

УДК 621.396, 543.4(045)

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ТРЁХЦВЕТНЫХ МАТРИЧНЫХ ФОТОПРИЁМНИКОВ

© С. И. Зиенко, В. Л. Жбанова

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
214013, г. Смоленск, Энергетический проезд, 1  
E-mail: stanislav-zienko@rambler.ru

Для количественной оценки спектральной чувствительности матричных фотоприёмников предлагается метод, основанный на преобразованиях Фурье для более детального разбора характеристик в частотной и временной областях по величине показателя широкополосности, форме кривой импульсной (временной) характеристики, по степени колебательности, величине коэффициента демпфирования, энергетических потерь. Обнаружено сильное влияние электрон-фононного взаимодействия в полупроводнике на образование шумов в матричных фотоприёмниках относительно глаза человека.

*Ключевые слова:* спектр, глаз, машинное зрение, многослойные системы, импульсная характеристика, фазовый портрет, добротность, затухание контура, коэффициент демпфирования.

DOI: 10.15372/AUT20220204

**Введение.** Анализ спектральных характеристик матричных фотоприёмников — сегодня перспективное направление в науке и технике. Качественный анализ позволяет предсказать технические возможности приёмника, оценить искажения входного сигнала и его пространственно-частотного спектра [1–3]. Подобная тематика относится к вопросам реализации систем и методов передачи информации, приёма и обработки сигналов, к технологиям обработки, анализа и распознавания изображений и сигналов, машинному зрению, что является стратегическими направлениями развития науки и техники.

В представленной работе рассмотрены матричные фотоприёмники разных производителей: Sony, Kodak, Agilent, Foveon X3 [4, 5]. Характеристики приведённых матричных фотоприёмников отличаются по форме. К примеру, матричный фотоприёмник Sony имеет достаточно ровные кривые без второстепенных пиков. Но кривая по зелёному спектру имеет максимум 540 нм, а также меньший коэффициент пропускания по сравнению с другими. При рассмотрении спектральных характеристик Kodak заметны второстепенные максимумы кривых красного и синего каналов, перекрывающие области друг друга. Спектральные характеристики матричных фотоприёмников Kodak и Agilent схожи. Кривые красного и синего каналов имеют второстепенные максимумы, находящиеся в нерабочих областях. Кроме того, пики характеристик широкие и неровные, что ухудшает рабочие свойства матрицы и передачу «чистых» цветов. Системы цветоразделения с многослойной полупроводниковой структурой Foveon X3 являются весьма перспективным направлением развития фотопреобразователей видимого диапазона [4–6]. Это универсальный датчик, регистрирующий информацию всех трёх цветовых компонентов (R, G, B) изображения в одной точке. Но у этих матричных фотоприёмников спектральные характеристики каждого канала достаточно широкие, а максимумы сглажены. Идеальными характеристиками можно считать ровные, куполообразные пики с единичными максимумами на рабочей длине волны. Какие характеристики можно считать эталонными? Для ответа на этот вопрос в представленной работе выбрана относительная спектральная эффективность зрительной

системы человека (глаза человека) и разложена на три составляющие, которые послужили основой для сравнительной характеристики современных матричных фотоприёмников.

Вышеприведённое описание кривых матричных фотоприёмников является качественной оценкой. Поэтому был предложен метод количественной оценки, основанный на преобразованиях Фурье. Важно отметить переход при анализе спектральных характеристик от частоты во временной диапазон, так как особенностью видимого диапазона света является очень высокая частота колебаний. Например, длине волны  $\lambda = 600$  нм соответствует период колебаний  $T = 2$  фс, т. е. он находится в фемтосекундном диапазоне времени. Непосредственное измерение таких процессов в настоящее время не представляется возможным. Обычно используется косвенный метод определения временных характеристик. Вначале в результате прямых измерений находится спектр сигнала по шкале длин волн или энергии. Свойства исследуемого процесса во временной и частотной областях находятся путём вычислений по известным формулам, в которые входят результаты прямых измерений. В данной работе для исследования матричных фотоприёмников в видимом диапазоне света применяется прямое и обратное преобразования Фурье.

Цель предлагаемой работы состоит в сравнении спектральной чувствительности матричных фотоприёмников различного типа со спектральной чувствительностью зрительной системы человека как эталона в частотной и временной областях и решении следующих задач.

1. Исследовать спектральную чувствительность глаза человека и матричных фотоприёмников в частотной области.
2. Произвести расчёт импульсных (временных) характеристик глаза человека и матричных фотоприёмников.
3. Выявить влияние электрон-фононного взаимодействия в исследуемых устройствах.
4. Сравнить по степени колебательности спектры матричных фотоприёмников и чувствительности глаза человека.
5. Установить коэффициент демпфирования спектров исследуемых объектов.

Данный вопрос ранее практически не рассматривался. Между тем его решение имеет большое научное и практическое значение. Это позволит провести более глубокий анализ матричных фотоприёмников до стадии внедрения в цифровые устройства и улучшить их качество. Обработка исследуемых спектральных характеристик проведена в программе Origin.

**Спектральная чувствительность глаза человека в частотной области.** Зависимость функции относительной спектральной чувствительности глаза человека от длины волны приведена на рис. 1, *a* [7]. Анализ данных проводился по шкале энергии:  $E = hc/\lambda_{\max}$ , где  $hc = 1240$  эВ·нм,  $h$  — постоянная Планка,  $c$  — скорость света,  $\lambda_{\max} = 720$  нм — наибольшее значение длины волны ( $E$  в эВ). Спектральные кривые по шкале энергии и шкале частот приведены на рис. 1, *b*. Начальное значение шкалы энергии определялось из соотношения  $E_0 = (1240/720) = 1,72$  эВ. Частоту находили следующим образом:

1. Из шкалы энергии  $E$  вычитали энергию  $E_0$ , в результате получалась шкала локальной энергии  $E - E_0$ .

2. Учитывали переход от энергии  $E$  к энергии  $E = E_0$  с помощью коэффициента  $m = E_{\pi}/(E_{\pi} - E_0)$ , где  $E_{\pi}$  — энергия, соответствующая пику спектральной кривой.

3. Находили соотношение для расчёта частоты  $f = m\nu$ , где  $\nu = (E - E_0)/h$ . Здесь  $h = 4,1 \cdot 10^{-15}$  эВ — постоянная Планка [8].

4. Окончательно находили  $f = (m/4,1)(E - E_0) \cdot 10^{15}$  Гц. В расчёте за единицу частоты принималась величина  $10^{15}$  Гц. В нашем случае  $m = 4,87$ . Кривая  $\theta$  спектральной чувствительности (см. рис. 1, *b*) имеет сложную форму. Поэтому её разлагали с помощью программы Origin на элементарные составляющие в форме кривой Гаусса.

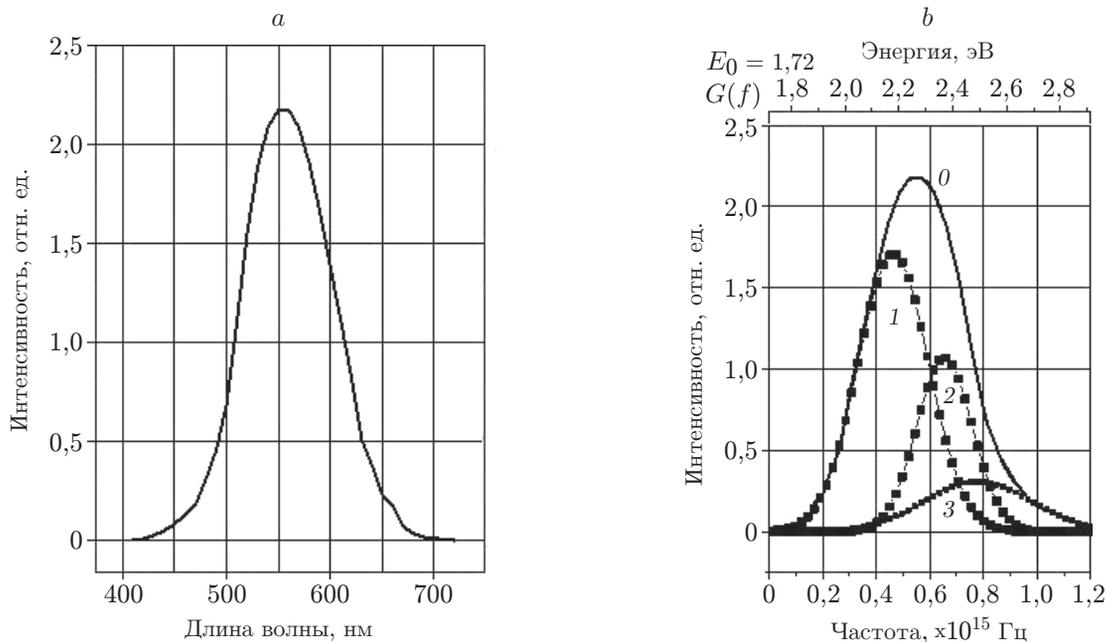


Рис. 1. Спектральная чувствительность глаза человека (яркий цвет):  
*a* — по длине волны; *b* — по частоте

Таблица 1

Параметры полос спектральной чувствительности глаза человека

Номер пика	Частота пика, $\times 10^{15}$ Гц	Ширина пика, $\times 10^{15}$ Гц	Весовой коэффициент	Амплитуда пика, отн. ед.	Показатель ( $\mu$ )
1	0,472	0,329	0,566	1,7	0,7
2	0,661	0,235	0,279	1,06	0,35
3	0,778	0,470	0,154	0,30	0,6

Дифференциальная функция распределения элементарной кривой Гаусса описывается уравнением

$$G_0(f) = A \exp\left(-2,8\left(\frac{f - f_0}{\Delta f}\right)^2\right), \quad (1)$$

где  $A$  — амплитуда кривой Гаусса,  $f_0$  — частота пика,  $\Delta f$  — ширина на его полувысоте.

При этом площадь, ограниченная спектральной кривой 0 (см. рис. 1, *b*), по величине равна единице. На рис. 1, *b* можно видеть, что в частотной области спектральная кривая 0 состоит из трёх перекрывающихся друг с другом элементарных полос: 1 — красные (R), 2 — зелёные (G) и 3 — синие (B) спектры. Их параметры приведены в табл. 1. Для фемтосекундного диапазона времени представляет большой интерес показатель широкополосности [9]. Его значение определялось из соотношения

$$\mu = \frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{(f_{\max} + f_{\min})/2}, \quad (2)$$

где  $f_0$ ,  $f_{\min}$  и  $f_{\max}$  — средняя, минимальная и максимальная частоты энергетического спектра соответственно;  $\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$  — ширина полосы частот сигнала на его полувысоте.

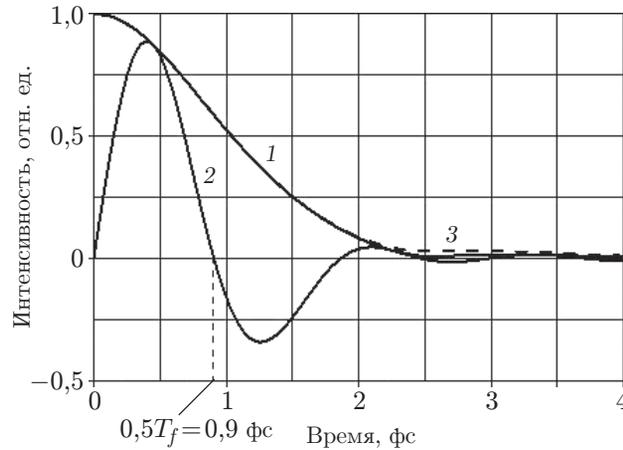


Рис. 2. Временные характеристики комплексного спектра глаза человека:  
1 — модуля; 2 — мнимой компоненты, 3 — расчётного значения

Сигналы с  $0,2 \leq \mu \leq 2$  называют сверхширокополосными (СШП — UWB, Ultra Wideband) сигналами. При этом СШП-сигналы с  $\mu = 2$  относятся к видеосигналам:  $0,1 \leq \mu \leq 0,2$  — широкополосным и  $\mu \leq 0,001$  — узкополосным [9]. Таким образом, СШП-сигналы занимают особое место среди других сигналов. Их форма колебаний во времени имеет нелинейный характер. Экспериментальные данные, представленные в табл. 1, показывают, что в данном случае  $\mu = 0,35-0,6$ , и следовательно, элементарные компоненты спектральной чувствительности обладают СШП-свойствами.

Комплексную импульсную (временную) характеристику находили по формуле обратного преобразования Фурье:

$$g^*(t) = \int_0^{\infty} G(f)e^{-2\pi jft} df, \quad (3)$$

где  $G(f)$  — дифференциальная функция распределения спектральной чувствительности глаза человека (кривая 0, см. рис. 1, б). Решение интеграла (3) выполнено численным методом. На рис. 2 видно, что затухание светового колебания происходит практически за один период  $T_k = 1,8$  фс.

Импульсную характеристику можно получить аналитическим путём, используя спектральные компоненты 1, 2 и 3, изображённые на рис. 1, б в форме элементарных кривых Гаусса. Суть в том, что, если импульсная характеристика описывается элементарной кривой Гаусса 1, интеграл 3 имеет аналитическое решение [10]:

$$g_0^*(t) = Ce^{-at^2 + j2\pi ft}. \quad (4)$$

Модуль находится как

$$g_0(t) = Ce^{-\alpha t^2}, \quad (5)$$

где  $C$  — площадь, ограниченная кривой Гаусса,

$$\alpha = 3,5 \Delta f^2. \quad (6)$$

Таким образом, для каждого из пиков 1, 2 и 3 соответственно можно по аналогии с (4) записать следующие комплексные соотношения:

$$g_1^*(t) = C_1 e^{-\alpha_1 t^2 + j2\pi f_1 t}, \quad g_2^*(t) = C_2 e^{-\alpha_2 t^2 + j2\pi f_2 t}, \quad g_3^*(t) = C_3 e^{-\alpha_3 t^2 + j2\pi f_3 t}, \quad (7)$$

где коэффициенты  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  находятся из соотношения (6), принимая ширину пика равной  $\Delta f_1, \Delta f_2$  и  $\Delta f_3$  соответственно. Параметры  $C_1, C_2$  и  $C_3$  — весовые коэффициенты, значения которых указаны в табл. 1, причём всегда  $C_1 + C_2 + C_3 = 1$ ;  $f_1, f_2, f_3$  — пиковые частоты кривых 1, 2, 3 (см. рис. 1, b).

Так как импульсные характеристики, соответствующие пикам 1, 2 и 3, являются векторными величинами (7), можно записать их векторную сумму в следующем виде:

$$\mathbf{g}^* = \mathbf{g}_1^* + \mathbf{g}_2^* + \mathbf{g}_3^*. \quad (8)$$

Из соотношения (8) находим модуль  $g(t)$  в виде

$$g(t) = \sqrt{\Delta P_s + \Delta P_r}, \quad (9)$$

где

$$\Delta P_s = g_1^2 + g_2^2 + g_3^2 \quad (10)$$

— мгновенная мощность сигналов;

$$\Delta P_r = 2g_1g_2 \cos(2\pi(f_1 - f_2)t) + 2g_1g_3 \cos(2\pi(f_1 - f_3)t) + 2g_2g_3 \cos(2\pi(f_2 - f_3)t) \quad (11)$$

— функция взаимодействия сигналов между собой.

Из соотношений (6), (7), (9)–(11) с использованием данных, указанных в табл. 1, получена расчётная зависимость модуля  $g(t)$  от времени. Её график приведён на рис. 2 в виде пунктирной кривой 3. Здесь же показана кривая 1, полученная в результате численного решения обратного преобразования Фурье при использовании спектральной кривой в форме огибающей линии 0 (см. рис. 1, b). Из сравнения результатов расчётов следует их хорошее совпадение.

**Спектральная чувствительность матричных фотоприёмников в частотной области.** Спектры чувствительности различных по типу матричных фотоприёмников в частотной области представлены на рис. 3, a—d. Спектры получены путём перехода от длин волн к частоте (в диапазоне 380–770 нм) по вышеописанной методике. В данном случае начальная энергия  $E_0 = 1,61$  эВ ( $1240/\lambda_{\max}$ ), где  $\lambda_{\max}$  — наибольшее значение длины волны.

Жирными точками на рис. 3 показаны экспериментальные значения спектральных кривых. Из сопоставления спектров матричных фотоприёмников можно видеть, что они по форме огибающих заметно отличаются друг от друга. Огибающие содержат все признаки компонентного состава. Для разложения огибающей кривой спектра на элементарные составляющие (1, 2, 3) использовалась аналитическая функция (1). Параметры спектров представлены в табл. 2. Характерно, что спектры матричных фотоприёмников так же, как и зрительной системы человека, обладают СШП-свойствами. У них показатель широкполосности меняется от 0,33 до 0,66.

Сравнительный анализ различных матричных фотоприёмников по спектральной чувствительности был выполнен во временной области. Для этого использовалась известная дифференциальная функция распределения  $G(f)$  (см. рис. 3, a—d). Она может быть представлена в виде огибающей 0. Здесь временная зависимость находится путём численного решения интеграла (3). Решение данной задачи можно выполнить также с помощью вышеизложенной расчётной модели. В этом случае проще объяснить процессы релаксации импульсной характеристики во времени. Из соотношений (6), (7), (9)–(11) с использованием данных табл. 2 получены графические зависимости  $g(t)$ , представленные на рис. 4.

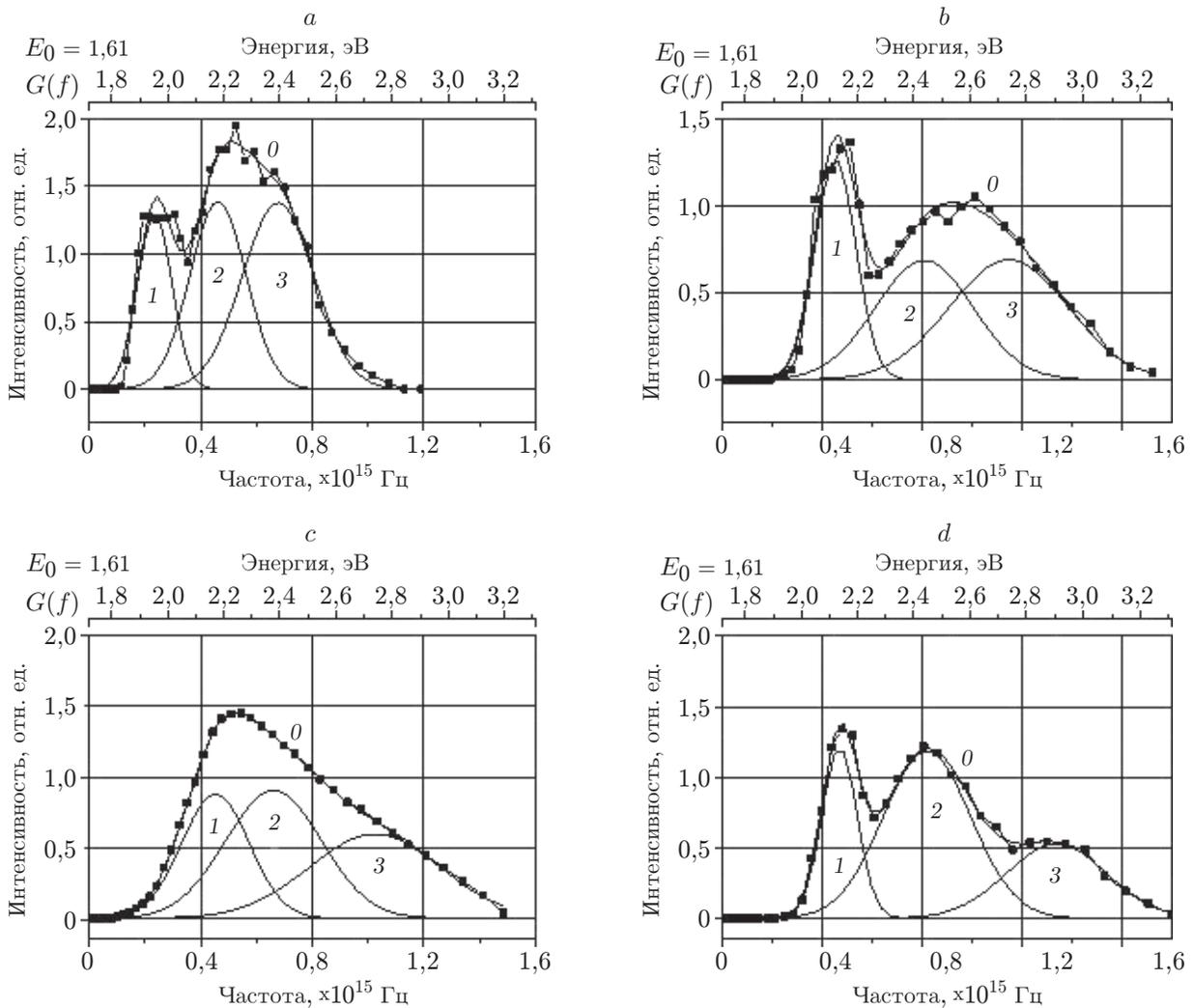


Рис. 3. Спектры чувствительности разных по типу фотоприёмников: *a* — Agilent; *b* — Foveon X3; *c* — Sony; *d* — Kodak (жирные точки соответствуют экспериментальным значениям, тонкими линиями показаны огибающая кривая 0 и компоненты спектра 1, 2, 3)

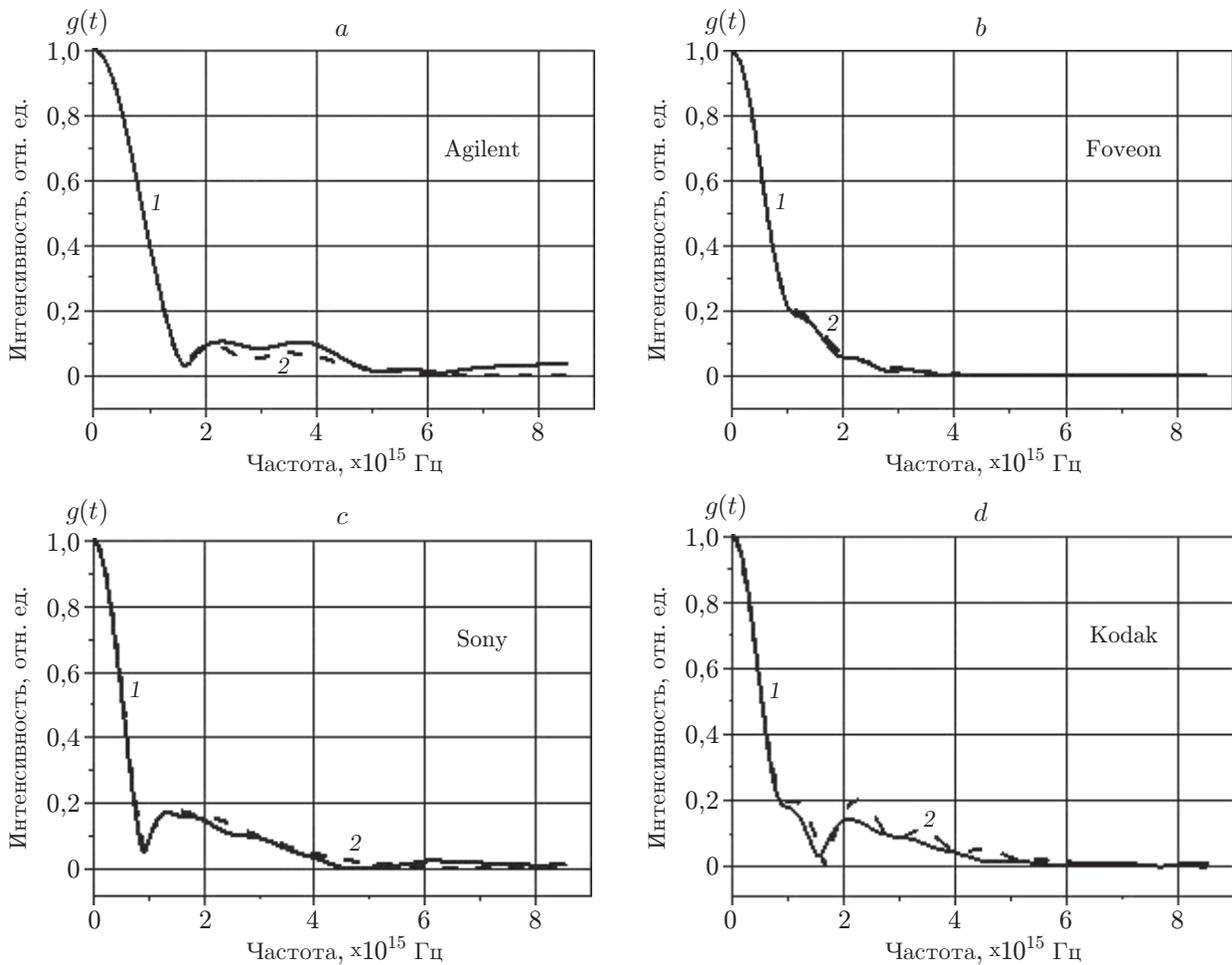
Сравнение численного и аналитического решений показывает их хорошее совпадение. Процесс релаксации импульсной характеристики во времени помимо быстрой стадии 1 имеет медленную стадию затухания 2. За счёт неё происходит заметное увеличение длительности  $g(t)$ . Оценка на уровне 0,03 от амплитуды, равной единице, показывает, что в зависимости от типа матричного фотоприёмника (см. рис. 3) по сравнению с быстрой стадией длительность затухания возрастает в 2,5–5 раз. Последнее создаёт мешающий фон и является дополнительным источником шумов исследуемых матричных фотоприёмников даже при ярком свете.

**Анализ функции взаимодействия спектров.** Для объяснения происхождения этого явления был выполнен анализ соотношений (9)–(11). Соотношение (10) описывает мгновенную мощность сигналов. По величине оно всегда имеет положительное значение. Тогда как выражение (11) описывает функцию взаимодействия сигналов между собой, которая может принимать как положительное, так и отрицательное значение. В качестве примера на рис. 5 приведена функция взаимодействия  $\Delta P_r$  (кривая 1) для матричного фотоприём-

Таблица 2

**Параметры спектральных компонент фотоприёмников различного типа**

Тип приёмника	Номер пика	Частота пика, $\times 10^{15}$ Гц	Ширина пика, $\times 10^{15}$ Гц	Весовой коэффициент	Показатель ( $\mu$ )
Foveon 3X	1	0,454	0,277	0,267	0,60
	2	0,655	0,403	0,390	0,60
	3	1,03	0,554	0,342	0,54
Sony	1	0,467	0,175	0,259	0,37
	2	0,818	0,467	0,336	0,57
	3	1,139	0,555	0,410	0,48
Agilent	1	0,242	0,161	0,200	0,66
	2	0,464	0,242	0,352	0,50
	3	0,686	0,302	0,448	0,44
Kodak	1	0,488	0,150	0,214	0,30
	2	0,826	0,412	0,522	0,50
	3	1,351	0,450	0,263	0,33



*Рис. 4.* Импульсные (временные) характеристики разного типа матричных фотоприёмников: *a* — Agilent; *b* — Foveon X3; *c* — Sony; *d* — Kodak (1 — быстрая стадия затухания, 2 — медленная стадия затухания)

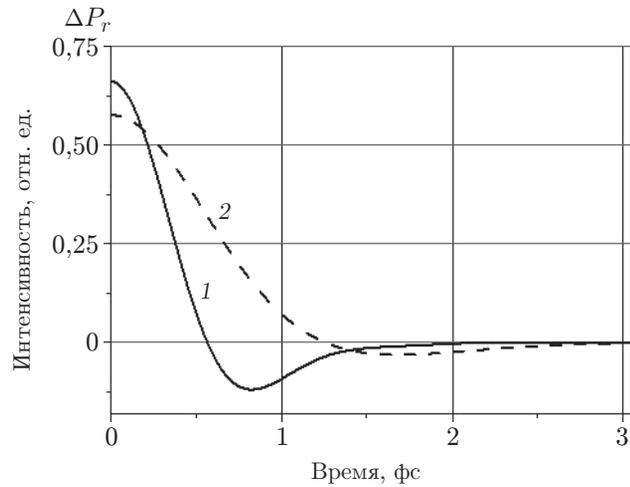


Рис. 5. Графики функций взаимодействия сигналов фотоприёмников: 1 — глаз человека, 2 — Sony

ника Sony. Расчёт выполнен по формуле (11) с использованием данных табл. 2.

Кривая функции взаимодействия 1 принимает как положительное, так и отрицательное значение. Последнее приводит к тому, что среднее значение мгновенной мощности функции взаимодействия уменьшается по величине [10, 11]. Как показало исследование, подобные зависимости имеют также и другие фотоприёмники (Agilent, Kodak, Foveon X3). Между тем функция взаимодействия сигналов зрительной системы человека имеет весьма малую величину (кривая 2, рис. 5). Из физических соображений существование функции взаимодействия можно объяснить электрон-фононным взаимодействием, которое приводит к переносу энергии между разными типами примесных центров полупроводника. Электрон-фононное взаимодействие отражает взаимодействие носителей заряда (электронов или дырок) с тепловыми колебаниями кристаллической решётки полупроводника (фононами). Отсюда следует, что медленная стадия релаксации (кривая 2, рис. 4, а) отражает инерционные свойства кристаллической решётки полупроводника и иллюстрирует предельные возможности полупроводника по быстродействию.

При выявлении особенностей функций взаимодействия матричных фотоприёмников и глаза человека использовалась геометрическая интерпретация этих явлений, для чего применялся фазовый портрет импульсной характеристики [12]. Вначале находилась скорость изменения импульсной характеристики  $V = -dg(t)/dt$ , затем строился график зависимости  $V = f(g(t))$ .

Фазовый портрет импульсной характеристики фотоприёмника Sony 1 приведён на рис. 6. Форму, подобную кривой 1, имеют и другие фотоприёмники (Agilent, Kodak, Foveon X3). Для глаза человека фазовая траектория плавно нарастает при уменьшении функции:  $g(t)$  от 1 до 0,66 достигает максимального значения  $V_{m2}$ , затем плавно уменьшается по величине практически до нулевого значения. С позиции теории колебаний таким свойством обладают демпфированные колебательные устройства [13]. Демпфер представляет собой устройство для гашения (демпфирования) или предотвращения колебаний, возникающих в приборах при их работе. Важным свойством демпфера является уменьшение добротности той колебательной системы, к которой он подключён. Для матричных фотоприёмников фазовая траектория также плавно нарастает с уменьшением функции:  $g(t)$  от 1 до 0,45 достигает максимального значения  $V_{m1}$ , которое превышает по величине скорость  $V_{m2}$  примерно в 2,2 раза. При дальнейшем уменьшении  $g(t)$  фазовая траектория кривой 1 вблизи начала координат образует петлю, т. е. здесь имеет место колебательный процесс.

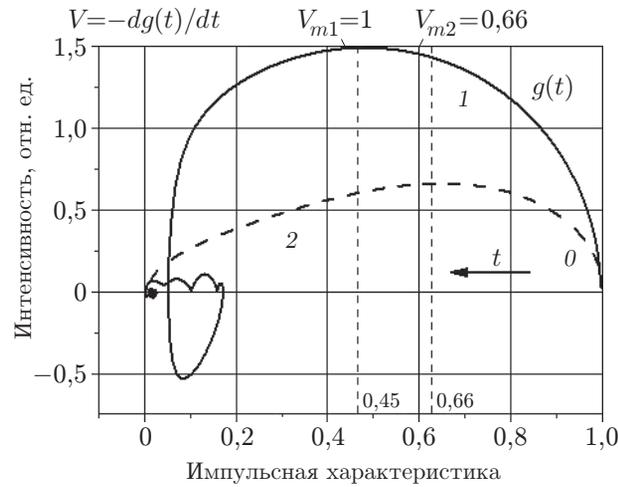


Рис. 6. Фазовые портреты импульсной характеристики фотоприёмников:  
1 — глаз человека, 2 — Sony

Из этого можно сделать вывод, что матричные фотоприёмники имеют колебательную систему с недостаточной степенью демпфирования.

**Амплитудно-частотные характеристики фотоприёмников.** Для оценки степени колебательности фотоприёмников воспользуемся понятием затухания контура, который является количественной характеристикой колебательной системы. Для этого было применено прямое преобразование Фурье [9]:

$$W^*(f) = \int_0^{\infty} g(t) e^{-2\pi jft} dt. \quad (12)$$

Комплексная функция  $W^*(f)$  содержит вещественную  $a$  и мнимую  $b$  части:

$$W^*(f) = a + jb. \quad (13)$$

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) находится из соотношения

$$W^*(f) = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad (14)$$

а коэффициент затухания  $\delta$  — из соотношения [13]

$$\delta \simeq 2 \Delta f_{0,7} / f_r, \quad (15)$$

где  $\Delta f_{0,7}$  — ширина АЧХ на уровне 0,7 от амплитудного значения;  $f_r = 1/T_r$  — резонансная частота колебаний.

Графики АЧХ для глаза человека 1 и фотоприёмника Sony 2 приведены на рис. 7. Кривая 1 описывается монотонно спадающей с ростом частоты функцией, тогда как кривая 2 с ростом частоты спадает неравномерно. Последнее характерно и для других фотоприёмников (Agilent, Kodak, Foveon X3). Основные параметры фотоприёмников представлены в табл. 3. Результаты расчёта показывают, что затухание контура в наибольшей степени имеет место в зрительной системе человека ( $\delta = 0,83$ ). Для оценки колебательности вместо затухания употребляют обратную величину — добротность контура  $Q = 1/\delta$ , которая показывает, насколько напряжение на конденсаторе или индуктивности по величине

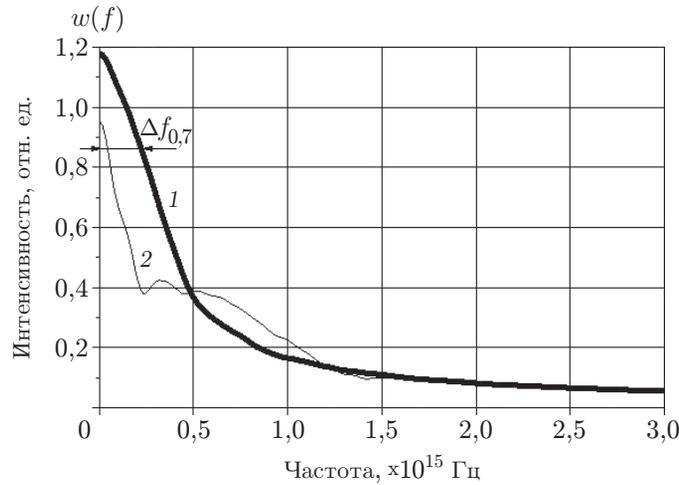


Рис. 7. Амплитудно-частотные характеристики фотоприёмников: 1 — глаз человека, 2 — Sony

Таблица 3

Основные частотные характеристики фотоприёмников

Тип приёмника	Ширина АЧХ, $\times 10^{15}$ Гц	Частота резонанса $f_r$ , $\times 10^{15}$ Гц	Затухание контура ( $\delta$ )	Добротность ( $Q$ )	Декремент затухания ( $\beta$ )
Глаз	0,23	0,55	0,83	1,20	3,40
Agilent	0,08	0,52	0,30	3,33	10,35
Kodak	0,10	0,83	0,24	4,16	13,00
Sony	0,10	0,83	0,24	4,16	13,00
Foveon	0,23	0,71	0,64	1,56	4,64

превышает амплитуду напряжения на входе колебательного контура. Для глаза человека добротность имеет небольшую величину ( $Q \approx 1,2$ ), здесь превышение напряжения составляет всего  $\sim 20\%$ . Количественной характеристикой быстроты затухания колебаний является декремент затухания  $\beta$ . Он в линейной системе характеризует число периодов  $T$ , в течение которых происходит затухание колебаний. Декремент затухания связан с добротностью соотношением [14, 15]

$$\beta = \pi \sqrt{Q^2 - 1/4}. \quad (16)$$

В данном случае  $\beta = 3,4$ . С увеличением добротности  $\beta$  возрастает, например, фотоприёмники Kodak и Sony имеют  $\beta = 13$ , в то же время Foveon X3 имеет  $\beta = 4,64$  и по этой величине приближается к зрительной системе человека. В целом матричные фотоприёмники по характеристикам затухания колебательного контура заметно уступают зрительной системе человека.

**Энергетические потери фотоприёмников.** Далее выполнялся анализ исследуемых устройств по величине энергетических потерь. Энергию сигнала определяли с помощью равенства Парсевала [8]

$$E = \int_0^{\infty} g^2(t) dt. \quad (17)$$

Таблица 4

## Энергетические параметры глаза человека и матричных фотоприёмников

Тип приёмника	Энергия потерь, эВ			КПД ( $\eta$ )	Коэффициент демпфирования ( $\zeta$ )
	$E$	$E_s$	$E_r$		
Глаз	0,78	0,45	0,33	0,57	1,36
Agilent	0,68	0,48	0,20	0,70	2,40
Kodak	0,44	0,37	0,07	0,84	5,28
Sony	0,46	0,31	0,15	0,67	2,00
Foveon	0,50	0,28	0,22	0,56	1,27

С учётом соотношения (9) выражение (17) запишем в следующем виде:

$$E = E_s + E_r, \quad (18)$$

где

$$E_s = \int_0^{\infty} \Delta P_s dt \quad (19)$$

— положительные потери, связанные с затратами электромагнитного излучения на образование неравновесных носителей заряда в полупроводниковом материале;

$$E_r = \int_0^{\infty} \Delta P_r dt \quad (20)$$

— безвозвратные потери энергии, обусловленные нагревом кристаллической решётки полупроводника.

Решение интегралов (19), (20) выполнено численным методом с использованием формул (7), (9) и (11) и данных табл. 2. Результаты расчёта приведены в табл. 4. Из сравнения данных (см. табл. 4) можно видеть, что глаз человека имеет наибольшее значение энергии потерь, равное  $\sim 0,78$  эВ, и связано это с большей величиной тепловых потерь  $E_r = 0,33$  эВ. Численные значения КПД, представленные в таблице, рассчитаны по формуле  $\eta = E_s/E$ . Коэффициент демпфирования  $\zeta$  определяет степень согласованности сопротивления нагрузки с внутренним сопротивлением источника сигнала. Для нахождения коэффициента  $\zeta$  введём понятие фиктивных сопротивлений, которые отражают потери энергии на генерацию носителей заряда в полупроводнике  $R_s$  и рассеяние энергии в решётке материала в виде тепла  $R_r$ . Их значения полагали пропорциональными энергиям  $E_s$  и  $E_r$  соответственно. При этом внутренним сопротивлением источника сигнала являлось сопротивление  $R_r$  с нагрузкой  $R_s$ . Следовательно,  $\zeta = R_s/R_r$ . Результаты расчёта по этой формуле представлены в табл. 4. Анализ данных показывает, что все исследованные устройства имеют коэффициент  $\zeta > 1$ . Из них наименьшее значение коэффициента  $\zeta$  у фотоприёмника Foveon X3 (1,27) и глаза человека (1,36).

Известно, что оптимальным вариантом является случай, когда внутреннее сопротивление источника сигнала равно сопротивлению нагрузки. В такой ситуации  $\zeta = 1$ , а КПД составляет 50 %. Здесь надо иметь в виду, что в слаботочной электронике главная задача состоит в осуществлении оптимальных условий, заключающихся в получении согласованной нагрузки, особенно когда речь идёт о передаче сигналов очень высоких частот по

линии передачи с распределёнными параметрами, поэтому экономическое значение КПД уходит на задний план. Таким образом, режим согласованной нагрузки в рассмотренных устройствах в полной мере не выполняется.

**Заключение.** В результате теоретических, эмпирических и количественных методов исследования цель достигнута и задачи выполнены.

1. Выполнено исследование спектральной чувствительности глаза человека и матричных фотоприёмников в частотной области. Спектры разлагались на три элементарные полосы в форме кривых Гаусса, соответствующих красному, зелёному и синему цветам. Были использованы основные положения Фурье-преобразований.

2. Получены аналитические соотношения, с помощью которых выполнен расчёт импульсных (временных) характеристик исследованных устройств. Установлено, что во временной и частотной областях свойства глаза человека и матричных фотоприёмников заметно отличаются друг от друга.

3. Обнаружено сильное влияние электрон-фононного взаимодействия в полупроводнике Geveon X3 на образование шумов в матричных фотоприёмниках. У глаза человека это явление выражено значительно меньше.

4. Выявлено, что по степени колебательности обычные матричные фотоприёмники заметно уступают глазу человека.

5. Установлено, что все исследованные устройства имеют коэффициент демпфирования более единицы. Из них наименьшее значение коэффициента  $\zeta$  имеют фотоприёмник Geveon X3 (1,27) и глаз человека (1,36), режим согласованной нагрузки ( $\zeta = 1$ ) в рассмотренных устройствах в полной мере не выполняется.

Полученные результаты позволяют иначе посмотреть на анализ спектральных характеристик матричных фотоприёмников и понять, что основой разработки могут быть не только максимумы кривых трёх основных каналов по цвету, но и такие параметры, как временная и частотная области, импульсная характеристика, колебательность и коэффициент демпфирования. Приведённый метод оценки спектральных характеристик может помочь получить качественный сравнительный анализ цифровых систем цветного изображения относительно человеческого глаза, что позволит понять их недостатки и в дальнейшем улучшить компьютерное зрение.

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 21-79-00012).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варламова А. А., Кузнецов А. В. Обнаружение встраивания на изображениях путём анализа артефактов, обусловленных параметрами сенсора регистрирующего устройства // Компьютерная оптика. 2017. **41**, № 6. С. 920–930.
2. Bayram S., Sencar H., Memon N., Avcibas I. Source camera identification based on CFA interpolation // IEEE International Conference on Image Processing. 2005. **3**. P. 63–72. DOI: 10.1109/ICIP.2005.1530330.
3. Solomatin V. A., Parvulyusov Yu. B., Zhbanova V. L. Spatial-frequency characteristics of photo matrices for colour image // Journ. Phys.: Conf. Ser. 2020. **1679**. 022038. P. 1–6. DOI: 10.1088/1742-6596/1679/2/022038.
4. Zhbanova V. L., Parvulyusov Yu. B., Solomatin V. A. Multispectral matrix silicon photodetectors with the IR range registration // Journ. Phys.: Conf. Ser. 2020. **1679**. 022039. P. 1–6. DOI: 10.1088/1742-6596/1679/2/022039.
5. Lyon R. F., Hubel P. M. Eyeing the Camera: Into the Next Century // IS&T Reporter «The window on imaging». 2002. **17**, N 6. P. 1–6.

6. **Зиенко С. И., Жбанова В. Л.** Фурье-анализ спектральных характеристик матричного фотоприёмника в частотной и временной области // Прикладная физика. 2021. № 3. С. 39–46. DOI: 10.33383/2021-028.
7. **Мешков В. В., Матвеев А. Б.** Основы светотехники. М.: Энергоатомиздат, 1989. 432 с.
8. **Зиенко С. И.** Определение происхождения алмазов по спектрам люминесценции // Успехи прикладной физики. 2018. 6, № 4. С. 297.
9. **Лазоренко О. В., Черногор Л. В.** Сверхширокополосные сигналы и физические процессы. 1. Основные понятия, модели и методы описания // Радиофизика и радиоастрономия. 2008. 13, № 2. С. 166.
10. **Зельдович Я. Б., Мышкис А. Л.** Элементы прикладной математики. М.: Наука, 1972. 512 с.
11. **Гросс Е. Ф., Пермогоров С. А., Разбирин Б. С.** Аннигиляция экситонов и экситон-фононное взаимодействие // Успехи физических наук. 1971. 103. Вып. 3. С. 431–446.
12. **Андронов А. А., Витт А. А., Хайкин С. Э.** Теория колебаний. М.: Наука, 1981. 914 с.
13. **Островский Л. А.** Основы общей теории электроизмерительных устройств. Л.: Энергия, 1971. 544 с.
14. **Гоноровский И. С.** Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь, 1986. 592 с.
15. **Френкс Л.** Теория сигналов /Под ред. Д. Е. Вакмана. М.: Сов. радио, 1974. 343 с.

*Поступила в редакцию 06.12.2021*

*После доработки 24.01.2022*

*Принята к публикации 11.03.2022*

---