

УДК 621.373.826

Перспективы применения квантово-каскадных лазеров в системах оптико-электронного противодействия. Обзор

© 2017 г. **П. И. АБРАМОВ, КАНД. ТЕХН. НАУК; Е. В. КУЗНЕЦОВ, ДОКТОР ТЕХН. НАУК;
Л. А. СКВОРЦОВ, ДОКТОР. ТЕХН. НАУК**

Научно-исследовательский институт «Полюс» им. Стельмаха, Москва

E-mail: lskvortsov@gmail.com

Поступила в редакцию 02.03.2017

Рассмотрены существующие и перспективные лазерные средства для систем противодействия, работающих в инфракрасном диапазоне спектра. Основное внимание уделено вопросам противодействия головкам самонаведения, функционирующим в инфракрасной области спектра, и подавления тепловизионных средств наблюдения, разведки и прицеливания. Проведенный критический анализ имеющихся литературных данных позволяет сделать вывод о том, что квантово-каскадные лазеры могут быть использованы при создании перспективных мультиспектральных компактных систем противодействия инфракрасного диапазона. Приводятся оценки мощности излучения квантово-каскадных лазеров, необходимой для функционального подавления удаленных фотоприемных устройств. Результаты расчетов находятся в удовлетворительном согласии с имеющимися литературными данными. Показано, что существующие пути повышения мощности излучения квантово-каскадных лазеров позволяют достичь необходимых значений для их применения в системах инфракрасного противодействия.

Ключевые слова: оптико-электронные системы противодействия, инфракрасные головки самонаведения, тепловизионные средства наблюдения, разведки и прицеливания, квантово-каскадные лазеры.

Коды OCIS: 140.5960, 140.3070

1. ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития вооружения и военной техники одним из приоритетных вопросов является решение задач оптико-электронного противодействия (ОЭП), в частности, в области среднего и дальнего инфракрасного диапазонов спектра. В настоящее время за рубежом проводятся работы по созданию систем ОЭП наземного, морского и воздушного базирования. Наиболее интенсивно разрабатываются бортовые авиационные системы, позволяющие выводить из строя оптоэлектронные приборы путем их функционального подавления лазерным излучением. Необходимость создания таких систем продиктована, в частности, тем, что за последние десятилетия около 90% всех случаев поражения самолетов и вертолетов в военных конфликтах связано с попаданием в них управляемых ракет с инфракрасными (ИК) головками самонаведения (ГСН) [1].

Поэтому одним из важных направлений создания новых образцов вооружения и военной тех-

ники является разработка систем и средств ОЭП. Они предназначены для снижения эффективности, функционального подавления или поражения оптоэлектронных приборов различного назначения (тепловизионные средства разведки, наблюдения и прицеливания, головки самонаведения управляемых ракет и др.) [2–4].

При подавлении тепловизионных средств (ТПС) противника атакующая сторона может получить решающее преимущество, поэтому в современных условиях противодействие им должно стать составной частью защиты всех родов войск. Задача, связанная с созданием эффективных средств подавления ТПС и оснащением ими войск, становится особенно актуальной в связи с возрастающей вероятностью возникновения локальных вооруженных конфликтов.

Не менее актуальной является задача противодействия переносным зенитно-ракетным комплексам (ПЗРК) с ИК ГСН для защиты летательных аппаратов (ЛА). Считается общепринятым, что

только лазерные системы оптико-электронного подавления обеспечивают надежное и эффективное противодействие современным и перспективным угрозам со стороны ПЗРК. Поэтому разработка компактных, надежных, долговечных и энергоэффективных мультиспектральных лазерных систем для противодействия ПЗРК с ИК ГСН так же представляется крайне необходимой, особенно для защиты вертолетов и средств малой авиации, включая беспилотные ЛА.

Целью настоящей работы является обоснование возможности применения источников излучения нового поколения, какими являются квантово-каскадные лазеры (ККЛ) среднего инфракрасного диапазона спектра, для функционального подавления чувствительных в этой спектральной области удаленных фотоприемных систем. Следует заметить, что интенсивно развивающиеся в последнее десятилетие ККЛ в ряде случаев рассматриваются как ключевой элемент для решения этой важнейшей задачи.

Разумеется, данная работа не может охватить все вопросы, связанные с разработкой систем и средств ОЭП различного назначения на базе ККЛ. Тем не менее, она представляет собой первую попытку в ряде важнейших и актуальных, по мнению авторов обзора, примеров критически проанализировать возможности перспективных средств противодействия на базе ККЛ, а также сформулировать практические рекомендации по их развитию.

2. НАПРАВЛЕННЫЕ СИСТЕМЫ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ РАКЕТАМ С ИК ГСН

2.1. Средства ИК противодействия

Переносные зенитные управляемые комплексы с ИК ГСН продолжают оставаться наиболее эффективным оружием против ЛА. Как уже отмечалось, в локальных войнах последних десятилетий примерно 90% всех случаев поражения ЛА было связано с попаданием в них управляемых ракет с ИК ГСН.

В качестве автономных средств защиты боевых ЛА в самом начале их развития наибольшее распространение получили расходоуемые средства («ложные тепловые цели», ЛТЦ) и ламповые постановщики некогерентных модулированных ИК помех. Однако использование первых для защиты гражданских самолетов ограничено из-за опасности возникновения пожара (при применении ЛТЦ на высотах менее 300 м), а также из-за недостаточной их эффективности против современных ПЗРК, которые наделены способностью отличать реальную цель от ЛТЦ. В свою очередь, средства постановки некогерентных модулированных ИК помех не могут результативно противодействовать ПЗРК из-за недостаточной спектральной плотно-

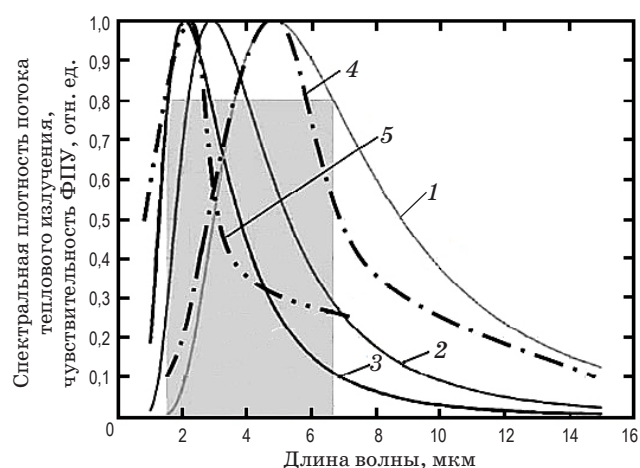


Рис. 1. Спектральные зависимости плотности потока теплового излучения абсолютно черного тела при температурах 600 (1), 1000 (2), 1400 К (3). Спектральные зависимости чувствительности ИК детекторов на основе соединений InSb (4) и PbS (5). Заливка — область спектра с недостаточной для детектирования мощностью излучения [5].

сти мощности их теплового излучения по сравнению с ее значением ИК излучения у самолетных двигателей.

По заключению российских и зарубежных специалистов в настоящее время только лазерные системы ОЭП обеспечивают надежное и эффективное противодействие современным и перспективным угрозам со стороны ПЗРК.

По мере развития средств противодействия ПЗРК с ИК ГСН идет непрерывное совершенствование ИК техники самонаведения ПЗРК. Например, в современных ПЗРК применяются матричные мультиспектральные детекторы, обеспечивающие максимум чувствительности в спектральной области 3–5 мкм. Именно этот диапазон спектра соответствует наиболее мощному тепловому сигналу, формируемому газовым факелом двигателя атакуемого ЛА (рис. 1). Диапазон 3–5 мкм характеризуется также меньшим затуханием в атмосфере и меньшим уровнем помех. Кроме того, для подавления тепловых шумов и повышения рабочих характеристик детектора используется охлаждение (обычно жидким азотом) ГСН. При этом в последних поколениях ПЗРК увеличены скорость сопровождения и маневренность, расширено поле зрения, усовершенствованы алгоритмы наведения и повышены кинематические характеристики [2].

2.2. Концепция направленного ИК противодействия

Последние разработки в области лазерных технологий сделали возможным применение лазеров в системах ИК противодействия различного назначения. Хорошо известным примером таких систем являются так называемые направленные ИК

системы противодействия, устанавливаемые на борту самолетов для их защиты от управляемых ракет с ИК ГСН, эффективность которых во многом определяется мощностью лазерного излучения [6–8].

Направленные ИК системы противодействия первоначально были предназначены для противодействия ПЗРК со сканирующими ГСН, содержащими один чувствительный в ИК области (3–5 мкм) детектор. Однако это поколение управляемых ракет с ИК наведением (*infrared seekers*) является не защищенным от создаваемых импульсным ИК лазером модулированных помех.

Поэтому следующее поколение ракет с ИК ГСН (*imaging seekers*) оснащается ИК матричными фотоприемными устройствами (МФПУ). По мере сближения ракеты с целью система цифровой обработки данных строит ее изображение и сравнивает с образами типовых целей, заложенных в память процессора. Поэтому «обман» таких ракет с помощью постановки импульсным ИК лазером помех станет практически невозможным [2, 3, 9].

В качестве наиболее перспективного метода противодействия ракетам с ИК ГСН, снабженными МФПУ, сейчас рассматривается не постановка помех, а «ослепление» ракет излучением непрерывного или квазинепрерывного импульсного лазера, длина волны излучения которого попадает в область чувствительности ИК МФПУ. Достижимое при этом функциональное повреждение МФПУ связано с обратимым эффектом насыщения массива чувствительных элементов матрицы при облучении ее лазерным излучением с мощностью излучения существенно большей, чем для подавления ИК ГСН предыдущего поколения с одним детектором и со сканирующей головкой. В последнем случае достаточно было создания модулированной помехи с мощностью, не намного превышающей сигнал от мишени [3, 9].

В зависимости от мощности лазерного излучения, падающего на приемную площадку МФПУ, с длиной волны, совпадающей с областью его спектральной чувствительности, возможны различные эффекты, приводящие к временной или полной его неработоспособности, основные из которых представлены в таблице. При ее составлении были учтены экспериментальные результаты, полученные для МФПУ различного типа в работах [2, 3, 6–10]. Обращает на себя внимание тот факт, что не существует четкой границы между эффектом постановки помех и ослеплением, которые могут проявляться одновременно.

В то же время необратимое повреждение элементов МФПУ требует более значительного уровня освещенности матрицы, чем в случае ослепления. Следует отметить, что существующие источники излучения в среднем ИК диапазоне спектра (3–5 и 8–12 мкм) обеспечивают уровни освещенности, которые не превышают значения, необходимые для достижения эффекта ослепления в диапазоне расстояний от нескольких сотен до нескольких тысяч метров [2].

Как уже отмечалось выше, применение лазеров среднего ИК диапазона спектра в качестве средства противодействия не ограничивается защитой ЛА от управляемых ракет с ИК ГСН. Поэтому в обзоре рассмотрим проблему направленного противодействия ИК системам визуализации в общем случае применительно к системам различного назначения, в том числе ТПС.

2.3. Практическая реализация концепции направленных ИК систем противодействия на примере ИК ГСН

Появление новых ракет с ИК ГСН, не восприимчивых к ИК ловушкам, ускорило переход к более эффективным лазерным направленным ИК системам противодействия, которые могут бороться

Эффекты, возникающие в МФПУ при воздействии лазерного излучения (расстояние до цели 2 км)

Проявление воздействия	Постановка помех	Ослепление	Разрушение чувствительного элемента ФПУ
Средняя мощность лазерного излучения, Вт	0,5–10	2–10	10–200 (> 0,1 Дж)
Краткое описание эффекта	Подобранная частота модуляции	Непрерывный режим или с большой частотой следования импульсов	Непрерывный режим или с большой частотой следования импульсов
Применение	Смещение сигнала помехи с сигналом от реальной цели, создание ложной цели (фантом реальной цели). Относительно низкое отношение уровня помехи к сигналу.	Обратимый эффект насыщения элементов МФПУ, растекание заряда в соседние ячейки, появление хаотического шума во всей области фотоприемной матрицы. Высокое отношение уровня помехи к сигналу	Необратимое повреждение элементов МФПУ проявляется в появлении в фокальной плоскости «белых», «выгоревших» пикселей
	ИК ГСН	ИК ГСН, ТПС	ИК ГСН, ТПС

со всеми известными и пока еще проектируемыми ракетами с ИК наведением. Стоимость, обслуживание и надежность этих систем ограничивало их применение в прошлом, но по мере совершенствования лазерных технологий и дальнейшей миниатюризации, а также с повышением уровня «изощренности» угроз все более крупные парки транспортных и специальных воздушных платформ оснащаются такими системами.

Практическая реализация этой идеи в России была осуществлена в бортовом многофункциональном комплексе обороны ЛА «Президент-С» [1], в состав которого входит лазерная станция ОЭП.

Масса лазерной системы — 64 кг, потребляемая в рабочем режиме мощность электроэнергии от бортового источника питания — не менее 1 кВт. В состав входят: твердотельный лазер (по всей видимости, параметрический генератор света), оптико-механический блок с одной передающей головкой с рабочим сектором обзора на 360° по азимуту, блок управления и питания (рис. 2).

Работы по созданию лазерных систем противодействия ПЗРК с ИК ГСН интенсивно ведутся и за рубежом. В США этой проблемой давно и активно занимается корпорация *Northrop Grumman*. Корпорация уже установила системы лазерной защиты направленных ИК систем противодействия первого поколения на несколько сотен больших самолетов, в том числе на военную авиацию, включая вертолеты [11]. В качестве источников лазерного излучения в этой системе защиты применяется перестраиваемый параметрический генератор света (ПГС), в котором используется нелинейный кристалл на основе тройного твердого раствора германиевого фосфида цинка $ZnGeP_2$ (ZGP). Масса системы, а также относительно большое энерго-

потребление позволяет устанавливать ее только на большие самолеты и вертолеты. Средняя мощность лазерного излучения в диапазоне 3–5 мкм составляет несколько ватт.

2.4. Концепция Common Infrared Countermeasures и пример ее реализации

Упомянутые выше недостатки существующих систем защиты ЛА на базе ПГС и газовых лазеров требуют разработки относительно недорогих, компактных, долговечных и энергоэффективных лазерных источников, излучающих в среднем ИК диапазоне, для их размещения на легких ЛА, большинство среди которых составляют боевые вертолеты.

За рубежом программа создания таких лазеров получила название общего (стандартного) ИК противодействия (*Common Infrared Countermeasures*). Она предназначена для создания следующего поколения систем расширенного противодействия ракетам с ИК ГСН для вертолетов и легких самолетов. В рамках программы намерены развивать легкую, недорогую и модульную систему ИК защиты, в частности, на основе полупроводниковых ККЛ. Как известно, ККЛ характеризуются не только малыми размерами, но и высокой энергоэффективностью. Например, в работе [12] продемонстрирован одиночный ККЛ с энергоэффективностью 12,7% на длине волны 4,6 мкм при мощности непрерывного излучения 3 Вт.

Первым примером реализации программы стало создание мощных мультиспектральных модульных ККЛ-систем типа SOLARIS (рис. 3), которые представляют собой, по мнению авторов обзора, наиболее законченную разработку с ясными перспективами развития. Системы противодействия SOLARIS отличаются малыми массогабаритными



Рис. 2. Лазерная система ОЭП ПЗРК с ИК ГСН, входящая в бортовой многофункциональный комплекс обороны ЛА «Президент-С» [1].



Рис. 3. Система активной защиты вертолетов SOLARIS от ПЗРК с ИК ГСН [13].

параметрами, долговечностью и высокой энергоэффективностью по сравнению с существующими системами защиты на основе ПГС.

Средняя мощность излучения входящего в систему мультиспектрального лазера *Solaris*TM составляет более 10 Вт, а ориентировочная масса всей системы не превышает 15 кг, что особенно важно для вертолетов и легких беспилотных ЛА, где каждый килограмм лишнего веса и энергоэффективность оборудования имеют принципиальное значение [13].

В дополнение к сказанному необходимо отметить, что в настоящее время ведется целенаправленная работа по снижению температуры факела газов, выбрасываемых двигателем ЛА, что предполагает использование в ГСН ФПУ, чувствительных в области 8–12 мкм. В перспективе это будут мультиспектральные МПФУ, область чувствительности которых будет содержать окна 3–5 и 8–12 мкм [2].

На сегодняшний день единственным компактным лазерным источником, способным противодействовать ИК ГСН, снабженным такими МПФУ, могут быть только мультиспектральные системы на основе ККЛ. Уже сейчас на базе технологии сведения пучков от отдельных лазеров созданы мультиспектральные ККЛ-системы, суммарная мощность излучения которых превышает 20 Вт [14]. В ближайшем будущем планируется получить ККЛ-системы с мощностью излучения в среднем ИК диапазоне от 100 Вт до 1 кВт и с расходимостью, близкой к дифракционной ($M^2 < 2$), [15].

Таким образом, из сказанного следует, что, по крайней мере, в среднесрочной перспективе альтернативы использованию ККЛ в мультиспектральных системах противодействия ПЗРК с ИК ГСН не существует, особенно, если учесть упомянутую тенденцию к снижению температуры выбрасываемого двигателем ЛА газового факела. Конечно, в первую очередь, это относится к легкой авиации и вертолетам, учитывая компактность и высокую энергоэффективность ККЛ.

3. ПОДАВЛЕНИЕ ТПС НАБЛЮДЕНИЯ, ПРИЦЕЛИВАНИЯ И РАЗВЕДКИ

3.1. Особенности подавления ТПС

По своему назначению системы подавления оптико-электронных средств (ОЭС) можно подразделить на разведывательные системы, предназначенные только для обнаружения ОЭС с возможностью передачи данных в системы огневого подавления, и на системы обнаружения и непосредственного подавления ОЭС. Последние, в свою очередь, по принципу подавления делятся на средства подавления на базе стрелкового оружия и на средства подавления на базе силовых лазеров [16].

Активные работы по созданию подобных средств ведутся во многих странах мира. Традиционно система поражения ОЭС содержит ночной и дневной визирные каналы, систему пеленга и боевой канал поражения ОЭС. Сканирование пространства проводится, как правило, излучением полупроводникового лазерного диода (ЛД), обратно отраженное от ОЭС излучение которого регистрируется ФПУ. При наведении системы на цель осуществляется функциональное поражение (ослепление) оптико-электронного устройства мощным лазерным излучением. Поражающее лазерное излучение обычно имеет две рабочие длины волны — 0,53 и 1,06 мкм, соответствующие пропусканию оптики дневных и ночных ОЭС, с дальностью поражения до 2 км [16].

Тепловизор, как и любое ОЭС разведки, конструктивно имеет в своем составе объектив, выходное окно которого по отражающим свойствам резко выделяется на фоне окружающей местности. Эта особенность позволяет использовать для его обнаружения принцип лазерной локации, применяющийся в приборах обнаружения средств оптико-электронной разведки в видимом и ближнем ИК диапазонах спектра [16].

Учитывая тот факт, что подавление ТПС в реальных условиях необходимо осуществлять на достаточно больших расстояниях (от нескольких сотен метров до нескольких километров), к энергетическим параметрам силовых лазеров видимого и ближнего ИК диапазонов, а также к параметру качества их излучения (M^2) должны предъявляться высокие требования, чтобы обеспечить необратимое повреждение приемного объектива ТПС, сопровождаемое механическим нарушением его целостности (разрушением). Используя результаты работ [17–19], можно показать, что в этом случае применение лазеров видимого или ближнего ИК диапазонов спектра нецелесообразно для дистанционного подавления ТПС в полевых условиях. Высокие значения энергии лазерного излучения лишают твердотельные силовые лазеры даже с полупроводниковой накачкой компактности в силу возрастания их массогабаритных параметров и энергопотребления.

3.2. Функциональное подавление ТПС лазерным излучением

Требования к энергетическим параметрам лазера можно значительно снизить, если длина волны его излучения попадает в область чувствительности ТПС, т.е. в одно из указанных выше окон прозрачности атмосферы. Так как германий является прозрачным материалом в этих диапазонах длин волн, то ТПС можно вывести из строя за счет его ослепления лазерным излучением. В режиме ослепления объектив тепловизора и его фотоприемная матрица не подвергаются разрушению [3, 9]. Как и в упомянутых работах, под разрушением

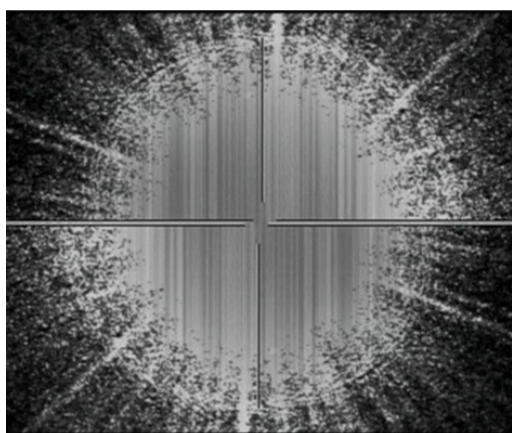


Рис. 4. Пример, иллюстрирующий эффект «ослепления» ТПС при лазерном воздействии [3, 9].

матрицы будем понимать необратимый вывод из строя ее элементов.

В то же время эффект «ослепления», достигаемый при относительно небольшой мощности лазерного излучения, является обратимым. Однако он приводит не только к временной потере работоспособности ИК камеры, но и к нарушению зрения оператора за счет яркой вспышки на экране ТПС (рис. 4). Нельзя исключать и сильный психологический эффект временного ослепления.

Вероятно, именно этими обстоятельствами объясняется тот факт, что в последнее время уделяется пристальное внимание созданию компактных «низкоэнергетичных» лазерных средств ИК противодействия ТПС [3, 9, 20]. При этом нельзя не провести аналогию с созданием компактных систем противодействия ПЗРК с ИК ГСН в рамках выполнения программы *Common Infrared Countermeasures*.

3.4. Эффект «ослепления» и его особенности

К сожалению, эффекты, связанные с воздействием излучения на поверхность элементов МФПУ, изучены недостаточно, чтобы судить о последствиях, которые это воздействие оказывает на работоспособность МФПУ в целом [3, 9]. В реальных условиях (дальность объекта свыше 200–300 м) вся энергия излучения, как правило, попадает на один элемент матрицы, распространяясь далее по ее поверхности за счет рассеяния. Это обусловлено тем, что на таких дальностях источник лазерного излучения относительно ТПС является точечным. В этом случае можно утверждать, что при не слишком больших энергиях в лазерном импульсе ослепление является следствием насыщения элементов МФПУ, растеканием заряда в соседние ячейки (яркое пятно) и появлением хаотического шума во всей области фотоприемной матрицы (хаотическое свечение пикселей). При насыщении происходит экранирование внутреннего электрического поля

большим числом фотогенерированных носителей заряда, что ведет к уменьшению их подвижности, а в конечном итоге — уменьшению фотоотклика и отношения сигнала к шуму, которые не зависят от количества поглощенных фотонов [3].

В ходе экспериментов, проведенных в работах [3, 9], разные типы ИК камер подвергались воздействию излучения лазеров, работающих в различных режимах генерации.

В качестве примера рассмотрим случай, когда на камеру с матрицей фотодетекторов на основе твердого раствора кадмий-ртуть-теллур (КРТ), работающей в диапазоне 3–5 мкм, воздействовали излучением DF-лазера как в непрерывном, так и в импульсном режиме, который достигался с помощью акустооптического модулятора. При этом длительность импульсов изменялась в пределах от 5 до 100 мкс при частотах следования 5 и 20 кГц. Параметры камеры с матрицей на основе КРТ: диаметр объектива — 9 см, угловое поле — $4,4 \times 4,4^\circ$, число элементов — 256×256 , время интегрирования — 1 мс, частота кадров — 100 Гц [3, 9]. На рис. 5 приведена зависимость диаметра области насыщения на МФПУ (на основе КРТ) в зависимости от облученности объектива.

Существенным результатом исследований является установление того факта, что диаметр области ослепления определяется функцией рассеяния точки данного объектива, которая описывает зависимость распределения освещенности от координат в плоскости изображения [3, 9]. При этом авторами работ установлена эмпирическая зависимость радиуса области насыщения x_{sat} (в пикселях) от интенсивности излучения в плоскости объектива I_0

$$x_{\text{sat}} = \sqrt[3]{4 / \pi (I_0 / I_{\text{sat}})}, \quad (1)$$

где I_{sat} — интенсивность излучения, соответствующая порогу насыщения одного пикселя.

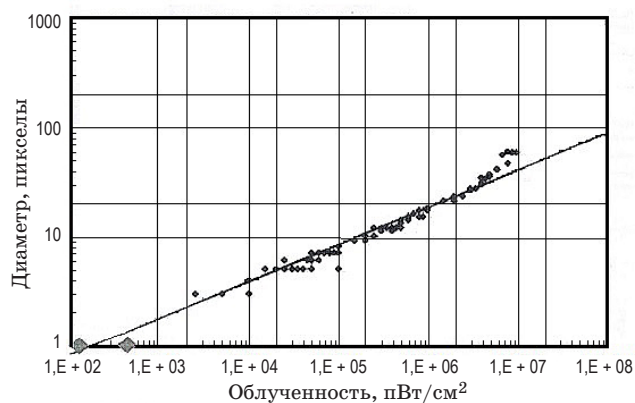


Рис. 5. Зависимость диаметра области насыщения (количества пикселей) от облученности объектива ИК камеры с матрицей на основе КРТ [3, 9].

Важно подчеркнуть, что такой же характер зависимости диаметра области насыщения от интенсивности излучения в плоскости объектива камеры наблюдался и у МФПУ на основе InSb при его облучении лазерными импульсами наносекундной длительности. На исследуемое МФПУ воздействовало излучение ПГС с длиной волны $\lambda = 3,9$ мкм на основе периодически поляризованного кристалла ниобата лития при накачке излучением $YVO_4:Nd$ -лазера. Длительность импульсов ПГС составляла порядка 10 нс при частоте следования 30 кГц, средняя мощность излучения — 60 мВт, угловая расходимость — 1 мрад. Параметры камеры с матрицей на основе InSb: поля зрения $4,5 \times 6,0^\circ$ и $1,5 \times 2,0^\circ$, число элементов — 256×320 , время интегрирования — 1 мс, частота кадров — соответствует стандарту NTSC, т.е. составляет 60 полукадров в секунду [3, 9]. В этом случае интенсивность облучения матрицы была на 4 порядка выше, чем в рассмотренном ранее примере (рис. 5).

В обоих случаях камеры работали в линейном режиме. При этом обеспечивался так называемый низкоэнергетический режим воздействия, при котором происходит рост области насыщения с увеличением падающей мощности излучения в соответствии с формулой (1). В этом режиме облучения воздействие на испытуемые объекты непрерывного излучения, как показано в работах [3, 9], эквивалентно воздействию периодически следующих с высокой частотой повторения «низкоэнергетических» лазерных импульсов с такой же средней мощностью.

Таким образом, при воздействии на элементы исследуемых матриц лазерным излучением с малой энергией импульсов, например, в микросекундной области, когда не проявляются нелинейные эффекты в отклике ФПУ, размеры области насыщения определяются средней мощностью излучения. Этот факт крайне важен для выбора режима работы лазера, так как наиболее эффективными для ослепления матричных элементов ИК камер оказываются лазеры непрерывного или квазинепрерывного режима работы. При этом время интегрирования камеры должно превышать период следования лазерных импульсов, что заведомо выполнимо при больших частотах следования лазерных импульсов.

Что касается лазерных импульсов наносекундного диапазона длительностей с относительно большой энергией, то при их воздействии на матрицу, как показано в работах [3, 9], имеет место сильное проявление нежелательных нелинейных эффектов. Одним из проявлений нелинейности, например, может быть невозможность достижения насыщения: с ростом мощности излучения на объектив камеры отклик МФПУ падает. Причем этот эффект начинает проявляться практически при одинаковых интенсивностях излучения, воз-

действующего как на МФПУ на основе КРТ, так и на основе InSb. Для выяснения особенностей поведения МФПУ при воздействии на них наносекундных лазерных импульсов большой интенсивности, по мнению авторов обзора, необходимо проведение дополнительных исследований, которых на сегодняшний день явно недостаточно.

3.5. Оценка средней мощности лазера для ИК систем противодействия

Результаты, представленные в работах [3, 9], позволяют оценить среднюю мощность лазерного излучения ИК систем противодействия, работающих в режиме воздействия с малой энергией в импульсе. Приведенная ниже оценка справедлива как в микросекундном, так и в наносекундном диапазоне длительностей импульсов в режиме облучения с малой скважностью.

Расчеты минимальной мощности излучения лазера, необходимой для ослепления ИК камеры, проведем для расстояния $L = 2$ км, расходимости лазерного излучения $\theta = 1$ мрад и диаметра объектива МФПУ $D_{ob} = 20$ см. На расстоянии 2 км от источника диаметр пятна лазерного излучения составит $D_L \approx 200$ см (для надежного захвата цели и обеспечения равномерной засветки размер лазерного пятна должен в несколько раз превосходить диаметр объектива МФПУ).

Из рис. 5 следует, что достигнутый в работе [9] максимальный размер (диаметр) области насыщения составляет порядка 60 пикселей при интенсивности облучения объектива $I_{lob} = 10^7$ пкВт/см². В соответствии с законом $x_{sat} \sim (I_{ob})^{1/3}$ для достижения насыщенных всех элементов матрицы формата 256×256 интенсивность лазерного излучения в плоскости входного отверстия объектива МФПУ должна быть $I_{ob} = (256/60)^3 \times 10^7$ пкВт/см² = $6,4 \times 10^{-4}$ Вт/см². Это соответствует мощности излучения в пятне диаметром $D_L \approx 200$ см (мощности излучения на выходе лазера), равной

$$P_0 = \pi D_L^2 I_{ob} / 4(1 - R) \tau_{atm} \tau_{opt} = 30 \text{ Вт.} \quad (2)$$

Здесь $R = 0,1$ — коэффициент отражения германия с нанесенным широкополосным просветляющим покрытием, $\tau_{atm} = 0,8$ — пропускание атмосферы на расстоянии 2 км при метеорологической дальности видимости 15 км, $\tau_{opt} = 0,9$ — пропускание ИК объектива МФПУ.

Таким образом, можно считать, что полученная оценка средней мощности излучения находится в удовлетворительном согласии с данными, приведенными в таблице для режима «ослепление».

Из формулы (2) следует выражение для дальности ослепления ИК МФПУ

$$L = 2 / \theta \sqrt{\tau_{atm} \tau_{opt} (1 - R) P_0 / \pi I_{ob}}, \quad (3)$$

где P_0 — средняя мощность лазерного излучения.

С точки зрения ИК противодействия ТПС особый интерес представляет исследование воздействия лазерного излучения в дальнем ИК диапазоне на тепловизионные приборы с неохлаждаемой микроболометрической матрицей. К сожалению, в открытой литературе этой проблеме посвящено лишь небольшое количество работ [10, 21]. Так, результаты работы [10] в общих чертах подтверждают характер развития «повреждения» матрицы с ростом мощности лазерного излучения. Это, по мнению авторов обзора, делает возможным и в этом случае применение выражения (1) для оценки средней мощности лазерного излучения в непрерывном режиме генерации и в «низкоэнергетическом» режиме с высокой частотой повторения импульсов.

4. ИСТОЧНИКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПОДАВЛЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИК ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ

4.1. Газовые лазеры

Что касается существующих источников лазерного излучения в среднем ИК диапазоне спектра, то в недавнем прошлом газовые лазеры низкого давления на углекислом газе и оксиде углерода (CO_2 и CO) были основными источниками лазерного излучения в области дальнего ИК диапазона. Они генерируют множество дискретных линий в диапазонах 9–11,5 мкм (12CO_2 и 13CO_2 -лазеры) и 5,0–7,5 мкм (CO -лазеры).

В настоящее время созданы достаточно компактные волноводные CO_2 -лазеры с высокочастотным возбуждением и принудительным воздушным охлаждением [22]. При средней мощности излучения 10 Вт масса CO_2 -лазера с источником питания не превышает 10 кг, длина лазера составляет порядка 50 см. При больших мощностях их массогабаритные характеристики возрастают, а сами лазеры требуют принудительного водяного охлаждения. Существенным недостатком таких лазеров является относительно малый срок службы, составляющий 2000 ч. Кроме того, другим принципиальным недостатком является то, что излучение CO_2 -лазера не попадает в область 3–5 мкм, которая также является рабочей зоной ИК ФПУ. В то же время этот недостаток частично устраняется путем генерации второй гармоники CO_2 -лазера. Однако это приводит не только к снижению мощности излучения, но и к усложнению всей системы.

В коротковолновой части среднего ИК диапазона (от 3 до 5 мкм) применяется электроразрядный HF-DF-лазер с замкнутым циклом смены рабочей смеси, который также имеет дискретный спектр излучения в указанном диапазоне длин волн. Как и лазеры на CO_2 , HF-DF-лазер представляет собой

источник излучения большой мощности, однако обладает значительными габаритами и энергопотреблением. Кроме того, дискретный характер спектра излучения в относительно небольшом спектральном интервале ограничивает область его применения.

4.2. Параметрические генераторы света

В настоящее время наиболее эффективными перестраиваемыми источниками излучения, длина волны которых приходится на диапазон 3–5 мкм, являются ПГС на кристалле ZGP при накачке гольмиевым лазером с длиной волны генерации порядка 2 мкм. Область прозрачности кристаллов ZGP находится в диапазоне 2–8 мкм [23].

Обладая высокой нелинейностью, кристаллы ZGP характеризуются относительно низкой лазерной прочностью поверхности, которая составляет около 130 МВт/см^2 (1 Дж/см^2) [24]. Это ограничивает энергию в импульсе лазерного излучения значением в несколько сотен миллиджоулей. Как и CO_2 -лазер, ПГС на кристалле ZGP может работать только в одном спектральном интервале, совпадающем с одним из двух окон прозрачности атмосферы в коротковолновой части среднего ИК диапазона 3–5 мкм. При этом ему так же характерен относительно небольшой ресурс работы (порядка 1000 ч работы), связанный, вероятно, с так называемым накопительным эффектом, т.е. зависимостью порога разрушения от количества лазерных импульсов [17]. К недостаткам ПГС на кристалле ZGP следует также отнести небольшой коэффициент полезного действия (не выше 1%), что является причиной значительного энергопотребления (в рабочем режиме более 1 кВт). Поэтому массогабаритные параметры лазерных систем ОЭП на ПГС с источником питания и системой охлаждения весьма значительны (масса превышает 60 кг), что затрудняет их применение в компактных устройствах.

Тем не менее, сейчас ПГС продолжают рассматриваться как основные импульсные источники излучения, используемые для противодействия ИК ГСН в области 3–5 мкм. В последнее время этому способствует значительный прогресс в создании компактных, мощных и эффективных ПГС, работающих в указанном диапазоне длин волн [25–35].

4.3. Квантово-каскадные лазеры среднего ИК диапазона спектра

4.3.1. Физические принципы, лежащие в основе работы ККЛ

Вопросам, которые рассматриваются в данном разделе, посвящено значительное количество монографий, обзоров и оригинальных статей, к которым можно обратиться для более детального изучения ККЛ [36–54], в частности, для изучения

существующих путей повышения энергоэффективности и мощности излучения ККЛ. Тем не менее, авторы обзора считают необходимым хотя бы в общих чертах представить свое видение предмета, акцентируя внимание на особенностях, связанных с рассматриваемой областью применения ККЛ. При этом ограничимся рассмотрением ККЛ с вертикальными переходами внутри одной квантовой ямы, которые сейчас получили наибольшее распространение.

Физические принципы, лежащие в основе работы ККЛ, существенно отличаются от принципов работы обычных полупроводниковых ЛД. 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 испускаемые ККЛ фотоны частотой $(E_n - E_{n-1})/h$, где h — постоянная Планка, появляются в результате квантовых переходов электрона между энергетическими уровнями E_n и E_{n-1} . В действительности эти уровни не существуют в полупроводниковых материалах, из которых состоит так называемая активная область лазера. Они создаются искусственно путем конструирования 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) и запрещенных подзон (мини-щель). Движение электронов в такой структуре происходит в пределах мини-зоны перпендикулярно к границе раздела слоев. При этом энергия электронов, локализованных в квантовых ямах, квантуется и зависит от ширины и высоты ее потенциального барьера между соседними ямами, но не зависит от материала структуры.

В отличие от ЛД 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» (т.е. в каждом из каскадов). Число каскадов обычно находится в диапазоне от 20 до 35

у лазеров, предназначенных для получения излучения в диапазоне длин волн от 4 до 8 мкм, но лазеры могут иметь и более 100 каскадов. Этот каскадный эффект отвечает за очень высокие мощности излучения ККЛ по сравнению с традиционными биполярными ЛД, так как его квантовая эффективность намного превышает 1. Отсюда и название — квантово-каскадные лазеры.

На рис. 6 приведена типичная энергетическая диаграмма ККЛ, служащая для иллюстрации принципа его работы.

Наклон в зоне проводимости обусловлен наличием приложенного электрического поля. При этом каждый каскад, как уже отмечалось, содержит инжектор электронов и активную область. В рассматриваемом примере активная область состоит из двух одинаковых квантовых ям, характеризующихся тремя квантованными энергетическими состояниями. Лазерный переход определяется разностью энергий между состояниями 3 и 2, которая, главным образом, зависит от выбранной толщины квантовых ям. Для получения лазерной генерации требуется инверсия населенностей между уровнями 3 и 2. Это приводит к условию, чтобы время жизни 3-го уровня было существенно больше, чем время жизни 2-го. Для достижения этой цели самый низкий уровень 1 должен быть расположен ниже уровня 2 на энергию оптического фонона (порядка 34 мэВ). Выполнение перечисленных условий обеспечивает быстрое опустошение уровня 2 за счет взаимодействия электронов с оптическими фононами, в результате чего электроны оказываются в состоянии 1. Вследствие резонансного характера этот процесс происходит очень быстро — с характерным временем релаксации порядка 0,1–0,2 пс. В свою очередь, электроны

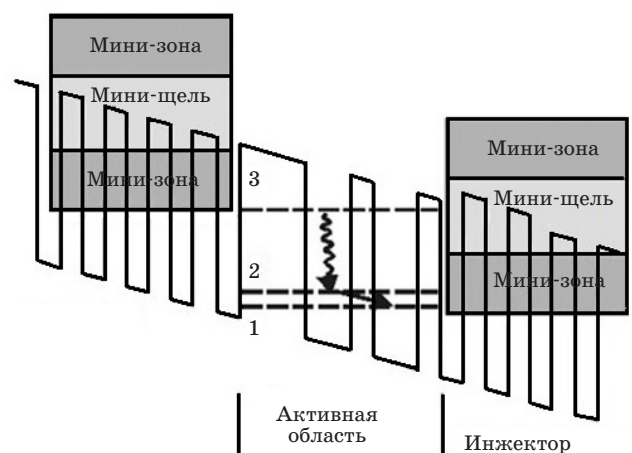


Рис. 6. Энергетическая диаграмма квантового каскадного лазера с вертикальными переходами внутри одной квантовой ямы. В качестве материала квантового барьера используется тройной твердый раствор InAlAs, а в качестве материала квантовой ямы — раствор InGaAs (1, 2 и 3 — энергетические уровни в яме) [54].

на 3-ем уровне имеют существенно большее время жизни из-за относительно большего энергетического зазора между уровнями 3 и 2, поэтому процесс электрон-фононного взаимодействия в этом случае носит нерезонансный характер, а его вероятность крайне мала.

Для получения лазерной генерации необходимо также подавить нежелательную утечку электронов за счет туннелирования из состояния 3 в состояния, формирующие широкий квази-континуум. 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 переходы с верхнего лазерного уровня. При этом сам инжектор «настроен» таким образом, что основной уровень электронов в нем совпадает с верхним рабочим уровнем в следующей за ним энергетической яме, когда приложенное напряжение увеличивается выше определенного значения (порядка 70 кВ/см). В этом случае электроны инжектируются на верхний лазерный уровень с помощью процесса, известного как резонансное туннелирование. Поэтому этот процесс 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 качестве иллюстрации к сказанному выше на рис. 7 представлена конструкция полоскового ККЛ с указанием характерных размеров.

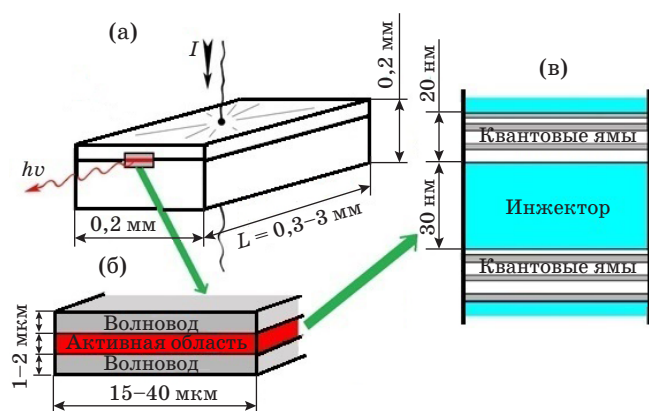


Рис. 7. Типичная конструкция полоскового ККЛ с указанием характерных размеров активного элемента (а), активной области (б) и элементов гетероструктуры (каскада) (в). I — ток накачки, ν — частота излучаемого света [54].

4.3.2. Особенности дизайна гетероструктуры ККЛ для разных областей длин волн в среднем ИК диапазоне

В случае излучений, длины волн которых превышают 5 мкм, состав материалов гетеропары ям и барьеров выбирается таким, чтобы он был решительно-согласованным с подложкой InP, т.е. с той же постоянной решетки (например, твердые растворы $\text{Al}_{0,48}\text{In}_{0,52}\text{As}$ и $\text{In}_{0,47}\text{Ga}_{0,53}\text{As}$). Высота барьера квантовой ямы в этом случае (или разрыв зоны проводимости на гетерогранице) примерно $\Delta E_c \approx 0,52$ эВ. Этого вполне достаточно для реализации работающего при комнатной температуре ККЛ дальнего ИК диапазона, т.е. от 8 до 12 мкм, который представляет интерес для лазерных средств подавления ТПС.

На рабочих длинах волн, меньших 5 мкм, представляющих интерес для создания на базе ККЛ средств противодействия тепловым ГСН, энергия верхнего состояния в квантовой яме возрастает, так что высота барьера для термической активации электронов уменьшается, что способствует их выбросу из квантовой ямы и опустошению верхнего уровня оптического перехода. В непрерывном режиме генерации при комнатной температуре и выше этот процесс ограничивает максимальную рабочую температуру ККЛ. Однако эту проблему можно устранить, если использовать упругосбалансированные (с компенсацией деформации) гетеропары $\text{AlInAs}/\text{GaInAs}$, в которых повышено содержание Al в барьерных слоях и уменьшено содержание In в квантовых ямах. В этом случае используются два твердых раствора, рассогласованных относительно материала подложки в разные стороны [35]. В упругосбалансированных структурах может быть достигнута высота потенциального барьера 0,70–0,80 эВ, предотвращающая утечку электронов посредством их теплового выброса и обеспечивающая устойчивую работу приборов при комнатной и даже более высоких температурах. Все высокоэффективные ККЛ, работающие при комнатной температуре в непрерывном режиме на длинах волн $\lambda \leq 5,2$ мкм [12, 36–40], используют упругосбалансированные наногетероструктуры. Другим важным параметром дизайна гетероструктуры ККЛ, улучшающим температурные характеристики лазера, является разделение энергии между нижним состоянием лазерного перехода (уровень 2 на рис. 6) и основным состоянием инжектора. Как правило, это разделение должно превышать 0,1 эВ, чтобы свести к минимуму вероятность обратного теплового заброса на уровень 2 электронов из инжектора.

В последние несколько лет значительное улучшение характеристик ККЛ (низкий порог и более высокая мощность) было достигнуто за счет введения в дизайн гетероструктуры ККЛ так называемого двойного фононного резонанса [41].

Активная область такого лазера имеет уже четыре квантовых ямы и три энергетических состояния, одинаково удаленных друг от друга на значение энергии оптического фонона 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.

Конечно, существуют и другие конструкции активной зоны ККЛ, однако их анализ выходит за рамки настоящей статьи, тем более что здесь рассмотрена наиболее распространенная на сегодняшний день схема построения ККЛ с вертикальными переходами внутри одной квантовой ямы, при этом уделено внимание основным физическим принципам и явлениям, лежащим в основе работы ККЛ.

4.3.3. Пути увеличения мощности излучения ИК ККЛ

Как следует из сказанного выше, ключевым моментом для возможности применения ККЛ в системах ИК противодействия является повышение мощности лазерного излучения при сохранении его высокого качества. Эта проблема носит самостоятельный характер и заслуживает отдельного рассмотрения, однако ввиду ее важности следует хотя бы кратко остановиться на ней. Рассмотреть все вопросы, касающиеся решения проблемы, связанной с повышением мощности излучения ИК ККЛ и улучшением его качества, в настоящей статье не представляется возможным, поэтому авторы вынуждены ограничиться упоминанием, на их взгляд, наиболее важных оригинальных работ, в которых исследуются эти вопросы.

В качестве основных путей увеличения мощности ИК ККЛ рассматриваются три основных способа (помимо оптимизации дизайна ККЛ и улучшения интенсивности теплоотвода). Первый способ связан с повышением мощности отдельного ККЛ, а его реализация, в первую очередь, зависит от числа периодов в используемой гетероструктуре. Следует отметить, что для создания мощных ККЛ, как правило, необходимо более 60 периодов с несколькими десятками наногетеропар в каждом периоде. Вполне естественно, что для этого требуется высокая прецизионность процесса, так как с ростом числа периодов различие в параметрах соответствующих слоев (например, толщине) может только возрастать. Это, в свою очередь, сведет на «нет» все усилия, затраченные на создание многопериодной структуры [45]. Второй способ связан со сложением пучков от отдельных ККЛ и имеет множество возможных реализаций [44]. Наконец, третий способ повышения мощности связан с использованием монолитной линейки ККЛ с распределенной обратной связью (РОС), интегрирован-

ной с однопроходовыми усилителями для каждого из излучателей (рис. 8).

Кроме того, линейка ККЛ с усилителями бегущей волны (конфигурация «задающий генератор — усилитель мощности») должна быть снабжена устройством для сведения лучей в дальней зоне [15, 40, 41]. Представленное решение лишено недостатков, присущих существующим в настоящее время коммерческим перестраиваемым ККЛ с внешним резонатором. Отметим лишь главные из них. Во-первых, в линейке ККЛ с усилителями бегущей волны отсутствуют подвижные части, что особенно важно для портативных систем, во-вторых, она представляет собой монолитную систему, что упрощает процесс наладки и юстировки. Наконец, при сохранении высокого качества излучения линейка ККЛ с усилителями позволяет более чем на порядок увеличить выходную мощность излучения на каждой из длин волн (рис. 9) при достаточно широкой области перестройки.

Линейка с усилителями бегущей волны подразумевает применение системы совмещения в дальнем поле лазерных пучков от отдельных ее элементов.

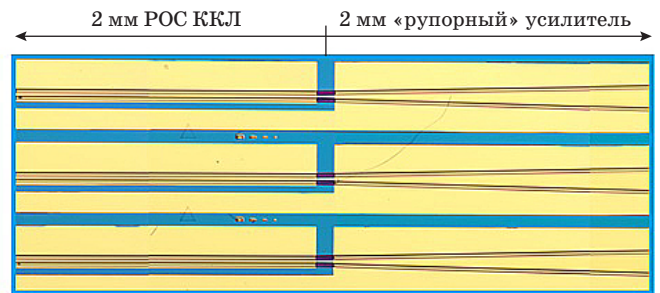


Рис. 8. Монолитная линейка РОС ККЛ лазеров с однопроходовыми усилителями [42].

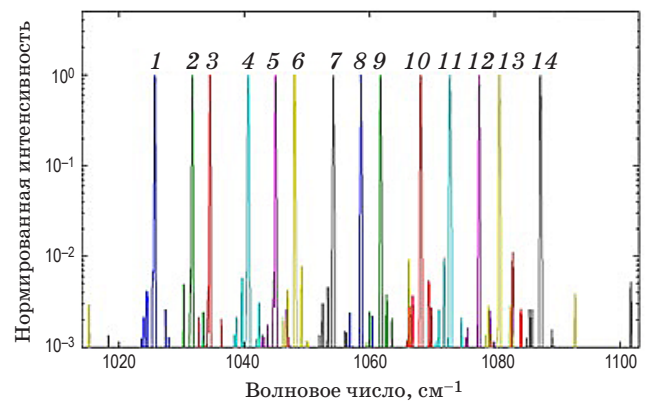


Рис. 9. Спектр излучения линейки ККЛ с усилителями бегущей волны, пиковая мощность линий генерации 4,1 (1), 3 (2), 3,8 (3), 5,5 (4), 3,1 (5), 4,9 (6), 5,7 (7), 6,8 (8), 6,2 (9), 4,3 (10), 6,6 (11), 2,7 (12), 3,9 (13), 4,6 Вт (14). Подавление боковых мод для всех линий — более 20 дБ [43].

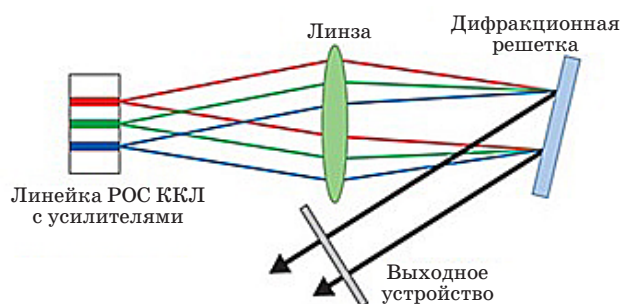


Рис. 10. Схема совмещения лучей от отдельных элементов линейки ККЛ [40].

Один из предлагаемых в литературе способов такого совмещения представлен на рис. 10 и основан на использовании дисперсионного элемента в виде дифракционной решетки.

Что касается качества излучения отдельного ККЛ, то оно, в первую очередь, достигается путем создания одномодовых ККЛ с РОС, улучшением интенсивности теплоотвода и совершенствованием конструкции волновода [48, 50, 52]. Для интегрированных систем в виде линейки с усилителями бегущей волны со сведением пучков от отдельных излучателей важную роль играет также выбранная оптическая схема и качество ее элементов [42].

4.3.4. Основные отличительные особенности ККЛ от биполярных ЛД, свойства излучения ИК ККЛ

Квантово-каскадные лазеры среднего ИК диапазона спектра представляют собой интенсивно развивающуюся прорывную технологию, которая со временем внесет принципиальные изменения в жизнь общества.

Для сравнения с традиционными биполярными ЛД ниже приведены основные отличительные особенности ККЛ:

- униполярные лазеры,
- излучение фотонов в квантово-размерных структурах происходит в результате межподзонных 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 определяется шириной квантовой ямы, а не материалами гетеропары,
- мощность (энергия) излучения при прочих равных условиях зависит от числа каскадов и превышает ее значение у биполярных ЛД (квантовая эффективность более 1),
- ИК ККЛ работают в области среднего и дальнего ИК диапазонов (3,4–25 мкм),
- в области среднего ИК диапазона мощность излучения коммерческих одиночных ККЛ при комнатной температуре в непрерывном режиме ге-

нерации на сегодняшний день достигла значений 3 Вт, а в области дальнего ИК диапазона — 1 Вт,

– в среднем ИК диапазоне ККЛ обладают широким диапазоном плавной перестройки — более 800 см^{-1} ,

– узкая линия генерации ($\delta\nu$): коммерческие ИК ККЛ — $\delta\nu \leq 100\text{ МГц}$ в непрерывном режиме и $\delta\nu \leq 1\text{ см}^{-1}$ в импульсном режиме генерации,

– длительность импульса излучения 40–500 нс при частоте следования от 0,1 до 100 кГц,

– ККЛ представляют собой компактные, высокоэффективные (коэффициент полезного действия более 10%), надежные, стабильные и долговечные полупроводниковые излучатели.

Отмеченные выше особенности ИК ККЛ порождают уникальные свойства их излучения, которые во многом определяют возможность применения ИК ККЛ в системах противодействия:

– в окнах прозрачности атмосферы 3–5 и 8–12 мкм излучение ИК ККЛ распространяется сквозь туман, дымку, дождь и снег с минимальными потерями,

– по сравнению с видимым или ближним ИК диапазонами спектра излучение среднего ИК диапазона более устойчиво к возмущениям в атмосфере,

– длины волн излучения ИК ККЛ попадают в области спектральной чувствительности одноэлементных и матричных фотоприемных устройств, используемых в ИК ГСН и в тепловизионной технике, которые совпадают с окнами прозрачности атмосферы.

5. ВЫВОДЫ

В заключение отметим, что уже сейчас на базе технологии сведения пучков [15, 40, 41, 53] от отдельных лазеров и ККЛ-линеек созданы компактные мультиспектральные ККЛ-системы, суммарная мощность излучения которых превышает 20 Вт [14]. В ближайшем будущем планируется получить такие системы с суммарной мощностью излучения в среднем ИК диапазоне от 100 Вт до 1 кВт [15]. При этом отмечается, что после сведения лазерный пучок будет обладать расходимостью, близкой к дифракционной ($M^2 < 2$), а энергоэффективность таких систем будет составлять 5–10%.

Таким образом, есть все основания полагать, что в недалеком будущем ИК ККЛ займут свою нишу в перспективных компактных мультиспектральных системах ИК противодействия, предназначенных, в первую очередь, для защиты вертолетов и других средств легкой авиации. Во многом это связано также с тем, что в перспективных системах ПЗРК с ИК ГСН будут использоваться мультиспектральные МФПУ, чувствительные в областях 3–5 и 8–12 мкм. Ни один из рассмотренных в работе источников лазерного излучения (газовые лазеры и твердотельные ПГС),

кроме КЖЛ, пока не способен перекрыть этот диапазон спектра, обладая при этом компактностью, энергоэффективностью и высокой мощностью излучения.

Что касается подавления ТПС, работающих в диапазоне длин волн 8–12 мкм, то на сегодняшний день для решения этой задачи кроме модульных КЖЛ-систем, использующих технологию сведения пучков в дальнем поле, так же пока не видно эффективных компактных источников излучения.

Важным преимуществом ИК КЖЛ, излучающих в областях 3–5 и 8–12 мкм, является тот факт, что при их производстве используется не только одинаковое оборудование для изготовле-

ния гетероструктур, но и проводится одинаковая в основных чертах постростовая обработка, а также и идентичные технологические приемы, направленные на улучшение их параметров.

Необходимо отметить еще один важный вывод, полученный в результате проведенного анализа опубликованных результатов исследований. Для перспективных разработок ИК камер с мультиспектральными МФПУ во избежание проявления нежелательных нелинейных эффектов, препятствующих их насыщению, целесообразно использовать лазеры непрерывного или квазинепрерывного импульсного режима работы с относительно небольшой энергией в импульсе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бутызов В.В. Лазер против ПЗРК // Военное обозрение. 2013. № 8. С. 23.
2. Willers C.J. and Willers M.S. Simulating the DIRCM engagement: Component and system // Proc. SPIE. 2012. V. 8543. P. 85430M-1–16.
3. Schleijsen R.M.A., Heuvel J.C., Mieremet A.L., Mellier B., Putten F.J.M. Laser dazzling of focal plane array cameras // SPIE Florence, Technologies for Optical Countermeasures IV. 2007. V. 6738. P. 67380O.1–67380O.10.
4. Hueber N., Vincent D., Morin A., Dieterlen A., & Raymond P. Analysis and quantification of laser-dazzling effects on IR focal plane arrays // Proc. SPIE. 2010. V. 7660. P. 766042.
5. Doskočil R. and Farlik J. Self-protection of aircraft versus resistance of missile optic seekers // Advances in Military Technology. 2010. V. 5. № 2. P. 5–16.
6. Ericsson A., Steinval O., Sjöqvist L., Lindgren M. Tunable lasers for countermeasures // Literature Survey. FOI-R-0536-SE. 2002.
7. Titterton D. A review of the development of optical countermeasures // Proc. SPIE. 2004. V. 5615. P. 1–15.
8. Titterton D. Requirements for laser devices used in countermeasure applications // Proc. SPIE. 2005. V. 5989. P. 67–80.
9. Schleijsen R.M.A., Heuvel J.C., Mieremet A.L., Mellier B., Putten F.J.M. Laser dazzling of focal plane array cameras // Proc. SPIE. 2007. V. 6543. P. 65431B.
10. Мордвин Н.Н. Подавление работы тепловизионных систем длинноволнового диапазона на основе неохлаждаемой микроболометрической матрицы // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2010. Т. 5. № 1. С. 12–19.
11. Defense Daily // Northrop Grumman: A World Leader in Infrared Countermeasures. http://www.northropgrumman.com/Capabilities/DIRCM/Documents/northrop_grumman_ircm.pdf
12. Lyakh A., Maulini R., Tsekoun A., Go R., Pflügl C., Diehl L., Wang Q.J., Capasso F., and Patel C.K.N. 3 W continuous-wave room temperature single-facet emission from quantum cascade lasers based on nonresonant extraction design approach // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 95. P. 141113-1–3.
13. Takeuchi E., Chapman W., Arnone D., Pushkarsky M., Lopez E., Young M., Caffey D., Borgardt B., Priest A., Sensibaugh J., Day T. High-power, military ruggedized QCL-based laser systems // Proc. SPIE. 2012. V. 8373. P. 71–75.
14. <http://www.pranalytica.com/core-technologies/quantum-cascade-lasers.php>
15. <https://navystp.com/vtm/print?project=N68936-16-C-0027>
16. Поляков С.Ю., Ленкин В.М., Королев С.С., Змиевской Г.А. Пути совершенствования противодействия тепловизионной разведке // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. 2015. Т. 1. № 42. С. 7–15.
17. Зверев Г.М., Левчук Е.А., Колядин С.А., Скворцов Л.А. Исследование процессов разрушения диэлектрических пленок под действием лазерного излучения // Квант. электрон. 1977. Т. 4. № 2. С. 413 – 419.
18. Лопаткин В.Н., Сидорюк О.Е., Скворцов Л.А. Лазерная модуляционная фототермическая радиометрия — новый метод измерения малых поглощений в объеме материалов и покрытиях // Квант. электрон. 1985. Т. 12. № 2. С. 339 – 346.
19. Дж. Рэди. Действие мощного лазерного излучения. М.: Мир, 1974. 468 с.
20. Diehl W.J. Continued optical sensor operations in a laser environment // Maxwell Paper. 2012. № 4. P. 1–37.
21. Durescu A., Fleury D., Goular D., Planchat C., Rommeluere S., Bourdon P. Dazzling sensitivity analysis of a microbolometer array on an infrared laser irradiation breadboard. Paris: OPTRO, 2014. P. 1–13.

22. <http://www.plasmalabs.ru/files/products/lcd.pdf>
23. *Калинцева Н.А., Копыльцов А.В.* Математическое моделирование параметрических преобразователей частоты для среднего ИК-диапазона // Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. 2011. № 138. С. 16–23.
24. *Zawilski K.T., Setzler S.D., Schunemann P.G., Pollak T.M.* Laser damage threshold of single crystal ZnGeP₂ at 2,05 mm // Proc. SPIE. 2005. V. 5991. P. 50–62.
25. *Zhu G.L., Ju Y.L., Zhang C.H., Yao B.Q., Wang Y.Z.* High-power, high-quality ZGP OPO pumped by a Tm,Ho:GdVO₄ laser // Laser Phys. 2010. V. 20. P. 1341–1343.
26. *Peng Y., Wei X., Wang W., & Li D.* High-power 3.8 μm tunable optical parametric oscillator based on PPMgO:ClN // Opt. Commun. 2010. V. 283(20). P. 4032–403.
27. *Chen T., Wei K., Jiang P., Wu B., & Shen Y.* High-power multichannel PPMgIn-based optical parametric oscillator pumped by a master oscillation power amplification-structured Q-switched fiber laser // Appl. Opt. 2012. V. 51(28). P. 6881–6885.
28. *Peng Y., Wei X., Nie Z., Luo X., Peng J., Wang Y., & Shen D.* High-power, narrow-bandwidth mid-infrared PPMgIn optical parametric oscillator with a volume Bragg grating // Opt. Exp. 2015. V. 23(24). P. 30827–30832.
29. *Shang Y., Xu J., Wang P., Li X., Zhou P., & Xu X.* Ultra-stable high-power mid-infrared optical parametric oscillator pumped by a super-fluorescent fiber source // Opt. Exp. 2016. V. 24(19). P. 21684–21692.
30. *Petrov V.* Progress in 1-μ m pumped mid-IR optical parametric oscillators based on non-oxide nonlinear crystals // IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron. 2015. V. 21(1). P. 193–206.
31. *Schellhorn M., Eichhorn M., Kieleck C., & Hirth A.* High repetition rate mid-infrared laser source // Comptes Rendus Physique. 2007. V. 8(10). P. 1151–1161.
32. *Petrov V.* Frequency down-conversion of solid-state laser sources to the mid-infrared spectral range using non-oxide nonlinear crystals // Progress in Quantum Electronics. 2015. V. 42. P. 1–106.
33. *Piccoli R., Pirzio F., Agnesi A., Badikov V., Badikov D., Marchev G., & Petrov V.* Narrow bandwidth, picosecond, 1064 nm pumped optical parametric generator for the mid-IR based on HgGa₂S₄ // Opt. Lett. 2014. V. 39(16). P. 4895–4898.
34. *Kostyukova N. Y., Boyko A., Badikov V., Badikov D., Shevyrdyaeva G., Panyutin V., & Petrov V.* Widely tunable in the mid-IR BaGa₄Se₇ optical parametric oscillator pumped at 1064 nm // Opt. Lett. 2016. V. 41(15). P. 3667–3670.
35. *Vainio M. & Halonen L.* Mid-infrared optical parametric oscillators and frequency combs for molecular spectroscopy // Physical Chemistry Chemical Physics. 2016. V. 18(6). P. 4266–4294.
36. *Faist J., Capasso F., Sivco D.L., Sirtori C., Hutchinson A.L., and Cho A.Y.* Quantum cascade laser // Science. 1994. V. 264. P. 553–556.
37. *Rauter P. and Capasso F.* Multi-wavelength quantum cascade laser arrays // Laser Photonics Rev. 2015. V. 9(5). P. 452–477.
38. *Vitiello M.S., Scalfari G., Williams B., and Natale P.* Quantum cascade lasers: 20 years of challenges // Opt. Exp. 2015. V. 23(4). P. 5167–5182.
39. *Razeghi M., Bandyopadhyay N., Bai Y., Lu Q., and Slivken S.* Recent advances in mid infrared (3–5μm) quantum cascade lasers // Opt. Mat. Exp. 2013. V. 3(11). P. 1872–1884.
40. *Goyal A., Pfluegl C., Diehl L., Belkin M., Sanchez-Rubio A., Capasso F.* Wavelength beam combining of quantum cascade laser arrays // Patent US 2012/0033697 A1. 2011.
41. *Lee B.G., Kansky J., Goyal A.K., Pflugl C., Diehl L., Belkin M.A., Sanchez A., Capasso F.* Beam combining of quantum cascade laser arrays // Opt. Exp. 2009. V. 17(18). P. 16216–1662.
42. *Goyal A., Myers T., Wang C.A., Kelly M., Tyrrell B., Gokden B., Sanchez A., Turner G., and Capasso F.* Active hyperspectral imaging using a quantum cascade laser (QCL) array and digital-pixel focal plane array (DFPA) camera // Opt. Exp. 2014. V. 22(12). P. 1432–1401.
43. *Rauter P., Menzel S., Goyal A.K., Wang C.A., Sanchez A., Turner G., and Capasso F.* High-power arrays of quantum cascade laser master-oscillator power-amplifiers // Opt. Exp. 2013. V. 21(4). P. 4518–4530.
44. *Mukherjee A., Prasanna M., Mukherjee N.* Optically multiplexed mid-infrared laser systems and uses thereof // Patent US2013/029271 A1. 2011.
45. *Егоров А.Ю., Бабичев А.В., Карачинский Л.Я., Новиков И.И., Никитина Е.В., Тchernycheva М., Софронов А.Н., Фирсов Д.А., Воробьев Л.Е., Пухтин Н.А., Тарасов И.С.* Генерация многопериодных квантово-каскадных лазеров в спектральном диапазоне 5.6–5.8 мкм при токовой накачке // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49(11). С. 1574–1577.
46. *Егоров А.Ю., Брунков П.Н., Никитина Е.В., Пирогов Е.В., Соболев М.С., Лазаренко А.А., Байдакова М.В., Кириленко Д.А., Конников С.Г.* Многопериодные квантово-каскадные наногетероструктуры: эпитаксия и диагностика // Физика и техника полупроводников. 2014. Т. 48(12). С. 1640–1645.

47. Бабичев А.В., Bousseksou A., Пухтин Н.А., Тарасов И.С., Никитина Е.В., Софронов А.Н., Фирсов Л.Е., Воробьев Д.А., Новиков И.И., Карачинский Л.Я., Егоров А.Ю. Генерация квантово-каскадных лазеров на длине волны излучения 5.8 мкм при комнатной температуре // Физика и техника полупроводников. 2016. Т. 50(10). С. 1320–1324.
48. Razeghi M. High-power high-wall plug efficiency mid-infrared quantum cascade lasers based on InP/GaInAs/InAlAs material system // Proc. SPIE. 2009. V. 7230. P. 723011–14.
49. Maulini R., Lyakh A., Tsekoun A., Go R., Pflügl C., Diehl L., Capasso F., and Patel C.K.N. High power thermoelectrically cooled and uncooled quantum cascade lasers with optimized reflectivity facet coatings // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 95. P. 151112-1–3.
50. Troccoli M., Diehl L., Bour D.P., Corzine S.W., Yu N., Wang C.Y., Belkin M.A., Hofler G., Lewicki R., Wysocki G., Tittel F.K., Capasso F. High-performance quantum cascade lasers grown by metal-organic vapor phase epitaxy and their applications to trace gas sensing // J. Lightw. Technol. 2008. V. 26. P. 3534–3555.
51. Lyakh A., Pflügl C., Diehl L., Wang Q.J., Capasso F., Wang X. J., Fan J. Y., Tanbun-Ek. T., Maulini R., Tsekoun A., Go R., and Patel C.K.N. 1.6 W high wall plug efficiency, continuous-wave room temperature quantum cascade laser emitting at 4.6 μm // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 92. P. 111110-1–3.
52. Hofstetter D., Beck M., Aellen T., Faist J. High-temperature operation of distributed feedback quantum-cascade lasers at 5.3 μm // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 78. P. 396–398.
53. Rauter P. and Capasso F. Multi-wavelength quantum cascade laser arrays // Laser Photonics Rev. 2015. V. 9. № 5. P. 452.
54. Засавицкий И.И. Квантовые каскадные лазеры // XII Всерос. молодежная конкурс-конф. по оптике и лазерной физике. Самара, 12–16 ноября 2014 г. URL: <http://www.myshared.ru/slide/968796/> (дата обращения 07.08.16).