



Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И.Ульянова (Ленина)

Выпускная квалификационная работа на тему:

Разработка установки для создания тонких пленок методом ионного напыления

Студент группы 1281: Андронов Андрей Олегович

Руководитель: асп., асс. каф. МНЭ Матюшкин Лев Борисович

Работа выполнена в СПбГЭТУ «ЛЭТИ», каф. МНЭ, УНЛ
«Наноматериалы»

Санкт-Петербург

2015 г.

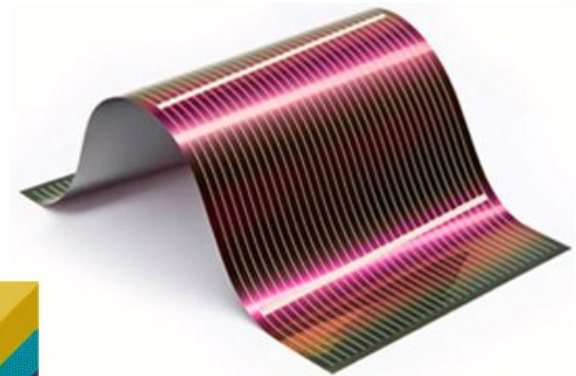
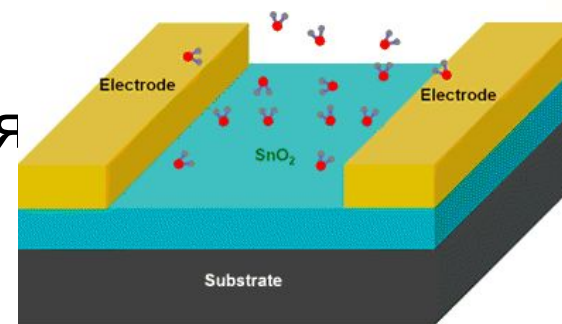
Актуальность работы

Особенности метода ионного наплаивания:

- Прецизионное регулирование толщины синтезируемого слоя
- Нанесение слоев на изделия сложной формы, больших размеров, в том числе на гибкие подложки
- Комнатная температура синтеза
- Использование простых в аппаратном отношении автоматизированных установок

Применение в различных сферах:

- Газовые сенсоры
- Солнечные элементы
- Оптоэлектронные приборы
- Пассивирующие защитные покрытия на поверхности металлов



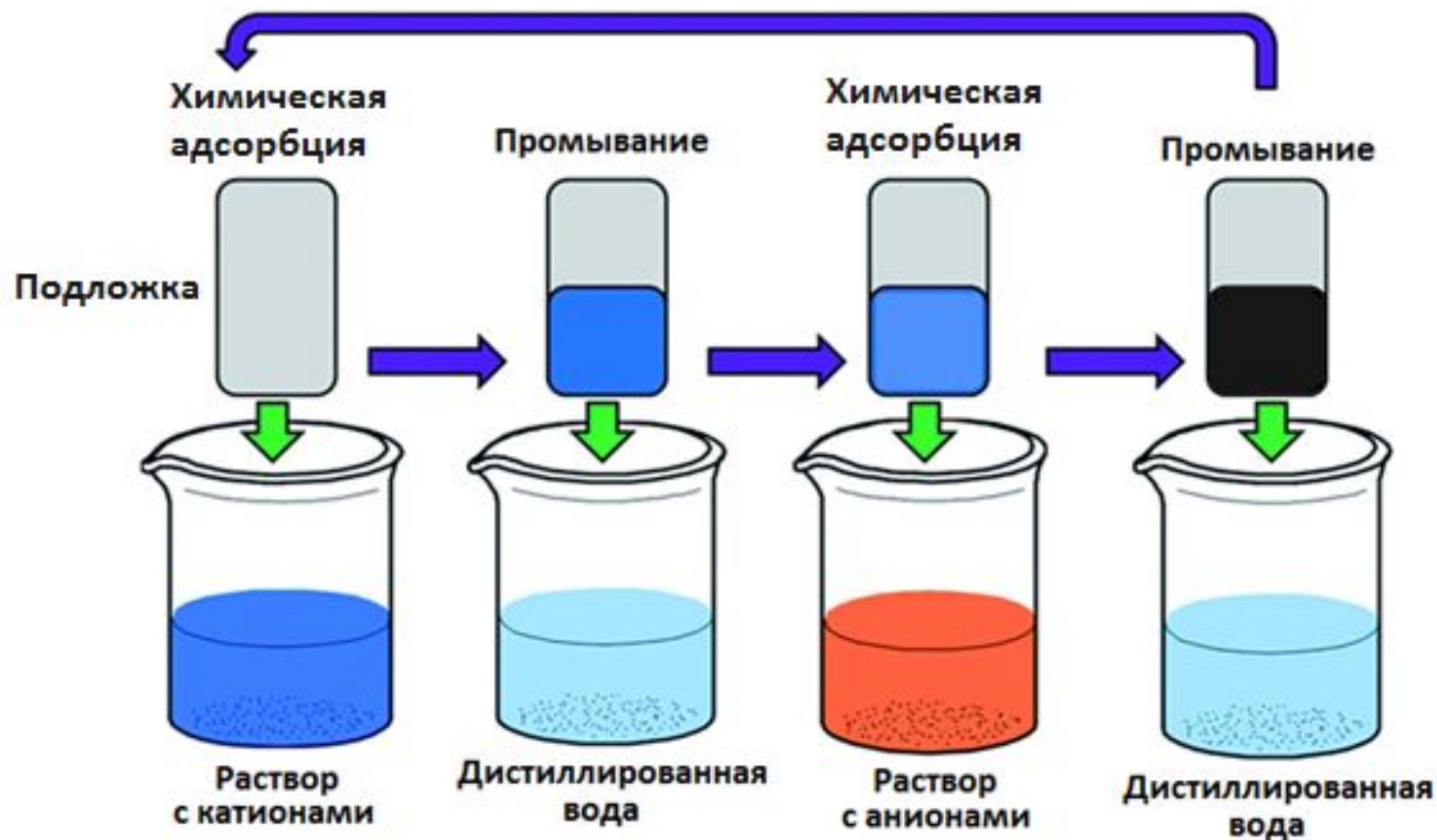
Цель работы

Разработать автоматизированную установку для формирования тонкопленочных покрытий методом ионного наплаивания

Задачи

1. Создать блок управления электромеханической и термостатирующей частями установки.
2. Написать программное обеспечение в среде LabVIEW для управления технологическим процессом нанесения слоев.
3. Проверить работоспособность установки на примере получения тонких полупроводниковых пленок.

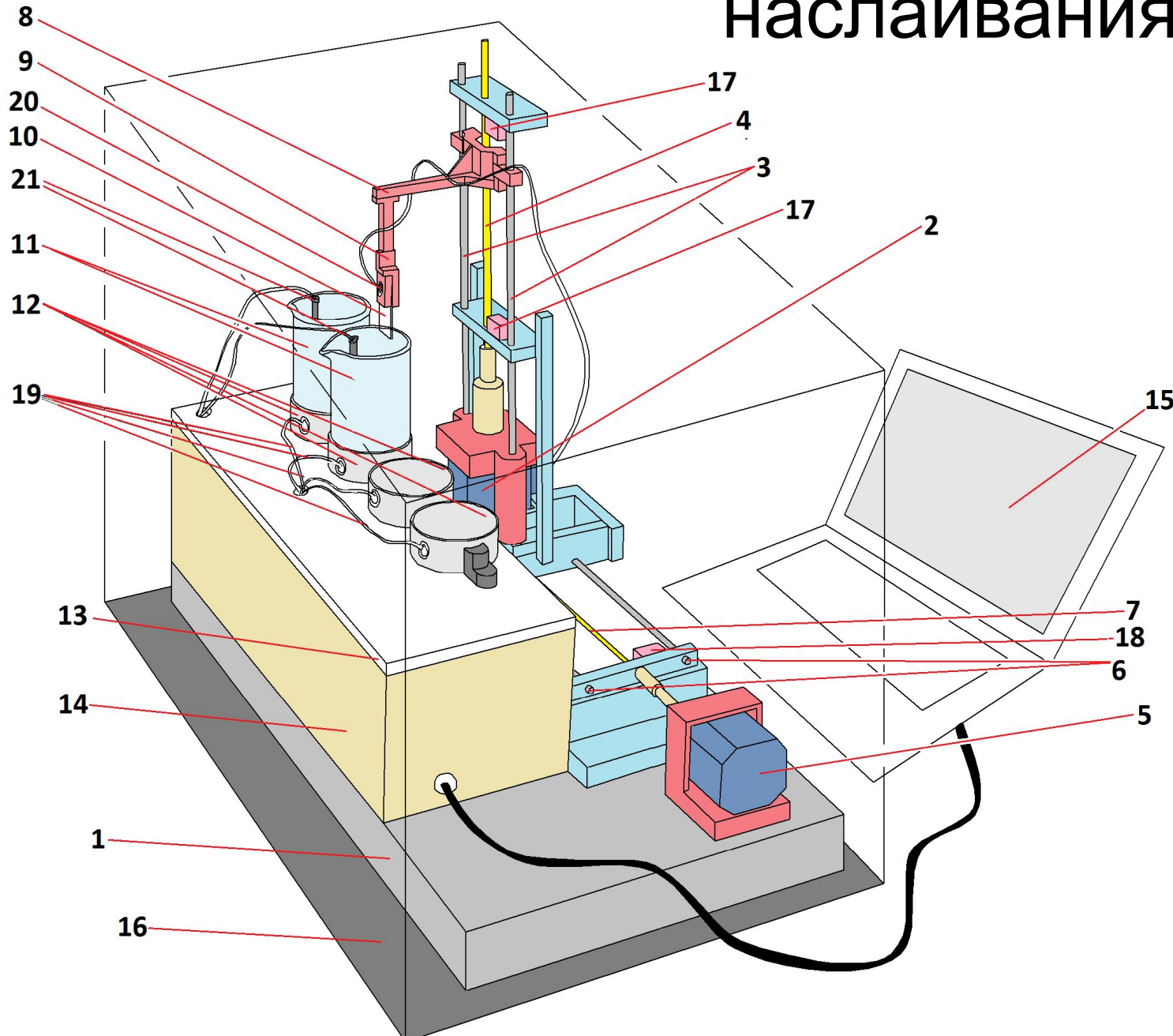
Метод ионного наплаивания (SILAR, SILD)



Метод основан на последовательных реакциях на границе раздела подложка/раствор

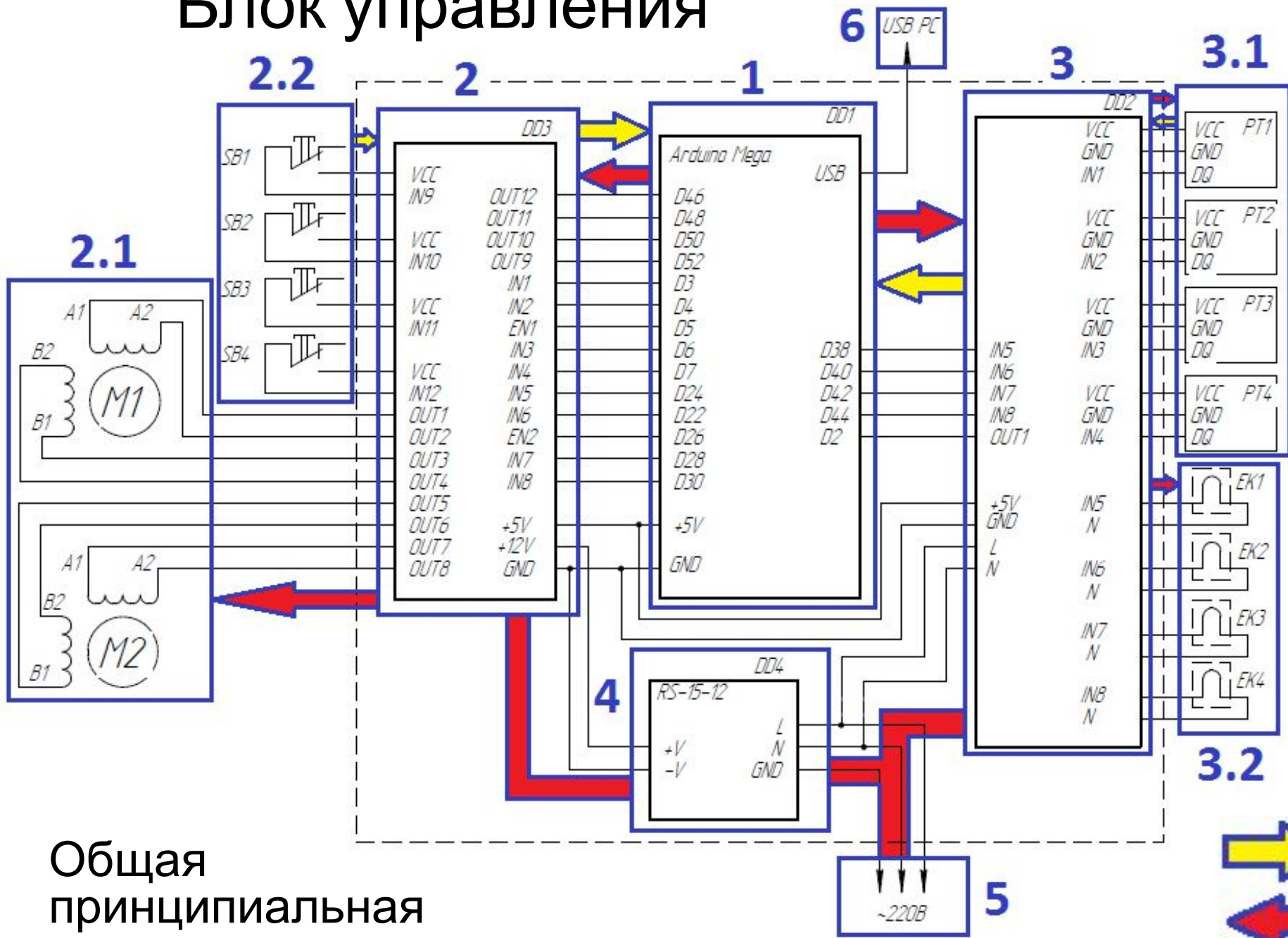
Автоматизированная установка для ионного

наслаивания





1 – основание;
2, 3, 4 – устройство вертикального перемещения;
5, 6, 7 – устройство горизонтального перемещения;
8, 9, 10 – держатель образца с закрепленным в нем образцом;
11 – сосуды для жидкостей;
12, 13 – сосуды закрепленные в нагревателях;
14 – блок управления;
15 – компьютер;
16 – герметичный бокс;
17, 18 – отслеживание положения образца;

Блок управления



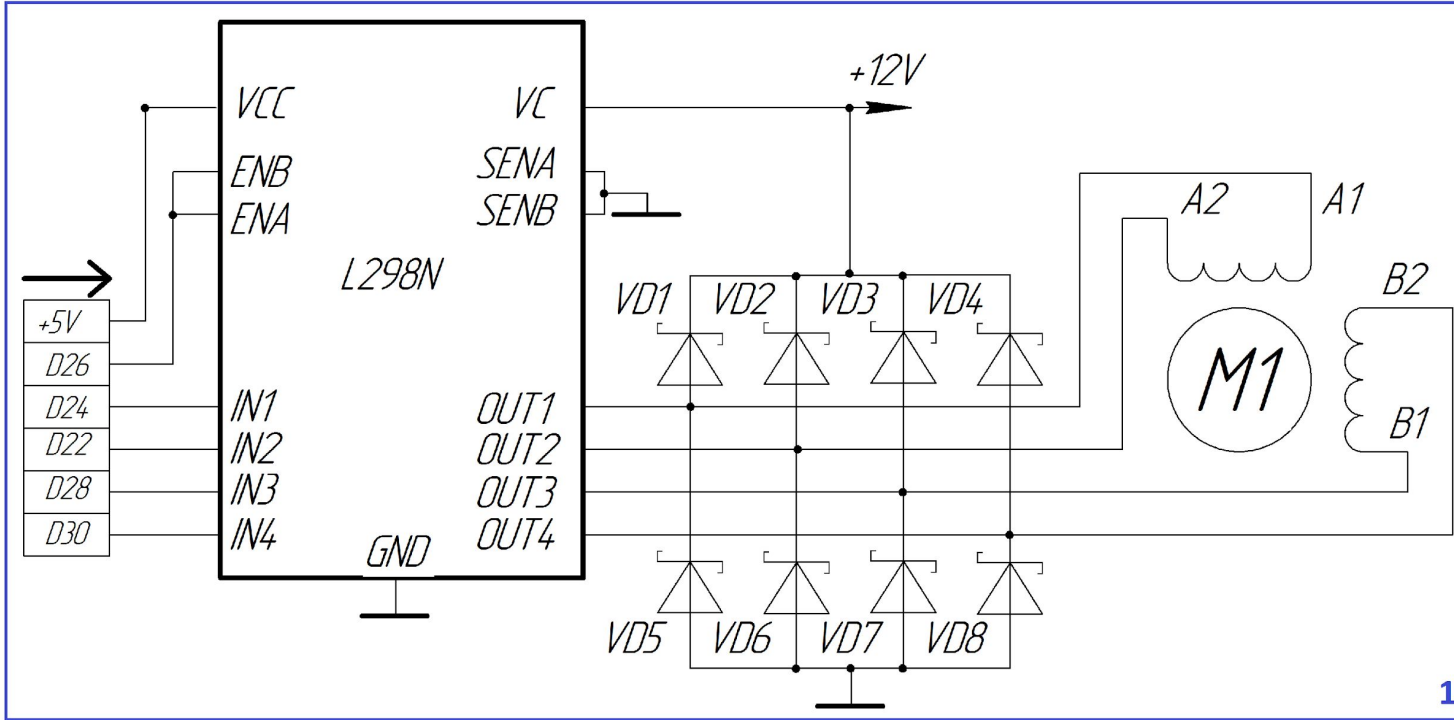
- 1 – плата Arduino Mega;
- 2 – плата управления шаговыми двигателями;
- 2.1 – шаговые двигатели;
- 2.2 – микро-переключатели;
- 3 – плата термостатирования растворов;
- 3.1 – термодатчики;
- 3.2 – нагреватели;
- 4 – источник питания;
- 5 – сеть 220 В;

 Принимаемые сигналы
 Сигналы управления

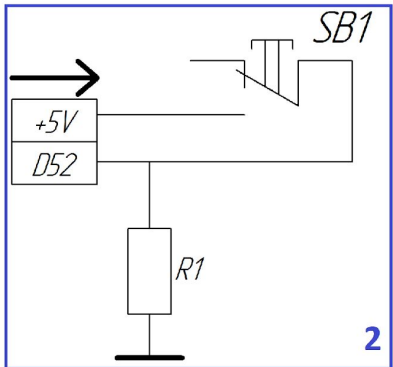
Общая принципиальная электрическая схема

Общая принципиальная электрическая схема

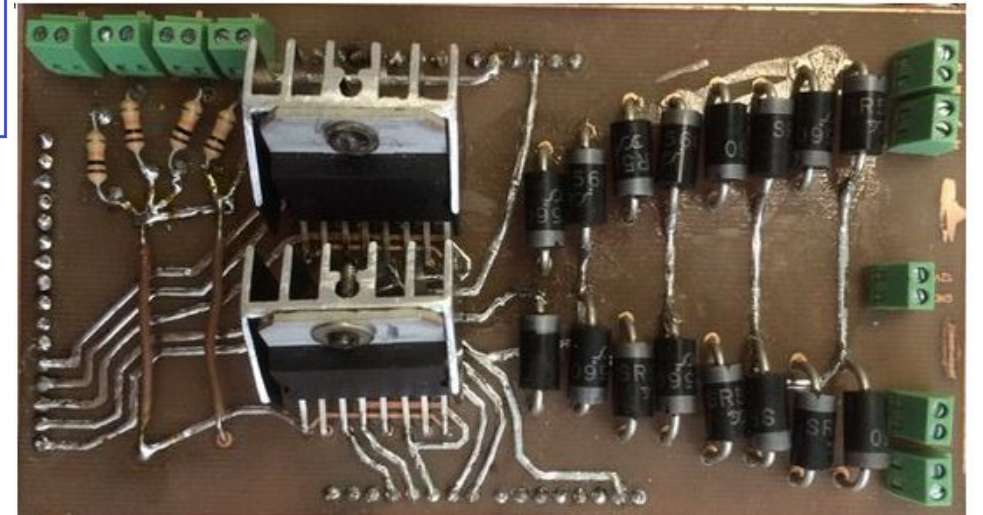
Плата управления шаговыми двигателями



- 1 – управление шаговым двигателем;
- 2 – считывание сигнала с микропереключателя

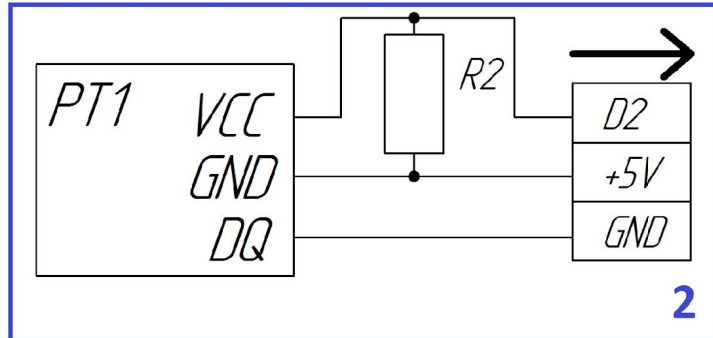
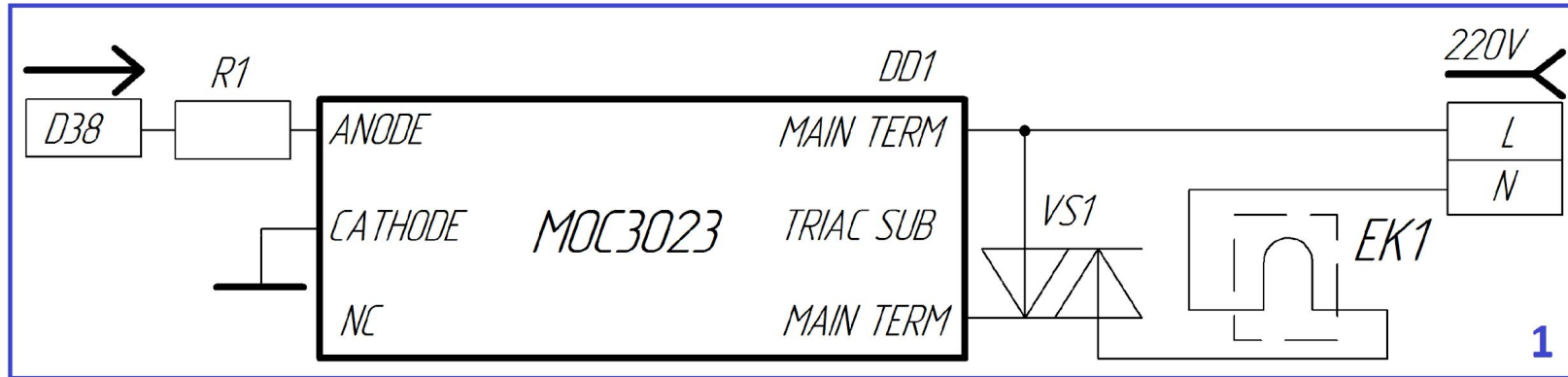


Принципиальная электрическая схема функциональных элементов платы управления шаговыми двигателями



Внешний вид печатной платы

Плата термостатирования растворов

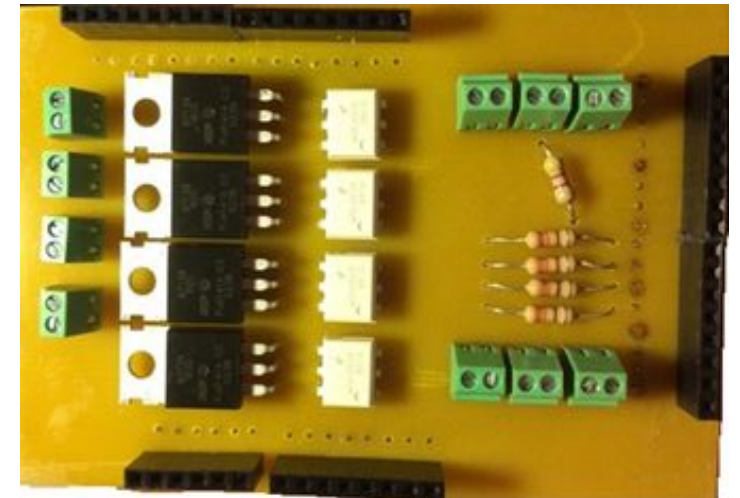


1 – управление мощностью нагревателя

2 – считывание значений температуры с термодатчика

(использован принцип ПИД регуляции);

Принципиальная электрическая схема функциональных элементов платы термостатирования растворов



Внешний вид печатной платы

Программное обеспечение

The screenshot displays a control software interface with a menu bar (File, Edit, View, Project, Operate, Tools, Window, Help) and a toolbar. The interface is divided into several functional areas:

- Control Panel (Left):** Contains various input fields and buttons for process parameters, including COM port, number of cycles, number of solutions used, number of dips per cup, current cycle, number of dips in each cup, current number of dips in each cup, liquid volume per cup, cup height, substrate height, immersion mode, and immersion depth.
- Process Execution (Center):** Shows a green 'ЗАПУСК' (START) button, a progress bar, and real-time data for 'Процесс выполнения' (Process Execution), including speed in mm/s (Max 2.9, Min 0.5) and various timing parameters for substrate movement and immersion.
- Temperature Control (Right):** Features a red panel with a 'Включение нагрева' (Heating On) toggle, 'Нагрев включен' (Heating On) and 'Нагрев завершен' (Heating Completed) indicators, 'Время нагрева' (Heating Time) display, and 'Необходимая температура' (Required Temperature) and 'Текущая температура' (Current Temperature) displays.
- Temperature Graph (Bottom Right):** A graph titled 'Изменение температуры во времени' (Temperature Change over Time) showing 'Температура [градусы Цельсия]' (Temperature [Celsius]) on the y-axis (20-100) and 'Время [с]' (Time [s]) on the x-axis (0-300).

Numbered callouts (1-27) point to specific UI elements across the interface.

2-11 – контроль пространственного расположения подложки;

12 – контроль скоростей процесса;

13 – контроль времен наслаивания;

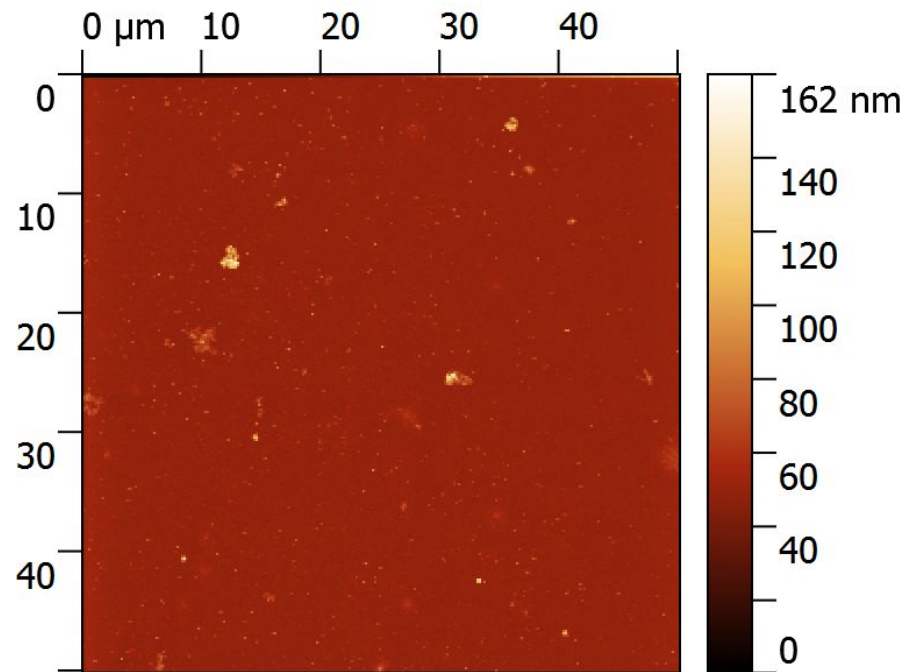
16 – отображение времени всего процесса;

17-19 – отображение законченности процесса;

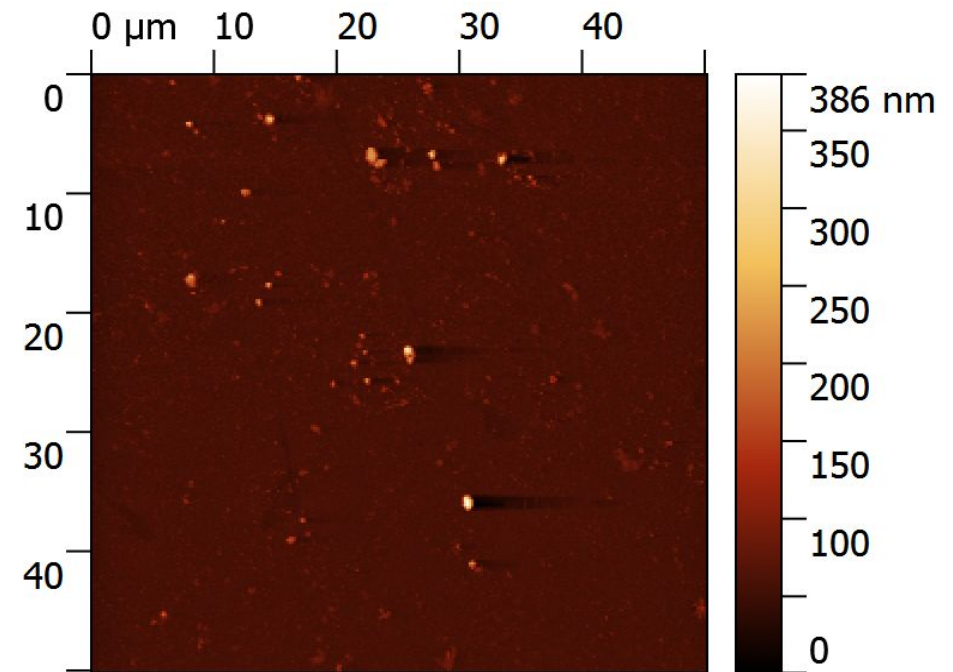
21-27 – контроль температуры

Получение тонких пленок CdS после 10, 20, 30 и 50 ЦИКЛОВ

Растворы в сосудах 1 и 3	CdCl ₂	Na ₂ S
Концентрация, М	0,025	0,025
Время обработки, с	40	40
Время промывки, с	100	100
Скорость подложки в растворе, мм/с	1	1

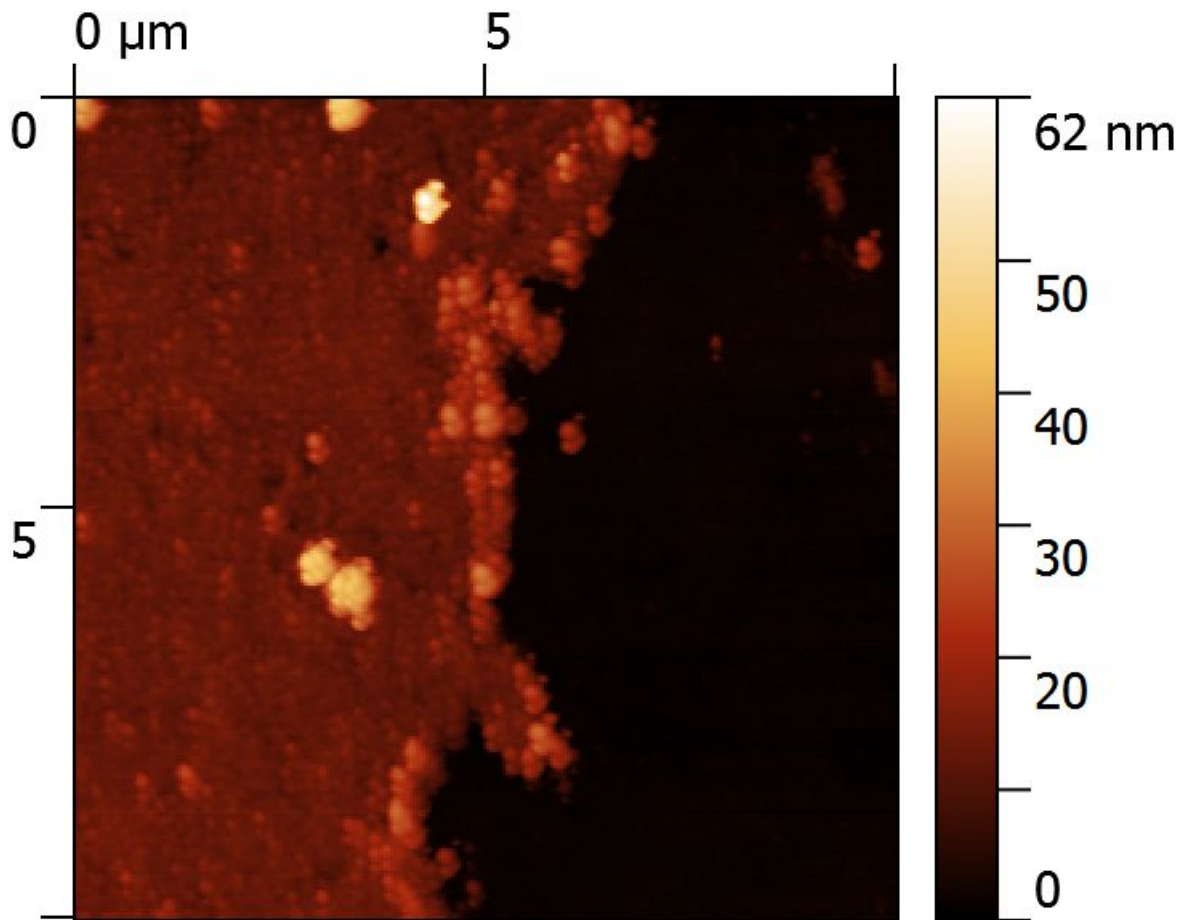


Топология пленки после 10 циклов (50x50 мкм)

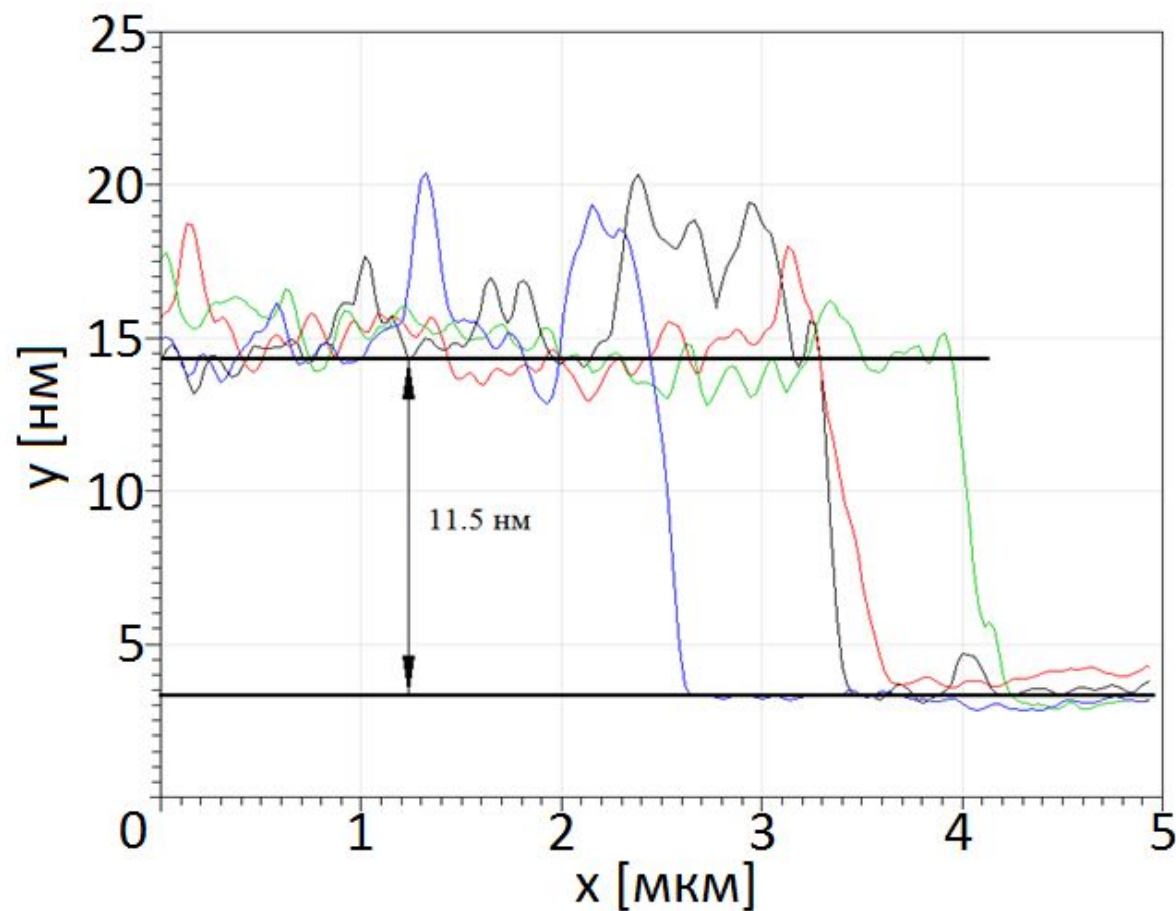


Топология пленки после 50 циклов (50x50 мкм)

Измерение толщины пленки CdS после 30 циклов наслаивания

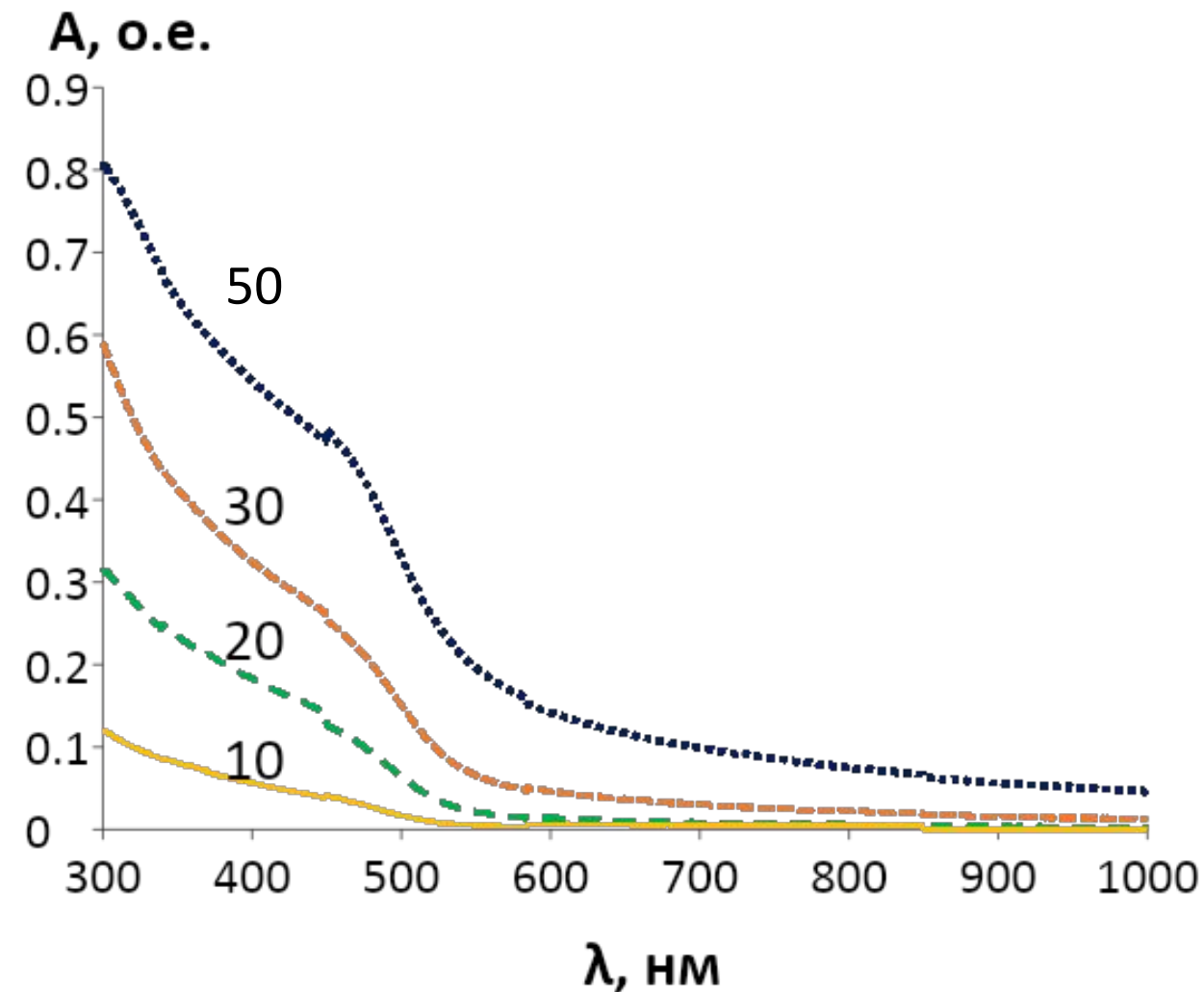


Топология границы травления образца (10x10 мкм)

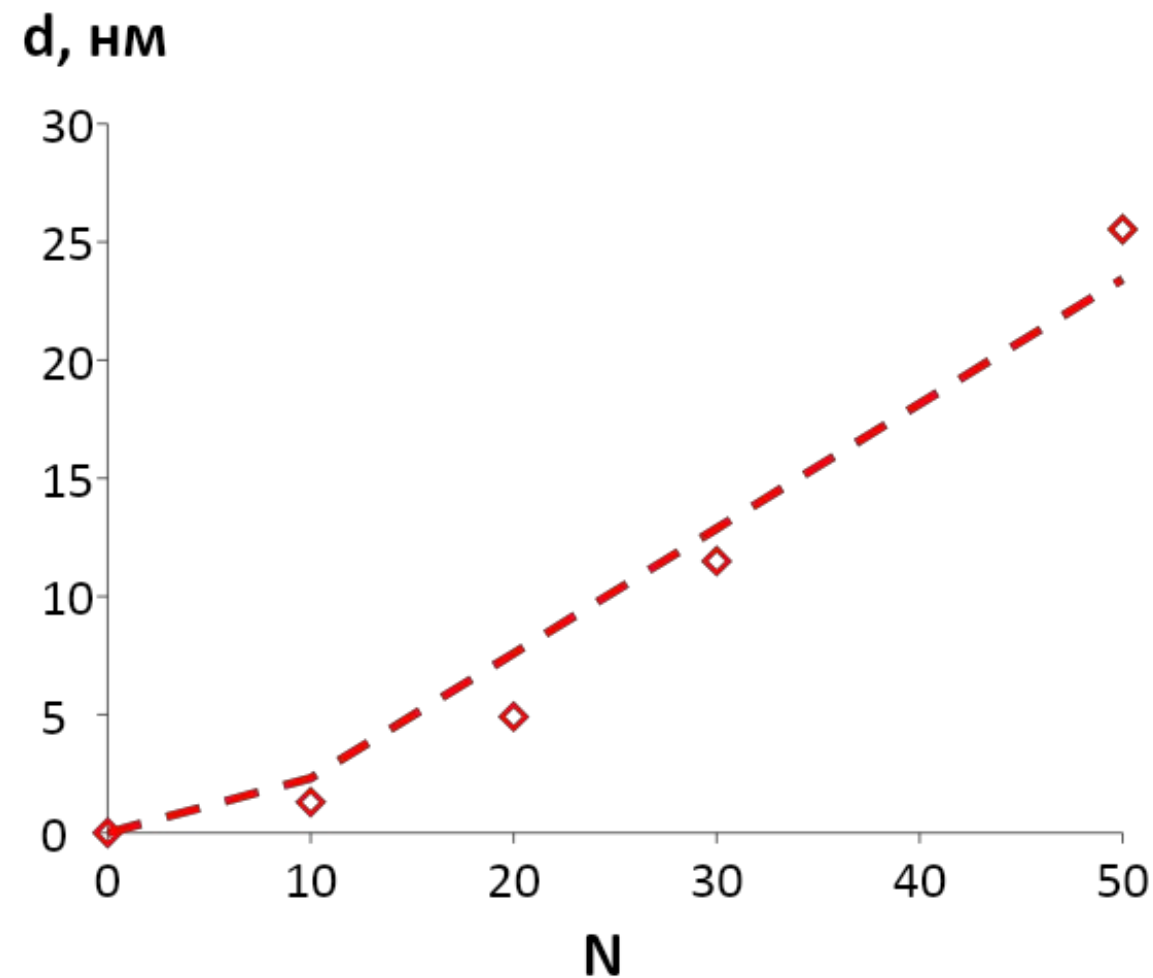


Профили пленки сульфида кадмия в различных точках границы травления

Оптические свойства пленок

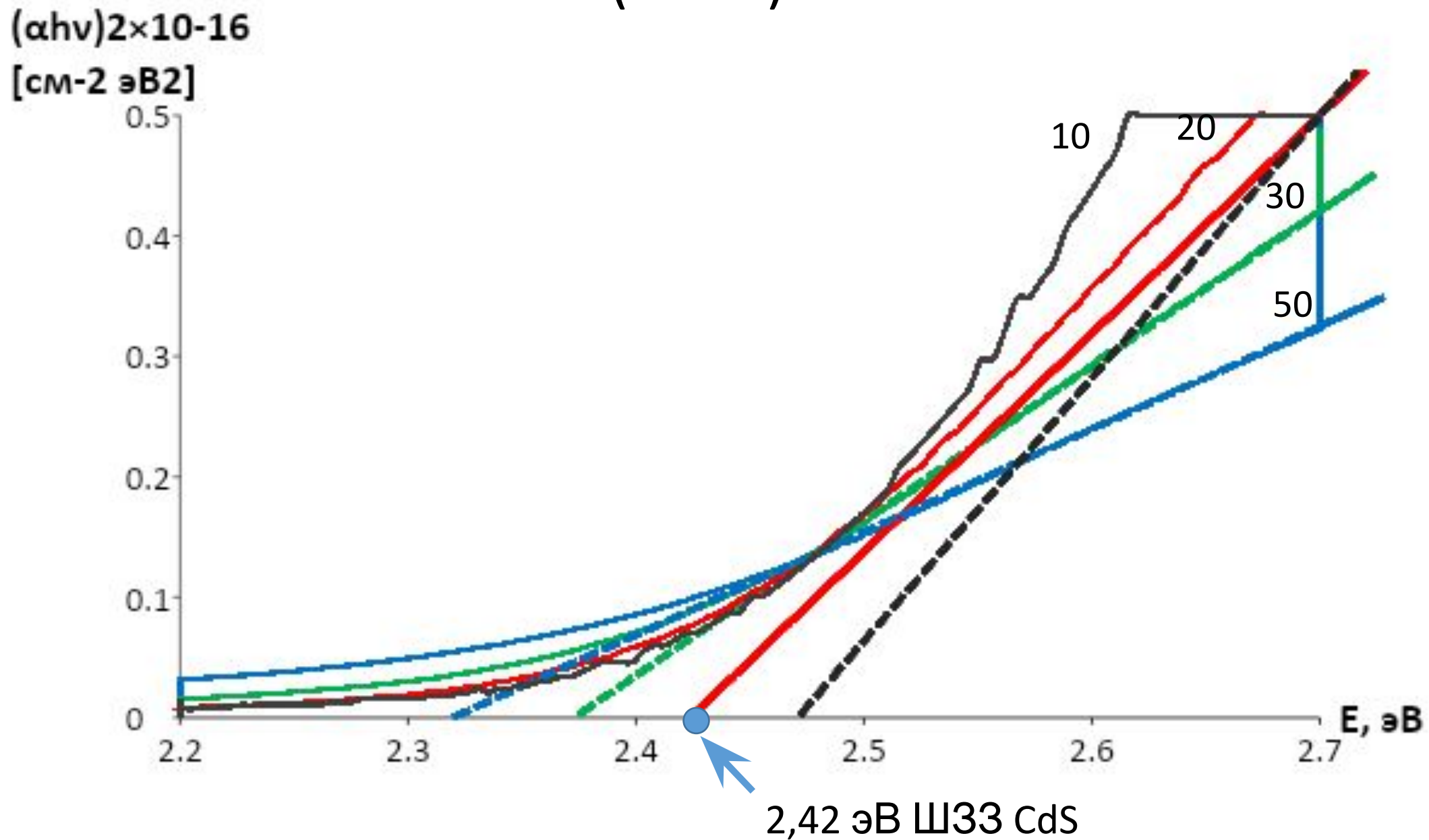


Спектры оптической плотности образцов



Зависимость толщины пленки от количества циклов нанесения

Определение оптической ширины запрещенной зоны (ШЗЗ)

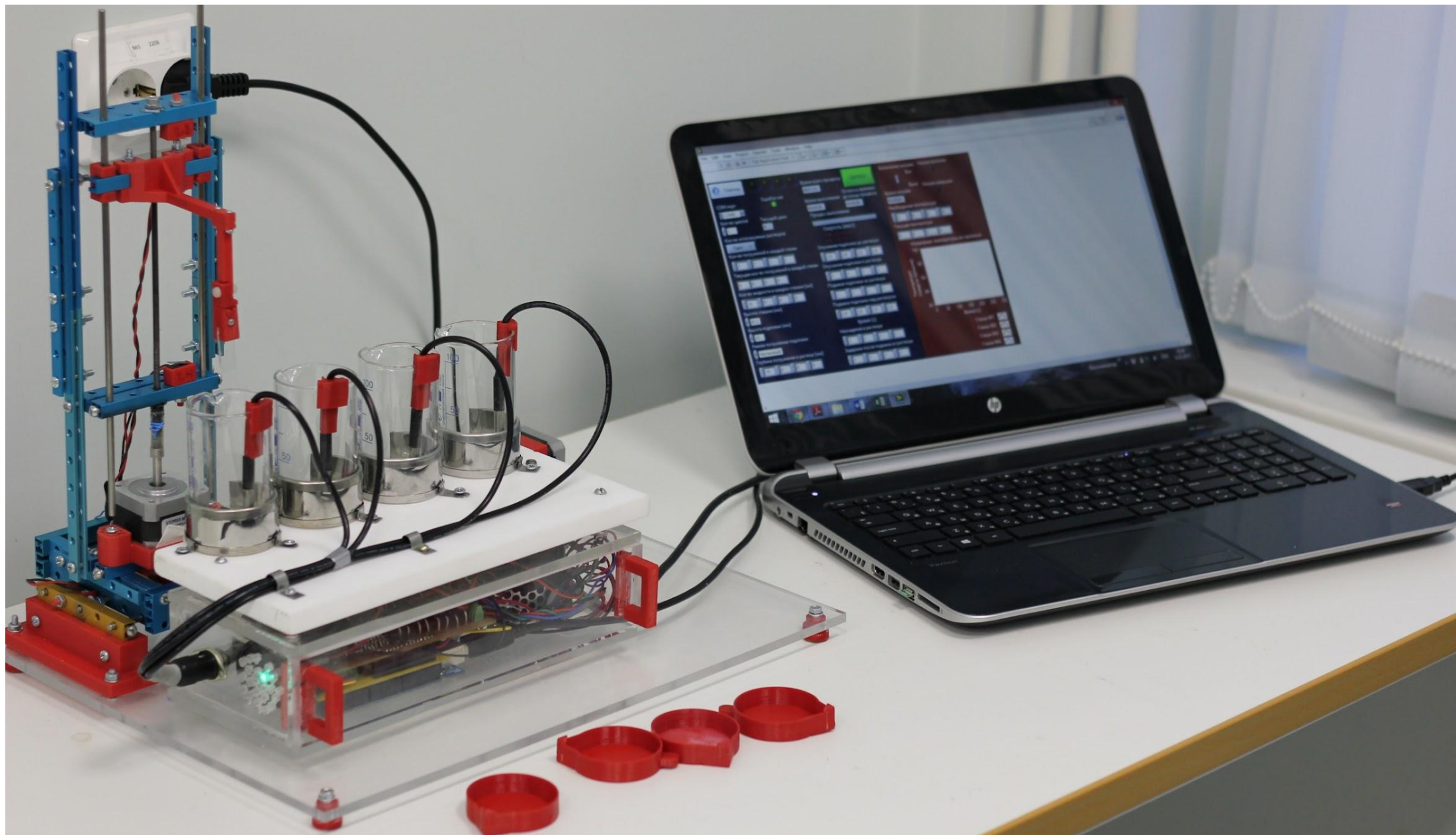


Заключение

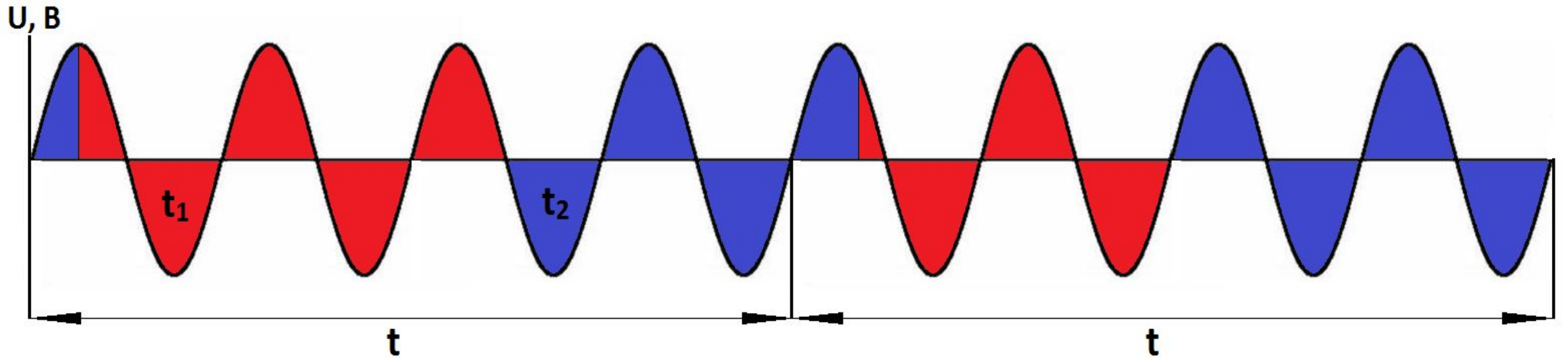
1. Основные конструктивные и технико-эксплуатационные показатели установки:
 - точность позиционирования образца относительно реагентов – 8 мкм,
 - скорость перемещения подложки в растворе – от 0,5 до 2,9 мм/с,
 - предельный размер подложки – 30х35х2 мм³,
 - диапазон термостатирования растворов – от 45 до 90 °С,
 - точность термостатирования $\pm 3^{\circ}\text{C}$.
2. С помощью установки получены образцы после 10 – 50 циклов наслаивания, толщина пленок которых составляет от 1,3 нм до 25,5 нм.
3. Оптически определенная ширина запрещенной зоны полученных материалов лежит в диапазоне 2,32 эВ – 2,47 эВ.

Спасибо за внимание

Внешний вид установки



ПИД-регулятор

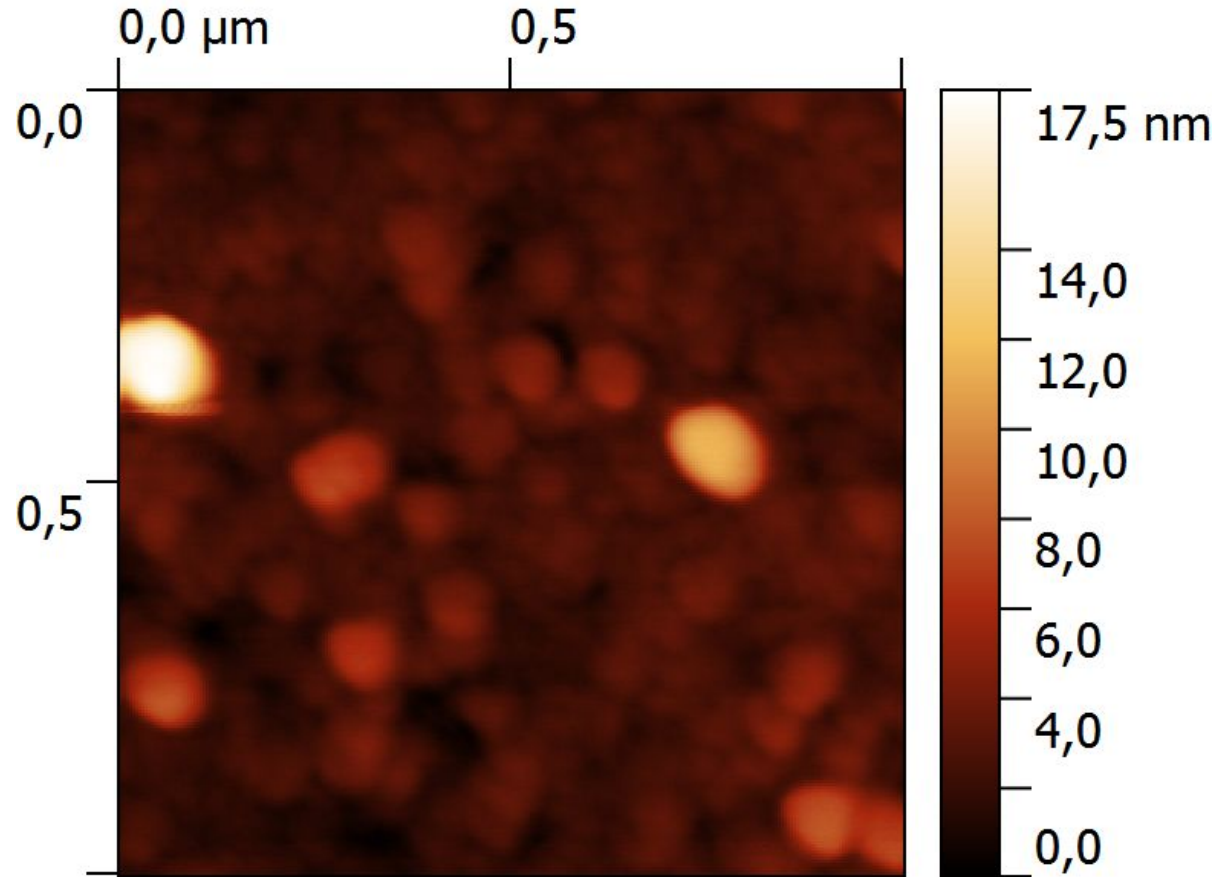


Управление мощностью, выделяемой нагревателем, осуществляется при изменении отношения времен включенного t_1 и выключенного состояния t_2 при одинаковом общем t равном 0,5 с

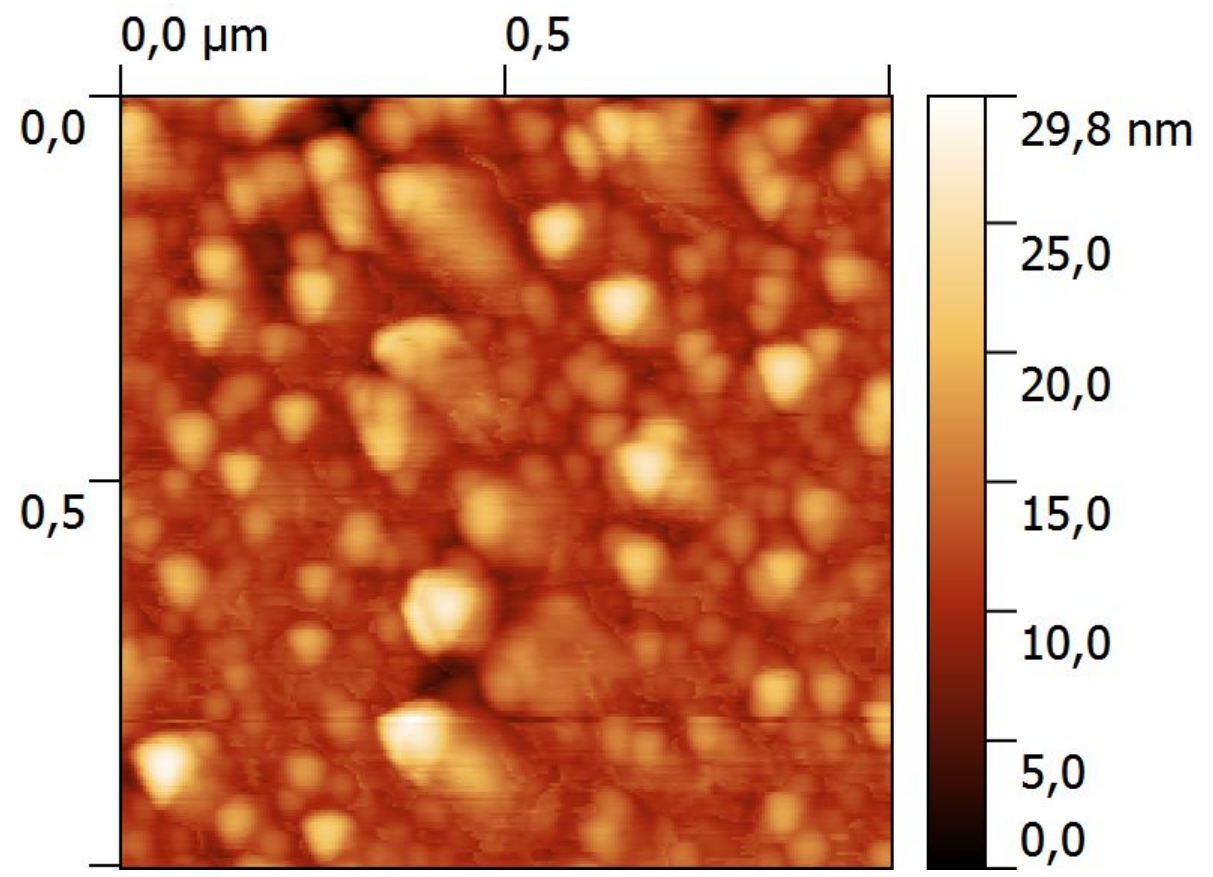
$$t_1 = P \cdot (T_z - T_t) + I \cdot \int_0^t (T_z - T_t) dt + D \cdot \frac{d(T_z - T_t)}{dt},$$

Формула для расчета времени во включенном состоянии

Результаты АСМ-измерений



Топология пленки
толщиной 1,3 нм после 10
циклов (1x1 мкм)



Топология пленки
толщиной 25,5 нм после
50 циклов (1x1 мкм)