

FILTRON:

оптические фильтры для КМОП интегральных фотодетекторов

Сами АХМЕД (Samy AHMED)
Генрих ГОТТЛОБ (Heinrich GOTTLÖB)

Авторский перевод:
Владимир РЕНТЮК

Интеграция в одной монолитной интегральной схеме фотоприемников и схем усилителей с использованием КМОП-технологии удобна как с точки зрения уменьшения размеров продукта, так и для пользователя, поскольку данными компонентами можно управлять с помощью цифровых шин. Статья посвящена технологии FILTRON от компании Vishay Semiconductor GmbH, которая использует выполненный непосредственно на фотодетекторе с помощью тонкопленочной технологии интерференционный фильтр Фабри — Перо.

Оптоэлектронные компоненты, изготовленные из такого полупроводникового материала, как кремний, чувствительны к свету с длиной волны в диапазоне от ультрафиолетового (УФ), видимого света до ближнего инфракрасного диапазона (полный диапазон длин волн 300–1100 нм). Падающий свет создает подвижные пары носителей заряда в полупроводниковом кристалле вследствие наличия фотоэффекта. Таким образом, кремний может быть использован в качестве фотоприемника или фотодетектора. В первом приближении измеренный фотоэлектрический ток пропорционален спектральной чувствительности, то есть области рабочих длин волн детектора, интенсивности и спектральной характеристики падающего света. Если говорить с точки зрения компонентов, то интеграция в одной монолитной интегральной схеме фотоприемников и схем усилителей с использованием КМОП-технологии (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник; *англ.* CMOS, complementary metal-oxide-semiconductor) приводит к уменьшению размеров продукта. Это также более удобное решение и для пользователя, поскольку данными компонентами можно управлять с помощью цифровых шин. При этом есть возможность устанавливать различные уровни усиления и таким образом расширять динамический диапазон, избегая ограничения выходного напряжения, которое пропорционально фототоку, а он, как уже говорилось, связан с характеристиками освещенности.

Спектральная чувствительность детектора первоначально определена спектральной чувствительностью кремния и технологического процесса, используемого при изготовлении КМОП-устройства. Однако спектральная чувствительность компонента

может быть изменена с помощью соответствующих оптических фильтров. Эти фильтры могут быть, например, полосовыми, предназначенными для датчиков освещенности, или адаптированными к чувствительности человеческого глаза или дневного света, или способными пропускать только ближний инфракрасный спектр света. Оптические фильтры могут быть выполнены, в частности, путем добавки определенных пигментов в герметизирующий материал корпуса. Такие материалы могут образовывать интерференционные фильтры в передней лицевой рабочей части компонента или быть закрепленными на кремниевой пластине фотоприемника. Возможны и комбинации подобных фильтров. Выбор здесь осуществляется на основе требований к продукции, доступности необходимого материала для реализации фильтра с заданными характеристиками и, естественно, стоимости самого решения.

Запатентованная технология под названием FILTRON от компании Vishay Semiconductor GmbH использует выполненный на фотодетекторе с применением тонкопленочной технологии интерференционный фильтр Фабри — Перо. Резонатор Фабри — Перо, предложенный в 1899 году, является основным видом оптического резонатора и представляет собой два соосных, параллельно расположенных и обращенных друг к другу зеркала, между которыми может формироваться резонансная стоячая оптическая волна; широко используется в интерферометрах и лазерах. Фильтр формируется на уровне пластин после завершения КМОП-процесса изготовления. Интерференционный фильтр состоит из полности, изготовленной из двух частично отражающих слоев зеркала с диэлектрической средой между ними (рис. 1а). Такая конфигу-

рация пропускает свет, имеющий длину волны (то есть обеспечивает конструктивную интерференцию двух разделенных лучей, как это показано в публикации [1]), которая в первом приближении удовлетворяет следующему уравнению:

$$2 \times n \times t = m \times \lambda_0, \quad (m = 1, 2, 3, \dots)$$

В этом уравнении n — показатель преломления; t — толщина слоя диэлектрической среды; m — представляет собой целое число без знака; а λ_0 — длина волны падающего света. Таким образом, данная структура представляет собой полосовой фильтр с коэффициентом пропускания, его можно считать передаточной функцией $T(\lambda)$, которая описывается уравнением [1]:

$$T = \frac{1}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \times \sin^2 \frac{2\pi \times n \times t}{\lambda}}$$

Отражательная способность R зеркал определяет ширину полосы пропускания полосового фильтра и задается для тонких металлических слоев регулированием толщины слоя. Для выбранной системы материала, например тонкие слои зеркал на основе серебра с нитридом кремния в качестве диэлектрической среды, передаточная функция фильтра может быть задана с помощью толщины слоя, как это показано на рис. 1б. Спектральная чувствительность фотоприемников с такой зеркальной полостью, образующей интерференционный фильтр Фабри — Перо, изменяется в соответствии с характеристикой узкополосного фильтра.

Процесс изготовления по технологии КМОП также позволяет выполнить интегрированную на одном чипе детекторную матрицу, выполненную из нескольких фото-

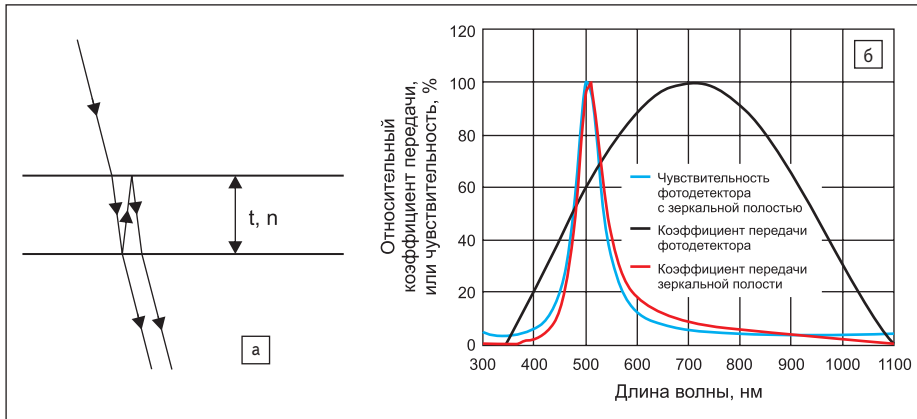


Рис. 1. а) Передача спектра через резонатор Фабри — Перо с зеркалами расположенными на расстоянии t и с диэлектрической средой между ними, имеющей показатель преломления n ; б) пример передачи через зеркальную полость, выполненную из нитрида кремния между тонкими серебряными зеркалами, а также и чувствительность кремниевого фотоприемника, как с использованием зеркальной полости, так и без нее

детекторов. При изготовлении полости каждый детектор такой матрицы получает свой собственный полосовой фильтр, который формируется путем многократного осаждения и структурирования.

Датчик освещенности

Датчик освещенности (англ. — Ambient light sensor, ALS) обеспечивает измерение яркости внешнего освещения, например для управления подсветкой дисплея или экрана телевизора. Таким образом, яркость подстраивается в соответствии с внешней освещенностью окружающей среды, поэтому экран дисплея будет и не слишком ярким и не слишком темным, что не только обеспечивает комфорт для пользователя, но и сокращает общее потребление энергии.

Ярко или темно — это субъективные человеческие ощущения уровня освещенности, воспринимаемые глазом. Рецепторы в нашем глазу чувствительны к видимому свету (диапазон длин волн 400–700 нм) и достигают максимума в зеленом участке диапазона видимого спектра. Если в качестве датчика окружающей освещенности используется широкополосный кремниевый фотодетектор, то результат ее измерения будет существенно зависеть от спектральной характеристики такого детектора по отношению к окружающему свету. Так, при одной и той же интенсивности света при использовании компонента с большой инфракрасной областью (чувствительного к длинам волн более 700 нм) лампа накаливания или солнечный свет приведут к большему уровню сигнала, чем при освещении от белого светодиода, имеющего спектр, ограниченный длинами волн 450–700 нм. В настоящее время технология FILTRON позволяет адаптировать чувствительность такого датчика освещенности, изготавливая его с полосовым фильтром, в результате он будет иметь аналогичную свойственной человеческому глазу. Отклонения

для различных источников света удалось свести к минимуму, чтобы они укладывались в пределы $\pm 15\%$.

Датчик освещенности VEML6030 компании Vishay [6], в дополнение к световому каналу анализа освещенности окружающей среды, адаптированному благодаря технологии FILTRON к восприятию освещенности человеческим глазом, имеет еще и широкополосный «белый» результирующий канал. Этот канал предоставляет дополнительную информацию об источнике света, что приводит к дальнейшему повышению точности определения яркости внешнего освещения. Оба канала располагают 16-битным разрешением и выполняют измерения параллельно. Компонент имеет адресацию по I²C-шине, так что через нее могут быть установлены соответствующие время интегрирования и коэффициенты усиления. Это позволяет обеспечить широкий динамический диапазон датчика, в результате он может работать в различных условиях: от полного солнечного освещения (приблизительно 10×10^4 лк) до освещения лунным светом (приблизительно

0,01 лк). Кроме того, его можно установить, например, на задней стенке корпуса телевизионного дисплея, который не только скрывает светочувствительный элемент, но и ослабляет падающий на него свет.

Возможно использование сенсора VEML6030 для управления яркостью и в приложениях для управления внешней фоновой подсветкой телевизоров, мониторов или дисплеев в мобильных устройствах. Данный фотодатчик также предназначен для управления освещением в помещениях или для промышленных применений.

Цветной сенсор (RGB — красный, зеленый, синий)

Как датчик с нормализованными каналами красного, зеленого и синего цветов, он измеряет интенсивность света в трех различных диапазонах длин волн видимого света, соответствующих красному, зеленому и синему цветам, а также имеет дополнительный канал белого света (рис. 2а). Следовательно, он может определять разные свойства источника света, в том числе коррелированную цветовую температуру — CCT (англ. CCT — correlated color temperature), которая содержит информацию о том, как свет воспринимается глазами человека.

Отдельные чувствительные каналы фотодатчика VEML6040 расположены в точечной матрице размером 4×4 (рис. 2б). Светофильтры датчика выполнены по технологии FILTRON, а результирующие характеристики фильтра приближаются к стандартизированным кривым чувствительности стандартной цветовой модели CIE1931. Зеленый канал может быть использован непосредственно в качестве датчика окружающего освещения. Все четыре канала имеют 16-битное разрешение, измерения по каналам выполняются параллельно. Размеры фотодатчика VEML6040, предназначенного для монтажа на поверхность, составляют всего $2 \times 1,25 \times 1$ мм.

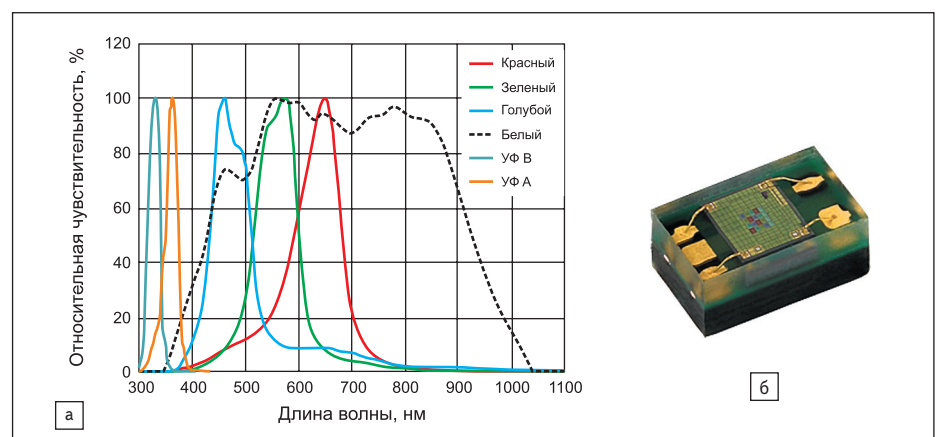


Рис. 2. а) Спектральная чувствительность различных каналов датчика, использующего технологию FILTRON; б) пример конструктивного исполнения датчика VEML6040 RGB с четырьмя каналами для красного, зеленого, синего и белого

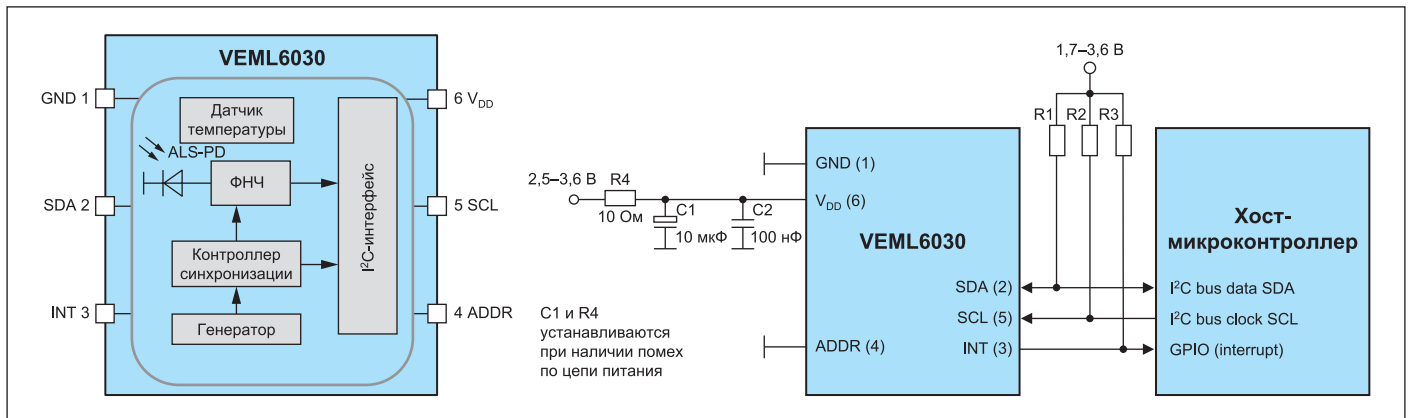


Рис. 3. Блок-схема и схема включения датчика освещенности VEML6030

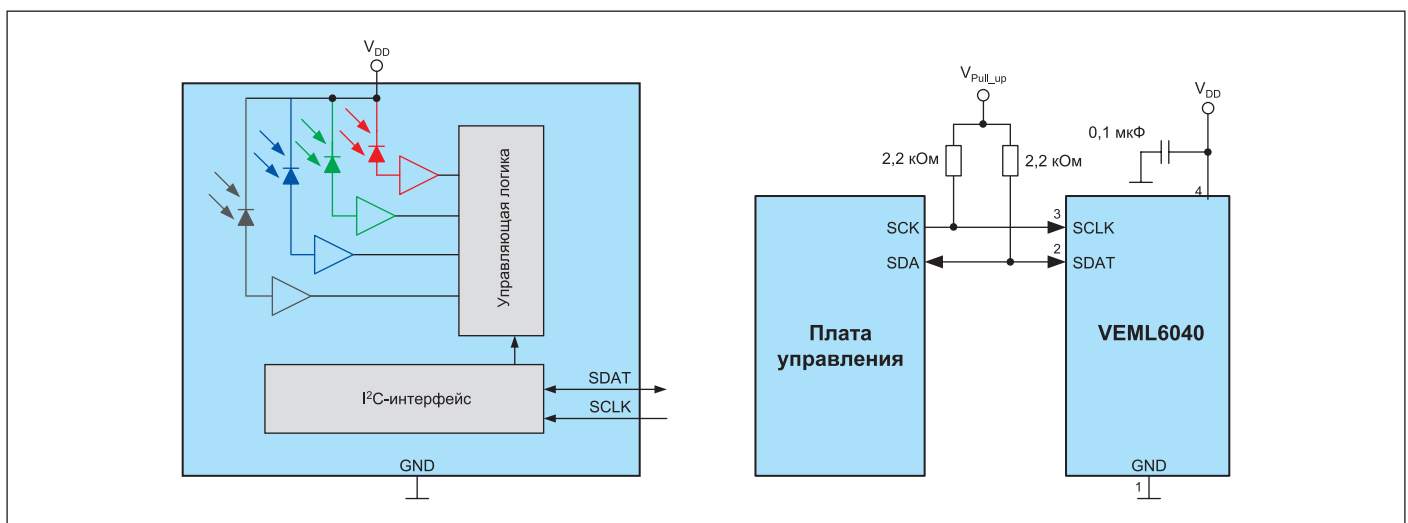


Рис. 4. Блок-схема и схема включения датчика с нормализованными каналами красного, зеленого и синего цветов VEML6040

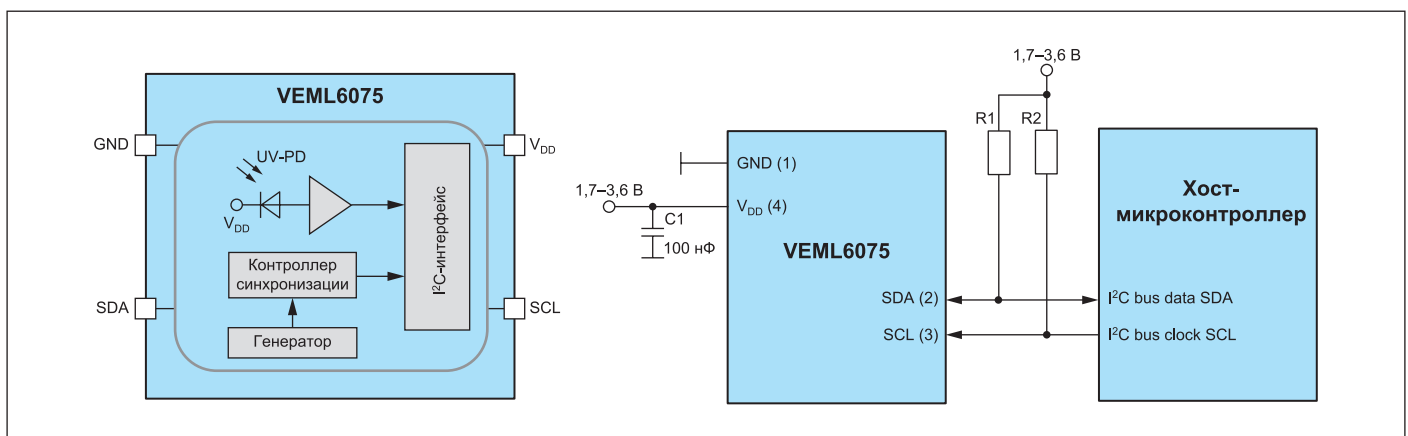


Рис. 5. Блок-схема и схема включения датчика ультрафиолетового излучения VEML6075

С использованием информации о цвете, в частности для дисплеев, их точка белого или насыщенность цвета регулируется в соответствии с условиями освещения. Кроме того, здесь выполняется и распознавание объектов по цвету. В качестве одного из примеров такого решения применяется вариант, когда объекты подсвечиваются светом с широким спектром от белого свето-

диода, а затем уже отраженный от объекта свет анализируется посредством датчика цвета. С помощью отраженного света цвет объекта может быть распознан, а информация об обнаружении передана исполнительной части приложения для принятия соответствующего данному случаю решения. В сегменте рынка освещения, где используются цветные источники света, генери-

рующие чистые RGB-цвета или источники с гетерогенными сборками из RGB и белых светодиодов, такой датчик цвета может быть встроен непосредственно в контур управления [9]. Это необходимо для того, чтобы компенсировать отклонения по цветовой температуре, а также явления, связанные с деградацией источников света в результате старения [2].

Ультрафиолетовый сенсор (УФ-А + УФ-В)

Ультрафиолетовое излучение (УФ) имеет более короткую длину волны, чем видимый свет, и достигает поверхности Земли от Солнца, которое здесь выступает в качестве естественного источника, в виде УФ-излучения типа А с длиной волны в диапазоне 380–315 нм и типа В с длиной волны в диапазоне 315–280 нм. Этот компонент спектра солнечного света относительно мал и в общем спектре составляет примерно 4,9% для УФ-А и около 0,1% УФ-В. Тем не менее столь короткие длины волн характеризуются более высокой энергией фотона, что вызывает повреждения кожи, такие как хорошо всем известные солнечные ожоги. Что касается солнечных ожогов, то излучение УФ-В значительно более опасно, чем УФ-А.

Кроме того, спектр УФ-В частично поглощается защитным озоновым слоем Земли, в то время как излучение УФ-А достигает поверхности нашей планеты практически без ослабления. По этой причине количество излучения вида УФ-В зависит от положения Солнца и местных условий, в том числе от толщины озонового слоя. При определении УФ-индекса, который описывает уровни излучения Солнца, характеризующие опасность получения солнечных ожогов, спектры УФ-А и УФ-В оцениваются по-разному [3]. УФ-индекс — это определенная международным стандартом измеряемая величина обычно с 12 уровнями, которые характеризуют силу солнечного ожога от продуцируемого излучения. Он служит для того, чтобы избежать слишком высокого уровня облучения.

Датчик UVA+UVB VEML6075 [8] имеет отдельные фотоприемники для спектров УФ-А (UVA) и УФ-В (UVB) полос (рис. 2а) и дополнительные каналы компенсации для определения и подавления шумов, вызванных наличием в окружающей среде излучений в видимом и инфракрасном диапазонах. УФ-индекс может быть рассчитан с использованием результатов измерений отдельных каналов [4]. Датчик применяется в портативной электронике, в сегменте рынка носимых устройств, для того чтобы своевременно предупредить о наличии недопустимо высокого уровня солнечного излучения или чтобы напомнить о необходимости использования соответствующей защиты. Другая область применения — мониторинг ультрафиолетовых светодиодных источников света, например для промышленных процессов с помощью ультрафиолетовой полимеризации.

Заключение

Запатентованная технология FILTRON предназначена для реализации оптических полосовых фильтров непосредственно на КМОП-фотоприемниках, без использования дополнительных оптических фильтров. Датчики, представленные компанией Vishay Semiconductor GmbH, обеспечивают канальное разделение спектра света в диапазоне от ультрафиолета до ближней инфракрасной области длин волн. Для всех упомянутых датчиков имеются демонстрационные комплекты, которыми можно легко управлять при помощи одного из стартовых комплектов Vishay USB Sensor Kit Starter [5]. Для разработчиков предлагаются программные мо-

дули, которые дают доступ ко всем настройкам, что обеспечивает удобное тестирование компонентов в конкретном приложении пользователя.

Блок-схемы упомянутых в статье датчиков и схемы их подключения приведены на рис. 3–5 [6–8]. ■

Литература

1. Jenkins F. A., White H. E. Fundamentals of Optics. McGraw-Hill, 1957.
2. Sowada D., Ahmed S. Mehr Komfort und Design: Weißlichtszenarien aktiv steuern: Weiße LEDs in Innenraum-Anwendungen (Active control of white light scenarios: white LEDs in indoor applications) // Elektronik Journal. March 2016. Issue 02.
3. The Global Solar UV Index and Health Effects of UV Exposure. www.kunden.dwd.de/uvi/data/www_UV_Index.pdf
4. Designing the VEML6075 into an Application. www.vishay.com/docs/84339/designingveml6075.pdf
5. Sensor starter kit downloads. www.vishay.com/moreinfo/vcnldemokit/
6. VEML6030 High Accuracy Ambient Light Sensor with I²C Interface, Rev. 13-Jun-2016. www.vishay.com/docs/84366/veml6030.pdf
7. VEML6040 RGBW Color Sensor with I²C Interface, Rev. 1.5, 24-Aug-2016. www.vishay.com/docs/84276/veml6040.pdf
8. VEML6075 UVA and UVB Light Sensor with I²C Interface, Rev. 1.1, 19-May-2016. www.vishay.com/docs/84304/veml6075.pdf
9. Нимз Т., Хайлер Ф., Янсен К. Сенсоры и обратная связь в многоцветных светодиодных системах // Полупроводниковая светотехника. 2015. № 2.