

Высококочувствительный гибридный фотоприемный модуль на основе фотокатодов с отрицательным электронным сродством и матриц ПЗС (КМОП) с электронной бомбардировкой тыльной стороны

Л. М. Балясный, А. Б. Балашов, Ю. Н. Гордиенко, Ю. К. Грузевич, Д. Е. Миронов, А. Э. Петров, С. С. Татаурщиков

В работе рассматриваются различные фоточувствительные структуры высокоэффективных фотоприемных модулей (ФПМ) для современных оптико-электронных систем и приборных комплексов, работающих при низких уровнях естественной ночной освещенности (менее 10^{-3} лк) и в условиях воздействия естественных и организованных оптических помех. Анализируются варианты с использованием электронно-оптических преобразователей (ЭОП) III и III+ поколений, фото- и электронно-чувствительных матриц ПЗС или КМОП. Рассматривается возможность создания сверхвысоковакуумных гибридных модулей на основе фотокатодов с отрицательным электронным сродством, используемых в ЭОП III и III+ поколений, и кремниевых электронно-чувствительных ПЗС или КМОП матриц с бомбардировкой фотоэлектронами утоненной обратной стороны матрицы, приведены их основные характеристики, показано их преимущество по сравнению с другими структурами ФПМ и приведены основные области применения в составе современных оптико-электронных систем ночного видения.

Ключевые слова: фотоприемный модуль, электронно-оптический преобразователь, сверхвысоковакуумный гибридный модуль, электронно-чувствительная ПЗС матрица.

Введение

Для реализации современной техникой ночного видения многих важнейших функций, число которых непрерывно возрастает особенно в условиях крайне низкой освещенности и при воздей-

ствии естественных и организованных оптических помех, необходимо внедрение новых физических принципов и ключевых наукоемких и информационных технологий. Функционирование современных оптико-электронных систем (ОЭС) специального назначения в экстремальных условиях эксплуатации было бы практически невозможно без использования высокоэффективных низкоуровневых гибридных приборов на основе фотокатодов с отрицательным электронным сродством (ОЭС-фотокатодов) и электронно-чувствительных матриц ПЗС (ЭЧ ПЗС).

В настоящее время для получения качественного изображения в дневных и сумеречных условиях широко используются ТВ-камеры на основе матриц приборов с зарядовой связью (ПЗС) или комплиментарных металл-оксидных полупроводников (КМОП), у которых пороговая освещенность на поверхности чувствительных элементов матрицы не превышает 10^{-2} лк, что явно недостаточно для получения качественных изображений при использовании их в системах низкоуровневого телевидения при уровнях освещенности менее 10^{-3} лк [1]. Для работы в ночных условиях при уровне естественной ночной освещенности ниже 10^{-3} лк используются фотоприемные модули

Балясный Лев Михайлович¹, главный конструктор.

Балашов Андрей Борисович¹, вед. специалист.

Гордиенко Юрий Николаевич¹, зам. техн. директора.

Грузевич Юрий Кириллович^{1,2}, зам. ген. директора по научной работе, профессор.

Миронов Денис Евгеньевич³, в.н.с.

Петров Алексей Энгелевич¹, с.н.с.

Татаурщиков Сергей Сергеевич³, зам. ген. директора по научной работе.

¹ ОАО «НПО Геофизика-НВ».

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

E-mail: yukg@mail.ru

² МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Россия, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1.

³ АО «ЦНИИ «Электрон».

Россия, 194223, Санкт-Петербург, пр. Тореза, 68, лит. Р.

E-mail: 918@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15 июля 2018 г.

© Балясный Л. М., Балашов А. Б., Гордиенко Ю. Н., Грузевич Ю. К., Миронов Д. Е., Петров А. Э., Татаурщиков С. С., 2018

(ФПМ) на основе электронно-оптических преобразователей (ЭОП) III и III+ поколений, состыкованных с фоточувствительными матрицами ПЗС или КМОП (ФЧ ПЗС (КМОП)) через волоконно-оптический элемент (ВОЭ) или фокон, схема и внешний вид которых приведен на рис. 1 [2].

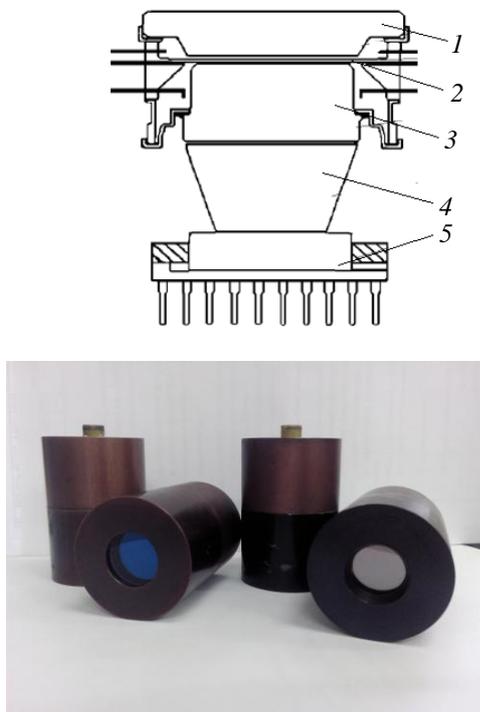


Рис. 1. Схема и внешний вид фотоприемного модуля на основе ЭОП, состыкованного с матрицей ПЗС (КМОП): 1 – входное окно с ОЭС-фотокатодом, 2 – МКП, 3 – волоконно-оптический элемент с катодоллюминесцентным экраном ЭОП, 4 – фокон, 5 – матрица ФЧ ПЗС (КМОП)

В процессе формирования выходного видеосигнала в структуре ФПМ происходит многократное преобразование входного изображения, сформированного на фотокатод ЭОП, сначала в пространственное распределение фотоэлектронов в соответствии с квантовым выходом фотокатода, которые затем ускоряются электрическим полем к микроканальной пластине (МКП), в каналах которой происходит усиление электронного потока. За счет приложенного поля многократно усиленные электроны бомбардируют нанесенный на ВОЭ катодоллюминесцентный экран ЭОП, который преобразует пространственное распределение электронов в изображение, передаваемое с помощью ВОЭ на состыкованный с ним кристалл ФЧ матрицы ПЗС (КМОП), которая, в свою очередь, преобразовывает оптическое изображение в электрический видеосигнал. Каждое преобразование оптического излучения в поток фотоэлектронов и обратно приводит к искажению входного изображения, качество которого оценивается передаточными функциями каждого каскада преобразования

оптического и электрического сигнала, при этом происходит потеря качества изображения за счет снижения разрешающей способности, наличия различных дефектов и искажений в фотокатод, МКП, катодоллюминесцентном экране ЭОП и ВОЭ (черных точек, искажения прямой линии, проявления границ многожильных световодов и др.). На поверхность МКП в ЭОП III и III+ поколений наносят ионно-барьерную пленку с целью защиты ОЭС-фотокатода от обратного потока ионов из МКП, что снижает отношение сигнал-шум ЭОП из-за потери части сигнального заряда.

Гибридный фотоприемный модуль

Одним из перспективных направлений улучшения качества сформированного низкоуровневого изображения является уменьшение в структуре фотоприемных модулей количества преобразований входного оптического сигнала в поток фотоэлектронов и обратно, а также изменение принципа усиления электронного потока (вместо размножения фотоэлектронов за счет вторичной эмиссии в каналах МКП использование размножения фотоэлектронов за счет ударной ионизации в кремнии электронно-чувствительной (ЭЧ) матрицы ПЗС или КМОП) путем введения в структуру свехвысоковакуумного ЭОП кремниевой ЭЧ ПЗС (КМОП) с бомбардировкой фотоэлектронами утоненной обратной стороны матрицы. Схема и внешний вид гибридного фотоприемного модуля приведен на рис. 2 [2].

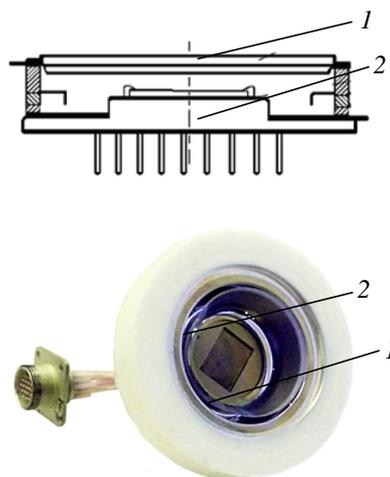


Рис. 2. Гибридный прибор со встроенной в вакуумный объем ЭЧ ПЗС (КМОП) с электронной бомбардировкой ее утоненной обратной стороны: 1 – входное окно с ОЭС-фотокатодом, 2 – матрица ПЗС (КМОП).

ЭЧ ПЗС (КМОП) получают путем утонения электронно-чувствительной области матрицы ПЗС (КМОП) со стороны подложки до 10÷20 мкм. Основная сложность заключается в том, чтобы полу-

чить утоненную часть (мембрану) равномерной по толщине. С этой целью кристалл крепится в специально разработанную оснастку и опускается в травитель. При этом поверхность, не подлежащая утонению, защищается элементами оснастки.

Учитывая, что ЭЧ ПЗС (КМОП) матрица чувствительна в УФ и видимой областях спектра, необходимо обеспечить защиту кристалла от оптического излучения, прошедшего через полупрозрачный ОЭС-фотокатод ЭОП, т. к. к сигналу, возникающему в кремнии под действием электронной бомбардировки, может добавиться паразитный сигнал, обусловленный оптическим излучением. Для снижения чувствительности ЭЧ ПЗС (КМОП) к оптическому излучению на рабочую утоненную поверхность ЭЧ ПЗС (КМОП) наносится алюминиевое покрытие, не пропускающее оптическое излучение, но прозрачное для электронов с энергией $5 \div 10$ кэВ.

Для того чтобы паразитное оптическое излучение, прошедшее через полупрозрачный ОЭС-фотокатод ЭОП, не отражалось от алюминиевой пленки обратно на фотокатод, ухудшая таким образом пространственное разрешение прибора, целесообразно применять в качестве покрытия окисленный, так называемый «черный алюминий» или дополнительно нанести на слой алюминия окиси кремния (SiO_x). Проведенные исследования показали, что для получения требуемого результата достаточно, чтобы толщина пленки алюминия должна быть $450 \div 500 \text{ \AA}$, а толщина пленки SiO_x – в диапазоне от 700 \AA до 1000 \AA . При этом принципиально важно, чтобы показатель преломления слоев SiO_x был $n \geq 1,9$.

Для создания высокоэффективного ФПМ на основе ЭЧ ПЗС (КМОП) необходимо было обеспечить оптимальное легирование ЭЧ ПЗС (КМОП), т. к. усиление сигнала в разрабатываемом модуле достигается за счет бомбардировки утоненной поверхности ЭЧ ПЗС (КМОП) высокоэнергетичными фотоэлектронами (до 10 кэВ). При электронной бомбардировке фотоэлектроны, попадая в кремний, генерируют электронно-дырочные пары. Средняя энергия, необходимая для образования одной электронно-дырочной пары, равна 3,6 эВ. Таким образом, при энергии бомбардирующих электронов от 5 до 10 кэВ в кремнии может рождаться от 1350 до 2700 пар носителей заряда. При этом следует отметить, что электроны с энергией 10 кэВ проникают в объем кремния в среднем на глубину порядка 1 мкм, а электронно-дырочные пары образуются на всем пути бомбардирующего электрона. Учитывая, что толщина мембраны (электронно-чувствительной области

ЭЧ ПЗС (КМОП) составляет порядка 15 мкм, то созданные электронной бомбардировкой заряды образуются в приповерхностной области мембраны, обращенной к фотокатоду, в то время как потенциальные ямы ячеек ЭЧ ПЗС (КМОП) находятся с противоположной стороны. Поэтому важнейшей задачей при создании модуля является «транспортировка» образовавшихся в результате облучения дырок в потенциальные ямы под затворами ЭЧ ПЗС (КМОП). Для этого в мембране создают встроенное тянущее электрическое поле, которое создает ток образованных электронной бомбардировкой дырок в потенциальные ямы ячеек ЭЧ ПЗС (КМОП). Для создания тянущего поля у входной стороны мембраны p -типа методом ионной имплантации формируется p^+ -слой. При этом необходимо обеспечить градиент концентрации основных носителей заряда (ОНЗ), направленный к входной поверхности мембраны.

Для формирования повышенной концентрации носителей заряда проводилась имплантация примеси бора в приповерхностную область матрицы ПЗС. В результате имплантации бора в кремний образовалась область с p^+ -проводимостью, концентрация ОНЗ в которой на несколько порядков выше, чем в мембране. Профиль распределения легирующей примеси имеет максимум концентрации на некотором удалении от входной поверхности мембраны (порядка 0,1 мкм), поэтому между входной поверхностью мембраны и максимумом концентрации градиент концентрации носителей имеет противоположное направление. В результате этого образуется так называемый «мертвый» слой, т. е. область в объеме мембраны, в которой электронно-дырочные пары рекомбинируют. Следовательно, сгенерированные дырки не попадают из этой области в область тянущего поля и далее в подзатворные потенциальные ямы ячеек, не давая, таким образом, вклада в усиление сигнала. Фотоэлектроны будут давать усиление сигнала с ЭЧ ПЗС (КМОП) лишь тогда, когда глубина их проникновения в мембрану превысит толщину «мертвого» слоя.

Таким образом, следующей важной задачей при изготовлении ЭЧ ПЗС (КМОП) является уменьшение толщины «мертвого» слоя, для чего необходимо «сдвинуть» максимум концентрации легирующей примеси как можно ближе к поверхности мембраны. Для оптимизации характеристик встроенного поля проводились исследования концентрационного профиля p^+ -слоя методом электрохимического вольт-фарадного профилирования на автоматизированной установке ECV-Pro фирмы Nanometrics (США). Форма профиля распределе-

ния легирующей примеси зависит от дозы p^+ -примеси и энергии легирования. Одной из целей работы был выбор оптимального режима ионного легирования, для чего проводились исследования профилей концентрации ОНЗ для режимов легирования с различной энергией пучка.

Исследования наглядно показали, что увеличение энергии легирования сдвигает максимум профиля вглубь образца, тем самым увеличивая толщину «мертвого» слоя. По результатам исследований была проведена корректировка процесса ионного легирования: энергия пучка ионов при легировании была снижена с 25 кэВ до 13 кэВ.

Обсуждение результатов

Проведенные исследования показали, что усиление электронного изображения в кремнии имеет значительно большее значение сигнал-шум, чем при умножении электронов в МКП.

Все перечисленные выше факторы приводят к значительному росту разрешения и контраста конечного изображения в ФПМ на основе ЭЧ ПЗС (КМОП). Кроме того, устранение стыковки матрицы ЭЧ ПЗС (КМОП) через волоконную оптику снижает размеры и вес прибора. Для питания такого устройства при использовании планарной конструкции модуля требуется всего одно питающее напряжение для усиления электронного потока.

Учитывая, что фактор шума при усилении электронов в кремнии не превышает 1,09 по сравнению с ЭОП III и III+ поколений с МКП, содержащей ионно-барьерную пленку, в которой фактор шума равен 1,8÷2,0, гибридный прибор на основе ЭЧ ПЗС (КМОП) полностью реализует высокую чувствительность GaAs ОЭС-фотокатода. При этом первая фаза усиления входного оптического сигнала определяет отношение сигнал-шум всего прибора.

Таким образом, усиления в кремнии на уровне 200 достаточно, чтобы получить однофотонную регистрацию без деградации сигнала при темновом сигнале с ЭЧ ПЗС (КМОП) в 35 электронов с ячейки за кадр. На рис. 3 приведены одноэлектронные импульсы, полученные с помощью гибридного прибора на основе ЭЧ ПЗС (КМОП) сотрудниками АО «ЦНИИ «Электрон» на протонном синхротроне в CERN [3].

Сравнение качества изображения, полученного в ФПМ с GaAs ОЭС-фотокатодом и ЭЧ ПЗС матрицей и модуля на основе ЭОП III и III+ поколений с GaAs ОЭС-фотокатодом, состыкованного с матрицей ФЧ ПЗС (КМОП) через ВОЭ, показало значительно более высокое качество модуля на основе ЭЧ ПЗС (КМОП).

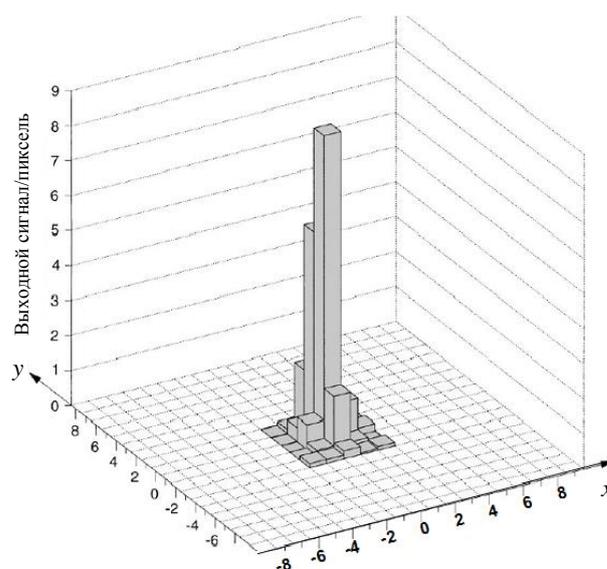


Рис. 3. Одноэлектронные импульсы, полученные с помощью гибридного модуля на основе ЭЧ ПЗС (КМОП).

На рис. 4 приведены графики модулей передаточных функций $H(v_x)$ фоточувствительной матрицы ПЗС (КМОП), ФПМ на основе GaAs ОЭС-фотокатода и ЭЧ ПЗС матрицей и ФПМ на основе ЭОП III и III+ поколений с GaAs ОЭС-фотокатодом, состыкованного с ФЧ ПЗС (КМОП) матрицей [2].

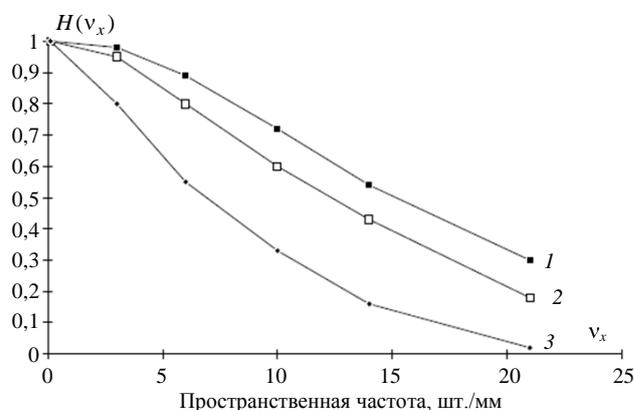


Рис. 4. Модули передаточных функций различных типов ФПМ. 1 – ФЧ ПЗС, 2 – ФПМ с ЭЧ ПЗС, 3 – ФПМ с ФЧ ПЗС.

Заключение

Проведенные в работе исследования, а также анализ современного состояния разработок и производства низкоуровневых телевизионных систем и гибридных приборов на основе отечественных ЭЧ ПЗС (КМОП) матриц с электронной бомбардировкой обратной стороны утоненной матрицы, показал, что практически все основные параметры и характеристики гибридных приборов,

которые определяют дальность действия оптико-электронных систем и приборных комплексов при низких уровнях естественной ночной освещенности, значительно превосходят параметры и характеристики модулей на основе ФЧ ПЗС (КМОП) матриц или ФПМ на основе ФЧ ПЗС (КМОП), состыкованных с помощью волоконно-оптических элементов с ЭОП III и III+ поколений с GaAs ОЭС-фотокатодом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Секев К., Томпсетт М. Приборы с переносом заряда. – М.: Мир, 1978.
2. George M., Williams Jr., et al. // SPIE. 2012. Vol. 2172. P. 1273
3. Buontempo S., Chiodi G., Dalinenko I. N., Ereditato A., Ekimov A. V., Fabre J. P., Fedorov V. Yu., Frenkel A., Galeazzi F., Garu F., Golovkin S. V., Govorun V. N., Kalashnikova N. N., Kossov V. G., Kozarenko E. N., Kreslo I. E., Lasovsky L. Yu., Liberti B., Malyarov A. V., Martellotti G., Medvedkov A. M., Penso G., Vishnevsky G. I., Wol T., Zhuk A. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 1998. Vol. A 413. P. 255.

PACS: 68.65.Fg, 73.21.Fg, 73.40.Cg, 81.07.St.

High-sensitivity hybrid device based on photocathodes with negative electronic affinity and CCD (CMOS) matrixes with electron bombardment its back side

L. M. Balyasny¹, A. B. Balashov¹, Yu. N., Gordienko¹, Yu. K. Gruzevich^{1,2},
D. E. Mironov³, A. E. Petrov¹, and S. S. Tataurchikov³

¹ Scientific Production Unity «GEOFIZIKA-NV», JSC
Bld. 2, 23 Matrosskaya Tishina, Moscow, 107076, Russia
E-mail: yukg@mail.ru

² Bauman Moscow State Technical University
2-nd Baumanskaya str., Moscow, 105005, Russia
E-mail: yukg@mail.ru

³ "NRI Electron", JSC
lit. P, 68 Toreza av., St. Petersburg, 194223, Russia
E-mail: 918@mail.ru

Received July 15, 2018

Various photosensitive structures of the high effective photoactive modules (FAM) for modern electro optical systems working at low levels of natural night exposure (less than 10-3 lux) and in conditions of influence of the natural and organized optical interferences are considered. Variants with usage of Third & Third+ generation image intensifier tubes (IIT Gen. III & III+), a photo- and electro-sensitive CCD or CMOS (complimentary metal oxide semiconductor) are analyzed. The opportunity of designing the high sensitive hybrid modules on the basis of photocathodes with the negative electronic affinity, used in IIT Gen. III & III+, and CCD (CMOS) matrixes with electron bombardment its back side are considered. The main parameters and characteristics of these modules. The advantage of the hybrid modules in comparison with other modules structures is shown. Prospects of the development of these hybrid devices for various applications for night vision systems are given.

Keywords: CCD, EBCCD, CMOS, Third generation image intensifier tubes, negative electron affinity.

REFERENCES

1. K. Seken and M. Tompsettr, *Charge coupled devices* (Mir, Moscow, 1978) [in Russian].
2. M. George, Jr. Williams, et al., SPIE **2172**, 1273 (2012).
3. S. Buontempo, G. Chiodi, I. N. Dalinenko, A. Ereditato, A. V. Ekimov, J. P. Fabre, V. Yu. Fedorov, A. Frenkel, F. Galeazzi, F. Garu, S. V. Golovkin, V. N. Govorun, N. N. Kalashnikova, V. G. Kossov, E. N. Kozarenko, I. E. Kreslo, L. Yu. Lasovsky, B. Liberti, A. V. Malyarov, G. Martellotti, A. M. Medvedkov, G. Penso, G. I. Vishnevsky, T. Wol, and A. Zhuk, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **A 413**, 255 (1998).