

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 53.08; 544. 77

АВТОМАТИЗАЦИЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА СТАТИЧЕСКОГО СВЕТОРАССЕЯНИЯ

Рогачев Альберт Александрович, студент, направление подготовки 03.03.02 Физика, Оренбургский государственный университет, Оренбург
e-mail: albert.r2099@gmail.com

Научный руководитель: **Алиджанов Эскендер Куртаметович**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры биофизики и физики конденсированного состояния, Оренбургский государственный университет, Оренбург
e-mail: ekaalid@yandex.ru

Аннотация. Сформирован аппаратно-программный комплекс автоматизированной регистрации угловых и кинетических зависимостей статического светорассеяния коллоидных растворов. Аппаратная часть комплекса включает в себя сборку Arduino Nano (микроконтроллер ATmega328), драйвер шагового двигателя A4988, биполярный шаговый двигатель. Программная часть комплекса состоит из скетча, написанного в среде программирования Arduino IDE, и оконного приложения, сформированного в среде Visual Studio на языке C#. Программная часть комплекса позволяет задавать конфигурацию процедуры измерений (шаг изменения угла рассеяния, временной диапазон кинетических измерений), производить измерения интенсивности светорассеяния в автоматическом режиме с последующим формированием текстового файла с результатами эксперимента.

На основе созданного аппаратно-программного комплекса проведены исследования агрегации водного раствора коллоидного золота. Получен ряд оригинальных экспериментальных результатов.

Ключевые слова: автоматизация эксперимента, USB интерфейс, программируемый микроконтроллер, статическое рассеяние света, коллоидные растворы, фрактальная размерность.

Для цитирования: Рогачев А. А. Автоматизация установки для реализации метода статического светорассеяния // Шаг в науку. – 2024. – № 3. – С. 9–15.

AUTOMATION OF INSTALLATION FOR IMPLEMENTING THE METHOD OF STATIC LIGHT SCATTERING

Rogachev Albert Alexandrovich, student, training program 03.03.02 Physics, Orenburg State University, Orenburg
e-mail: albert.r2099@gmail.com

Research advisor: **Alidzhanov Eskender Kurtametovich**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Associate Professor of the Department of Biophysics and Condensed Matter Physics, Orenburg State University, Orenburg
e-mail: ekaalid@yandex.ru

Abstract. A hardware and software complex for automated registration of angular and kinetic dependences on static light scattering of colloidal solutions has been formed. The hardware part of the complex includes an Arduino Nano assembly (ATmega328 microcontroller), A4988 stepper motor driver, and a bipolar stepper motor. The software part of the complex consists of a sketch written in the Arduino IDE programming environment and a window application

generated in the Visual Studio environment in C#. The software part of the complex allows us to set the configuration of the measurement procedure (the step of changing the scattering angle, the time range of kinetic measurements), to measure the intensity of light scattering in automatic mode, followed by the formation of a text file with the results of the experiment.

On the basis of the created hardware and software complex, studies of the aggregation of an aqueous solution of colloidal gold were carried out. A number of original experimental results have been obtained.

Key words: experiment automation, USB interface, programmable microcontroller, static light scattering, colloidal solution, fractal dimension.

Cite as: Rogachev, A. A. (2024) [Automation of installation for implementing the method of static light scattering]. *Shag v nauku* [Step into science]. Vol. 3, pp. 9–15.

Автоматизированные системы сбора и обработки данных, управления внешними устройствами можно реализовать при помощи микроконтроллера, сопряженного с ПК через USB интерфейс. Такие системы удобны при использовании ноутбуков, имеющих ограниченные возможности подключения внешней аппаратуры [2]. Предлагаемая схема автоматизации позволяет решить (в рамках своих ограничений) задачу управления различными экспериментальными установками, не связанными с регистрацией быстропротекающих процессов.

Для повышения экспрессности, воспроизводимости и точности измерений проводили автоматизацию установки статического светорассеяния с угловым разрешением.

Общий вид экспериментальной установки статического светорассеяния приведен на рисунке 1 а. На гониометрическом столе смонтирован гелий-неоновый лазер и кюветное отделение для виалы с исследуемым раствором. Лазерное вертикально-поляризован-

ное излучение, рассеиваемое исследуемым раствором, направляется на вход неподвижного измерительного тракта, сформированного на основе ФЭУ-68. Поворот гониометрического стола (совместно лазером и кюветным отделением) позволяет изменять угол (от 40° до 130°), под которым осуществляется измерение сигнала светорассеяния. В изначальном варианте вращение гониометрического стола проводилось вручную. Показания интенсивности сигнала светорассеяния считывались визуально со шкалы стрелочного прибора У5-6.

Общая схема автоматизации установки изображена на рисунке 1 б. Микроконтроллер Arduino (ATmega328P) интегрируется с ПК через последовательный USB порт. Микроконтроллер ATmega328P – чип на архитектуре AVR с разрядностью 8 бит, максимальной тактовой частотой 20 МГц, 32 Кбайтами Flash памяти, 2 Кбайтами ОЗУ памяти [1]. Данный микроконтроллер программируется в среде Arduino IDE. Микроконтроллер (МК) ATmega328P имеет 13 цифровых выходов и 5 аналоговых входов (пинов).

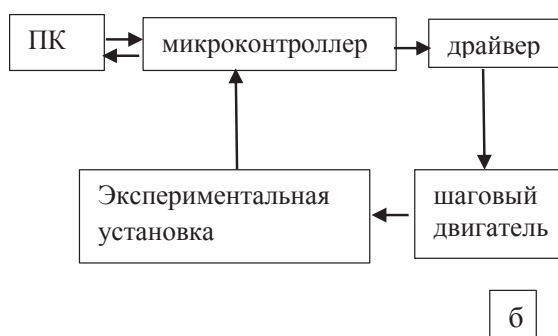
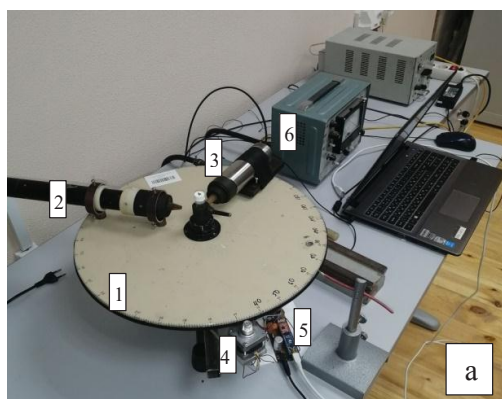


Рисунок 1. А – общий вид экспериментальной установки, б – система автоматизации установки
1 – гониометрический стол, 2 – лазер, 3 – ФЭУ-68, 4 – шаговый двигатель, 5 – плата микроконтроллера, 6 – усилитель электрометрический У5-6.

Источник: разработано автором

В среде .NET для программирования взаимодействия с последовательным портом существует специальный ресурс последовательного порта – SerialPort. На его основе и строится реализация данного проекта. Питание микроконтроллера ATmega328 осуществляется через Vcc и GND выводы USB разъема. Через два других сигнальных проводника (DATA+ и DATA-) поддерживается связь между компьютером и МК Arduino.

В качестве исполнительного механизма управления использовался биполярный шаговый двигатель. Управление работой шагового двигателя осуществляется с помощью драйвера шагового двигателя A4988.

Поворот ротора шагового двигателя на определенный угол (1 полный шаг $-0,9^\circ$) происходит, когда на обмотки статора поступает серия токовых импульсов определенной последовательности. Драйвер A4988 имеет три вывода селектора размера шага (разрешения), а именно: MS0, MS1 и MS2. Установив соответствующие логические уровни на эти контакты, мы можем настроить работу двигателя на одно из пяти разрешений микрошага (таблица 1). Управление работой ШД осуществляется подачей одиночных импульсов с цифрового пина Arduino на контакт драйвера Step (рисунок 2).

Таблица 1. Значения логических уровней на выводах драйвера для различных режимов работы шагового двигателя

MS0	MS1	MS2	Разрешение микрошага
0	0	0	Полный шаг
1	0	0	1/2 шага
0	1	0	1/4 шага
1	1	0	1/8 шага
1	1	1	1/16 шага

Источник: разработано автором

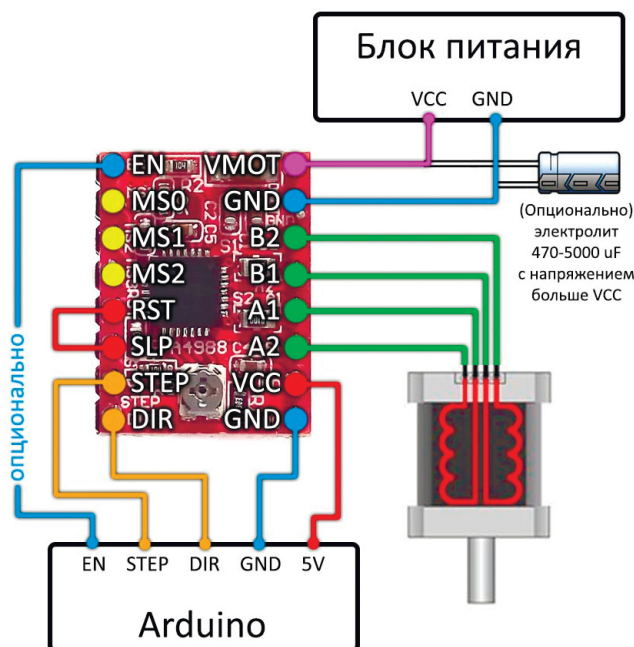


Рисунок 2. Схема подключения шагового двигателя

Источник: взято из avRussia.ru. – URL: <https://avrussia.ru/schemas/sc006572> (дата обращения: 15.03.2024)

Подача на контакт DIR логического 0 или 1 позволяет изменять направление вращения ротора ШД.

Измерительная система установки состоит из фотоэлектронного умножителя ФЭУ-68 сопряженного с электрометрическим усилителем У5-6. Выходной сигнал с У5-6 (0-5 В) поступает на аналого-цифровой вход АЦП Arduino. АЦП преобразует аналоговый сигнал в соответствующее цифровое значение. Микроконтроллер ATmega328P имеет АЦП разрядностью в 10 бит, т.е. поступающее на вход аналоговое напряжение преобразуется в число от 0 до 1024. На аналоговые входы допускается подача напряжения от 0 В (GND) до значения опорного напряжения (по умолчанию 5В). МК сравнивает значение поданного на пин напряжения «analogRead» с опорным и выражает результат в долях от 1024 (например - $3/5 * 1024 = 614$). В дальнейшем для перевода этого числа в вольты используется функция «double voltage = analogRead (614*5.0 / 1023);». Таким образом, переменной «voltage» присваивается значение в интервале от 0 до 5В. Результат измерения заносится в память компьютера.

Таким образом, автоматизированная процедура измерений происходит в следующей последовательности:

- шаговый двигатель осуществляет поворот гониометрического стола установки на определённый

угол (по умолчанию на 10^0);

- АЦП цифрует сигнал интенсивности светорассеяния, поступающий с У5-6, и передает результат в ПК.

Такие циклы повторяются определённое количество раз (по умолчанию 8 циклов), осуществляя поворот гониометрического стола относительно фиксированного положения ФЭУ на угол от 40^0 до 130^0 , как по направлению движения «по часовой стрелке» так и в обратном. Результаты измерений сигналов светорассеяния заносятся в память ПК. По окончании процедуры измерений из них формируется текстовый файл.

Для выполнения изложенного алгоритма действий необходимо произвести программирование микроконтроллера ATmega328. Для этого в среде Arduino IDE был сформирован скетч.

Скетч содержит в себе такие функции как:

- инициализация рабочих пинов и переменных;
- управление работой шаговым двигателем;
- измерение сигнала светорассеяния и формирование таблицы результатов измерений.

На языке программирования C# в среде Visual Studio была сформирована специальная программа управления экспериментальной установкой с помощью компьютера. Внешний вид окна программы управления приведен на рисунке 3.

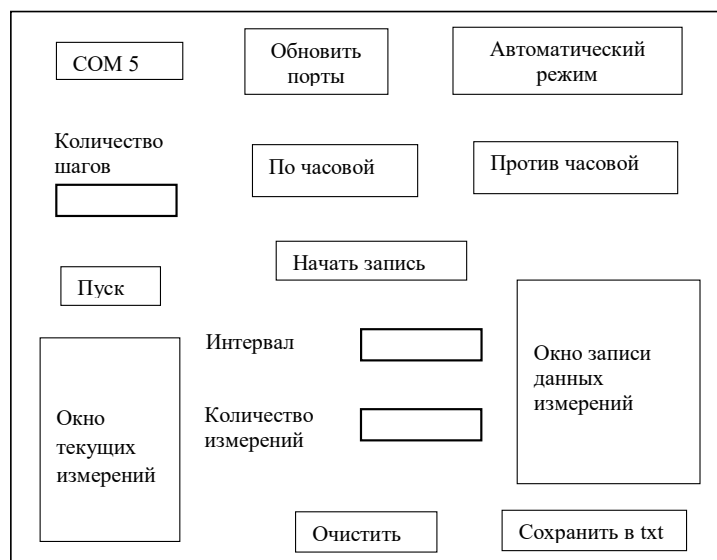


Рисунок 3. Вид оконного приложения для управления работой установки

Источник: разработано автором

Программа управления позволяет задавать количество микрошагов в одном цикле, направление поворота, временной интервал между измерениями,

определять количество измерений в цикле, сохранять результаты измерений в виде текстового файла.

На автоматизированной установке статического

светорассеяния проводили исследования агрегации раствора коллоидного золота после добавления в него в качестве коагулянта $0,27 \cdot 10^{-4}$ М соляной кислоты. Коллоидный раствор золота был получен цитратным методом путём восстановления из хлорида золота [6]. При добавлении в исходный коллоидный раствор коагулянта (пиридин, соляная кислота) инициируется процесс агрегации наночастиц золота (НЧЗ). При

этом скорость агрегации напрямую определяется количеством добавляемого коагулянта и может варьироваться в широких пределах. В результате происходит формирование крупных фрактальных кластеров с фрактальной размерностью $D_f = 1,7 - 2,2$ [4].

На рисунке 4 приведена кинетика изменения интенсивности светорассеяния коллоидного раствора НЧЗ в процессе агрегации.

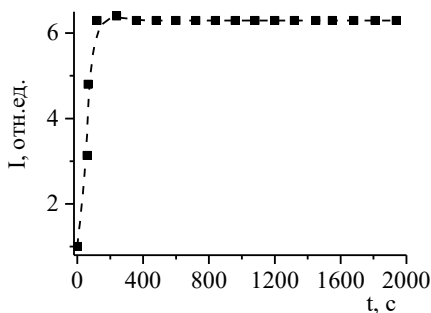


Рисунок 4. Кинетика изменения интенсивности светорассеяния коллоидного раствора золота в процессе коагуляции. Измерения проводились при угле рассеяния 90° .

Источник: разработано автором

Из приведенного графика видно, что на начальном этапе агрегации имеет место резкое усиление сигнала светорассеяния более чем в 6 раз. В дальнейшем интенсивность светорассеяния остается постоянной на протяжении всего процесса агрегации. Согласно теории рассеяния света на фрактальных кластерах [5] рост интенсивности светорассеяния следу-

ет ожидать только до этапа агрегации, при котором размеры кластеров достигают значения $R = q^{-1}$, где $q = (4\pi n/\lambda)\sin(\Theta/2)$ – вектор рассеяния (в нашем случае $q^{-1} = 54$ нм). Усиление сигнала светорассеяния α при формировании кластеров $R \approx 54$ нм можно оценить следующим образом:

$$\alpha = \left(\frac{R_k}{a}\right)^{D_f} = \left(\frac{54}{20}\right)^{D_f} \approx 6,4, \tag{1}$$

здесь за $a = 20$ нм принимается радиус НЧЗ в исходном коллоидном растворе [7]. Оценка величины фрактальной размерности сформированных кластеров согласно соотношению (1) дает значение $D_f \approx 1,8 - 1,9$.

На рисунке 5 представлена угловая зависимость

интенсивности светорассеяния коллоидного раствора золота на начальном (кривая 1) и на конечном этапе агрегации НЧЗ (кривая 2).

Для крупных кластеров $R > q^{-1}$ угловая зависимость интенсивности светорассеяния имеет вид [3]:

$$I(q) \propto (Rq)^{-D_f}. \tag{2}$$

Из (2) следует, что по тангенсу угла наклона линейной аппроксимации графиков угловой зависимости интенсивности светорассеяния можно определить фрактальную размерность кластеров в исследуемом коллоидном растворе.

В автоматическом режиме проводили непрерывную регистрацию угловой зависимости интенсивности светорассеяния коллоидного раствора золота в процессе его агрегации. Используя совокупность

полученных данных, определяли характер временной эволюции величины фрактальной размерности кластеров НЧЗ. Результаты такой процедуры представлены на рисунке 6.

Из графика $D_f(t)$ следует, что в среднем фрактальная размерность кластеров НЧЗ за все время агрегации составляла $D_f \approx 1,95$. При этом в середине временного интервала агрегации величина фрактальной размерности опускалась до значения $D_f \approx 1,8$.

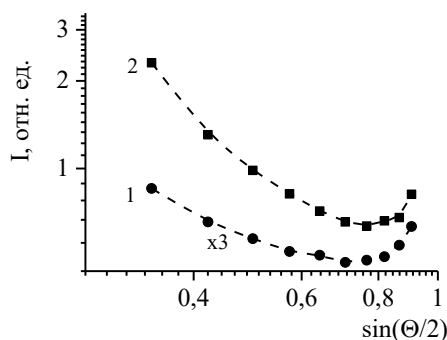


Рисунок 5. Угловые зависимости интенсивности светорассеяния: 1 – исходного раствора коллоидного золота, 2 – после добавления в исходный раствор коагулянта. График 1 представлен в трехкратном увеличении.

Источник: разработано автором

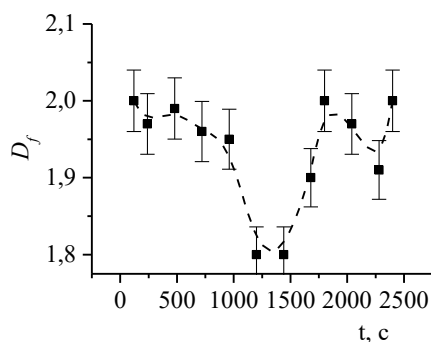


Рисунок 6. Кинетика эволюции фрактальной размерности кластеров Au в процессе коагуляции

Источник: разработано автором

Такие изменения величины фрактальной размерности кластеров в процессе агрегации важно учитывать, поскольку они должны оказывать существенное влияние на изменение скорости кинетики процесса.

На основе программируемого микроконтроллера ATmega328 проведена автоматизация экспериментальной установки регистрации угловых и кинетических зависимостей статического светорассеяния.

В среде программирования Arduino IDE сформирован скетч для программирования микроконтроллера. Для управления установкой с помощью ПК, в среде Visual Studio на языке C# написано специальное оконное приложение.

На базе созданного аппаратно-программного комплекса проведено исследование агрегации водного раствора коллоидного золота. Измерена кинетика изменения интенсивности светорассеяния коллоидного раствора НЧЗ в процессе агрегации. Исследован характер временной эволюции величины фрактальной размерности кластеров НЧЗ в процессе агрегации. Показано, что использование автоматизированного аппаратно-программного комплекса по регистрации угловых и кинетических зависимостей статического светорассеяния существенно расширяет возможности экспериментального исследования коллоидных растворов наночастиц.

Литература

1. Белов А. В. Программирование ARDUINO: создаем практические устройства. – СПб.: Наука и Техника, 2018. – 272 с.
2. Каткова М. Р., Зворыкин И. Ю. Методические возможности автоматизации школьного физического эксперимента // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. Серия: Социальные науки. – 2015. – № 3(39). – С. 248–251.
3. Салаватов Н. А., Дементьева О. В., Рудой В. М. Золотые наностержни с органокремнеземной оболочкой

как платформа для создания многофункциональных наноструктур // Коллоидный журнал. – 2020. – Т. 82, № 6. – С. 733–739. – <https://doi.org/10.31857/s0023291220060129>.

4. Olivier B. J., Sorensen C. M. (1990) Variable aggregation rates in colloidal gold: Kernel homogeneity dependence on aggregant concentration. *Physycal Review A*. Vol. 41, No 4, pp. 2093–2100. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.41.2093>. (In Eng.).

5. Roldugin V. I. (2003) The characteristics of fractal disperse systems. *Russian Chemical Reviews*. Vol. 72. No 11, pp. 913–937. – <https://doi.org/10.1070/rc2003v072n11abeh000829>. (In Eng.).

6. Sorensen C. M. (2001) Light Scattering by Fractal Aggregates: A Review. *Aerosol Science and Technology*. Vol. 35(2). pp. 648–687. – <https://doi.org/10.1080/02786820117868>. (In Eng.).

7. Turkevich J., Stevenson P. C., Hillier J. (1951) A study of the nucleation and growth processes in the synthesis of colloidal gold. *Discussions of the Faraday Society*. Vol. 11., pp. 55–75. – <https://doi.org/10.1039/DF9511100055>. (In Eng.).

Статья поступила в редакцию: 08.05.2024; принята в печать: 03.09.2024.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.