

УДК 621.384.326.23

Преимущества использования твердотельных фотоприемных устройств на область спектра 1,4–1,7 мкм в приборах ночного видения

Н.И. Гусарова, Н.Ф. Кошавцев, С.В. Попов

Представлены результаты исследований характеристик внешних условий в спектральных диапазонах 0,4–0,9 мкм и 1,4–1,7 мкм. Показано преимущество использования матричных фотоприемных устройств, чувствительных в спектральном диапазоне 1,4–1,7 мкм в приборах ночного видения.

PACS: 42.79.Pw, 85.60-g, 85.60Gz

Ключевые слова: фотоприемное устройство, прибор ночного видения, естественная ночная освещенность, спектральный диапазон.

Введение

В настоящее время обеспечение видения ночью, в основном, решается с помощью приборов ночного видения (ПНВ) на основе вакуумных электронно-оптических преобразователей (ЭОП). ПНВ решают большинство практических задач, имеют относительно низкую стоимость, простую конструкцию, малые габариты и вес.

Тепловизионные средства, обеспечивая большую информативность и более высокие характеристики по дальности действия и вероятности обнаружения и опознавания объектов, имеют более сложную конструкцию, большую стоимость, массу и габариты по сравнению с ПНВ на ЭОП. Поэтому совершенствование средств ночного видения, работающих благодаря естественной ночной освещенности, является актуальной задачей.

Недостатком ПНВ на ЭОП является существенная зависимость их основных характеристик от уровня естественной ночной освещенности (ЕНО). Существует достаточно большой перечень условий, при которых они не обеспечивают требований по дальности действия, вероятности обнаружения и опознавания. Это, в частности, возникает при «глубоком погружении» Солнца за горизонт и отсутствии света от Луны. Особенно опасное уменьшение дальности действия возникает при сильном закрытии горизон-

та (ночь в городе с неосвещенными строениями, туннели, горные ущелья, нахождение под пологом леса и другие условия). Уже при освещенности ниже 2×10^{-3} лк дальность видения в такие приборы недостаточна, а вероятность опознавания крайне низка. Недостатки ПНВ на ЭОП связаны со спектральным диапазоном 0,4–0,9 мкм, в котором чувствительны современные фотокатоды ЭОП. Разработка фотокатодов, чувствительных до 1,1–1,2 мкм пока не завершена, а для диапазона до 1,7 мкм пока в основном ведутся поисковые работы, далекие от завершения.

Внешние условия работы приборов ночного видения

Внешние условия включают уровень ЕНО, коэффициенты яркости фонов и целей, пропускание атмосферы, яркость атмосферной дымки. Ниже рассмотрены основные характеристики внешних условий работы ПНВ.

Основной характеристикой внешних условий ночью является освещенность горизонтальной E_r и вертикальной E_v поверхностей. Ночная освещенность обусловлена излучением верхних слоев атмосферы (высвечивание возбужденных молекул атмосферных газов и гидроксильной группы ОН), зодиакальным светом, прямым и рассеянным излучением звезд и других космических объектов, прямым и рассеянным светом Луны, излучением Солнца, рассеянным в верхних слоях атмосферы. В сумерки основным источником является рассеянный свет Солнца. Уровень освещенности зависит от глубины погружения Солнца за горизонт.

Спектральный состав ЕНО на горизонтальной и вертикальной поверхностях приведен на рис. 1.

В заданной области спектра наиболее интенсивными являются линии излучения атмосферного кислорода. Основной вклад в уровень ЕНО обусловлен гидроксильной группой ОН. При

Гусарова Наталья Иннокентьевна, ведущий специалист
Попов Сергей Викторович, начальник Центра корпоративного управления.

ОАО «Швабе». Россия, 620100, Екатеринбург, Восточная ул., 33б.

E-mail: mail@shvabe.com

Кошавцев Николай Федорович, профессор
Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН.
Россия, 101990, Москва, Мал. Харитоньевский переулок, 4.

Статья поступила в редакцию 13 мая 2014 г.

© Гусарова Н.И., Кошавцев Н.Ф., Попов С.В., 2014

этом уровень освещенности резко возрастает при смещении в инфракрасную область спектра $\lambda > 0,9$ мкм. Интегральный уровень освещенности благодаря свечению гидроксильной группы OH, примерно, в 10^3 раз превосходит уровень освещенности, создаваемой всеми остальными составляющими.

Яркость фонов и объектов зависит от уровня освещенности. При диффузном отражении спектральная плотность яркости определяется известным соотношением [1]:

$$L_\lambda = E_\lambda \beta_\lambda \tau_{a\lambda} / \pi, \quad (1)$$

где E_λ — спектральная плотность освещенности на поверхности объекта, Вт/(м²мкм), β_λ — спектральный коэффициент яркости поверхности объекта, $\tau_{a\lambda}$ — спектральное пропускание атмосферы на трассе между объектом и наблюдателем.

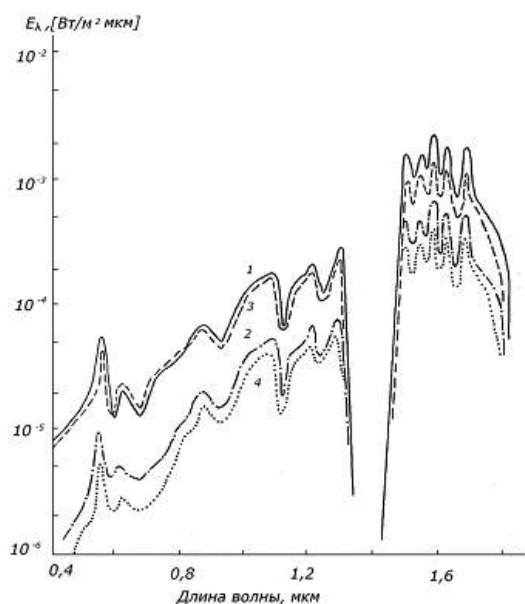


Рис. 1. Спектральная плотность горизонтальной (E_h) и вертикальной (E_v) освещенности ночью. 1 — $E_z = 1,4 \times 10^{-3}$ лк (ясно), 2 — $E_z = 3,5 \times 10^{-4}$ лк (сплошная облачность), 3 — $E_z = 1,5 \times 10^{-3}$ лк (ясно, снег), 4 — $E_z = 2,5 \times 10^{-4}$ лк (сплошная облачность, зеленый фон).

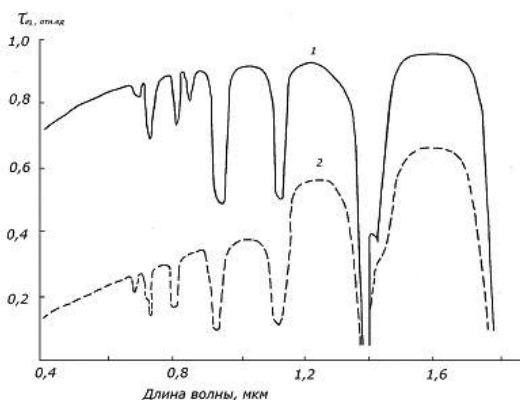


Рис. 2. Спектральное пропускание атмосферы на трассе длиной 1 км. 1 — $S_m = 20$ км, 2 — $S_m = 2,5$ км.

Атмосфера ослабляет световой поток вследствие поглощения и рассеяния. Поглощение светового потока в диапазоне длин волн 0,4—1,7 мкм, в основном, обусловлено парами воды, углекислым газом, в значительно меньшей степени основными газами атмосферы (азотом и кислородом) [2]. Состояние прозрачности атмосферы обычно оценивается метрологической дальностью видимости S_m .

Спектральное пропускание атмосферы на трассе длиной 1 км для случаев метрологической дальности видимости 20 и 2,5 км приведено на рис. 2.

Рассматриваемый спектральный диапазон делится на ряд окон, в которых поглощение относительно слабое, а ослабление обусловлено рассеянием на флуктуациях плотности атмосферы и на различных частицах, взвешенных в атмосфере. Рассеяние существенно уменьшается при переходе в область спектра $\lambda > 0,9$ мкм. Особенно значительный выигрыш по пропусканию в этом случае наблюдается при относительно низкой прозрачности атмосферы (наблюдение в условиях дымки, слабых туманов и пыли, $S_m = 2,5$ км). Яркость атмосферной дымки также снижается при переходе в более длинноволновую область спектра.

Зависимости коэффициентов яркости от длины волны для типовых фонов приведены на рис. 3.

На этом рисунке также приведена спектральная зависимость коэффициента яркости краски, используемой для окрашивания военной техники: отечественной НПФ-10 (кривая 6) и американской (кривая 5). Краски имеют низкие коэффициенты яркости, близкие по величине коэффициентам яркости зеленых фонов в видимой области спектра. В инфракрасной области спектра величина коэффициентов яркости красок практически не меняется, в то время как коэффициенты яркости зеленых фонов возрастают.

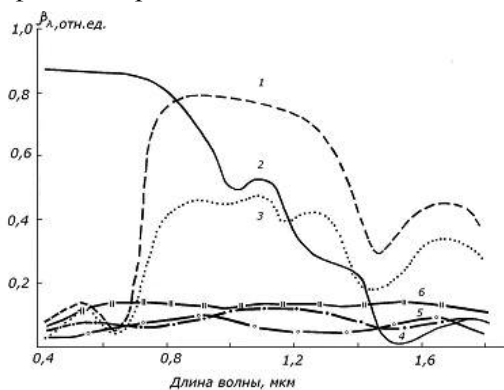


Рис. 3. Спектральное распределение коэффициентов яркости. 1 — зеленая трава, 2 — снег, 3 — хвойный лес, 4 — чернозем, 5 — американская краска для военной техники, 6 — краска НПФ-10.

На основании характеристик внешних условий было рассчитано спектральное распределение контрастов K_λ , представленное на рис. 4, по формуле

$$K_\lambda = (L_{\lambda_0} - L_{\lambda\phi}) / L_{\lambda\phi}, \quad (2)$$

где L_{λ_0} , $L_{\lambda\phi}$ — спектральные плотности яркости объекта и фона, соответственно.

В видимой и ближней инфракрасной области спектра $\lambda < 0,9$ мкм спектральный контраст меняет знак с положительного значения на отрицательное. Интегральный контраст для ПНВ на ЭОП обычно имеет малую величину. В области спектра $\lambda > 0,9$ мкм интегральный контраст либо

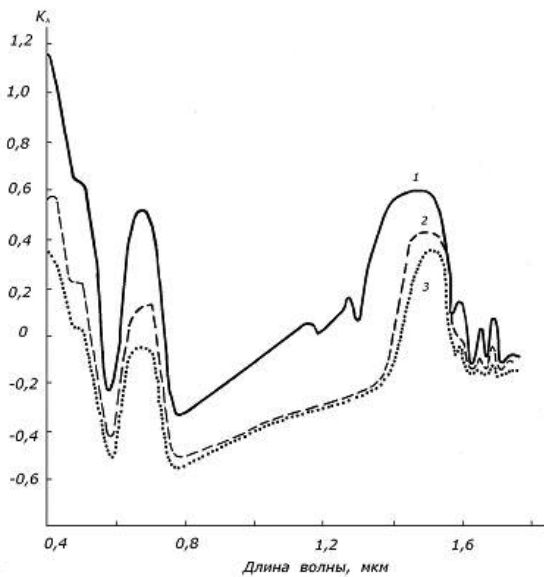


Рис. 4. Спектральный ход контраста поверхности, окрашенной краской НПФ-10 на зеленом фоне в сумерки и ночью. 1- $h_\odot = -6^\circ$, $E_z = 0,64$ лк, ясно, 2 — $h_\odot = -9^\circ$, $E_z = 1,3 \times 10^{-1}$ лк, ясно, 3 — $h_\odot = -12^\circ$, $E_z = 8 \times 10^{-3}$ лк, ясно (h_\odot — угол погружения Солнца за горизонт).

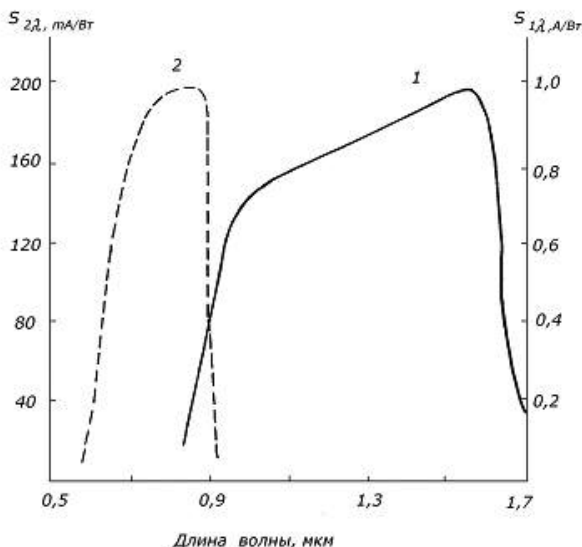


Рис. 5. Спектральная чувствительность фотоприемных устройств. 1 — фотоприемника InGaAs ($S_{1\lambda}$), 2- фотокатода A_3B_5 ($S_{2\lambda}$).

отрицательный, либо положительный, а для $\lambda > 1,3$ мкм обычно незначительный.

Из анализа приведенных характеристик внешних условий следует, что спектральный диапазон 1,4–1,7 мкм существенно превосходит спектральный диапазон 0,4–0,9 мкм, в котором работают ПНВ на ЭОП. Поэтому разработки приборов для этой области спектра являются очень перспективными. Возможной реализацией ПНВ для спектрального диапазона 1,4–1,7 мкм является использование матричного фотоприемного устройства на InGaAs. Характерными преимуществами данных фотоприемных устройств являются малые темновые токи и шумы, а также возможность использования более дешевых систем термоэлектрического охлаждения [3–5].

Оценка эффективности работы ПНВ в спектральных диапазонах 0,4–0,9 мкм и 1,4–1,7 мкм

Для сравнения приборов, работающих в спектральных диапазонах 0,4–0,9 мкм и 1,4–1,7 мкм, была проведена оценка их эффективности по дальности действия. Дальность действия прибора определяется из соотношения

$$D = a/\Delta\alpha, \quad (3)$$

где a — элемент разложения изображения объекта, обнаружение которого обеспечивает его опознавание, $\Delta\alpha$ — угловое разрешение прибора:

$$\Delta\alpha \approx (\alpha_0^2 + \alpha_{стр}^2 + \alpha_{гл}^2)^{1/2}, \quad (4)$$

где α_0 — угловое разрешение, определяется флуктуациями в потоке фотонов и выражается в виде:

$$\alpha_0^2 = k^2 C (2 + K) K^{-2} \times \left(\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_\lambda \tau_{a\lambda} \tau_{o\lambda} S_\lambda d\lambda \right)^{-1}, \quad (5)$$

где используются следующие величины:

$\alpha_{стр}$ — структурная составляющая углового разрешения прибора,

$\alpha_{гл}$ — угловое разрешение, определяемое органом зрения человека, как конечным приемником прибора,

C — const,

k — отношение сигнал/шум, определяемое из заданной вероятности обнаружения (опознавания) объекта,

K — интегральный контраст объекта на фоне в спектральном диапазоне чувствительности фотоприемного устройства λ_1 — λ_2 ,

S_λ — спектральная чувствительность фотоприемного устройства А/Вт,

$\tau_{o\lambda}$ — спектральное пропускание оптической системы.

При правильном выборе характеристик оптической системы и низких уровнях освещенности менее 2×10^{-3} лк можно считать $\alpha_0 \gg (\alpha_{\text{стр}}^2 + \alpha_{\text{тр}}^2)^{1/2}$ и $\Delta \alpha \approx \alpha_0$.

Дальность действия прибора будет определяться флуктуационной составляющей углового разрешения α_0 , зависящей от уровня ЕНО, контраста объект—фон и пропускания атмосферы.

Оценка эффективности по дальности действия сравниваемых приборов, имеющих одинаковые оптические системы и отличающиеся спектральными диапазонами работы, в данном приближении может определяться из отношения [6]:

$$\begin{aligned} (D_1) / (D_2) &= (\Delta \alpha_2) / (\Delta \alpha_1) = \\ &= \left[(2 + K_2)^{1/2} K_1 / (2 + K_1)^{1/2} K_2 \right] \times \\ &\times \left[\left(\int_{1,4}^{1,7} E_{\lambda} \tau_{a\lambda} S_{1\lambda}^0 d\lambda \right) / \left(\int_{0,4}^{0,9} E_{\lambda} \tau_{a\lambda} S_{2\lambda}^0 d\lambda \right) \right]^{1/2}, \quad (6) \end{aligned}$$

где D_1 , $\Delta \alpha_1$, K_1 , $S_{1\lambda}^0$ — дальность действия, угловое разрешение, контраст и относительная спектральная чувствительность фотоприемного InGaAs-устройства, работающего в спектральном диапазоне 1,4–1,7 мкм; D_2 , $\Delta \alpha_2$, K_2 , $S_{2\lambda}^0$ — дальность действия, угловое разрешение, контраст и относительная спектральная чувствительность фотокатода A_3B_5 современного ЭОП, работающего в спектральном диапазоне 0,4–0,9 мкм.

Оценка проводилась для $E_{\text{т}} = 1,4 \times 10^{-3}$ лк и пропускания атмосферы на трассе длиной 1 км для случаев метеорологических дальностей видимости $S_m = 20$ км и $S_m = 2,5$ км. Предполагалось, что характеристики оптических систем сравниваемых приборов одинаковые. Спектральные кривые чувствительности фотокатода A_3B_5 и фотоприемника на InGaAs приведены на рис. 5 [5].

Результаты оценки показали, что эффективность работы прибора ночного видения в спектральном диапазоне 1,4–1,7 мкм при низких уровнях освещенности и метеорологических дальностях видимости $S_m = 20$ км и $S_m = 2,5$ км, соответственно в 8 и в 13 раз выше, чем в спектральном диапазоне 0,4–0,9 мкм.

Заключение

Спектральный диапазон 1,4–1,7 мкм по характеристикам внешних условий, включающих уровень ЕНО, коэффициенты яркости фонов и целей, пропускание атмосферы, яркость атмосферной дымки, существенно превосходит спектральный диапазон 0,4–0,9 мкм. Возможной реализацией ПНВ для спектрального диапазона 1,4–1,7 мкм является использование матричного фотоприемного устройства на InGaAs. Преимуществами данных фотоприемных устройств являются ма-

лые темновые токи и шумы, а также возможность использования более дешевых систем термоэлектрического охлаждения.

Оценка эффективности по дальности действия показала, что ПНВ на фотоприемных устройствах на InGaAs при низких уровнях освещенности (менее 2×10^{-3} лк), в условиях дымки, слабых туманов и пыли ($S_m = 2,5$ км) на порядок превосходят ПНВ на ЭОП.

Приборы на фотоприемных устройствах на InGaAs, работающие в спектральном диапазоне 1,4–1,7 мкм, позволят обеспечить при низких уровнях освещенности существенно большую дальность видения ночью, наблюдение в условиях дымки, слабых туманов и пыли, обнаружение замаскированных объектов, а также видимость объектов, нагретых до температур выше 150 °С, за счет собственного теплового излучения.

Применение фотоприемных устройств на основе матриц чувствительных элементов из InGaAs может быть реализовано не только в приборах ночного видения, но также в медицине, промышленности (для контроля производственных процессов, машинного зрения), в системах космического мониторинга и др. [7–14].

Литература

1. Мешков В.В. Основы светотехники. — М.: Энергия, 1979.
2. Радиационные характеристики атмосферы и земной поверхности. — М.: Гидрометеорологическое изд. — во, 1969
3. Андреев Д.С., Гришина Т.Н., Залетаев Н.Б. и др. // Прикладная физика. 2012. № 4. С. 86.
4. Горлачук П.В., Мармалюк А.А., Рябоштан Ю.Л. и др. // Прикладная физика. 2012. № 5. С. 77.
5. Болтарь К.О., Чинарева И.В., Лопухин А.А. и др. // Прикладная физика. 2013. № 5. С. 10.
6. Кошавцев Н.Ф., Кошавцев А.Н., Федотова С. Ф. // Прикладная физика. 1999. № 3. С. 66.
7. Saul R.H and Chen F.S. // IEEE Electron Device Lett. 1983. V. ELD-4. P.467.
8. Chin A.K., Chen F.S. and Ermanis F. // J. Appl. Phys. 1984. V. 55. P.1596.
9. Marion D. Enriquez, Michael A. et al. // Proc. SPIE. 2008. V. 6940. P. 69000.
10. SU320KTS-1,7RT InGaAs SWIR Camera. Проспект фирмы Goodrich Corp., США, 2010.
11. Камера OWL SW1,7 фирмы Raptor Photonics, Ltd, Северная Ирландия, 2011 / Проспект фирмы ЗАО «Мир диагностики», 2011.
12. Инфракрасная камера XS-1,7–320 фирмы Xenuics Infrared Solutions. Бельгия / Проспект фирмы Everest Security Sitems, 2011.
13. Охлаждаемая инфракрасная камера XSW-640 фирмы Xenuics Infrared Solutions. Бельгия / Проспект фирмы Everest Security Sitems, 2013.
14. Бурлаков И.Д., Гринченко Л.Я., Дирочка А.И., Залетаев Н.Б. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 2. С. 131

Advantages of using the solid-state photodetectors for the 1.4–1.7 μm spectral range in night vision devices

N. I. Gusarova, N. F. Koshavtsev, and S. V. Popov

OAO Shvabe

33b Vostochnaya str., Yekaterinburg, 620100, Russia

E-mail: mail@shvabe.com

Received May 13, 2014

The article presents results of studies of the characteristics of external conditions in the spectral range 0.4–0.9 microns and 1.4–1.7 microns. It shows the advantage of using matrix photodetectors sensitive in the spectral range 1.4–1.7 microns in night vision devices.

PACS: 42.79.Pw, 85.60-g, 85.60Gz

Keywords: photodetector, night vision devices, nightlight illumination, spectral range.

References

1. V. V. Meshkov, *Lighting Engineering Principles* (Energia, Moscow, 1979) [in Russian].
2. *Radiation Features of Atmosphere and Earth Surface* (Gidrometeorologiya, Moscow, 1969) [in Russian].
3. D. S. Andreev, T. N. Grishina, N. B. Zaletaev, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 4, 86 (2012).
4. P. V. Gorlachuk, A. A. Marmalyuk, Yu. L. Ryaboshtan, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 77 (2012).
5. K. O. Boltar, I. V. Chinareva, A. A. Lopukhin, et al., *Прикладная физика*, No. 5, 10 (2013).
6. N. F. Koshavtsev, A. N. Koshavtsev, and S. F. Fedotova, *Prikladnaya Fizika*, No. 3, 66 (1999).
7. R. H. Saul and F. S. Chen, *IEEE Electron Device Lett.* **ELD-4**, 467 (1983).
8. A. K. Chin, F. S. Chen, and F. Ermanis, *J. Appl. Phys.* **55**, 1596 (1984).
9. Marion Enriquez, A. Michael, et al., *Proc. SPIE* **6940**, 69000 (2008).
10. *SU320KTS-1,7RT InGaAs SWIR Camera*. (Goodrich Corp., USA, 2010).
11. *OWL SW1,7 Camera* (Raptor Photonics, Ltd, 2011).
12. *XS-1,7–320 Camera* (Xenuics Infrared Solutions, Belgium, 2011).
13. *XSW-640 Camera* (Xenuics Infrared Solutions, Belgium, 2013).
14. I. D. Burlakov, L. Ya. Grinchenko, A. I. Dirochka, et al., *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **2**, 131 (2014).