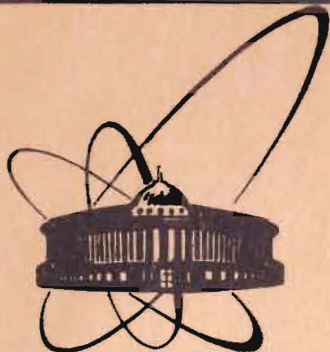


85-550



**сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна**

P10-85-550

Х.Кисслинг, А.Л.Меньшиков, В.Н.Поляков,
В.И.Приходько

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЭС ЛИНЕЕК
В ОБЛАСТИ ПОРОГОВОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

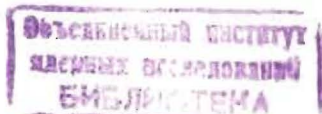
1985

Преимущества формирователей видеосигналов на приборах с зарядовой связью /ПЗС/ по сравнению с вакуумными телевизионными передающими трубками /цифровое управление, жесткий геометрический растр чувствительных элементов и др./ привлекают внимание разработчиков измерительных систем. Физические принципы работы, технология изготовления и вопросы применения светочувствительных приборов с зарядовой связью достаточно хорошо рассмотрены с качественной стороны в монографиях ^{1,2/}, но характеристики конкретных приборов в измерительных системах, особенно в области пороговой чувствительности, требуют тщательного изучения.

Ниже приводятся результаты исследования характеристик линейных фоточувствительных схем с зарядовой связью /ЛФЦЭС/ типа К1200ЦЛ2 ^{3/}. ЛФЦЭС, часто называемые в литературе ПЗС-линейками, предназначены для измерения и обработки координат одномерных изображений освещенных объектов. Такими объектами могут быть, например, оптические спектры, изображения треков частиц на фотопленке, графические и текстовые материалы и другие оптически контрастные объекты. Чтобы обрабатывать с помощью ЛФЦЭС двумерные изображения, необходимо применить механическое сканирование в плоскости изображения объекта.

ЛФЦЭС К1200ЦЛ2 содержит 2048 светочувствительных элементов-фотодиодов и два сдвиговых трехфазных транспортных ПЗС-регистра с поверхностным каналом. Каждый из регистров имеет собственные выходные устройства, а также отдельные входные устройства для ввода аналоговой информации, например, фонового заряда. 48 светочувствительных элементов микросхемы закрыты непрозрачным слоем алюминия и служат для отсчета уровня "черного" в строке. Каждый из транспортных регистров имеет дополнительно по 8 сдвиговых элементов, сигнал с которых несет информацию об уровне заполнения регистра сдвига темным зарядом.

Испытания К1200ЦЛ2 проводились в телевизионной камере, конструкция которой обеспечивает минимальный уровень помех. Управление потенциалами электродов ЛФЦЭС осуществлялось с помощью преобразователей уровня ТТЛ-МОП типа К170АПЗ. Пульсации напряжения питания схемы управления ЛФЦЭС не превышали 0,2 мВ. Выходной истоковый повторитель был нагружен на генератор тока и эмиттерный повторитель, расположенные в непосредственной близости от ЛФЦЭС.



1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ЛФСЗС

Испытания 10 линеек типа К1200ЦЛ2 показали, что высокий уровень импульсных напряжений можно установить одинаковым для всех трех фаз, затворов разрешения обоих регистров, затвора накопления, затвора транзистора сброса и входного диода. При потенциале подложки +15 В значение напряжения низкого уровня равно нулю, а высокого /напряжение питания преобразователей уровня/ $+10,7 \pm 1,2$ В, при изменении высокого уровня в этих пределах результирующая неэффективность переноса минимальна и практически не изменяется.

Входное устройство каждого транспортного регистра состоит из входного диода и двух затворов. При инжекции заряда по методу уравнивания потенциалов величина входного сигнала прибора линейно зависит от разности потенциалов между входными затворами. При напряжении на первом входном затворе +7 В коэффициент передачи ЛФСЗС с входа электрической инжекции на выход для испытанных линеек находится в диапазоне $0,2 \div 0,5$.

Выходное устройство каждого регистра состоит из выходного затвора и детектирующего узла, соединенного с затвором выходного транзистора и истоком транзистора сброса. Нормальная работа выходного узла обеспечивается при напряжении на выходном затворе, равном $+7,5 \pm 2,5$ В, и нулевом напряжении на стоках транзисторов. Напряжение на экранирующем затворе устанавливается по минимуму прохождения импульса сброса в выходную цепь, достигаемым при напряжении на затворе, равном +1 В, при этом амплитуда помехи от импульса сброса не превышает 60 мВ.

2. СВЕТОСИГНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛФСЗС

Основными светосигнальными характеристиками ЛФСЗС являются интегральная чувствительность и спектральная характеристика чувствительности. При измерении чувствительности использовался проектор с красным интерференционным фильтром / $0,633$ мкм/, освещенность измерялась люксметром типа К16. Определенная в этих условиях дифференциальная чувствительность пересчитана на основе спектральной характеристики ЛФСЗС в интегральную чувствительность для источника света типа А; для К1200ЦЛ2 она оказалась равной $0,7$ В/лк·с, что близко к паспортным данным.

Кроме информационной составляющей выходной сигнал содержит и шумовые составляющие, имеющие различную природу, их величины приведены в таблице.

Детерминированный, или геометрический, шум вызван неравномерностью чувствительности /гарантируется не более 10%/ и неравномерностью темнового сигнала, характеризуемой двумя параметрами: амплитудой отдельных единичных пиков /не более 3/ темнового сигнала максимальной величины и типичным значением неравномерности

Таблица

Светочувствительные характеристики ЛФСЗС К1200ЦЛ2

	мин.	средн.	макс.
Чувствительность, В/лк·с		0,7	
Неравномерность темнового сигнала:			
макс. выбросы, мВ/мс	0,3	3,5	8,5
типичная величина, мВ/мс	0,06	1,1	4,5
Среднее значение темнового сигнала регистра накопления, мВ/мс	0,33	1,2	3,0
Среднее значение темнового сигнала транспортного регистра, мВ/мс	0,6	2,6	5,0
Относительная светочувствительность транспортного регистра, мс/мс	0,2	0,5	1,9
Результирующая неэффективность переноса	0,2	0,3	0,7

темнового сигнала, измеренным от пика до пика без учета отдельных максимальных выбросов.

Средний уровень темнового сигнала /уровень черного/ равен сумме двух слагаемых. Одно вызвано темновым током в регистре накопления и пропорционально времени накопления, а второе - темновым током транспортного регистра и пропорционально периоду сдвигающих импульсов при условии постоянства скорости сдвига.

Контрастно-частотная характеристика ЛФСЗС определяется геометрией чувствительных элементов и неэффективностью переноса регистров сдвига. Для определения неэффективности переноса измерялись коэффициенты передачи регистра сдвига со входа электрической инжекции на выход для сигнала с нулевой частотой и сигнала с частотой, равной половине частоты сдвига регистра. По известной зависимости коэффициента передачи от результирующей неэффективности переноса ¹ найдено значение неэффективности для К1200ЦЛ2. При частоте сдвига не выше 500 кГц среднее значение результирующей неэффективности переноса равно 0,3. Суммарное затухание частотно-контрастной характеристики на частоте, равной половине частоты сдвига регистра, рассчитанное для известных размеров и шага расположения чувствительных элементов, не менее 0,3 /среднее значение/.

3. ПОРОГ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К1200ЦЛ2

Порог чувствительности любого фотодатчика зависит от условий наблюдения объекта, чувствительности и собственного шума дат-

чика, требуемого пространственного разрешения, необходимых значений вероятности обнаружения сигнала и вероятности ложного обнаружения. В качестве объекта условимся рассматривать скачок освещенности заданной величины на уровне некоторой фоновой освещенности.

Порогом чувствительности будем считать минимальный скачок освещенности, обеспечивающий на выходе детектора отношение сигнала к дисперсии собственного шума фотодатчика, равное 3, при фоновой экспозиции, подобранной по минимуму шума данного датчика. Такой порог чувствительности при высокой вероятности обнаружения сигнала и малой - ложного срабатывания может быть достигнут в измерительной системе только при использовании сложной математической обработки. Порог чувствительности, определенный как утроенная величина дисперсии собственного шума фотодатчика, будем называть предельным порогом чувствительности.

Величина хаотического шума на выходе линейки К1200ЦЛ2 приблизительно равна 1 мВ /размах от пика до пика/, примерное значение дисперсии в 6-8 раз меньше. Учитывая, что чувствительность линейки в искусственном солнечном свете в 1,5 раза выше чувствительности для источника типа А, построим линию предельной пороговой освещенности линейки /рис.1, линия 1/.

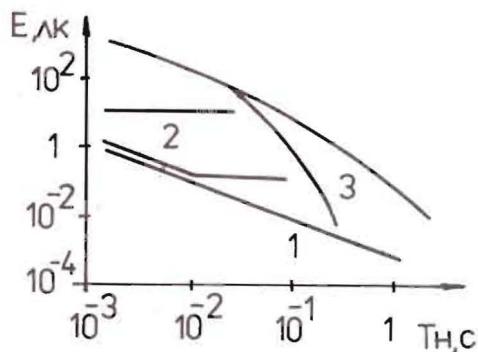


Рис.1. Входные характеристики К1200ЦЛ2 в зависимости от времени накопления: 1 - предельный порог освещенности, 2 - аппаратный порог освещенности, 3 - освещенность насыщения.

Интересно знать порог чувствительности для измерительных устройств с простейшей обработкой видеосигнала, например, с пороговой обработкой. Аппаратным порогом чувствительности назовем освещенность, вызывающую на выходе линейки сигнал, равный по величине неравномерности темнового сигнала без учета единичных пиков максимальной амплитуды. Линии 2 /рис.1/ показывают зависимость аппаратного порога чувствительности для лучшего и худшего приборов /при отсутствии фоновой засветки, т.е. при минимальном геометрическом шуме/.

В случае регистрации однократных процессов либо при использовании прерывателей светового потока аппаратный порог чувствительности может быть снижен путем аналоговой компенсации темно-



Рис.2. Неравномерность темнового сигнала /время накопления 45 мс, 100 мВ/дел/. а/ Компенсация низкочастотной составляющей темнового сигнала; б/ видеосигнал без компенсации; в/ видеосигнал с компенсацией неравномерности темнового сигнала.

вого сигнала в транспортном регистре. Компенсация осуществляется следующим образом. При закрытом фотозатворе линейка непрерывно сканируется с целью вывода из прибора термоэлектронов. Фотозатвор открывается синхронно с началом кадра, в регистре накопления начинают накапливаться фотоэлектроны /вместе с термоэлектронами/, а в сдвиговый регистр в это время записываются зарядовые пакеты, соответствующие инвертированному темновому сигналу, накопленному в предыдущем кадре. Затем при переносе накопленных зарядовых пакетов в регистр сдвига происходит компенсация темнового сигнала.

На рис.2а изображен видеосигнал линейки в течение двух кадров: считывания темнового сигнала и считывания скомпенсированного темнового сигнала. Из рисунка видно, что низкочастотная составляющая темнового сигнала компенсируется полностью.

На рис.2б представлена осциллограмма выходного сигнала линейки без компенсации, а на рис.2в - с компенсацией темнового сигнала. Оба видеосигнала зафиксированы при съемке одного и того же распределения освещенности - двух светящихся линий /им соответствуют пики с координатами 3 и 7,2 делений/. Судя по амплитуде пиков темнового сигнала, можно утверждать, что высокочастотная составляющая уменьшается в результате компенсации в 3 раза. Это означает и соответствующее уменьшение аппаратного порога чувствительности. Уменьшение степени компенсации высокочастотной составляющей темнового сигнала объясняется неэффективностью переноса.

Величина освещенности, которая линейно преобразуется ЛФСЗС, сверху ограничена освещенностью насыщения. Кривые 3 на рис.1

характеризуют зависимость освещенности насыщения от времени накопления для лучшего и худшего приборов.

Из рис. 1 можно сделать следующие выводы. Аппаратный порог освещенности линеек не зависит от времени накопления /если он не ограничивается хаотическими шумами/ и равен 10 лк для худших приборов и 10^{-1} лк * для лучших /при использовании аналоговой компенсации темнового сигнала 3 лк и 0,03 лк соответственно/. Динамический диапазон измерительных устройств с аппаратной обработкой уменьшается с увеличением времени накопления. При времени накопления 2 мс для худшего прибора динамический диапазон равен 50. Предельная пороговая освещенность уменьшается с увеличением времени накопления. Без охлаждения линеек для худших образцов можно достичь предельного порога 10^{-3} лк, для лучших - приблизительно 10^{-5} лк /ограничение вызвано насыщением линейки темновым током/.

4. СРАВНЕНИЕ СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЭС-ЛИНЕЕК И ФОТОПЛОНОК

Для удобства сравнения переведем зависимости пороговых освещенностей от времени накопления в пороговые экспозиции/рис.3/. Отметим, что кривые построены для искусственного солнечного света, потому что характеристики пленок приводятся именно для такого источника света.

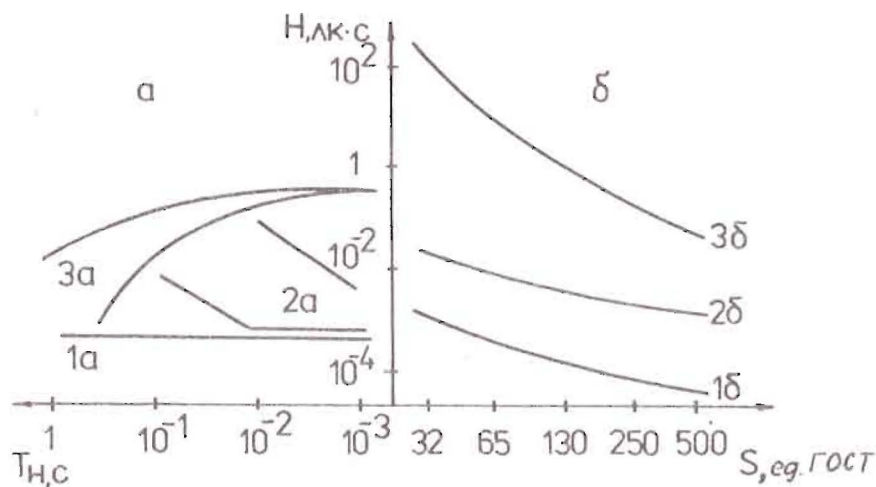


Рис. 3. а/ Характеристики К1200Ц12 в зависимости от времени накопления. б/ Характеристики фотопленок ГОСТ 32, ГОСТ 65, ГОСТ 130, ГОСТ 250, изопанхром 13 при стандартных условиях обработки ⁵; 1б - предельный порог чувствительности, 2б - аппаратный порог чувствительности, 3б - экспозиция насыщения.

Предельный порог чувствительности для фотопленки ограничивается хаотическим шумом фотопленки, вызванным зернистостью. При инструментальном измерении пленка сканируется световым пятном, а прошедший через пленку свет воспринимается преобразователем. Величина выходного сигнала пленки определяется ее прозрачностью. Модуляция прозрачности участка пленки с площадью, равной площади чувствительности ячейки К1200Ц12, вызванная зернистостью, является собственным шумом фотопленки, поставленной в такие же условия, как и линейка. Если допустить, что характеристическая кривая фотопленки ⁴ линейна, то выражение для предельного порога чувствительности пленки принимает вид

$$H = \frac{10^{(D - D_B - 0,2) \cdot \gamma}}{S} \cdot \frac{\ln 10}{\gamma} \cdot 3\sigma_D,$$

где σ_D - дисперсия оптической плотности при ее значении, равном D , и заданной площади сканирующего пятна; γ - контрастность фотопленки, S - чувствительность фотопленки, определенная при плотности, на 0,2 превышающей плотность вуали D_B .

Воспользовавшись зависимостью дисперсии прозрачности от прозрачности ⁵, нетрудно показать, что порог чувствительности монотонно уменьшается с увеличением прозрачности. Значит, наименьший порог чувствительности фотопленки имеют при отсутствии фоновой засветки, и вычислять его необходимо для плотности почернения, равной плотности вуали. Кривая 1б на рис. 3 показывает зависимость предельного порога чувствительности некоторых типов пленок /вычисления сделаны на основе характеристик пленок, приведенных в ⁴/.

Реальные фотопленочные измерительные системы имеют порог чувствительности, больший утроенной дисперсии шума зернистости, что вызвано аппаратной обработкой видеосигнала. Аппаратным порогом чувствительности для существующих систем измерения можно считать экспозицию, соответствующую плотности 0,2 над уровнем вуали /фильмы с трековых детекторов обычно имеют плотность не меньше 0,2/. На рисунке кривая 2б показывает зависимость аппаратного порога чувствительности от типа пленки. Линия 3б характеризует зависимость экспозиции насыщения пленок от чувствительности.

Сравнив характеристики пленок и испытанных ПЭС-линеек, приведенные на рис. 3, можно сказать, что аппаратный порог чувствительности худших линеек при малых временах накопления приблизительно равен аппаратному порогу фотопленок низкой чувствительности /ГОСТ 32, ГОСТ 65/, предельный порог которых сравним с аппаратным порогом чувствительности лучших линеек. Лучшие экземпляры линеек в состоянии конкурировать по величине аппаратного порога с фотопленками высокой чувствительности /приблизительно $250 \div 500$ единиц ГОСТ/. Предельный порог чувствительности линеек примерно равен предельному порогу фотопленки ГОСТ 65. Динамический диапазон линеек меньше динамического диапазона рассмотрен-

ных пленок ряда ГОСТ и равен динамическому диапазону высокочувствительной контрастной фотопленки изопанхром 13.

Таким образом, проведенное в данной работе исследование характеристик ПЗС-линеек показывает, что на их основе с успехом могут быть построены как недорогие, компактные, высокоточные устройства для измерения и контроля линейных размеров различных объектов^{/6/} и преобразования графической и текстовой информации, так и устройства с большим динамическим диапазоном и высокой чувствительностью для регистрации слабосветящихся объектов и обработки полутоновых изображений.

Авторы признательны И.И.Скрылю за полезные обсуждения и ряд ценных замечаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Секен К., Томпсет М. Приборы с переносом заряда. "Мир", М., 1978.
2. Пресс Ф.П. Формирователи видеосигнала на приборах с зарядовой связью. "Радио и связь", М., 1981.
3. Василевская Л.М., Костюков Е.В., Павлова З.В. "Электронная промышленность", 1982, № 7, с.10-13.
4. Гороховский Ю.Н., Баранова В.П. Свойства черно-белых фотографических пленок. "Наука", М., 1970.
5. Обработка изображений и цифровая фильтрация. /Под ред. Т.Хуанга/. "Мир", М., 1979.
6. Дроздов В.А., Комов Г.М. ОИЯИ, 10-84-447, Дубна, 1984.

Рукопись поступила в издательский отдел
17 июля 1985 года.

Кисслинг Х. и др.
Характеристики ПЗС-линеек
в области пороговой чувствительности

P10-85-550

Приводятся результаты исследований характеристик ПЗС-линеек K1200C12 в области пороговой чувствительности. Описывается электрический режим работы приборов, их шумовые, светосигнальные и передаточная характеристики. Рассматриваются возможности уменьшения порога чувствительности путем аналоговой компенсации темнового сигнала. Дается сравнение светочувствительных и шумовых свойств некоторых типов фотопленок и ПЗС-линеек.

Работа выполнена в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1985

Перевод О.С. Виноградовой

Kissling H. et al.
Characteristics of the Linear CCD's
in the Threshold Sensitivity Region

P10-85-550

Results of investigation of characteristics of linear CCD's in the threshold sensitivity region are presented. The levels of working voltages, noise, lightsignal and transfer characteristics are described. The possibility of threshold sensitivity decreasing by means of analogue compensation of dark signal is considered. The comparison of lightsignal and noise performance of some types of films and linear CCD's is given.

The investigation has been performed at the Laboratory of Computing Techniques and Automation, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 1985