

К. ф.-м. н. В. Л. ПЕРЕВЕРТАЙЛО, к. т. н. А. А. ЕПИФАНОВ,
В. Г. КАРЕНГИН, Л. И. ТАРАСЕНКО

Украина, г. Киев, НИИ микроприборов
E-mail: detector@carrier.kiev.ua

Дата поступления в редакцию
26.04—18.08 2005 г.

Оппонент к. т. н. С. А. ГОРЬЕВ
(ОНИИТТ, г. Одесса)

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ САМОСКАНИРУЕМЫХ ЛИНЕЙНЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ В ИНТРОСКОПИИ И ТОМОГРАФИИ

Применение интегральных схем формирователей изображения позволяет создать малогабаритную аппаратуру для интроскопии и томографии, в том числе рентгеновские сканеры с повышенным разрешением.

Твердотельные формирователи изображений широко используются при формировании изображений в видимой области света. Что касается их применения для рентгеновской области спектра, то здесь существует ряд ограничений и особенностей, связанных со слабой эффективностью прямого преобразования энергии рентгеновских квантов в заряд в относительно тонком кремниевом детекторе, изготовленном на пластинах кремния толщиной около 0,5 мм. В этом случае необходимо применение таких конвертеров как сцинтилляторы — для более полного преобразования энергии рентгеновских квантов в световое излучение с последующей регистрацией фотоприемными устройствами видимого диапазона.

В настоящее время хорошо известны формирователи изображения на приборах с зарядовой связью (ПЗС) [1]. Эти приборы изготавливаются по технологии с очень высокими требованиями и поэтому имеют высокую стоимость и ограниченное число производителей. В то же время развитие и распространение более доступной технологии КМОП ИС стимулирует создание нового класса преобразователей изображения на основе цифровых регистров [2, 3], которые способны конкурировать с аналогичными устройствами на ПЗС не только по цене, но и по ряду других параметров, в том числе и по радиационной стойкости, что важно при работе в составе аппаратуры для гамма-, рентгеновской интроскопии и др. Кроме того, использование твердотельных формирователей изображения для конвертированного светового излучения требует согласования размеров их элементарной ячейки с размерами ячейки конвертера, которые иногда составляют единицы или десятки миллиметров. Эта задача упрощается, если вместо ПЗС используется опрос ячеек цифровыми регистрами.

Дополнительным преимуществом таких систем является то, что организация опроса фоточувствитель-

ных элементов (ФЧЭ) осуществляется с помощью цифровых регистров, расположенных отдельно от ФЧЭ, при этом появляется возможность обработки сигнала внутри самой фотоприемной ячейки, т. к. в фоточувствительном элементе и рядом с ним можно размещать необходимые МОП-элементы преобразования и обработки сигнала для улучшения его параметров. В отношении таких ФЧЭ с описанными МОП-элементами употребляют термин “активная сенсорная ячейка” (АСЯ).

Использование технологии КМОП ИС расширяет также возможности интеграции фотоприемных элементов с электронными схемами обработки и усиления сигналов на одном кремниевом чипе, что является современной тенденцией при разработке подобных изделий.

В данной работе представлены линейные и матричные фоточувствительные приборы на основе массива фоточувствительных элементов (ячеек) и цифровых регистров, изготовленных по технологии КМОП ИС.

В разработанных интегральных микросхемах (ЛФП) SFD32 и SFD128 реализован принцип построения кремниевых многоэлементных фотоприемников с совмещением функций накопления сигнального заряда, считывания сигналов и превращения заряда в напряжение. Структурная схема ИС приведена на рис. 1, где InR — стартовый импульс цифрового регистра развертки; Q_A — выход аналогового сигнала; Qr — выходной импульс цифрового регистра развертки.

В данной конструкции реализована схема последовательного опроса фоточувствительных ячеек со считыванием их сигналов на общий предусилитель.

Разработка потребовала проведения расчета и исследования временных и зарядовых характеристик основных схемотехнических узлов аналоговой и цифровой

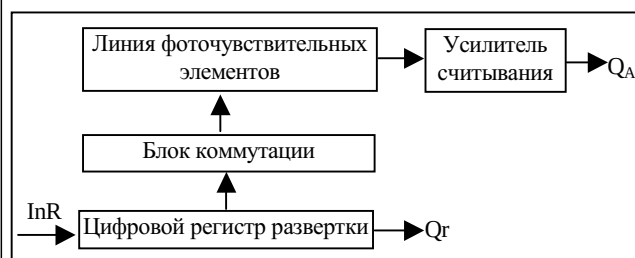


Рис.1. Структурная схема ИС SFD128 (SFD32)

Авторы благодарят сотрудников Института сцинтилляционных материалов НАНУ В. Д. Рыжикова и А. Д. Ополонина за помощь и предоставленные материалы.

частей микросхем, а также исследований, связанных с необходимостью совмещения технологии изготовления фотоприемников и технологии микроэлектронных схем обработки сигналов с учетом возможностей изготовления в рамках технологии КМОП ИС.

Разработанные ИС имеют соответственно 32 и 128 ФЧЭ. Например, микросхема SFD128 содержит в составе чипа линию из 128 фоточувствительных элементов, цифровой регистр развертки (имеющий не менее 128 каскадов) и выходной усилитель считывания. Длина кристаллов фотопленок 25,4 мм, для SFD32 шаг ФЧЭ — 0,8 мм, их размеры — 0,6×2 мм, для SFD128 — шаг 0,2 мм, а размеры ФЧЭ 0,1×2 мм.

На рис. 2 показана электрическая схема активной сенсорной ячейки, включающей ФЧЭ. Каждая такая ячейка содержит фотодиод FD, МДП-транзистор M1, который предназначен для предустановки потенциала на фотодиоде FD перед каждым циклом регистрации фотозаряда путем периодической подачи на FD положительного напряжения Vd. При этом затворы транзисторов M1 линии ФЧЭ управляются выходными сигналами каскадов регистра развертки. МДП-транзистор M3 функционирует как устройство антиблужинга для фотодиода FD, т. е. позволяет устранить боковое растекание и инжекцию фотоносителей в полупроводниковую подложку при чрезмерной засветке ЛФП. Уровень срабатывания антиблужинга определяется значением напряжения Vab, подаваемого на затвор транзистора M3.

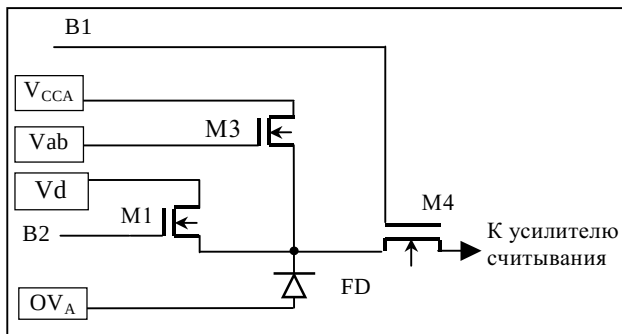


Рис. 2. Схема активной сенсорной ячейки с ФЧЭ

Детектирование фотогенерированного заряда в каждом ФЧЭ производится путем подключения фотодиода FD через транзистор M4 к входу усилителя считывания. Затворы транзисторов M4 линии ФЧЭ управляются выходными сигналами каскадов регистра развертки. В данной схеме детектирования устраняется «геометрический шум», связанный с пространственным разбросом параметров усилителя считывания, и минимизируется мощность, потребляемая устройством считывания. Коэффициент преобразования "заряд—напряжение" при этом определяется отношением

$$C_{FD} / (C_{FD} + C_{вх\ ус} + C_{вых\ ш}),$$

где C_{FD} — емкость фотодиода FD;

$C_{вх\ ус}$ — входная емкость усилителя считывания;

$C_{вых\ ш}$ — емкость выходной шины.

Цифровой регистр развертки предназначен для управления последовательным подключением фото-

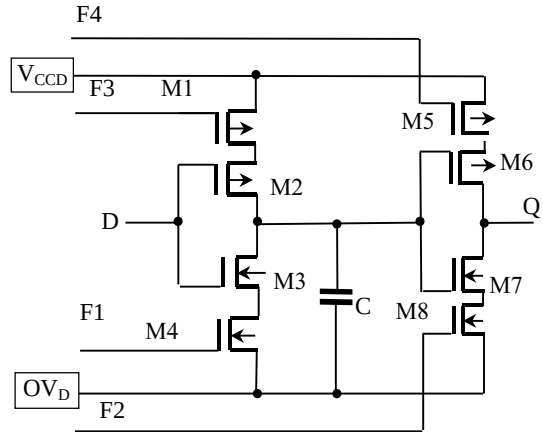


Рис. 3. Схема каскада цифрового регистра развертки

чувствительных элементов в процессе их предустановки, а также при считывании фотогенерированных в них зарядов. Регистр развертки построен по схеме динамического сдвигового регистра. Каждый каскад регистра состоит из двух динамических инверторов, между которыми включена фиксирующая емкость. Схема одного каскада цифрового регистра развертки приведена на рис. 3.

Управление регистром развертки производится посредством 4-фазных тактовых импульсов (рис. 4). Для согласования по входу регистра с уровнями ТТЛ-сигналов в него введен согласующий входной каскад. На вход регистра развертки периодически подается входной импульсный сигнал логической «1». Передача этого импульса через регистр производит последовательное подключение фотодиодов линии ФЧЭ к источнику напряжения Vd для их предустановки или к входу усилителя считывания при детектировании фотогенерированных зарядов. Для контроля работы регистра, а также для синхронизации работы различных микросхем в составе одного модуля, предусмотрен выходной 128-й каскад регистра, в котором имеется дополнительный элемент с цифровым выходом Qr. Так как для предустановки фотодиода в J-м фотозаэлементе линии используется сигнал с последующего (J+1)-го каскада регистра, то для управления предустановкой 128-го ФЧЭ в регистре развертки предусмотрен дополнительный 129-й каскад.

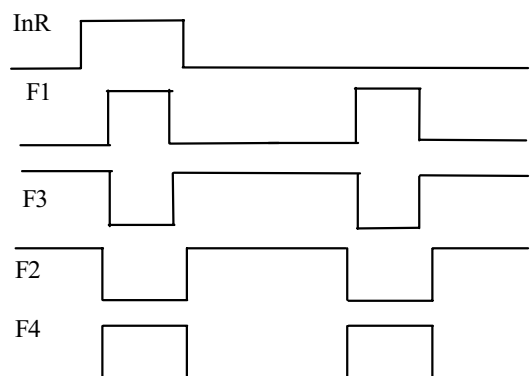


Рис. 4. Тактовые импульсы цифрового регистра развертки

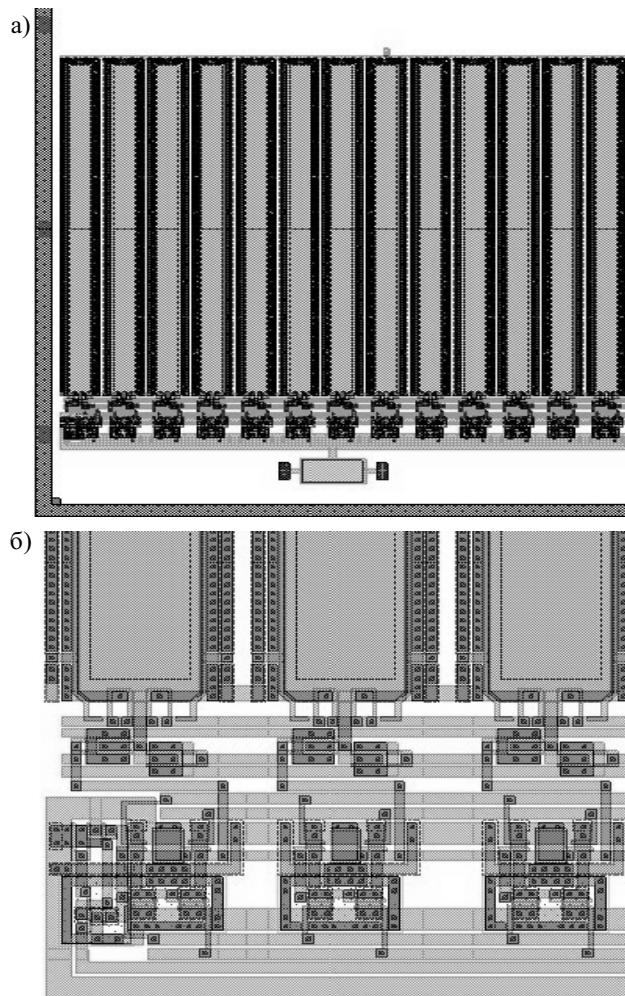


Рис 5. Фрагменты топологии кристалла ЛФП:
а — ФЧЭ, б — регистр

Фрагменты топологии кристалла микросхемы ЛФП показаны на **рис. 5**, где видны фоточувствительные элементы и элементы коммутации и считывания сигналов.

Цифровой регистр развертки ИС SFD128 позволяет проводить опрос элементов с частотой до 10 МГц. Структурная схема сопряжения каскадов цифрового регистра и фоточувствительных элементов показана на **рис. 6**.

Изготовление микросхем SFD32 и SFD128 проводилось по технологии изготовления серийных КМОП ИС на стандартных пластинах кремния КДБ-12 диаметром 100 мм. Размеры кристалла ИС составляют 3,45×25,4 мм.

ИС смонтированы в специализированном 20-выводном корпусе типа DIP с двухрядным расположением выводов и базой 15 мм. Микросхема SFD128 в корпусе показана на **рис. 7**. Конструкция фотоподложки и корпуса дает возможность осуществить последовательную линейную стыковку двух и более микросхем в одну строку с необходимым общим количеством элементов (например 512).

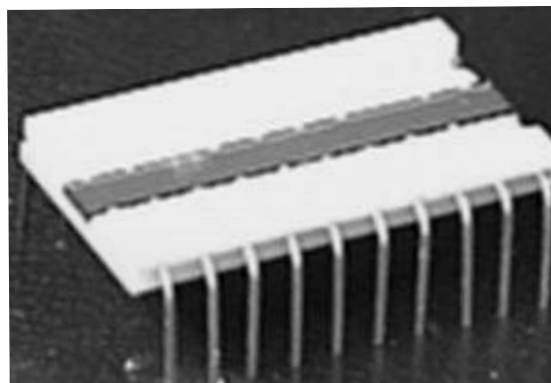


Рис. 7. Микросхема SFD128 в корпусе

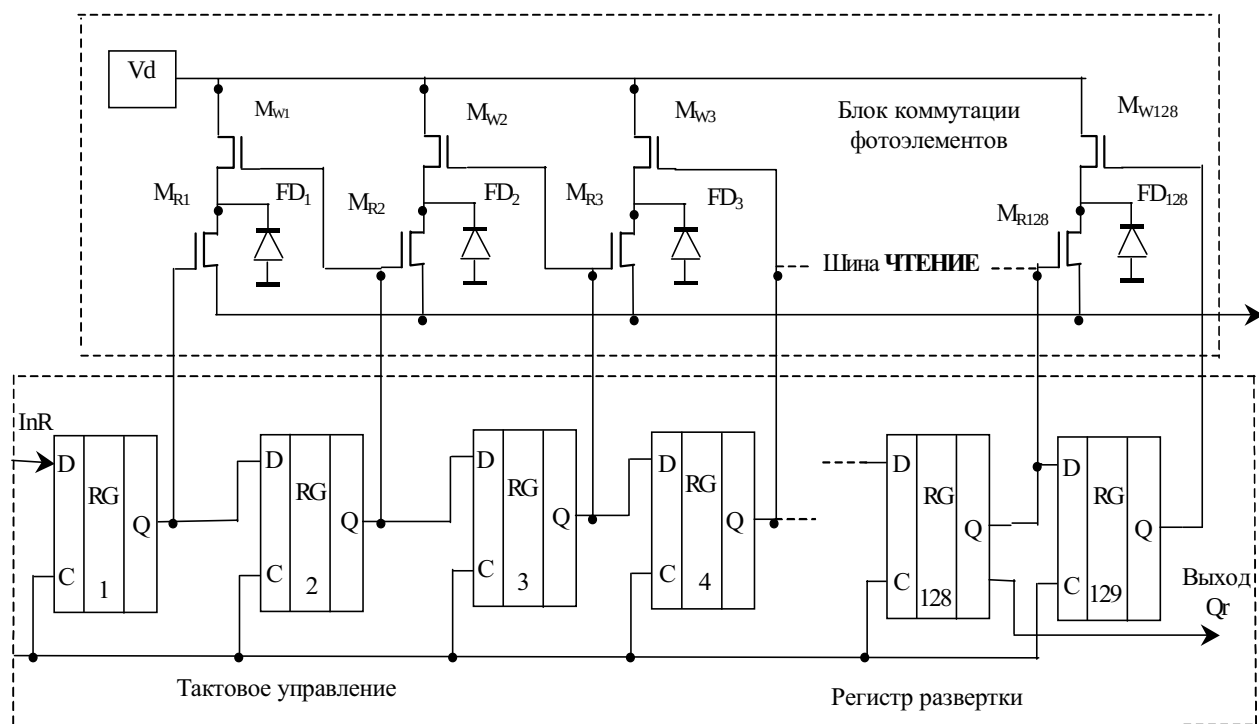


Рис. 6. Функциональная схема регистра развертки и блока коммутации

Выходной усилитель считывания, расположенный на кристалле ИС, предназначен для детектирования фотогенерированных зарядов, а также для согласования аналогового выхода микросхемы с внешними устройствами. Усилитель считывания построен по схеме операционного усилителя. Он обеспечивает согласование аналогового выхода ИС с емкостной нагрузкой не более 10 пФ. Амплитуда выходного сигнала SFD128 для максимального освещения составляет около 1,3 В, отношение сигнал/шум для ЛПФ более 50 ДБ.

Напряжение питания микросхемы 6,0—9,0 В.

Описанные фоточувствительные линейки используются в детекторах рентгеновского излучения в сочетании со сцинтилляторными линейками для преобразования энергии рентгеновского излучения в световое излучение, что позволяет реализовать формирователь рентгеновского изображения с повышенным разрешением (10—20 мкм) в интроскопии и томографии. В этом случае фотолинейки используются для регистрации вторичного оптического излучения сцинтилляторных кристаллов, высвечивающих люминесцентное излучение при взаимодействии с рентгеновским излучением. На **рис. 8** показана зависимость выходного сигнала ЛФП от мощности экспозиционной дозы рентгеновского излучения, падающего на сцинтилляторные элементы (толщина сцинтиллятора 0,6 мм).

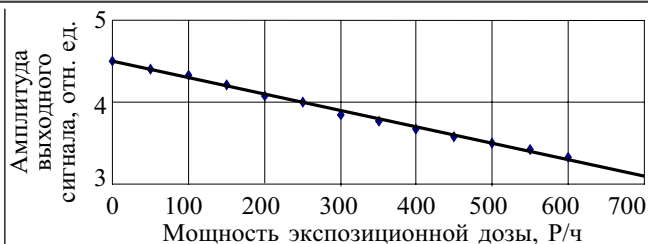


Рис. 8. Зависимость выходного сигнала ЛФП от мощности рентгеновского излучения в импульсе ($t=1\text{мс}$)

На **рис. 9** показано полученное с помощью описанного в статье ЛФП рентгеновское изображение тест-объекта, представляющего собой набор пар проволочек различного диаметра (0,05; 0,063; 0,08; 0,1; 0,13; 0,16; 0,2; 0,25; 0,32; 0,4; 0,5; 0,63; 0,8 мм), смонтированных на стеклотекстолите. Расстояние между проволочками каждой пары равно диаметру проволочки. Черная линия на **рис. 9, а** обозначает положение 41-го канала.

В варианте без сцинтиллятора фотолинейки могут быть использованы для регистрации излучения в видимой области с предельной длиной волны 1 мкм. Для расширения диапазона регистрируемого излучения в сторону УФ используется специальная конструкция фотоприемного элемента, позволяющая уменьшить поглощение УФ-излучения в пассивном поверхностном слое ФЧЭ.

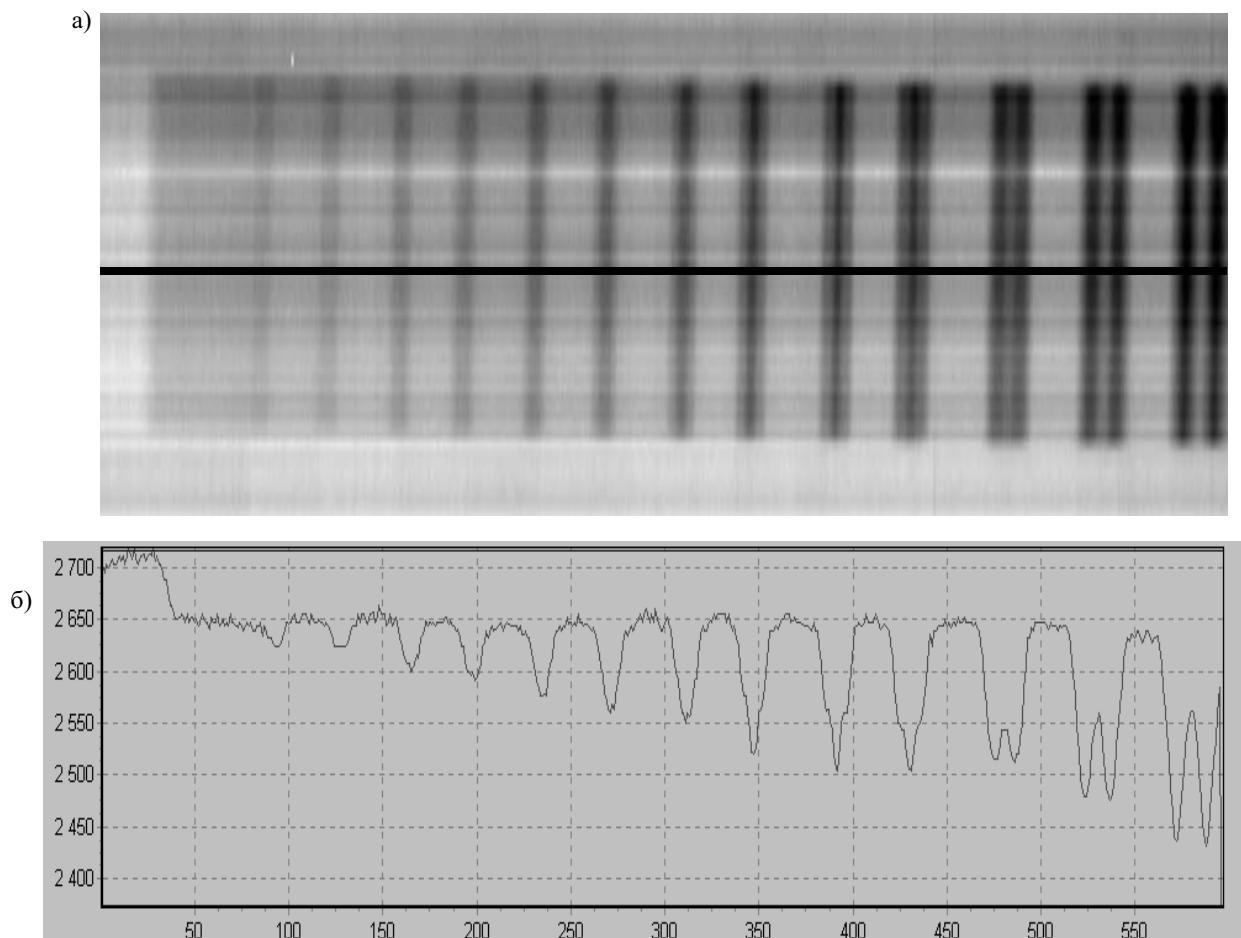


Рис. 9. Рентгеновское изображение тест-объекта (а) и зависимость амплитуды сигнала изображения от координаты вдоль черной линии на рентгеновском изображении тест-объекта (б)

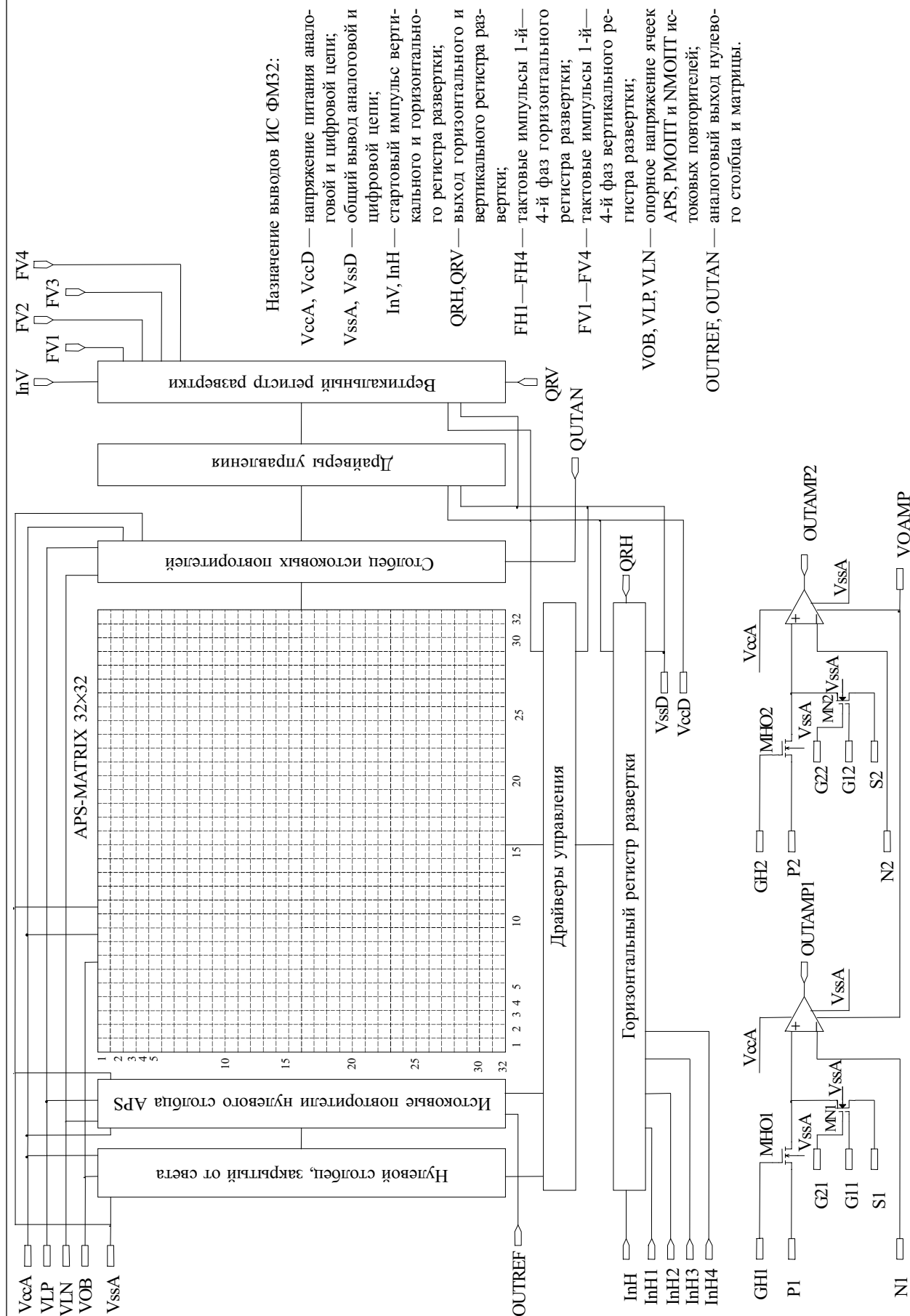


Рис. 10. Функциональная схема FM32

Описанный принцип опроса цифровыми регистрами позволяет также реализовать матричные формирователи изображения, используя горизонтальный и вертикальный регистры. Функциональная схема подобного матричного формирователя в виде тестовой матрицы 32×32 элемента показана на рис. 10.

Аналогичная конструкция реализована для построения матрицы 128×128 элементов. На основе активных сенсорных ячеек спроектирована КМОП ИС матричного преобразователя изображения XFM128, предназначенного для регистрации вторичного оптического излучения сцинтилляторных кристаллов, высвечивающих люминесцентное излучение при взаимодействии с рентгеновским излучением. Преобразователь изображения XFM128 содержит на кремниевом чипе размерами 25,4×25,4 мм матричный массив активных сенсорных ячеек в формате 128×128 и схемы электронного обрамления.

Выводы

1. Разработана конструкция КМОП интегральной микросхемы линейного фоточувствительного прибора

на основе активных сенсорных ячеек и цифровых регистров опроса.

2. Результаты измерений и исследований ЛФП позволяют сделать вывод о возможности их использования в формирователях изображения рентгеновского излучения на основе сцинтилляторов.

3. Предложена функциональная схема матричного фоточувствительного прибора на основе активных сенсорных ячеек и цифровых считывающих регистров и разработана конструкция КМОП интегральной микросхемы матричного фоточувствительного прибора в формате 128×128 со схемами электронного обрамления.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Секен К., Томпсет М. Приборы с переносом заряда.— М.: Мир, 1978.
2. Wong H.-S. Technology and device scaling considerations for CMOS imagers // IEEE Trans. Electron Devices.— 1996.— Vol. 43, N 12.— P. 2131—2142.
3. Mendis S. K., Kemeny S. E., Gee R. C. et al. CMOS active pixel image sensor for integrated imaging systems // IEEE J. of Solid State Circuits.— 1997.— Vol. 32, N 2.— P. 187—197.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Казеннов Г. Г. Основы проектирования интегральных схем и систем.— М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005.— 295 с.: ил.

В книге рассматриваются вопросы, связанные с методикой проектирования интегральных схем и систем, в том числе СБИС и систем на кристалле (SoC). Акцентируется внимание на основных этапах процесса проектирования (системный, микросхемный, регистровый, логический, схмотехнический, топологический, компонентный).

Приводятся сведения о средствах автоматизированного проектирования, а также о применении для этих целей систем искусственного интеллекта.

Для студентов вузов, специализирующихся в области электроники и изучающих дисциплины, связанные с проектированием интегральных схем и систем. Книга также может быть полезна разработчикам микроэлектронной аппаратуры.

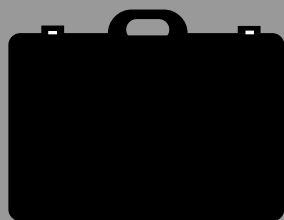
Швец В. А. Одноплатные микроконтроллеры. Проектирование и применение.— М.: МК-Пресс, 2005, 304 с.

Книга посвящена вопросам комплексного проектирования одноплатных микроконтроллеров для информационных и управляющих систем, построенных на универсальных микропроцессорах x86 и микроконтроллерах семейства x51. Подробно рассматриваются вопросы проектирования узлов одноплатных микроконтроллеров, программного обеспечения, применение микропроцессоров в цифровой обработке информации и измерительных устройствах.



в портфеле редакции

- Физическая модель акустооптического процессора цифровой обработки сигналов. (Украина, г. Донецк)
- Исследование элементной базы микрофототерминала. (Узбекистан, г. Ташкент)
- Исследование характеристик импульсных сигналов на основе базисов Хаара. (Украина, г. Киев)
- О влиянии температуры спекания на эксплуатационные характеристики влагонепроницаемой алюмомагнетитовой керамики. (Украина, г. Львов, Дрогобыч)
- Помехоподавляющие магнитопроводы из микропровода в стеклянной изоляции. (Молдова, г. Кишинев)
- Измерение рентгеновского излучения сенсорами на основе CdZnTe. (Украина, г. Харьков)
- Статистические характеристики интенсивности мешающих сигналов в безэховой камере туннельного типа. (Украина, г. Одесса)



- Использование сети электропитания для построения информационных систем. (Украина, г. Киев)
- Моделирование термоэлектрического генератора с низкотемпературным источником тепла. (Украина, г. Черновцы)
- Измерение влияния магнитного поля на термоэдс в микро- и нанополупроводниковых пленках без создания градиента температур. (Россия, г. Волгоград)

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции