

УДК 53.247.4; 681.785.42

© М. П. Данилаев, С. А. Карандашов, В. А. Ку克林,
А. Ж. Сахабутдинов, С. М. Р. Х. Хуссейн, 2021

ТУРБИДИМЕТРИЧЕСКИЙ ФОТОМЕТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕДИМЕНТАЦИИ НАНОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ

Анализируется турбидиметрический фотометр с импульсным режимом работы источника света, позволяющего проводить седиментационные исследования наноразмерных объектов в условиях лабораторных фоновых засветок при длительностях процесса более 500 часов. Описывается функциональная схема лабораторного макета фотометра и приводятся экспериментальные исследования некоторых его характеристик.

Кл. сл.: турбидиметрический фотометр, фоновая засветка, дрейф нулевой линии

ВВЕДЕНИЕ

Фотометрия, возникнув как направление исследований характеристик световых потоков непрерывных и импульсных источников света [1, 2], стала одним из мощнейших инструментов при проведении экспериментальных исследований. Распространенность фотометрических методов характеризует краткое перечисление областей их применения, таких как: астрофизические исследования [3]; аналитический химический анализ [4]; клиническая практика [5, 6]; исследование гиперзвукового обтекания объектов авиационной и космической техники [7]; анализ атмосферных аэрозолей [8] и других светорассеивающих систем [9]; исследование оптических свойств нанокompозитных материалов [10, 11]; исследование процессов диффузии [12] и горения [13]; оценка степени окисления металлов в пленке [14] и т.д. Фотометрические методы анализа также широко используются в промышленности для идентификации металлов и примесей в них, например, в соответствии с ГОСТ 27981-88. Общими и наиболее серьезными проблемами, возникающими при разработке фотометрических приборов, являются фоновая засветка [15], тепловой дрейф и шумовой порог [16].

Учитывая столь широкое использование фотометрических методов диагностики, промышленность производит большое разнообразие фотометрического и спектрофотометрического оборудования: КФК-3, 5, Unico 2100, Apel PD303, SolidSpec-3700 и т.д. В качестве источников света используются дейтериевые, криптоновые, галогенные лампы, работающие в непрерывном режиме излучения и имеющие ресурс, не превышающий 5 тыс. ч (производители PHILIPS, OSRAM и др.). Турби-

диметрические методы с использованием данных приборов позволяют получать важные характеристики исследуемых объектов: размеры макро-частиц в растворах, их концентрации, коэффициенты диффузии частиц в растворах, массы частиц и т.п. Несмотря на принимаемые меры термостабилизации, паспортный дрейф нулевой линии при измерениях оптической плотности серийными фотометрами оценивается величиной до 0.004 1/ч. Это ограничивает их использование при исследовании длительных процессов, таких как седиментация, например, наноразмерных частиц и полимерных молекул. Поэтому при исследовании малоразмерных объектов широкое распространение получило использование ультрацентрифуг с ускорением до 10^5 g [17]. Однако при анализе биологических объектов с такими перегрузками возможно их разрушение и изменение структуры [6]. Можно предположить, что использование данного воздействия [17] будет оказывать влияние на пространственные характеристики объектов, например, изменять конформацию полимерных молекул при определении их молекулярной массы и характерного размера.

В связи с этим целью данной работы ставилось создание фотометра, обеспечивающего возможность длительных турбидиметрических исследований наноразмерных объектов под действием естественной гравитации без необходимости какой-либо дополнительной защиты от фоновой засветки.

ОПИСАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ ЛАБОРАТОРНОГО ОБРАЗЦА ФОТОМЕТРА

Схема лабораторной установки приведена на рис. 1. Оптическая плотность исследуемого

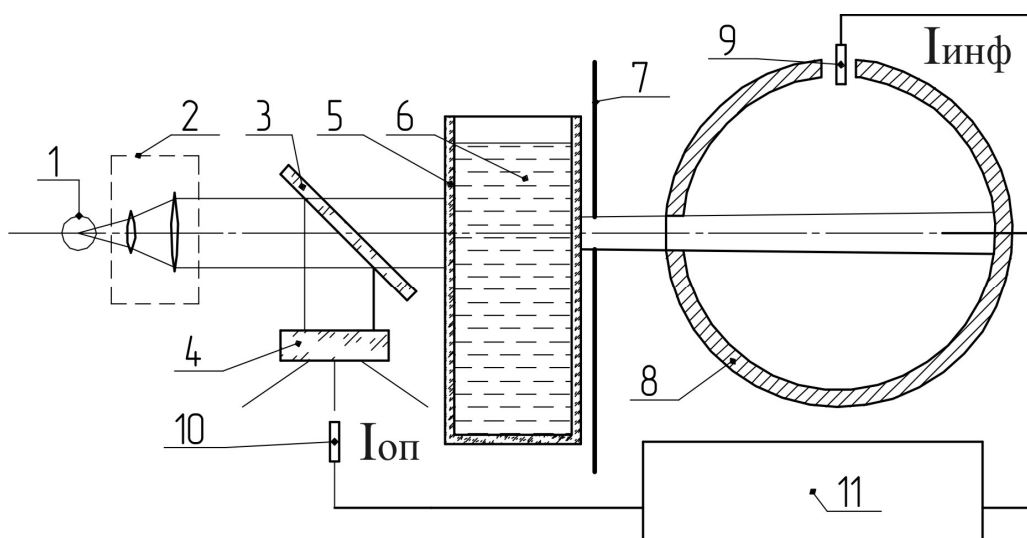


Рис. 1. Структурная схема турбидиметрического фотометра.

1 — светодиод; 2 — коллиматор (при необходимости со светофильтром); 3 — светоделительная пластина; 4 — диффузно-рассеивающая пластина; 5 — кювета; 6 — исследуемый объект (показана кювета с раствором); 7 — диафрагма; 8 — фотометрическая сфера; 9 — сигнальный фотодиод $I_{\text{инф}}$; 10 — опорный фотодиод $I_{\text{оп}}$; 11 — блок регистрации и обработки сигналов

раствора (объекта) определяется по формуле $D = \lg (U_{\text{с0}} / U_{\text{пр}})$, где $U_{\text{с0}}$ — показание сигнального фотодиода 9 при прохождении светового потока через кювету 5 без исследуемого раствора (объекта); $U_{\text{пр}}$ — показание сигнального фотодиода 9 при прохождении светового потока через исследуемый раствор (объект).

Прохождение рассеянного излучения ограничивается диафрагмой 7 и за счет входного отверстия фотометрического шара. Использование диффузно-рассеивающей пластины 4 и фотометрической сферы позволяет ослабить влияние изменений распределения интенсивности света по сечению зондирующего луча на результат измерений.

В качестве источника света использовались светодиоды (BL-L101URC $\lambda = 660$ нм, $\Delta\lambda = 30$ нм). Следует отметить, что разнообразие промышленно выпускаемых светодиодов позволяет перекрыть весь видимый световой диапазон. Питание светодиодов осуществлялось импульсным напряжением с частотой 1522 Гц со стабилизацией тока 15–20 мА. Частота может изменяться в широких пределах, и ее выбор определяется спектром промышленных помех и фоновой засветки в условиях проведения измерений с целью повышения помехозащищенности фотометра.

Выходное напряжение с сигнального и опорного фотодиодов (использовались ФД256 с диапазо-

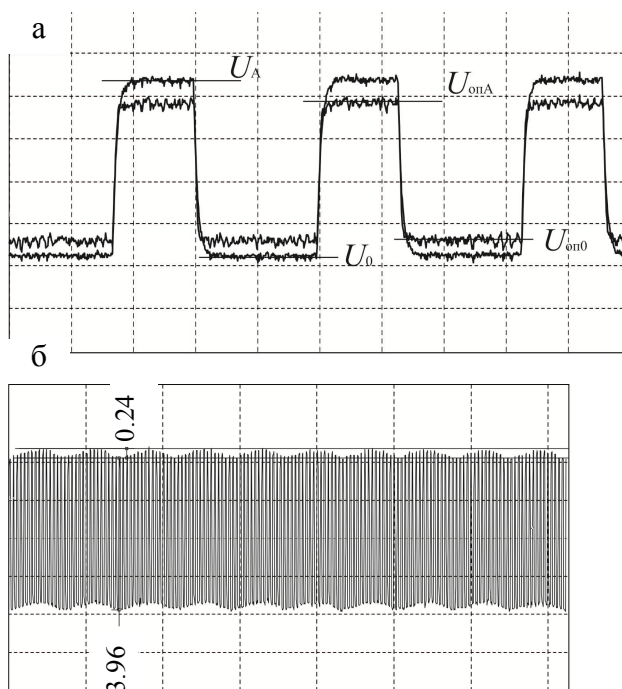


Рис. 2. Осциллограммы сигналов, записанных в файл. а — напряжение сигналов с сигнального и опорного фотодиодов; б — напряжение сигнала с фоновой засветкой от ламп дневного света лабораторного освещения

ном спектральной чувствительности 0.4–1.1 мкм) усиливалось (использовались микросхемы 544УД2 по схеме включения [18]), регистрировалось двухлучевым цифровым осциллографом (8-разрядный АЦП) с частотой дискретизации 100 кГц и записывалось в файл по 10 000 отсчетов. При обработке информации вычислялись величины нулевой линии U_0 и амплитудного значения фототока U_A с усреднением по 20 отсчетам (см. рис. 2, а). Амплитуда напряжения, приведенная к напряжению с опорного фотодиода, вычислялась по формуле $(U_A - U_0) / (U_{опА} - U_{оп0})$ и усреднялась по 150 отсчетам.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОМЕТРА

На рис. 2, б, приведен характерный вид осциллограммы с фоновой засветкой от освещения лампами дневного света без затемнения элементов оптической схемы лабораторного фотометра.

Видно наличие в спектре периодического сигнала 100 Гц составляющей и случайных импульсных промышленных помех. Фоновая засветка с амплитудой 6.1% не привела к существенной дополнительной ошибке регистрации амплитуды импульсов сигнального фотодиода. Обработка результатов измерений оптической плотности без фоновой засветки и при ее наличии в указанном диапазоне показала отклонение результатов измерений, не превышающее 0.27%.

В таблице приведены результаты измерения оптической плотности контрольных образцов из Набора мер оптической плотности (НМПОП-ФЗ-8, класс точности 0.04). Отклонение результатов измерения оптической плотности в диапазоне до 2 не превышает 0.04, что находится на уровне погрешности наиболее распространенных промышленных лабораторных фотометров. Использование данного лабораторного фотометра для измерения оптической плотности выше 2 приводит к существенным погрешностям измерений, что определяется тепловыми шумами фотодиодов.

Результаты измерения оптической плотности контрольных образцов из НМПОП-ФЗ-8 (класс точности 0.04)

Оптическая плотность контрольного образца	0.34	1.13	1.41	1.74	2.14
Результаты измерений	0.35	1.17	1.42	1.71	2.1
Доверительный интервал результатов измерения с вероятностью 0.95	0.001	0.004	0.006	0.011	0.036

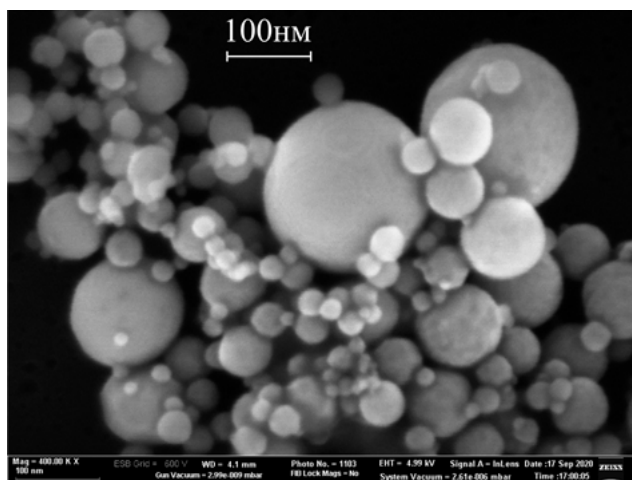


Рис. 3. СЭМ-изображение наноразмерных частиц Al_2O_3

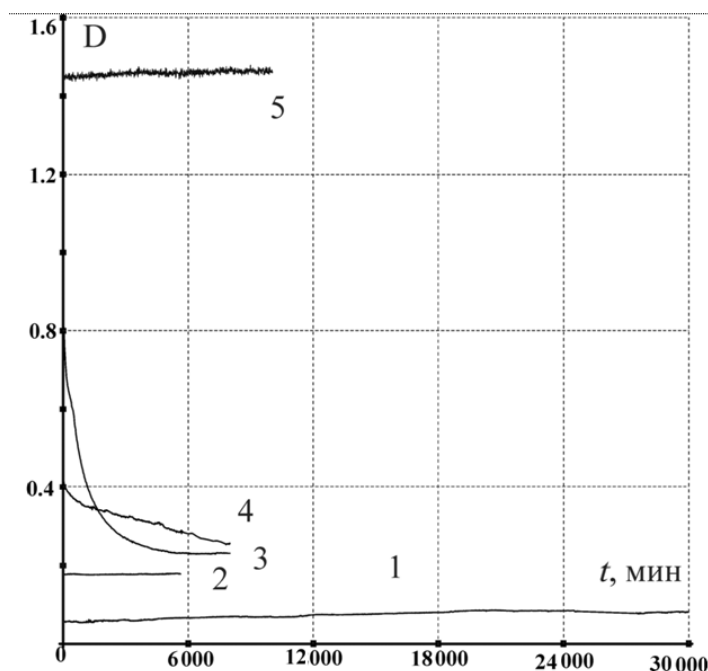


Рис. 4. Результаты измерения оптической плотности D различных объектов при длительном режиме работы.

- 1 — дистиллированная вода в кювете;
- 2 — оптическое стекло с коэффициентом пропускания 50%;
- 3 — седimentация наноразмерных частиц Al_2O_3 со средним диаметром 55 ± 5 нм в дистиллированной воде;
- 4 — полимер ПКК ПСС-70 с молекулярной массой 70 000 а.е.м. в этилацетате;
- 5 — оптическое стекло с коэффициентом пропускания 5%

Как правило, турбидиметрические методы анализа применяются при низких концентрациях растворов с низкой оптической плотностью, чтобы можно было пренебречь взаимодействием между исследуемыми объектами. Поэтому на данном этапе работ ограничимся диапазоном измерений оптической плотности до 2 ед. На рис. 3 приведено СЭМ-изображение частиц Al_2O_3 , а на рис. 4 — результаты измерения оптической плотности различных оптических объектов.

Длительные измерения на оптических объектах с постоянной оптической плотностью (кривые 1, 2 и 5 на рис. 4) дают оценку дрейфа сигнала, который не превышает 0.00017 1/ч в диапазоне оптической плотности до 0.2. В области оптических плотностей выше 1.0 дрейф сигнала достигает величины 0.0008, что во многом определяется изменениями температурного режима светодиода в процессе работы (его термостабилизация не использовалась).

Изменение оптической плотности при седimentации наноразмерных объектов (кривые 3 и 4) на 2–3 порядка выше временного дрейфа сигнала, что говорит о возможности использования рассматриваемой схемы фотометра при применении турбидиметрических методов для анализа характеристик наноразмерных объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, использование светодиодов с импульсным напряжением питания со стабили-

зацией тока в качестве источника света в турбидиметрическом фотометре позволяет существенно сократить (в сравнении с промышленным фотометрическим оборудованием) временной дрейф сигналов при измерении оптической плотности образцов в длительном режиме при сохранении уровня погрешности измерения. Это позволяет использовать его при исследовании седimentации наноразмерных объектов. Импulsный режим работы источника света и статистическая обработка сигналов ослабляет требования к защите от фоновой засветки.

Научные исследования проведены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках исполнения обязательств по Соглашению номер 075-03-2020-051/3 от 09.06.2020 (номер темы fzsu-2020-0021).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуревич М.М. Фотометрия (теория, методы и приборы). Л.: Энергоатомиздат, 1983. 272 с.
2. Волькенштейн А.А., Кувалдин Э.В. Фотоэлектрическая импульсная фотометрия (теория, методы и приборы). Л.: Физматгиз, 1975. 382 с.
3. Бурнашев В.И., Бурнашева Б.А. Фотометрия и спектрофотометрия звезд и галактик. Симферополь: Антиква, 2016. 382 с.
4. Пилипенко А.Т., Пятницкий И.В. Аналитическая химия. Том 1. М.: Химия, 1990. 480 с.
5. Меньшиков В.В. Клиническая лабораторная аналитика. М.: Агат-Мед, 2002. 860 с.

6. Ваганов А.В. Прибор для исследования эндотоксикоза на основе биотестирования // Научное приборостроение. 2003. Т. 13, № 3. С. 62–66.
URL: <http://iairas.ru/mag/2003/abst3.php#abst10>
7. Храмов П.П., Васецкий В.А., Гриценко В.М., Дорошко М.В., Черник М.Ю., Махнач А.И., Ших И.А. Диагностика полей плотности фотометрическим теневым методом при гиперзвуковом обтекании конуса в легкогазовой баллистической установке // ЖТФ. 2019. Т. 89, вып. 10. С. 1506–1512.
DOI: 10.21883/JTF.2019.10.48165.74-18
8. Шмаргунов В.П., Полюкин В.В., Тумаков А.Г., Панченко М.В. Ореольный фотометр закрытого объема // ПТЭ. 2010. № 6. С. 155–157.
9. Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Звезков А.А., Никитин А.П., Нелюбина Н.В., Белокуров Г.М., Каленский А.В. Определение оптических свойств светорассеивающих систем с помощью фотометрического шара // ПТЭ. 2015. № 6. С. 60–66.
10. Лядов Н.М., Гумаров А.И., Валеев В.Ф., Нурдин В.И., Базаров В.В., Файзрахманов И.А. Исследование оптических свойств ZnO и Al_2O_3 , имплантированных ионами серебра // ЖТФ. 2014. Т. 84, вып. 5. С. 62–65.
11. Белов Н.П., Гайдукова О.С., Панов И.А., Патяев А.Ю., Смирнов Ю.Ю., Шерстобитова А.С., Яськов А.Д. Лабораторный спектрофотометр для ультрафиолетовой области спектра // Известия ВУЗОВ. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 5. С. 81–87.
12. Красноперов Я.И., Скляренко М.С. Фотометрический способ определения коэффициента диффузии в водных растворах красителей в тонкой горизонтальной ячейке // ПТЭ. 2017. № 6. С. 123–129.
13. Самсонов В.П., Мурунов Е.Ю., Алексеев М.В. Роль вихревых структур в механизме возбуждения автоколебательного горения конденсированных систем // ЖТФ. 2008. Т. 78, вып. 8. С. 34–40.
14. Назаров Д.В., Осмоловская О.М., Бобрышева Н.П., Смирнов В.М., Мурин И.В. Особенности фазовых переходов в наноразмерном диоксиде ванадия: магнитные характеристики // Российские нанотехнологии. 2012. № 11-12. С. 75–82.
15. Кувалдин Э.В. Фотометры для измерения коэффициентов отражения природных объектов в спектральной области излучения солнца // Научное приборостроение. 2005. Т. 15, № 1. С. 21–28.
URL: <http://iairas.ru/mag/2005/abst1.php#abst2>
16. Кувалдин Э.В. Системный подход к энергетическому расчету фотометрического прибора // Научное приборостроение. 2003. Т. 13, № 2. С. 52–56.
URL: <http://iairas.ru/mag/2003/abst2.php#abst8>
17. Millard M.M., Wolf W.J., Dintzis F.R., Willett J.L. The hydrodynamic characterization of waxy maize amylopectin in 90% dimethyl sulfoxide–water by analytical ultracentrifugation, dynamic, and static light scattering // Carbohydrate Polymers. 1999. Vol. 39. P. 315–320.
18. Хоббс Ф.С.Д. Усилители для фотодиодов на операционных усилителях // Компоненты и технологии. 2009. № 2. С. 42–50.

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, Казань
(Данилаев М.П., Карандашов С.А., Куклин В.А., Сахабудинов А.Ж., Хуссейн С.М.Р.Х.)

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань (Куклин В.А.)

Университет Кербелы, Кербела, Ирак
(Хуссейн С.М.Р.Х.)

Контакты: Куклин Владимир Александрович,
iamkvova@gmail.com

Материал поступил в редакцию 26.03.2021

TURBIDIMETRIC PHOTOMETER FOR STUDYING THE SEDIMENTATION OF NANOSIZED OBJECTS

M. P. Danilaev¹, S. A. Karandashov¹, V. A. Kuklin^{1,2},
A. Zh. Sakhabutdinov¹, S. M. R. H. Hussein^{1,3}

¹Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev, Kazan, Russia

²Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia

³University of Karbala, Karbala, Iraq

A turbidimetric photometer with a pulsed mode of operation of a light source is analyzed. The device makes it possible to conduct sedimentation studies of nanoscale object in terms of laboratory background illumination with a study duration of more than 500 hours. The functional diagram of the laboratory device sample is described and experimental surveys of some characteristics are presented.

Keywords: turbidimetric photometer, background illumination, zero line drift

INTRODUCTION

Photometry, having emerged as a line of research into the characteristics of light fluxes produced by continuous and pulsed light sources [1, 2], has become one of the most powerful tools in experimental researches. The prevalence of photometric methods is characterized by a short listing of their application areas, such as: astrophysical research [3]; analytical chemical analysis [4]; clinical practice [5, 6]; study of hypersonic flow around objects of aviation and space technology [7]; analysis of atmospheric aerosols [8] and other light-scattering systems [9]; investigation of the optical properties of nanocomposite materials [10, 11]; investigation of diffusion [12] and combustion [13] processes; evaluation of the oxidation state of metals in the film [14], etc. Photometric methods of analysis are also widely used in industry to identify metals and impurities in them, for example, in accordance with the GOST / State Standard of Russia 27981-88. The common and most serious problems arising in the development of photometric devices are background illumination [15], thermal drift and noise threshold [16].

Given such widespread use of photometric diagnostic methods, the industry produces a wide variety of photometric and spectrophotometric equipment: КФК-3, 5, Unico 2100, Apel PD303, SolidSpec-3700 etc. Deuterium, krypton, halogen lamps operating in a continuous mode of radiation and having an operating life not exceeding 5 thousand hours (by PHILIPS, OSRAM, etc.) are used as light sources. Turbidimetric methods using these devices let to obtain important characteristics of the objects under study: sizes of macroparticles in solutions, their concentrations, diffusion coefficients of particles in solutions, particle masses, etc. Despite the thermal stabilization

measures taken, the certificate drift of the baseline when measuring the optical density with serial photometers is estimated to be up to 0.004 1 / h. This limits their use in the study of long-term processes, such as sedimentation, for example, of nanosized particles and polymer molecules. Therefore, in the study of small-sized objects, the use of ultracentrifuges with an acceleration of up to 10^5 g has become widespread [17]. However, when analyzing biological objects with such overloads, their destruction and structural changes are possible [6]. It can be assumed that the exerted effect [17] will impact the spatial characteristics of objects, for example, by means of changing the conformation of polymer molecules when determining their molecular weight and characteristic size.

In this regard, the goal of this work was to create a photometer that provides the possibility of long-term turbidimetric studies of nanoscale objects under the influence of natural gravity without the need for any additional protection from background illumination.

DESCRIPTION OF THE FUNCTIONAL DIAGRAM OF THE PHOTOMETER LABORATORY SAMPLE

The diagram of the laboratory setup is shown in Fig. 1. The optical density of the investigated solution (object) is calculated by the formula $D = \lg(U_{c0}/U_{np})$, where U_{c0} is the readings of the signal photodiode 9 when the light flux passes through the cuvette 5 without the test solution (object); U_{np} is the readings of the signal photodiode 9 when the light flux passes through the test solution (object).

The passage of the scattered radiation is limited by the diaphragm 7 and the inlet of the photometric ball. The use of a diffuse-scattering plate 4 and a photometric sphere makes it possible to weaken the influence of changes in the distribution of *luminous* intensity along

Fig. 1. Block diagram of a turbidimetric photometer.

1 — LED; 2 — collimator (if necessary with a light filter); 3 — beam splitter; 4 — diffuse-scattering plate; 5 — cuvette; 6 — object under study (the cuvette with the solution is shown); 7 — diaphragm; 8 — photometric sphere; 9 — signal photodiode $I_{\text{сф}}$; 10 — reference photodiode $I_{\text{он}}$; 11 — block of registration and processing of signals

Fig. 2. Oscillograms of signals recorded in a file.

a — voltage of signals from signal and reference photodiodes; b — voltage of signal with background illumination of fluorescent lamps of laboratory lighting

the cross-section of the probing beam on the measurement result.

LEDs (BL-L101URC $\lambda = 660 \text{ nm}$, $\Delta\lambda = 30 \text{ nm}$) were used as a light source. It should be noted that the variety of industrially produced LEDs allows covering the entire visible light range. The LEDs were powered by a pulsed voltage with a frequency of 1522 Hz and a current stabilization of 15–20 mA. The frequency can vary over a wide range, and its choice is determined by the spectrum of industrial noise and background illumination in the measurement conditions in order to increase the noise immunity of the photometer.

The output voltage from the signal and reference photodiodes ($\Phi\text{Д}256$ with a spectral sensitivity range of 0.4–1.1 μm) was amplified (544YД2 microcircuits were used according to the switching circuit [18]), recorded with the use of a two-beam digital oscilloscope (8-bit АЦП) with a sampling rate of 100 kHz and saved in files per 10 000 counts. When processing the information, the values of the zero line U_0 and the amplitude value of the photo-induced current U_A were calculated with averaging over 20 counts (see Fig. 2, a). Voltage amplitude, accounted to voltage across a reference photodiode, was calculated by the formula $(U_A - U_0) / (U_{\text{онА}} - U_{\text{он0}})$ and averaged over 150 counts.

STUDY OF PHOTOMETER CHARACTERISTICS

In Fig. 2, b, a typical oscillogram form of a background illumination of fluorescent lamps without darkening the optical scheme elements of the laboratory photometer is shown.

One can see the presence of a periodic signal of 100 Hz component and random impulse industrial noise in the spectrum. Background illumination with

an amplitude of 6.1% did not lead to a significant additional error in recording the amplitude of the signal photodiode pulses. The processing of the optical density measurement results without background illumination and in its presence in the specified range showed a deviation of the measurement results not exceeding 0.27%.

The table shows the results of measuring the optical density of reference samples, taken from the Set of measures of optical density (НМПОП-Ф3-8, accuracy grade 0.04). The deviation of the optical density measurement results in the range up to 2 does not exceed 0.04, which is at the level of the error of the most common industrial laboratory photometers. The use of this laboratory photometer to measure optical density above 2 leads to significant measurement errors, which are caused by the thermal noise of the photodiodes.

As a rule, turbidimetric methods are used for analysis of solutions with low concentrations and low optical density, so that the interaction between the objects under study can be neglected. Therefore, at this stage of work, we restrict ourselves to the range of measurements of optical density up to 2 units. Fig. 3 shows an SEM image of Al_2O_3 particles, and Fig. 4 shows the results of measuring the optical density of various optical objects.

Long-term measurements of optical objects with constant optical density (curves 1, 2, and 5 in Fig. 4) let to estimate the signal drift, which does not exceed 0.00017 1/h in the optical density range up to 0.2. In the region of optical densities above 1.0, the signal drift reaches 0.0008, which is largely determined by changes in the temperature regime of the LED during operation (its thermal stabilization was not used).

The results of measuring the optical density of check samples, taken from НМПОП-Ф3-8 set (accuracy grade 0.04)

Check sample optical density	0.34	1.13	1.41	1.74	2.14
Measurement results	0.35	1.17	1.42	1.71	2.1
Confidence interval of measurement results with probability 0.95	0.001	0.004	0.006	0.011	0.036

Fig. 3. SEM image of nanosized Al_2O_3 particles

Fig. 4. The results of measuring the optical density of various objects during long-term operation.

- 1 — distilled water in a cuvette;
- 2 — optical glass with a transmission ratio of 50%;
- 3 — sedimentation of nanoscale Al_2O_3 particles with an average diameter of 55 ± 5 nm in distilled water;
- 4 — polymer PCC PSS-70 with a molecular weight of 70 000 amu. in ethyl acetate;
- 5 — optical glass with a transmission ratio of 5%

The change in optical density during sedimentation of nanosized objects (curves 3 and 4) is 2–3 orders of magnitude higher than the time drift of the signal, which indicates the possibility of using the considered photometer scheme to analyze the characteristics of nanosized objects by means of turbidimetric methods.

CONCLUSION

Thus, the use of LEDs with a pulsed voltage supply and a current stabilization as a light source in a turbidimetric photometer can significantly reduce (in comparison with industrial photometric equipment) the time drift of signals when measuring the optical density of samples in a long-term mode while maintaining the level of measurement error. This makes it possible to use it in studies of sedimentation of nanoscale objects. The used pulsed mode of operation of the light source and statistical processing of signals dumbs down the requirements for protection against background illumination.

Scientific research was carried out with the financial support of the Ministry of Higher Education and Science of Russia under the Agreement No. 075-03-2020-051 / 3 dated 06/09/2020 (topic number fzs-2020-0021).

REFERENCES

1. Gurevich M.M. *Fotometrija (teorija, metody i pribory)* [Photometry (theory, methods and instruments)]. Leningrad, Jenergoatomizdat Publ., 1983. 272 p. (In Russ.).
2. Vol'kenshtejn A.A., Kuvaldin Je.V. *Fotojelektricheskaja impul'snaja fotometrija (teorija, metody i pribory)* [Photoelectric pulse photometry (theory, methods and instruments)]. Leningrad, Fizmatgiz Publ., 1975. 382 p. (In Russ.).
3. Burnashev V.I., Burnasheva B.A. *Fotometrija i spektrofotometrija zvezd i galaktik* [Photometry and spectrophotometry of stars and galaxies]. Simferopol, Antikva Publ., 2016. 382 p. (In Russ.).
4. Pilipenko A.T., Pjatnickij I.V. *Analiticheskaja himija. T. I.* [Analytical chemistry. Vol. 1]. Moscow, Himija Publ., 1990. 480 p. (In Russ.).
5. Men'shikov V.V. *Klinicheskaja laboratornaja analitika* [Clinical Laboratory Analytics]. Moscow, Agat-Med Publ., 2002. 860 p. (In Russ.).
6. Vaganov A.V. [Bioassay device for investigation of endotoxicosis]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2003, vol. 13, no. 3, pp. 62–66. URL: <http://iairas.ru/mag/2003/abst3.php#abst10> (In Russ.).
7. Khramtsov P.P., Vasetskii V.A., Grishchenko V.M., Doroshko M.V., Chernik M.Y., Makhnach A.I., Shikh I.A. [Diagnostics of density fields in hypersonic flows around a cone in a light-gas gun by the shadow photometric method]. *Zhurnal tekhnicheskij fiziki* [Technical Physics], 2019, vol. 89, is. 10, pp. 1506–1512. DOI: 10.1134/S1063784219100104
8. Shmargunov V.P., Pol'kin V.V., Tumakov A.G., Panchenko M.V. [Closed volume halo photometer]. *Pribory i tehnika jeksperimenta* [Instruments and Experimental Techniques], 2010, no. 6, pp. 155–157. (In Russ.).
9. Aduv B.P., Nurmukhametov D.R., Zvekov A.A., Nikitin A.P., Nelyubina N.V., Belokurov G.M., Kalenskii A.V. [Determining the optical properties of light-diffusing systems using a photometric sphere]. *Pribory*

- i tehnika jeksperimenta* [Instruments and Experimental Techniques], 2015, no. 6, pp. 60–66. (In Russ.).
10. Lyadov N.M., Valeev V.F., Nuzhdin V.I., Bazarov V.V., Faizrakhmanov I.A., Gumarov A.I. [Optical properties of ZnO and Al₂O₃ implanted with silver ions]. *Zhurnal tehnikeskoy fiziki* [Technical Physics], 2014, vol. 84, is. 5, pp. 62–65. (In Russ.).
 11. Belov N.P., Gaydukova O.S., Panov I.A., Patyaev A., Smirnov Y., Sherstobitova A.S., Yaskov A.D. [Laboratory spectrophotometer for ultraviolet spectral region]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [News of higher educational institutions. Instrument making.], 2011, vol. 54, no. 5, pp. 81–87. (In Russ.).
 12. Krasnoperov Y.I., Sklyarenko M.S. [A photometric method for determining the diffusivity of dyes in aqueous solutions in a thin horizontal cell]. *Pribory i tehnika jeksperimenta* [Instruments and Experimental Techniques], 2017, no. 6, pp. 123–129. (In Russ.).
 13. Samsonov V.P., Murunov E.Y., Alexeev M.V. [Role of vortex structures in excitation of condensed system self-oscillatory burning]. *Zhurnal tehnikeskoy fiziki* [Technical Physics], 2008, vol. 78, is. 8, pp. 34–40. (In Russ.).
 14. Nazarov D.V., Osmolovskaya O.M., Bobrysheva N.P., Smirnov V.M., Murin I.V. [Peculiarities of phase transitions in nanosized vanadium dioxide: magnetic characteristics]. *Rossiyskie nanotekhnologii* [Nanotechnologies in Russia], 2012, no. 11–12, pp. 75–82. (In Russ.).
 15. Kuvaldin E.V. [Solar spectral region photometers for natural objects reflectance measurements]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation]. 2005, vol. 15, no. 1, pp. 21–28.
URL: <http://iairas.ru/mag/2005/abst1.php#abst2> (In Russ.).
 16. Kuvaldin E.V. [System approach to photometer energy calculations]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation]. 2003. T. 13, № 2. С. 52–56. URL: <http://iairas.ru/mag/2003/abst2.php#abst8> (In Russ.).
 17. Millard M.M., Wolf W.J., Dintzis F.R., Willett J.L. The hydrodynamic characterization of waxy maize amylopectin in 90% dimethyl sulfoxide–water by analytical ultracentrifugation, dynamic, and static light scattering. *Carbohydrate Polymers*, 1999, vol. 39, pp. 315–320. DOI: 10.1016/S0144-8617(99)00021-1
 18. Hobbs F.S.D. [Amplifiers for photodiodes on operational amplifiers]. *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies], 2009, vol. 2, no. 91, pp. 46–50. (In Russ.).

Contacts: *Kuklin Vladimir Alexandrovich*,
iamkvova@gmail.com

Article received by the editorial office on 26.03.2021