

УДК 622.232.8:621.384.3.01:531.714.2

## Квантово-каскадные лазеры и их применение в системах обеспечения безопасности и связи

Волков В. Г.

**Целью работы** является описание современного уровня разработки квантово-каскадных лазеров (ККЛ), их характеристик и возможностей, а также оценка целесообразности применения ККЛ в системах обеспечения безопасности и связи. **Используемый метод исследования** – методика расчета дальности распознавания и целеуказания в тепловизионные приборы (ТВП), выполненные на основе матриц микроболометров, при совместной работе ТВП с ККЛ. **Новизна:** впервые рассматривается вопрос применения ККЛ в системах обеспечения безопасности и связи. **Результаты работы:** создание ТВП с инфракрасными (ИК) осветителями или целеуказателями на основе ККЛ в стационарном, мобильном, переносном и портативном (наголовном) исполнении обеспечивает сохранение дальности распознавания и целеуказания в ТВП при падении уровня температурного контраста объекта с фоном не менее чем в 10 раз по сравнению с нормированной его величиной. Применение ККЛ на основе конкретных примеров приводит к созданию систем круглосуточного и всепогодного действия, в том числе универсальных прицельных комплексов, комбинированных ИК осветителей-целеуказателей, лазерных дальномеров и измерителей скорости. Применение ККЛ в системах досмотра на основе использования Т-лучей позволит работать в области спектра до 300 мкм и создать переносную и портативную аппаратуру. Применение ККЛ в лазерных атмосферных системах связи позволяет обеспечить их всепогодность. Аналогичные известные публикации по данным вопросам отсутствуют. **Практическая значимость:** результаты работы могут быть использованы для создания приборов наблюдения, прицеливания, вождения патрульных автомашин, прицеливания и целеуказания, точного измерения дальности и скорости всепогодного и круглосуточного действия в интересах служб безопасности и ГИБДД, а также всепогодных систем атмосферной лазерной связи. **Перспективы дальнейшего развития результатов работы** – применение в приборах более мощных ККЛ с мощностью более 100 Вт в непрерывном и в импульсном режиме при комнатной температуре, обеспечение высокого к.п.д. ККЛ при работе в непрерывном режиме свыше 30%, создание коротковолновых ККЛ для области спектра 2-4 мкм, заполнение пробела 20-70 мкм в рабочем диапазоне длин волн ККЛ, повышение мощности излучения терагерцовых ККЛ и обеспечение их работы при термоэлектрическом охлаждении. **Выводы:** новое поколение приборов для систем обеспечения безопасности и связи позволяет устранить известный недостаток ТВП – резкое снижение их дальности при пониженных температурных контрастах объекта с фоном, а для систем измерения дальности, скорости и атмосферной связи – обеспечить их круглосуточную и всепогодную работу.

**Ключевые слова:** квантово-каскадный лазер, рабочая область спектра, мощность излучения, эффективность, терагерцовый диапазон длин волн, системы безопасности, атмосферная связь, дальность, скорость, точность измерения, угол поля зрения.

### Актуальность

В настоящее время интенсивно развивается новое и перспективное направление квантовой электроники – квантово-каскадные лазеры (ККЛ). Их уникальные свойства нашли целый ряд применений в современной науке и технике. В связи с этим представляется целесообразным рассмотреть возможности ККЛ и их применение в системах обеспечения безопасности и связи.

## Появление ККЛ

Появлению ККЛ (QCL – quantum cascade laser) предшествовал целый ряд исследований. В 1971 г. впервые Казариновым Р. А., Сурисом Р. А. была предложена идея использовать внутренние минизонные переходы и туннелирование для каскадного усиления света [1]. Эта идея определяла возможность создания ККЛ на оптических переходах между подзонами одной энергетической зоны. В качестве излучающего материала исследователи из Принстонского университета использовали много слоев полупроводника толщиной всего в один атом. Во время испытаний ученые обнаружили, что их устройство испускает не один луч, а два с различными длинами волн. При этом у второго луча обнаружились новые свойства [2–26]. Во-первых, оказалось, что два луча "конкурируют". При увеличении силы тока мощность обычного луча возрастала, в то время как второй ослабевал. Во-вторых, при росте температуры до определенного значения мощность второго луча увеличивалась, в то время как у обычных лазерных диодов она уменьшается [4]. Преимуществами ККЛ являются более низкое по сравнению с современными аналогами энергопотребление, а также более высокая температура работы. В настоящее время исследователи работают над схемой, которая позволила бы "отсекать" первое излучение, добившись появления луча только второго типа [4].

## Классификация ККЛ и их основные свойства

Классификация ККЛ основана на их различии по типу соединения, по типу сверхрешетки и по типу активной области [2, 3]. По типу соединения различают ККЛ на основе AlInAs/GaInAs, GaAs/AlGaAs, InAs/AlSb, Si/SiGe, InGaAs/InGaP, InGaAs/AlAs. По типу сверхрешеток различают структуры ККЛ с плавно меняющимся периодом, с двойным оптическим резонансом, на переходах уровень – минizona. По типу активной области (легированной или нелегированной) различают структуры с одной квантовой ямой (КЯ), с двумя КЯ, с тремя КЯ [2, 3]. ККЛ – униполярный прибор, обеспечивающий излучение фотонов при межзонных переходах. В ККЛ каждый электрон излучает  $N_p$  фотонов ( $N_p$  – число каскадов). В обычном полупроводниковом лазере происходит рекомбинация электронно-дырочных пар через запрещенную зону полупроводника, не заполненную электронами, с излучением одного фотона. В ККЛ каждый электрон многократно излучает фотон при переходе от одного активного слоя в другой [5, 6]. Число активных слоев толщиной в один атом может быть 1000–2000. В ККЛ происходит генерация излучения, когда электрон перемещается между гетероструктурами полупроводника внутри одной зоны. Эти слои чуть различаются по толщине и разделены слоями другого материала, поэтому разные уровни энергии образуют своего рода «лестницу», с которой электрон и «спускается», излучая фотон на каждой «ступени» [7–10]. Частота генерации задается путем подбора толщины слоев и перестраивается с помощью приложенного напряжения [9]. Второй луч в ККЛ реабсорбирует (т.е. поглощает) только 10% выпущенных фотонов по сравнению с первым лучом. Это определяет высокую эффективность ККЛ, в особенности при высоких рабочих температурах. Благодаря этому возможна

генерация в ККЛ длинноволнового инфракрасного (ИК) излучения при высоких температурах [10]. Рабочая температура ККЛ значительно превышает комнатную – доходит до 400 К, а характеристическая температура может достигать 500 К [7]. Особенно большую мощность излучения ККЛ генерируют в области спектра 4–5 мкм: до 5 Вт в непрерывном и 120 Вт в импульсном режиме при 300 К. Для одномодовых ККЛ типичная мощность излучения составляет около 0,1 Вт, хотя в отдельных случаях может быть на порядок выше. К.п.д. «от розетки» ККЛ с большим числом каскадов при низких температурах может превышать 50% [7]. Основные параметры типичных ККЛ приведены в приложении 1, внешний вид активной среды ККЛ показан на рис. 1 [2, 4], на рис. 2 – структура ККЛ [2]. Внешний вид типичных ККЛ – на рис. 3–6 [26–29].

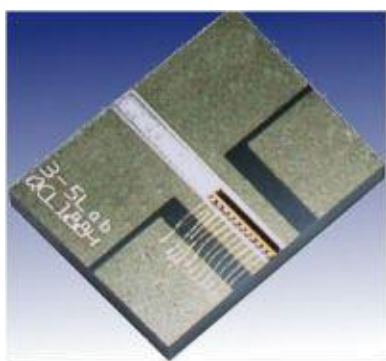


Рис. 1. Активная среда ККЛ

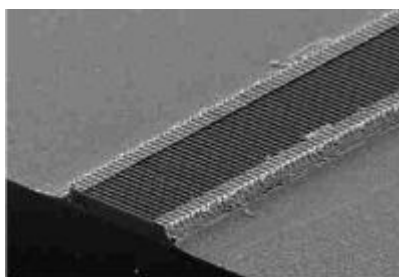


Рис. 2. Структура ККЛ

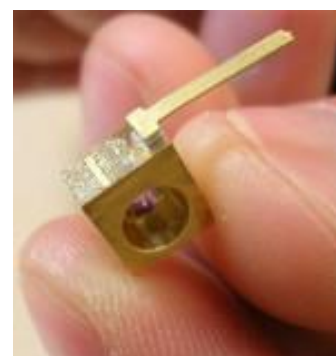


Рис. 3. Внешний вид ККЛ фирмы Frankfurt Laser Company

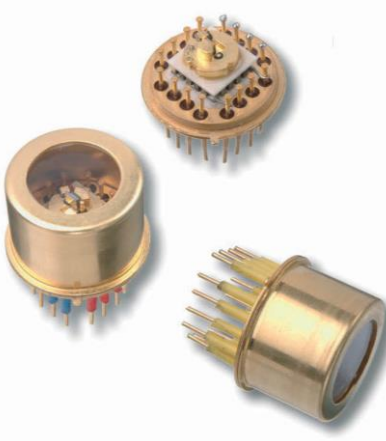


Рис. 4. Внешний вид ККЛ фирмы Азимут Фотоникс



Рис. 5. Внешний вид ККЛ фирмы Hamamatsu



Рис. 6. Внешний вид ККЛ фирмы Wlaser. Co.

### Рабочий спектральный диапазон ККЛ

ККЛ могут работать в ИК области спектра от 2,7 мкм до 300 мкм [2, 3]. При этом ККЛ на основе AlInAs/GaInAs излучают в области спектра 3,6-100 мкм, а ККЛ на основе Si/SiGe – в области спектра 7,5-9,5 мкм. Рабочая область спектра ККЛ на основе GaAs/AlGaAs простирается от 8 мкм до 300 мкм. Область генерации определяется в основном толщинами квантово-размерных слоев, уровнем легирования, а также высотой потенциальных

барьеров в зоне проводимости. Использование последовательности узкозонных и широкозонных содинений на основе InAs/AlSb позволяет увеличить высоту потенциальных барьеров в зоне проводимости до  $\approx 2$  эВ. Это перспективно для создания коротковолновых ККЛ, работающих в области спектра 2–5 мкм. Альтернативными соединениями для создания коротковолновых ККЛ являются также структуры на основе InGaAs/InGaP, выращенные на подложке GaAs, а также InGaAs/AlAs. Хотя ККЛ излучают в средней и дальней ИК областях спектра, между ними существует спектральная область, в которой ККЛ не работают [11]. Перестройка длины волны в ККЛ с распределенной обратной связью (РОС ККЛ) может обеспечиваться в пределах 10–20 см<sup>-1</sup>, а при использовании внешнего дисперсионного резонатора – от 100 до 500 см<sup>-1</sup> [7].

### Работа ККЛ в терагерцовой области спектра

Особо следует остановиться на работе ККЛ в терагерцовой области спектра. Строго говоря, такое название, принятое в литературе, не совсем корректно. Ведь терагерцовый диапазон простирается от ультрафиолетовой до дальней инфракрасной области спектра. В современной литературе под терагерцовым диапазоном понимают только дальнюю ИК область спектра (1 – 30 ТГц). Тем не менее, сохраним здесь такую терминологию вследствие того, что она является общепринятой. Терагерцовые волны (Т-лучи) отражаются от металлов, но проникают через пластмассу, бумагу, сухую древесину, камень, одежду, керамику, тело человека, любые мутные среды и мелкодисперсные материалы из-за резкого подавления рэлеевского рассеяния. В терагерцовом диапазоне лежат вращательные спектры многих органических молекул, включая колебания биологически важных коллективных мод и белков, а также фоновые резонансы кристаллических решеток. Т.к. эти лучи поглощаются поразному молекулами различных веществ, то их можно использовать для определения каждой составляющей вещества в отдельности [12, 13]. Это позволяет развивать новые методы спектроскопии биологических и полупроводниковых структур. С помощью терагерцового диапазона можно управлять химическими реакциями и манипулировать электронными постоянными в КЯ [12]. В отличие от рентгеновских лучей Т-лучи не опасны, т.к. не производят ионизацию среды и повреждение биологических молекул. Это позволяет производить безвредную для человека диагностику, в том числе раковых опухолей, глубины и степени ожогов. Т-лучи перспективны для беспроводной коммутации компьютеров и периферийных устройств внутри зданий, разработки системы безопасности на основе видения (досмотра) с помощью Т-лучей [12]. Теоретически и экспериментально исследованы структуры ККЛ терагерцового диапазона, выполненные на основе GaAs/Al<sub>0,15</sub>Ga<sub>0,85</sub>As, в которых инверсия населенностей возникает за счет испускания оптического фонона. Продемонстрировано использование ККЛ диапазона 3 ТГц для регистрации сигнала примесной проводимости в магнитном поле объемного n-GaAs и напряженной гетероструктуры p-Ge/Ge-Si [2, 3]. ККЛ прочно заняли нишу компактных когерентных перестраиваемых источников излучения терагерцового диапазона. Прецизионное регулирование таких



параметров, как толщина и уровень легирования слоев, позволяет создать ККЛ с новыми функциональными возможностями и улучшенными характеристиками.

### Основные конструкции ККЛ

Рассмотрим различные конструкции ККЛ. Начнем с ККЛ с резонатором Фабри-Перо [16] (рис. 3) [2]. Данный вид лазера – самый простой из ККЛ. Сначала изготавливают оптический волновод из квантово-каскадных материалов для формирования активной среды. Концы прозрачного полупроводника скалываются, чтобы сформировать два параллельных зеркала на обоих концах волновода, таким образом формируя резонатор Фабри-Перо. Остаточного отражения на сколотых краях полупроводника (на воздухе) достаточно, чтобы создать резонатор. ККЛ с резонатором Фабри-Перо способны выдавать большие мощности, но обычно в многомодовом режиме при большом токе. Экономичные Фабри-Перо лазеры имеют многомодовый спектр излучения с полушириной около 30 нм, которая является исключительно подходящей для обнаружения составляющих жидкостей или для линий спектра поглощения газов в области их одинокого расположения, т. е. свободной от линий поглощения других газов. Длина волны может быть изменена в основном за счет изменения рабочей температуры ККЛ. ККЛ с распределенной обратной связью (РОС лазеры или DFB – distributed feedback laser). Это – лазер, резонатор которого состоит из активной среды, включающей в себя периодическую структуру. Вследствие этого в ней возникает брэгговское отражение, реализующее распределенную обратную связь. РОС лазер похож на лазер с резонатором Фабри-Перо, похож на лазер Фабри-Перо, но в них встроены брэгговские диэлектрические зеркала на поверхности волновода, чтобы предотвратить излучение на ненужных длинах волн. Это позволяет лазеру работать в нужном режиме, даже при высоких рабочих токах. РОС лазеры могут быть настроены главным образом за счет изменения температуры, но интересный вариант по перестройки длины волны можно получить в импульсном режиме работы лазера. В этом режиме длина волны лазера быстро изменяется в течение импульса (так называемый «чирп», или по-русски, щебетание). Это позволяет производить быстрое сканирование некоторой спектральной области в течение импульса [16]. В ККЛ с внешним резонатором квантового каскада структура служит в качестве активной среды лазера. Одна или обе грани волновода имеют антибликовое покрытие, которое предотвращает формирование резонатора между гранями кристалла. Зеркала потом встраиваются во внешний резонатор. На рис. 7 представлена схема ККЛ в конфигурации Литтрова (Littrow) с внешним резонатором, включающим дифракционную решетку [2].

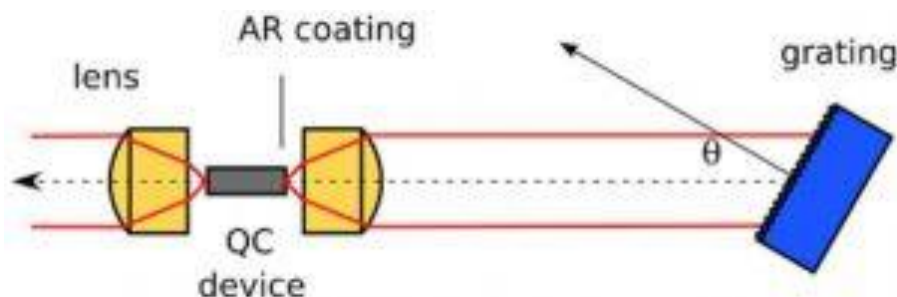


Рис. 7. Схема квантово-каскадного лазера в конфигурации Литтрова (Littrow) с внешним резонатором: lens – объектив, QC device – квантово-каскадный лазер, AR (anti-reflective) coating – антиотражающее покрытие, grating – дифракционная решетка

Если частотно-селективный элемент включен во внешний резонатор, то возможно получить одноволновую генерацию. Например, с использованием дифракционной решетки можно создать лазер, перестраиваемый более чем 15% от центральной длины волны генерации [16].

### Основные направления и перспективы развития ККЛ

В настоящее время разработка ККЛ ведется по следующим основным направлениям [2]:

- исследование физики внутризонных переходов в униполярных ККЛ на сверхрешетках;
- получение генерации на резонансной частоте в полупроводниковых квантоворазмерных гетероструктурах, излучающих одновременно две длины волны;
- исследование междузонной генерации в узкозонных гетероструктурах и физики биполярных структур ККЛ на сверхрешетках.

Важнейшие результаты разработки ККЛ [7]:

- изменение рабочей длины волны в широкой области спектра 2,7–24 мкм и 60–300 мкм;
- разработаны одномодовые с распределенной обратной связью (РОС) ККЛ с областью плавной перестройки длины волны 10–20 см<sup>-1</sup>, а для ККЛ с внешним резонатором – до 170 см<sup>-1</sup>; можно увеличить этот диапазон до 500 см<sup>-1</sup> в ККЛ со схемами с усилением уровней и в гетерогенных ККЛ;
- ширина линии излучения составляет менее 100 кГц в режиме свободной генерации и менее 10 кГц при стабилизации;
- униполярная природа ККЛ и эффекты каскадирования приводят к генерации большой мощности излучения при 300 К – более 1 Вт (до 3-5 Вт) в области спектра 4–10 мкм в непрерывном режиме и до 120 Вт в импульсном режиме при к.п.д., составляющем десятки процентов;
- высокая рабочая (до 400 К) и высокая характеристическая (до 500 К) температура;
- высокочастотная модуляция до 100 ГГц;

- возможность генерации коротких импульсов излучения ( $t_{и}=89$  пс, частота 100 МГц) за счет короткого времени релаксации электронов и времени жизни фотонов в резонаторе (около 1–3 пс);
- самосинхронизация мод с частотой биений 13 ГГц;
- срок службы до 2,5 лет (при генерации излучения на длине волны 4,8 мкм).

Перспективы развития ККЛ [7]:

- повышение мощности излучения и к.п.д. – более 100 Вт в непрерывном и в импульсном режиме при комнатной температуре;
- к.п.д. при работе в непрерывном режиме свыше 30%;
- создание коротковолновых ККЛ для области спектра 2 – 4 мкм.

Для применения ККЛ в волоконно-оптических линиях связи требуется длина волны 1,5 мкм, для реализации которой нужно исследовать новые гетероструктуры с большой шириной запрещенной зоны (нитриды, соединения группы II – III), заполнение пробела 20–70 мкм в рабочем диапазоне длин волн ККЛ, повышение мощности излучения терагерцовых ККЛ и обеспечение их работы при термоэлектрическом охлаждении, создание КЛ на квантовых точках с низкой плотностью порогового тока (до 10 А/см<sup>2</sup>) и высокой характеристической температурой – до 400 К.

### Основные применения ККЛ

Основные применения ККЛ [7]:

- спектроскопия (разрешение  $\leq 10^{-4}$  см<sup>-1</sup>);
- газоанализ (чувствительность ppm – ppb);
- медицина (дыхательная диагностики, диагностирование опухолей, ожогов и др.);
- гетеродинирование в ИК области спектра;
- интроскопия различных материалов;
- охрана;
- досмотр;
- военные применения (ИК подсвет, ИК буи и маяки);
- секретная связь в свободном пространстве без риска быть обнаруженным;
- ИК целеуказание и измерение дальности;
- тепловидение;
- создание глушителей для ракет с ИК наведением и прочих ИК помех;
- досмотр багажа и людей и др.

### Роль рабочей длины волны ИК лазера при распространении его излучения в атмосфере

С точки зрения влияния ослабления излучения в атмосфере на практике часто используется понятие метеорологической дальности видимости (МДВ)  $S_M$  [30]:

$$S_M = (-\ln K_{\text{пор}}) \alpha_{\Sigma}^{-1}, \quad (1)$$

где  $K_{\text{пор}}$  – пороговый контраст объекта с фоном.

Метеорологическая дальность видимости – расстояние, на котором дальность видения черных объектов на фоне неба определяется только показателем ослабления.

Поскольку  $K_{пор}=0,02$ , то:

$$S_M = 3,91\alpha_{\Sigma}^{-1}. \quad (2)$$

В общем случае ослабление в оптически прозрачной среде можно выразить с помощью закона Бугера [30]:

$$\tau_a = \exp(-\alpha_{\Sigma} l), \quad (3)$$

где  $\tau_a$  – пропускание атмосферы,

$\alpha_{\Sigma}$  – суммарный показатель ослабления, 1/км,

$l$  – длина трассы, км,

$$\alpha_{\Sigma} = \alpha_{п} + \alpha_{мр} + \alpha_{ар}, \quad (4)$$

где  $\alpha_{п}$  – показатель поглощения, 1/км,

$\alpha_{мр}$  – показатель молекулярного рассеяния, 1/км,

$\alpha_{ар}$  – показатель аэрозольного рассеяния, 1/км.

В табл. 2 представлены объемные аэрозольные коэффициенты рассеяния  $\alpha_{ар}$  для лазеров, излучающих на различных длинах волн в дымках, облаках, туманах и дождях [30].

Таблица 2 – Объемные аэрозольные коэффициенты рассеяния  $\alpha_{ар}$  для лазеров, излучающих на различных длинах волн в дымках, облаках, туманах и дождях

Длина волны, мкм	0,63			0,69			0,84			1,06		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Условия	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Дымка, $S_m = 10$ км	0,25	0,38	0,3	0,22	0,37	0,28	0,15	0,35	0,22	0,10	0,33	0,17
Облако или туман, $S_m = 0,2$ км	16	21	19	16	20	20	15	20	19	17	22	20
Дождь интенсивностью $J = 5$ мм/час	0,69			0,69			0,69			0,69		
Длина волны, мкм	1,15			3,39			3,51			10,6		
Условия	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Дымка, $S_m = 10$ км	0,08	0,33	0,16	0,03	0,26	0,08	0,02	0,25	0,07	0,01	0,06	0,02
Облако или туман, $S_m = 0,2$ км	16	20	20	20	31	21	19	30	21	3,0	21	14
Дождь интенсивностью $J = 5$ мм/час	0,69			0,69			0,69			0,69		

Примечания:

1. Условия определяют величину  $\alpha_{ар}$ : 1 – минимальную, 2 – максимальную, 3 – наиболее вероятную.
2. Для дождя интенсивностью  $J = 5$  мм/час для всех длин волн  $\alpha_{ар} = 0,69$ .
3. Приведенные в таблице значения  $\alpha_{ар}$  для длин волн 0,63; 0,84; 1,06; 3,51 мкм одновременно являются и коэффициентами ослабления; для лазеров с другими длинами волн следует учесть еще и коэффициент поглощения.
4. В случае, если  $S_m$  отличается от величин, приведенных в таблице, то значения  $\alpha_{ар}$  следует умножить соответственно на коэффициенты  $10/S_m$  и  $0,2/S_m$ , а для дождя с произвольной интенсивностью  $J$  – на коэффициент  $J/5$ .
5. Прозрачность атмосферы для лазерного излучения рассчитывают по формуле 3, причем  $\alpha_{\Sigma} = \alpha_{ар} + \alpha_{п}$ , где  $\alpha_{п}$  – коэффициент поглощения, км<sup>-1</sup>; этот коэффициент берется из таблицы 3 [30]. Молекулярным рассеянием можно пренебречь.



Таблица 3 – Коэффициенты ослабления поглощения  $\alpha_{\text{п}}$  для различных длин волн лазерного излучения

Длина волны, мкм	0,69 (минимум)	0,69 (максимум)	1,15	3,39	10,6
$\alpha_{\text{п}}$	0,26	1,1	3,0	5,0	0,08

Примечание: данные табл. 3 приведены для влажности  $a=10$  г/м<sup>3</sup>, для другой влажности величины  $\alpha_{\text{п}}$  таблицы следует умножить на  $a/10$ .

На рис. 8 представлена зависимость коэффициента ослабления лазерного излучения в атмосфере в ИК области спектра от ослабления в видимой области спектра для длин волн, мкм: 1–1,06; 2–1,44; 3–1,54; 4–2,1; 5–10,6 [30].

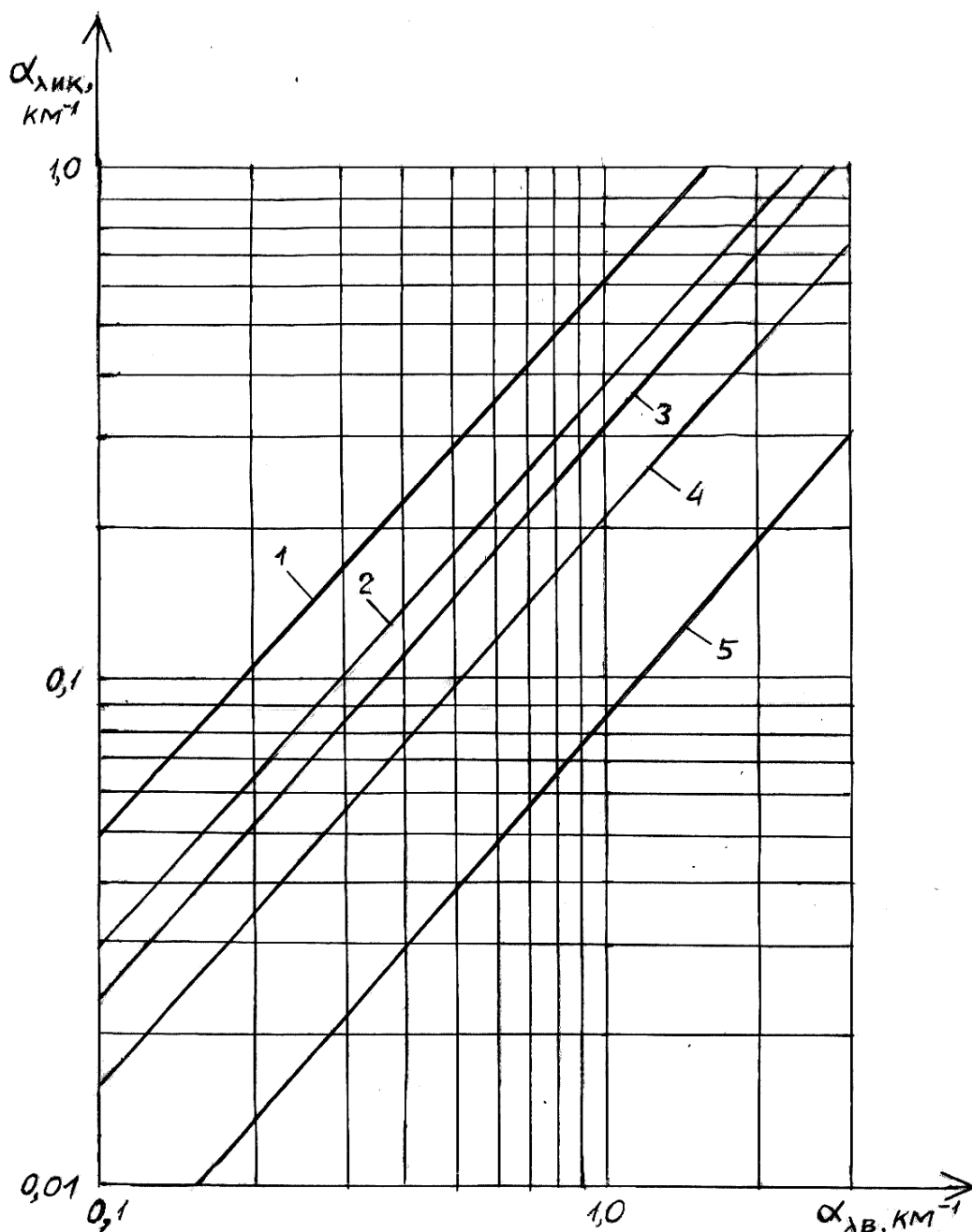


Рис. 8. Зависимость коэффициента ослабления  $\alpha_{\text{ЛИК}}$  лазерного излучения в атмосфере в ИК области спектра от коэффициента ослабления  $\alpha_{\text{ЛВ}}$  в видимой области спектра для длин волн, мкм: 1–1,06; 2–1,44; 3–1,54; 4–2,1; 5–10,6

Из рис. 8 и таблиц 2 и 3 видно преимущество перехода в более длинноволновую ИК область спектра. Это позволяет улучшить условия прохождения лазерного излучения в атмосфере, т.е. расширяется возможность работы оптико-электронных устройств при пониженной прозрачности атмосферы (дымка, туман, дождь, снегопад, пыльная или песчаная буря, дымы и др.).

### **Применение ККЛ в стационарных и мобильных тепловизионных приборах для систем обеспечения безопасности**

В связи с необходимостью работы в условиях пониженной прозрачности атмосферы в системах обеспечения безопасности получили большое распространение тепловизионные приборы (ТВП) наблюдения [30–34]. Они широко используются в системах охраны при работе со стационарных постов и методом патрулирования. ТВП работают в области спектра 3–5 и 8–14 мкм. Это позволяет им функционировать при пониженной прозрачности атмосферы. По тепловому излучению можно с помощью ТВП обнаружить злоумышленников, скрытых в листве кустарников и деревьев. Однако ТВП могут работать только при условии обеспечения достаточно высоких температурных контрастах объекта наблюдения с окружающим объект фоном. Если такой контраст ниже порогового значения, то ТВП теряют работоспособность. Применение дополнительного ИК лазерного осветителя, работающего в рабочей области спектра ТВП, позволяет при подсвете объекта резко повысить его температурный контраст по отношению к фону. Это позволяет обнаружить и распознать злоумышленника при наблюдении со стационарных и мобильных постов охраны. Для мобильных постов это также важно с точки зрения повышения безопасности вождения патрульных автомашин в ограниченных условиях видимости. В самом деле, если поперек дороги (или на пересеченной местности) лежит бревно или камень с низким температурным контрастом по отношению к фону, то возможен наезд и авария. На рис. 9 представлен типичный ТВП FLIR FC серии S для охраны со стационарного поста [33], а на рис. 10 – ТВП PathFindIR с патрульной автомашины [34].



Рис. 9. Типичный ТВП для охраны со стационарного поста

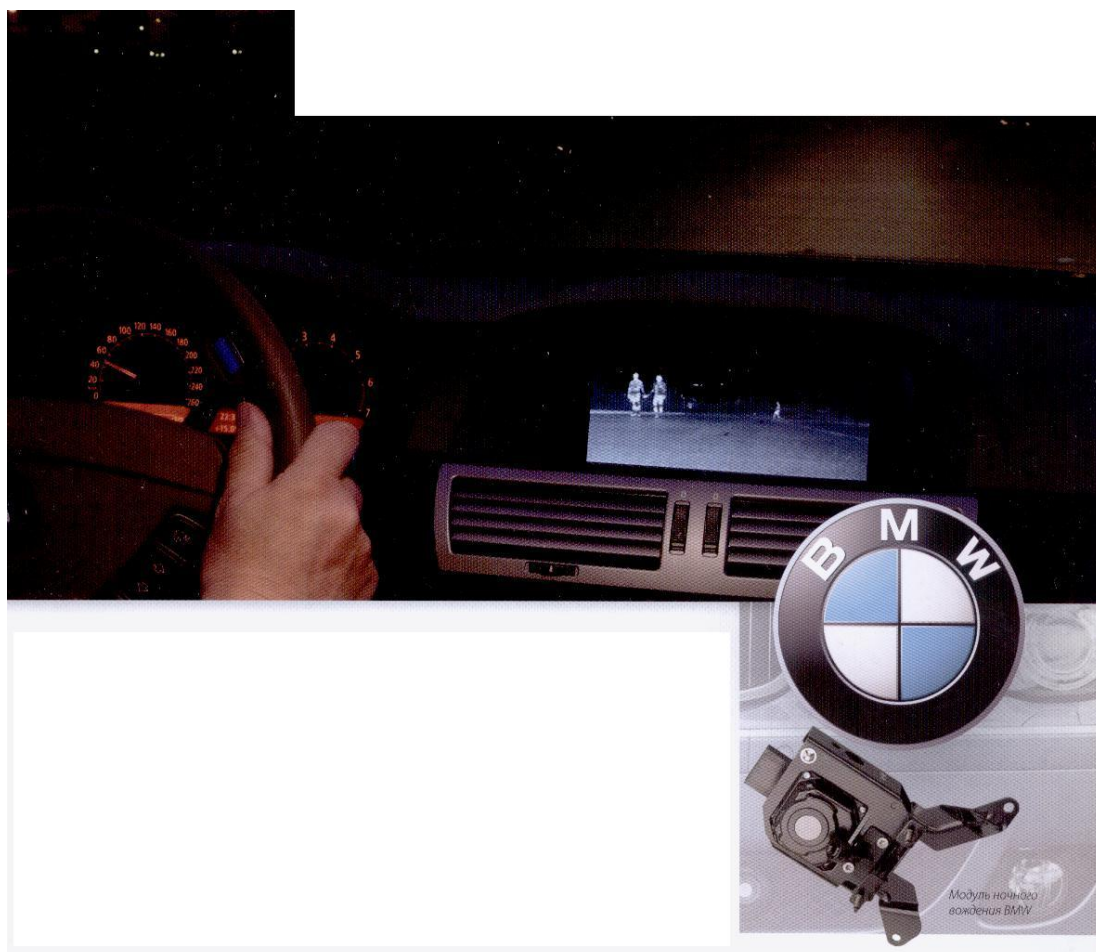


Рис. 10. Типичный ТВП для охраны с патрульной автомашины

ТВП FLIR FC серии S (рис. 9) [33] позволяет обнаружить нарушителей и другие угрозы для безопасности охраняемых объектов в полной темноте и при плохой погоде. В ТВП передача данных и питание осуществляются по одному кабелю. ТВП FLIR FC серии S может быть подключен к любой существующей сети TCP/IP для управления самых различных сетевых устройств, включая персональный компьютер, NVR, смартфон или планшет с использованием программных продуктов FLIR или других производителей. С помощью этого ТВП можно следить за обстановкой по Интернету с любого расстояния. Каналы потокового цифрового видео доступны в форматах H.264, MPEG-4 или MJPEG. ТВП выполнен на базе фокально-плоскостной неохлаждаемой матрицы микроболометров с числом пикселей  $640 \times 480$ . ТВП работает в области спектра  $7,5\text{--}13,5$  мкм при температурной чувствительности менее  $0,05$  К, массе  $1,8$  кг, габаритах  $259 \times 114 \times 106$  мм, энергопотреблении  $5$  Вт при питании от  $24$  В или  $8$  Вт при питании от  $\sim 24$  В. Дальность распознавания ростовой фигуры человека (РФЧ) с характерным размером  $1,8 \times 0,5$  м в нормированных условиях (нормальная прозрачность атмосферы  $\tau_a \geq 0,8$ , температурный контраст объекта с фоном  $\Delta T = 0,5$  К) составляет  $320$  м, а транспортного средства (ТС) с характерным размером  $2,3 \times 2,3$  м –  $950$  м. Угол поля зрения ТВП равен  $18 \times 14^\circ$ . Расчет по методике работы [32] показывает, что при дополнительной установке ИК осветителя на базе ККЛ с длиной волны  $10,3$  мкм, мощностью излучения  $0,2$  Вт и углом подсвета  $5 \times 2,5^\circ$  дальность

распознавания РФЧ в нормированных условиях сохраняется даже при  $\Delta = 0,05$  К.

ТВП PathFindIR (рис. 10) [34] вождения патрульной автомашины также обеспечивает работу в полной темноте и в плохую погоду, делает невозможным ослепление водителя фарами встречных ТС. С помощью этого ТВП обнаружение большинства опасностей в 4 раза выше, чем с помощью обычных фар. ТВП выполнен на базе неохлаждаемой матрицы микроболометров с числом пикселей  $320 \times 240$ . Рабочая область спектра – 8–14 мкм. Угол поля зрения  $24 \times 18^\circ$ . Масса ТВП 0,3 кг при габаритах  $60 \times 86 \times 82$  мм, а электронного блока управления – 0,35 кг и  $148 \times 110 \times 24$  мм соответственно. Энергопотребление составляет 2 Вт (6 Вт с включенным обогревателем) при питании от  $\approx 12$  В. Расчет по методике работы [32] показывает, что при установке ИК осветителя на основе ККЛ с указанными выше параметрами вероятность обнаружения опасностей как при нормальной, так и при пониженной прозрачности атмосферы возрастает с  $P = 0,5$  до  $P = 0,8$  при вероятности пропусков и ложных тревог  $P_{пр} = P_{лт} = 0,01$ .

### **Применение ККЛ в портативных тепловизионных приборах и приборных комплексах для систем обеспечения безопасности**

Для охранников нередко используются тепловизионные ночные монокуляры (ТНМ) и псевдобинокулярные тепловизионные очки ночного видения (ТОНВ), которые можно удерживать в руке, но чаще всего они закрепляются на голове оператора с помощью регулируемого ремennого оголовья либо на шлеме с помощью универсального крепления. Простым поворотом ТНМ или ТОНВ с последующей фиксацией можно осуществить их перевод из рабочего положения в нерабочее или наоборот.

Конкретным примером ТНМ может служить модель МТ-1 фирмы ООО «СОТ» (РФ) (рис. 11) [31]. ТНМ МТ-1 имеет дальность распознавания РФЧ в нормированных условиях 250–300 м, угол поля зрения  $12 \times 9^\circ$ , увеличение 1 крат, температурное разрешение 0,05 К, рабочую область спектра 8–12 мкм, массу 0,4 кг, габариты  $76 \times 76 \times 76$  мм, энергопотребление не более 1,8 Вт при напряжении питания равном 6 В. МТ-1 выполнен на базе неохлаждаемой матрицы микроболометров с числом пикселей  $160 \times 120$ .

Конкретным примером ТОНВ может служить модель ИТТ-2 ЦКБ «Точприбор» (РФ) (рис. 12) [31]. ТОНВ ИТТ-2 имеют дальность распознавания РФЧ в нормированных условиях 300–350 м, угол поля зрения  $22,6 \times 17^\circ$ , температурное разрешение 0,1 К, рабочую область спектра 7–14 мкм, массу 0,35 кг, габариты  $52 \times 75 \times 120$  мм, напряжение питания 6 В. ТОНВ ИТТ-2 выполнены на базе неохлаждаемой матрицы микроболометров с числом пикселей  $384 \times 288$ .

Для приборов МТ-1 и ИТТ-2 при работе «с руки» возможно применение дополнительного ИК осветителя на базе ККЛ с длиной волны 10,3 мкм, мощностью излучения 0,2 Вт, углом подсвета  $8 \times 4^\circ$  и массой 0,08 кг позволяет как показывает расчет по методике работы [32], сохранить указанные выше дальности распознавания РФЧ при  $\Delta T = 0,03$  К.





Рис. 11. Тепловизионный ночной монокуляр (ТНМ)



Рис. 12. Тепловизионные очки ночного видения (ТОНВ)

Для обеспечения работы бойцов спецподразделений необходим ночной универсальный прицельный комплекс. Он служит для ведения прицельной стрельбы из индивидуального стрелкового оружия, чтения карт, вождения ТС, ремонтных работ и др. в условиях низкой освещенности ночью и в сумерках. Его модель «Альфа-1962» ОАО «Швабе – Фотоприбор» [31] содержит ночной монокуляр (НМ) «Альфа-9022», лазерный целеуказатель (ЛЦУ) «Альфа-7115», ИК светодиодный осветитель (ИКСО) «Альфа-8111», афокальную оптическую насадку с увеличением 2,5 крат, устройство зарядное для зарядки аккумуляторов – источников первичного питания НМ, ИКСО, ЛЦУ от напряжения: 12 В; 27 В; ~220 В, 50 Гц. НМ «Альфа-9022» выполнен на основе электронно-оптического преобразователя, работающего в области спектра 0,4–0,9 мкм. НМ «Альфа-9022» крепится с помощью универсального крепления на защитном шлеме. Крепление допускает быстрый перевод НМ из рабочего положения в нерабочее и наоборот. НМ может также крепиться на голове любой формы с помощью оголовья с регулируемыми ремнями. НМ может использоваться и для работы «с руки». В этом случае он комплектуется ИК осветителем «Альфа-8111» на базе ИК светодиода с длиной волны 0,85 мкм и

имеет автономный источник питания. При работе в нормированных условиях ( $\tau_a \geq 0,8$ , уровень естественной ночной освещенности  $3 \times 10^{-3}$  лк) дальность распознавания РФЧ в НМ составляет 200 м. В абсолютной темноте НМ совместно с ИКСО обеспечивает распознавание РФЧ на дальности до 100 м. При установке на объектив НМ афокальной оптической насадки дальность распознавания РФЧ в НМ увеличивается до 300 м при угле поля зрения  $10^\circ$ . НМ имеет регулируемую фокусировку и диоптрийную наводку, а также встроенный ИКСО для работы в закрытом помещении. Мощность излучения этого ИКСО равна 5 мВт при рабочей длине волны 0,85 мкм и угле подсвета  $40^\circ$ , а дальность действия – 10 м. НМ имеет угол поля зрения  $40^\circ$ , увеличение 1 крат, массу 0,35 кг, габариты  $50 \times 70 \times 140$  мм. ИКСО «Альфа-8111» имеет мощность излучения 20 мВт, рабочую длину волны 0,85 мкм, угол подсвета  $8^\circ$ , массу 0,075 кг, габариты  $\varnothing 22 \times 120$  мм. ЛЦУ «Альфа-7115» монтируется на стрелковое оружие и служит для создания на цели светового пятна подсвета, наблюдаемого в НМ. ЛЦУ обеспечивает наблюдение пятна подсвета с постоянной во времени яркостью или мерцающего в зависимости от конкретных условий наблюдения. ЛУЦ выверен по отношению к оси оружия так, чтобы при стрельбе пули попадали в пятно подсвета. Достаточно придать оружию положение, при котором пятно подсвета совпадает с целью – и можно открывать огонь. ЛУЦ «Альфа-7115» имеет мощность излучения 2 мВт, угол подсвета  $1,5'$ , длину волны 0,82–0,85 мкм, массу 0,36 кг, габариты  $120 \times 110 \times 42$  мм. Напряжение питания всех устройств комплекса составляет 2,5–3 В (2 батареи АА-типа). Комплекс по своим техническим характеристикам находится на уровне лучших мировых образцов. Однако он имеет недостаток – невозможность работы при пониженной прозрачности атмосферы. Для устранения этого недостатка НМ «Альфа-9022» должен быть заменен на ТНМ, например, на ТМ-1. В ЛЦУ вместо традиционного инжекционного лазерного полупроводникового излучателя должен быть установлен ККЛ с длиной волны 10,3 мкм при массе ЛЦУ 0,3 кг. Вместо обычной оптики должен быть установлен германиевый ИК объектив. Мощность излучения ККД составляет 3 мВт при угле подсвета  $1,5'$ . В этом случае дальность видения пятна подсвета, как показывает расчет по методике работ [30, 32], в ТНМ составляет 1500 м. ИК осветитель также должен быть выполнен на базе ККЛ с ИК оптикой из германия, с длиной волны 10,3 мкм, мощностью излучения 20 мВт, углом подсвета  $8 \times 4^\circ$ , массой 0,11 кг. Как показывает расчет по методике работы [32], наличие осветителя на базе ККЛ позволяет сохранить дальность распознавания РФЧ при температурном контрасте 0,05 К. ТНМ должен иметь встроенный ИК осветитель на основе ККЛ с длиной волны 10,3 мкм, мощностью излучения 3–5 мВт и углом подсвета  $20^\circ$ . Его дальность действия, как показывает расчет по методике работы [32], составляет 10 м. при температурном контрасте 0,05 К.



Рис.13. Универсальный ночной прицельный комплекс «Альфа-1962»

ЛЦУ может входить в состав комбинированного осветителя-целеуказателя, состоящего из ИК осветителя и собственно ЛЦУ. ИК осветитель служит для обеспечения работы НМ (ОНВ) в темноте, а ЛЦУ – для прицеливания из любого положения оружия. Конкретным примером такого прибора является светодиодный осветитель-целеуказатель «2ИКС-КЛЕЩ + ЛЦУ» с режимом стробоскопа (рис. 14) [35]. Источник света в ИК осветителе – модуль полупроводникового сверх яркого светодиода ИК-диапазона с дальностью не менее 150 метров. ЛЦУ ИК-диапазона имеет длину волны 0,85 мкм и эффективную дальность в темное время суток – 1500 метров. Электропитание осуществляется от двух элементов CR123 с номинальным напряжением 3 В, либо от 4-х никель-кадмиевых аккумуляторов. Время непрерывной работы со стабильным световым потоком от штатных элементов питания (режим постоянного включения) не менее 3 часов. Габаритные размеры: 73×36×46 мм. Масса изделия без элементов питания – не более 165 г. Наличие режима стробоскопа как ИК осветителя, так и ЛЦУ. Возможность дополнительно включить ИК осветитель при уже работающем ЛЦУ. Имеется наличие индикации работы ИК осветителя и ЛЦУ.

Для обеспечения работы данного прибора при пониженной прозрачности атмосферы в нем, как и в комплексе «Альфа-1962», должен быть вместо ИК светодиода и ИК лазерного диода введен ККЛ с длиной волны 10,3 мкм и массой 0,3 кг. Вместо обычной оптики должен быть установлен германиевый ИК объектив. Мощность излучения ККД составляет 3 мВт при угле подсвета 1,5'. В этом случае дальность видения пятна подсвета в ТНМ составляет 1500 м (по расчету по методике работы [36]). ИК осветитель также должен быть выполнен на базе ККЛ с ИК оптикой из германия, с длиной волны 10,3 мкм, мощностью излучения 20 мВт, углом подсвета  $8 \times 4^\circ$ , массой 0,11 кг. Наличие

осветителя на базе ККЛ позволяет, как показывает расчет по методике работы [32], сохранить прежнюю дальность распознавания РФЧ при температурном контрасте 0,05 К.



Рис. 14. Комбинированный осветитель-целеуказатель 2ИКС-КЛЕЩ + ЛЦУ

Такой же ЛЦУ может быть использован для обеспечения посадки вертолета на необходимую площадку при пониженной прозрачности атмосферы. Для этого ЛЦУ, надетый на палец, указывает место посадки, создавая на нем пятно подсвета (рис.15) [30]. При этом оператор, работающий с ЛЦУ, должен иметь ТНМ или ТОНВ, а пилот вертолета – ТОНВ.



Рис. 15. ЛЦУ, надетый на палец, служащий для указания места посадки вертолета в ограниченных условиях видения



### Применение ККЛ в лазерных приборах для измерения дальности и скорости

Для систем безопасности, в том числе для обеспечения безопасности дорожного движения в интересах ГИБДД, используются портативные лазерные дальномеры (ЛД) и измерители скорости. Они выполнены на основе полупроводниковых лазеров, излучающих на длине волны 0,85, 0,9 или 1,55 мкм. ЛД состоят из дневного оптического визира со встроенным фотодиодом для приема лазерного излучения, отраженного от цели, а также из канала лазерного излучателя. В частности, ЛД LRM 2000 (совместное производство канадской фирмы Newcon Optic и ОАО «Швабе-Фотоприбор») (рис. 16) [36], выполненный на основе полупроводникового лазера с длиной волны 0,905 мкм. ЛД измеряет дальность от 20 до 2000 м с точностью  $\pm 1$  м, имеет массу 0,45 кг, габариты 120×123×78 мм, напряжение питания = 9 В. Дневной визир имеет увеличение 7 крат и угол поля зрения 8,2°. ЛД имеет встроенную доплеровскую систему измерения скорости, обеспечивающую ее контроль от 5 до 400 км/ч при точности  $\pm 1$  км/ч. Недостаток ЛД - его неспособность работать в темное время суток и при пониженной прозрачности атмосферы. Для устранения этого недостатка вместо дневного визира рекомендуется установить ТВП с рабочей областью спектра 8–12 мкм, с увеличением 7 крат и углом поля зрения 8×6°. При этом достигается круглосуточная и всепогодная работа, а также возможность видения при воздействии излучения мощных автомобильных фар. Вместо лазерного излучателя с длиной волны 0,905 мкм должен быть установлен ККЛ с длиной волны 10,3 мкм, мощностью излучения в импульсе 5 Вт и угловой расходимостью излучения 1'. При этом, как показывают расчеты по методике работы [30, 32], указанный выше диапазон измерения дальности сохраняется и при пониженной прозрачности атмосферы, а также ночью.



Рис. 16. Портативный лазерный дальномер.

ЛД входит в состав многоканальной системы круглосуточного и всепогодного наблюдения. Примером такой системы может служить система серии HRC Multi-Sensor System (фирма FLIR Systems, США) (рис. 17) [37]. Система предназначена для охраны границ и береговой линии на больших расстояниях. Система может быть выполнена в различных конструктивных конфигурациях. В частности, возможно объединение в конфигурацию ТВП

НРС-Х, дневной длиннофокусной ТВ камеры LR-TV, ЛД, GPS, цифрового магнитного компаса, TCP/IP, надежного опорно-поворотного устройства. В нормированных условиях ТВП НРС-Х обеспечивает дальность обнаружения РФЧ (1,8×0,5 м) 17,5 км, распознавания – 9,2 км, идентификации – 5,3 км. В тех же условиях НРС-Х обеспечивает дальность обнаружения ТС (2,3×2,3 м) 21,6 км, распознавания – 15,1 км, идентификации – 10,5 км. При этом вариообъектив позволяет менять угол поля зрения от 0,5×0,38° (для указанных максимальных дальностей действия) до 6,3×4,7°. ТВП выполнен на базе матричных фотодетекторов на основе InSb или CdHgTe с числом пикселей 64×480 или 640×512. Рабочая область спектра 3–5 мкм. Масса ТВП составляет 12 кг, габариты 564×264×303 мм, энергопотребление 35 Вт (125 Вт с нагревателем) при напряжении питания = 24±4 В.



Рис. 17. Многоканальный комплекс круглосуточного и всепогодного наблюдения

Системы ЛД на (основе активной среды  $Eg + \text{стекло}$ ) с длиной волны 1,54 мкм обеспечивает измерение дальности от 80 до 20000 м с точностью  $\pm 5$  м. Его энергопотребление не превышает 5 Вт при том же напряжении питания, масса составляет 3,5 кг.

Дневная ТВ камера LR-TV выполнена на основе матрицы ПЗС формата  $\frac{1}{2}$  дюйма, работающей в области спектра 0,4–1,1 мкм. Фокусное расстояние объектива камеры меняется от 12,5 мм до 750 мм (при наличии экстендера с увеличением 2 крат – от 25 мм до 1500 мм). При этом угол поля зрения составляет соответственно 0,48°–28,7° (при наличии экстендера – 0,24°–14,4°), минимальная рабочая освещенность 0,02–0,06 лк, масса 10,5 кг при том же напряжении питания.

Опорно-поворотное устройство обеспечивает программируемый поиск и вращение системы по азимуту  $n \times 360^\circ$  со скоростью вращения 0,03–65 град/с, по углу места цели  $\pm 35^\circ$  со скоростью вращения 0,03–30 град/с. Точность устройства составляет 1 мрад, разрешение – 0,1 мрад. Энергопотребление всей системы составляет 55–140 Вт (350 Вт с нагревателем), масса – не более 65 кг.

В данной системе применение ИК осветителя на основе ККЛ с длиной волны 3,9 мкм при мощности его излучения 0,5 Вт, угле подсвета  $1 \times 0,5^\circ$ , массе 5 кг, как показывают расчеты по методике работы [32], создается возможность сохранения указанных выше дальностей действия при  $\Delta T = 0,05$  К.

Применение в ЛД ККЛ вместо активной среды  $Eg + \text{стекло}$  позволяет визуализировать излучение ЛД. При этом ЛД на базе ККЛ будет иметь длину волны 3,9 мкм и мощность излучения в импульсе 200 Вт при частоте 3 Гц. При этом ЛД с длиной волны 3,9 мкм может более эффективно работать при пониженной прозрачности атмосферы по сравнению с длиной волны 1,54 мкм.

Для обеспечения безопасности вождения транспортных средств ГИБДД используют лазерные измерители скорости. В частности, применяется мобильный лазерный измеритель скорости «Луч-М» (рис. 18) [38] с автоматической фоторегистрации факта нарушения скоростного режима и идентификацией ТС. Узконаправленное лазерное излучение исключает измерение скорости двух и более ТС в потоке автомобилей. Информация с датчика передается по Wi-Fi на расстояние до 1 км на удаленный пост. «Луч-М» может работать в любое время суток. Рабочая длина волны – 0,905 мкм, диапазон измерения скорости 0–250 км/ч, дальности 50–300 м, дальности, на которой обеспечивается читаемость государственных регистрационных знаков 80–200 м, среднеквадратическая погрешность измерения скорости 0,7 км/ч, дальности  $\pm (0,3 + 0,001 D)$  м, где  $D$  – дальность. Угол расходимости лазерного излучения составляет  $0,003 \times 0,003$  рад, напряжение питания = 10–14 В. Недостаток прибора – невозможность работы при пониженной прозрачности атмосферы и при воздействии излучения встречных автомобильных фар. Для устранения этого недостатка рекомендуется введение тех же устройств, что и для ЛД LRM 2000.

### Применение ККЛ в системах досмотра

Выше уже говорилось об эффективности применения терагерцового диапазона излучения для досмотра (рис. 19) [12]. Дополнительное использование в такой системе ККЛ, работающего в области спектра до 300 мкм, позволит существенно повысить чувствительность системы. Для системы досмотра на основе Т-лучей использование ККЛ с мощностью излучения до 5 Вт позволит создать не только стационарную, но мобильную и переносную систему досмотра. Поскольку Т-лучи проникают не только сквозь одежду и тело человека, но и другие вещества. Это существенно повышает эффективность досмотра.





Рис. 18. Лазерный измеритель скорости «Луч-М»



Рис.19. Досмотр в терагерцовом диапазоне спектра



## Применение ККЛ в лазерных атмосферных линиях связи

Кроме радиотехнических и волоконно-оптических линий связи в современной технике также получили распространение лазерные атмосферные линии связи. Такая беспроводная оптическая связь более эффективна при ее использовании в охранных системах и других системах обеспечения безопасности, позволяя достигнуть высокой скорости передачи, скрытности канала связи и его недоступность в части определения вида связи. Такая система позволяет организовать канал связи между территориально удаленными сегментами локальной сети (например, соединение отдельно стоящих корпусов предприятия, складских помещений, студенческих городков, объединение локальных сетей банков, медицинских учреждений и др.). Оборудование позволяет с минимальными затратами организовать канал связи через реки и прочие водоемы, железные дороги, автомагистрали, горные районы (ущелья), частные территории и другие участки местности, где прокладка кабельных соединений невозможна или затруднена. Примером лазерной атмосферной системы связи может служить модель M1FE-R, работающая на дальности 1500–7000 м со скоростью передачи информации 131 Мбит/с [39]. Длина волны оптического лазерного канала составляет 0,785 мкм. Бюджет линии на дистанции 1 км составляет 33 дБ, время задержки в оптическом канале менее 0,125 мс, дальность связи при доступности 0,9999 – до 7000 м, частота резервного радиорелейного канала 5,8 ГГц, скорость передачи в резервном канале до 20 Мбит/с, время задержки 5–300 мс. Способ поддержания направления связи – автоматическое наведение, диапазон отработки углов отклонения 50/3 мрад/град, энергопотребление 38 Вт при напряжении питания ~ 90–260 В или  $(48 \pm 15\%)$  В. Масса, кг/габариты, мм оптического блока 13/555×475×225, интерфейсного блока 2,5/450×280×40, радиоблока 3/300×300×50, длина кабеля менее 100 м. В данной системе автоматическая наводка приемо-передающих модулей друг на друга в процессе настройки и эксплуатации беспроводного канала связи осуществляется с точностью 0,08 мрад. Это повышает бюджет лазерной атмосферной линии связи (что особенно важно на дистанциях более 500 м), увеличивает надежность беспроводного канала, одновременно снижая требования к стабильности опоры и обслуживающего оборудования. Предусмотрена защита от солнечной засветки и автоматическая регулировка мощности лазерного излучателя, что увеличивает ресурс системы до  $10^5$  часов. Аэродинамический защитный кожух защищает блоки системы от перегрева или препятствует набиванию снега в передающие и приемные объективы. Недостаток лазерной системы – резкое падение дальности действия при ухудшении прозрачности атмосферы. В связи с этим замена лазерного излучателя с длиной волны 0,785 мкм на ККЛ с длиной волны 10,3 мкм при его мощности излучения 0,2 Вт позволит обеспечить работу системы и при пониженной прозрачности атмосферы без снижения дальности действия. В приемной части системы, как и во всех подобных устройствах с применением ККЛ, должно быть установлено фотоприемное устройство (на базе CdHgTe или микроболометров), чувствительное к длине волны ККЛ.

Современные атмосферные системы связи (рис. 20) работают на длинах волн 0,785, 0,83 или 1,55 мкм.



Рис. 20. Лазерная атмосферная система связи

Переход к использованию в таких системах ККЛ работающего на длине волны 10,6 мкм, как показывают расчеты по методике работы [30], позволит использовать такую систему связи круглосуточно и в условиях пониженной прозрачности атмосферы.

### Заключение

Приведенные примеры не охватывают, конечно, всех направлений использования ККЛ в системах обеспечения безопасности и связи. Однако они наглядно характеризуют возможности ККЛ с точки зрения создания систем круглосуточного и всепогодного действия.

Таблица 1 – Основные параметры типичных ККЛ

№ п/п	Рабочая длина волны, мкм	Мощность излучения, Вт, в непрерывном/ импульсном режиме	Рабочая температура	Пороговая плотность тока, кА/см <sup>2</sup>	Рабочий ток, А	Рабочее напряжение, В	Размеры излучателя (ширина тела свечения, мкм, длина резонатора, мм)	К.П.Д. (Эффективность), %	Источник информации, примечание
1	~ 4,4	-/2,1	30°C		6	10 - 20			[10] фирма Alpen Lasers
2	4,3	-/2,1	78 К		6	10 - 30			-«-
3	4,47	-/2,1	300 К		6	30			-«-
4	5,2	-/3,1	190 К		До 2	До 30			-«-
5	5	-/5	280 К					До 33	-«-
6	6	>1,1/-	200 К						[10] фирма Illinoic M
7	6	0,64/-	295 К					(65)	[10] фирма Razagtu
8	6	0,17/-	15°C		1,5	1,5			[10] фирма Razagtu
9	8,4	0,204/-	300 К		0,9				[10] фирма Harvard + Agilent (США)
10	4,8	0,038 (60°C)/- 0,17 (15°C)/-	До 60°C	1,1	До 0,8	До 12		1,5	[10] РОС ККЛ
11	4,57	0,02/-	10 - 20°C		1				[19] Фирма ЮЕ Интернейшнл, диапазон перестройки ±1 см <sup>-1</sup>
12	7,73	0,02/-	10 - 20°C		1				[19]
13	7,82	0,02/-	10 - 20°C		1				[19]
14	7,1	1,4/1,2	293 К		2,3	12,3		10 (нр) 19 (ир)	[20], t <sub>и</sub> = 500 нс
15	14	-/0,336 -/0,13 -/0,06	300 К 80 К 300 К	2				20 (t <sub>и</sub> = 1 мкс, F = 200 кГц) 5 (t <sub>и</sub> = 0,5 мкс, F = 100 кГц)	[21] t <sub>и</sub> = 500 нс
16	~4,55	0,01 – 0,02/-	128 – 303 К		0,11 – 0,18	15			[22] F = 100Гц
17	4,7 – 5,6 7,3	0,015/- 0,32/-	48 - 60°C 25°C	1	1		10; 1		[23]
18	10,3	-/0,6	300 К		До 4	12			[24] t <sub>и</sub> = 160 нс
19	4,7	-/4,5	283 К		До 1,8	14	7,5; 3		[25] срок службы 2x10 <sup>3</sup> часов
20	7,26	1,5/-	300 К		До 3,5				[26] θ <sub>1</sub> =17,6°, θ <sub>2</sub> =25,6°
21	105,3 – 114,6	-/0,028	200 К	1	До 1,6				[27] F = 2,6 – 2,85 ТГц
22	14	0,366	300 К (190 – 310 К)	2			-; 2,8		[9] 6 КЯ, 70 каскадов,
23	4,9	-/16	298 К		3,3	16		27	[9] 70 каскадов
24	4,6	-/14,5	300 К		2	10			[9]

№ п/п	Рабочая длина волны, мкм	Мощность излучения, Вт, в непрерывном/ импульсном режиме	Рабочая температура	Пороговая плотность тока, кА/см <sup>2</sup>	Рабочий ток, А	Рабочее напряжение, В	Размеры излучателя (ширина тела свечения, мкм, длина резонатора, мм)	К.П.Д. (Эффективность), %	Источник информации, примечание
25	9	-/4,5, -/2	300 К			100	10; 3	16 (70) 10	[9]
26	4,9	5,1/-	383 (298 – 373) К				8; 5	21 (нр) 27 (ир)	[9]
27	4,45	-/120	298 К				400, 3		[9] $t_n = 200$ нс
28	4,6	7,3/-	80 К				12,5; 5	30	[9]
	9	2/-	300 К						
29	4,8	2,4/-	298 К			1 – 1,7	8; 5	> 50	[9] перестройка в диапазоне 2084 – 2088 см <sup>-1</sup>
30	~ 4,5		≤ 100 К				14; 3	40 - 50	[9] 43 каскада
31	~ 5		40 К				6; 2	53	[9] 80 каскадов
32	2,6	0,26/-	80 К	5,5					[9] InAs/AlSb на подложке InAs
33	3,1	0,12/-	80 К	3,5					[9] Композиция КЯ и барьера In <sub>0,73</sub> Ga <sub>0,27</sub> /AlAs(sb)/InP
34	3,3	-/3,5	300 К	3,5					[9] In <sub>0,73</sub> Ga <sub>0,27</sub> /AlAs(sb)/InP, [9] Без Sb, но с AlAs! In <sub>0,72</sub> Ga <sub>0,28</sub> As/In <sub>0,52</sub> Al <sub>0,08</sub> As-AlAs/InSb
35	3,6	0,05/0,05	266 К						[9] 35 каскадов, $t_n = 300$ нс
36	4,0	0,75/2,18	290 К				8,7; 3,65	5 (нр) 10,5 (ир)	[9] 40 каскадов, $t_n = 500$ нс
37	4,6	2/1,2 4,5/3	292 К				0,5; 3,5 или 15; 5	13 (нр) 15,4 (ир)	[9]
38	8,7	0,1/1	300 К (до 500 К)	2	0,85				[9] с внешним резонатором, 5 КЯ, 40 каскадов
39	4,8	0,2 – 0,3/-	300 К				11; 3		[9] срок службы 21000 часов (2,4 года!)
40	4,6	2,1/-	298 К				11; 3		[9] срок службы 3560 часов
41	4,6	7,3/-	80 К				12,5; 5	30	[9] срок службы сотни часов
42	4,6	2-3/0,1	293 К				15; 5	10	[9]
	9,6	-/0,02							
43	4,6	-/0,2 (средняя мощность излучения)			До 20			5	[9] $t_n = 50$ нс – 5 мкс, $F < 5$ МГц
44	60 - 250	0,008 – 0,056/-	5 – 200 К						[9] 1,2 – 5 ТГц
45	70	0,008 – 0,056/-	248 К						[9] 4,7 ТГц



№ п/п	Рабочая длина волны, мкм	Мощность излучения, Вт, в непрерывном/импульсном режиме	Рабочая температура	Пороговая плотность тока, кА/см <sup>2</sup>	Рабочий ток, А	Рабочее напряжение, В	Размеры излучателя (ширина тела свечения, мкм, длина резонатора, мм)	К.П.Д. (Эффективность), %	Источник информации, примечание
46	70	0,0004 – 0,012	5 – 117 К						[9] 3 ТГц
47	75 - 300	0,00002 – 0,0013	4 – 20 К						[9] 1 – 4 ТГц
48	3 – 3,6	-4 1,1/- 0,01/-	217 К 78 К 300 К					21	[9]
49	3,6 – 3,9	0,29/-	300 К					15	[9]
50	2,6	-0,26	80 К						[9] $t_n = 100$ нс, 7 КЯ, $F = 10$ кГц
51	5,2	-200	(-20) – (+50)°С						[28] фирма Азимуг Фотоник, РОС ККЛ
52	10,3	-100	(-20) – (+50)°С						-«-
53	12,5	-10	(-20) – (+50)°С						-«-
54	13,4	-80	(-20) – (+50)°С						-«-
55	4,57	0,02/-	(-10) – (+50)°С	1					[29] фирма Hamamatsu Photonics К.К., размеры ККЛ 44,5x31,8x17,8 мм
56	5,26	-«-	-«-	1					-«-
57	6,13	-«-	-«-	1					-«-
58	7,93	-«-	-«-	1					-«-
59	4,48	-/0,05	-«-						[29] размеры ККЛ Ø15,3x23,8 мм, $t_n = 10$ нс, $F = 200$ кГц при +20°С
60	5,26	-«-	-«-						-«-
61	6,13	-«-	-«-						-«-
62	7,82	-«-	-«-						-«-
63	5,263	0,015/-				1,5	7; 2	7, 1,2	[12] $\theta_1 = 30^\circ$ , $\theta_2 = 60^\circ$
65	5,2		(-20)-(+)50°С						[12] $\theta_1 = 30^\circ$ , $\theta_2 = 55^\circ$
66	5,2	0,2/-	-«-						-«-
67	10,3	0,1/-	0-(+30)°С		2,5	12	10x15 мкм		-«-
68	10,3	0,003/-	-«-		-«-	-«-			-«-
69	12,5	0,01/-	-«-		-«-	-«-			-«-
70	13,4	0,08/-	(-20)-(+)50°С		-«-	-«-			-«-

Примечания:  $t_n$  – длительность импульса излучения,  $F$  – частота следования импульсов,  $\theta_1$  – угловая расходимость излучения в плоскости р–п перехода,  $\theta_2$  – угловая расходимость излучения в плоскости, перпендикулярной р–п переходу., нр – непрерывный режим, ир – импульсный режим.

## Литература

1. Квантово-каскадные лазеры // Мастерская своего дела [Электронный ресурс] – URL: <http://www.msd.com.ua/principyu-lazeroi/kvantovo-kaskadnye-lazery> (дата обращения 02.12.15).
2. Квантово-каскадные лазеры. Перевод Малахова П. // Научно-образовательный проект "Лазерный портал" [Электронный ресурс] – URL: [http://www.laserportal.ru/content\\_726](http://www.laserportal.ru/content_726) (дата обращения 02.012.15).
3. Бараш Л. Создан самый мощный терагерцовый квантовый каскадный лазер. – URL: [http://ko.com.ua/sozdan\\_samyj\\_moshhnyj\\_teragercevyj\\_kvantovyj\\_kaskadnyj\\_lazer\\_104224](http://ko.com.ua/sozdan_samyj_moshhnyj_teragercevyj_kvantovyj_kaskadnyj_lazer_104224) (дата обращения 02.012.15).
4. Исследователи из Принстона открыли новый тип лазерной генерации // Nanotechnology News Network [Электронный ресурс] – URL: <http://www.nanonewsnet.ru/articles/2008/issledovateli-iz-prinstona-otkryli-novyi-tip-lazernoj-generatsii> (дата обращения 02.12.15).
5. Ученые смогли создать 1-Вт квантово-каскадный лазер терагерцового диапазона // Overclockers [Электронный ресурс] URL: [http://www.overclockers.ru/hardnews/58916/Uchenye\\_smogli\\_soizat\\_1-Vt\\_kvantovo-kaskadnyj\\_lazer\\_teragercevogo\\_diapazona.html](http://www.overclockers.ru/hardnews/58916/Uchenye_smogli_soizat_1-Vt_kvantovo-kaskadnyj_lazer_teragercevogo_diapazona.html) (дата обращения 05.05.15).
6. Создан квантовый каскадный лазер с рекордной эффективностью энергопреобразования // Компьютерра [Электронный ресурс] – URL: [http://compulenta.computerra.ru/archive/applied\\_research/494202/](http://compulenta.computerra.ru/archive/applied_research/494202/) (дата обращения 02.12.15).
7. Засавицкий И. И. Рекордные характеристики квантовых каскадных лазеров // Общероссийский семинар по ДЛС 31 октября 2012 Москва. – URL: <http://www.spsl.nsc.ru/FullText/konfe/ДЛС-18.pdf> (дата обращения 02.12.15).
8. Засавицкий И.И. Достижения в области квантовых каскадных лазеров (ККЛ) и их применений // Международная конференция "Радиационная физика твердого тела" им. П.Н. Лебедева РАН – URL: [http://www.dls.gpi.ru/rus/sem/6/KKL\\_DLS2006RUS.pdf](http://www.dls.gpi.ru/rus/sem/6/KKL_DLS2006RUS.pdf) (дата обращения 07.07.15).
9. Демиховский В. Я. Квантовые ямы, нити, точки. Что это такое? // Соросовский образовательный журнал. 1997. № 5. С. 80-86 – URL: [http://stat.phys.spbu.ru/Method/Kvantovie\\_jami.pdf](http://stat.phys.spbu.ru/Method/Kvantovie_jami.pdf) (дата обращения 02.012.15).
10. Квантово-каскадный лазер перевернул все представления физиков // Hi-Tech Mail.ru [Электронный ресурс] – URL: [https://hi-tech.mail.ru/review/kvantovo\\_kaskadnyj\\_lazer\\_perevernul\\_vse\\_predstavleniya\\_fizikov/](https://hi-tech.mail.ru/review/kvantovo_kaskadnyj_lazer_perevernul_vse_predstavleniya_fizikov/) (дата обращения 02.12.15).
11. Ластовкин А. А. Квантово-каскадные лазеры. ИФМ РАН // MyShared [Электронный ресурс] – URL: <http://www.myshared.ru/slide/175045/> (дата обращения 10.07.15).
12. Андронов А. А., Захаров Н. Г., Маругин Д. В., Савикин А. П. Новые источники и приемники ИК и терагерцового диапазона // Нижегородский

государственный университет им. Н.И. Лобачевского. Нижний Новгород. 2007. 95 с. URL: <http://www.unn.ru/pages/issues/aids/2007/27.pdf> (дата обращения: 02.12.15).

13. Терагерцовый перестраиваемый лазер – новый тип химического анализатора // DailyTechInfo [Электронный ресурс] – URL: <http://www.dailytechinfo.org/news/829-teragercovuj-perestraivaemyj-lazer-novuj-tip.html> (дата обращения 02.12.15)

14. Вакс В. Л., Домрачева Е. Г., Приползин С. И., Собакинская Е. А., Черняева М. Б. Прецизионные спектрометры на основе квантово-каскадных лазеров. Проблемы и возможные пути их решения // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 6(1). С. 93–98.

15. Коэфф Й, Фишер М., Легге М., Сейферт Й., Вернер Р. Лазеры с распределенными брэгговскими решетками на квантовых ямах, точках и с квантовыми каскадами // Фотоника. 2008. № 4. С. 12–16.

16. Различные типы квантово-каскадных лазеров // Научно-образовательный проект "Лазерный портал" [Электронный ресурс] – URL: [http://www.laserportal.ru/content\\_731](http://www.laserportal.ru/content_731) (дата обращения 09.12.15).

17. Квантово-каскадные лазеры позволяют детально рассмотреть нанообъекты // pcwork.ru Компьютерные системы [Электронный ресурс] – URL: [http://www.pcwork.ru/kvantovyie\\_lazeryi\\_pozvolyayut\\_detalno\\_rassmotret\\_na\\_poobjektyi.htm](http://www.pcwork.ru/kvantovyie_lazeryi_pozvolyayut_detalno_rassmotret_na_poobjektyi.htm) (дата обращения 02.12.15).

18. Maulini R., Lyakh A., Tsekoun A., Kumar C., Patel N.  $\lambda \sim 7.1 \mu\text{m}$  quantum cascade lasers with 19% wall-plug efficiency at room temperature // Optics Express, 2011. Vol. 19. № 18. pp. 17203–17211.

19. Xue Huang, Charles W.O., Gmachi C. Temperature-intensitive long-wavelength ( $\lambda \sim 14 \mu\text{m}$ ) Quantum Cascade Lasers with low threshold // Optics Express. 2011. Vol. 19. № 9. pp. 8297–8302.

20. Xue Huang, Chiu Y., Charles W.O., Gmachi C. Ridge-width dependence of the threshold of long wavelength ( $\lambda \sim 14 \mu\text{m}$ ) quantum cascade lasers with sloped and vertical sidewalls // Optics Express. 2012. Vol. 20. № 3. pp. 2539–2547.

21. Bewley W. W., Canedy C. I., Kim C. S. Continuous-wave interband cascade lasers operating above room temperature at  $\lambda = 4.7\text{--}5.6 \mu\text{m}$  // Optics Express. 2012. Vol. 20. № 3. pp. 3235–3240.

22. Fuchs P., Friedl J., Höfling S. Single mode quantum cascade lasers with shallow-etched distributed Bragg reflector // Optics Express. 2012. Vol. 20. № 4. pp. 3890–3897.

23. Lyakh A., Maulini R., Tsekovn A. Tapered  $4.7 \mu\text{m}$  quantum cascade lasers with highly strained active region composition delivering over 4.5 watts of continuous wave optical power // Optics Express, 2012. Vol. 20. № 4. pp. 4382–4388.

24. Menzel S., Diehl L., Pflügel C. Quantum cascade laser master-oscillator power-amplifier with 1.5 W output power at 300 K // Optics Express. 2011. Vol. 19. № 17. pp. 16229–16235.

25. Fathololoum S., Dupurt E., Chan C.W.I. at all. Terahertz quantum cascade lasers operating up to ~200 K with optimized oscillator strength and improved injection tunneling // *Optics Express*. 2012. Vol. 20. № 4. pp. 3866–3876.
26. Quantum Cascade Laser. Каталог фирмы Frankfurt Laser Co. Германия. 2015. URL: <http://www.frlaserco.com> (дата обращения 20.09.15).
27. Квантово-каскадные лазерные диоды. Каталог компании Азимут Фотоникс. Оптоэлектронные компоненты. Российская Федерация. М., 2015.
28. Квантово-каскадные лазеры. Quantum Cascade Laser. Каталог фирмы Hamamatsu Photonics К.К. Япония, 2015.
29. Квантово-каскадные лазеры. Каталог фирмы WLaser Co. 2015. URL: <http://www.wlaser.ru/diode> (дата обращения 09.10.15).
30. Гейхман И. Л., Волков В. Г. Видение и безопасность. - М.: Новости, 2009. – 850 с.
31. Волков В. Г., Гиндин П. Д. Техническое зрение. Инновации. – М.: Техносфера, 2014. – 850 с.
32. Алеев Р. М., Иванов В. П., Овсянников В. А. Несканирующие тепловизионные приборы. Основы теории и расчета. – Казань: Издательство Казанского университета, 2004. – 228 с.
33. Тепловизионные камеры в системах обеспечения безопасности. Каталог фирмы FLIR Systems. США. 2015.
34. Автомобильная система ночного видения PathFundIR II. Проспект фирмы Пергам. 2015.
35. Комбинированный осветитель-целеуказатель 2ИКС-КЛЕЩ + ЛЦУ. Проспект компании «Зенит». 2015.
36. Лазерный дальномер LRM 2000. Проспект ОАО «Швабе-Фотоприбор». 2014.
37. Тепловизионные камеры, обеспечивающие наблюдение границ и береговой линии на больших расстояниях. Каталог фирмы FLIR Systems. США.
38. Лазерный измеритель скорости «Луч-М». Проспект ОАО «НИИ «Полюс» им. М. Ф. Стельмаха ОАО «Швабе». 2015.
39. Атмосферные оптические линии передачи данных FSO (Free Space Optics). Проспект Государственного рязанского приборостроительного завода. РФ. Рязань, 2014.

## References

1. Kvantovo-kaskadnye lasery. [Quantum-Cascade lasers] *Masterskaia svoego dela* [Online Resource]. Available at: <http://www.msd.com.ua/principy-lazerov/kvantovo-kaskadnye-lazery> (accessed 02 December 2015) (in Ukraine).
2. Kvantovo-kaskadnye lasery. Perevod Malakhova P. [Quantum-Cascade Lasers] *Scientific-educational project "Laser portal"* [Online Resource]. Available at: [www.laserportal.ru/coherent\\_726](http://www.laserportal.ru/coherent_726) (accessed 02 December 2015) (in Russian).
3. Barash L. *Sozdan samyi moshchnyi teragerzovyi kvantovo-kaskadnyi lazer*. [Created a Powerful Terahertz Quantum-Cascade Laser] Available at:



[http://ko.com.ua/sozdan\\_samyj\\_moshhnyj\\_teragercevyj\\_kvantovyj\\_kaskadnyj\\_lazer\\_104224](http://ko.com.ua/sozdan_samyj_moshhnyj_teragercevyj_kvantovyj_kaskadnyj_lazer_104224) (accessed 02 December 2015) (in Ukraine).

4. Issledovateli iz Prinstona otkryli novyi tip lazernoi generatsii [Researchers at Princeton Discovered a New Type of Laser Generation]. *Nanotechnology News Network* [Online Resource]. Available at: [www.nanonewsnet.ru/articles/2008/issledovateli-iz-prinstona-otkryli-novyi-tip-lazernoi-generatsii](http://www.nanonewsnet.ru/articles/2008/issledovateli-iz-prinstona-otkryli-novyi-tip-lazernoi-generatsii) (accessed 02 December 2015) (in Russian).

5. Uchenye smogli sozdat' 1-Vt kvantovo-kaskadnyi lazer teragertsovogo diapazona [Scientists were able to Create a 1-watt Quantum Cascade Laser Terahertz Range]. *Overclockers* [Online Resource]. Available at: [http://www.overclockers.ru/hardnews/58916/Uchenye\\_smogli\\_sozdat\\_1-Vt\\_kvantovo-kaskadnyj\\_lazer\\_teragercevogo\\_diapazona.html](http://www.overclockers.ru/hardnews/58916/Uchenye_smogli_sozdat_1-Vt_kvantovo-kaskadnyj_lazer_teragercevogo_diapazona.html) (Accessed 05 May 2015) (in Russian).

6. Sozdan kvantovyi kaskadnyi lazer s rekordnoi effektivnostju energopreobrazovanija. [Created Quantum Cascade Laser with Record Efficiency Servoproportional]. *Computerra* [Online Resource]. Available at: <http://www.science.compulenta.ru/494202> (accessed 02 December 2015) (in Russian).

7. Zasavitskii I. I. Rekordnye kharakteristiki kvantovykh kaskadnykh lazerov [Record the Characteristics of Quantum Cascade Lasers]. *15-th all-Russian seminar on DLS*. October 31, 2012, Moscow. Available at: <http://www.spsl.nsc.ru/FullText/konfe/ДЛС-18.pdf> (accessed 07 July 2015) (in Russian).

8. Zasavitskii I. I. Dostizheniia v oblasti kvantovykh kaskadnykh lazerov (KKL) i ikh primeneniia [Achievements in the Field of Quantum Cascade Lasers (CCL) and their Applications] *International conference "Radiation physics of solids" named after P. N. Lebedev RAS*. Available at: [www.dis.dpi.ru/rus/sem/6/KKL\\_DIS2006RUS.pdf](http://www.dis.dpi.ru/rus/sem/6/KKL_DIS2006RUS.pdf). (accessed 08 July 2015) (in Russian).

9. Demikhovskii V. Ya. Quantum Wells, Wires and Dots. *Soros educational journal*, 1997, no. 5, pp. 80-86. Available at: [http://stat.phys.spbu.ru/Metod/Kvantovie\\_jami.pdf](http://stat.phys.spbu.ru/Metod/Kvantovie_jami.pdf) (accessed 02 December 2015) (in Russian).

10. Kvantovo-kaskadnyi lazer perevernul vse predstavlenija fizikov. [A Quantum-Cascade Laser has Changed the Impression of Physicists]. *Hi-Tech Mail.ru* [Online Resource]. Available at: [www.http://hi-tech.mail.ru/review/kvantovo\\_kaskanye\\_lazery](http://hi-tech.mail.ru/review/kvantovo_kaskanye_lazery). (accessed 02 December 2015) (in Russian).

11. Lastovkin A. A. Kvantovo-kaskadnye lazery [Quantum-cascade lasers]. IPM RAS. *MyShared* [Online Resource]. Available at: [www.myshared.ru/slide/1755045/lastovkin.ppt](http://www.myshared.ru/slide/1755045/lastovkin.ppt) (accessed 10 July 2015) (in Russian).

12. Andronov A. A., Zakharov N. G., Marugin D. V., Savikin A. P. *Novye istochniki i priemniki IK i teragertsovogo diapazona* [New Sources and Detectors of Infrared and Terahertz Range]. Nizhny Novgorod, Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod Publ., 2007, 95 p. Available at:

[www.unn.ru/pages/issues/aids/2007/27.pdf](http://www.unn.ru/pages/issues/aids/2007/27.pdf). (accessed 02 December 2015) (in Russian).

13. Teragertsovyi perestraivaemyi lazer – novyi tip khimicheskogo analizatora [Terahertz Tunable Laser is a New Type of Chemical Analyzer]. *DailyTechInfo* [Online Resource]. Available at: [www.dailytechinfo.org/news/829](http://www.dailytechinfo.org/news/829) (accessed at 02 December 2015) (in Russian).

14. Vaks V.L., Domracheva E.G., Pripolzin S.I., Sobakinskaja E.A., Chernjaeva M.B. Pretsizionnye spektrometry na osnove kvantovo-kaskadnykh lazerov. Problemy i vozmozhnye puti ikh resheniia. [Precise Spectrometers Based on Quantum Cascade Lasers. Problems and Possible Solutions]. *Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*, 2011, vol. 1, no. 6, pp. 93–98. Available at: [www.http://cyberlenica.ru/article/pretsizionnye-spetrometry-na-osnove-kvantovo-kaskadnykh-lazerov-problemy-i-vozmozhnostye-puti-ih-reshenye](http://cyberlenica.ru/article/pretsizionnye-spetrometry-na-osnove-kvantovo-kaskadnykh-lazerov-problemy-i-vozmozhnostye-puti-ih-reshenye). (accessed 02 December 2015) (in Russian).

15. Coef J., Fisher M., Legge M., Seifert J., Verner R. Lazery s raspredeleennyimi breggovskimi reshetkami na kvantovykh iamakakh, tochkakh i s kvantovymi kaskadami [Lasers with Distributed Bragg Gratings in Quantum Wells, Dots and Quantum Cascades]. *Photonics*, 2008, no. 4, pp. 12–16 (in Russian).

16. Razlichnye tipy kvantovo-kaskadnykh lazerov [Different Types of Quantum-Cascade Lasers]. *Scientific-educational project "Laser portal"*. Available at: [www.laser.Portal.ru/content\\_731.htm](http://www.laser.Portal.ru/content_731.htm). (accessed 15 August 2015) (in Russian).

17. Kvantovo-kaskadnye lazery pozvoliaut detal'no rassmotret' nanoob'ekty [Quantum Lasers Allow Detailed Consideration of Nanoobjects]. *Computer system*. Available at: [www.pcwork.ru/kvantovyie\\_lazeryi\\_pozvolayut\\_detalno\\_rassmotret\\_nanoobektyi.html](http://www.pcwork.ru/kvantovyie_lazeryi_pozvolayut_detalno_rassmotret_nanoobektyi.html). (accessed 02 December 2015) (in Russian).

18. Maulini R., Lyakh A., Tsekoun A., Kumar C., Patel N.  $\lambda \sim 7.1 \mu\text{m}$  quantum cascade lasers with 19% wall-plug efficiency at room temperature. *Optics Express*, 2011, vol. 19, no. 18, pp. 17203–17211.

19. Xue Huang, Charles W. O., Gmachi C. Temperature-intensitive long-wavelength ( $\lambda \sim 14 \mu\text{m}$ ) Quantum Cascade Lasers with low threshold. *Optics Express*, 2011, vol. 19, no. 9, pp. 8297–8302.

20. Xue Huang, Chiu Y, Charles W. O., Gmachi . Ridge-width dependende of the threshold of long wavelength ( $\lambda \sim 14 \mu\text{m}$ ) quantum cascade lasers with sloped and vertical sidewalls. *Optics Express*, 2012, vol. 20, no. 3, pp. 2539–2547.

21. Bewley W. W., Canedy C. I., Kim C. S. Continous-wave interband cascade lasers operating above room temperature at  $\lambda = 4.7 - 5.6 \mu\text{m}$ . *Optics Express*, 2012, vol. 20, no. 3, pp. 3235–3240.

22. Fuchs P., Friedl J., Höfling S. Single mode quantum cascade lasers with shallow-etched distributed Bragg reflector. *Optics Express*, 2012, vol. 20, no. 4, pp. 3890–3897.

23. Lyakh A., Maulini R., Tsekovn A. Tapered  $4.7 \mu\text{m}$  quantum cascade lasers with highly strained active region composition delivering over 4.5 watts of continuous wave optical power. *Optics Express*, 2012, vol. 20, no. 4, pp. 4382–4388.

24. Menzel S., Diehl L., Pflügel C. Quantum cascade laser master-oscillator power-amplifier with 1.5 W output power at 300 K. *Optics Express*, 2011, vol. 19, no. 17, pp. 16229–16235.
25. Fatholouloumi S., Dupurt E., Chan C.W.I. Terahertz quantum cascade lasers operating up to ~200 K with optimized oscillator strength and improved injection tunneling. *Optics Express*, 2012, vol. 20, no. 4, pp. 3866–3876.
26. *Quantum Cascade Laser*. The catalog company Frankfurt Laser Co., Germany, 2015. Available at: [www.frlaserco.com](http://www.frlaserco.com). (accessed 20 September 2015).
27. *Kvantovo-kaskadnye lazernye diody*. Katalog kompanii Azimut Fotoniks. Optoelektronnye komponenty [Quantum-Cascade Laser Diodes]. Directory of the company Azimut Photonic. Optoelectronic components. The Russian Federation, Moscow, 2015 (in Russian).
28. *Quantum-Cascade Laser*. Directory of Hamamatsu Photonics K. K. Japan, 2015.
29. *Quantum-cascade lasers*. The company catalogue with WLaser, of the Russian Federation, Moscow, 2015. Available at: [www.wlaser.ru/diode](http://www.wlaser.ru/diode). (accessed 09 October 2015) (in Russian).
30. Geikhman I. L., Volkov V. G. *Videnie i bezopasnost'* [Vision and Safety]. Moscow, News Publ., 2009, 850 p. (in Russian).
31. Volkov V.G., Gindin P.D. *Tekhnicheskoe zrenie. Innovatsii* [Technical Vision. Innovations]. Moscow, Technosphaera Publ., 2014, 850 p. (in Russian).
32. Aleev R.M., Ivanov V.P., Ovsjannikov V.A. *Neskanirujushie teplovisornye pribory. Osnovy teorii i rascheta* [Thermal Imaging Devices. Fundamentals of Theory and Calculation]. Kazan, Publishing house of Kazan University, 2004, 228 p. (in Russian).
33. *Thermal imaging cameras in security systems*. The Directory of the company FLIR Systems, USA, 2015.
34. *Avtomobil'naiia sistema nochnogo videniia PathFundIR II* [Automotive Night Vision System PathFundIR II]. The brochure of the company Pergam, Moscow, 2015 (in Russian).
35. *Kombinirovanyi osvetitel'-tseleukazatel' 2IKS-KLEShch + LTsU* [Combined Illuminator-Designator 2ICS-MITE + LCC]. The brochure of the company "Zenit", Moscow, 2015 (in Russian).
36. *Lasernyi dal'nomer LRM 2000* [Laser Rangefinder LRM 2000]. The brochure of JSC "Shvabe-Fotopribor", Moscow, 2014 (in Russian).
37. *Thermal imaging cameras for surveillance of the borders and the coastline at large distances*. The Directory of the company FLIR Systems, USA, 2015.
38. *Lasernyi izmeritel' skorosti «Luch-M»* [The Laser Speed Meter "Luch-M"]. The brochure of Ltd "NII "Polyus" n. a. M. F. Stelmakh JSC "Schwabe", Moscow, 2015 (in Russian).
39. *Atmosfernye opticheskie linii peredachi dannykh FSO* [Atmospheric Optical Data Link FSO (Free Space Optics)]. Prospect the Ryazan State instrument-making plant, Ryazan, 2014 (in Russian).

Статья поступила 20 ноября 2015 г.

### Сведения об авторе

Волков Виктор Генрихович – доктор технических наук, академик Российской академии естественных наук. Профессор кафедры РЛ-2 «Лазерные и оптико-электронные системы». Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: приборы визуализации изображения. E-mail: volkvik2009@yandex.ru.

Адрес: Россия, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

---

## Quantum Cascade Lasers and their Application in Safety and Communication Systems

V. G. Volkov

*The purpose of this paper is to describe current level of development of quantum-cascade lasers (CCL), their characteristics and capabilities, and assess the feasibility of using CCL in the security systems and communications. The used research method – method of calculating the range of the recognition and targeting in thermal imaging devices (TVP), is made on the basis of microbolometer matrices, when combined with CCL. Novelty: this was the first time when Author considering the use of CCL in the security systems and communications. Similar to the known publications on these issues are absent. Results: created a VIP with infra-red (IR) illuminators or designators on the basis of the CCL in fixed, mobile, transportable and portable (head-mounted). The VIPs feature in that it ensures the preservation of the range of the recognition and targeting at the fall of the temperature contrast of the object with the background not less than 10 times compared with a normalized value. System clock and all-weather operation created with the application of CCL on the basis of specific examples, including a universal sighting complexes, combined infra-red illuminators-target designators, laser rangefinders and lidars. Practical value: the results can be used to create instruments for observation, aiming, driving patrol vehicles, aiming and targeting, accurate measurement of range and speed weatherproof and persistent action in the interest of the security services and police, as well as all weather systems atmospheric laser communication. The use of CCL in the inspection system based on the use of T-rays will work in the range of to 300 microns and to create a portable and mobile equipment. The use of CCL in atmospheric laser communication systems to ensure all-weather capability. The prospects for further development of the results – application in devices more powerful CCL with power exceeding 100 watts in CW and in pulsed mode at room temperature, do high efficiency. CCL when working in continuous mode above 30%, the creation of CCL for short-wave spectral region from 2 to 4  $\mu\text{m}$ , a gap of 20 to 70  $\mu\text{m}$  in the working range of wavelengths CCL, increase the power of terahertz radiation CCL and do their work in thermoelectric cooling. Conclusions: the new generation of devices for security systems and communications allows you to eliminate the known disadvantage of the NT – the sharp decline in their range at low temperature of the object contrasts with the background. For measurements of distance, speed and the atmospheric connection is to provide year-round and all-weather performance.*

**Keywords:** quantum cascade laser, the working region of the spectrum, output power, efficiency, terahertz wavelength range, security system, atmospheric communication, range, speed, measurement accuracy, field of view angle.

### About the Author

Viktor Genrichovich Volkov – Dr. habil. of Engineering Sciences, Academician of Russian Academy of Natural Sciences. Professor at the Department RL-2 “Laser and Optic Electron Systems”. Bauman Moscow State Technical University. Field of research: devices of images visualization. E-mail: volkvik2009@yandex.ru

Address: Russia, 105005, Moscow, 2nd Baumanskaya str., 5-1.