

- налов акустической эмиссии // Наука та інновації. — 2010. — № 3. — С. 20—29. [Skalsky V. R., Klym B. P., Plakhtiy R. M., et al. Portable system SKOP-8M for measurement and analysis of acoustic emission signals // Science and Innovation. — 2010. — № 3. — P. 20—29 (In Russian)]
3. Недосека С. А., Овсиенко М. А. Особенности обработки данных акустической эмиссии при использовании сложных множественных локационных антенн // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. — 2012. — № 2. — С. 7—12. [Nedoseka S. A., Ovsienko M. A. Features of processing acoustic emission data at application of complex and multiple location arrays // Technical diagnostics and non-destructive testing. — 2012. — № 2. — P. 7—12. (In Russian)]
 4. Пат. РФ № 2396557, МПК G01N 29/14. Многоканальное акустико-эмиссионное устройство / Л. Н. Степанова, С. И. Кабанов, Е. Ю. Лебедев и др. // 2010. — Бюл. — № 22. [Pat. RF № 2396557, G01N 29/14. Multichannel acoustic-emission device / L. N. Stepanova, S. I. Kabanov, E. Y. Lebedev, et al // Bulletin. — 2010. — № 22. (In Russian)]
 5. Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н., Лебедев Е. Ю. и др. Использование микропроцессорных акустико-эмиссионных систем при ресурсных испытаниях самолета // Дефектоскопия. — 2013. — № 8. — С. 35—42. [Seryeznov A. N., Stepanova L. N., Lebedev E. Y., et al. Use of microprocessor acoustic emission systems during aircraft endurance testing // Flaw Detection. — 2013. — № 8. — P. 34—42. (In Russian)]
 6. Степанова Л. Н., Кабанов С. И., Рамазанов И. С. и др. Диагностический сварочный блок для контроля дефектов многопроходной сварки // Датчики и системы. — 2014. — № 4. — С. 24—29. [Stepanova L. N., Kabanov S. I., Ramazanov I. S., et al. Welding diagnostic unit application for multi-pass constructions welding quality control // Sensors and Systems. — 2014. — № 4. — P. 24—29. (In Russian)]

УДК 681.786.23:551.521.32

О НЕКОТОРЫХ ПЕРСПЕКТИВНЫХ РАЗРАБОТКАХ ПРИБОРОВ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ, ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ В КОРОТКОВОЛНОВОЙ ОБЛАСТИ ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА

ON SOME PROMISING DEVELOPMENTS OF NIGHT VISION DEVICES, SENSIBLE IN NIR SUB-BAND OF INFRARED SPECTRUM

Смагин Михаил Сергеевич

канд. техн. наук, доцент

E-mail: smagin@mniti.ru

**ЗАО “Московский научно-исследовательский
телевизионный институт”, Москва**

Аннотация: Дан обзор особенностей коротковолнового участка инфракрасного спектра с точки зрения его перспективности для решения задач ночного видения. В частности рассматривается явление собственного свечения атмосферы Земли, имеющего пик яркости на данном участке. Представлены существующие и перспективные технологии построения приборов ночного видения, чувствительных на данном участке электромагнитного спектра. Сделан вывод о перспективности данного направления и необходимости организации соответствующих исследований в России.

Ключевые слова: приборы ночного видения, инфракрасные приборы, нанотехнология, электроника на новых физических принципах, органическая электроника, собственное свечение атмосферы.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно общепринятому определению, прибором ночного видения (ПНВ) называется устройство, предназначенное для наблюдения в условиях недостаточной освещенности. В зависимости от спектральной области чувствительности их традиционно разделяют на два класса. Первый

Smagin Mikhail S.

Ph. D. (Tech.), Associate Professor

E-mail: smagin@mniti.ru

**Moscow Television Research Institute, CJSC,
Moscow**

Abstract: This article presents a review of NIR sub-band features according to it's possible availability for night vision devices. The particular attention is given to atmospheric airglow phenomena, which has intensity peak in this sub-band. The now used and promising technologies of night vision devices, sensible for this sub-band, are considered. The conclusion is made about promising character of this field and the necessity of performing the research and development works on this field in Russia.

Keywords: night vision devices, infrared devices, nanotechnology, electronics on new physical principles, organic electronics, atmospheric airglow.

класс — низкоуровневые телевизионные системы, чувствительные к электромагнитным волнам видимого диапазона, амплитуда которых слишком мала для их эффективного восприятия зрительной системой человека. Второй класс — инфракрасные (ИК) системы, чувствительные в инфракрасной области электромагнитного спектра.

К ИК-области спектра относятся электромагнитные волны с длиной волны от 0,75 до 1000 мкм, однако условия распространения электромагнитных волн данной области спектра в атмосфере очень сильно меняются в зависимости от длины волны. Области ИК-спектра, для которых характерно слабое затухание электромагнитных волн при прохождении в атмосфере, называются окнами прозрачности. Традиционно выделяют окна прозрачности на длинноволновом (в диапазоне длин волн от 7 до 14 мкм), средневолновом (в диапазоне длин волн от 3 до 5 мкм), коротковолновом (от 1,4 до 3,0 мкм) и ближнем к видимому (в диапазоне длин волн от 0,75 до 1,4 мкм) участках ИК-спектра [1].

С точки зрения задач ночного видения наиболее информативными участками инфракрасного диапазона являются длинно- и средневолновой, называемые также тепловизионными. Данные участки удобны тем, что позволяют создавать системы ночного видения, работающие по пассивному принципу и регистрирующие собственное инфракрасное излучение наблюдаемых объектов. Длинноволновая область эффективна для наблюдения объектов со сравнительно низкими собственными температурами (от единиц до нескольких сотен градусов Цельсия), в частности живых существ, а высокотемпературные объекты с температурами порядка 1000 °С и выше ярче проявляются на средневолновом участке.

Коротковолновой участок считается менее перспективным с точки зрения задач ночного видения в силу ряда ограничений. Основным из них является необходимость организации подсветки наблюдаемой сцены от внешнего источника. Для этих целей в настоящее время используются инфракрасные источники излучения на основе инфракрасных фильтров или светодиодов.

Однако именно коротковолновой участок в настоящее время вызывает большой интерес исследователей и разработчиков ПНВ ввиду того, что современные научные достижения позволили задействовать естественный источник подсветки, активный в данной области ИК-диапазона. Речь идет о собственном излучении атмосферы Земли [2].

В предлагаемой статье дается обзор современных разработок приборов ночного видения, в том числе использующих нанотехнологии и электронику на новых физических принципах, чувствительных в области максимума собственного излучения атмосферы Земли.

СОБСТВЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

Собственное свечение атмосферы Земли — давно известное и хорошо изученное природное явление. Его причиной является комплекс физических и химических процессов, протекающих в атмосфере при ее взаимодействии с высокоионизированными частицами, испускаемыми Солнцем (солнечный ветер).

Спектральная характеристика собственного излучения атмосферы имеет ряд максимумов в инфракрасной области электромагнитного спектра. График распределения интенсивности собственного свечения в ближней ИК-области спектра, выраженной в количестве фотонов, излучаемых областью неба, соответствующей телесному углу в 1 стерadian, на участок поверхности площадью 1 м^2 за секунду, описанный в научной литературе, представлен на рис. 1 [3].

Особое внимание на представленном графике следует обратить на область от 1,4 до 1,8 мкм, поскольку в ней наблюдается максимум интенсивности собственного излучения атмосферы в ближнем инфракрасном участке электромагнитного диапазона. Примечательно, что на данный участок приходится также окно прозрачности атмосферы, что позволяет атмосферному излучению распространяться на большие расстояния.

Данная особенность позволяет использовать собственное излучение атмосферы в качестве естественного источника подсветки для ПНВ. Приборы, чувствительные в данной области, могли бы работать в пассивном режиме без использования источников искусственного освещения, что позволило бы улучшить как характеристики их незаметности (что особенно важно для систем военного назначения), так и характеристики автономности указанных ПНВ.

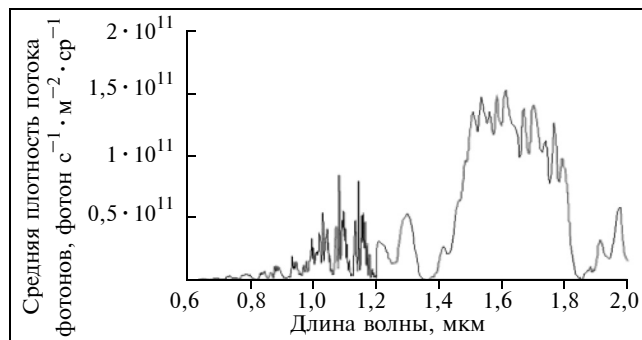


Рис. 1. График распределения интенсивности собственного свечения атмосферы в ближней инфракрасной области спектра

СОВРЕМЕННЫЕ ПНВ, ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ В ОБЛАСТИ 1,4...1,8 МКМ

В настоящее время существует несколько технологий создания устройств, чувствительных в ближней ИК-области электромагнитного спектра. На рис. 2 представлены графики зависимости квантовой эффективности от длины падающих электромагнитных волн для чувствительных элементов, построенных на основе различных технологий, совмещенные с графиком интенсивности собственного свечения атмосферы и графиком ее прозрачности для электромагнитных волн соответствующей длины [3, 4].

Как видно из графика, представленного на рис. 2, из всех современных технологий ПНВ область максимума собственного свечения атмосферы захватывают ПНВ на основе InGaAs и CdHgTe. Обе указанные технологии имеют свои достоинства и недостатки. Рассмотрим каждую из них более подробно.

Основным достоинством технологии на основе InGaAs является высокая чувствительность, характеризующаяся таким показателем, как удельная обнаружительная способность. Для ИК-устройств на основе InGaAs она достигает на интересующем нас участке электромагнитного диапазона значений вплоть до 10^{13} см \cdot Гц $^{1/2}$ ·Вт $^{-1}$ [5]. Однако такая высокая чувствительность достигается весьма дорогой ценой, связанной с несколькими существенными недостатками данной технологии. К таковым относятся очень высокая цена, связанная с иссяканием природных запасов индия и рас-

сеянностью галлия в земной коре, а также низкая экологичность производства, обусловленная применением ядовитого мышьяка.

Аналогичные недостатки, хотя в существенно меньшей степени, свойственны и другой технологии — CdHgTe. В данном случае проблема рассеянности касается кадмия, а ядовитости — ртути. В целом же, технология на основе CdHgTe при несколько более низкой, чем у InAsGa, обнаружительной способности, обеспечивает существенно более низкую стоимость производства. К тому же ее положительной особенностью является возможность варьировать характеристики области спектральной чувствительности путем изменения пропорционального соотношения между ртутью и кадмием.

Основным же недостатком технологии на основе CdHgTe является слабая связь между ртутью и теллуром, что увеличивает вероятность возникновения как поверхностных, так и структурных неоднородностей в чувствительных элементах, что негативно влияет как на погрешность при регистрации электромагнитного излучения, так и на процент брака при массовом производстве [6].

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РАЗРАБОТКИ ПНВ, ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ В ОБЛАСТИ 1,4...1,8 МКМ

В настоящее время за рубежом, в первую очередь в США и КНР, активно ведутся разработки устройств получения изображений, чувствительных в спектральном диапазоне 1,4...1,8 мкм и лишенных указанных выше недостатков. Наиболее

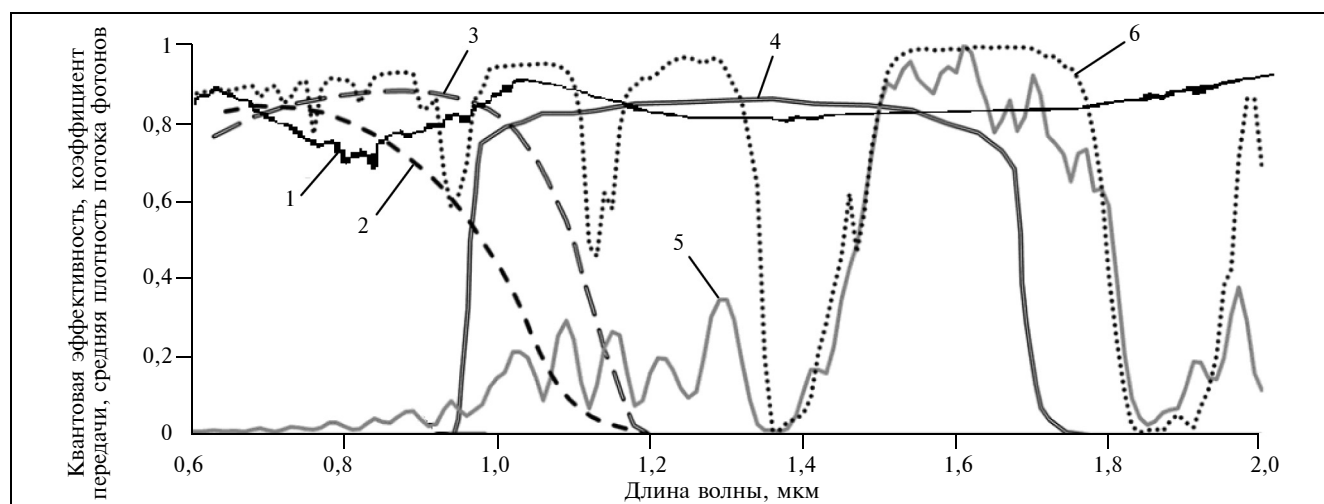


Рис. 2. Графики зависимости квантовой эффективности от длины волны для ПНВ, построенных на основе различных технологий: 1 — ПНВ на основе кадмия-ртути-теллура (CdHgTe); 2 — ПНВ на основе ПЗС-матриц; 3 — ПНВ на основе КМОП-элементов; 4 — ПНВ на основе индия-галлия-мышьяка (InGaAs); 5 — собственное свечение атмосферы; 6 — прозрачность атмосферы

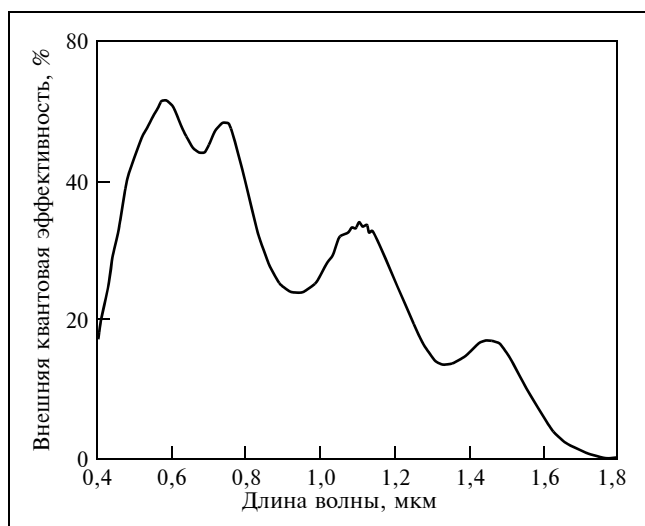


Рис. 3. Изменение внешней квантовой эффективности фотодиодных детекторов на основе ККТ сульфида свинца

перспективными в настоящее время являются разработки устройств на основе коллоидных квантовых точек сульфида свинца (PbS) и в области органических фоточувствительных устройств. Рассмотрим более подробно каждую из них.

Сульфид свинца благодаря своей дешевизне остается одним из наиболее распространенных материалов для ИК-датчиков. Главным недостатком технологии, реализуемой на его основе, является существенно (более чем в 10 раз) меньшая удельная обнаружительная способность в сравнении с технологиями на основе InGaAs и CdHgTe. Данный недостаток предполагается компенсировать путем формирования на его основе наночастиц, для которых свойственна повышенная физическая и химическая активность, обусловленная высоким отношением площади поверхности к объему. Подобные наночастицы принято называть квантовыми точками.

Коллоидными квантовыми точками (ККТ) называют полупроводниковые нанокристаллы с размером в диапазоне от 2 до 10 нм, состоящие из $10^3 \dots 10^5$ атомов, созданные на основе неорганических полупроводниковых материалов, покрытые слоем стабилизатора толщиной в одну молекулу, полученные методом коллоидного синтеза [7].

Особенностями устройств, использующих ККТ сульфида свинца, является их фоточувствительность в широком диапазоне длин электромагнитных волн, охватывающем видимый, ближний и частично коротковолновой ИК-диапазоны. График изменения внешней квантовой эффективнос-

ти фотодиодных детекторов на их основе представлен на рис. 3 [8].

Примечательно, что представленный график имеет локальный максимум квантовой эффективности в точке 1450 нм, лежащей в пределах интересующего нас диапазона 1,4...1,8 мкм.

Имеются сведения о разработке на основе ККТ сульфида свинца оптических устройств, построенных по схеме типа “бычий глаз”. Применение подобной оптической схемы позволило почти на 30 % повысить эффективность светопоглощения в узком диапазоне шириной 300 нм на коротковолновом участке ИК-спектра [9]. Это позволяет говорить о теоретической возможности создания оптических систем на основе ККТ сульфида свинца, чувствительных в области максимума собственного свечения атмосферы.

Однако фоточувствительные устройства на основе ККТ сульфида свинца обладают серьезным недостатком, существенно ограничивающим их практическое использование в современных электронных устройствах. Проблема состоит в том, что для достижения нужного режима работы фотодиодов на основе ККТ необходима подача на них большого (порядка 40 В) напряжения смещения, что неприемлемо для большинства применений [10].

Другим подходом к построению устройств, чувствительных в ближнем участке ИК-диапазона, является использование устройств органической электроники. Данные устройства строятся на основе органических полимерных соединений, обладающих свойствами полупроводников. Исследования в этой области начались в середине 1970-х годов прошлого столетия, а в 2000 г. ученым А. Хигеру, А. МакДиармиду и Х. Сиракава была присуждена Нобелевская премия в области химии с формулировкой “за открытие и разработку полимеров-проводников”.

Как можно судить по публикациям в открытой печати, в настоящее время А. Хигер участвует в разработках датчиков изображений коротковолнового ИК-диапазона [11]. Авторам статьи удалось получить гетерогенную структуру с использованием полимерного соединения PDDTT в качестве донора и полимерного соединения PC₆₀BM в качестве акцептора. Данная гетероструктура обладает фоточувствительностью в широком диапазоне длин волн от 300 до 1450 нм, а устройства на ее основе лишены недостатков устройств на основе ККТ.

Информации о продолжении данных работ в открытых источниках обнаружить не удалось, однако о современном уровне развития данного направления можно судить по косвенным фактам [12–14].

В частности, с февраля 2013 г. по март 2015 г. коллектив разработчиков фирмы CBRITE Inc, включавший в себя большую часть авторов статьи [11], совместно с Агентством передовых разработок Министерства обороны США (DARPA) и фирмой PARC работал над проектом “Изогнутый фотосенсор для смотрящих систем” (Curved Sensor for Vision Systems — CSVS). Заказчиком работы выступали ВВС США.

Согласно данным, представленным в сети Интернет, техническое задание проекта предполагало создание купольного матричного фотоприемника на основе полимерных датчиков, чувствительных в видимом, а также ближнем и коротковолновом ИК-диапазонах с размером матрицы 1280×1024 пикселя. При этом ставилась задача добиться значения показателя удельной обнаружительной способности не менее, чем $10^{12} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$, т. е. сопоставимого с технологией на основе CdHgTe.

Из этого можно сделать вывод, что зарубежные разработки в области полимерных датчиков ближнего ИК-диапазона, чувствительных, в частности, в области максимума собственного свечения атмосферы, перешли из стадии научно-исследовательских работ в стадию опытно-конструкторских.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании представленных выше данных можно заключить, что разработка устройств, чувствительных в диапазоне 1,4...1,8 мкм ведется очень активно и пользуется за рубежом, в частности в США, большим вниманием военных. Существующим приборам ночного видения, чувствительным в данном диапазоне, свойственен высокий процент брака при массовом производстве, либо же они дороги и низкоэкологичны. В связи с этим активно ведется разработка новых материалов, чувствительных в указанном диапазоне и построенных на основе нанотехнологий или новых физических принципов, однако на этом пути остается масса нерешенных задач.

Текущая ситуация требует скорейшей организации подобных работ в России с использованием существующих заделов в указанных научно-тех-

нических областях [15, 16]. Развертывание таких работ в ближайшие годы позволит России сохранить научно-технический паритет с зарубежными странами, а возможно, ввиду новизны тематики, и добиться лидирующих позиций в области разработки ПНВ, чувствительных в области максимума собственного свечения атмосферы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Byrnes J.* (ed.). Unexploded ordnance detection and mitigation // Springer Science & Business Media. — 2008.
2. *De Gaspari D.*, et al. The Night Glows Brighter in the Near-IR // *Photonics Spectra*. — 2012. — Vol. 46, № 4. — P. 62–65.
3. *Vollmerhausen R. H.*, *Maurer T.* Night illumination in the visible, NIR, and SWIR spectral bands // *AeroSense 2003*. — International Society for Optics and Photonics, 2003. — P. 60–69.
4. *Hall D. N. B.*, et al. HgCdTe Optical & Infrared Focal Plane Array Development in the Next Decade // *Astro 2010: The Astronomy and Astrophysics Decadal Survey*. — 2010.
5. *Rogalski A.* Infrared detectors // CRC press. — 2010.
6. *Martyniuk P.*, *Rogalski A.* Quantum-dot infrared photodetectors: Status and outlook // *Progress in Quantum Electronics*. — 2008. — Vol. 32, № 3. — P. 89–120.
7. *Васильев П. Б.*, *Дирин Д. Н.* Квантовые точки: синтез, свойства, применение. — М.: МГУ, 2007. [*Vasil'ev R. B.*, *Dirin D. N.* Quantum dots: synthesis, properties, applications. — Moscow: MSU, 2007. (In Russian)]
8. *Clifford J. P.*, et al. Fast, sensitive and spectrally tuneable colloidal-quantum-dot photodetectors // *Nature nanotechnology*. — 2009. — Vol. 4, № 1. — P. 40–44.
9. *Diedenhofen S. L.*, et al. Integrated colloidal quantum dot photodetectors with color-tunable plasmonic nanofocusing lenses // *Light: Science & Applications*. — 2015. — Vol. 4, № 1. — P. e234.
10. *Konstantatos G.*, et al. Ultrasensitive solution-cast quantum dot photodetectors // *Nature*. — 2006. — Vol. 442, № 7099. — P. 180–183.
11. *Gong X.*, et al. High-detectivity polymer photodetectors with spectral response from 300 nm to 1450 nm // *Science*. — 2009. — Vol. 325, № 5948. — P. 1665–1667.
12. *Curved Sensor for Vision Systems (CSVS)*. URL: <https://sibirsource.com/sbir/awards/144365-curved-sensor-for-vision-systems-csvs#> (date of the application 12.01.2016).
13. *Curved Sensor for Vision Systems (CSVS)*. URL: <https://www.sbir.gov/sbirsearch/detail/394105> (date of the application 12.02.2016).
14. *Daniel J.*, et al. Flexible and Printed Electronics for Displays and Image Sensors // Palo Alto Research Center. 25.02.2008.
15. *Разумов В. Ф.* Спектрально-люминесцентные свойства нанокластеров коллоидных квантовых точек // Высоко-реакционные интермедиаты химических и биохимических реакций, *ChemInt2015*. — Москва, 2015. [*Razumov V. F.* Spectral-luminescence properties of colloidal quantum dots nanoclusters // Highly reactive intermediates of chemical and biochemical reactions, *ChemInt2015*. — Moscow, 2015. (In Russian)]
16. *Vannikov A. V.*, et al. Photoelectric, nonlinear optical, and photorefractive properties of polymer composites including carbon nanotubes and cyanine dyes // *Physics of the solid state*. — 2013. — Vol. 55, № 3. — P. 572–580.