

УДК 539.12.175

Фотоприемный модуль с фотокатодом с барьером Шоттки на основе структуры InP/InGaAs/InP:Ag и с чувствительностью до 1,7 мкм

Ю. К. Грузевич, Ю. Н. Гордиенко, Л. М. Балясный, П. С. Альков,
В. Ю. Иванов, А. Л. Дятлов, П. И. Ваценко

Данная статья посвящена работе по созданию ТЕ-фотокатода с барьером Шоттки, чувствительного в диапазоне $\Delta\lambda = 0,9\div 1,7$ мкм. Разработанная гетероэпитаксиальная структура обеспечивает изготовление фотокатодного узла ИК ФПМ по серийной технологии изготовления GaAs ОЭС фотокатода для ЭОП III поколения методом термокомпрессионного соединения гетероэпитаксиальной структуры со стеклом входного окна.

PACS 03.65.Ta

Ключевые слова: термокомпрессионное соединение, электронно-оптический преобразователь, ТЕ-фотокатод.

Введение

Электронно-оптические преобразователи (ЭОП) являются ключевым элементом приборов ночного видения (ПНВ), которые, не смотря на наметившийся в последние годы прогресс в области создания неохлаждаемых тепловизионных приемников, остаются наиболее массовыми визуальными системами для наблюдения в темное время суток [1].

В настоящее время в ПНВ (очках ночного видения, ночных прицелах и монокулярах, низкоразрешающих телевизионных системах и др.) используются в основном ЭОП II+ поколения с мультищелочными (МЩ) фотокатодами (ФК) и ЭОП III поколения с ФК с отрицательным электронным сродством (ОЭС- фотокатодами), чувствительных в спектральном диапазоне 0,4—0,9 мкм [1, 2].

ОЭС-фотокатоды имеют значительно более высокую (более чем в два раза) интегральную и почти в четыре раза большую спектральную чув-

ствительность на длине волны 0,85 мкм, чем МЩ ФК. Кроме того, в связи с тем, что ОЭС-фотокатоды изготавливают из монокристаллических полупроводниковых структур с заранее известными электрофизическими параметрами, их характеристики предсказуемы и они в составе ЭОП обладают более высокой технологичностью и процентом выхода готовых изделий.

Известно, что основная задача повышения эффективности ПНВ связана с увеличением дальности их действия. Это, в свою очередь, зависит не только от чувствительности фотокатодов и их разрешающей способности, но и от характеристик внешних условий наблюдения, а именно: от спектрального состава и уровня естественной ночной освещенности (ЕНО), пропускания атмосферы, атмосферной дымки, коэффициентов отражения естественных и искусственных объектов. На рис. 1 представлены спектральная плотность излучения

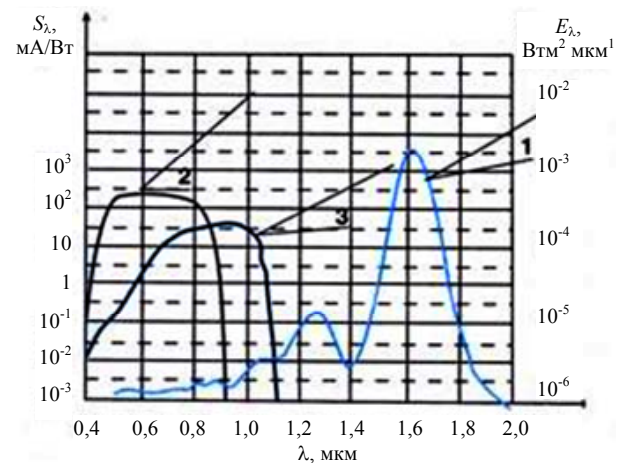


Рис. 1. Спектральная плотность излучения ночного неба (1) и чувствительности фотокатодов: GaAs (2), InGaAs (3)

Грузевич Юрий Кириллович, зам. генерального директора по научной работе.

Гордиенко Юрий Николаевич, зам. технического директора.

Балясный Лев Михайлович, главный конструктор ЭОП и ФПМ.

Альков Павел Сергеевич, инженер.

Иванов Владимир Юрьевич, ведущий специалист.

Дятлов Алексей Леонидович, начальник лаборатории.

Ваценко Полина Ильинична, начальник участка.

ОАО «НПО Геофизика-НВ».

Россия, 107076, Москва, ул. Матросская Тишина, 23, стр. 2.

Тел.: 8 (499) 268-16-96, 8 (499) 268-53-07.

E-mail: yukg@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10 июля 2015 г.

© Грузевич Ю. К., Гордиенко Ю. Н., Балясный Л. М., Альков П. С., Иванов В. Ю., Дятлов А. Л., Ваценко П. И., 2015

ночного неба и спектральные чувствительности фотокатодов на основе GaAs и InGaAs [2].

Видно, что спектральная светимость ночного неба (в отсутствие Луны) постоянно растет с продвижением в инфракрасную область спектра. Из рис. 1 можно заключить, что средняя величина спектральной облученности в области чувствительности ОЭС-фотокатода составляет $(1,5 - 3) \cdot 10^{-9} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot \text{мкм}}$, тогда как в окне прозрачности атмосферы ($\Delta\lambda = 1,4 \div 1,8 \text{ мкм}$) она достигает величины $(1,5 - 2) \cdot 10^{-7} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot \text{мкм}}$. Прозрачность атмосферы составляет 72 и 93 % соответственно на 1 км при метеорологической дальности видимости (МДВ) 10 км. Кроме того, в ИК-области спектра величина контраста (объект наблюдения — фон) более стабильная и выше в $1,4 \div 1,5$ раза. Заметим, что в области работы современных фотокатодов абсолютные значения контрастов составляют $0,05 \div 0,5$ [2].

Из вышесказанного вытекает, что весьма результативно использование ПНВ, работающих в области спектра $\Delta\lambda = 1,4 \div 1,8 \text{ мкм}$ для демаскировки объектов. На рис. 2 приведены кривые отражательной способности формы солдата российской армии (кривая 1), формы солдата армии США (кривая 2) и натуральной растительности (кривая 3). Из рис. 2 видно, что в области спектра $\Delta\lambda = 1,4 \div 2,0 \text{ мкм}$ разница в отражательной способности обмундирования позволяет не только обнаружить солдата на фоне растительности, но и отличить своего от чужого.

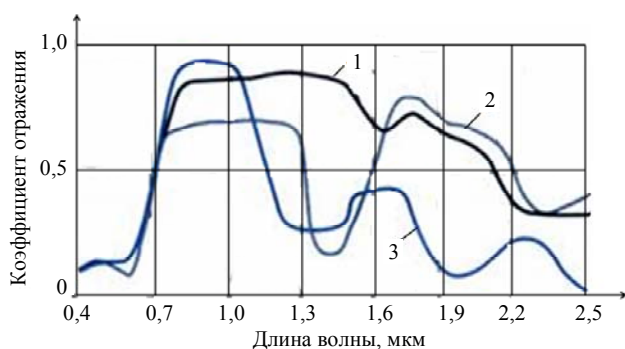


Рис. 2. Спектральные кривые отражения натуральных и искусственных объектов в видимой и ИК-области спектра

Кроме того, в этой области спектра работают лазерные целеуказатели (ЛЦУ) и осветители на

длине волны 1,54 мкм, безопасной для глаз. Следовательно, в сочетании с ПНВ на основе ЭОП, работающих в активно-импульсном режиме с лазерной подсветкой, при высокой прозрачности атмосферы возможно получение значительно больших значений дальности действия ПНВ [3].

Первые работы по созданию фотокатодов, чувствительных в диапазоне $\Delta\lambda = 0,9 \div 1,7 \text{ мкм}$ появились еще в 70—80-е годы прошлого столетия [4—6]. В настоящее время наилучшие результаты по разработке и созданию ЭОП достигнуты американской фирмой Intevac (рис. 3).



Рис. 3. Внешний вид ЭОП, разработанный фирмой «Intevac»

Спецификой ЭОП, работающего в диапазоне $\Delta\lambda = 0,9 \div 1,7 \text{ мкм}$, является использование фотокатода с внутренним электрическим полем, которое обеспечивает выход фотоэлектронов в вакуум (ТЕ-фотокатод). Принцип работы ТЕ-фотокатода с барьером Шоттки проиллюстрирован на рис. 4.

Как видно из рисунка, при приложении электрического поля снимаются внутренние барьеры, и возбужденные в поглощающем слое фотоэлектроны попадают в эмиттерный слой. В эмиттерном слое электрическое поле ускоряет фотоэлектроны и переводит их из Г-зоны в L-зону с энергией выше уровня вакуума, что обеспечивает эффективную фотоэмиссию.

Особенностью работы ТЕ-фотокатода с барьером Шоттки является одновременная фотоэмиссия электронов в вакуум и генерация дырок в барьере Шоттки для компенсации заряда. При этом в объеме структуры происходит генерация электронов, которые также эмитируются в вакуум и образуют значительную составляющую темнового тока фотокатода.

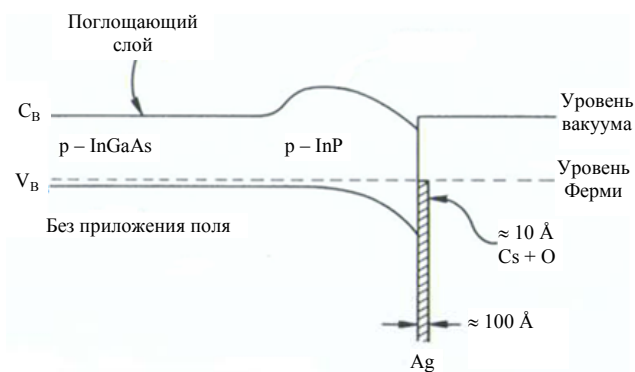


Рис. 4. Энергетическая диаграмма гетероструктуры ТЕ-фото катода

Повышенное значение темнового тока ТЕ-фото катода с барьером Шоттки является ограничением в применении ЭОП с ТЕ-фото катодом с барьером Шоттки в наблюдательных приборах ночного видения на их основе. Перспективным использованием ЭОП с ТЕ-фото катодом с барьером Шоттки является создание на их основе фото приемных модулей (ИК ФПМ), чувствительных в ИК-области спектра ($\Delta\lambda = 0,9 \div 1,7$ мкм) и состоящих из ЭОП и оптически соединенной с ним фоточувствительной (ФЧ) матрицы ПЗС (рис. 5), либо с встроенной в объем вакуумного блока ЭОП электронночувствительной (ЭЧ) матрицы ПЗС (рис. 6).

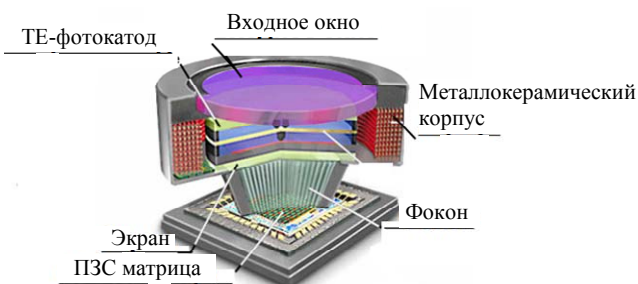


Рис. 5. ИК ФПМ на основе структуры «ЭОП с ТЕ-фото катодом — ФЧ матрица ПЗС»

Высококачественное изображение, сформированное прибором ночного видения на основе ИК ФПМ, обеспечивается компенсацией заряда, созданного темновым током фото катода, специальным электронным блоком, управляющим матрицей ПЗС.

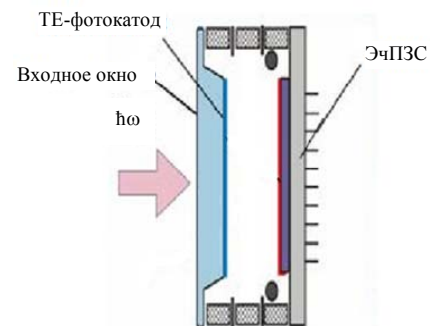
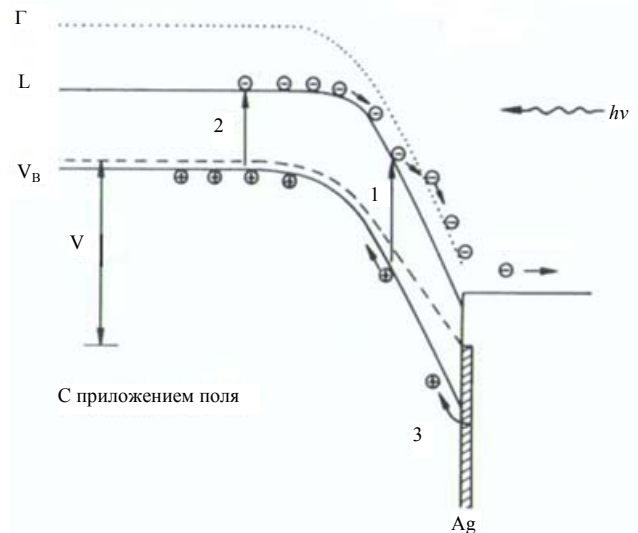


Рис. 6. ИК ФПМ на основе структуры «ЭОП с ТЕ-фото катодом — ЭЧ матрица ПЗС»

Целью данной работы является исследование возможности создания отечественного ИК ФПМ с аналогичным ТЕ-фото катодом с барьером Шоттки на основе инверсной структуры, термокомпрессионно соединенной с входным окном вакуумного блока ЭОП, входящего в состав ИК ФПМ.

Экспериментальная часть

В данной статье приведены результаты создания отечественного ИК ФПМ с аналогичным ТЕ-фото катодом с барьером Шоттки на основе инверсной структуры, термокомпрессионно соединенной с входным окном вакуумного блока ЭОП, входящего в состав ИК ФПМ. Предложенное техническое решение позволяет значительно уменьшить потери падающего потока оптического излучения за счет исключения из структуры ТЕ-фото катода с барьером Шоттки массивной подложки. Для создания ТЕ-фото катода на основе со-

единения InGaAs, выращенного на подложке InP, была предложена совершенно иная топология полупроводниковой структуры.

Разработанная гетероэпитаксиальная структура для ТЕ-фотокатода состоит из пяти слоев:

- подложка — InP;
- стопорный слой — InGaAs;
- эмиттерный слой — InP;
- поглощающий слой, имеющий спектральную характеристику, соответствующую спектру поглощения — $In_{0,53}Ga_{0,47}As$;
- буферный слой — InP.

Разработанная гетероэпитаксиальная структура для ТЕ-фотокатода с барьером Шоттки обеспечивает изготовление фотокатодного узла ИК ФПМ по серийной технологии изготовления GaAs ОЭС фотокатода для ЭОП III поколения методом термокомпрессионного соединения гетероэпитаксиальной структуры со стеклом входного окна стандартного ЭОП III поколения. В качестве материала для входного окна ИК ФПМ используется специально подобранное стекло с коэффициентом температурного расширения (КТР), близким по своему значению с КТР подложки из InP. Конструкция разработанного фотокатодного узла ИК ФПМ представлена на рис. 7.

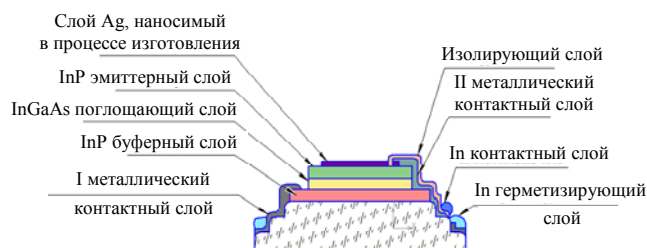


Рис. 7. Конструкция фотокатодного узла ИК ФПМ

Основные характеристики разработанного фотокатодного узла на основе ТЕ-фотокатода для ИК ФПМ оценивались по уровню и по распределению фотолюминесценции, а согласование по периоду кристаллических решеток оценивалось методом рентгеновской дифракции.

В ОАО «НПО Геофизика-НВ» были разработаны, изготовлены и экспериментально исследованы образцы ИК ФПМ с InP/InGaAs/InP ТЕ-фотокатодом с барьером Шоттки.

На рис. 8 представлен внешний вид вакуумного блока, состыкованного с ФЧ ПЗС матрицей, а на рис. 9 — внешний вид разработанного ИК

ФПМ с InP/InGaAs/InP ТЕ-фотокатодом с барьером Шоттки.

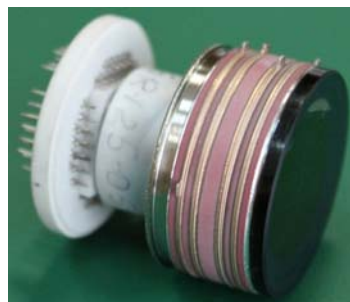


Рис. 8. Внешний вид вакуумного блока, состыкованного с ПЗС матрицей



Рис. 9. Внешний вид ИК ФПМ

Основные параметры разработанных ИК ФПМ с InP/InGaAs/InP ТЕ-фотокатодом с барьером Шоттки приведены в таблице, а их спектральная характеристика чувствительности приведена на рис. 10.

Таблица

Наименование параметра	Значение параметра
Спектральный диапазон чувствительности	0,95÷1,65 мкм
Диаметр фотокатода	18 мм
Линейные размеры рабочего поля	12,8×9,6 мм ²
Квантовая эффективность на $\Delta\lambda = 1,54$ нм	2÷3 %
Плотность темнового тока	25 нА/см ²
Темновой ток фотокатода (при 25 °С)	6·10 ⁻⁷ А
Эквивалентная мощность шума	10 ⁻¹³ Вт/Гц ^{1/2}
Телевизионное разрешение по всему полю	450 ТВЛ
Параметры цифрового выходного сигнала:	
- формат выходного кадра	768×576
- разрядность выходного сигнала	12 бит
Напряжение питания	12 В
Ток потребления	170 мА
Масса	115 г
Габаритные размеры:	
- наружный диаметр	45 мм
- длина	65 мм

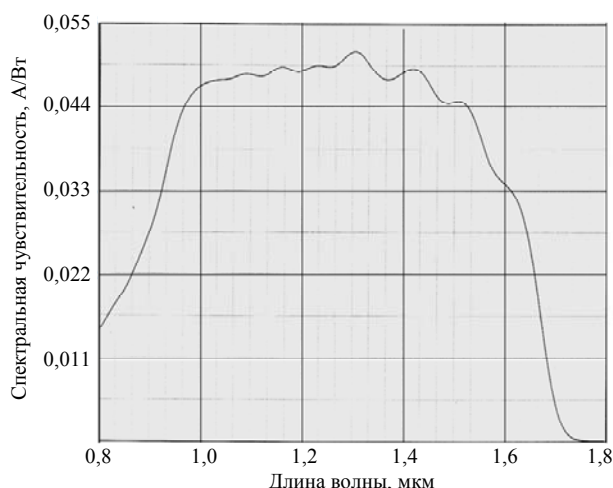


Рис. 10. Спектральная характеристика чувствительности ИК ФПМ

Заключение

Анализ результатов экспериментальных исследований разработанных образцов ИК ФПМ с InP/InGaAs/InP ТЕ-фотокатодом с барьером Шоттки позволяет сделать следующие выводы.

1. За счет совершенствования технологии изготовления фотокатодного узла возможно достижения значений его квантовой эффективности более 4 % (на длине волны $\lambda = 1,54$ мкм).

2. Из-за высокого уровня плотности темного тока в ИК ФПМ, который на 4—5 порядков превышает уровень плотности темного тока в ФПМ на основе стандартных ЭОП III поколения с GaAs ОЭС фотокатодом, в настоящее время при-

менение ИК ФПМ целесообразно в оптико-электронных системах наблюдения, работающих совместно с лазерной подсветкой, излучающей на длинах волн: 1,06 мкм, 1,071 мкм и 1,54 мкм в активно-импульсном режиме. При этом стробирование по дальности в системах на основе ИК ФПМ осуществляется импульсным питанием смещения на барьере Шоттки ТЕ-фотокатода.

3. Применение микроканальных пластин в структуре вакуумного блока ИК ФПМ нецелесообразно из-за высоких значений темного тока ТЕ-фотокатода с барьером Шоттки (при комнатной температуре).

ЛИТЕРАТУРА

1. Грузевич Ю. К. Оптико-электронные приборы ночного видения. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014.
2. Грузевич Ю. К., Гордиенко Ю. Н., Солдатенков В. А. // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. "Приборостроение". 2005. С. 51.
3. Волков В. Г. // Специальная техника. 2001. № 5.
4. Коцавцев Н. Ф., Коцавцев А. Н., Федотова С. Ф. // Прикладная физика. 1999. № 3. С. 66.
5. Bell R. L. // Appl. Phys. Lett. 1974. P. 25.
6. Escher J. S. // IEEE Trans. Elec. Dev. 1980. V. ED-27. P. 1244.
7. Kenneth Costello / Патент США № 5047821 от 10.09.1991.
8. LIVAR M506 Laser Illuminated Viewing and Ranging System. Реклама фирмы Invatec (США), 2010.
9. Карасик В. Е., Орлов В. М. Локационные лазерные системы видения. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013.
10. Айнбунд М. Р., Васильев И. С., Вилькин Е. Г. и др. // Прикладная физика. 2006. № 4. С. 96.

Photodetector photocathode with a Schottky barrier based on the InP/InGaAs/InP: Ag structure sensitive up to 1.7 μ

Y. K. Gruzevich, Y. N. Gordienko, L. M. Balyasnyi, P. S. Alkov,
V. Y. Ivanov, A. L. Diatlov, and P. I. Vatsenko

Scientific Production Unity «GEOPHIZIKA-NV»
bld. 2, 23 Matrosskaya Tishina str., Moscow, 107076, Russia
E-mail: yukg@mail.ru

Received July 10, 2015

This article is dedicated to the work on the creation of a TE photocathode with a Schottky barrier, sensing range $\lambda = 0.9 \div 1.7$ mm. The developed heteroepitaxial structure provides manufacturing photocathode unit IR photodetectors for serial manufacturing technology GaAs photocathode for image intensifier III generation by thermocompression connection heteroepitaxial structures with glass entrance window.

Keywords: thermocompression bonding, image intensifier tube, TE photocathode.

REFERENCES

1. Yu. K. Gruzevich, *Optical-Electronic Night Viewing Devices* (Fizmatlit, Moscow, 2014) [in Russian].
2. Yu. K. Gruzevich, Yu. N. Gordienko, and V. A. Soldatenlov, *Vestnik Bauman MGTU. Ser. Priborostr.*, 51 (2005).
3. V. G. Volkov, *Spetsial. Tekhnika*, No. 5, (2001).
4. N. F. Koshchavtsev, A. N. Koshchavtsev, and S. F. Fedotova, *Prikladnaya Fizika*, No. 3, 66 (1999).
5. R. L. Bell, *Appl. Phys. Lett.* 25 (1974).
6. J. S. Escher, *IEEE Trans. Elec. Dev.* **ED-27**, 1244 (1980).
7. Kenneth Costello, USA Patent No. 5047821, September 10, 1991.
8. *LIVAR M506 Laser Illuminated Viewing and Ranging System*. (Advertisemen of Invatec, USA, 2010).
9. V. E. Karasik and V. M. Orlov, *Location Laser Systems of Vision* (Bauman MGTU, Moscow, 2013) [in Russian].
10. M. R. Ainbund, I. S. Vasil'ev, E. G. Vil'kin, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 4, 96 (2006).