

УДК 621.315.592

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК И ПАРАМЕТРОВ ТИПИЧНЫХ ФОТОМАТЕРИАЛОВ И ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ПАМЯТИ

В. А. Борщак, А. П. Балабан

Одесский национальный университет имени И.И.Мечникова,
ул. Дворянская, 2, 65082, Одесса, Украина, E-mail: ndl_lepikh@onu.edu.ua

Аннотация

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК И ПАРАМЕТРОВ ТИПИЧНЫХ ФОТОМАТЕРИАЛОВ И ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ПАМЯТИ

В. А. Борщак, А. П. Балабан

Проведено исследование фотоэлектрических характеристик элементов памяти на основе неидеального гетероперехода. Применение понятий сенситометрии к твердотельным элементам памяти позволило получить универсальное выражение для характеристической кривой сенсора, которое хорошо согласуется с экспериментальными данными и может быть использовано при исследовании сенситометрических характеристик подобных приборов. Сделан вывод о том, что сенсор на основе неидеального гетероперехода можно охарактеризовать с помощью классических сенситометрических характеристик, разработанных для фотографических материалов.

Ключевые слова: гетеропереход, сенситометрия, элемент памяти, сенсор изображения, фотоматериалы

Анотація

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК І ПАРАМЕТРІВ ТИПОВИХ ФОТОМАТЕРІАЛІВ І ТВЕРДОТІЛЬНОГО ЕЛЕМЕНТУ ПАМ'ЯТІ

В. А. Борщак, А. П. Балабан

Проведено дослідження фотоелектричних характеристик елементів пам'яті на основі неідеального гетеропереходу. Застосування понять сенситометрії до твердотільних елементів пам'яті дозволило одержати універсальний вираз для характеристичної кривої сенсора, який добре погоджується з експериментальними даними і може бути використаний при дослідженні сенситометричних характеристик подібних приладів. Зроблено висновок, що сенсор на основі неідеального гетеропереходу можна охарактеризувати за допомогою класичних сенситометричних характеристик, які розроблені для фотографічних матеріалів.

Ключові слова: гетероперехід, сенситометрія, елемент пам'яті, сенсор зображення, фотоматеріали

Abstract

THE TYPICAL PHOTOGRAPHIC MATERIALS AND THE SOLID-STATE MEMORY ELEMENT CHARACTERISTICS AND PARAMETERS COMPARATIVE ANALYSIS

V.A. Borshchak, A.P. Balaban.

The memory elements on the basis of nonideal heterojunction photoelectric characteristics have been researched. The sensitometry concepts application to the solid-state memory elements has allowed receiving universal expression for a sensor characteristic curve which coordinate well with the experimental data and can be used at similar devices sensitometric characteristics research. The conclusion that the sensor on the basis of nonideal heterojunction can be characterized with the help of classical sensitometric characteristics developed for photographic materials is made.

Keywords: heterojunction, sensitometry, memory element, image sensor, photographic materials

Исследования процессов токопереноса в неидеальных гетероструктурах позволили разработать твердотельный элемент памяти, обладающий такими свойствами, как высокая чувствительность, возможность накопления и хранения сигнала, возможность повторного считывания информации [1]. Применение таких элементов в качестве сенсоров изображения на основе неидеальной гетероструктуры перспективно в различных областях медицины, при астрономических и лабораторных исследованиях.

Эффект накопления и длительного хранения информации сенсорами изображения на основе неидеального гетероперехода позволяет сравнивать этот объект с фотоматериалами. Поэтому применим типичные параметры сенситометрии при описании параметров и характеристик полученного сенсора, что позволит провести его сравнение с известными фотоматериалами и облегчит его использование в прикладной области.

Сенситометрия связана с изучением фотографических свойств фотоматериалов, обладающих чувствительностью к излучениям видимой и прилегающих к ней областей спектра, а также параметров получаемых на них фотографических изображений. Одним из самых распространенных методов сенситометрии является метод построения характеристических кривых, предложенный Хертером и Дрифилдом для количественного определения характеристик фотоматериалов [2].

Фотографическое почернение сильно зависит от изменения условий освещения, и в первую очередь от величины экспозиции H :

$$H = E \cdot t, \quad (1)$$

где E — освещенность в плоскости эмульсионного слоя; t — время экспозиции.

Если облучить слой фотоматериала светом любого спектрального состава серией возрастающих экспозиций и по данным измерения проявленных почернений построить зависимость оптической плотности D от логарифма экспозиции $\lg H$, то полученная кривая, называемая характеристической, будет иметь S-образную форму (рис. 1) [2]. В пределах полученной зависимости различают несколько характерных областей:

- I — область недодержек;
- II — область пропорциональной передачи или область нормальных экспозиций;
- III — область передержек;
- IV — область соляризации или область обращения.

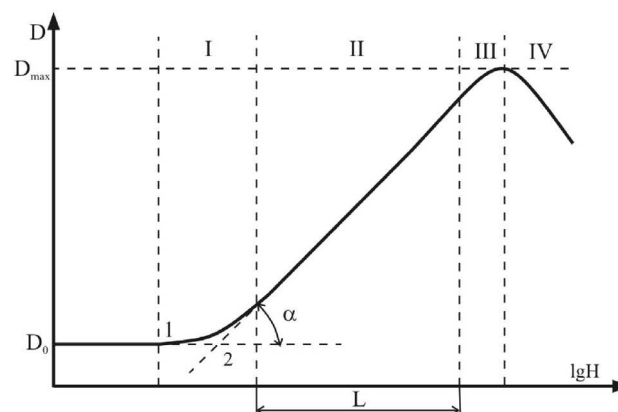


Рис. 1. Зависимость оптической плотности D от логарифма экспозиции H (Характеристическая кривая). Пояснения в тексте.

Как правило, подобную форму имеют характеристические кривые, построенные для любых фотоматериалов при различных условиях экспонирования и проявления.

Если взять две точки D_1 и D_2 в области нормальных экспозиций (II), то можно ввести коэффициент контрастности γ , который будет определять степень проявления фотографического слоя, и записать соотношение [3]:

$$\gamma = \frac{D_2 - D_1}{\lg H_2 - \lg H_1} = \frac{\Delta D}{\Delta \lg H} = \operatorname{tg} \alpha. \quad (2)$$

Отсюда следует:

$$\frac{dD}{d \lg H} = g, \quad (3)$$

где g — градиент плотности и $g_{\max} = \gamma$.

В качестве критериев для фотоматериалов используют несколько точек и параметров, которые можно выделить на характеристической кривой (рис. 1):

т. 1 — порог почернения;

т. 2 — точка инерции;

D_0 — плотность вуали;

L — фотографическая широта (представляет собой интервал экспозиций в пределах области пропорциональной передачи).

Согласно определению, фотографическая чувствительность — величина обратно пропорциональна величине экспозиции соответствующей уровню оптической плотности, превышающему плотность вуали в $10^{0.1}$ раза [4]:

$$S = \frac{1}{H_{D=0.1+D_0}}. \quad (4)$$

Применим вышеуказанные понятия, для описания сенсора на основе неидеального гетероперехода CdS-Cu₂S. В качестве аналога оптической плотности D воспользуемся десятичным логарифмом тока короткого замыкания, генерированного преобразователем.

Способ измерения характеристической кривой такого сенсора заключается в следующем. Сенсор непрерывно освещается светом с длиной волны $\lambda=520$ нм. Возрастание $j_{\text{кз}}$ со временем при определенной величине интенсивности света с $\lambda=520$ нм регистрировалось на экране осциллографа. При этом в качестве считывающего света использовался ИК — светодиод, работающий в импульсном режиме. Импульсы частотой 5 мс позволяли измерять изменение тока в образце без заметного эффекта стирания. При измерениях использовался закрытый вход осциллографа, что позволяло наблюдать реакцию сенсора непосредственно на импульс без постоянной составляющей.

С целью оценки применимости данного метода были измерены характеристические кривые неидеальной гетероструктуры CdS-Cu₂S при интенсивностях возбуждающего света: 0.05 лк, 0.1 лк и 0.5 лк. Результаты измерений в виде характеристических кривых, построенных для различных интенсивностей возбуждающего света, представлены на рисунке 2.

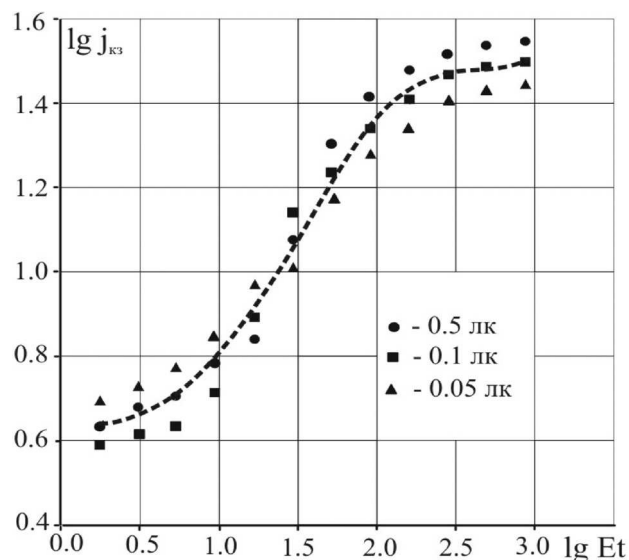


Рис. 2. Характеристические кривые неидеальной гетероструктуры CdS-Cu₂S, измеренные при различных интенсивностях света и усредненная кривая (-----)

Как видно из представленного рисунка, семейство кривых достаточно хорошо повторяет один и тот же профиль. Это говорит о том, что образец обладает свойством интегральности и по отношению к нему применимо понятие экспозиции. Из усредненной характеристической кривой (рис. 2) были определены основные сенситометрические характеристики сенсора. Коэффициент контрастности γ , равный тангенсу угла наклона прямолинейного участка, оказался равным $\gamma=0.55$, фоточувствительность S оказалась равной примерно 16 ед. ГОСТ. Полученные значения сенситометрических параметров исследуемого сенсора могут быть использованы в качестве “паспортных данных” при его практическом применении и описании.

Экспериментальные данные могут быть использованы для математического описания изложенных выше предположений. Пусть L_0 — количество световых квантов попадающих на единицу поверхности слоя CdS в единицу времени; L_1 — доля квантов дошедших до начала

ОПЗ; L_2 -доля квантов достигших металлургической границы. Тогда, воспользовавшись при описании процессов поглощения в сенсоре законом Бугера-Ламберта, получаем следующие выражения:

$$L_1 = L_0 e^{-k(d-W_0)}, \quad (5)$$

$$L_2 = L_0 e^{-kd}, \quad (6)$$

где k — коэффициент поглощения CdS;

d — толщина слоя CdS;

W_0 — темновое значение ширины ОПЗ.

Очевидно, что вклад в ток короткого замыкания $j_{кз}$ дадут поглощенные в ОПЗ фотоны, т.е.:

$$\Delta L = L_1 - L_2 = L_0 e^{-kd} (e^{kW_0} - 1). \quad (7)$$

Определяя напряженность электрического поля на гетерогранице в начальный момент времени $\mathcal{E}(0,0)$, воспользуемся тем, что она зависит лишь от суммарного заряда в приконтактной области. По теореме Остроградского-Гаусса:

$$\mathcal{E}(0,0) = \frac{qN_d W_0}{\varepsilon \varepsilon_0}, \quad (8)$$

где q — заряд электрона;

ε — диэлектрическая проницаемость CdS;

$\mathcal{E}(0,0)$ — напряженность электрического поля на гетерогранице в начальный момент времени;

N_d — объемная плотность ионизированных доноров в CdS.

Фоточувствительность в системе ГОСТ определяется в области недодержек, поэтому справедливым будет предположение о том, что за достаточно малое время t протяженность ОПЗ не успевает существенно измениться и остается приблизительно равной W_0 . Это облег-

чает определение зависимости напряженности электрического поля на металлургической границе от времени при экспонировании:

$$\mathcal{E}(0,t) = \frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0} (N_d W_0 + \Delta L t \beta), \quad (9)$$

$$\mathcal{E}(0,t) = \frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0} (N_d W_0 + L_0 t \beta e^{-kd} (e^{kW_0} - 1)), \quad (10)$$

где β — квантовый выход.

Обозначив $\chi = \frac{L_0 \beta t e^{-kd} (e^{kW_0} - 1)}{N_d W_0}$, (11)

запишем напряженность электрического поля (10) на любом этапе экспонирования следующим образом:

$$\mathcal{E}_\chi(0) = \mathcal{E}(0,0)(1 + \chi). \quad (12)$$

В представленных экспериментальных данных фигурирует освещенность E , выраженная в люксах. Следовательно, L_0 можно записать следующим образом:

$$L_0 = \frac{E}{\xi \frac{hc}{\lambda}}, \quad (13)$$

где $\frac{hc}{\lambda}$ — энергия фотона длинноволновой подсветки, ξ — световая эффективность.

Таким образом, преобразовав известное из [1] выражение для тока короткого замыкания, получаем следующее выражение применительно к используемым понятиям сенситометрии:

$$j_{кз} = j_{кз}^0 \frac{1}{1 + \frac{S_\delta}{\mu_n \mathcal{E}_\chi(0)}} \quad (14)$$

или в развернутом виде с учетом (11)–(13):

$$j_{кз} = j_{кз}^0 \left(1 + \frac{S_\delta}{\mu_n \frac{qN_d W_0}{\varepsilon \varepsilon_0} \left(1 + \frac{E \lambda \beta t e^{-kd} (e^{kW_0} - 1)}{\xi hc N_d W_0} \right)} \right)^{-1}. \quad (15)$$

Выражение (15), представленное в координатах $\lg(j_{кз})$ от $\lg(Et)$, является теоретической моделью характеристической кривой сенсора на основе неидеального гетероперехода CdS-Cu₂S.

Полученная кривая представлена на рисунке 3, где для сравнения приведена также усред-

ненная экспериментальная кривая, которая была уже показана на рис. 2.

Подбор параметров, входящих в формулу (15), для получения удовлетворительного совпадения расчетной и экспериментальной кривых дал следующие значения:

$$S_s = 1.6 \times 10^6 \frac{\text{сМ}}{\text{с}}; \mu_n = 1 \frac{\text{сМ}^2}{\text{Вс}}; \varepsilon = 10;$$

$$d = 1 \times 10^{-3} \text{ сМ}; N_d = 1 \times 10^{15} \frac{1}{\text{сМ}^3};$$

$$j_{\text{кз}}^0 = 1 \times 10^{-6} \text{ А}; W_0 = 105.131 \text{ нМ}.$$

Значение коэффициента поглощения k были взяты из [5].

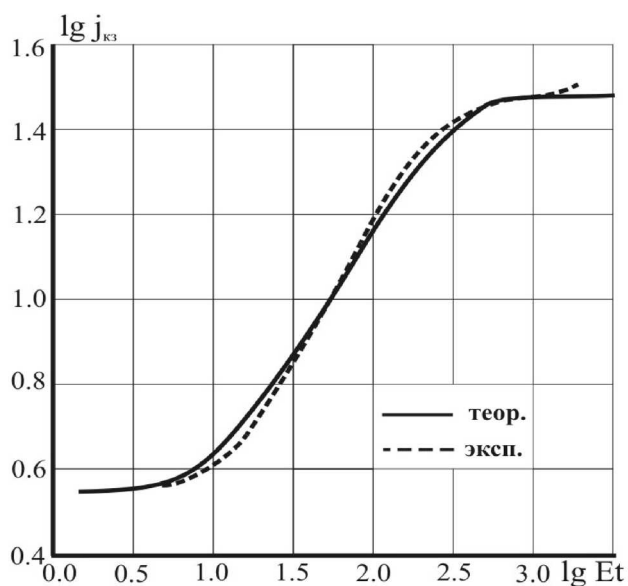


Рис. 3. Теоретическая и экспериментальная характеристические кривые элемента памяти на основе неидеального гетероперехода CdS–Cu₂S.

В результате расчета сенситометрических характеристик по полученной теоретической кривой, получили значение $\gamma=0.53$, а фоточувствительность $S=15$ ед. ГОСТ, что удовлетворительно совпадает с экспериментальными данными.

Выводы.

Анализ вышеизложенного приводит к выводу, что сенсор на основе неидеального гетероперехода можно характеризовать с помощью классических сенситометрических характеристик, разработанных для фотографических слоев. Спектральное распределение фоточувствительности [6] позволяет охарактеризовать сенсор изображения на основе неидеального гетероперехода CdS–Cu₂S как зеленочувствительный по общепринятой классификации для фотографических слоев с коэффициентом контрастности $\gamma=0.55$ и фоточувствительностью 16 единиц системы ГОСТ.

Авторы выражают благодарность проф. Смынтине В. А. и проф. Лепиху Я. И. за обсуждение результатов данной работы.

Литература.

1. V.A.Smyntyna, V.A.Borschak, M.I.Kutalova, N.P.Zatovskaya, A.P.Balaban Mechanism to restrict signal in solid-state image sensors based on non-ideal heterostructure.// T2B-P1 Proc. of EUROSENSORS XX Conf.- Geteborg.- 17-20 sept.- 2006.
2. Миз К., Джеймс Т. Теория фотографического процесса, пер. с англ.// Л., 1973.
3. М.И. Закс. Фотоматериалы и их обработка// М.: Легпромбытиздат.— 1993.— 142 с.
4. А.Л. Картужанский, Л.В. Красный. Химия и физика фотографических процессов// Ленинград: Химия.— 1983.— 171 с.
5. Баранский П.И., Клочков В.П., Потыкевич И.В. Полупроводниковая электроника: свойства материалов. //Киев: Наукова думка. — 1975.— 704 с.
6. D.L.Vassilevski. Physical principles of graphic data registration by non-ideal heterojunction.// Sensors and Actuators A 55.— 1996.— P.167-172.