.....	172
9.1. Введение.....	172
9.2. Выбор длины волны источника излучения для АОЛС.....	174
9.2.1. Краткие сведения об источниках излучения и фотоприемниках, используемых в коммерческих АОЛС.....	174
9.2.2. Экспериментальное обоснование выбора длины волны источника излучения для АОЛС.....	176
9.3. Примеры практической реализации АОЛС на базе ККЛ.....	180
9.3.1. АОЛС на базе ИК ККЛ.....	180
9.3.2. Перспективы и возможные области применения АОЛС на базе ТГц ККЛ.....	190
9.4. Нетрадиционные методы устранения влияния турбулентности и повышения информационной емкости канала передачи.....	192
9.5. Выводы.....	197

Глава 10. ККЛ в медицине и биологии	200
10.1. Введение.....	200
10.2. Диагностика заболеваний путем анализа состава выдыхаемого воздуха.....	202
10.2.1. Краткий обзор существующих методов.....	202
10.2.2. Методы лазерной спектроскопии для анализа выдыхаемого воздуха.....	202
10.2.2.1. Общая характеристика методов лазерной спектроскопии, используемых при анализе газовой среды.....	202
10.2.2.2. Выбор спектрального диапазона.....	204
10.2.3. Сравнительные характеристики методов спектрального анализа высокого разрешения, применяемых для анализа ВВ.....	205
10.2.3.1. Диодная лазерная спектроскопия.....	205
10.2.3.2. Спектроскопия CRDS.....	208
10.2.3.3. Разновидности метода CRDS.....	209
10.2.3.4. Фотоакустическая спектроскопия.....	211
10.2.4. Коммерческие системы для анализа состава ВВ.....	213
10.2.5. Проблемы и перспективы.....	215
10.3. Применение ИК ККЛ в хирургии.....	217
10.3.1. Лазерный скальпель.....	217
10.3.2. Удаление атеросклеротических бляшек.....	220
10.4. Формирование изображений срезов биоткани с помощью квантово-каскадных лазеров для диагностики онкологических заболеваний.....	222
10.4.1. Терагерцевый имиджинг.....	222
10.4.2. Микроспектроскопия с применением перестраиваемых ИК ККЛ.....	225
10.4.3. Pump-Probe ИК фототермическая микроспектроскопия.....	227
10.5. Выводы.....	230
Заключение	232
Литература	238

Предисловие

Физические принципы работы квантово-каскадных лазеров (ККЛ) существенно отличаются от традиционных лазерных диодов, в отличие от которых ККЛ являются униполярными полупроводниковыми лазерами.

Оптически активная область ККЛ представляет собой периодическую многослойную наногетероструктуру из тончайших выращенных с исключительной точностью по толщине и составу тонкопленочных гетеропар из материалов типа A_3B_5 на подложках фосфида индия (InP) или арсенида галлия (GaAs). Чередующаяся гетероструктура образует сверхрешетку, которая формирует изменяющийся вдоль структуры электрический потенциал. Это, в свою очередь, означает, что различаются вероятности нахождения электрона в различных позициях по длине сверхрешетки. Такая структура называется одномерной квантовой ямой и приводит к расщеплению разрешенной полосы энергий электрона в зоне проводимости на ряд дискретных энергетических уровней. Существенно, что, варьируя толщины слоев, можно путем решения уравнения Шредингера спроектировать инверсию населенности уровней, которая необходима для получения лазерного излучения.

Положение энергетических уровней в системе в первую очередь зависит от толщины слоя, а не состава материала. Поэтому в ККЛ можно настроить длину волны излучения в широком диапазоне в той же структуре.

Таким образом, в квантовой каскадной структуре фотоны излучаются при переходе электрона между дискретными энергетическими уровнями в пределах квантовой ямы. Далее электроны резонансно туннелируют на следующий период структуры и процесс повторяется. Этот процесс, при котором происходит излучение нескольких фотонов при прохождении одного электрона через активную среду ККЛ, имеет название «каскадный процесс», что послужило причиной названия лазеров. Квантовая эффективность такого процесса намного превышает единицу, что приводит к повышению выходной мощности, которая больше, чем у традиционных полупроводниковых лазерных диодов. К настоящему времени в структурах A_3B_5 получена генерация на длинах волн от 3 до 200 мкм.

В современных ККЛ один электрон может порождать до 100 фотонов и более. При этом период сверхрешетки составляет ~ 50 нм. А наименьшая ширина квантовой ямы (ширина отдельного слоя) может быть порядка 1 нм и менее. Таким образом, для производства ККЛ необходимо самое современное технологическое оборудование, такое как установка молекулярной лучевой (пучковой) эпитаксии (МЛЭ) или МОС-гидридной эпитаксии, позволяющая наращивать отдельные монослои с резкими границами с прецизионным контролем *in situ* толщины и состава пленок.

Идея создания ККЛ была впервые высказана советскими физиками Р.Ф. Казариновым и Р.А. Сурисом еще в 1971 году, однако первый экспериментальный образец появился только в 1994 году (Federico Capasso et all.). В свою очередь, серийное производство ККЛ началось на фирме Alpes Lasers в Швейцарии в 1997 году. Так что прошло достаточно времени, чтобы подвести промежуточные итоги развития этого направления с точки зрения областей применения ККЛ и обсудить проблемы, стоящие перед этой областью лазерной техники.

Появление коммерческих ККЛ существенно расширило спектральный диапазон лазеров вплоть до терагерцевой области, что сделало возможным создание на их основе компактных устройств, способных решать новые задачи в области обороны, безопасности, экологического мониторинга, атмосферных оптических линий связи, медицины и биологии, в научных исследованиях и других областях человеческой деятельности.

Дальнейшее развитие всех портативных информационно-измерительных комплексов на базе ККЛ непосредственно связано с созданием компактных энергоэффективных лазеров, обладающих повышенными эксплуатационными параметрами при комнатной температуре, расширением диапазона длин волн генерации и области перестройки ККЛ. По-прежнему остается актуальным вопрос, связанный с созданием недорогих обладающих высокой чувствительностью неохлаждаемых фотоприемных устройств. Предстоит еще большая работа по созданию новых материалов, в том числе метаматериалов, для разработки новых лазерных устройств, особенно в ТГц-диапазоне частот. Наконец, предстоит еще большая работа по созданию устройств формирования и управления лазерным излучением ККЛ, в частности быстродействующих пространственных фильтров для средств связи. Развитие перечисленных направлений позволит более эффективно искать новые подходы к созданию систем на базе ККЛ, основанных на применении современных материалов и технологий, тем самым расширяя область применения ККЛ.

Целью данной книги являются обобщение и систематизация результатов работ по применению квантово-каскадных лазеров в различных областях и сферах человеческой деятельности. В книге излагаются наиболее продвинутые и перспективные, на наш взгляд, области практического применения ККЛ, приводятся многочисленные примеры практической реализации разработок, проводится анализ основных проблем, которые еще требуют своего решения, а также перспективы развития направлений, связанных с применением ККЛ.

ГЛАВА I

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ФИЗИЧЕСКИХ ПРИНЦИПАХ РАБОТЫ ККЛ

I.1. Физические основы ККЛ

Вопросам, связанным с рассмотрением физических принципов работы ККЛ, посвящено значительное количество монографий, обзоров и оригинальных статей, к которым можно обратиться для более детального знакомства с физикой квантово-каскадных лазеров [1–16]. Поэтому в настоящем разделе мы лишь кратко отметим принципиальное отличие ККЛ от традиционных лазерных диодов и акцентируем внимание на уникальных свойствах излучения ККЛ, которые открывают новые возможности для решения ряда важных проблем в области обороны, безопасности, связи, экологического мониторинга и медицины.

Физические принципы, лежащие в основе работы ККЛ, существенно отличаются от принципов работы обычных полупроводниковых лазерных диодов. В отличие от традиционных полупроводниковых лазеров, в которых генерация фотона является результатом рекомбинации электрона и дырки (биполярный диод), в ККЛ используется только один тип носителей заряда (униполярный лазер) — электроны. При этом излучаемые ККЛ фотоны появляются в результате квантовых переходов электрона между энергетическими уровнями внутри квантовой ямы. В действительности эти уровни не существуют в полупроводниковых материалах, из которых состоит так называемая активная область лазера. Они создаются при конструировании активной области из ультратонких слоев этих материалов, в результате чего она представляет собой набор чередующихся потенциальных барьеров и квантовых ям нанометровой толщины (сверхрешетка).

Наложение дополнительного периодического потенциала сверхрешетки на потенциал кристаллического поля вызывает расщепление зоны проводимости на ряд разрешенных (мини-зона, *miniband*) и запрещенных подзон (минищель, *minigap*). Движение электронов в такой структуре происходит в пределах

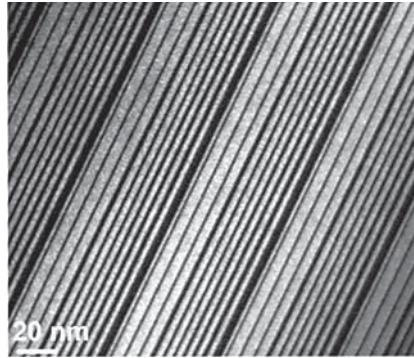


Рис. 1.1. Структура ККЛ, полученная методом молекулярно-лучевой эпитаксии [16]

мини-зоны перпендикулярно к границе раздела слоев. При этом энергия электронов, локализованных в квантовых ямах, квантуется, а положение уровней размерного квантования в основном определяется ее шириной и высотой потенциального барьера между соседними ямами, но не зависит от материала структуры.

В отличие от лазерного диода в ККЛ электрон остается в зоне проводимости после испускания фотона в результате перехода между энергетическими уровнями в квантовой яме. Поэтому электрон может повторно инжектироваться в идентичную соседнюю активную область, где он испускает другой фотон, и так далее. Для достижения этой каскадной эмиссии фотонов активные области должны чередоваться с легированными областями инжекции электронов. Так называемые каскады, в состав которых входят активная область и инжектор, порождают «энергетическую лестницу», с которой «спускаются» электроны, излучая фотоны на каждой из «ступеней» (то есть в каждом из каскадов). Число каскадов, необходимое для реализации высокоэффективного ИК ККЛ, — 40 и более [6]. Этот каскадный эффект отвечает за очень высокие мощности излучения квантово-каскадных лазеров по сравнению с традиционными биполярными лазерными диодами (более 1 Вт), так как его квантовая эффективность намного превышает единицу. Отсюда и название — квантово-каскадные лазеры.

На рис. 1.2 показана типичная энергетическая диаграмма ККЛ, служащая для иллюстрации принципа его работы.

Наклон в зоне проводимости обусловлен наличием приложенного электрического поля. В рассматриваемом примере активная область состоит из двух одинаковых квантовых ям, характеризующихся наличием трех квантованных энергетических состояний. Лазерный переход определяется разностью энергий между состояниями 3 и 2, которая зависит, главным образом, от выбранной толщины квантовых ям. Для получения лазерной генерации необходима инверсия населенностей между уровнями 3 и 2. Это приводит к требованию,

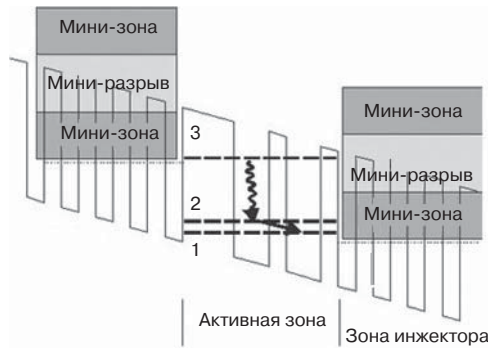


Рис. 1.2. Энергетическая диаграмма квантового каскадного лазера с вертикальными переходами внутри одной квантовой ямы. В качестве материала квантового барьера используется тройной твердый раствор InAlAs, а в качестве материала квантовой ямы — раствор InGaAs [7]

чтобы время жизни 3-го уровня ($\tau_{32} \sim 2\text{--}5$ пс) было существенно больше, чем время жизни 2-го. Для достижения этой цели самый низкий уровень 1 должен быть расположен ниже уровня 2 на величину энергии оптического фотона. Выполнение перечисленных требований обеспечивает быстрое опустошение уровня 2 за счет взаимодействия электронов с продольными оптическими фотонами, в результате чего электроны оказываются в состоянии 1. Вследствие резонансного характера этот процесс происходит очень быстро и характеризуется временем релаксации порядка $\tau_{21} \sim 0,1\text{--}0,2$ пс. В свою очередь, электроны на 3-м уровне имеют существенно большее время жизни из-за относительно большой величины энергетического зазора между уровнями 3 и 2, поэтому процесс электрон-фононного взаимодействия в этом случае носит нерезонансный характер, а его вероятность значительно меньше.

Для получения лазерной генерации необходимо также подавить нежелательную утечку электронов за счет туннелирования из состояния 3 в состояния, формирующие широкий квазиконтинуум. Такая утечка электронов приводит к уменьшению населенности верхнего 3-го уровня. Для предотвращения этого процесса перед следующим каскадом проектируется инжектор, представляющий собой сверхрешетку с низкой плотностью электронных состояний, в которой не существует резонансного электронного состояния, соответствующего энергии E_3 верхнего уровня в квантовой яме.

Таким образом, инжектор формирует мини-щель, которая блокирует утечку электронов с верхнего лазерного уровня. При этом сам инжектор «настроен» таким образом, чтобы обеспечивать эффективный транспорт электронов со своего основного уровня на верхний лазерный уровень следующей активной зоны с помощью процесса, известного как резонансное туннелирование. Вышеописанный транспорт носителей можно рассматривать как своеобразную накачку ККЛ. Кроме того, как следует из сказанного выше, использование эффектов

резонансного туннелирования и проводимости по мини-зоне позволяет связать активные зоны.

В принципиальном плане ККЛ представляет собой помещенную в волновод многослойную гетероструктуру, поперек которой пропускается электрический ток (т.е. нормально к слоям). Структура состоит из чередующихся активных областей, в которых происходит излучение фотонов, и инжекционных областей, через которые носители резонансно туннелируют до следующей активной области. Такая каскадная конструкция лазера обеспечивает довольно простой способ увеличения выходной мощности одиночного прибора. Так как, преодолевая каждый каскад, электрон испускает фотон, то за свой проход через ККЛ один электрон испускает множество фотонов. Чем больше число каскадов в ККЛ, тем большее число фотонов испускает один электрон за свой проход. Следовательно, увеличение числа каскадов должно приводить к увеличению выходной мощности прибора и снижению порогового тока генерации.

В качестве иллюстрации к сказанному выше на рис. 1.3 представлена конструкция полоскового ИК ККЛ с указанием характерных размеров.

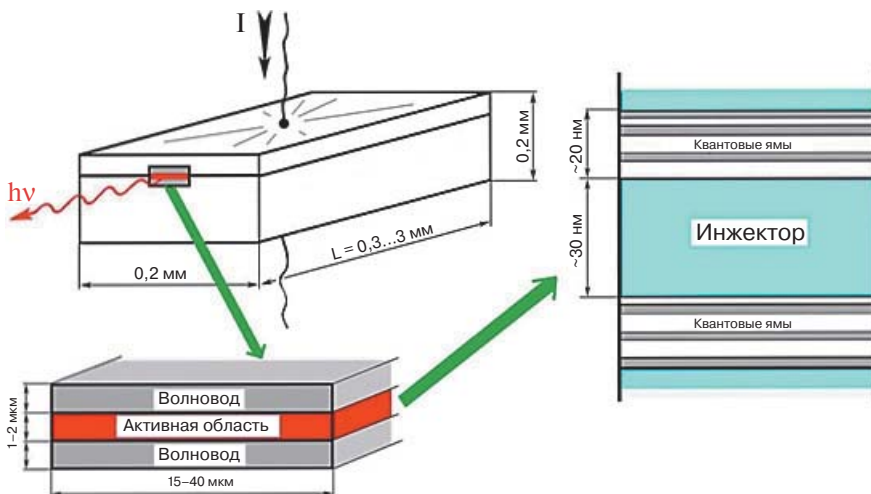


Рис. 1.3. Типичная конструкция полоскового ИК ККЛ с указанием характерных размеров активного элемента (наверху слева), активной области (внизу) и элементов гетероструктуры (каскада) [7]

Конечно, существуют и другие, более сложные конструкции активной зоны, однако их анализ выходит за рамки настоящей монографии. Например, значительное улучшение характеристик ИК ККЛ (более низкий порог генерации и высокая мощность излучения при комнатной температуре) было достигнуто за счет введения в дизайн гетероструктуры ИК ККЛ так называемого двойного фононного резонанса [8]. Активная область такого лазера имеет уже четыре квантовые ямы и три энергетических состояния, одинаково удаленных друг от друга на величину

энергии оптического фона вместо рассмотренных выше двух уровней. Такой дизайн активной области приводит к большей инверсии населенности, потому что электроны более эффективно удаляются из нижнего состояния лазерного перехода. Существенное увеличение мощности и снижение порогового тока ИК ККЛ достигаются использованием активной области с набором квантовых ям и барьерных слоев с плавно изменяющимся периодом (*chirped superlattices*) [9]. В дальнейшем было предложено использовать лазеры с дизайном активной области *bound-to-continuum*, т. е. с излучательным переходом электронов из связанных состояний в квантовой яме в состояния непрерывного спектра мини-зоны. Такой дизайн дает возможность изготавливать ИК ККЛ с большими коэффициентами усиления в более широкой области частот, что имеет существенное значение для расширения полосы перестройки ИК ККЛ [10].

На сегодняшний день ИК ККЛ являются единственными полупроводниковыми лазерами в среднем инфракрасном диапазоне спектра, которые могут работать при комнатных температурах. В общем случае ИК ККЛ могут быть трех типов: лазеры с резонатором Фабри—Перо, работающие в многомодовом режиме, лазеры с распределенной обратной связью (РОС-ККЛ; *Distributed FeedBack Quantum Cascade Laser*, DFB-QCL) и лазеры с внешним резонатором (ВР-ККЛ, QE-QCL). Последние два типа представляют собой одномодовые источники излучения с возможностью перестройки длины волны генерации, что делает их особенно привлекательными для спектроскопических исследований.

Что касается терагерцевых квантово-каскадных лазеров (ТГц ККЛ), то в частотном диапазоне 2–5 ТГц они фактически являются единственным типом твердотельных источников когерентного электромагнитного излучения с мощностью излучения в районе милливаттных значений. ТГц ККЛ подразделяются на прямые (инверсные) и безынверсные, использующие эффект генерации разностной частоты (ГРЧ, DFG). Последние обладают возможностью перестройки частоты излучения в достаточно широком интервале значений (1,4–5,9 ТГц) и работают при комнатной температуре, однако имеют низкую мощность излучения (~0,2 мВт), что затрудняет их применение для большинства практически значимых приложений [11]. Прямые (Direct) ТГц ККЛ с резонатором Фабри—Перо работают на фиксированной частоте при криогенных температурах и генерируют относительно большую мощность излучения, которая может достигать значений ~100 мВт [12] и более [13]. Область перестройки одномодового прямого ТГц ККЛ (ТГц ВР-ККЛ) составляет лишь несколько процентов от центральной линии генерации [14].

На рис. 1.4 представлены энергетическая диаграмма прямого (с инверсной населенностью) ТГц ККЛ (слева) и его активная область с волноводной структурой. Необходимо отметить, что обычные диэлектрические волноводы, как в ИК ККЛ, не являются подходящими для терагерцевых лазеров вследствие больших потерь из-за поглощения на свободных носителях и практических

ограничений на толщину эпитаксиального роста. На сегодняшний день при изготовлении ТГц ККЛ применяют два типа волноводов: плазмонный и металлический. Второй тип волноводов (двойной металлический волновод) обеспечивает более сильную локализацию поля внутри волновода (М-М-волновод). Кроме того, использование волновода с металлом по обеим сторонам активной части структуры позволило обеспечить высокое модовое ограничение и получить резонатор с малыми потерями для терагерцевого лазера.

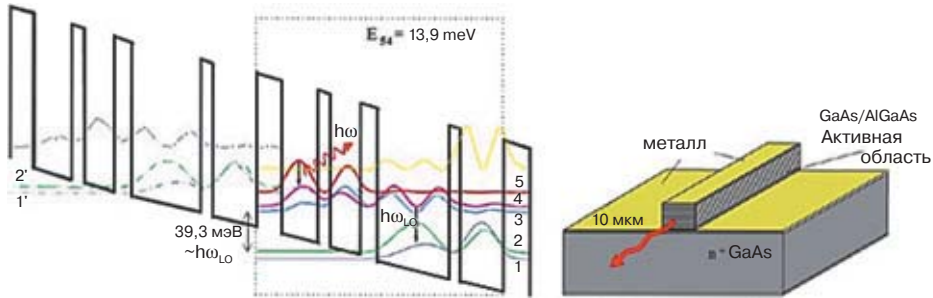


Рис. 1.4. Энергетическая диаграмма прямого (с инверсной населенностью) ТГц ККЛ (слева) и его активная область с волноводной структурой типа металл — металл (справа). Рабочий переход 5-4 с каналом опустошения основного уровня резонансными LO-фононами [15]

1.2. Основные отличительные особенности ККЛ от биполярных лазерных диодов. Свойства излучения ИК ККЛ

Для сравнения с традиционными биполярными лазерными диодами (ЛД) ниже приведены основные отличительные особенности ККЛ:

- униполярные лазеры;
- излучение фотонов в квантово-размерных структурах происходит в результате внутризонных переходов электронов (т.е. в пределах одной зоны, например зоны проводимости);
- каскадный характер излучения фотонов (один электрон порождает N фотонов, где N — число каскадов или периодов в гетероструктуре ККЛ);
- длина волны генерации не зависит от ширины запрещенной зоны и в основном определяется шириной квантовой ямы, а не составом материалов гетеропары;
- мощность (энергия) излучения при прочих равных условиях зависит от числа каскадов и превышает ее значение для биполярных лазерных диодов (квантовая эффективность >1);

- ККЛ работают как в области средневолнового (MWIR, *Mid-Wave Infrared*) и длинноволнового (LWIR, *Long-Wave Infrared*) ИК-диапазонов (3,4–25 мкм), так и в ТГц-области частот (1,5–5 ТГц);
- в области средневолнового (MWIR) ИК-диапазона мощность излучения коммерческих одиночных ККЛ при комнатной температуре в непрерывном (CW) режиме генерации на сегодняшний день достигла значений 4 Вт, а в области длинноволнового (LWIR) ИК-диапазона превышает 1 Вт;
- в ТГц-диапазоне частот при комнатной температуре достигнута мощность излучения в CW-режиме 0,2 мВт, в импульсном — 1 Вт (при криогенных температурах);
- в среднем ИК квантово-каскадные лазеры обладают широким диапазоном плавной перестройки — более 900 см^{-1} ;
- узкая линия генерации в одномодовом режиме: коммерческие ИК ККЛ — $\delta\nu \leq 100 \text{ МГц}$ (CW) и $\delta\nu \leq 1 \text{ см}^{-1}$ в импульсном режиме генерации;
- ККЛ представляют собой компактные энергоэффективные (КПД > 10 %) надежные, стабильные и долговечные полупроводниковые излучатели.

Как отмечалось выше, появление коммерческих ККЛ существенно расширило спектральный диапазон лазеров вплоть до терагерцевой области, что сделало возможным создание на их основе компактных устройств, способных решать новые задачи в различных сферах деятельности. Во многом это обусловлено уникальными свойствами излучения ККЛ, среди которых следует отметить следующие:

- излучение средневолнового (MWIR) и длинноволнового (LWIR) ИК-диапазона, а также терагерцевое (THz, ТГц) излучение неинвазивны, они не являются ионизирующим излучением и при умеренных интенсивностях не представляют опасности для здоровья человека;
- спектральные характеристики (коэффициенты поглощения и отражения излучения, диэлектрическая проницаемость и др.) большинства сложных химических соединений имеют характерные особенности (*fingerprints*, отпечатки пальцев) в средневолновом и длинноволновом инфракрасном диапазонах, а также в ТГц-области частот электромагнитного спектра, то есть попадают в область длин волн генерации, характерных для ККЛ. В первую очередь это касается взрывчатых, отравляющих, наркотических и токсичных веществ промышленного происхождения, что позволяет не только дистанционно обнаруживать эти вещества, но и с большой степенью достоверности проводить их идентификацию даже в многокомпонентной среде;
- в ИК-области квантово-каскадные лазеры обладают широким диапазоном плавной перестройки — более 900 см^{-1} ;

- в окнах прозрачности атмосферы 3–5 мкм и 8–12 мкм излучение ИК ККЛ распространяется с минимальными потерями, определяемыми молекулярным спектрально-селективным поглощением. То же можно сказать и об излучении ТГц ККЛ в соответствующих микроокнах прозрачности, пропускание которых, однако, сильно зависит от наличия водяных паров в атмосфере;
- терагерцевое излучение существенно меньше подвержено рассеянию ($1/\lambda^4$), чем видимое или инфракрасное излучение. Поэтому такие объекты, как сухие ткани, дерево, бумага, пластмассы, керамика, краски, окрашенное стекло, прозрачны в терагерцевом диапазоне частот (за исключением металлов и веществ, состоящих из полярных молекул, например воды).
- в окнах прозрачности атмосферы излучение среднего ИК- и ТГц-диапазона распространяется сквозь туман, дымку, дождь и снег с минимальными потерями;
- по сравнению с видимым или ближним ИК-диапазоном спектра излучение ККЛ более устойчиво к возмущениям (турбулентности) в атмосфере в силу большей длины волны;
- малое время жизни электрона (<1 пс) в возбужденном состоянии внутри квантовых ям ККЛ обеспечивает высокую рабочую частоту и определяет предельную частоту модуляции до 100 ГГц, что в принципиальном плане делает возможным создание атмосферных оптических линий связи (АОЛС) с очень высокой пропускной способностью.

В силу перечисленных выше уникальных свойств излучения ККЛ представляют значительный интерес для атмосферных оптических линий связи [17], они уже нашли широкое практическое применение в области обороны [18–23], безопасности [24–31], медицины и биологии [32–37], мониторинга окружающей среды [38–43], инфракрасной спектроскопии [44–51].

Как уже отмечалось, первая экспериментальная демонстрация работы ККЛ имела место в 1994 году [1], то есть спустя более двух десятилетий после теоретического предсказания о возможности реализации таких лазеров [2]. Коммерческий выпуск ККЛ начался в 1997 году фирмой *Alpes Lasers* в Швейцарии. Сейчас на рынке присутствует продукция от многих производителей (*NanoPlus GmbH*, *Alpes Lasers*, *Fraunhofer IAF*, *Daylight Solutions Inc.*, *Pranalytica Inc.* и других).

Есть все основания полагать, что при дальнейшем совершенствовании и удешевлении технологии изготовления ККЛ, улучшении их параметров возможные области применения ККЛ не ограничатся перечисленными выше.

Более детально с физическими принципами, положенными в основу работы ККЛ, и путями улучшения параметров генерации можно ознакомиться в обзорах и оригинальных статьях [52–60].

ГЛАВА 2

ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОХОЖДЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРУ. ВЛИЯНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

2.1. Поглощение. Окна прозрачности атмосферы

Прохождение лазерного излучения через атмосферу зависит от длины волны излучения, состава и состояния атмосферы. Атмосфера состоит из различных видов молекул газообразных веществ (молекулы воды, кислорода, диоксида углерода, азота и др.), аэрозолей (туман, смог и дым, продукты выделения лесов и растений, пыль, частицы морской соли, частицы почвы, частицы вулканического происхождения и микрочастицы иного происхождения), частиц льда и капель воды. В связи с этим атмосфера вызывает ослабление оптических сигналов за счет поглощения и рассеяния. Для больших расстояний необходимо учитывать реальное состояние атмосферы и связанные с ним зависимости поглощения и рассеяния света от длины волны лазерного излучения, а также наличие в ней «окон» прозрачности (рис. 2.1, 2.2).

Из рис. 2.1 следует, что в области MWIR и LWIR можно определить положение двух окон прозрачности атмосферы: 3,5–5 и 8–14 мкм, пропускание которых практически не зависит от изменения относительной влажности. Поэтому для дистанционных применений длины волн ИК ККЛ выбирают из указанных диапазонов электромагнитного спектра.

В терагерцевом диапазоне существует множество линий поглощения от различных газов, составляющих атмосферного воздуха, главным образом водяного пара (рис. 2.2). Именно его влияние в значительной степени ограничивает возможности применения терагерцевого излучения на больших расстояниях,

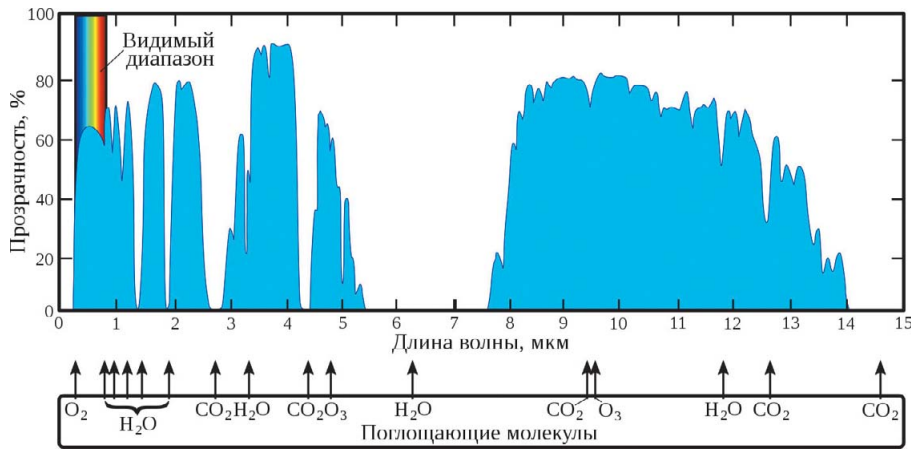


Рис. 2.1. Область прозрачности атмосферы от видимого до длинноволнового ИК-диапазона [61]

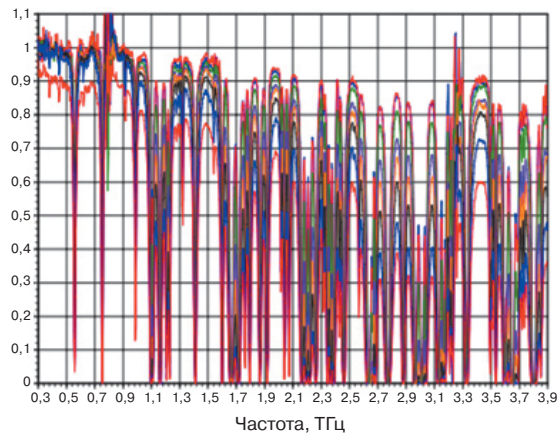


Рис. 2.2. Нормированное спектральное пропускание атмосферы (0,3–4,0 ТГц) при значениях относительной влажности (RH) от 5% (верхний участок) до 58% (нижний участок) для пяти атмосферных окон: 1,47–1,56, 1,96–2,0, 2,09–2,12, 2,51–2,55 и 3,39–3,47 ТГц. Спектральное разрешение $0,15 \text{ см}^{-1}$ [62]

в первую очередь из-за сильной вариации интенсивности линий поглощения водяных паров при изменении влажности воздуха.

В то же время на расстояниях до нескольких десятков метров, представляющих интерес для ряда задач перспективных применений ТГц ККЛ, имеется значительное количество окон, в которых отношение сигнала к шуму (SNR) может достигать 50 дБ и более. Это означает, что при умеренной влажности на относительно небольших расстояниях (50–100 м) атмосферу в этих окнах можно считать достаточно прозрачной. Данные, приведенные на рис. 2.2, указывают

на существование в атмосфере по крайней мере пяти различных окон пропускания в терагерцевом диапазоне от 1,4 до 4 ТГц. Для существующих в настоящее время ТГц ККЛ хорошо подходят окна в области частот 2,11, 2,52, и 3,42 ТГц.

Для применения лазеров в реальных условиях большое значение приобретает также вопрос, связанный с обеспечением лазерной безопасности [63]. Лазеры видимого диапазона спектра и ближнего ИК-диапазона (1064 нм) являются в этом смысле особенно опасными, так как их излучение эффективно поглощается сетчаткой. Кроме того, общим недостатком всех лазеров, излучающих в УФ- или ИК-диапазонах, является тот факт, что рефлекторная реакция мигания срабатывает только на видимый свет. На рис. 2.3 показаны рассчитанные значения максимально допустимой дозы облучения (МРЕ) в зависимости от длины волны лазерного импульса длительностью 6 нс [64].

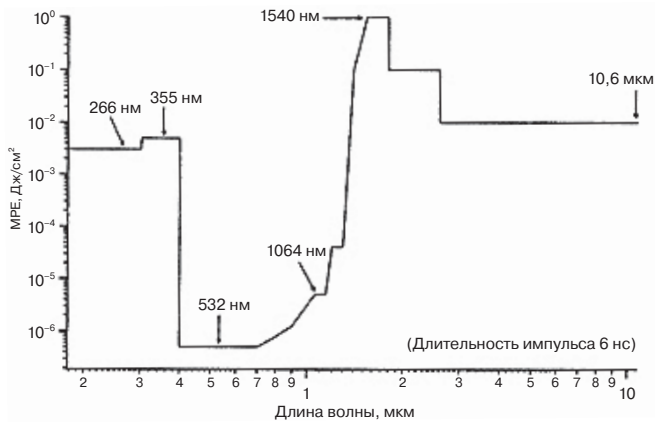


Рис. 2.3. Максимально допустимая доза облучения (МРЕ) в зависимости от длины волны для лазерного импульса длительностью 6 нс [64]

Как видно, наибольшую опасность для глаз представляют длины волн излучения 532 и 1064 нм. По сравнению с ними УФ-излучение имеет явное преимущество, а наиболее безопасным является излучение с длинами волн вблизи 1540 нм, а также внутри средневолнового и длинноволнового ИК-диапазонов. Что касается ТГц-излучения, то ввиду малой энергии кванта излучения оно является наиболее безопасным из всех перечисленных.

2.2. Рассеяние света. Эмпирическая модель Крузе

Следует различать три основных типа рассеяния света: рэлеевское, Ми и неселективное. Тип рассеяния зависит от соотношения между размером рассеивающих частиц и длиной волны излучения. Рэлеевское рассеяние обусловлено наличием в атмосфере частиц, размеры которых значительно меньше длины волны света.

При этом интенсивность рассеяния уменьшается с длиной волны как $\sim \lambda^{-4}$. Рэлеевское рассеяние существенно в ультрафиолетовом и видимом спектральных диапазонах. При этом оно незначительно в инфракрасном диапазоне. Если размер частиц сравним с длиной волны излучения или равен ей, наблюдается рассеяние Ми. Ослабление мощности излучения лазера в тумане обусловлено главным образом поглощением и сильным Ми-рассеянием света взвешенными частицами воды на пути распространения луча. При размерах частиц, превышающих длину волны излучения, наблюдается неселективное рассеяние.

Интерес к спектральным диапазонам MWIR и LWIR связан с ожидаемым уменьшением рассеяния света, особенно при зондировании на большие расстояния. Это обстоятельство приобретает первостепенное значение, например, для применения лазеров в атмосферных оптических линиях связи (АОЛС). Увеличение длины волны лазера в таких приложениях обеспечивает АОЛС более высокую производительность в неблагоприятных погодных условиях, особенно в тумане. Последние публикации, сравнивающие источники излучения в этих диапазонах с источниками NIR (*Near Infrared*) и SWIR (*Short-Wave Infrared*), содержат для АОЛС многообещающие результаты при использовании в них ИК ККЛ [17, 65, 66].

Следует отметить, что наличие окон прозрачности в атмосфере для длин волн в диапазонах SWIR и MWIR (LWIR) обеспечивает практически одинаковое поглощение излучения в этих областях спектра (рис. 2.1). Поэтому можно утверждать, что с точки зрения потерь на поглощение преимуществ между длинами волн в окнах прозрачности этих спектральных диапазонов (1,5–1,8, 3,3–4,2, а также 4,5–5,1 мкм) не существует [67]. Однако в контексте рассеяния большая длина волны света, как известно, приводит к меньшим потерям в результате уменьшения отношения размера неоднородности (капли) к длине волны в дымке (задымлении) и туманах [68].

Насколько дальность передачи в тумане в среднем ИК-диапазоне превышает ее значение в ближнем инфракрасном диапазоне, можно оценить с помощью эмпирической модели Крузе, которая устанавливает связь атмосферной видимости V (км), или дальности видимости, с коэффициентом экстинкции (затухания) γ (1/км) в зависимости от длины волны излучения. Атмосферная видимость обычно определяется как расстояние, на котором мощность излучения с длиной волны 550 нм ослабляется до 2 или 5% от первоначального значения [69]. В свою очередь, удельное оптическое ослабление атмосферы измеряется в дБ/км и получается из коэффициента экстинкции в соответствии с соотношением A (дБ/км) = $10 \log(e) \gamma$. Для коэффициента экстинкции модель Крузе дает следующую оценку [66, 68–70]:

$$\gamma(\lambda) = \frac{3,91}{V} \left(\frac{\lambda}{0,55} \right)^{-q}, \quad (2.1)$$

где $\gamma(\lambda)$ — коэффициент затухания (экстинция); λ — длина волны излучения; q — показатель распределения рассеивающих частиц по размерам ($q = 1,6$ для $V > 50$ км; $q = 1,3$ для $6 \text{ км} < V < 50 \text{ км}$; $q = 0,585 V^{1/3}$ для $V < 6 \text{ км}$).

Модель имеет хорошее согласие с экспериментом в широком диапазоне длин волн, по крайней мере в диапазоне от 0,55 до 6 мкм [68]. Однако, как было отмечено [69], зависимость коэффициента экстинкции от длины волны в модели Крузе, вероятно, была установлена из данных, полученных в условиях дымки, а не во время тумана. Поэтому для небольших значений атмосферной видимости ($V < 0,5 \text{ км}$) формула (2.1) менее надежна, т. е. возможны случаи, когда данные вычислений отклоняются от результатов наблюдения [66].

Известно, что туман имеет бимодальное распределение размера капель. Большинство (>70%) частиц в нем имеют размер 0,8–4 мкм, а остальные — 5–10 мкм [68]. Излучение в диапазоне MWIR (LWIR) при распространении в дымке или тумане обладает меньшими потерями вследствие резонансного рассеяния Ми, чем в случае NIR (SWIR), так как его длина волны в 6–8 раз больше. Кроме того, известно, что при появлении тумана из дымки мелкие частицы доминируют по количеству, что способствует более длительному времени безотказной работы MWIR (LWIR) АОЛС в начале неблагоприятных событий [71]. Частицы тумана находятся (*float*) в воздухе дольше, чем капли дождя. Кроме того, они характеризуются размером, меньшим длины волны излучения. Таким образом, рассеяние из-за осадков (неселективное рассеяние) менее значимо, чем в случае тумана (рассеяние Ми).

2.3. Атмосферная турбулентность

На распространение лазерного луча сильно влияет также турбулентность атмосферы, т. е. случайные пространственно-временные изменения показателя преломления, вызванные перемещением воздуха,

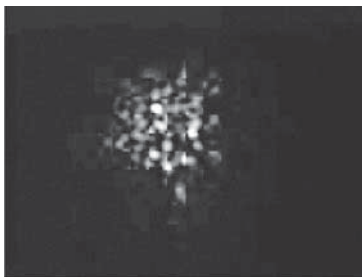


Рис. 2.4. Поперечное сечение пучка ККЛ, прошедшего через фазовую пластину, имитирующую атмосферную турбулентность [72]

флуктуациями его температуры и плотности. Поэтому световые волны, распространяющиеся в атмосфере, испытывают не только поглощение и рассеяние, но и флуктуации передаваемой мощности [71–73]. Интенсивность турбулентных флуктуаций в атмосфере описывается структурной характеристикой пульсаций показателя преломления воздуха C_n^2 [74]. Искажения фронтальной волны можно наблюдать как изменения интенсивности, называемые сцинтилляцией (рис. 2.4).

При турбулентности воздушные вихри могут искривлять оптический путь, если их размер больше диаметра луча, вызывая блуждание пучка на поверхности приемного устройства (рис. 2.5).



Рис. 2.5. Распространение лазерного излучения в турбулентной атмосфере [74]

Основными эффектами, обусловленными турбулентностью атмосферы, которые существенно ограничивают возможности канала линии связи, являются сцинтилляции, блуждание и расширение лазерного луча. Сцинтилляция является наиболее важной для звеньев АОЛС, вызывая колебания интенсивности на поверхности приемника. В то же время блуждание пучка определяет требования к приборам слежения и наведения системы АОЛС [75]. Этот эффект наблюдается в виде случайного движения сфокусированного пучка по поверхности фотоприемника. Блуждание пучка также выражается в терминах локальных флуктуаций интенсивности излучения. Это приводит к увеличению частоты системных битовых ошибок (BER) и, соответственно, ошибки отслеживания. Наконец, расширение светового луча до размеров, превышающих апертуру приемника, также приводит к ограничению практической эффективности АОЛС (т. н. геометрические потери).

В последнее время многие исследования показали, что частично когерентные пучки меньше подвержены влиянию турбулентности, чем полностью когерентные пучки. Поэтому использование частично когерентного пучка снижает флуктуацию интенсивности излучения на приемнике [75, 76]. Для смягчения таких атмосферных эффектов, как сцинтилляция или блуждание луча, обычно применяют традиционные методы, такие как адаптивная оптика, методы разнесения, усреднение апертуры и антенны быстрого слежения [77, 78].

Как известно, адаптивная оптика предназначена для непрерывного измерения и исправления ошибок волнового фронта, и ее эффективность давно доказана на практике. Кроме того, влияние турбулентности можно практически исключить путем разнесения лучей, которое можно осуществить несколькими способами:

- использование нескольких передатчиков и приемников (пространственное разнесение);
- использование двойных передаваемых сигналов, разделенных задержкой во времени (временное разнесение);
- использование по крайней мере двух различных длин волн передачи данных (разнесение по длинам волн).

Разработаны также многочисленные методы точного слежения и автоматического сбора информации, которые используют квадрантные детекторы, сервомоторы, речевые катушки, шаговые двигатели, зеркала, ПЗС-матрицы и МЭМС [79].