



## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ДЕНСИТОМЕТРИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

В. Суханов, В. Забродский, П. Аруев, Е. Шерстнев, Физико-технический институт им. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, [sildet@mail.ioffe.ru](mailto:sildet@mail.ioffe.ru); П. Втулкин, С. Марченко, Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия; [vniiofi@vniiofi.ru](mailto:vniiofi@vniiofi.ru)

Решение задач метрологического обеспечения измерений оптической плотности опирается на создание разных технических средств. Среди них – денситометрические комплексы и стандартные образцы оптической плотности материалов. Но сердцем этих устройств по-прежнему остается фотоприемное устройство. Приведены результаты исследования фотоприемного устройства на основе спектрофотометрического детектора СФД-1, содержащего кремниевый фотодиод и контроллер. Полученные характеристики свидетельствуют о возможности его использования для измерений оптической плотности в широком динамическом диапазоне более 8 В.

Успехи измерительных технологий, базирующихся на оптических методах, во многом зависят от характеристик используемых в них систем детектирования сигналов. Системы детектирования для спектрофотометрии, пирометрии, вакуумметрии и иных подобных методов должны одновременно обладать высокой чувствительностью, широким динамическим диапазоном измерения и достаточной линейностью. Задача создания таких систем особенно актуальна для оптической денситометрии. Ее решением, как одним из важных направлений, занимаются ведущие в этой области организации и институты, разрабатывая в ряду других проектов способы совершенствования метрологического обеспечения средства измерений оптической плотности, меры для их калибровки.

Так, в Национальном институте стандартов и технологий США (NIST) разработано средство измерения оптической плотности в проходящем

## STUDY OF CHARACTERISTICS OF PHOTODETECTOR FOR DENSITOMETRIC COMPLEX

V. Sukhanov, V. Zabrodsky, P. Aruev, E. Sherstnev, Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, [sildet@mail.ioffe.ru](mailto:sildet@mail.ioffe.ru); P. Vtulkin, S. Marchenko, All-Russian Research Institute of Optical-Physical Measurements, Moscow, Russia; [vniiofi@vniiofi.ru](mailto:vniiofi@vniiofi.ru)

Solution of the tasks on metrological assurance of optical density measurements relies on the creation of different technical means. Densitometric complexes and standard samples of materials optical density refer to them. But as before, the photodetector is the core component of these devices. The results of photodetector study are given on the basis of spectrophotometric detector СФД-1 which contains silicon photodiode and controllers. Obtained characteristics indicate its applicability for the measurements of optical density in the wide dynamic range of more than 8 В.

Progress of the measurement technologies which are based on the optical methods considerably depends on the characteristics of signal detection systems used in them. Detection systems for spectrophotometry, pyrometry, measurement of vacuum and other similar methods must simultaneously have high sensitivity, wide dynamic range of measurement and sufficient linearity. The task of formation of such systems is specifically critical task for the optical densitometry. Organizations and institutes which are leading in this area are engaged into its solution as one of the most important line of activities developing the instruments of optical density measurements, methods of their calibration together with other projects of metrological assurance improvement.

So, the National Institute of Standards and Technology of the USA (NIST) has developed the instrument of optical density measurement in transmitted light of standard samples SRM 1001 and SRM 1008 which represent the step optical attenuators on X-ray and photographic films. The



свете стандартных образцов SRM 1001 и SRM 1008, представляющих собой ступенчатые оптические ослабители на рентгеновской и фотографической пленке. Установка измерения оптической плотности позволяет определять диффузную оптическую плотность в диапазоне до 6 В, при этом стандартная неопределенность равна 0,002 В, расширенная неопределенность (при коэффициенте охвата  $k=3$ ) равна 0,006 В [1-3]. В основе измерительного прибора – термостабилизированное фотоприемное устройство (ФПУ), состоящее из кремниевого фотодиода и предусилителя. ФПУ обеспечивает измерение оптического сигнала в диапазоне семи порядков величины, это и расширило диапазон измерений оптической плотности пропускания до 6 В.

Немецкий Национальный Институт Метрологии (PTB) обладает волоконным денситометром [4], который обеспечивает измерения оптической плотности мер – спектрально нейтральных образцов вплоть до 6 В, при этом расширенная неопределенность измерения плотности (при коэффициенте охвата  $k=2$ ) равна 0,006 В.

Для исследования линейности ФПУ в составе эталонного отражательного спектрофотометра можно использовать метод двойной апертуры [5],

optical density measurement instrument allows estimating the diffuse optical density within the range up to 6 В and the standard uncertainty is equal to 0.002 В, expanded uncertainty (when coverage factor  $k = 3$ ) is equal to 0.006 В [1-3]. Thermally-stabilized photodetector (PD) which consists of silicon photodiode and preamplifier is the basis of the measurement device. PD ensures the measurement of optical signal within the range of seven orders of magnitude and for this reason the range of transmission optical density is extended up to 6 В.

German National Metrology Institute (PTB) has the fiber densitometer [4] which ensures the measurements of optical density of measures – spectrally-neutral samples up to 6 В and the expanded uncertainty of density measurement (when coverage factor  $k = 2$ ) is equal to 0.006 В.

In order to study the linearity of PD in the structure of reference reflectance spectrophotometer the double aperture method [5] can be used or when measuring the densities of more than 3 В the diagram of current conversion into voltage can be used with its further amplification [6]. The absolute error of optical density measurement of less than  $\pm 0.005$  В was obtained in the designed densitometer [6].

или при измерении плотностей более 3 Б применить схему преобразования тока в напряжение с последующим его усилением [6]. В разработанном денситометре [6] достигнута абсолютная погрешность измерения оптической плотности менее  $\pm 0,005$  Б.

Однако работы [1-6] страдают одним недостатком – в них отсутствует описание методов оценки основных параметров ФПУ – чувствительности, динамического диапазона и линейности. Но именно эти ключевые параметры определяют качество измерительных систем, в которые встраивают ФПУ.

Анализ ведущих публикаций [1-6] показал, что ФПУ, используемые для измерения визуальной диффузной оптической плотности с высокой точностью, были выполнены на основе кремниевого фотодиода и трансимпедансным усилителем, преобразующим ток фотодиода в выходное напряжение операционного усилителя. Переключение резисторов в обратной связи предусилителя обеспечивало динамический диапазон работы ФПУ.

В нашей работе в качестве системы детектирования денситометрического комплекса было использовано ФПУ, выполненное по схеме интегратора, а не трансимпедансного усилителя. Исследуемое ФПУ состояло из спектрофотометрического детектора СФД-1 и контроллера. В состав СФД-1 входил кремниевый фотодиод [7] с активной областью диаметром 10 мм, предназначенный для регистрации излучения в спектральном диапазоне 200–1180 нм. Он обладает температурным коэффициентом внешней квантовой эффективности  $0,01\%/^{\circ}\text{C}$  для длин волн 885–238 нм [8]. Кроме кремниевого фотодиода детектор СФД-1 включал в себя преобразователь тока фотодиода, собранный по схеме интегратора. СФД-1 был выполнен в виде гибридной сборки и регистрировал токовые сигналы на одном измерительном элементе во всем динамическом диапазоне [9]. Выходной сигнал с СФД-1 в цифровом виде слабо подвержен воздействию внешних электромагнитных помех. Контроллер обеспечивает обработку цифровых данных, полученных от СФД-1, а также передачу результатов измерения на персональный компьютер (ПК). Программное обеспечение, разработанное для исследуемого ФПУ, обеспечивает запись и обработку данных, поступающих с контроллера, а также графическое отображение результатов измерения ФПУ (рис.1) на основе СФД-1. Габариты СФД-1: диаметр 20 мм и высота 10 мм. Коэффициент преобразования



**Рис.1.** СФД-1 и плата контроллера  
*Fig. 1 СФД-1 and controller board*

However, the papers [1-6] have one shortcoming, they do not have the description of estimation methods of the PD key parameters – sensitivity, dynamic range and linearity. But these specific key parameters determine the quality of measuring systems which PDs are built in.

Analysis of the leading published papers [1-6] showed that PDs used for the measurement of visual diffuse optical density with high accuracy were made on the basis of silicon photodiode and with transimpedance amplifier which converts the photodiode current into the output voltage of operational amplifier. Switching over of the resistors in the feedback of preamplifier ensured the dynamic range of PD operation.

In our paper the PD made according to the diagram of integrator rather than transimpedance amplifier was used as the detection system of densitometric complex. The PD under study consisted of spectrophotometric detector СФД-1 and controller. The detector СФД-1 included silicon photodiode [7] with the active region diameter of 10 mm designated for the registration of radiation within the spectral range 200–1180 nm. It had the temperature coefficient of external quantum efficiency of  $0.01\%/^{\circ}\text{C}$  for the wavelengths 885–238 nm [8]. Besides the silicon photodiode, the detector СФД-1 included photodiode current converter assembled in accordance with the integrator diagram. The detector СФД-1 was made in the form of hybrid assembly and registered the current signals on one measuring element within the whole dynamic range



СФД-1 определяли с помощью источника калиброванного постоянного тока, который выполнен на основе источников опорного напряжения AD581 и прецизионного проволочного резистора. Проверка источника калиброванного тока представлена в табл.1.

В рамках данной работы оптические сигналы в спектральном диапазоне 350–1100 нм регистрировали кремниевым фотодиодом. Измерения фототока вели при температуре 20–25°C.

На рис.2 представлен график относительной спектральной чувствительности ФПУ, полученный по результатам калибровки во ФГУП ВНИИОФИ на Установке высшей точности для воспроизведения единиц спектральной чувствительности в диапазоне длин волн 0,22–2,5 мкм (УВТ 42-А-86).

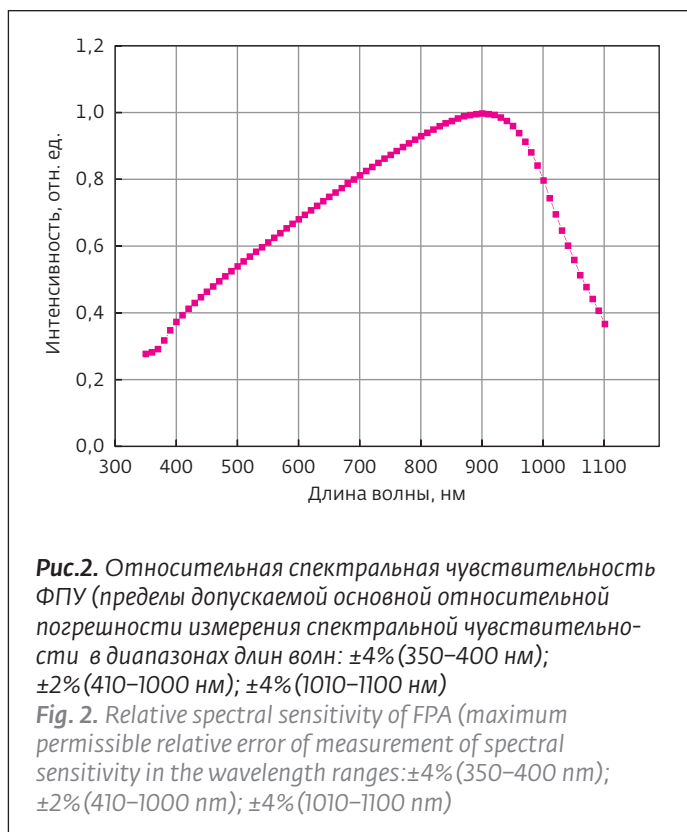
### **ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА И ЛИНЕЙНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФПУ**

С целью определения возможности использования исследованного ФПУ в качестве фотоприемного блока в составе денситометрического комплекса были проведены измерения: шумовых параметров, динамического диапазона

[9]. The output signal from СФД-1 in the digital form is poorly exposed to the external electromagnetic disturbance. Controller provides the processing of digital data obtained from the detector СФД-1 and transmission of the measurement results to the personal computer (PC). Software designed for the PD under study provides the record and processing of data which comes from the controller as well as the graphic display of measurement results (Fig. 1) of PD based on the detector СФД-1. The detector СФД-1 dimensions: diameter – 20 mm, and height – 10 mm. СФД-1 conversion coefficient was estimated using the source of calibrated direct current which was made on the basis of AD581 reference voltage sources and precision wire-wound resistor. Check up of the calibrated current source is given in Table 1.

Within the framework of this paper the optical signals within the spectral range 350–1100 nm were registered by the silicon photodiode. Photocurrent measurements were performed at the temperature 20–25°C.

The diagram of PD relative spectral sensitivity obtained on the basis of calibration results in All-Russian Research Institute of Optical-Physical Measurements, Federal State Unitary Enterprise (ARIOPM FSUE) on the Higher-Accuracy Device for



и линейности энергетической характеристики исследованного ФПУ.

### Оптическая схема и оборудование

Исследования шумовых параметров, динамического диапазона и линейности энергетической характеристики исследованного ФПУ проводили на установке, оптическая схема которой приведена на рис.3. В качестве источника излучения использована светоизмерительная лампа накаливания типа СИРШ 8.5-200-1 (напряжение 8 В, ток 23 А), в качестве приемника оптического излучения – ФПУ на основе кремниевого фотодиода и интегратора СФД-1. Питание лампы СИРШ 8.5-200-1 (2) обеспечивал стабилизированный источник питания СИП-30, для контроля напряжения на лампе был использован вольтметр В7-54/3. Напряжение на лампе, которое поддерживали посредством магазина сопротивлений РЗЗ, было равным  $8,0020 \pm 0,0004$  В. Напряжение на ФПУ, которое устанавливали посредством стабилизированного источника питания MPS 3020, было равно  $6,00 \pm 0,01$  В.

### Метод исследования

В основу исследования положен метод измерения фотоэлектрических параметров

the reproduction of spectral sensitivity units within the range of wavelengths 0.22-2.5  $\mu\text{m}$  (УБТ 42-А-86) is shown in Fig. 2.

### STUDY OF DYNAMIC RANGE AND LINEARITY OF PD ENERGY CHARACTERISTIC

In order to determine the applicability of investigated PD as the photodetector unit in the structure of densitometric complex the following measurements were performed: measurements of noise parameters, dynamic range and linearity of energy characteristic of investigated PD.

### Optical Scheme and Equipment

Study of noise parameters, dynamic range and linearity of energy characteristic of investigated PD was performed on the device optical scheme of which is shown in Fig. 3. The photometric incandescent lamp of СИРШ 8.5 - 200-1 type (voltage 8 V, current 23 A) was used as the radiation source, the photodetector СФД-1 based on silicon photodiode and integrator was used as the radiation-measuring instrument. Power was supplied to the lamp СИРШ 8.5 - 200-1 (2) by the stabilized power source СИП-30 and in order to control the lamp voltage the voltmeter В7-54/3 was used. Lamp voltage which was supported by means of the РЗЗ resistor bank was equal to  $8.0020 \pm 0.0004$  V. PD voltage which was estimated by means of the MPS 3020 stabilized power source was equal to  $6.00 \pm 0.01$  V.

**Таблица 1.** Проверка источника постоянного тока с использованием электрометра Keithley-6514

Расчетное значение тока, А	Показания Keithley-6514, А (в режиме "slow")
$2 \cdot 10^{-3}$	$1,99942 \cdot 10^{-3}$
$1 \cdot 10^{-3}$	$1,00039 \cdot 10^{-3}$
$0,5 \cdot 10^{-3}$	$0,50042 \cdot 10^{-3}$
$200 \cdot 10^{-6}$	$200,058 \cdot 10^{-6}$
$100 \cdot 10^{-6}$	$100,035 \cdot 10^{-6}$
$50 \cdot 10^{-6}$	$50,0110 \cdot 10^{-6}$
$20 \cdot 10^{-6}$	$20,0033 \cdot 10^{-6}$
$10 \cdot 10^{-6}$	$10,0030 \cdot 10^{-6}$
$1 \cdot 10^{-6}$	$1,00126 \cdot 10^{-6}$
$0,5 \cdot 10^{-6}$	$0,50057 \cdot 10^{-6}$
$49,8 \cdot 10^{-9}$	$49,864 \cdot 10^{-9}$
$4,976 \cdot 10^{-9}$	$4,9766 \cdot 10^{-9}$
$0,49 \cdot 10^{-9}$	$0,49138 \cdot 10^{-9}$



и определения характеристик ФПУ [10]. Суть метода состоит в определении отношения между двумя величинами силы тока фотоприемника: одной – возникающей при попадании на фотоприемник светового потока, прошедшего через исследуемый образец; и другой – при попадании света на фотоприемник в отсутствие исследуемого образца. Варьирование светового потока, попадающего в интегрирующую сферу, осуществляли тремя разными способами: во-первых, изменяя расстояние между источником света и интегрирующей сферой; во-вторых, диафрагмируя световой поток; в-третьих, вводя в оптический тракт нейтральные фильтры. А комбинация этих способов с различными сочетаниями оптических элементов позволила изменять интенсивность светового потока, попадающего в интегрирующую сферу, в широком диапазоне. При каждом сочетании оптических элементов, а также при регистрации темнового тока, проводили измерения сигнала сериями из 10-ти наблюдений (время одного наблюдения – 3 с) и определяли среднее значение  $\bar{I}$ , и среднее квадратическое отклонение результата измерения  $S$  согласно стандартной методике [11].

### Определение динамического диапазона

Определение динамического диапазона проводили по методу, установленному в [10]. Динамический диапазон определяли по формуле:

$$D \leq I_{\phi} \cdot K_{\phi} / I_{\Pi}, \quad (1)$$

где:  $I_{\phi}$  – ток фотосигнала,  $K_{\phi}$  – коэффициент ослабления фильтра, вводимого в оптический тракт,  $I_{\Pi}$  – значение тока шума, то есть фототока, соответствующего порогу чувствительности  $\Phi_{\Pi}$ .

### Method of Study

The method of measurement of photoelectric parameters and estimation of PD characteristics was taken as the basis of the study [10]. The point of this method lies in the determination of relation between two magnitudes of photodetector current intensity: one magnitude occurs when the luminous flux falls on photodetector, other magnitude occurs when the light falls on photodetector upon absence of the sample under study. Variation of luminous flux which falls into the integrating sphere was performed by three different methods: first of all, changing the distance between light source and integrating sphere; secondly, diaphragming the luminous flux; thirdly, introducing the neutral filters into the optical path. And combination of these methods with the different compositions of optical elements made it possible to change the intensity of luminous flux which fell into the integrating sphere within wide range. Upon each combination of optical elements and registration of dark current the signal measurements were performed by the series consisting of 10 observations (period of one observation was 3 s) and the mean value  $\bar{I}$  was estimated as well as mean square deviation of measurement result  $S$  in accordance with the standard methods [11].

### Estimation of the Dynamic Range

Estimation of the dynamic range was performed on the basis of the method established in the paper [10]. Dynamic range was estimated according to the following formula:

$$D \leq I_{\phi} \cdot K_{\phi} / I_{\Pi}, \quad (1)$$

where  $I_{\phi}$  stands for the photosignal current,  $K_{\phi}$  stands for the attenuation coefficient of the filter

### Определение тока шума, соответствующего порогу чувствительности ФПУ

Значение тока шума ФПУ определяли, когда установленный экран (см. рис.3) перекрывал путь световому лучу во входной порт интегрирующей сферы. При этом на выходе ФПУ регистрировали общий ток  $I_{\text{общ}}$  и темновой ток  $I_{\text{T}}$ . По результатам их измерений с помощью разработанного ПО вычисляли значение фототока, согласно формуле  $I_{\text{Ф}} = I_{\text{Общ}} - I_{\text{T}}$ . За значение фототока  $I_{\text{П}}$ , соответствующего порогу чувствительности  $\Phi_{\text{П}}$  детектора, было принято значение тока, равное  $I_{\text{П}} = 3,25 S_{\text{ш}}$ , где коэффициент 3,25 – это коэффициент Стьюдента

introduced into optical path,  $I_{\text{П}}$  is the value of noise current, in other words, photocurrent which corresponds to the threshold of sensitivity  $\Phi_{\text{П}}$ .

### Estimation of Noise Current Which Corresponds to PD Threshold of Sensitivity

PD noise current value was estimated when the installed screen (see Fig. 3) was blocking the way of luminous flux to the access port of integrating sphere. At this moment the total current  $I_{\text{общ}}$  and dark current  $I_{\text{T}}$  were being registered in the PD output. According to the results of their measurements using the designed software the value of photocurrent was being

**Таблица 2.** Результаты двух серий измерений тока ФПУ при различных сочетаниях оптических элементов в оптической схеме

1-я серия измерений		2-я серия измерений	
$\bar{I}$ , среднее значение фототока, нА	$\delta$ , относительная погрешность измерения, нА	$\bar{I}$ , среднее значение фототока, нА	$\delta$ , относительная погрешность измерения, нА
$I_{\text{max}}$ 1 283,540059	0,000175	$I_{\text{max}}$ 6 328,193034	0,000225
308,387819	0,000030	1 227,644596	0,000312
129,131645	0,000011	647,258702	0,000091
31,549351	0,000049	303,247038	0,000053
13,551207	0,000047	125,834879	0,000083
10,304460	0,000185	31,082712	0,000071
3,317204	0,000069	13,182938	0,000114
2,464791	0,000034	9,880288	0,000106
1,629944	0,000032	3,263380	0,000104
1,044206	0,000068	2,429279	0,000119
0,396707	0,000065	1,580837	0,000027
0,255132	0,000036	1,026931	0,000046
0,248926	0,000328	0,390156	0,000169
0,108556	0,000093	0,254164	0,000273
0,059722	0,000106	0,249127	0,002000
0,026513	0,000155	0,106616	0,000147
0,025555	0,000339	0,058704	0,000427
0,013190	0,000436	0,026618	0,000485
0,006172	0,000666	0,026324	0,000572
0,003207	0,001183	0,012952	0,001262
0,002666	0,002135	0,006174	0,002513
0,000640	0,007417	0,003253	0,001254
0,000312	0,009163	0,002709	0,003472
$I_{\text{min}}$ 0,000060	0,131762	0,000665	0,009623
–	–	0,000323	0,026274
–	–	$I_{\text{min}}$ 0,000087	0,146437



при доверительной вероятности  $P=0,99$ , а  $S_{III}$  – среднее квадратическое отклонение результата измерения среднего темного тока  $I_T$ . В результате измерений было определено значение фототока  $I_{II}$ , соответствующее порогу токовой чувствительности ФПУ,  $I_{II}=(1,9 \pm 0,2) \cdot 10^{-5}$  нА  $\approx 2 \cdot 10^{-5}$  нА.

Далее, варьируя расстояние между источником и интегрирующей сферой ( $L_1=300$  см,  $L_2=157$  см,  $L_3=80$  см, погрешность установки 0,1 см), меняли световой поток, попадающий в интегрирующую сферу. Световой луч был направлен непосредственно на диафрагму Д (см. рис.3), а на пути луча вводили фильтры HC11, HC13. Были использованы 4 различные диафрагмы диаметрами:  $D_1=1,3$  мм;  $D_2=4,0$  мм;  $D_3=12,0$  мм;  $D_4=40,0$  мм.

В табл.2 представлены результаты первой и второй серии измерений фототока  $I_{\Phi}$  при различных сочетаниях оптических элементов в оптической схеме. Результаты расположены в порядке убывания от максимального значения к минимальному: от  $I_{max}=1283,540$  нА до  $I_{min}=0,000060$  нА – для I-й серии измерений; и от  $I_{max}=6328,193$  нА до  $I_{min}=0,000087$  нА – для II-й серии измерений. Таким образом, диапазон измеренных токов детектора в первой серии измерений составляет  $I_{max}/I_{min}=1283,540/0,000060=21392334,3 \approx 2,1 \cdot 10^7$  и  $LOG_{10}(I_{max}/I_{min})=7,33 \pm 0,06$ . Во второй серии измерений  $I_{max}/I_{min}=6328,193034/0,000087=72737850,97 \approx 7,3 \cdot 10^7$  и  $LOG_{10}(I_{max}/I_{min})=7,86 \pm 0,07$ .

Динамический диапазон Д при  $I_{\Phi}=\bar{I}=647,3$  нА (табл.2, 3-я строка 2-й серии измерений),  $K_{\Phi}=9,78$  и  $I_{II}=0,00002$  нА достигает значения  $D=3,16530 \cdot 10^8$ , (2) а  $LOG_{10}D=8,50 \pm 0,07$  (3).

### Исследование линейности энергетической характеристики ФПУ

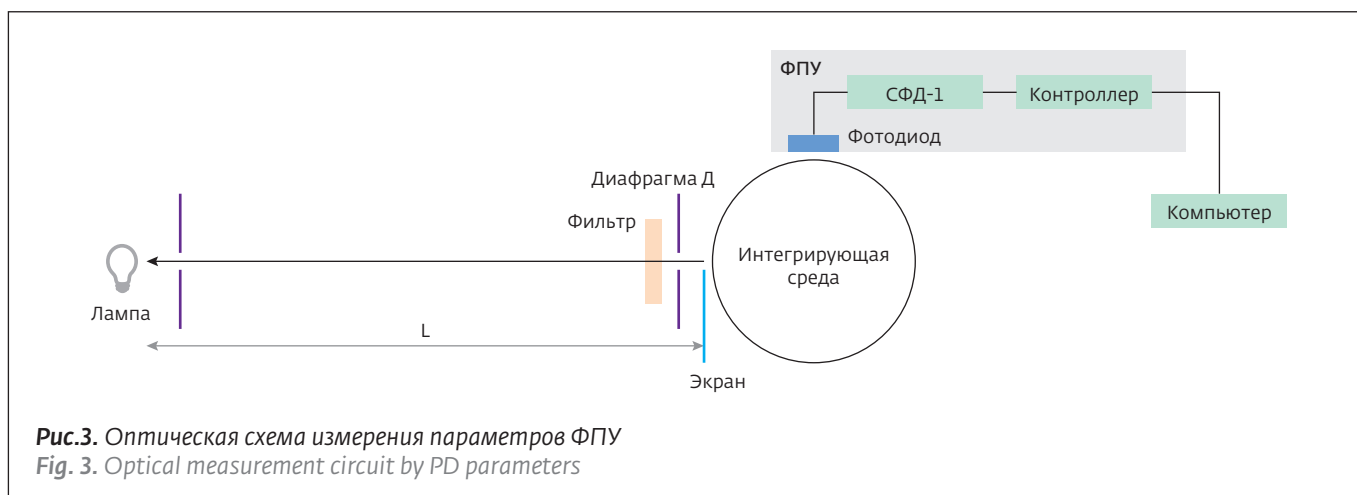
Для исследования линейности энергетической характеристики использовали метод [10]. По результатам измерений фототока, (табл.2) с учетом известных значений коэффициентов

calculated according to the formula  $I_{\Phi}=I_{Общ}-I_T$ . The photocurrent value  $I_{II}$  corresponding to the threshold of sensitivity  $\Phi_{II}$  of detector was assumed as the current value which is equal to  $I_{II}=3.25S_{III}$ , where the coefficient 3.25 stands for the Student's coefficient with the confidence coefficient  $P=0.99$  and  $S_{III}$  stands for the mean square deviation of the measurement result of mean dark current  $\bar{I}_T$ . As a result of measurements the photocurrent value  $I_{II}$  was estimated which corresponded to the threshold of PD current sensitivity,  $I_{II}=(1.9 \pm 0.2) \cdot 10^{-5}$  nA  $\sim 2 \cdot 10^{-5}$  nA.

Then, varying the distance between the source and integrating sphere ( $L_1=300$  cm,  $L_2=157$  cm,  $L_3=80$  cm, setup error 0.1 cm) we changed the luminous flux falling into the integrating sphere. Luminous flux was directed straight on the diaphragm Д (see Fig. 3) and the filters HC11, HC13 were introduced on the way of beam. 4 different diaphragms with the following diameters were used:  $D_1=1.3$  mm;  $D_2=4.0$  mm;  $D_3=12.0$  mm;  $D_4=40.0$  mm.

Results of the first and second series of measurements of the photocurrent  $I_{\Phi}$  are given in Table 2 upon the different combinations of optical elements in the optical scheme. Results are arranged in decreasing order from the maximum value to the minimum one: from  $I_{max}=1283.540$  nA to  $I_{min}=0.000060$  nA – for the 1st measurement series; and from  $I_{max}=6328.193$  nA to  $I_{min}=0.000087$  nA – for the 2nd measurement series. Thus, the range of detector measured currents in the first measurement series is  $I_{max}/I_{min}=1283.540/0.000060=21392334.3 \sim 2.1 \cdot 10^7$  and  $LOG_{10}(I_{max}/I_{min})=7.33 \pm 0.06$ ; in the second measurement series  $I_{max}/I_{min}=6328.193034/0.000087=72737850.97 \sim 7.3 \cdot 10^7$  and  $LOG_{10}(I_{max}/I_{min})=7.86 \pm 0.07$ .

The dynamic range Д when  $I_{\Phi}=\bar{I}=647.3$  nA (Table 3, 3<sup>rd</sup> row of the 2<sup>nd</sup> measurement series),  $K_{\Phi}=9.78$



**Рис.3.** Оптическая схема измерения параметров ФПУ  
**Fig. 3.** Optical measurement circuit by PD parameters

пропускания элементов, вводимых в световой пучок (оптических фильтров, диафрагм, варьирования расстояния между источником света и интегрирующей сферой) был проведен анализ. Он показал, что погрешность определения оптической плотности этих элементов не превышает 0,2% в пределах диапазона измеренных токов исследованного ФПУ (от 0,006174 нА до 6328,193 нА во II-й серии измерений).

Полученные в ходе испытаний результаты свидетельствуют о том, что отклонение от линейности энергетической характеристики по критерию, указанному в [10] не превышает 1% в диапазоне  $D=4,1 \cdot 10^6$ . В логарифмической шкале отклонения от линейного закона энергетической характеристики не превышают 0,003 Б в диапазоне от 0,03–6,6 Б.

### Исследование линейности энергетической характеристики ФПУ методом двойной апертуры

Дополнительно методом двойной апертуры [5] была исследована линейность энергетической характеристики ФПУ в спектральном диапазоне (340–770 нм), заданном в документе [12]. Световой поток от лампы после прохождения фильтра Ф1, нейтрального фильтра ФН, рассеивателя и диафрагмы (диаметром 3 мм) попадал на непрозрачную маску, имеющую два отверстия А и Б (диаметром 1 мм). Отверстия были расположены таким образом, что они оба находились внутри площади, охватываемой этой диафрагмой, а расстояние между их крайними точками составляло 0,4 мм. Схему исследования линейности ФПУ методом двойной апертуры поясняет рис.4. Поток излучения, исходящий из этих отверстий, перекрывают заслонкой. Заслонка установлена

and  $I_{\text{П}}=0.00002$  нА obtains the following value  $D=3.16530 \cdot 10^8$ , and  $\text{LOG}_{10}D=8.50 \pm 0.07$ .

### Study of Linearity of PD Energy Characteristic

The method [10] was used for the study of linearity of energy characteristic. According to the results of photocurrent measurements (Table 2) and taking into account the known values of transmission coefficients of elements introduced into the luminous flux (optical filters, diaphragms, variation of distance between the light source and integrating sphere) the analysis was carried out. It showed that the error of optical density estimation concerning these elements does not exceed 0.2% within the range of measured currents of the PD under study (from 0.006174 нА to 6328.193 нА in the 2nd measurement series).

The results obtained during experiments indicate that the energy characteristic deviation from linearity by the criteria specified in the paper [10] does not exceed 1% within the range  $D=4.1 \cdot 10^6$ .

**Таблица 3.** Фотоэлектрические характеристики исследуемого ФПУ

Наименование характеристики	Значение
Порог чувствительности (значение фототока $I_{\text{п}}$ )	Не превышает $2 \cdot 10^{-5}$ нА
Диапазон значений измеренных токов $\text{LOG}_{10}(I_{\text{max}}/I_{\text{min}})$	Не менее 7,33
Динамический диапазон $\text{LOG}_{10}D$	Не менее 8,5
Отклонение от линейного закона энергетической характеристики	Не превышает 0,003 Б в диапазоне 0,03 – 6,6 Б

на держателе, который приводился в движение механически шаговым двигателем. Таким образом заслонкой можно перекрывать свет то от одного отверстия А или В, то от двух отверстий одновременно. Спектральную характеристику светового потока, падающего на диафрагму, определяет спектр излучения лампы и фильтр Ф1. Она соответствовала спектральным условиям измерения оптической плотности в проходящем свете по ИСО 5-3 [12].

Использованием нейтральных фильтров ФН были заданы уровни интенсивности прошедшего излучения, их величина менялась в диапазоне 7-и порядков. Спектральная характеристика элементов, стоящих после диафрагмы, определялась фильтром Ф2 и спектральной чувствительностью ФПУ и также соответствовала спектральным условиям измерения стандартной визуальной диффузной плотности в проходящем свете по ИСО 5-3 [12].

Фототок, полученный при открытом отверстии А или В обозначен как  $S_A$  или  $S_B$ . Сигнал тока, полученный при двух открытых отверстиях принят как  $S_{A+B}$ . При каждом уровне излучения, задаваемом нейтральными фильтрами НС-3, НС-10 и НС-11 или их комбинацией, проводили серию измерений сигналов  $S_A$ ,  $S_B$  и  $S_{A+B}$ . Анализ отношения величин сигналов  $S_A/S_{A+B}$  и  $S_B/S_{A+B}$  показал, что отношения оставались постоянными с относительной погрешностью не более 1% в диапазоне интенсивности излучения 6,4 порядка. Значения фотосигналов были ограничены снизу значением фототока  $I_{\Gamma} \approx 2 \cdot 10^{-5}$  нА, что соответствовало порогу чувствительности  $\Phi_{\Gamma}$  фотоприемника. То

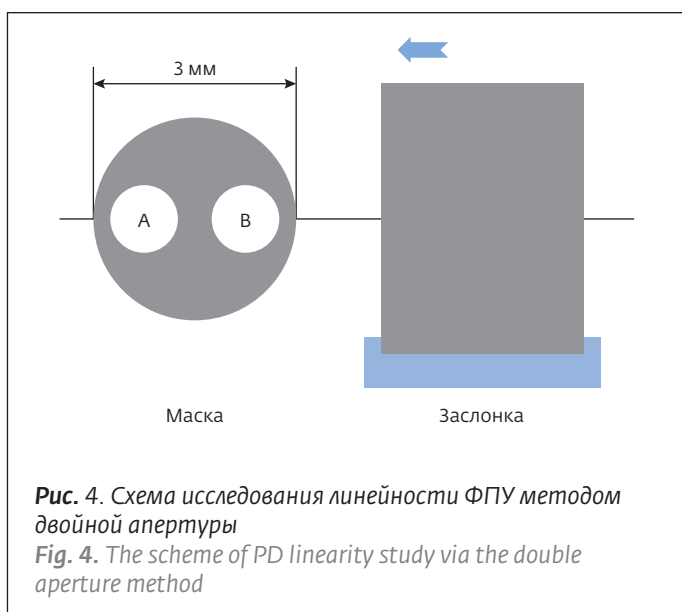


Рис. 4. Схема исследования линейности ФПУ методом двойной апертуры

Fig. 4. The scheme of PD linearity study via the double aperture method

In the logarithmic scale the energy characteristic deviations from linear law do not exceed 0.003 V within the range 0.03 – 6.6 V.

#### Study of Linearity of the PD Energy Characteristic Using the Method of Double Aperture

The linearity of PD energy characteristic was studied additionally using the double aperture method [5] within the spectral range (340-770 nm) given in the document [12]. Luminous flux from the lamp after passing the filter Ф1, neutral filter ФН, diffuser and diaphragm (with diameter of 3 mm) was falling on the non-transparent mask which had two openings A and B (with diameter of



есть исследование линейности энергетической характеристики ФПУ методом двойной апертуры подтвердило, что результаты измерений линейности энергетической характеристики ФПУ по методу [10] и методом двойной апертуры [5] находятся в соответствии друг с другом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования шумовых параметров, динамического диапазона и линейности ФПУ, используемого в структурной схеме эталонного денситометра в проходящем свете (табл.3) подтвердили возможность использования ФПУ на основе кремниевого фотодиода для измерений оптической плотности в динамическом диапазоне более 8 Б.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Эталонные образцы диффузной визуальной ступенчатой плотности пропускания на фото и рентгеновской пленке SRM 1001 и SRM 1008. NIST Специальные публикации 260-135, 1998.
2. Early E., O'Brian T. - The Journal of imaging science and technology 1999, v. 43, №4, p.388-397.
3. Early E., O'Brian T. - Analytica Chimica Acta, 1999, v.380, is.2-3, p.143-153.
4. Buher E., Bergmann D. - The Journal of imaging science and technology, 1999, v. 43, №4, p. 382-387.
5. Proctor J., Barnes P. - J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol., 1996, v.101, p.619.
6. Денисюк А., Кузьмин В., Николаев С., Сафронов С. и др. - Измерительная техника, 2006, №7, с. 39-41.
7. [www.technoexan.ru/products/diodes/cat2.php](http://www.technoexan.ru/products/diodes/cat2.php)
8. Goldberg Yu., Zabrodsky V., Obolensky O., Suhanov V. - Semiconductors, 1999, №33, p.343.
9. Суханов В., Аруев П., Дроздова М., Забродская Н. и др. - ФТП, 2013, №47 (2), с.174.
10. ГОСТ 17772-88. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик.
11. ГОСТ 8.207-76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений.
12. ИСО 5-3: 2009. Технология фотографии и графики. Денситометрия. Спектральные условия.

1 mm). Openings were located in such a way that both of them were inside of the area covered with this diaphragm and the distance between their endpoints was 0.4 mm. The scheme of PD linearity study via the double aperture method is described in Fig. 4. Radiant flux coming from these openings was blocked by the door. The door was installed on the holder which was actuated mechanically by the stepping motor. In such manner the light could be blocked from one opening A or B by the door or from two openings simultaneously. The spectral characteristic of luminous flux falling on the diaphragm determines the lamp radiation spectrum and filter  $\Phi 1$ . It corresponded to the spectral conditions of optical density measurement in the transmitted light according to ISO 5-3 [12].

Use of the neutral filters  $\Phi H$  set the levels of intensity of transmitted radiation, their values changed within the range of 7 orders. Spectral characteristic of the elements located near the diaphragm was estimated by the filter  $\Phi 2$  and spectral sensitivity of PD and corresponded to the spectral conditions of measurement of standard visual diffuse density in the transmitted light according to ISO 5-3 [12].

Photocurrent obtained upon the unblocked opening A or B was designated as  $S_A$  or  $S_B$ . Current signal obtained with two unblocked openings was assumed as  $S_{A+B}$ . Upon every level of radiation set by the neutral filters HC-3, HC-10 and HC-11 or their combination the series of measurements of signals  $S_A$ ,  $S_B$  and  $S_{A+B}$  were performed. Analysis of ratio of the signal values  $S_A/S_{A+B}$  and  $S_B/S_{A+B}$  showed that the ratios stayed constant with the relative error  $\bar{I}$  of not more than 1% within the range of radiation intensity of 6.4 orders. Photosignal values were flattened at the negative peak by the photocurrent value  $I_{\text{П}} \sim 2 \cdot 10^{-5}$  nA which corresponded to the threshold of photodetector sensitivity  $\Phi П$ . In other words, the study of linearity of the PD energy characteristic using the double aperture method confirmed that the results of measurements of PD energy characteristic linearity using the method [10] and double aperture method [5] correspond to each other.

## CONCLUSION

Performed study of noise parameters, dynamic range and linearity of the PD used in the structural diagram of reference densitometer in the transmitted light (Table 3) confirmed the applicability of the PD based on silicon photodiode for the measurement of optical density within the dynamic range of more than 8 B.