



Фотоника

Научно-производственная компания

ООО «НПК Фотоника»
196105 Россия, Санкт-Петербург,
пр. Юрия Гагарина, д.2
+7 (812) 740-71-28
www.npk-photonica.ru

Составитель: А.Птицын, продукт-менеджер НПК "Фотоника"

ЧТО МЫ ВИДИМ И ЧТО НЕ ВИДИМ?

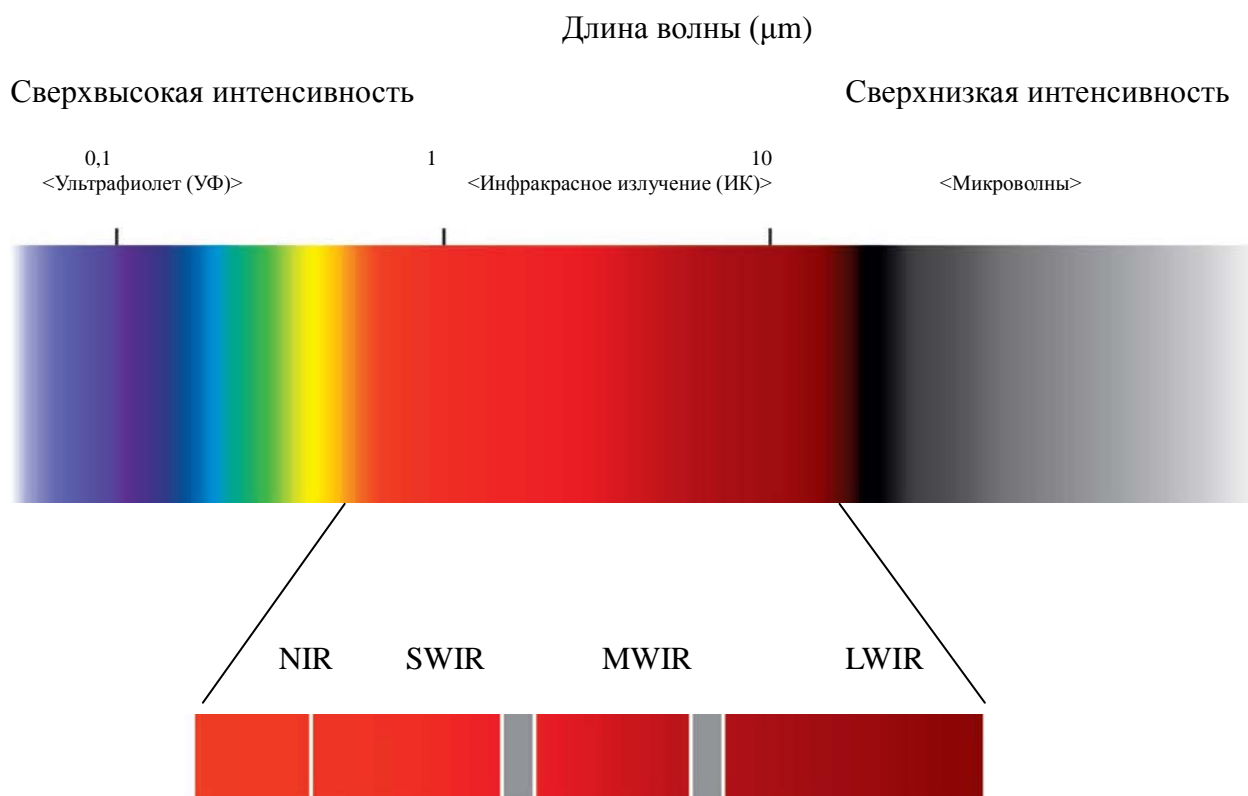
Решения многих задач в различных областях деятельности человека требуют применения специализированной техники и приборов, которые расширяют физические возможности данных человеку природой органов чувств.

К таким приборам относятся производимые Конструкторским Бюро «ВиТА» серийные и кастомизированные камеры короткого ИК диапазона.

Инфракрасное излучение

В повседневной жизни мы сталкиваемся с электромагнитным световым излучением в различных формах, например: видимый световой спектр, ультрафиолетовый спектр, радио волны и рентгеновское излучение, которые различаются друг от друга только длиной волны. Инфракрасное излучение как сектор электромагнитного спектра занимает положение между волнами видимого диапазона и микроволнами.

Общая схема дифференциации электромагнитного светового спектра



NIR – ближний инфракрасный диапазон

SWIR – коротковолновый инфракрасный диапазон

MWIR – средневолновый инфракрасный диапазон

LWIR – длинноволновый инфракрасный диапазон

Обнаружение излучений различных типов

Все физические тела постоянно излучают инфракрасные волны. При нагревании тела излучение становится более интенсивным и смещается в диапазон более коротких волн. (Чем больше температура тела, тем интенсивнее оно излучает более короткие волны инфракрасного диапазона). При умеренных температурах (выше 25°C) интенсивность излучения достигает уровня, определяемого как тепловое излучение. При температурах выше 800°C интенсивность излучения доходит до такого уровня, который достаточен для преодоления границы видимого диапазона в области красного излучения. Например: сталь при нагревании сначала становится красной, а затем при повышении температуры – белой. Это показывает, что ИК и подобное тепловое излучение может быть обнаружено и измерено камерами, обладающими соответствующими характеристиками.

Что такое SWIR?

SWIR излучение – это общепринятое название светового излучения в диапазоне электромагнитных волн $0.9 - 1.7\mu\text{m}$, хотя этот диапазон иногда расширяется до значений $0.7 - 2.5\mu\text{m}$. Вследствие того, что кремний имеет потолок чувствительности примерно до $1.0\mu\text{m}$, SWIR съемка требует особых оптических компонентов, работающих в диапазоне короткого ИК. Типичными сенсорами, используемыми при обычной съемке в SWIR диапазоне, являются сенсоры на основе арсенида индия-галлия (InGaAs), способные захватывать область от 550nm и вплоть до $2.5\mu\text{m}$.

ПОЧЕМУ SWIR?



В отличие от излучения среднего ИК и длинного ИК диапазонов, которые исходят от самих объектов, SWIR излучение близко к видимому диапазону в том, что фотоны либо отражаются, либо поглощаются объектами, и это свойство обеспечивает широкий динамический диапазон, необходимый для изображений с высоким разрешением. Атмосферное звездное свечение и фоновое излучение (ночное сияние) являются естественными источниками света SWIR диапазона и великолепной подсветкой объектов при ночной уличной съемке. Производимые сенсоры на основе InGaAs могут быть исключительно чувствительными, «подсчитывающими» буквально каждый фотон. Поэтому, камеры с встроенными в фокальные плоскости матрицами, которые насчитывают тысячи или миллионы мельчайших точечных сенсоров, или пикселей, способны работать в

условиях глубокой темноты. Очки ночного видения, которые используются уже несколько десятилетий, работают по принципу обнаружения и усиления в так называемых трубках интенсификации (I-Squared) отраженного света, который исходит от звезд или окружающих объектов. Данная технология хорошо подходит для очков непосредственного ночного видения. Но при возникновении необходимости передачи изображения на расстояние (например: разведывательный центр), нельзя воспользоваться ни одним методом, который бы был полностью надежен и не ограничивал чувствительность (например, ПЗС с оптическим усилением). А так как пользовательский интерфейс SWIR сенсоров конвертирует свет в электрический сигнал, эти сенсоры в основе своей совместимы с технологиями накопления и передачи сигналов.

Другим исключительным преимуществом SWIR приборов является возможность использовать их в ночное время. Атмосферное явление, известное как свечение ночного неба, излучает в пять-семь раз больше света, чем звездное свечение, и практически весь этот свет находится в диапазоне SWIR. Таким образом, SWIR камеры вместе с ночным свечением – часто называемым ночным свечением атмосферы – позволяют «видеть» объекты с большой четкостью в безлунные ночи и передавать такие снимки по сетям, т.к. никакие другие приспособления для съемки этого не делают.

Можно задаться вопросом: неужели нет больше приборов, работающих в коротком ИК диапазоне. Есть, конечно. Это сенсоры, изготавливаемые на основе теллурида ртути-кадмия и антимонида индия, которые очень чувствительны в полосе SWIR. Однако для достижения приемлемого для работы соотношения сигнал/шум такие камеры необходимо механически охлаждать, часто до сверхнизких температур. На больших военных самолетах, предназначенных для наблюдения и разведки, осуществление охлаждения не проблематично, так как установочные платформы для камер проектируются с большим запасом пространства и питания, чтобы использовать систему охлаждения. Без усилий соответствующую чувствительность показывают приборы на основе InGaAs при комнатной температуре.

Фактически камеры с сенсорами InGaAs могут быть небольшими и потреблять очень мало энергии, но выполнять значительные задачи. Сенсоры InGaAs ранее нашли применение в телекоммуникационной отрасли, т.к. они обладают чувствительностью к свету, используемому в оптоволоконных сетях большой протяженности, обычно на уровне 1550 нм. Диоды и матрицы все еще используются в телекоммуникации, часто в оптических мониторах вместе со спектрометрами, которые работают в диапазоне SWIR. Удивительные результаты дает такая комбинация. Если использовать SWIR подсветку 1,55 мн лазеров или светодиодов, можно скрытно освещать объект, который становится видимым для SWIR камер. Например, так можно освещать дорогу военным грузовикам при недостаточном ночном свечении (если путь пролегает сквозь густой лес или по тоннелю) для обеспечения безопасного передвижения по вражеской территории. Камерам InGaAs с пользовательским интерфейсом невозможно найти замену в таких ситуациях. А с учетом того, что они безопасны для зрения, количество ограничений по их использованию невелико.

Важно использовать объективы, предназначенные, оптимизированные и имеющие просветляющее покрытие для SWIR диапазона. Использование объективов, предназначенных для волн видимого спектра, приводит к получению снимков низкого разрешения с более высокой оптической абберацией. Так как волны SWIR проходят сквозь стекло, объективы и другие оптические компоненты (оптические фильтры и окна), предназначенные для SWIR съемки, могут изготавливаться по тем же технологиям, которые используются для компонентов видимого диапазона, что снижает издержки производства и делает возможным использование фильтров и окон в рамках одной системы.

Приборы SWIR применяются там, где использование приборов видимого излучения осложнено или невозможно. Водяной пар, туман и такие вещества, как силикон, прозрачны для SWIR волн. Кроме того, цвета, которые являются практически идентичными в видимом диапазоне, легко

различаются в диапазоне SWIR.

Итак, преимущества приборов SWIR

- высокая чувствительность
- высокое разрешение
- способность формировать изображение при свете ночного свечения или сиянии ночного неба
- возможность круглосуточного применения
- возможность скрытой подсветки
- способность видеть скрытые лазерные сигналы и маячки
- отсутствие требований для глубокого охлаждения
- возможность использовать серийные бюджетные объективы видимого диапазона
- компактность
- низкое энергопотребление

Как работает камера с коротковолновым инфракрасным (SWIR) сенсором

Сенсоры, используемые в SWIR камерах, устроены аналогичным с ПЗС и КМОП сенсорами на основе кремния образом, они преобразуют фотоны в электроны, которые называются также **квантовыми детекторами**. В целях обнаружения светового излучения за пределами видимого диапазона, чувствительная к свету область таких сенсоров изготавливается из такого материала, как арсенид индия-галлия (InGaAs) либо из теллурида кадмия-ртути (МСТ-HgCdTe). Таким образом, в зависимости от композитного материала (химической структуры) эти сенсоры чувствительны к световому излучению в различных диапазонах, а для получения требуемого коэффициента сигнал/шум такие сенсоры требуется охлаждать иногда до криогенных температур с помощью жидкого азота или компактных охлаждающих элементов Стирлинга.

В отличие от ПЗС и КМОП сенсоров на основе только кремния, InGaAs сенсоры изготавливаются из разного сырья. Процесс комбинирования таких материалов относительно сложный и время емкий, так как технология включает в себя множество этапов и отличается относительно низкой производительностью. Причина этому обуславливается в основном сложностями, которые возникают в процессе присоединения модуля считывания к светочувствительной области сенсора, что делает производство таких сенсоров совсем недешевым.

Следует также отметить, что современные технологии еще не обеспечивают 100% точности при присоединении считывающего модуля к светочувствительной области. Отсюда велик процент «плохих» пикселей по сравнению с ПЗС и КМОП сенсорами, что неизбежно влечет за собой необходимость соответствующей корректировки изображения. Более того, толщина слоя фосфида индия (InP) определяет диапазон спектральной чувствительности сенсора. Чем он тоньше, тем больше света с более высокой интенсивностью проходит сквозь него.

ПРИМЕНЕНИЕ ПРИБОРОВ SWIR

Определение влажности.

Вода абсорбируется в основном при показателях длины волны 1450 нм – 1900 нм. Данное свойство с применением соответствующих фильтров и подсветки может быть использовано для проведения различных исследований:

- определение однородности или степени увлажненности покрытий основного материала;
- определение уровня наполненности сквозь непрозрачный материал контейнера;
- выявление порченных или гнилых фруктов;
- определение относительного содержания влаги в растениях

Зоны с большим содержанием жидкости на снимках выглядят темнее.



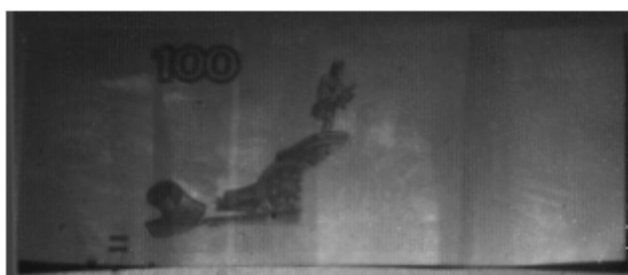
Так порченый плод видит человеческий глаз (слева) и наша камера (справа)

Использование данной технологии применимо во многих производствах:

- пищевой и сельскохозяйственной;
- горнодобывающей;
- деревообрабатывающей;
- легкой промышленности;
- автомобильной промышленности

Камеры коротковолнового инфракрасного диапазона (SWIR) позволяют расширить области их применения и увеличить возможности систем машинного зрения проникать за пределы видимого спектра.

Например, SWIR камеры зачастую могут «видеть» сквозь поверхности, не прозрачные для человеческого глаза. Такая способность помогает визуализировать скрытые параметры, такие как уровень наполняемости, наличие влаги или защитных элементов.



Аутентификация банкноты



Простой контроль наполняемости

В отличие от MWIR камер, в SWIR камерах охлаждение сенсора требуется не всегда. Кроме того, нет необходимости в какой-либо специальной оптике, так как волны диапазона 900 нм – 2700 нм проходят сквозь простое стекло. Благодаря этому стоимость всей системы держится на умеренном уровне. Дополнительное использование дисперсионной оптики или источника монохромного света делают возможным получение четких снимков исследуемого объекта с понятными значениями оптической плотности.

Применение камер коротковолнового ИК диапазона на основе сенсоров из арсенида индия-галлия (SWIR InGaAs) в оборонной промышленности

Основные преимущества:

- *SWIR InGaAs сенсоры чувствительны к свечению ночного неба (1 to 1.6 μm)*
- *SWIR InGaAs камеры могут быть неохлаждаемыми, небольшими, легкими и экономичными*
- *В камерах для подсветки объектов могут использоваться невидимые и безопасные для глаз лазерные лучи*
- По сравнению с сенсорами длинного и среднего ИК диапазона (LWIR и MWIR соответственно), SWIR InGaAs камеры «видят» отраженный свет. Использование SWIR InGaAs сенсоров вместе с LWIR и MWIR, наделяет камеры исключительными свойствами.

Обнаружение лазерных целеуказателей

В настоящее время лазеры широко применяются на поле боя: дальнометрические лазеры используются для определения удаленности объектов, а целеуказатели используются в наступательных операциях. Наиболее распространенные модели лазеров функционируют на длине волн 850 нм, 1060 нм и 1550 нм. Два первых излучения детектируются очками ночного видения, третье, на длине волны 1550 нм, считается невидимым. Камеры SWIR InGaAs могут обнаруживать все три излучения одновременно.

Ночное видение и обнаружение целей

Термоскопические камеры, такие как неохлаждаемые длинноволновые ИК микроболометры, наилучшим образом выполняют задачи по обнаружению объектов в ночное время. Тем не менее, камеры SWIR InGaAs являются отличным дополнением к термоскопическим камерам.

Если термоскопические приборы легко обнаруживают присутствие объектов, выделяющих тепло, например: автомашины, грузовики, люди и т.д., то SWIR InGaAs камеры могут использоваться для идентификации и распознавания указанных объектов при более низких температурах окружающей среды. Работа SWIR камер в ночное время основана на отражении ИК лучей атмосферного или ночного небесного свечения, а не теплового излучения. Поэтому изображения, получаемые SWIR камерами, представляют наиболее точно то, что различается в видимом диапазоне (см. Рисунок 1). В

сравнении с термоскопией, SWIR камеры обладают лучшим динамическим диапазоном. Термоскопические приборы являются другим классом камер с хорошими возможностями обнаруживать объекты, которые рекомендуются к использованию в дополнение к SWIR камерам. Если термоскоп в состоянии определять присутствие теплых объектов на фоне более холодного окружения, SWIR камера может на самом деле идентифицировать, что это за объект, т.к. термоскопы не обладают разрешающей способностью и динамическим диапазоном, что характеризует матрицы фокальных плоскостей SWIR камер. В военном деле считается критически важной способностью отличить военный транспорт от гражданского автомобиля. SWIR камеры могут способствовать распознаванию «свой-чужой».

КМОПы и ПЗС-ки являются великолепными приборами, которые все время совершенствуются для использования в оборонной промышленности, но данным сенсорам, обыкновенно, требуется дневной свет. В свою очередь, одна и та же SWIR камера может использоваться круглые сутки для выполнения поставленных задач.

Очевиден тот факт, что преимущество InGaAs камеры видимого ближнего диапазона (VISNIR InGaAs) состоит в ее способности фиксировать больше электромагнитных колебаний при наличии света видимого спектра, например: уличных фонарей или свечения населенных пунктов. К тому же, используя SWIR свет светодиодов или лазеров длиной волны 1150 нм, можно осуществлять невидимую подсветку, т.е. осуществлять наблюдение только при помощи SWIR камеры. Следует добавить, что SWIR лазеры безопасны для глаз; их можно использовать для безопасной подсветки объектов и людей.

Съемка с лазерной подсветкой

Съемка с лазерной подсветкой позволяет получать изображения удаленных объектов, в условиях низкой освещенности и при влиянии атмосферных факторов. При такой съемке лазерный стробоскоп осуществляет подсветку объекта, а камера фиксирует отраженные лучи. В качестве подсветки для SWIR InGaAs камер используется невидимые и безопасные для глаз лазеры с длиной волны 1,54 мкм.

Событийная осведомленность – фиксация выстрела

Акустические сенсоры, которые «слышат» ударную волну от пули не являются единственным решением для фиксации выстрелов. След выстрела может быть обнаружен, локализован и обработан намного быстрее высокоскоростными SWIR InGaAs камерами как в ночное, так и в дневное время. Такие камеры фиксируют дымовые газы и горячие частицы, образуемые при выстреле.

Обеспечение видимости в тумане и дыму

По сравнению с камерами видимого диапазона, SWIR InGaAs камеры обеспечивают великолепное качество съемки в условиях запыленности, тумана или дыма (см. Рисунок 2). При наличии источника огня, он может быть легко локализован и обнаружен такими камерами.



Рисунок 2.

Снимок камеры видимого диапазона

Снимок SWIR InGaAs камеры

Воздушная разведка, дистанционное зондирование и обзорное наблюдение

Небольшие потребляющие мало энергии и легкие SWIR InGaAs камеры могут устанавливаться на самолетах и беспилотных летающих аппаратах (БЛА) с целью проведения разведки и наблюдения. Суперспектральные камеры могут быть использованы для обнаружения уникального спектрального следа военнзначимых предметов, например: камуфляжных материалов.

ПРИМЕНЕНИЕ ПРИБОРОВ SWIR ПРИ ПРОВЕДЕНИИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Уникальное свойство молекул поглощать свет выявляется не только в среднем ИК диапазоне, но также в диапазоне короткого ИК, ближнего ИК и видимой части спектра. Следовательно, спектральный отклик можно также получать, принимая отраженный либо проведенный свет.

Спектроскопия не требует разрушения объекта, равно как и другой специальной подготовки и становится возможным быстрый и последовательный анализ как качественных, так и количественных параметров множества образцов по очереди.

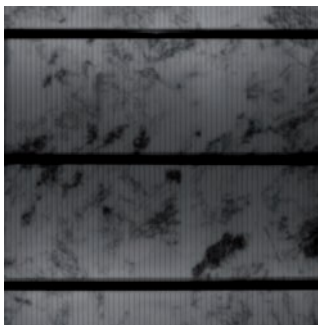
Применение:

- структурный анализ незнакомых веществ
- классификация веществ по количеству примесей на основе количественного анализа
- пробация основного материала без необходимости подготовительных мероприятий (химиометрика)
 - определение химических квалификационных значений
 - качественный анализ сельхозпродукции
 - сортировка пластиков

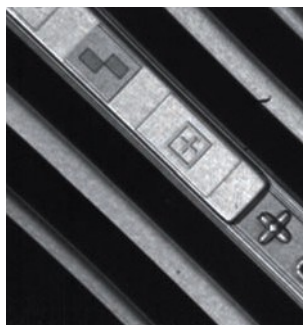
Тестирование проводников и солнечных батарей

В производстве кремниевых подложек и солнечных батарей на конечном этапе проверки качества и выявления микротрещин и дефектов литья используется явление электролюминесценции (ответная электрическому току эмиссия света). Как следствие, можно использовать явление фотолюминесценции (ответная засветке эмиссия света) на протяжении всего производственного процесса. Наиболее подходящими для этого являются SWIR камеры, так как эмитированный кремнием свет имеет пиковую длину волны 1150 нм, а квантовая эффективность сенсоров на основе InGaAs намного выше, чем у улучшенных камер ближнего ИК диапазона с использованием охлаждаемых и неохлаждаемых ПЗС и КМОП сенсоров, которые чувствительны к волнам до 1000 нм.

Ко всему прочему кремний не прозрачен для волн длиной до 1150 нм, поэтому SWIR камеры лучше всего подходят для проверки металлизированных покрытий и качества контактов на обратной стороне подложки.



Тестирование солнечных батарей



Тестирование полупроводников

ГРАЖДАНСКИЕ ОТРАСЛИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИБОРОВ SWIR

- Металлургия и стекольная промышленность: Термоскопия нагретых веществ (в диапазоне от **250 °С до 800 °С**)
- Медицина, наука и биология: Лазероскопия
- Полиграфия: проверка банкнот
- Проверка произведений искусства
- Расширение диапазона зрения



Проверка произведений искусства: обнаружение изображений под картинами



Рисунок 4а. Снимок картины Судный день The Last Judgment кисти Яна Провоста в SWIR, сделанный в Детройтском институте живописи, показывает первоначальный замысел художника и бережно вскрывает эскиз, лежащий под слоем масляных красок.

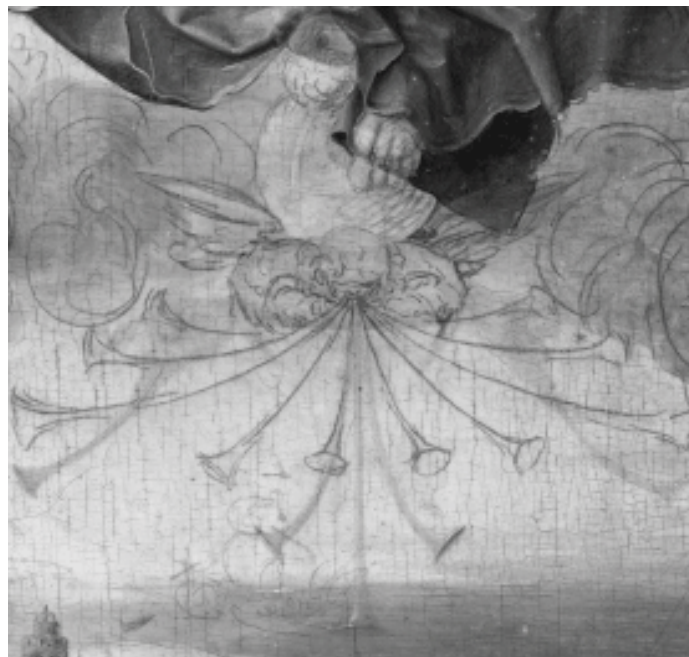


Рисунок 4б. Видны десять труб ниже архангела вместо 5 в окончательном варианте картины. Оказывается, что размещение прописанных труб вызвало тогда необходимость переместить парусник. Ступни сверху глобуса написаны по-другому, как задумывалось на эскизе.

Сенсоры ближнего и короткого ИК для приборов оптической когерентной томографии (ОКТ) внутренних органов высокого разрешения

Оптическая когерентная томография (ОКТ), методика низкокогерентной интерферометрии, прочно вошла в практику офтальмологии как неинвазивный клинический инструментальный для получения снимков высокого разрешения сетчатки глаза. Устанавливая значение центрального луча на уровне 1,05 нм, производители аппаратуры в настоящее время разрабатывают системы для получения снимков более глубокой области кровеносных сосудов глаза (так называемой хороидальной), лежащей позади сетчатки с целью диагностирования заболеваний и мониторинга проводимой терапии. В настоящее время ведутся работы по внедрению метода в эндоскопии, как пищевода, так и артерий, и в стоматологии.

Сквозь стекло...

И в завершение: основной преимущественной характеристикой SWIR зрения, которое не реализуется никаким другим прибором, является способность «видеть» сквозь стекло. Это значит, что с SWIR камерами возможно использование обычных, бюджетных объективов практически для всех применений, кроме самых требовательных. В большинстве случаев нет необходимости оснащать SWIR камеры специальной дорогой оптикой или стойкими к внешним воздействиям корпусами, что делает их пригодными к широкому использованию в различных отраслях. Так же данная характеристика позволяет монтировать коротковолновые ИК камеры внутри защитных окон, делая работы по размещению видеосистемы на желаемой платформе чрезвычайно простыми.

ВЫВОДЫ

SWIR приборы, производимые КБ «ВиТА» (Россия), позволяют выполнять ранее невыполнимые задачи, и выгодно отличаются от присутствующих на современном рынке камер SWIR диапазона иностранных производителей в сегменте серийного коммерческого приборостроения. Несмотря на то, что данное направление является инновационным для отечественного производителя, КБ «ВиТА» полностью освоила серийное производство SWIR камер с разрешением 320 x 256 пикселей и уже завершила проектирование SWIR камеры с большим разрешением. Так как продукция КБ «ВиТА» является разработкой отечественного производителя, она имеет неоспоримое преимущество перед зарубежными аналогами в части стоимости и является конкурентоспособной по техническим характеристикам, сопутствующему обеспечению и универсальным интеграционным возможностям.