

Определение и измерение цвета на примере датчиков Avago Technologies

Алексей ПАНКРАШКИН
Alexey.Pankrashkin@macrogroun.ru

Человеческий глаз способен достаточно хорошо различать цвета (научные эксперименты показали, что люди могут различать до 10 миллионов оттенков, но мы просто не имеем достаточно слов для описания названий всех этих цветов), однако разные люди опишут один и тот же цвет иначе. Поэтому в промышленности и других областях человеческой деятельности требуется точное определение цвета и управление им и с помощью автоматических устройств.

Не так давно производителям, использующим оптоэлектронные датчики, было достаточно лишь сведений о яркости излучения. Сейчас требования к таким датчикам растут, поскольку необходима гораздо более точная информация о свете. Диапазон подобных устройств широк: от дорогих лабораторных спектрофотометров до экономичных (RGB — Red, Green, Blue) датчиков цвета, например семейство RGB-преобразователей света в напряжение, производимых Avago Technologies. Столь широкий диапазон типов датчиков стимулировал увеличение областей практического использования измерения цвета. Сегодня датчики цвета применяются для цветовых измерений, контроля и управления цветом в промышленной автоматике, бытовой технике, текстильной промышленности, светодиодной подсветке ЖК-дисплеев и телевизоров, измерения цвета в портативном медицинском оборудовании и диагностической аппаратуре и т. д.

Восприятие цвета

Прежде чем углубиться в теорию и дать описание того, как современные электронные приборы считывают и определяют цвет, полезно понять, как чувствуют и определяют цвет люди. Цвет — это результат взаимодействия между источником света, объектом и наблюдателем. Так, свет, падающий на объект, будет отражен или поглощен в зависимости от характеристик поверхности, коэффициентов отражения и пропускания. Например, красная бумага будет поглощать зеленую и синюю части спектра при отражении красной и поэтому для наблюдателя бумага будет красной. В случае излучения света самим объектом свет достигает человеческого глаза, обрабатывается его рецепторами и интерпретируется нервной системой и мозгом.

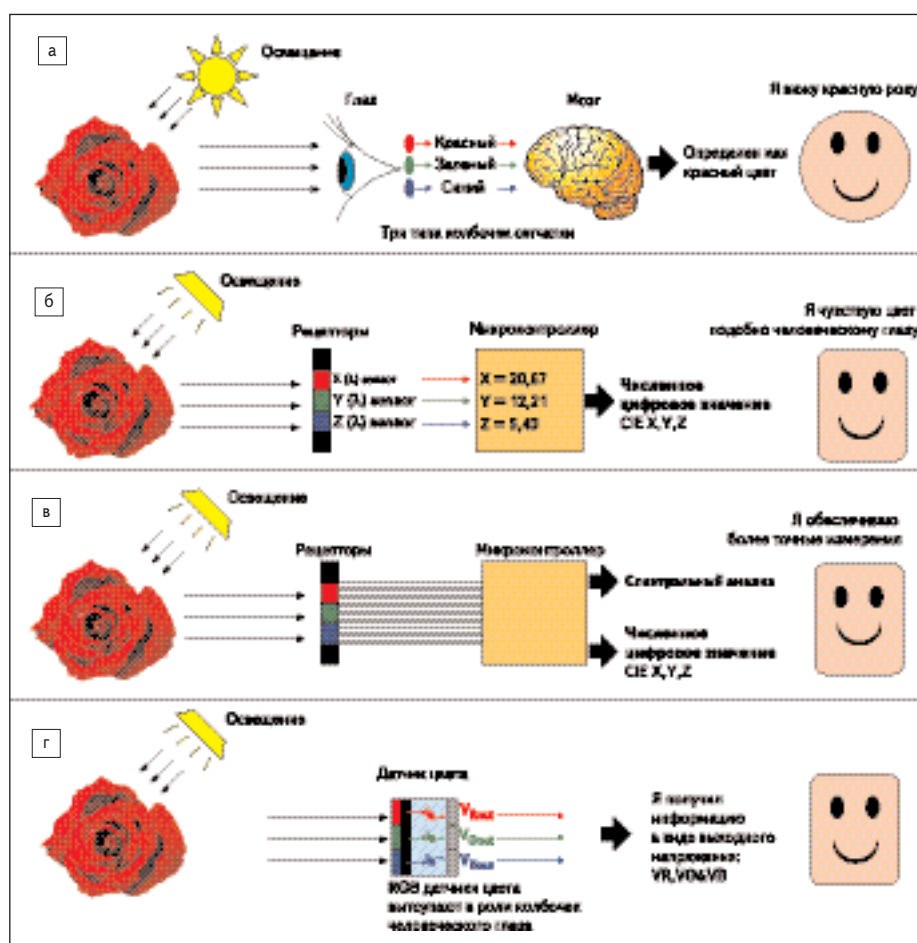


Рис. 1. Определение цвета: а) человеческим глазом; б) колориметром; в) спектрофотометром; г) RGB-датчиком цвета

Человеческий глаз может обнаруживать спектр электромагнитного излучения приблизительно от 400 (фиолетовый цвет) до 700 нм (красный цвет) и может адаптироваться к изменяющимся в широких пределах уровням освещенности и насыщенности цвета (отношение «чистый» цвет/белый цвет).

Клетки человеческого глаза, способные обрабатывать свет в широком диапазоне уровня освещенности и обеспечивать быструю реакцию на изменение освещенности, называются «палочками» и не имеют способности определять цвет. Клетки, названные «колбочками», обеспечивают определение цвета

с высокой разрешающей способностью. Имеются три набора колбочек с максимумом чувствительности в длинах волн, которые человеческий глаз может выделять: красный цвет (580 нм), зеленый (540 нм) и синий (450 нм). Свет с любой другой длиной волны в видимой части спектра будет стимулировать разное количество каждого из этих трех типов клеток с различной степенью, затем информация будет передана зрительным нервом и обработана мозгом.

На рис. 1а показан основной принцип определения цвета человеческим глазом. Имеются несколько типов приборов для измерения цвета, но сегодня чаще всего используют либо колориметрический, либо фотометрический методы измерения. Колориметрический метод предполагает измерение света от объекта с помощью датчика с тремя фильтрами (рис. 1б). Обычно спектральная чувствительность датчика оптимизирована так, чтобы она совпадала со спектральной чувствительностью человеческого глаза. Выходной сигнал дается в координатах цвета X, Y, Z Комиссии CIE (Commission International de l'Éclairage). При фотометрическом методе (рис. 1в) используется множество датчиков, определяющих цвет в большом количестве узких диапазонов. Затем компьютер вычисляет координаты цвета в каждом диапазоне и интегрирует полученные данные. Датчики цвета компании Avago (рис. 1г) — это датчики, использующие колориметрический принцип измерения, они состоят из фотодиодной матрицы, красного, зеленого и синего фильтров.

Теория измерения цвета

Сегодня выпускаются три различных типа датчиков цвета: датчики, преобразующие свет в фототок, датчики, преобразующие свет в аналоговый сигнал, и датчики, преобразующие свет в цифровой сигнал.

Датчик цвета, преобразующий свет в аналоговое напряжение, обычно состоит из матрицы фотодиодов с цветными светофильтрами, интегрированной со схемой преобразования тока в напряжение. Такой RGB-датчик цвета использует колориметрический принцип измерения и состоит из фотодиодной матрицы, красного, зеленого и синего фильтров и трех усилителей с токовым входом, объединенных в одной монолитной КМОП-микросхеме. Без цветного светофильтра обычный кремниевый фотодиод реагирует на длины волн от ближнего ультрафиолета до ближнего ИК-диапазона с областью максимальной чувствительности между 800 и 950 нм. Красный, зеленый и синий цветные фильтры на пропускание формируют и оптимизируют спектральную чувствительность фотодиода. Должным образом разработанные фильтры позволяют получать спектральную чувствительность для отфильтрованной фотодиодной матрицы, подобную чувствительности человеческого глаза. RGB-фильтры разлагают

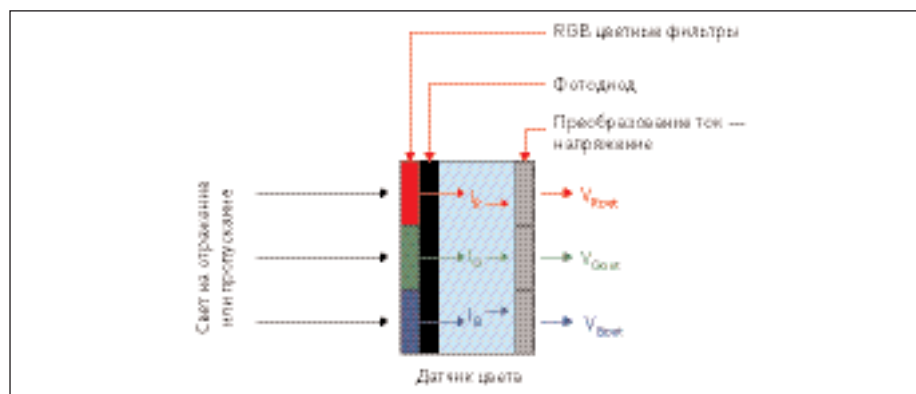


Рис. 2. Блок-схема типичного датчика цвета Avago Technologies

падающий свет на красную, зеленую и синюю составляющие. Фотодиод соответствующего канала цвета превращает их в фототок. Затем три усилителя с токовым входом (по одному для каждой составляющей R, G и B) преобразуют фототок в напряжение. Вместе три аналоговых выхода несут информацию о цвете и силе света. Выходное напряжение на каждом из каналов (R, G, B) линейно увеличивается с ростом интенсивности света. Блок-схема типичного датчика цвета от Avago Technologies приведена на рис. 2.

Чаще всего используют один из двух методов измерения и определения цвета: на отражение и на пропускание.

При измерении на отражение датчик цвета определяет и измеряет цвет излучения, отраженного от поверхности или объекта. При этом как источник, так и датчик цвета расположены близко от отражающей поверхности. Свет, излучаемый источником света (лампа накаливания, флуоресцентная лампа, белый светодиод или калиброванный светодиодный модуль RGB) отражается от поверхности, затем определяется и измеряется дат-

чиком цвета. Цвет излучения, отраженного от поверхности, зависит от цвета этой поверхности. Например, белый свет, падающий на красную поверхность, отражается как красный цвет. Отраженный красный свет попадает на датчик цвета, выдающего различные выходные напряжения по трем каналам R, G и B. Интерпретируя эти три напряжения, можно определить свет. Эти три выходных напряжения растут линейно с увеличением интенсивности отраженного света, поэтому такой датчик цвета может также измерять отражающую способность объекта или поверхности (рис. 3).

При измерении на пропускание датчик цвета определяет и измеряет свет непосредственно от источника. Датчик цвета и источник света расположены «лицом к лицу». Фотодиодная линейка со светофильтрами преобразует падающий свет в фототок от соответствующего канала, который затем усиливается и преобразуется в аналоговое напряжение. Интерпретируя эти три напряжения, можно определить цвет. Выходные напряжения, так же как и в случае измерения

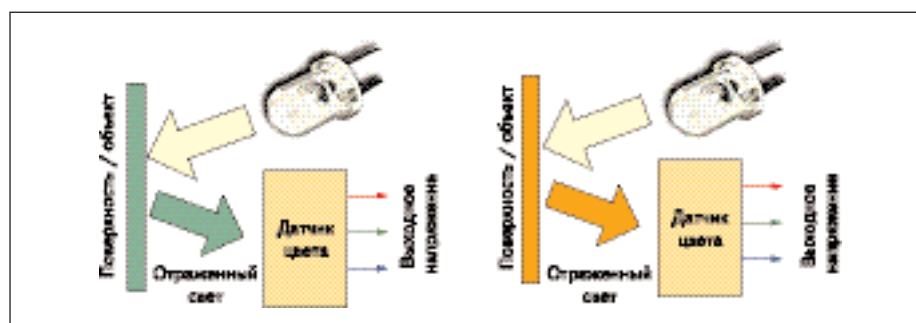


Рис. 3. Измерение цвета на отражение

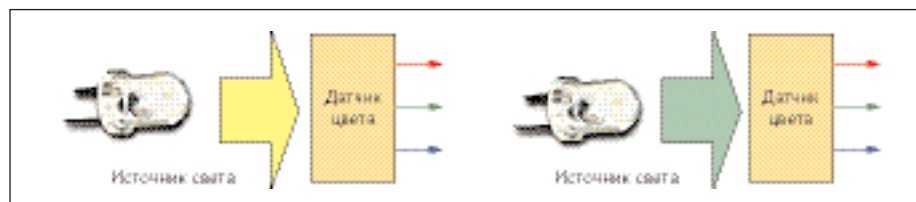


Рис. 4. Измерение цвета на пропускание

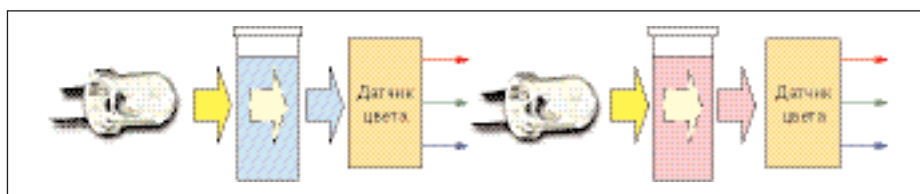


Рис. 5. Определения цвета прозрачных сред при измерении цвета на пропускание

на отражение, растут линейно с увеличением интенсивности отраженного света, поэтому такой датчик кроме цвета может измерить и полную интенсивность светового потока от источника света (рис. 4).

Измерение цвета на пропускание используется, например, для определения цвета прозрачных сред типа стекла, прозрачного пластика, жидкости или газа. В этом случае свет проходит сквозь прозрачную цветную среду и попадает на датчик цвета (рис. 5).

Три аналоговых напряжения на выходе датчика цвета могут использоваться для контроля в аппаратуре управления. Эти напряжения могут также быть преобразованы в цифровой сигнал, который может анализировать DSP.

Кратко представим методы описания цвета и яркости излучения.

Матричный метод

Этот метод используют, если необходимо определить несколько цветов. Метод основан на матричном уравнении: CIE X, Y, Z представляет собой координаты цвета, RGB представляет собой цифровые значения датчика цвета. Матричные коэффициенты C00, C01, C02, C10, C11, C12, C20, C21 и C22 определяются на основе выходных сигналов эталонного датчика цвета. Как только эти матричные коэффициенты определены, значения X, Y, Z могут быть рассчитаны из RGB значений датчика цвета.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{00} & C_{01} & C_{02} \\ C_{10} & C_{11} & C_{12} \\ C_{20} & C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

Табличный метод

Этот метод подходит для определения нескольких цветов одновременно. Для начала необходимо определиться, важна ли информация о яркости или нет. Сначала используется информация о яркости для каждого цвета с эталонного датчика, которая получена во время калибровки. Если информация о яркости не имеет значения, то для нахождения отношения между эталонным цветом, полученным во время калибровки, и определяемым цветом используется один отображенный цветной канал — как основание для всех наборов измерения (например, зеленый канал).

$$\left(\frac{R_n}{G_n}, 1, \frac{B_n}{G_n} \right), n = 1, 2, 3, \dots, N$$

Для случая, когда яркость важна:

$$\text{Distance} = \sqrt{(R_u - R_r)^2 + (G_u - G_r)^2 + (B_u - B_r)^2}$$

Для случая, когда яркость не важна:

$$\text{Distance} = \sqrt{\left(\frac{R_u}{G_u} - \frac{R_r}{G_r} \right)^2 + \left(\frac{B_u}{G_u} - \frac{B_r}{G_r} \right)^2}$$

- (R_u, G_u, B_u) — неизвестные цвета.
- (R_r, G_r, B_r) — эталонные цвета.
- для случая, когда яркость не важна, значение для одного канала датчика (например, зеленый канал) используется как знаменатель.

В настоящее время компанией Avago Technologies выпускается несколько датчиков различных типов (таблица), в числе последних — цифровой ADJD-S313-QR999 и аналоговый HDJD-S722-QR999, которые обеспечивают точную и надежную работу при достаточно невысокой цене.

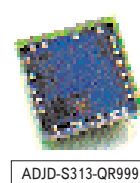
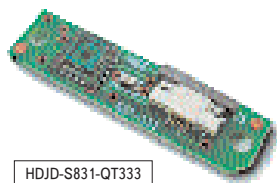
Для аналогового датчика цвета HDJD-S722-QR999 нужен один источник питания напряжением 5 В. Интегральное исполнение и стандартное 5-вольтовое питание гарантируют недорогое и эффективное решение для измерения цвета. Микросхема выпускается в плоском квадратном корпусе QFN для поверхностного монтажа 5×5×1 мм с 160 выводами. Данные датчики цвета могут использоваться для цветовых измерений, контроля

и управления цветом в промышленной автоматике, бытовой технике, текстильной промышленности, светодиодной подсветке ЖК-дисплеев и телевизоров, измерения цвета в портативном медицинском оборудовании и диагностической аппаратуре, а также в считывающих устройствах.

Цифровой датчик ADJD-S313-QR999 выполнен в 20-выводном корпусе QFN размером 5×5×0,75 мм. Датчик имеет RGB-фильтры и фотодиодную матрицу, АЦП и цифровое ядро для связи с микроконтроллером и для регулировки чувствительности. Он может напрямую взаимодействовать с микроконтроллером без каких-либо дополнительных компонентов. Это обеспечивает более простое согласование устройств. Интегрированный АЦП позволяет избавиться и от нежелательных шумов, связанных с предварительной обработкой аналогового сигнала. Встроенные RGB-фильтры разработаны на основе матрицы фотодиодов с равномерным распределением элементов. Однородное распределение RGB-фильтров и фотодиодных матриц уменьшает влияние градиента освещенности, связанное с ошибками оптических измерений и неровностями используемых поверхностей. Датчик работает от источника питания с напряжением 2,6 В, обеспечивая значительно более низкое энергопотребление. ADJD-S313-QR999 может использоваться в широком динамическом диапазоне уровня освещенности и идеально подходит для применений в устройствах, которые требуют высокой степени интеграции, малых размеров и пониженного энергопотребления. Имея широкий диапазон чувствительности, ADJD-S313-QR999 может использоваться для решения большого спектра задач с различными уровнями освещенности просто за счет регулировки коэффициента усиления. Регулировка чувствительности выполнена с помощью последовательного интерфейса и может быть оптимизирована индивидуально для каждого канала цветности. Например, датчик

Таблица. Датчики цвета различных типов, выпускаемые компанией Avago Technologies

Устройство	Тип выхода	Корпус и размер (мм)	Напряжение питания, В	Максимальный перепад напряжения / разрешение	Рабочий температурный диапазон (°C)	Диапазон уровня освещенности (клк)	Чувствительность (мВт/см²)	Спектральный диапазон (нм)
HDJD-S831-QT333	Аналоговый	Модуль 27,6×7×3	5	3 В	-20...+85	30-60	R: 1,1 G: 3,9 B: 3,1	400-700
HDJD-S722-QR999	Аналоговый	QFN 5×5×1	5	4,7 В	-20...+85	0,1-5,5	R: 27 G: 19 B: 15	400-700
ADJD-E622-QR999	Аналоговый	QFN 5×5×0,75	5	4,7 В	-20...+85	0,1-10	R: 27 G: 19 B: 13	400-700
ADJD-S313-QR999	Цифровой	QFN 5×5×0,75	2,6	7 бит разрешение	-20...+85	0,6-10	R: 1250 G: 1750 B: 2490	400-700



ADJD-S313-QR999 может использоваться вместе с белым светодиодом для измерения цвета отраженного излучения. К дополнительным возможностям прибора относится спящий режим, позволяющий минимизировать энергопотребление. Рабочий температурный диапазон прибора — от 0 до +70 °С.

Для эффективной обработки информации с датчиков цвета фирма Avago Technologies производит контроллеры цвета, например HDJD-J822. Система управления уровнем освещенности и цветом (ICM) с обратной связью способна компенсировать различие скорости деградации RGB-светодиодов и поддерживать точный цвет. Система обратной связи управления уровнем освещенности и цветом состоит из трех компонентов: датчика цвета, RGB-контроллера и светодиодов.

Avago Technologies предлагает датчики цвета для следующих возможных сегментов рынка: автомобильный рынок (навигационные панели, освещение настроения, освещение приборной панели), рынок освещения (архитектурное освещение, декоративное освещение и дисплеи, внутреннее освещение, освещение жилых помещений), промышленный рынок (упаковка, маркировка и идентификация товаров, косметика — сегрегация продукта и качество цвета, текстильная промышленность — обнаружение загрязнения пряжи, цвет ткани, печатная промышленность — пигментация и цвет краски), медицинский рынок (измерение глюкозы, холестерина и кетона в крови), рынок бытовой электроники (портативный датчик цвета, датчик цвета для тканей в стиральных машинах, игровое оборудование).

Пример 1. Декоративное освещение и освещение жилых помещений (рис. 6)

Датчик цвета используется, чтобы измерять интенсивность светодиода через некоторый промежуток времени (интенсивность светодиодов изменяется со временем) и предоставить обратную связь для управления цветом данного источника света. Датчик может использоваться вместе с контроллером цвета от Avago (HDJD-J822-SCR00) в системах управления цветом с обратной связью.

Пример 2. Обнаружение загрязнения пряжи в текстильной промышленности (рис. 7)

Датчик цвета установлен в поточной линии передвижения пряжи и обнаруживает присутствие загрязнения за счет изменения цвета пряжи. Когда загрязнение обнаружено, система автоматически останавливает линию, что позволяет сократить вероятность человеческой ошибки и улучшает точность и эффективность промывки пряжи.

Пример 3. Химический анализ — жидкостной хроматографический химический анализатор (рис. 8)

Четыре датчика цвета помещены вдоль зоны химической реакции, чтобы отслеживать стадию реакции по цвету.

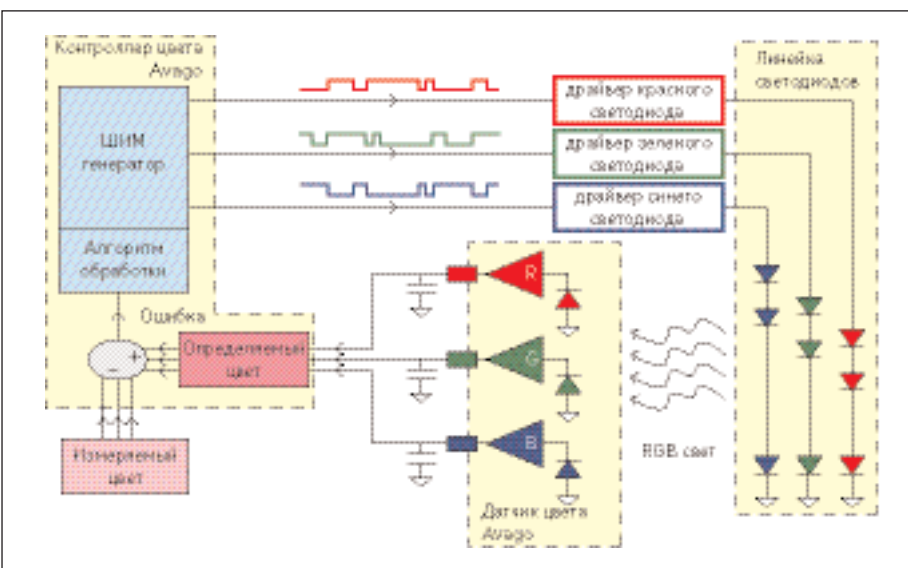


Рис. 6. Система управления цветом с обратной связью с использованием датчиков цвета и контроллера цвета HDJD-J822-SCR00 от Avago Technologies

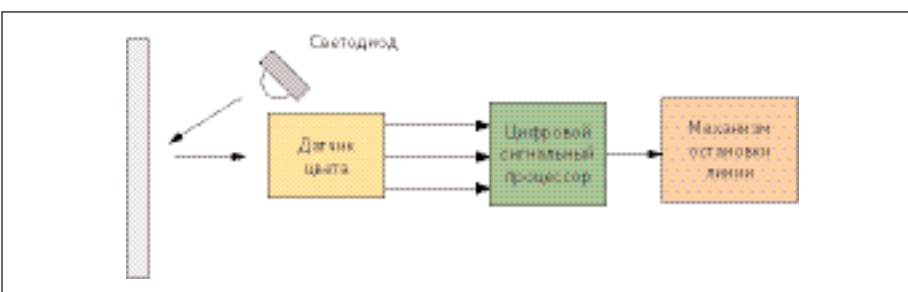


Рис. 7. Обнаружение загрязнения пряжи в текстильной промышленности с использованием датчиков цвета

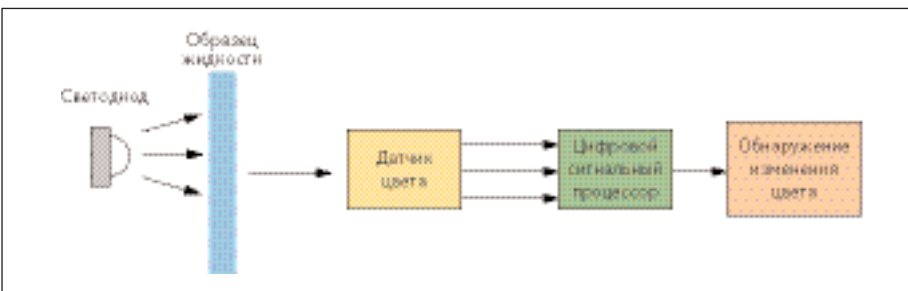


Рис. 8. Отслеживание стадии химической реакции по цвету