

МАТРИЧНЫЕ КМОП-ФОТОПРИЕМНИКИ

фирмы Agilent Technologies*

За достаточно короткое время цифровые фото- и видеокамеры перестали быть новшеством на рынке микроэлектроники. Они широко применяются как в бытовой технике, так и в узкоспециальном оборудовании, например системах наблюдения и фиксации быстротекущих процессов с автоматической подстройкой режимов экспозиции и разрешения кадра. И хотя такие системы не требуют высокого разрешения, – достаточно, скажем 320x240 пикселей, необходимость применения дополнительной схемы управления приводит к удорожанию конечного изделия. Ряду фирм, похоже, удалось справиться с этой проблемой и реализовать в КМОП-фотоприемных матрицах требуемые для недорогих специализированных камер разрешение и средства управления. Что же они собой представляют? Попытаемся ответить на этот вопрос на примере схемотехнической реализации специализированной камеры на базе КМОП-матрицы HDCS 2000, входящей в единственное на сегодняшний день на отечественном рынке семейство такого назначения HDCS фирмы Agilent Technologies.

На современном рынке представлено множество моделей фотоприемников для самых разнообразных цифровых камер – от профессиональных фото- и видеоустройств до камер для проведения видеоконференций и передачи “живого видео” (web-камер). При конструировании этих камер широко применяются однокристалльные датчики изображения, выполняемые в основном на ПЗС-матрицах, стоимость которых напрямую связана с их разрешающей способностью. Например, разрешение ПЗС-матрицы для профессиональных цифровых фотокамер высших моделей может достигать 4096x4096 пикселей (или около $16,8 \cdot 10^6$ пикселей), но и стоимость их тоже не маленькая – несколько сотен долларов. Однако столь высокого разрешения для многих приложений зачастую не требуется. Для пере-



И.Ванюшин, А.Сафонов, Ю.Тишин

дачи изображений видеоконференций или для web-камер (с учетом ограниченной пропускной способности канала компьютерной сети) обычно достаточно разрешения, скажем, 320x240 пикселей при частоте ~5–10 кадров/с. Высокое разрешение и телевизионное качество картинки, как правило, не нужно ни в охранных системах, ни в системах наблюдения. А значит, в камерах для таких систем можно применять достаточно дешевые матрицы. И здесь предпочтение все чаще отдается КМОП-матрицам, уступающим ПЗС-датчикам по качеству формируемого изображения, но более дешевым и потребляющим меньшую мощность. Эти фотоприемники изготавливаются по хорошо отработанной при производстве большинства микросхем (микропроцессоров, микроконтроллеров и схем памяти) КМОП-технологии. К тому же, на чипе КМОП-датчика изображения можно изготовить и вспомогательные схемы управления, что также способствует снижению стоимости камеры. Интерес к КМОП-фотоприемникам непрерывно растет и, по данным отделения In-Stat Group издательства Cahners, к 2004 году на долю этих устройств придется около 51% отгружаемых матричных фотоприемников, или 35,5% объема их продаж в стоимостном выражении. Чтобы удержаться на этом быстроразвивающемся рынке, изготовителям КМОП-датчиков приходится направлять усилия не только на совершенствование их характеристик и снижение стоимости, но и на реализацию дополнительных функций, в частности схем управления, требуемых в камерах узкоспециализированного назначения.

К КМОП-датчикам такого типа и относятся микросхемы семейства HDCS фирмы Agilent Technologies [1]. Это – однокристалльные матричные КМОП-датчики изображения с двумя встроенными 10-бит АЦП последовательного приближения, двумя операционными усилителями с программируемым (через 8-бит регистр) коэффициентом усиления и средствами полного управления внутренней синхронизацией (рис.1). Разрядность данных АЦП можно изменять от 8 до 10 бит с округлением, при необходимости, в сторону старших разрядов. Предусмотрена возможность независимого установления усиления для каждого RGB-канала. Средства управления позволяют динамично изменять режимы захвата изображения, в некоторых случаях даже без остановки работы фотоприемника. Централизованное управление этими режимами выполняет интегрированный программируемый контроллер синхронизации. Он обеспечивает внутреннюю синхронизацию операций считывания фоточувствительной матрицы по столбцам и строкам, задавая тем самым режим экспозиции. Микроконтроллер также отвечает за формирование сигнала выдачи параллельных данных (пикселей), строчного и кадрового синхроимпульсов,

*Фирма Agilent Technologies образована в 1999 году в результате глобальной реорганизации компании Hewlett-Packard. В состав фирмы Agilent перешло и подразделение электронных компонентов (а вместе с ним и авторские права и патенты). Таким образом, рассматриваемые в статье матричные фотоприемники, разработанные компанией Hewlett-Packard, сегодня выпускает Agilent Technologies (см. ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 1999, №6, с.53.).



сигнала “механический затвор/фотовспышка” (снимаемого с выходного триггера) и маскируемого, чувствительного к различным уровням приоритета сигнала запроса на прерывание – IRQ (для достижения совместимости с внешними микропроцессорными устройствами). Наряду с этим контроллер синхронизации обеспечивает доступ (с шагом 4x4 пикселей) к произвольной области фоточувствительной матрицы, а также выполняет функцию независимого прореживания изображения 1:2 по горизонтали и вертикали. Это позволяет увеличить (в пределах, до четырех раз) скорость считывания изображения, правда, за счет уменьшения разрешения картинки.

Фотоприемники семейства HDCS поддерживают три основных режима работы: нормальный, режим накопления (непрерывной экспозиции) и однокадровый с возможностью управления механическим затвором. Требуемый режим устанавливается с помощью набора управляющих регистров, программируемых через встроенный последовательный интерфейс, который может работать как в синхронном (Synchronous Serial), так и в асинхронном (UART) режимах обмена данными.

Благодаря очень низкому темновому току, высокой чувствительности и хорошим антибликовым характеристикам качество изображения, формируемого матрицами этого семейства, достаточно высокое. Немаловажное достоинство микросхем наряду с низким энергопотреблением – питание от одного источника напряжения (а не трех, как в ПЗС-матрицах), которое при необходимости может подаваться раздельно на цифровую, аналоговую и матричную части внутренней схемы.

Фотоприемники семейства HDCS выпускаются в двух вариантах, отличающихся размером фоточувствительной матрицы: HDCS-2000/2100 – VGA-формата (640x480, или 307200 пикселей) и HDCS-

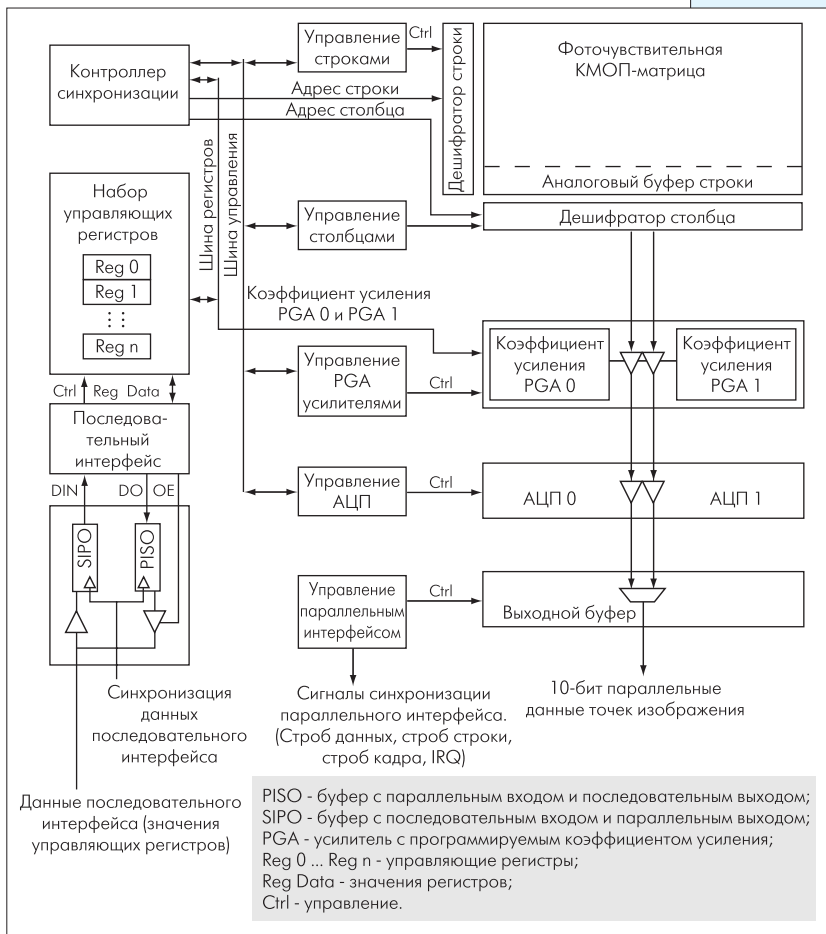
1000/1100 – CIF-формата (352x288, или 101376 пикселей). При этом HDCS-x100 – монохромные версии фотоприемника, а HDCS-x000, оснащенные RGB-фильтрами Байера, – датчики цветного изображения. Следует подчеркнуть достаточно высокую устойчивость RGB-фильтров к температурным воздействиям, возникающим при пайке фотоприемника на плату.

Согласно технической документации фирмы Hewlett-Packard (а теперь Agilent), максимальная частота кадров при максимальном разрешении (полном кадре) и тактовой частоте 25 МГц для матриц CIF-формата равна 44,5 и 40,8 кадров/с, для матриц VGA-формата – 15,3 и 14,0 кадров/с (при разрешении АЦП 8 и 10 бит, соответственно).

Ниже приведены основные технические характеристики фотоприемников семейства HDCS-x000/x100 [1]:

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Размер пиксела | 9x9 мкм |
| Максимальная тактовая частота | 25 МГц от внешнего генератора |
| Динамический диапазон АЦП | 60 дБ |
| Отношение сигнал/шум для 1 пиксела | 66 дБ |
| Шум (в эквивалентных электронах) кТС | 40 электронов |
| Темновой ток ¹ | 0,1 нА/см ² (при температуре 22°C) |
| Чувствительность матрицы ² | 1,1 В/Лс |
| Пиковая квантовая эффективность ^{1,2} | 21% |
| Насыщение | 1,3 В |
| Емкость максимального заполнения потенциальной ямы электронами для одной ячейки (Full well capacity) | 81000 электронов |
| Чувствительность преобразования ² | 16 мВ/электрон |
| Диапазон программируемого коэффициента усиления | 1–40 (255 шагов) |
| Фактор заполнения | 42% |
| Изменяемое время экспозиции | 0,5 мкс–4 с (с шагом 0,5 мкс) |
| Напряжение питания | 3,3 (-5/+10%) В |
| Потребляемая мощность | 200 мВт (рабочий режим), 3 мВт (режим ожидания) |
| Диапазон рабочих температур | -5...+65°C |
| Корпус | 44-выводный, оптический, формы крыла чайки PQFP-типа |

¹ Определяется по полной площади одного пиксела.
² Измерена при единичном усилении.



Недавно компанией Agilent еще по проекту Hewlett-Packard были выпущены модернизированные варианты датчиков HDCS-1x00/2x00 – HDCS-1020/2020 [2] с более высокой тактовой частотой (до 30 МГц), а также меньшими размером фотоячейки (7,4x7,4 мкм) и числом выводов корпуса (32 против 48 у HDCS-1000/2000). В новых датчиках предусмотрена возможность перевода выводов собственной шины данных в третье состояние (высокого импеданса), что упрощает конструирование камер с процессорной обработкой изображения.

Но КМОП-фотоприемники семейства HDCS фирмы Agilent Technologies, конечно, не лишены недостатков. В первую очередь это относится к программированию таких параметров, как время экспозиции (которое можно корректно изменить лишь после остановки контроллера синхронизации) или баланс белого. Последний параметр может стать головной болью большинства разработчиков, поскольку коэффициенты, соответствующие стандартным условиям освещенности, в технической документации Agilent не приведены. То же относится и к гамма-коррекции формируемого фотоприемником изображения.

Рис. 1. Архитектура КМОП-фотоприемника HDCS

Остается под вопросом и еще один важный аспект – сопряжение цифровой камеры с компьютером. Основная проблема здесь – определенные ограничения по скорости передачи данных. В камерах для таких применений, как правило, предусматривается аппаратная обработка изображения с целью разгрузки интерфейса и центрального процессора. Поэтому следующим шагом Hewlett-Packard стала разработка и выпуск микроконтроллеров HDCP-2000/2010, предназначенных для непосредственной работы с выпускаемыми фирмой КМОП-фотоприемниками (рис.2) [3,4]. Эти микросхемы позволяют решать большее число задач при работе с КМОП-фотоприемником. В частности, разработчик камеры теперь может не заботиться о преобразовании байеровского GRBG-массива в стандартное RGB-представление пикселей. Эту функцию выполняет встроенный процессор обработки изображений, который, к тому же, позволяет преобразовывать RGB-стандарт в YUV с последующим сжатием по методам 4:4:4 YUV и 4:2:2 Y1UY2V. Процессор выполняет и другие операции, такие как автоматический баланс белого, гамма-коррекция и автоматическая установка времени экспозиции. Но одна из главных особенностей микросхем серии HDCP-

Испытания камеры показали, что значения таких ее характеристик, как частота кадров и время одной итерации, при изменении параметров экспозиции или размеров кадра зависят от ограничения пропускного канала LPT-порта при 8-бит разрешении АЦП фотоприемника без сжатия изображения (все остальные параметры фотоприемника остаются без изменений). А именно:

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Частота кадров, полноформатное изображение (640x480 или цветное 320x240 пикселей) | ~2,2 кадр/с |
| Частота кадров, 4x4 пикселя | до 20000 кадр/с |
| Время, необходимое для одной итерации | ~120 мкс |

Из характеристик описанных выше и опробованных в камере фотоприемников серии HDCS можно сделать следующие выводы:

- обмен по последовательному интерфейсу может достигать 3 Мбит/с, что позволяет изменять настройку экспозиции или размер кадра в течение 10–20 мкс;
- скорость выдачи данных (пикселей) достигает 4–5 Мбайт/с.

Таким образом, проведенное исследование показало, что КМОП-фотоприемники по качеству изображения (равномерность фона, шумы, динамический диапазон, разрешение) пока уступают ПЗС. Их основное преимущество – гораздо более широкий спектр функциональных возможностей в плане программирования и миниатюризации конечного устройства. Следует отметить, что подобные матричные КМОП-фотоприемники для камер с невысоким разрешением выпускают также фирмы Biomorph VLSI, Conexant Systems, Kodak, Eastman, Mitsubishi Electric, OmniVision Technologies, Photon Vision Systems, STMicroelectronics, Semiconductor Insights, Symagery Microsystems, Toshiba, VLSI Vision. По принципам работы и управления эти схемы схожи с фотоприемниками семейства HDCS, а отличаются от них качеством формируемого изображения и технологией изготовления.



Рис.2. Функциональная блок-схема HDCP-2010

2000/2010 – возможность выполнять на аппаратном уровне такую подчас длительную операцию, как JPEG-сжатие изображения. При этом для достижения оптимального соотношения между качеством изображения и скоростью вывода кадра предусмотрен автоматический подбор таблиц дискретизации (параметров JPEG-сжатия). Благодаря этому производительность достигает 30 кадров/с для изображения формата 640x480 пикселей. В микросхему заложена также возможность аппаратной статистической обработки кадров с получением гистограмм по каждому RGB-каналу. Это может оказаться полезным для разработчиков как аппаратных, так и программных средств. Стоит также отметить наличие у HDCP-2000 USB-интерфейса, что облегчает разработку миниатюрных одноплатных камер.

Для оценки возможностей практического применения фотоприемников семейства HDCS на базе HDCS 2000 были разработаны цветная камера с управлением и считыванием данных через LPT порт и соответствующее программное обеспечение под ОС Windows'9x–NT. Скорость обмена управляющими байтами – примерно 50 Кбайт/с, скорость считывания данных изображения – около 750 Кбайт/с. Захваченный кадр перед считыванием в компьютер хранится в буферном ОЗУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. The HP HDCS Family of CMOS Image Sensors Hewlett-Packard. Product Technical Specification HDCS-2000/2100/100/1100.–Integrated Circuits Business Division/Hewlett-Packard Company/ Oct. 12, 1998.
2. Agilent Technologies HDCS Family of CMOS Image Sensors. Product Technical Specification HDCS-2020/1020.–Imaging Electronics Division/Agilent Technologies, Inc./March 30, 2000.
3. HDCS-2000, An Image Processing Chip for the HDCS Family of CMOS Image Sensors with USB Interface, Preliminary Product Technical Specification. /Imaging Electronics Division/Agilent Technologies, Inc./Dec., 2000.
4. HDCS-2010, An Image Processing Chip for the HDCS Family of CMOS Image Sensors, Preliminary Product Technical Specification./ Imaging Electronics Division/Agilent Technologies, Inc./Dec., 2000.

Контактный телефон: 531–3574