

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ КАМЕРЫ НА КРЕМНИЕВОЙ МАТРИЦЕ

© 2013 г. А. Н. Старченко, канд. техн. наук; В. Г. Филиппов; Ю. А. Югай

Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения,
г. Сосновый Бор, Ленинградская обл.

E-mail: anstar2000@mail.ru

Описан эксперимент и результаты исследования температурной зависимости чувствительности цифровой телевизионной камеры на основе кремниевой матрицы в трех участках видимой и ближней инфракрасной областей спектра.

Ключевые слова: матрица, температурная зависимость чувствительности, цифровая телевизионная камера, светофильтр.

Коды OCIS: 040.1240; 040.6040

Поступила в редакцию 01.03.2013

По мере развития и повсеместного внедрения аналоговых и цифровых камер на базе кремниевых матриц ПЗС и КМОП расширяется и спектр решаемых с их помощью измерительных задач. Наиболее сложными и перспективными оказываются применения фотометрического плана. В этих случаях необходима детерминированная характеристика преобразования камеры в нужном диапазоне измерения энергетической яркости, плотности мощности лазерного пучка и др., а также температур окружающей среды. Для измерений, как правило, применяются цифровые камеры с линейной характеристикой преобразования в кадре и программно задаваемым временем накопления.

Практический интерес представляет оценка влияния изменения температуры среды на работу камеры. В литературе сравнительно подробно рассматриваются процессы, приводящие к генерации и накоплению тепловых носителей (темновой ток), в том числе в элементах с технологическими дефектами (горячие точки). Количественные оценки температурного изменения чувствительности отсутствуют как в научных работах, так и в технических материалах фирм-

производителей кремниевых матриц и линеек (*Sony, Kodak, Hamamatsu* и др.).

Отправной точкой исследования стали ранее опубликованные данные по температурной зависимости чувствительности полупроводниковых приемников излучения, в частности кремниевых и германиевых фотодиодов [1, 2]. При нагреве для них типичны сдвиг максимума чувствительности в сторону больших длин волн и подъем чувствительности на длинноволновой ветви зависимости спектральной чувствительности $s(\lambda)$.

В силу особенностей применения кремниевые матрицы имеют спектральные чувствительности $s(\lambda)$, отличающиеся от зависимостей, характерных для кремниевых фотодиодов. На рис. 1 показаны относительные спектральные зависимости чувствительности матрицы ICX429ALL фирмы *Sony* и фотодиода ФД-24К [1]. Максимум чувствительности монохромных кремниевых матриц с фронтальным освещением лежит в области 500–700 нм, у кремниевых фотодиодов – в зоне 800–900 нм.

Исследованиям подвергалась цифровая камера VNC-748-E2 (разработчик и изготовитель

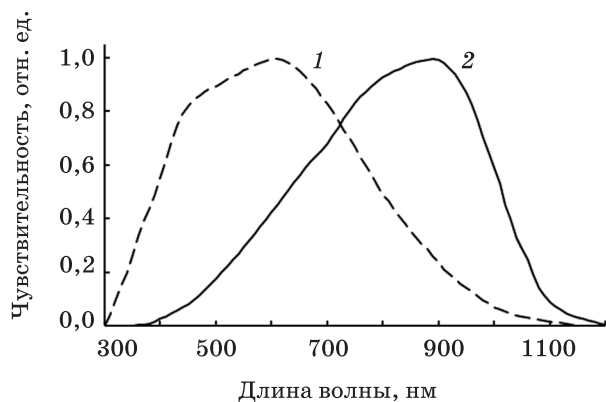


Рис. 1. Спектральные зависимости чувствительности матрицы ICX429ALL (1) и фотодиода ФД-24К (2).

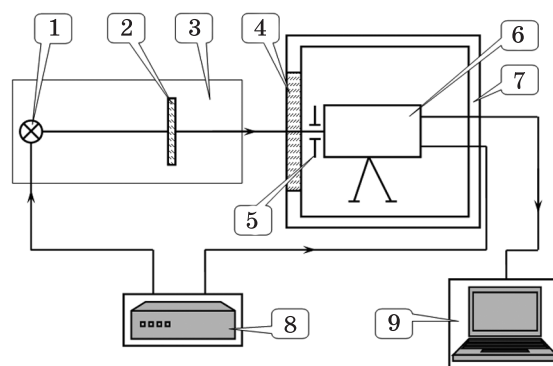


Рис. 2. Схема установки. 1 – галогенная лампа, 2 – сменный светофильтр, 3 – экран, 4 – входное окно климатической камеры, 5 – диафрагма, 6 – цифровая ТВ камера, 7 – климатическая камера, 8 – источник питания, 9 – портативный компьютер.

ООО «ЭВС», Санкт-Петербург). В ней применена матрица ПЗС ICX429ALL семейства EXview HAD CCD фирмы Sony. Эта матрица за счет применения иммерсионных микролинз имеет высокую чувствительность и широко применяется в цифровых и аналоговых камерах разных производителей. В камере VNC-748-E2 реализован интерфейс управления и передачи данных по последовательному каналу Ethernet 100Base-T, а также имеется вспомогательный выход аналогового телевизионного (ТВ) сигнала.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 2. Телевизионная камера размещалась в климатической камере КПК 3524/58. В качестве источника излучения применялась лампа накаливания с мощностью 20 Вт и цветовой температурой, близкой к 3000 К. Выделение участков спектра осуществлялось светофильтрами из цветных стекол ЗС8, КС18 и ИКС3 толщиной 3 мм. Экран препятствует попаданию на матрицу постороннего света. Излучение лампы засвечивает лишь центральную часть матрицы за диафрагмой диаметром 2 мм. ТВ камера подключалась к портативному компьютеру по каналу Ethernet 100Base-T. Ввод проводов питания камеры и кабеля подключения к компьютеру был выполнен через герметичный переход. Лампа и ТВ камера питались от стабилизированного источника напряжения.

В ходе подготовки были сделаны оценки спектральных показателей, необходимых для проведения эксперимента и интерпретации ре-

зультатов. На графиках рис. 3 показаны зависимости эффективной облученности $E_{ef}(\lambda)$, построенные согласно соотношению

$$E_{ef}(\lambda) = E(\lambda)s(\lambda)t(\lambda). \quad (1)$$

Здесь $E(\lambda)$ и $s(\lambda)$ – относительные спектральные зависимости плотности облученности от лампы и чувствительности матрицы, $t(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания фильтра.

Зависимость $E(\lambda)$ получена по эмпирической модели, учитывающей температурный и спектральный ход коэффициента излучения вольфрама [3].

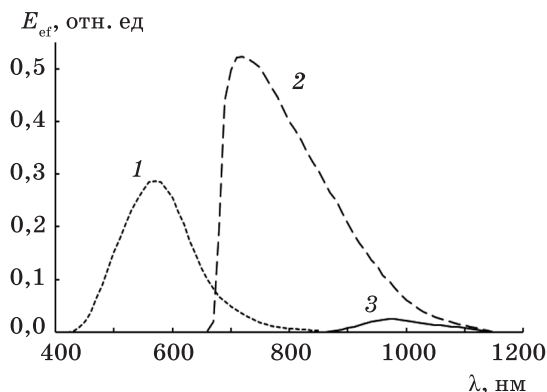


Рис. 3. Спектральные зависимости эффективной облученности с фильтрами ЗС8 (1), КС18 (2), ИКС3 (3).

Данные по спектральной чувствительности $s(\lambda)$ матрицы ICX429ALL диапазоне 400–1000 нм взяты из описания фирмы Sony, а на участках 300–400 и 1000–1150 нм дополнены результатами собственных измерений.

Спектры пропускания фильтров $t(\lambda)$ в диапазоне 300–1100 нм измерены на спектрофотометре СФ-56 (разработчик и изготовитель ЗАО «ОКБ Спектр», Санкт-Петербург), а для участка от 1100 до 1150 нм определены по данным каталога цветного стекла [4].

По кривым $E_{ef}(\lambda)$ были определены длины волн λ_{max} , отвечающие максимуму зависимостей $E_{ef}(\lambda)$, их границам по уровню 0,5 от максимальных значений. Также были рассчитаны значения эффективной длины волны λ_{ef} и спектральной эффективности χ по формулам (2) и (3) соответственно

$$\lambda_{ef} = [\int \lambda E_{ef}(\lambda) d\lambda] / [\int E_{ef}(\lambda) d\lambda], \quad (2)$$

$$\chi = [\int E_{ef}(\lambda) d\lambda] / [\int E(\lambda) d\lambda]. \quad (3)$$

Полученные значения спектральных показателей сведены в табл. 1. Они показывают, что применяемые фильтры вырезают три области шириной около 150 нм с эффективными длинами волн 590, 805 и 995 нм. В последней строке табл. 1 представлены данные при отсутствии фильтра. Расчетные уровни сигналов различаются почти в 100 раз.

Камера VNC-748-E2 поддерживает программное управление временем накопления, коэффициентом усиления, показателем гамма-коррекции и другими параметрами ее работы. Перед началом измерений были определены времена накопления, подходящие для работы с выбранными фильтрами. У фильтров ЗС8 и КС18 время накопления составляло 1 мс, с фильтром из стекла ИКС3 – 20 мс, а при наблюдении без фильтра – 0,5 мс.

Таблица 1. Значения спектральных показателей

Свето-фильтр	λ_{max} , нм	λ_{ef} , нм	$\Delta\lambda_{0,5}$, нм	χ , отн. ед.
ЗС8	570	590	490–635	0,085
КС18	720	805	680–855	0,19
ИКС3	980	995	915–1065	0,0069
–	685	710	510–855	0,39

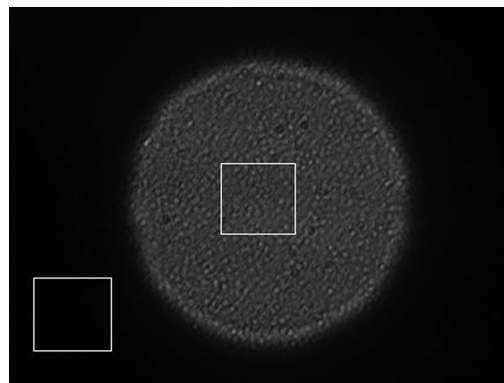


Рис. 4. Пример фиксируемого изображения.

В ходе эксперимента температура в климатической камере менялась с шагом 5°C от минус 20°C до плюс 40°C. Изображения записывались на диск компьютера. На рис. 4 показан пример получаемых изображений. Применяемая программа позволяла вычислять средние значения (N) и среднеквадратические отклонения (σ) в двух прямоугольных областях. Показатели в освещенной зоне кадра обозначены $N_{ci}(T_j)$ и $\sigma_{ci}(T_j)$, а в затененной – показатели $N_{mi}(T_j)$ и $\sigma_{mi}(T_j)$.

На рис. 5 представлены значения сигналов $N_i(T_j) = N_{ci}(T_j) - N_{mi}(T_j)$ и аппроксимации их температурного хода прямыми. Их аналитическое представление описывается формулой

$$N_i(T) = b_i T + a_i. \quad (4)$$

Коэффициенты b_i и a_i в каждой спектральной области получены методом наименьших квадратов. Искомые температурные коэффициенты чувствительности (процент на градус Цельсия) в каждом спектральном диапазоне получены

Таблица 2. Температурные коэффициенты чувствительности

Спектральный интервал, нм	490–635	510–855	680–855	915–1065
Температурный коэффициент, % / °C	0,3	0,39	0,47	1,0

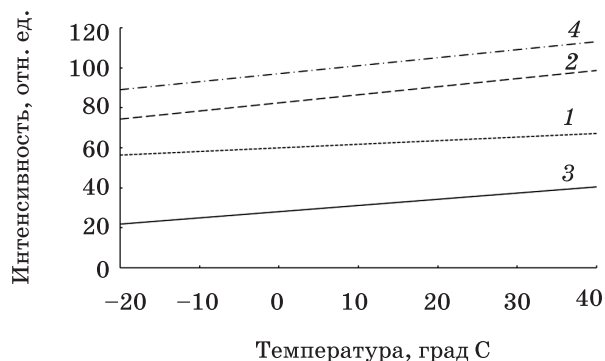


Рис. 5. Температурные зависимости сигналов с фильтрами ЗС8 (1), КС18 (2), ИКСЗ (3) и без фильтра (4).

делением коэффициента b_i на среднее значение сигналов по всем температурам $\langle N_i \rangle$ и умножением на 100. Значения температурных коэф-

фициентов исследуемой матрицы приведены в табл. 2.

Анализ экспериментальных данных показывает, что температурные зависимости чувствительности кремниевой матрицы подобны аналогичным зависимостям фотодиодов. Основное различие состоит в том, что максимум чувствительности матрицы сдвинут в коротковолновую область, а температурная зависимость проявляется, уже начиная с длин волн 700–750 нм.

Полученные значения температурных коэффициентов изменения чувствительности позволяют оценивать дополнительные ошибки измерения фотометрических параметров и при необходимости корректировать результаты измерений при существенных вариациях температуры окружающей среды.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. *Игнатъев В.Г., Воркачева Н.А.* Результаты исследования некоторых метрологических характеристик кремниевых и германиевых фотодиодов / Импульсная фотометрия. Л.: Машиностроение, 1984. В. 8. С. 82.
2. *Кувалдин Э.В., Борисов В.А.* Основные характеристики и методы испытаний измерительных фотодиодов / Импульсная фотометрия. Л.: Машиностроение, 1984. В. 8. С. 71.
3. *Вугман С.М., Вдовин Н.С.* Тепловые источники излучения для метрологии. М.: Энергоатомиздат, 1988. 80 с. (Б-ка светотехника, в. 17).
4. Цветное оптическое стекло и особые стекла. Каталог / Под ред. Петровского Г.Т. М.: Дом оптики, 1990. 177 с.