

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ OPTICAL ENGINEERING

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-5-619-625

УДК 621.375; 551.51

Особенности изображений воды, льда, снега, предметов и человека, формируемых гибридной телевизионной камерой в ближнем инфракрасном диапазоне

Михаил Рувимович Айнбунд¹, Артем Александрович Егоренков²✉, Андрей Владимирович Пашук³

^{1,2,3} АО «ЦНИИ «Электрон», Санкт-Петербург, 194223, Российская Федерация

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, 197376, Российская Федерация

¹ m.ainbund@niielectron.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2710-0530>

² herzdp@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-0084-564X>

³ a.pashuk@niielectron.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3276-3059>

Аннотация

Предмет исследования. В последнее время все большее распространение приобретают телевизионные камеры, основанные на работе в ближнем инфракрасном диапазоне длин волн. Преимуществом съемки в ближнем инфракрасном диапазоне является возможность наблюдения за объектами в условиях низкой освещенности и в сложных погодных условиях. В таких камерах могут быть использованы гибридные сенсоры, которые объединяют в едином вакуумном объеме инфракрасный фотокатод и чувствительную к электронам матрицу на основе кремния. В работе исследованы возможности одного из последних образцов подобной камеры, созданной в АО «ЦНИИ «Электрон». **Метод.** Исследованы изображения человека, воды, льда, снега и других предметов в диапазоне длин волн 0,95–1,7 мкм. Изображения получены с помощью телевизионной камеры, созданной на основе гибридного телевизионного инфракрасного сенсора, состоящего из расположенных параллельно друг другу в едином вакуумном объеме фотокатода и кремниевой матрицы прибора с переносом заряда. Освещение объектов съемки в ближнем инфракрасном диапазоне осуществлено лампой непрерывного спектра с максимумом регистрируемого излучения на длине волны 1,55 мкм. **Основные результаты.** Выполнено сравнение изображений, зарегистрированных в ближнем инфракрасном диапазоне и в видимой области спектра. Дано объяснение отличий изображения снега от изображений воды и льда в ближнем инфракрасном диапазоне. В качестве примера продемонстрировано различие светопередачи поверхностей материалов для водолазного снаряжения, таких как неопрены с покрытием и с открытой порой. **Практическая значимость.** Благодаря наличию в ближнем инфракрасном диапазоне существенного контраста изображений различных предметов на поверхности воды и льда, возможно создание эффективной системы поиска на воде. Рассмотрены преимущества предложенной системы визуального поиска по сравнению с иными системами, в том числе пассивными системами и системами, работающими в среднем и дальнем инфракрасном диапазонах. В ходе работы положено начало развития возможности использования новой камеры в создании эффективной системы поиска предметов и людей на водных поверхностях.

Ключевые слова

гибридная телевизионная камера, ИК фотокатод, ближний ИК диапазон, предметы в ИК диапазоне, поиск на воде

Ссылка для цитирования: Айнбунд М.Р., Егоренков А.А., Пашук А.В. Особенности изображений воды, льда, снега, предметов и человека, формируемых гибридной телевизионной камерой в ближнем инфракрасном диапазоне // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 5. С. 619–625. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-5-619-625

Features of images of water, ice, snow, objects and a human formed by a hybrid television camera in the near-infrared range

Mikhail R. Ainbund¹, Artyom A. Egorenkov²✉, Andrei V. Pashuk³

^{1,2,3} JSC "NRI Electron", Saint Petersburg, 194223, Russian Federation

² Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, 197376, Russian Federation

¹ m.ainbund@nrielectron.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2710-0530>

² herzdp@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-0084-564X>

³ a.pashuk@nrielectron.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3276-3059>

Abstract

Recently, television cameras operating in the near-infrared range have become increasingly widespread. The advantage of shooting in the short wave infrared range is the ability to observe objects in low light and difficult weather conditions. Such cameras can use hybrid sensors that consist of an infrared photocathode and an electron-sensitive matrix based on silicon in a single vacuum volume. The paper investigates the capabilities of one of the latest samples of a similar camera, created at JSC "NRI Electron". The images of a human, water, ice, snow and other objects in the wavelength range of 0.95–1.7 microns have been analyzed. The images were taken using a television camera based on a hybrid television infrared sensor, which consists of a photocathode and a silicon charge-coupled device in proximity range to each other in a single vacuum volume. Illumination of the objects in the near-infrared range was produced by a continuous spectrum lamp with a maximum of the detected radiation at a wavelength of 1.55 μm . The authors compared the images obtained in the near-infrared range with the ones obtained in the visible region. An explanation is given for the differences between snow images and water and ice images in the near-infrared range. As an example, the difference in light transmission between the surfaces of materials for diving equipment, such as coated and open cell neoprene, is demonstrated. Due to a significant contrast shown in the near-infrared range by images of various objects on the surface of water and ice, it is possible to create an effective system for searching objects on the water. The paper discusses the advantages of the proposed visual search system compared to other systems, including passive systems and the ones operating in the MWIR and LWIR. The research outlined the prospects of using the new camera for building an effective search system for objects and people on water surfaces.

Keywords

hybrid television camera, SWIR photocathode, SWIR range, objects in SWIR range, search on water

For citation: Ainbund M.R., Egorenkov A.A., Pashuk A.V. Features of images of water, ice, snow, objects and a human formed by a hybrid television camera in the near-infrared range. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 5, pp. 619–625 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-5-619-625

Введение

В настоящее время все большее распространение приобретают камеры, работающие в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне длин волн 0,95–1,7 мкм. Одним из преимуществ съемки в данном диапазоне является возможность наблюдения объектов в условиях низкой освещенности в сложных погодных условиях. В таких камерах в качестве сенсора могут использоваться твердотельные КМОП-матрицы на основе InGaAs или гибридные сенсоры, которые объединяют в едином вакуумном объеме ИК фотокатод и чувствительную к электронам матрицу на основе кремния [1, 2]. Преимущества гибридных сенсоров — более чем в 30 раз большая чувствительность (за счет ускорения фотоэлектронов электрическим полем между фотокатодом и матрицей) и возможность работы в импульсном режиме с временем стробирования менее 100 нс. В работе [2], посвященной исследованию возможностей камер M102 и M506 фирмы Intevac (США) на основе гибридных сенсоров, приведены результаты их применения для съемки различных объектов, в том числе на расстояниях до 27 км.

Цель работы — исследование возможностей образца камеры на основе гибридного сенсора, созданной в АО «ЦНИИ «Электрон». Результаты работы могут служить началом создания эффективной системы поиска предметов и людей на водных поверхностях с ис-

пользованием камер ближнего ИК диапазона на основе гибридных сенсоров.

Описание прибора и условий проведения съемки

Изображения в ближнем ИК диапазоне получены с помощью камеры, созданной на основе гибридного телевизионного ИК сенсора. Сенсор совмещает в едином вакуумном объеме фотокатод ближнего ИК спектрального диапазона и чувствительную к электронам матрицу прибора с переносом заряда (ППЗ) на основе кремния. Фотокатод и матрица ППЗ расположены параллельно относительно друг друга на близком расстоянии (рис. 1). При засветке входного окна прибора излучением ($h\nu$) фотокатод эмитирует электроны (e^-), которые под действием ускоряющего напряжения бомбардируют утоненную матрицу ППЗ. Матрица, обращенная к фотокатоду обратной поверхностью, свободной от элементов разводки, для минимизации «слепых» областей, регистрирует поверхностное распределение электронов, формируя изображение объекта. Использованный в работе образец гибридного сенсора при номинальных управляющих напряжениях имеет квантовый выход фотокатода $QE(1,55 \text{ мкм}) = 18 \%$ и расчетное значение чувствительности $S(1,55 \text{ мкм}) \approx 20 \text{ А/Вт}$. Аналогичный образец сенсора, имеющий меньшую чувствительность, описан в работе [1].

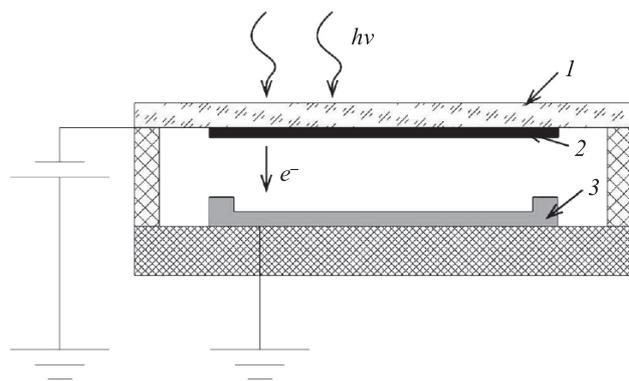


Рис. 1. Схема гибридного прибора: 1 — входное окно; 2 — фотокатод; 3 — чувствительная к электронам матрица прибора с переносом заряда

Fig. 1. Scheme of the hybrid device: 1 — input window; 2 — photocathode; 3 — electron bombarded charge-coupled device

В качестве осветителя в ближнем ИК диапазоне использована ИК лампа непрерывного спектра ЭРА ИКЗК 220 В, 250 Вт, расположенная на расстоянии 2–3 м от объекта съемки. Паспортная температура свечения лампы $T = 1277$ К определяет максимум излучения на длине волны 2,3 мкм. На рис. 2, а показано спектральное распределение излучения лампы R , рассчитанное по формуле Планка [3]:

$$R(\lambda, T) = \frac{1}{R_{\max}} \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1},$$

где h — постоянная Планка; c — скорость света; λ — длина волны; k — постоянная Больцмана.

Спектральная зависимость квантового выхода фотокаатода ИК сенсора приведена на рис. 2, б. Видно, что фотокатод имеет почти постоянную чувствительность в области 0,98–1,55 мкм и практически нечувствителен к облучению длинами волн более 1,7 мкм.

На рис. 2, с построена зависимость $QE(\lambda) \times R(\lambda)$, показывающая относительное спектральное распределение количества квантов, регистрируемых ИК сенсором при облучении лампой ЭРА ИКЗК. Видно, что основной вклад в изображение при облучении ИК лампой

вносят кванты с длинами волн в области 1,3–1,65 мкм, с максимумом на длине волны 1,55 мкм.

Чувствительность сенсора зависит от величины подаваемых напряжений на его контакты. Из-за большой интенсивности излучения ИК лампы для съемок было достаточно небольшой чувствительности сенсора, и съемки велись при небольших управляющих напряжениях на его контактах. В связи с этим квантовый выход ИК фотокаатода во время съемок был приблизительно равен $QE(1,55 \text{ мкм}) \approx 1\%$, а чувствительность ИК сенсора, зависящая от ускоряющего электроны напряжения между фотокаатодом и матрицей — $S(1,55 \text{ мкм})$, была не более 1 А/Вт. Диафрагма объектива камеры была установлена на значениях, значительно уменьшающих его светопропускание.

Съемка изображений производилась в комнате без окон со стенами, окрашенными в черный цвет. Изображения в видимом диапазоне получены с помощью камеры с $20 \cdot 10^6$ пикселей при освещении комнаты потолочными люминесцентными лампами. Данные изображения представлены в черно-белом виде, как если бы они наблюдались при слабом освещении.

Полученные результаты изображений

В таблице представлены изображения, полученные в видимом и ближнем ИК диапазонах.

Обсуждение результатов

Сравнение изображений показывает слабое отражение и сильное поглощение воды в ближнем ИК диапазоне, вследствие чего в этом диапазоне она выглядит черной. Лед в ближнем ИК диапазоне также выглядит черным, а снег белым. Различные предметы, ткани, в том числе черные и мокрые, и плакированный неопрен (неопрен с покрытием, используемый в костюмах для дайвинга) выглядят белыми. В работе [2] показано, что суда и лодки на воде в ближнем ИК диапазоне также выглядят белыми. Объяснение результатов, полученных в настоящей работе, разного отражения льда и снега в ближнем ИК диапазоне найдено в данных Берлинского

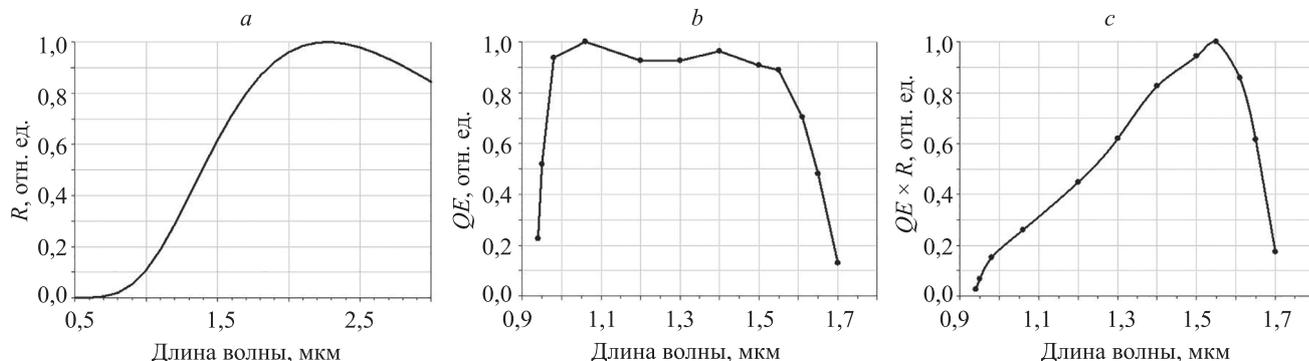
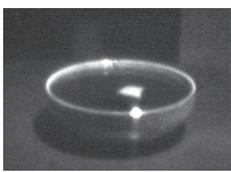


Рис. 2. Спектральное распределение излучения лампы ЭРА ИКЗК (а); спектральные зависимости квантового выхода фотокаатода инфракрасного сенсора (б) и количества квантов, регистрируемых инфракрасным сенсором при облучении лампой (с)

Fig. 2. Spectral distribution of radiation from the lamp (a); spectral dependence of the quantum efficiency of the IR sensor photocathode (b) and the number of quanta recorded by the IR sensor under irradiation with a lamp (c)

Таблица. Сравнение результатов изображений, полученных двумя способами
Table. Comparison of the images obtained in two ways

Вид изображения	Диапазон		Результат изображений
	Видимый	Ближний ИК	
Человек			В ближнем ИК диапазоне одежда выглядит белой, а открытые части тела — темные (угол освещения ИК лампой около 45°)
Снег при комнатной температуре			В ближнем ИК диапазоне снег выглядит белым. Серый цвет поверхности снега предположительно связан с его таянием при комнатной температуре. На тарелке не видно рисунка
Лед в тарелке на фоне из черной ткани			В ближнем ИК диапазоне лед черный, черная ткань фона белая, на тарелке не видно рисунка (только для снимков со льдом использована черная ткань в качестве фона)
Вода с кусочками неопрена			В видимом диапазоне вода прозрачная, неопрен черный. В ближнем ИК диапазоне вода черная, неопрен с покрытием белый, неопрен с открытой порой — черный (его изображение сливается с водой). ИК лампа расположена сверху, поэтому вертикальные глянцевые стенки тарелки не отражают в сторону объектива и выглядят темными
Человек в шлеме из неопрена с покрытием (шлем дайвера) в маске с трубкой			В ближнем ИК диапазоне неопрен с покрытием белый, маска и трубка черные. Одежда темного цвета выглядит белой
Человек в шлеме из неопрена без покрытия (неопрен с открытой порой) в маске с трубкой			В ближнем ИК диапазоне неопрен с открытой порой не отражает излучение, выглядит черным. Неопрен с открытой порой используется значительно реже, чем неопрен с покрытием (чаще при погружениях в холодной воде и фридайвинге — дайвинге на задержке дыхания)
Мокрая ткань в воде			В ближнем ИК диапазоне мокрая ткань выглядит белой, вода черной

университета имени Гумбольдта. На рис. 3 изображены спектральные характеристики отражения льда, крупнозернистого и мелкозернистого снега, снятые с помощью орбитальных спутников Земли.

Из рис. 3 видно, что отражение льда и снега сильно отличаются, в том числе в ближнем ИК спектральном диапазоне. Так как в исследованиях авторов настоящей работы источник света обладает широким спектром, и спектральная зависимость количества квантов, регистрируемых ИК сенсором (рис. 2, с), имеет равномерный подъем от 1 до 1,55 мкм, то количество отраженных от снега квантов, регистрируемых ИК сенсором значительно, и снег на снимках выглядит белым. В случае использования в качестве источника света монохроматического источника света — лазера с длиной волны 1,55 мкм (на этой длине волны кривые отражения снега имеют минимум и максимально приближаются к кривой отражения льда), согласно рис. 3, изображение крупнозернистого снега станет черным, а мелкозернистого снега черным или темно-серым.

Благодаря существенному контрасту в изображениях различных предметов на поверхности воды и льда в ближнем ИК диапазоне, может быть создана система поиска на воде. Данная система должна быть активной, т. е. с подсветкой поверхности воды мощными импульсами лазера и приемом отраженных сигналов излучения при помощи телевизионной камеры на основе гибридного сенсора, чувствительного в ближнем ИК диапазоне. Освещение предполагается осуществлять импульсами лазера на базе кристалла алюминиевого граната, легированного неодимом (Nd:YAG). Длина

волны лазера 1,55 мкм, предполагаемая световая мощность в импульсе 20–50 мДж. Данный сенсор, имея внутреннее усиление, в активном режиме поиска имеет в 20–30 раз большую чувствительность по сравнению с твердотельными аналогами, работающими в этом спектральном диапазоне. Это должно позволить системе на порядок повысить дальность обнаружения объектов и, соответственно, увеличить эффективность поиска. Система будет обеспечивать синхронизованный прием отраженного излучения импульсов лазера. В данном режиме изображение объекта будет наиболее четким и контрастным. Метод наблюдения «со стробированием» позволяет наблюдать объект через пелену тумана на больших расстояниях, где работа пассивных систем безрезультативна. Вода, имея слабое отражение на выбранной длине волны, выглядит черной, одежда и различные предметы, как правило, белые. Освещение лазером позволит системе работать «со стробированием» независимо от условий внешнего освещения. Так как длина волны 1,55 мкм безопасна для сетчатки глаза [2, 4, 5], мощный импульс лазера не причинит вреда зрению людей и животных. Атмосфера имеет в заданном спектральном диапазоне окно прозрачности [4, 5], что позволяет системе при хороших погодных условиях проводить наблюдение крупных объектов (например, судов) на расстоянии до 30 км [2]. Наиболее перспективно оснащать данной системой самолеты, так как они могут быстро достичь нужной территории поиска, которая может находиться за несколько тысяч километров от места базирования. Самолет, летящий ниже уровня облаков на расстоянии 0,5–2 км от поверх-

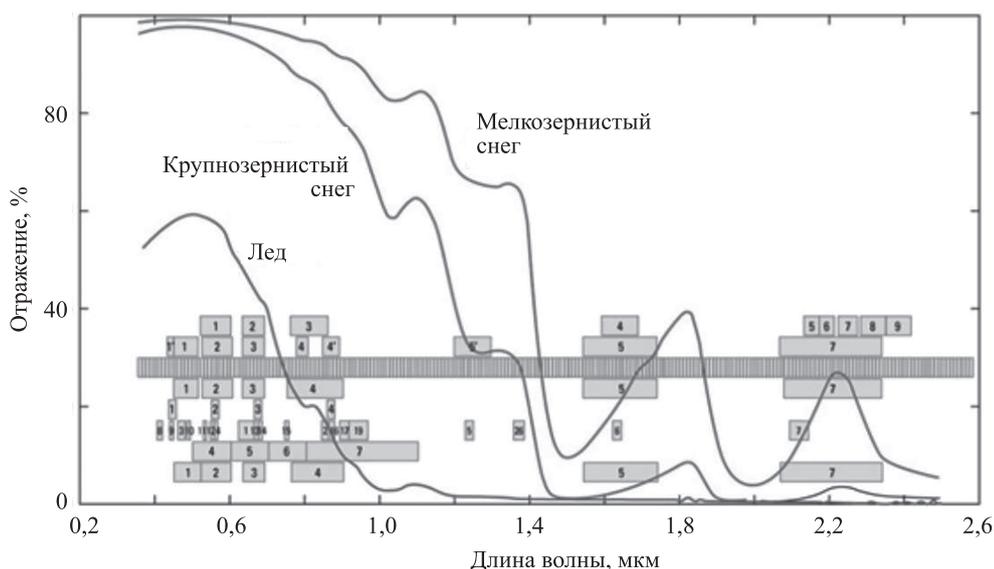


Рис. 3. Спектральные характеристики отражения ледникового льда, крупнозернистого и мелкозернистого снега. Спектральные полосы выбранных сенсоров на спутниках Земли показаны серым цветом. Числа в серых прямоугольниках относятся к соответствующим номерам полос каждого сенсора¹

Fig. 3. Spectral characteristics of the reflection of glacial ice, coarse-grained and fine-grained snow

The spectral bands of the selected sensors on Earth satellites are shown in gray. The numbers in the gray boxes refer to the corresponding band numbers for each sensor¹

¹ Spectral Reflectance of Earth Surface Features [Электронный ресурс]. URL: http://gsp.humboldt.edu/OLM/Courses/GSP_216_Online/lesson2-1/reflectance.html (дата обращения: 30.04.2021).

ности воды, позволит системе за сутки отсканировать территорию площадью ориентировочно до 30 тыс. км². Поиск с высоты самолетом выигрывает по сравнению с поисками при помощи судов еще тем, что заметить среди больших волн какой-либо предмет, дайвера или небольшую лодку на поверхности воды очень трудно.

Во время погружений дайверов в открытом море или океане происходят случаи, когда дайв-бот в силу различных причин уходит обратно на базу, в том числе иногда по ошибке, без кого-либо из участников погружения. Инциденты с потерей дайверов редки, однако они происходят^{1,2}. Повышенной опасности подвергаются не только дайверы. Пропадают рыбаки, каякеры, катающиеся на SUP-досках, любители зимней рыбалки, которые под воду не погружаются, но могут быть унесены в море на значительные расстояния. В интернете можно найти большое количество реальных фактов таких событий^{3,4,5,6}. Россия имеет большие морские границы, однако данная система могла бы использоваться для оказания услуг поиска также на международном уровне или продаваться в готовом виде на экспорт. Возможно использование системы для поиска людей при кораблекрушении. Закон Мерфи (если что-то плохое может случиться, оно обязательно случится) как раз за создание такой системы.

Имеющиеся в настоящее время твердотельные приемники изображения, чувствительные в ближнем, среднем и дальнем ИК диапазонах, не имеют внутреннего усиления, что ограничивает чувствительность телевизионных систем на их основе. Интенсивность теплового излучения человека, попавшего в воду, уменьшается стремительно и через несколько минут, в силу большой теплопроводности воды, сравнивается с ее тепловым излучением. И поэтому пассивные системы поиска

людей в воде, созданные на базе приемников изображения, работающих в среднем и дальнем ИК спектральных диапазонах, скорее всего, будут малоэффективны. Эффективность пассивных систем поиска людей, находящихся на лодках, досках, льдинах, с использованием этих диапазонов ограничена, как правило, малой поверхностью тела, которая может излучать интенсивный ИК сигнал, так как человек в данных условиях вынужден максимально беречь тепло и оставлять открытым из крупных частей тела только лицо, которое, как раз по известному закону, может быть повернуто не в сторону приемника излучения.

Создание активной системы подразумевает наличие мощного источника импульсного излучения (лазера) с длиной волны более 1,4 мкм [2]. Информации о наличии лазеров для среднего и дальнего ИК диапазонов, сопоставимых по удобству применения, мощности и цене с лазером Nd:YAG, пока нет.

В работе [5] отмечено, что длина волны 0,355 мкм также безопасна для зрения, однако использование мощного лазера с такой длиной волны требует осторожности, так как она относится к области мягкого ультрафиолета, и данные кванты обладают достаточно большой энергией, чтобы быть причиной интенсивной люминесценции [6]. Под воздействием ультрафиолета флюоресцируют многие ткани, хрусталик, роговица глаза, ногти, зубы, листья растений, природная вода и др. [6–8]. Квантовый выход люминесценции различных веществ, в том числе природной и морской воды, может достигать нескольких процентов [8]. Спектр люминесценции сдвинут в сторону больших длин волн относительно длины волны, вызвавшей эту люминесценцию. По этой причине люминесценция, вызванная облучением мощного лазера с $\lambda = 0,355$ мкм, может сформировать интенсивную вспышку излучения в спектральном диапазоне уже опасном для зрения.

Заключение

Впервые продемонстрирована возможность получения изображений в ближнем инфракрасном диапазоне при помощи отечественного образца камеры на основе гибридного сенсора, состоящего из расположенных параллельно друг другу в едином вакуумном объеме фотокатода, чувствительного в ближнем инфракрасном диапазоне, и кремниевой матрицы прибора с переносом заряда, чувствительной к электронам и обращенной к фотокатоду обратной стороной. Показаны возможные преимущества такой камеры при ее использовании в системе поиска на воде в активном режиме «со стробированием», совместно с импульсным лазером подсветки на $\lambda = 1,55$ мкм. Преимуществом такого типа сенсоров, по сравнению с твердотельными функциональными аналогами, являются в десятки раз большая чувствительность за счет ускорения фотоэлектронов и работа в импульсном режиме с временами стробирования менее 100 нс.

¹ Аквалангист из Приморья выжил после двух суток в открытом море при температуре +8 [Электронный ресурс]. URL: https://1tv-ru.turbopages.org/1tv.ru/s/news/2019-11-12/375592-akvalangist_iz_primorya_vyzhil_posle_dvuh_sutok_v_otkrytom_more_pri_temperature_8 (дата обращения: 30.04.2021).

² Группу SUP-серферов из Владивостока едва не унесло в открытое море [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vesti.ru/article/1543530> (дата обращения: 30.04.2021).

³ Российских дайверов в Египте бросили умирать в море, а искать стали спустя сутки [Электронный ресурс]. URL: <https://ura.news/news/15714> (дата обращения: 30.04.2021).

⁴ Вертолет МЧС пытается догнать сахалинцев, которых уносит в открытое море на SUP-бордах [Электронный ресурс]. URL: <https://astv.ru/news/criminal/2017-07-08-vertolet-mchs-pitaetsya-dognat-sahalintsev-kotorih-unosit-v-otkritoem-more> (дата обращения: 30.04.2021).

⁵ В Сочи спасли SUP-серфингиста, унесенного в море [Электронный ресурс]. URL: https://kuban.aif.ru/incidents/v_sochi_spasli_sup-serfingista_unesennogo_v_more (дата обращения: 30.04.2021).

⁶ На Сахалине трех женщин и пятерых мужчин унесло в море на оторвавшейся льдине [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rosbalt.ru/russia/2021/01/20/1882937.html> (дата обращения: 30.04.2021).

Литература

1. Айнбунд М.Р., Гарбуз А.В., Дементьев А.А., Левина Е.Е., Миронов Д.Е., Пашук А.В., Смирнов К.Я., Чернова О.В. Гибридные высокочувствительные цифровые телевизионные приборы для УФ и ИК спектральных диапазонов // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 6. С. 514–517.
2. Göhler B., Lutzmann P. Review on short-wavelength infrared laser gated-viewing at Fraunhofer IOSB // *Optical Engineering*. 2017. V. 56. N 3. P. 031203. <https://doi.org/10.1117/1.OE.56.3.031203>
3. Планк М. Теория теплового излучения. М.: КомКнига, 2005. 204 с.
4. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. М.: Советское радио, 1978. 400 с.
5. Белов М.Л., Городничев В.А., Кравцов Д.А., Черпакова А.А. Выбор безопасных для зрения длин волн излучения в УФ и ближнем ИК спектральных диапазонах для задач дистанционного зондирования // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2016. № 2. С. 105–122. <https://doi.org/10.7463/0216.0832497>
6. Белов М.Л., Черпакова А.А., Альков С.В., Городничев В.А. Выбор информационных каналов для лазерного контроля состояния растений при использовании для возбуждения флуоресценции безопасной длины волны излучения // Интернет-журнал «Науковедение». 2017. Т. 9. № 3. С. 25.
7. Бубнова И.А., Семчишен В.А., Свиридов А.П., Хайдуков Е.В., Новиков И.А., Петров С.Ю., Волжанин А.В. Люминесценция тканей глаза при механических нагрузках // Точка зрения. Восток–Запад. 2018. № 4. С. 84–86. <https://doi.org/10.25276/2410-1257-2018-4-84-86>
8. Горшкова О.М., Пацаева С.В., Федосеева Е.В., Шубина Д.М., Южаков В.И. Флуоресценция растворенного органического вещества природной воды // Вода: химия и экология. 2009. № 11. С. 31–37.

Авторы

Айнбунд Михаил Рувимович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, АО «ЦНИИ «Электрон», Санкт-Петербург, 194223, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-2710-0530>, m.ainbund@niielectron.ru

Егоренков Артем Александрович — инженер, АО «ЦНИИ «Электрон», Санкт-Петербург, 194223, Российская Федерация; аспирант, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, 197376, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-0084-564X>, herzdp@gmail.com

Пашук Андрей Владимирович — начальник отдела, АО «ЦНИИ «Электрон», Санкт-Петербург, 194223, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-3276-3059>, a.pashuk@niielectron.ru

Статья поступила в редакцию 27.06.2021
Одобрена после рецензирования 09.08.2021
Принята к печати 17.09.2021

References

1. Ainbund M.R., Garbuz A.V., Dement'ev A.A., Levina E.E., Mironov D.E., Pashuk A.V., Smirnov K.J., Chernova O.V. Hybrid high sensitive digital TV devices for UV and IR spectral ranges. *Advances in Applied Physics*, 2018, vol. 6, no. 6, pp. 514–517. (in Russian)
2. Göhler B., Lutzmann P. Review on short-wavelength infrared laser gated-viewing at Fraunhofer IOSB. *Optical Engineering*, 2017, vol. 56, no. 3, pp. 031203. <https://doi.org/10.1117/1.OE.56.3.031203>
3. Planck M. *Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung*, Leipzig, 1921, 224 p. (in German)
4. Kriksunov L.Z. *Reference Book on Basics of Infrared Mechanics*. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1978, 400 p. (in Russian)
5. Belov M.L., Gorodnichev V.A., Kravtsov D.A., Cherpakova A.A. Choice of Eye-Safe Radiation Wavelength in UV and Near IR Spectral Bands for Remote Sensing. *Science and Education of Bauman MSTU*, 2016, no. 2, pp. 105–122. (in Russian). <https://doi.org/10.7463/0216.0832497>
6. Belov M.L., Cherpakova A.A., Alykov S.V., Gorodnichev V.A. Search of informative bands for plant condition laser monitoring if using for fluorescence excitation of eye-safe wavelength. *Naukovedenie*, 2017, vol. 9, no. 3, pp. 25. (in Russian)
7. Bubnova I.A., Semchishen V.A., Sviridov A.P., Khaydukov E.V., Novikov I.A., Petrov S.Yu., Volzhanin A.V. The luminescence of the eye tissues under mechanical stresses. *Tochka zrenija. Vostok–Zapad*, 2018, no. 4, pp. 84–86. (in Russian). <https://doi.org/10.25276/2410-1257-2018-4-84-86>
8. Gorshkova O.M., Patsaeva S.V., Fedoseeva E.V., Shubina D.M., Juzhakov V.I. Fluorescence of organic matter dissolved in natural water. *Water: Chemistry and Ecology*, 2009, no. 11, pp. 31–37. (in Russian)

Authors

Mikhail R. Ainbund — PhD, Senior Researcher, JSC “NRI Electron”, Saint Petersburg, 194223, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-2710-0530>, m.ainbund@niielectron.ru

Artyom A. Egorenkov — Engineer, JSC “NRI Electron”, Saint Petersburg, 194223, Russian Federation; Postgraduate, Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, 197376, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-0084-564X>, herzdp@gmail.com

Andrei V. Pashuk — Head of Department, JSC “NRI Electron”, Saint Petersburg, 194223, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-3276-3059>, a.pashuk@niielectron.ru

Received 27.06.2021
Approved after reviewing 09.08.2021
Accepted 17.09.2021



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»