

УДК 621.383.4/5:621.375:546.817.23

## **МАТРИЧНОЕ ФОТОПРИЕМНОЕ УСТРОЙСТВО НА ОСНОВЕ СЕЛЕНИДА СВИНЦА**

*В. Д. Бочков, Б. Н. Дразников, Г. А. Казанцев,  
Э. И. Кафтаненко, М. Л. Храпунов*

Государственное унитарное предприятие «Научно-производственное объединение «Орион»»,  
Москва, Россия

*Приведены результаты научно-исследовательской работы по разработке фото-приемного устройства, состоящего из фотоприемника на основе матрицы из PbSe форматом 8x8 и термоэлектрического охладителя, и устройства обработки и управления. Показана возможность реализации порогового потока  $6,32 \cdot 10^{-8}$  Вт/эл при частоте модуляции 1200 Гц, полосе пропускания сигнала 150 Гц, температуре слоя 22 °С.*

ИК-системы с применением фоторезисторов на основе солей свинца до сих пор находят широкое применение в военной и коммерческой аппаратуре, о чем свидетельствует проведенный анализ рынка США, в соответствии с которым доходы от их продаж занимают в 1998 г. третье место после КРТ и антимонида индия, что обусловлено их дешевизной, надежностью, доступностью, меньшими

габаритными размерами, массой и энергопотреблением [1]. Привлекательной особенностью таких приемников является их способность работать как без охлаждения, так и при термоэлектрическом охлаждении до 195 К.

Следует отметить, что конечный потребитель ИК-систем заинтересован в получении информации большого объема и лучшего качества, что достигается при использовании больших матриц. Поэтому уже с 70-х гг. наблюдается тенденция как к увеличению числа элементов в матрице, что обеспечивает лучшее разрешение и чувствительность ИК-системы, так и к созданию более сложных фотоприемных устройств, осуществляющих усиление и считывание информации.

Матричное фотоприемное устройство (ФПУ) на основе селенида свинца для области спектра 3—5 мкм было разработано и изготовлено в рамках научно-исследовательской работы, заявленной МО, включает фотоприемник (ФП) и устройство обработки и управления (УОУ) и устанавливается непосредственно на оптический блок ИК-системы (рис. 1).

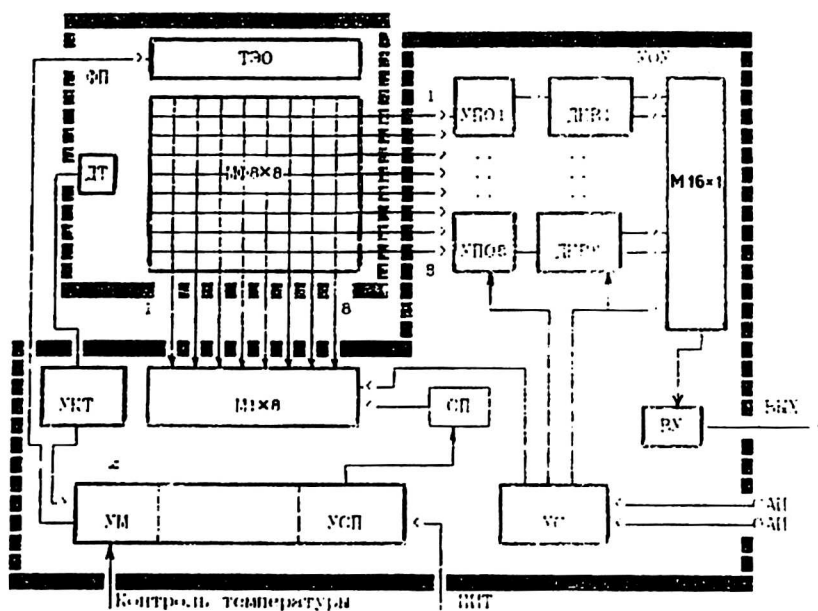


Рис. 1. Структурная схема фотоприемного устройства:

- ФП — фотоприемник; ТЭО — термоэлектрический охладитель; МФ8x8 — матрица;
- ДТ — датчик температуры; УОУ — устройство обработки и управления; УПО1, ..., УПО8 — устройство предварительной обработки; ДКВ1, ..., ДКВ8 — двойная коррелированная выборка; М1x8 — коммутатор-распределитель; М16x1 — 16-канальный коммутатор; ВУ — выходной усилитель; УС — устройство синхронизации; УКТ — устройство контроля температуры; УСП — устройство стабилизации питания; СП — стабилизатор напряжения; УМ — усилитель мощности

В ФПУ предусмотрен также модулятор светового потока, выполненный в виде диска с прорезями, размеры которых определяются размерами фоточувствительной площадки (ФЧП) матрицы. Диск модулятора располагается вблизи входного окна. Синхронизация работы ФПУ (время кадра) с частотой модуляции (скоростью вращения модулятора) обеспечивается синхродатчиком на базе оптопары (светодиод-фотодиод), который подает импульсный сигнал начала опроса элементов матрицы.

ФП содержит матрицу фоточувствительных элементов (МФ8x8) форматом 8x8, термоэлектрический охладитель (ТЭО), работающий в режиме термостабилизации, датчик температуры (ДТ).

УОУ состоит из устройств предварительной обработки (УПО1, ..., УПО8), коммутатора-распределителя (М1х8), устройств двойной коррелированной выборки (ДКВ1, ..., ДКВ8), 16-канального коммутатора (М16х1), выходного усилителя (ВУ), стабилизатора питания (СП), устройств контроля температуры (УКТ) и синхронизации (УС), устройства стабилизации питания (УСП), а также усилителя мощности (УМ).

Фоточувствительная матрица (МФ8х8) представляет собой сложную многослойную структуру, включающую изоляционную подложку, фоточувствительный слой, систему токопроводящих шин X-Y адресации и контактных площадок. Фоточувствительный слой изготавливается методом химического осаждения пленки PbSe, сенсibilизированной посредством подогрева в замкнутом объеме, система токопроводящих шин адресации и контактных площадок — методом вакуумного напыления тонких пленок с последующим фотолитографическим выделением. Особенность изготовления матрицы состоит в том, что каждая вертикальная шина проходит через весь ряд вертикального столбца из восьми ФЧП и делит каждую из них на две равные части. Горизонтальные шины представляют собой гребенку, формирующую второй размер ФЧП. Каждая такая шина объединяет горизонтальный ряд из восьми площадок. Вертикальные и горизонтальные шины в местах перекрестий изолированы между собой. Фрагмент топологии матрицы представлен на рис. 2, из которого видно, что индивидуальная фоточувствительная площадка представляет собой квадрат с двумя боковыми электродами и одним центральным, разделяющим ее на две равные части. Каждая половина ФЧП работает при противоположных полярностях подаваемого напряжения смещения [2]. Размер ФЧП без учета центрального электрода  $(1,2 \pm 0,01) \times (1,2 \pm 0,01)$  мм. Коэффициент заполнения рабочей площади матрицы составляет 65,8 %. Такой способ изготовления, несмотря на кажущуюся простоту, выявил ряд проблем, в частности обеспечение изоляции в перекрестиях токоведущих шин, которые были решены в процессе выполнения работы.

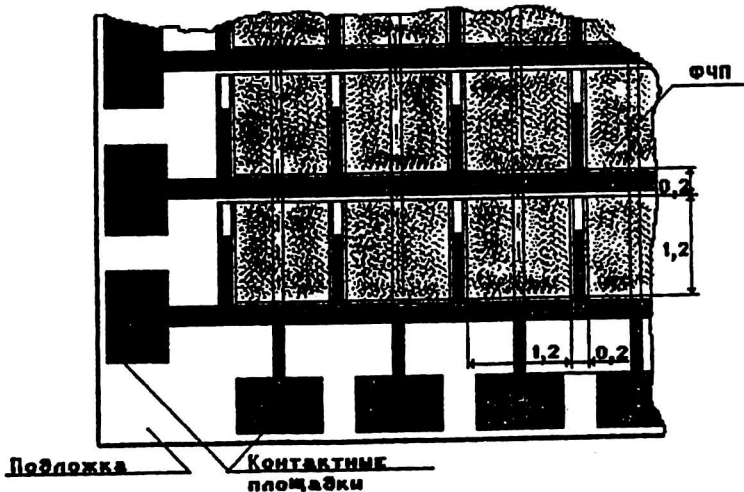


Рис. 2. Фрагмент топологии матрицы

Устройство обработки и управления обеспечивает считывание сигналов с входа ФП и формирование видеосигнала следующим образом.

Коммутатор-распределитель М1х8 осуществляет поочередную подачу напряжения смещения ( $E_{см}$ ) на каждый опрашиваемый столбец матрицы, причем сна-

чала на столбец, связанный с элементами 1, 2, ..., 8, затем 9, 10, ..., 16 и т. д., и подключение неопрашиваемых столбцов к нулевому потенциалу источника  $E_{см}$ .

Устройства предварительной обработки информации (УПО1, ..., УПО8) соединены со строками матрицы и обеспечивают предварительную обработку сигналов с выхода матрицы.

Устройства двойной коррелированной выборки (ДКВ1, ..., ДКВ8), связанные с выходами (УПО1, ..., УПО8), осуществляют выборку и хранение сигналов.

Функциональная схема устройств предварительной обработки и двойной коррелированной выборки представлена на рис. 3, из которой видно, что каждое из УПО1, ..., УПО8 содержит трансимпедансный усилитель (ТИУ), интегратор (ИНТ), дискретно-аналоговый фильтр (ДАФ) и ключ, а каждое из ДКВ1, ..., ДКВ8 — две идентичные схемы двойных коррелированных выборок (ДКВ1.1, ДКВ1.2, ..., ДКВ8.1, ДКВ8.2), что позволяет выбирать и хранить сигналы от элементов матрицы, расположенных через один (одна из схем связана с четными элементами матрицы, вторая — с нечетными).

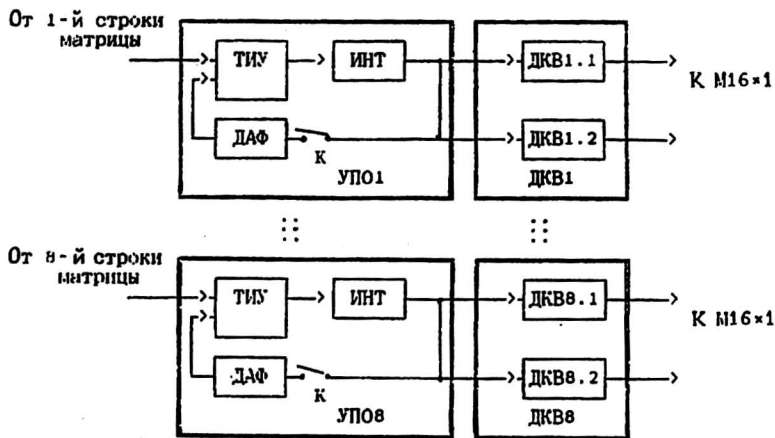


Рис. 3. Функциональная схема устройств предварительной обработки и двойной коррелированной выборки:

ТИУ — трансимпедансный усилитель; ИНТ — интегратор; ДАФ — дискретно-аналоговый фильтр; К — ключ; ДКВ1, ..., ДКВ8 — устройство двойной коррелированной выборки; ДКВ1.1, ДКВ1.2, ..., ДКВ8.2 — схема двойной коррелированной выборки; УПО2, ..., УПOn — устройство предварительной обработки

ТИУ, построенный на основе маломощного операционного усилителя, обеспечивает преобразование тока через ФЧП в напряжение и устраняет взаимное влияние между каналами за счет так называемого "виртуального нуля", т. е.  $E_{см}$  на неопрашиваемых элементах матрицы равно нулю, а сопротивления на обоих концах напрушиваемого элемента близки к нулю.

Напряжение на выходе ТИУ ( $U_{вых}$ ) при отсутствии оптического входного сигнала определяется как

$$U_{вых} = E_{см} R_{ос} / R_T,$$

где  $R_{ос}$ ,  $R_T$  — сопротивление резистора в цепи обратной связи ТИУ и темновое сопротивление фоторезистора, соответственно.

Таким образом, на выходе ТИУ образуется постоянная составляющая напряжения сигнала, величина которой зависит от величины  $R_T$ . Видеосигнал, образованный по следовательности этих постоянных составляющих напряжений, принято называть "структурной помехой", амплитудное значение которой зависит от неоднородности фоточувствительной структуры по  $R_T$ .

ИНТ осуществляет накопление в течение времени считывания сигнала с опрашиваемого элемента (время "светового" полукадра) и передачу его на вход ДКВ, где сигнал запоминается, и на ДАФ через ключ (К), где происходит устранение структурной помехи. Последнее осуществляется следующим образом. ДАФ в течение времени "темнового" полукадра (К замкнут) запоминает структурную помеху и передает на вход ТИУ, где в течение времени "светового" полукадра (К разомкнут) происходит вычитание "структурной" помехи.

Выходной 16-канальный коммутатор (М16х1) считывает сигналы с устройств двойной коррелированной выборки и формирует видеосигнал с однозначным обеспечением пространственно-временного преобразования, т. е. соответствие пространственного положения и номера элемента и временного положения сигнала от этого элемента.

Общая временная диаграмма работы ФПУ (рис. 4) иллюстрирует процесс формирования выходного сигнала, синхронно связанного с работой модулятора. На верхней строке диаграммы представлен процесс "набегания" изображения модулятора на одну из строк матрицы, а на последующих восьми представлена временная зависимость мощности светового потока, попадающего на каждую строку матрицы. Импульс ОАИ, синхронизированный с частотой модуляции, определяет начало опроса, с которым совпадает первый синхроимпульс САИ. Начиная с 21-го импульса САИ на выходе ФПУ появляется фотоэлектрический сигнал от ФЧП матрицы под номером 1, затем 2 и так до 64.

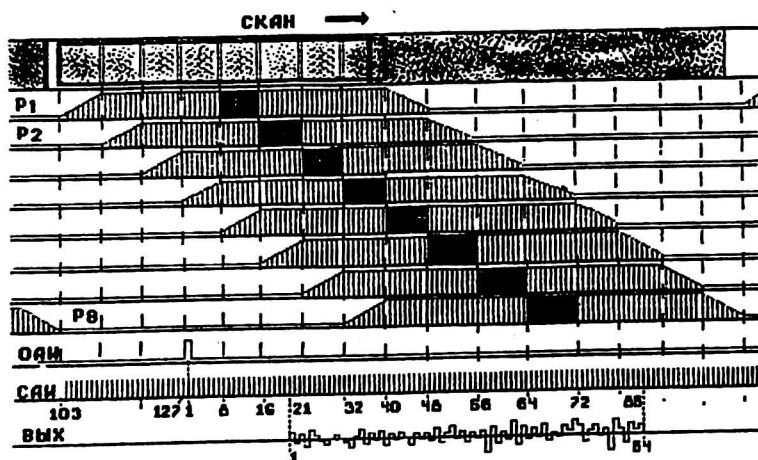


Рис. 4. Временная диаграмма работы ФПУ

Устройство синхронизации (УС) осуществляет формирование импульсов управления работой ФПУ.

Устройство контроля температуры (УКТ) работает совместно с термоэлектрическим охладителем (ТЭО) и датчиком температуры (ДТ), осуществляя термостабилизацию матрицы следующим образом. При температуре окружающей среды выше температуры стабилизации, ТЭО работает в режиме охлаждения, в противном случае — в режиме подогрева за счет обратной полярности протекающего через ТЭО тока.

Температура матрицы измеряется ДТ, который включен в одно из плеч мостовой схемы, в другом плече которого потенциометром достигается баланс моста, соответствующий определенным значениям сопротивления ДТ и температуры матрицы. Сигнал разбаланса моста усиливается дифференциальным усилителем и через усилитель мощности управляет ТЭО.

Конструкция ФПУ (рис. 5) выполнена в виде фланца 3 с резиновым уплотнением и геометрически развитой поверхностью на внешней стороне 4, обеспечивающих герметизацию внутреннего объема и более эффективный теплосброс в окружающую среду. УОУ выполнено в виде соединяющихся между собой специальными стойками печатных плат 2, на одной из которых расположены восемь микросборок ДАФ и микросхема коммутатора-распределителя (М1х8), на другой — микросборки ДКВ, коммутатора (М16х1) и ВУ, а также УКТ, выполненный на дискретных элементах, на третьей плате размещено УС, на четвертой — УСП, СП и УМ. В центрах плат предусмотрены отверстия, в которые вставляется фотоприемник 1. Питание и синхронизация ФПУ обеспечивается от внешних устройств через ленточный кабель 5, выходной сигнал ФПУ выводится через коаксиальный кабель 6 с разъемом типа МР1-30 на конце.

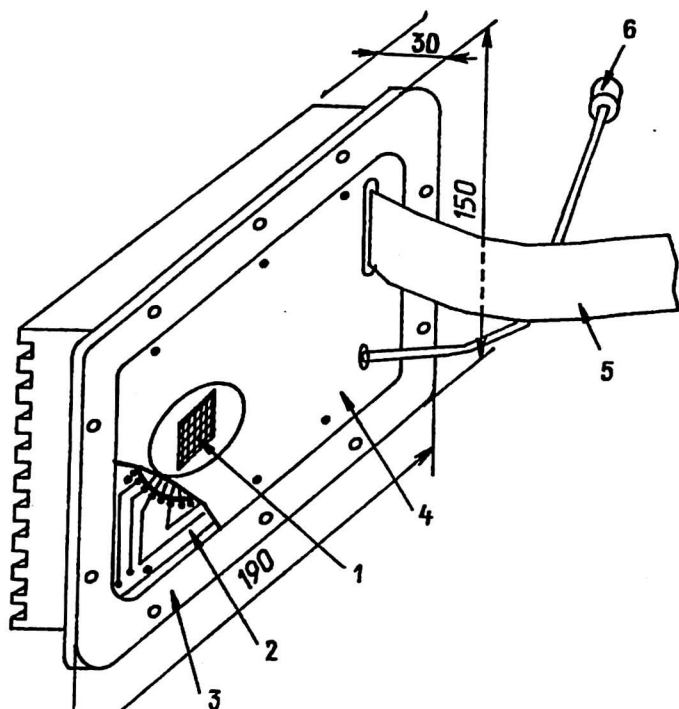


Рис. 5. Конструкция фотоприемного устройства

Экспериментальные исследования макетного образца заключались в оценке основных параметров, в т. ч. пороговой чувствительности ФЧП ( $P_{\text{пор.ф}}$ ), которая связана с удельной обнаружительной способностью ФЧП матрицы ( $D^*_{\text{ф}}$ ) следующим соотношением:

$$P_{\text{пор.ф}} = \frac{\left[ \epsilon_{\text{ши}}^2 + A \left( S(U)_{\text{ф}} / D^*_{\text{ф}} \right)^2 \right]^{1/2}}{(2t_{\text{и}})^{1/2} S(U)_{\text{ф}}}$$

где  $\epsilon_{\text{ши}}$  — среднее квадратическое значение спектральной плотности напряжения шума УПО на частоте модуляции, В/Гц<sup>1/2</sup>;

$A$  — площадь ФЧП, см<sup>2</sup>;

$S(U)_ф$  — вольтовая чувствительность ФЧП, В/Вт;

$t_{и}$  — время интегрирования сигнала, осуществляемого ДАФ, с.

По результатам измерения рассчитывалось среднее значение порогового потока ФПУ как

$$P_{пор} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{пор.ф.}}{n},$$

где  $n$  — число ФЧП в матрице.

Результаты исследования, проведенные при температуре фотослоя 22 °С, частоте модуляции 1200 Гц, полосе пропускания сигнала 150 Гц, представлены ниже:

Пороговый поток, Вт/эл, не более .....	6,32·10 <sup>-8</sup>
Мощность энергопотребления, Вт .....	8,6
Время:	
опроса одного канала, мкс .....	0,64
считывания кадра, мкс .....	7,8
выхода на режим с учетом ТЭО, мин, не более .....	3
Кэффициент фотоэлектрической связи, %, не более:	
между соседними .....	2,9
между вторыми .....	0,3
между остальными .....	0,05

Питание ФПУ осуществляется от внешних источников постоянного напряжения 5 В; 15 В; -15 В; 6,3 В; -6,3 В.

Управление ФПУ обеспечивается импульсами синхронизации (САИ) и опроса (ОАИ) с нижеследующими требованиями к их параметрам:

период следования импульсов синхронизации  $T_{САИ} = 7,8 \pm 0,01$  мкс;

период следования импульсов начала опроса  $T_{ОАИ} = 128 T_{САИ} \pm \Delta T_{САИ}$ ;

$\Delta T_{САИ} = (0 - 2) T_{САИ}$ ;

длительность на уровне 0,5 амплитуды импульсов синхронизации

$T_{САИ} = (0,6 \pm 0,1)$  мкс;

длительность на уровне 0,5 амплитуды импульсов начала опроса

$T_{ОАИ} = (7,8 \pm 0,1)$  мкс;

полярность импульсов — положительная.

Анализ полученных результатов исследований показывает, что благодаря успешным решениям проблем, связанных с изготовлением матрицы оригинальной структуры и выбором принципа обработки информации, удалось реализовать высокую чувствительность неохлаждаемого фотоприемного устройства на основе PbSe. Результаты исследований могут быть использованы при разработке ИК-систем широкого назначения.

### Л и т е р а т у р а

1. У ш а к о в а М. Б. Американский рынок ИК-систем с применением фоторезисторов на основе сульфида и селенида свинца: Обзор/ОНТИ ГУП «НПО "Орион"», 1998. — 43 с.

2. Dain S. Glad, James S. Lorenko, Christopher M. Parry. Pulse-bias modulation of a PbS mosaic array//Optical Engineering. 1980. № 19(6). P. 894—900.

## AREA ARREY PbSe PHTODETECTIVE ASSEMBLY

W. D. Bochkov, B. N. Drarhnikov, G. A. Kasantsev,  
E. I. Kaftanenko, M. L. Khrapunov

The State Unitary Enterprise «RD&P Centre "Orion"», Moscow, Russia

*Results of scientific and research work in development of photodetective assembly consisting of a photodetector, based on PbSe (8x8) array and a thermoelectric cooler, and a processing and control device are given. Possibility of realizing a threshold flow of 6,32·10<sup>-8</sup> W/el at modulation frequency of 1200 Hz, signal transmitting band of 150 Hz, layer temperature of 22 °C is shown.*