

А.Н. АНДРЕЕВ, канд. физ.-мат. наук, О.Н. АНДРЕЕВА, канд. физ.-мат. наук

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНЕРЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОРЕЗИСТОРОВ В ФИЗИЧЕСКОМ ПРАКТИКУМЕ

Введение

Полупроводниковые фоторезисторы находят широкое применение в различных устройствах фотопреобразователей [1 – 4], особенно там, где необходим широкий диапазон спектральной чувствительности и/или значительная мощность рассеивания. Одной из основных характеристик, влияющей на инерционность и фоточувствительность фоторезисторов, является среднее время жизни неравновесных носителей заряда, возникающих под действием света. Определение данного параметра в требуемом диапазоне освещенностей для каждого конкретного фоторезистора необходимо при регистрации переменных световых потоков [5 – 7].

С точки зрения фундаментальной науки, экспериментальное изучение фотопроводимости позволяет студентам инженерных специальностей понять основы зонной теории и физические процессы, возникающие при взаимодействии электромагнитного излучения с полупроводником [8 – 10]. Традиционно, для исследования фотопроводимости используется осциллограф и модулированный по амплитуде световой поток, что не позволяет автоматизировать процесс измерения и требует дополнительных габаритных элементов для формирования переменного светового потока (генераторы или прерыватели). Поэтому создание современной компактной автоматизированной установки для индивидуального изучения явления фотопроводимости в физическом практикуме является актуальным.

Краткая теория фотопроводимости

При освещении собственного полупроводника фотонами с энергией не меньше ширины запрещенной зоны (или энергией ионизации примесных атомов для примесного полупроводника), его электропроводность возрастает:

$$\sigma = \sigma_0 + \Delta\sigma = e(n_0\mu_n + p_0\mu_p) + e(\Delta n\mu_n + \Delta p\mu_p), \quad (1)$$

где σ_0 – электрическая проводимость полупроводника при отсутствии освещенности (темновая электропроводность), определяется равновесной концентрацией электронов (n_0) и дырок (p_0) при данной температуре и их подвижностью μ_n, μ_p ; $\Delta\sigma$ – фотопроводимость, обусловленная генерацией неравновесных носителей концентрацией $\Delta n, \Delta p$ под действием света; e – заряд электрона.

Если интенсивность падающего излучения невелика, то концентрация неравновесных носителей заряда значительно меньше концентрации равновесных зарядов в полупроводнике ($\Delta n, \Delta p \ll n_0, p_0$). Изменение Δn в единицу времени при освещении определяется разностью скоростей генерации и рекомбинацией неравновесных носителей. Скорость генерации избыточных носителей пропорциональна числу фотонов N , падающих на полупроводник за одну секунду:

$$G = \alpha\beta N = \alpha\beta \frac{JS}{hv}, \quad (2)$$

где α – коэффициент поглощения света; β – квантовый выход; J – интенсивность света;

ν – частота света; h – постоянная Планка; S – площадь освещаемой поверхности полупроводника.

Скорость рекомбинации при низкой освещенности пропорциональна концентрации избыточных зарядов (линейная рекомбинация):

$$R = \frac{\Delta n}{\tau}, \quad (3)$$

где Δn – концентрация неравновесных носителей; τ – время жизни неравновесных носителей.

Таким образом, скорость изменения концентрации неравновесных носителей, с учетом соотношений (2) и (3), при отсутствии электрического тока будет:

$$\frac{d(\Delta n)}{dt} = G - \frac{\Delta n}{\tau}. \quad (4)$$

Решая уравнение (4) для нулевых начальных условий ($\Delta n(0) = 0$), получаем:

$$\Delta n = G\tau \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) = \Delta n_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (5)$$

где t – время после начала освещения; $\Delta n_0 = G\tau$ – стационарное значение концентрации избыточных носителей заряда (при $t \rightarrow \infty$).

При выключении источника света генерация неравновесных носителей прекращается ($G = 0$). Принимая во внимание начальные условия $\Delta n(0) = \Delta n_0$, находим частное решение уравнения (4):

$$\Delta n = \Delta n_0 e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (6)$$

Из (5) и (6) следует, что при низком уровне освещенности полупроводника ($\sigma_0 \gg \Delta\sigma$) нарастание и спад фотопроводимости определяется средним временем жизни неравновесных носителей.

Если темновое сопротивление полупроводника большое и/или интенсивность падающего излучения велика, то концентрация неравновесных носителей окажется значительно больше, чем равновесных ($\Delta n, \Delta p \gg n, p$). В этом случае рекомбинация происходит по квадратичному закону:

$$R = \gamma \Delta n^2, \quad (7)$$

где γ – коэффициент, характеризующий вероятность рекомбинации.

Решая уравнения (4) для квадратичной рекомбинации с учетом начальных условий, получим изменение концентрации неравновесных носителей:

при освещении:

$$\Delta n = \sqrt{\frac{G}{\gamma}} th(\sqrt{G\gamma}t) = \Delta n_0 th(\gamma \Delta n_0 t) = \Delta n_0 th\left(\frac{t}{\tau}\right), \quad (8)$$

при затемнении:

$$\Delta n = \frac{\sqrt{G\gamma^{-1}}}{1 + \sqrt{G\gamma}t} = \frac{\Delta n_0}{1 + t\gamma \Delta n_0} = \frac{\Delta n_0}{1 + \frac{t}{\tau}}. \quad (9)$$

При $\Delta\sigma \gg \sigma_0$ нарастание и спад Δn происходят по разным законам (гиперболический тангенс и гипербола), поэтому время нарастания и спада фотопроводимости различно. Кроме

того, среднее время жизни ($\tau = (\gamma \Delta n_0)^{-1}$) неравновесных носителей зависит от интенсивности падающего света.

Из соотношений (5) и (8), видно, что при линейной рекомбинации стационарная концентрация неравновесных носителей является линейной функцией интенсивности: $\Delta n_0 = \tau \alpha \beta JS$, а при квадратичной нелинейной – $\Delta n_0 = \sqrt{\alpha \beta \gamma^{-1} JS}$.

Экспериментальная установка

Для исследования инерционных характеристик фоторезисторов была разработана и изготовлена лабораторная установка на базе 32-разрядного микроконтроллера STM32F103VET6 (рис.1).

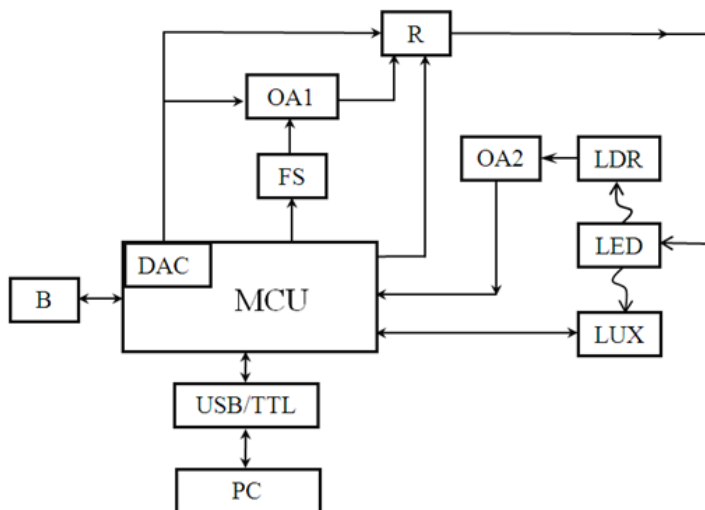


Рис. 1. Функциональная схема установки

Исследуемый фоторезистор (LDR) соединяется последовательно с сопротивлением нагрузки и источником постоянного напряжения. Сигнал, совпадающий по форме с фототоком, снимается с нагрузочного сопротивления и поступает на вход быстродействующего операционного усилителя (OA2) с регулируемым коэффициентом усиления. Регулировка коэффициента усиления OA2 выполняется микроконтроллером (MCU) путем переключения резистора в цепи обратной связи при помощи аналогового мультиплекса (на схеме не указан). Выходное

напряжение усилителя оцифровывается встроенным 12-битным аналого-цифровым преобразователем (АЦП) микроконтроллера, и полученные значения сохраняются в оперативной памяти микроконтроллера. Оцифрованные значения сигнала сохраняются в оперативной памяти микроконтроллера и затем через USB-UART преобразователь передаются на персональный компьютер (PC).

Для освещения фоторезистора в установке используется светодиод (LED) с цветовой температурой 2850 – 3000 К, на анод которого подается постоянное или переменное напряжение. Включение светодиода происходит в момент подачи с микроконтроллера цифрового сигнала низкого уровня на катод светодиода. Выбор источника питания светодиода осуществляется микроконтроллером путем переключения электромагнитного реле (R). Постоянное напряжение через буферный усилитель (на схеме не указан) поступает со встроенного 12-битного цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) микроконтроллера (DAC). Переменное синусоидальное напряжение формируется синтезатором частоты (FS) на базе микросхемы AD9833 и инвертирующим усилителем с регулируемым коэффициентом усиления (OA1). Усиление может изменяться как дискретно (аналоговый мультиплексор и набор резисторов), так и плавно (цифровой потенциометр). Смещение гармонического сигнала осуществляется вторым встроенным ЦАП микроконтроллера. Измерение освещенности фоторезистора осуществляется цифровым датчиком освещенности BH1750 (LUX), который «общается» с микроконтроллером по шине I²C.

Для сопряжения лабораторной установки со смартфоном используется блютуз модуль (B), подключенный к последовательному порту (UART) микроконтроллера. Это дает возможность проводить измерения в автономном режиме (без компьютера). Также на печатной плате установки находится разъем для подключения к микроконтроллеру Wi-Fi модуля на базе микроконтроллера ESP8266 для дистанционного режима измерений.

Измерительная установка может работать в следующих режимах: 1) определение люкс-амперной характеристики фоторезистора; 2) исследование нарастания и спада фототока при разных уровнях освещенности; 3) измерение частотной характеристики фоторезистора.

Результаты и их обсуждение

В установке светодиод одновременно освещает фоторезистор и цифровой датчик ВН1750, расположенные с противоположных сторон от светодиода, но на одинаковом расстоянии от него. Поскольку размеры рабочей поверхности цифрового датчика значительно меньше освещаемой поверхности фоторезистора, то, первоначально, были проведены измерения освещенности в области предполагаемого размещения фоторезистора. Датчик ВН1750 закреплен на подложке, которая перемещалась шаговым двигателем перпендикулярно (рис. 2, *а*) и параллельно (рис. 2, *б*) электродам светодиода (фоторезистора). В результате, вблизи максимума освещенности были установлены пространственные границы (Δx , Δy), в которых отклонение освещенности от среднего значения не превышает 5 %.

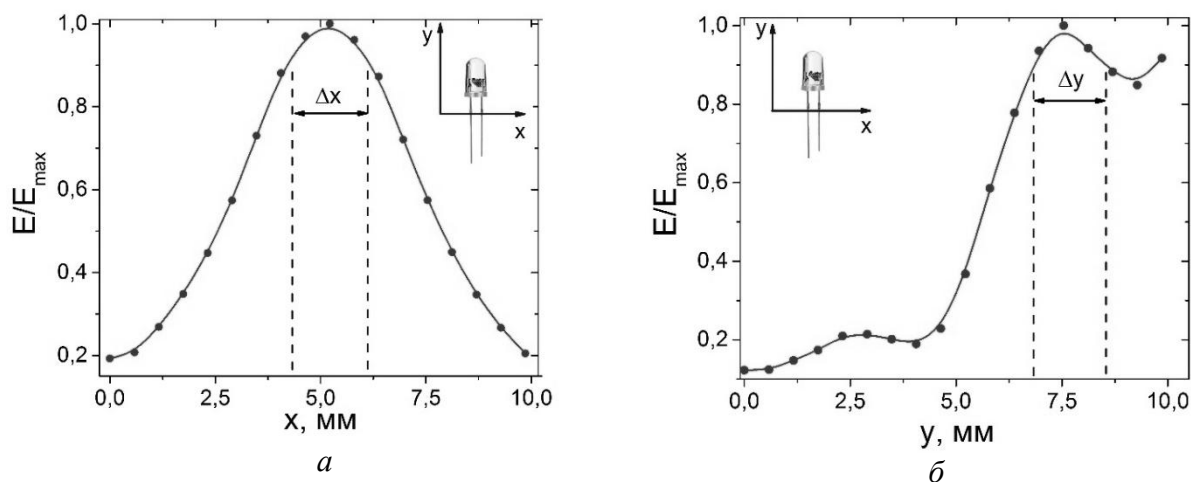


Рис. 2. Исследование диаграммы направленности светодиода: *а* - зависимость относительной освещенности при перемещении поперек электродов светодиода; *б* - зависимость относительной освещенности при перемещении вдоль электродов светодиода

Поскольку спектральные характеристики фоторезистора и датчика освещенности похожи, а диаграмма направленности светодиода симметрична относительно прямой соединяющей, фоторезистор и ВН1750, то отличие освещенности фоторезистора от значений, измеренных датчиком, не превысит 5 % при ограничении рабочей поверхности фоторезистора, путем размещения специально изготовленной круглой диафрагмы диаметром 1,8 мм, которая фиксировалась вблизи его поверхности.

Уровень освещения фоторезистора определяется напряжением питания светодиода (рис. 3), которое поступает с ЦАП микроконтроллера с шагом 0,8 мВ, что позволяет плавно изменять уровень освещенности исследуемого фоторезистора и исследовать его люкс-амперную характеристику (рис. 4). Значение освещенности и число точек усреднения (фототока и освещенности) задаются в программе управления установкой в

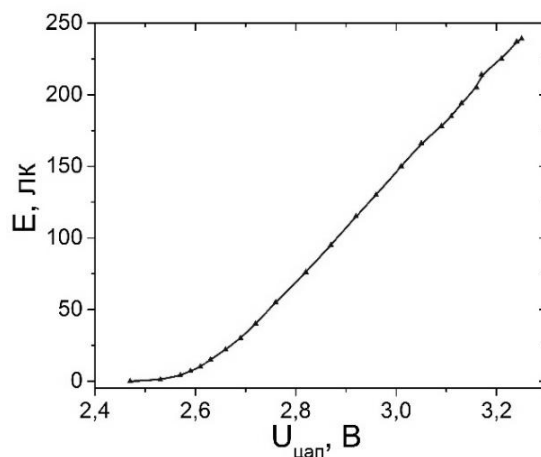


Рис. 3. Зависимость освещенности фоторезистора от напряжения питания светодиода

режиме измерения люкс-амперной характеристики. Из рис. 4 видно, что люкс-амперная характеристика фоторезистора при освещенности более 10 лк становится нелинейной, что говорит о квадратичном законе рекомбинации избыточных носителей.

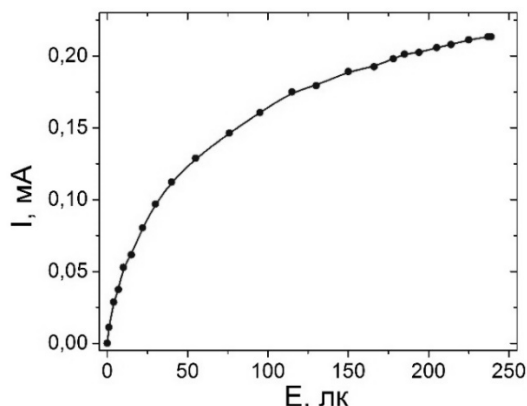


Рис. 4. Люкс-амперная характеристика фоторезистора

Фототок I на рис.4 представляет собой разность токов при освещении и затемнении фоторезистора. Применяя закон Ома в дифференциальной форме, а также учитывая соотношение (1) и однородность электрического поля, получим:

$$I = e\Delta n(\mu_n + \mu_p) \frac{U}{L} S, \quad (10)$$

где S, L – площадь поперечного сечения и длина полупроводника в направлении электрического поля соответственно; U – напряжение на фоторезисторе.

В установке сопротивление фоторезистора значительно больше сопротивления нагрузки во всем диапазоне измерений, поэтому U в процессе освещения изменяется незначительно. Это позволяет определить в программе обработки некоторые характеристики (k, δ) фоторезистора путем аппроксимации люкс-амперной характеристики функцией вида

$$I = kUE^\delta, \quad (11)$$

где k – константа, зависящая от свойств материала; δ – коэффициент нелинейности; E – освещенность.

Основным режимом работы установки является изучение инерционных характеристик фоторезистора. В программе управления задаются значения: освещенности фоторезистора; коэффициента усиления усилителя; частоты дискретизации АЦП. В соответствующем окне программы на экране монитора выводятся осциллограммы фототока (рис. 5) в момент освещения и затемнения фоторезистора (верхняя кривая) и при затемнении в логарифмическом масштабе (нижняя кривая). Если выполняется линейный закон рекомбинации, то нижний график на рис. 5 будет прямой линией. Длительность импульса питающего напряжения светодиода устанавливается такой, чтобы фототок достиг своего стационарного значения.

При квадратичной рекомбинации избыточных носителей, фототок согласно (8) и (9):
при освещении

$$I = e\Delta n_0(\mu_n + \mu_p) S \frac{U}{L} th(\gamma\Delta n_0 t) = I_0 th\left(\frac{t}{\tau}\right), \quad (12)$$

при затемнении

$$I = I_0 \left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^{-1}, \quad (13)$$

где I_0 – установившееся значение фототока при данном уровне освещения фоторезистора.

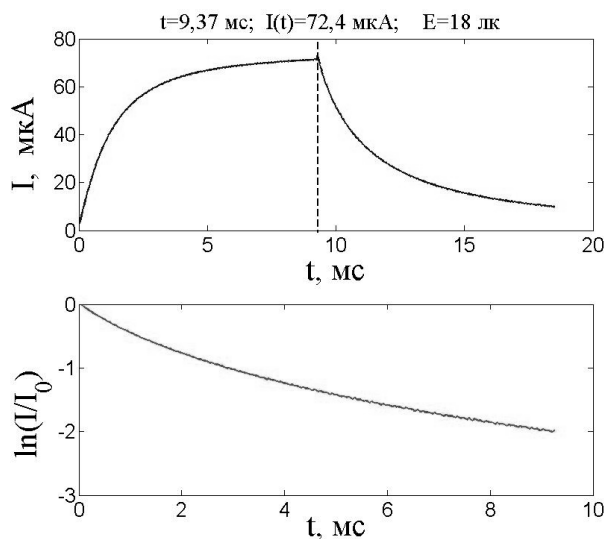


Рис. 5. Осциллограммы фототока

При высокой инжекции время жизни неравновесных носителей является переменной величиной, зависящей от уровня освещенности фоторезистора и соответственно от концентрации избыточных носителей. Поэтому на практике пользуются понятием мгновенного времени жизни [8].

Выбирая на осциллограмме нарастания или спада фототока (рис. 5, а) с помощью вертикального маркера соответствующие точки, можно вычислить время жизни при данном уровне освещения фоторезистора, используя соотношения (12) и (13). Для уменьшения погрешности определения τ выполняется усреднение по десяти измерениям. Относительная погрешность измерений не превышает 2 %.

Если уменьшить уровень освещенности фоторезистора, то согласно (5) и (6) законы нарастания

$$I = I_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (14)$$

и спада фототока

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (15)$$

становятся экспоненциальными.

С помощью маркера на осциллограмме выбираются необходимые значения фототока, которые автоматически нормируются согласно выражениям (14) или (15), а затем логарифмируются.

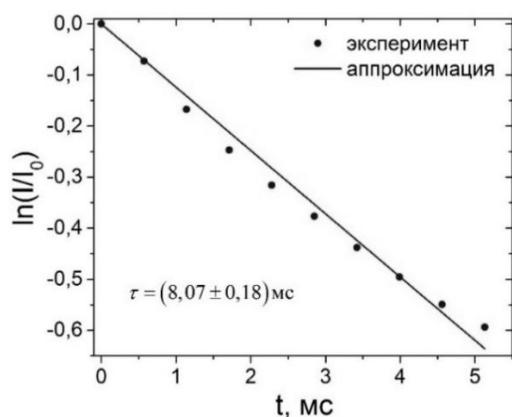


Рис. 6. Определение времени жизни неравновесных носителей заряда при затемнении фоторезистора

тезаторм частоты и усилителем ОА1 (рис. 1). В программе управления задается глубина модуляции и частота светового сигнала, а также число точек усреднения при измерении фототока. На экран выводится осциллограмма фототока (рис. 7).

Если интенсивность падающего излучения изменяется по гармоническому закону ($J \sim (1 + \cos \omega t)$), то переменная составляющая фототока

$$I_{\sim} = \frac{I_{\max 0}}{\sqrt{1 + (\omega \tau)^2}} \cos(\omega t - \phi), \quad (16)$$

где ω — циклическая частота падающего излучения; $\phi = \arctg(\omega \tau)$ — разность фаз между фототоком и падающим световым потоком; $I_{\max 0}$ — амплитудное значение фототока при частоте, близкой к нулевой.

Из соотношения (16) следует, что амплитудное значение фототока зависит от произведения частоты модуляции светового потока на время жизни избыточных носителей. При воз-

Затем выполняется линейная аппроксимация (рис. 6) по методу наименьших квадратов. Котангенс угла наклона прямой к оси абсцисс равен времени жизни неравновесных носителей. Погрешность измерений не превышает 3 %.

Третьим режимом работы установки является режим измерения частотной характеристики фоторезистора путем освещения его световым излучением синусоидальной формы. В этом случае для питания светодиода используется сигнал, формируемый син-

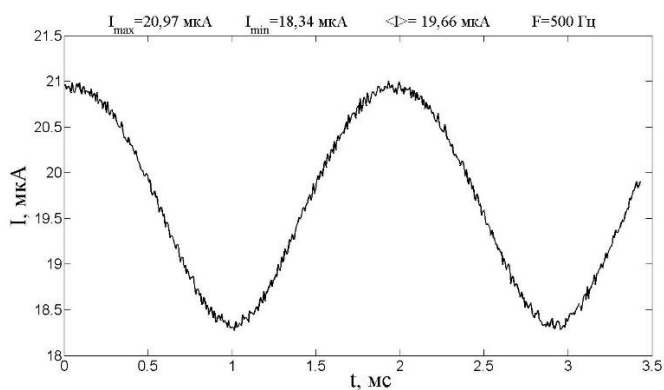


Рис. 7. Осциллограмма фототока при низком уровне освещенности

растании частоты наблюдается уменьшение максимального значения переменной составляющей: $I_{\max} = \frac{I_{\max 0}}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}}$. Частота, при которой амплитуда фототока уменьшается в $\sqrt{2}$ раз, называется частотой среза:

$$\omega_0 = \frac{1}{\tau}. \quad (17)$$

Таким образом, измеряя экспериментально (рис.8) зависимость амплитуды переменной составляющей фототока от частоты падающего светового потока, можно не только исследовать отклик фоторезистора на переменный световой сигнал, но и определить время жизни избыточных носителей заряда по частоте среза.

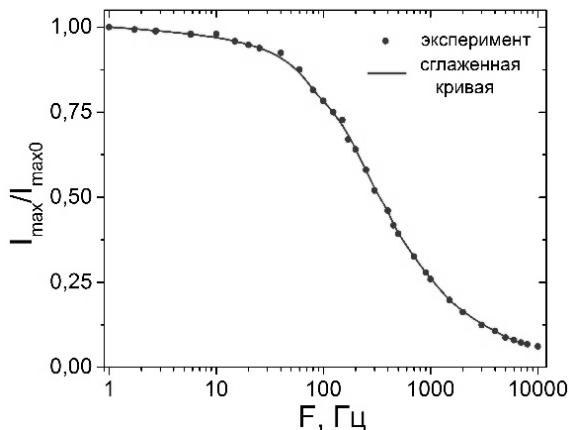


Рис. 8. Частотная характеристика фоторезистора

В заключение отметим, что фоторезистор и сопротивление нагрузки фиксируются на печатной плате измерительной установки с помощью винтовых клемм. Это позволяет, при необходимости, легко изменять их номиналы. Изменяя сопротивление нагрузки, можно исследовать зависимость времени нарастания и спада фототока от сопротивления нагрузки или реализовать согласованный режим работы, когда сопротивление нагрузки равно темновому сопротивлению фоторезистора.

Выводы

Разработана и протестирована компактная и низкобюджетная (себестоимость комплектующих 20 \$) автоматизированная измерительная установка для исследования закономерностей фотопроводимости при разном уровне освещенности и не требующая применения цифрового осциллографа и генератора сигналов.

Список литературы:

1. Marinho F. Measuring light with light-dependent resistors: an easy approach for optics experiments / F. Marinho, C.M. Carvalho, F.R. Apolinário, L. Paulucci // [European Journal of Physics](#). 2019. Vol.40, No.3.P. 035801–035814.
2. Jana A.K. An optical probe for liquid–liquid two-phase flows / A.K. Jana, T.K. Mandal, D.P. Chakrabarti, G. Das, P.K. Das // [Measurement Science and Technology](#). 2007. Vol.18, No.5. P. 1563–1575.
3. Xiao-Yuan W. Implementation of an analogue model of a memristor based on a light-dependent resistor / W. Xiao-Yuan, A.L Fitch, H.H.C. Iu, V. Sreeram, W.G. Qi // [Chinese Physics B](#). 2012. Vol. 21, No.10. P. 108501-1–108501-8.
4. Богданов Э.О. Фоторезисторы и их применение. Ленинград : Энергия, 1978. 144 с.
5. Sanga R. Design and development of a quasi-digital sensor and instrument for water turbidity measurement / R. Sanga, M. Sivaramakrishna, G.P. Rao // [Measurement Science and Technology](#). 2019. Vol.30, No.11. P.115106.
6. Flores-Fuentes W. [Comparison between Different Types of Sensors Used in the Real Operational Environment Based on Optical Scanning System](#) / W. Flores-Fuentes, J.E. Miranda-Vega, M. Rivas-Lopez, O. Sergiyenko, J.C. Rodríguez-Quinonez // [Sensors](#). 2018. Vol.18, issue 6. P.1684–1689.
7. Yuniarto M. Fiber optic sensor based on reflectivity configurations to detect heart rate / M. Yuniarto, A. Marzuki, R. Riyatun, D. Lestari // [Journal of Physics: Conference Series](#). 2016. Vol.776. P. 012110–012116.
8. Готра З.Ю. Фізичні основи електронної техніки / З.Ю. Готра, І.Є. Лопатинський, Б.А. Лукіянець та ін. Львів : Бескид Біт, 2004. 880 с.
9. Епифанов Г.И. Твердотельная электроника / Г.И. Епифанов, Ю.А. Мома. Москва : Высш. шк., 1986. 304 с.
10. Шалимова К.В. Физика полупроводников. Москва : Энергия, 1991. 416с.

Поступила в редколлегию 15.09.2020

Сведения об авторах:

Андреев Александр Николаевич – канд. физ.-мат. наук, Национальный технический университет «Харьковский Политехнический Институт», доцент кафедры физики, Украина, e-mail: andreievom@gmail.com

Андреева Ольга Николаевна – канд. физ.-мат. наук, Национальный технический университет «Харьковский Политехнический Институт», доцент кафедры физики, Украина, e-mail: Olga.Andreieva@khp.edu.ua