Bauman Moscow State Technical
Faculty of "Radioelectronics and Laser Technology“
Department RL2 "Laser and Optoelectronic Systems"

«Development of a Surface Plasmon Resonance Sensor for Predicting Airborne Contaminants and Their Cumulative Impact on Human Health»

Bachelor's final qualification work

12.03.02 "Optical Engineering"

Author: Ivanchenko A.M.
Supervisor: Batshev V.I.

Moscow, 2023

Surface Plasmon Resonance (SPR)

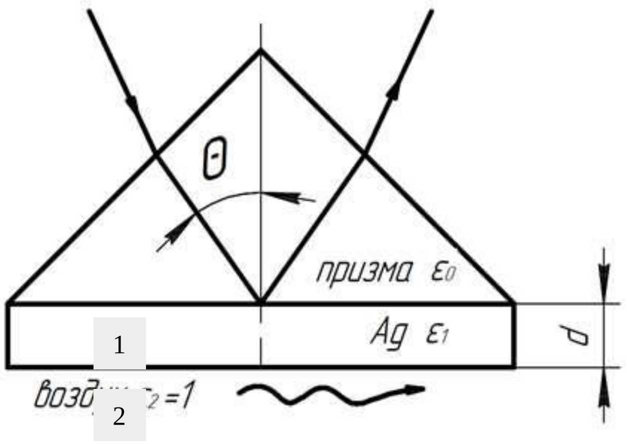
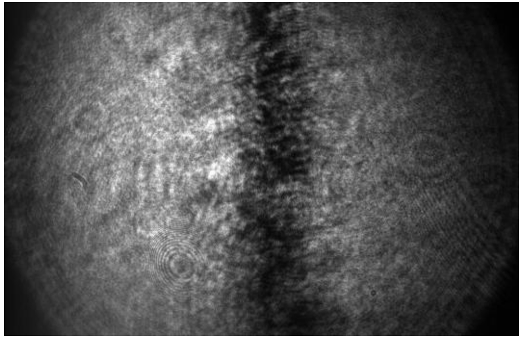


Fig. 1. Prismatic input method for excitation of SPR using attenuated total internal reflection in the Kretschmann configuration



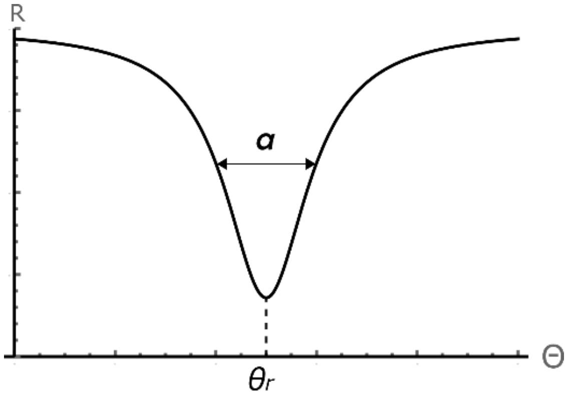


Fig. 2. Reflectivity function R(θ)

$$R = \left| \frac{r_0^1 + r_1^2 exp\,(2idk_1)}{1 + r_0^1 r_1^2 exp\,(2idk_1)} \right|^2$$

$$\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$$

$$k_i = \sqrt{\varepsilon_i \cdot \frac{\omega^2}{c} - \frac{\omega \cdot n_0 \cdot \sin(\theta)^2}{c}}$$

$$r_i^{i+1} = \frac{\varepsilon_{i+1} w_i - \varepsilon_i w_{i+1}}{\varepsilon_{i+1} w_i + \varepsilon_i w_{i+1}}$$

Corrosion

$$2HCl(\text{разб.}) + Ag_2O \rightarrow 2AgCl(\downarrow) + H_2O \qquad (1)$$

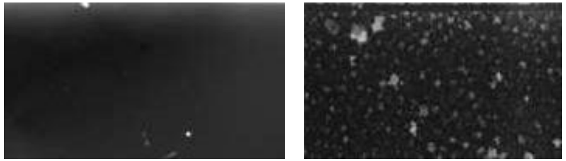
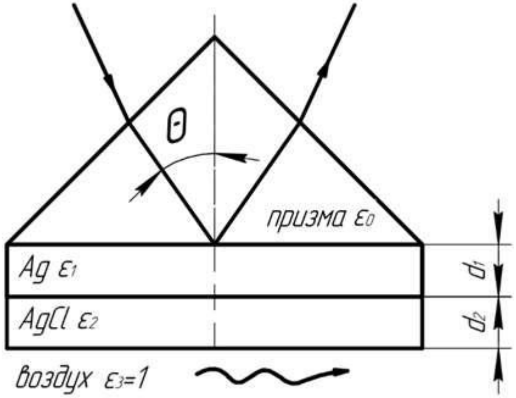


Fig. 3. Example of the appearance of a silver nanofilm on a glass prism before and after chlorine corrosion



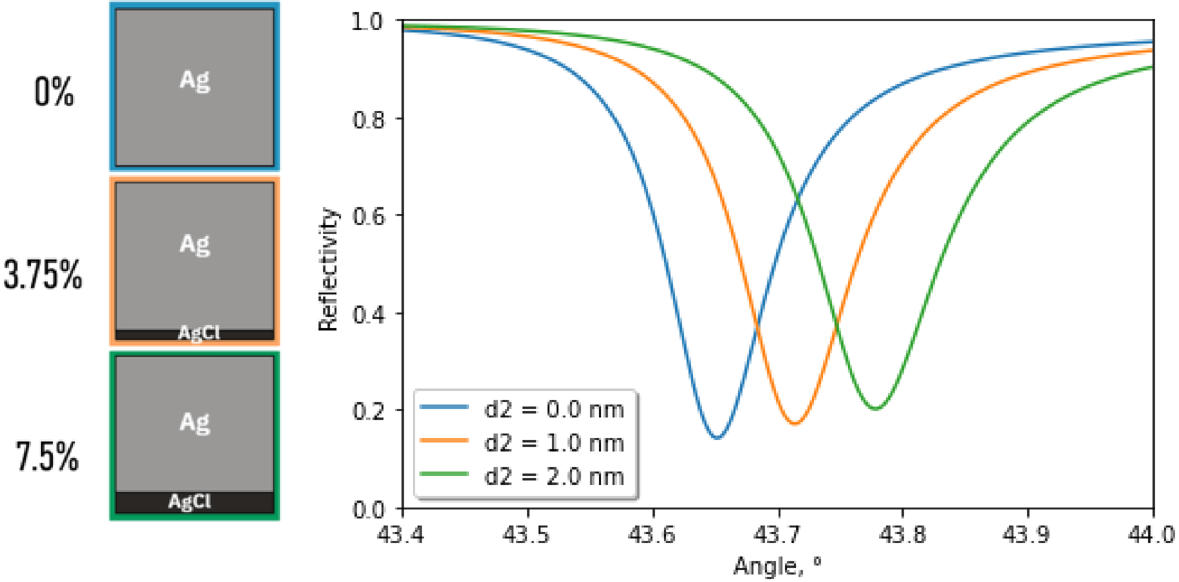
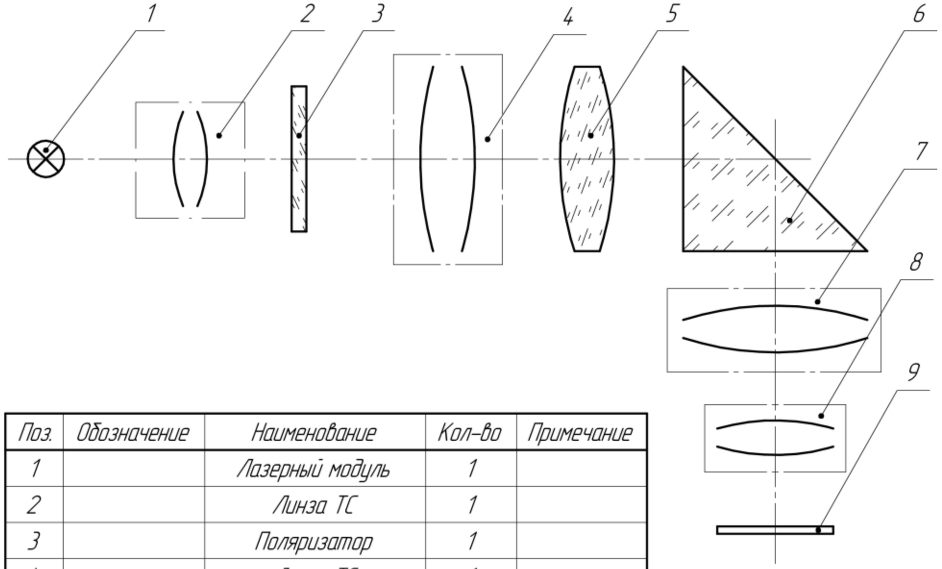


Рис. 4. Resonance curves for different degrees of corrosion.

n_0 = 1.481, , λ = 683.5 nm, d_1 = 50 nm, ω_p = 72920, γ = 171.4, ε_2 = 1.995

$$R = \left| \frac{r_0^1 + r_1^2 e^{2id_1w_1} + r_2^3 e^{2i(d_1w_1+d_2w_2)} + r_0^1 r_1^2 r_2^3 e^{2id_2w_2}}{1 + r_0^1 r_1^2 e^{2id_1w_1} + r_0^1 r_2^3 e^{2i(d_1w_1+d_2w_2)} + r_1^2 r_2^3 e^{2id_2w_2}} \right|^2 \qquad (2)$$

Поз.	Наименование	Обозначение	λ, нм	f', мм	Sf, мм	S'f', мм
2, 4	Телескопическая система		632,8	100	–	–
5	Фокусирующая линза		632,8	40	–32,4	35,1
7, 8	Объектив		380–760	54,8	–	–



Характеристики источника излучения
1. He–Ne лазер
2. Длина волны максимума излучения 632.8 нм
3. Диаметр пучка 0.7 мм
4. Мощность излучения 0.8 мВт

Характеристики приемника излучения
1. DMK 23G445 Monochrome Camera
2. Разрешение 1280x960 (1.2 MP)
3. Чувствительность 0.015 Лк
4. Размер элемента: 3.75x3.75 мкм
5. Размер фоточувствительной зоны 4.8x3.6 мм

Поз.	Обозначение	Наименование	Кол-во	Примечание
1		Лазерный модуль	1	
2		Линза ТС	1	
3		Поляризатор	1	
4		Линза ТС	1	
5		Фокусирующая линза	1	
6		Призма с напылениями	1	
7		Линза объектива	1	
8		Линза объектива	1	
9		Приемник излучения	1	

Перв. примен.
Справ. №
Подп. и дата
Инв. № дубл.
Взам. инв. №
Подп. и дата
Инв. № подл.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Иванченко		
Пров.		Батышев		
Т.контр.				
Н.контр.				
Утв.				

Индикатор вредных веществ на основе ППР

Схема оптическая принципиальная

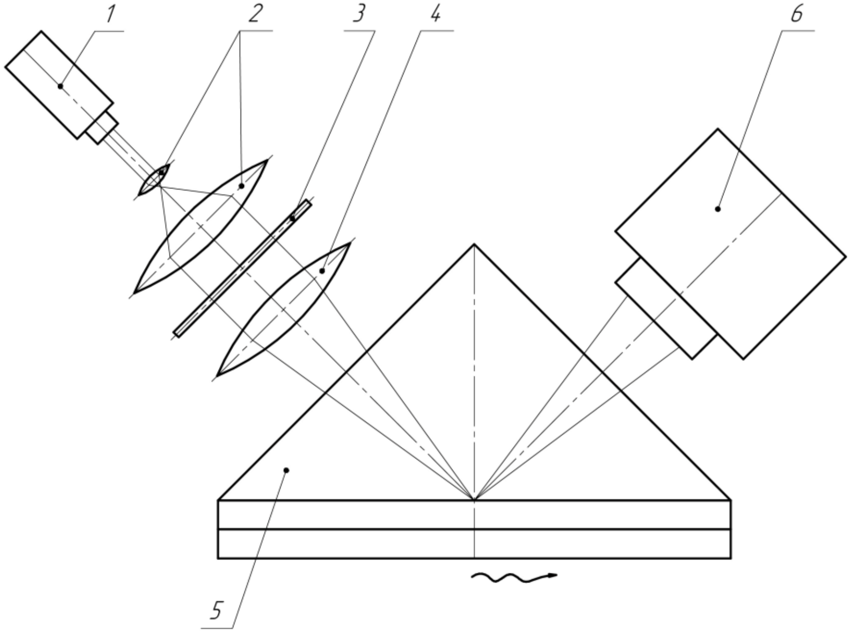
Лит.	Масса	Масштаб
		1:1

Лист | Листов 1

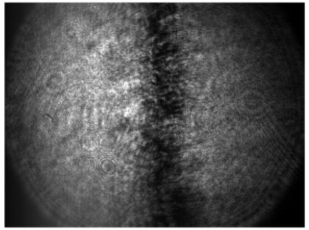
МГТУ им. Н.Э. Баумана группа РЛ2-82Б

Копировал

Формат А3



Изображение на приемнике при ППР



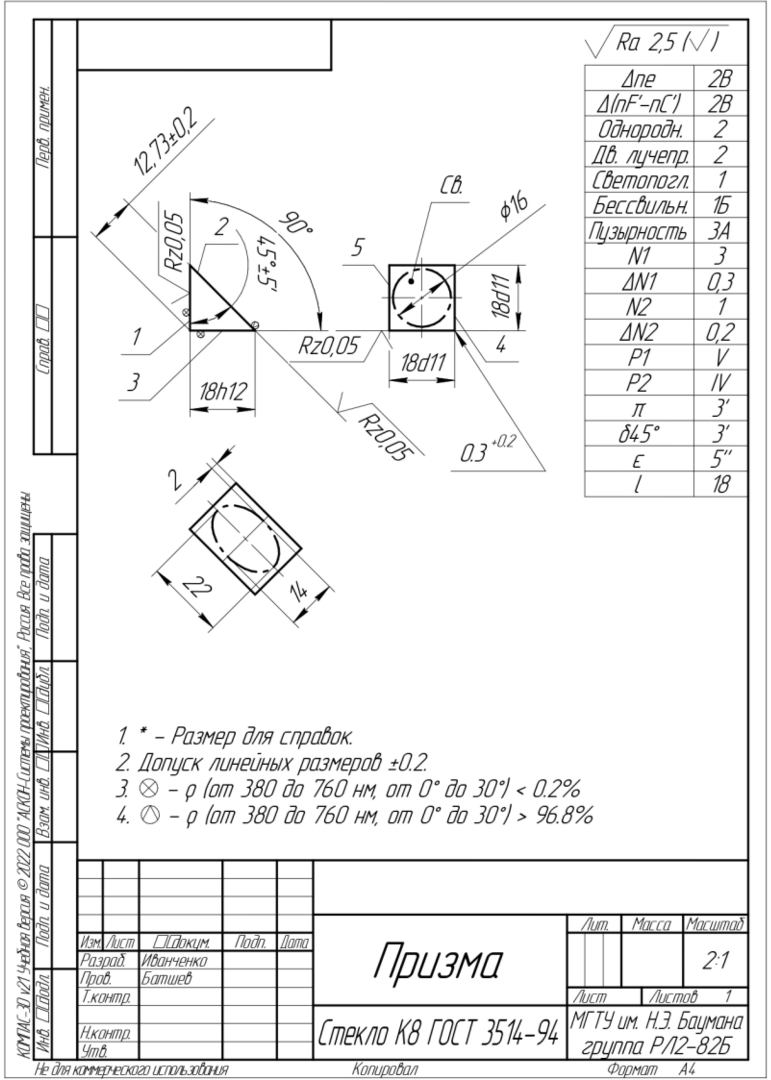
Функция коэффициента отражения:

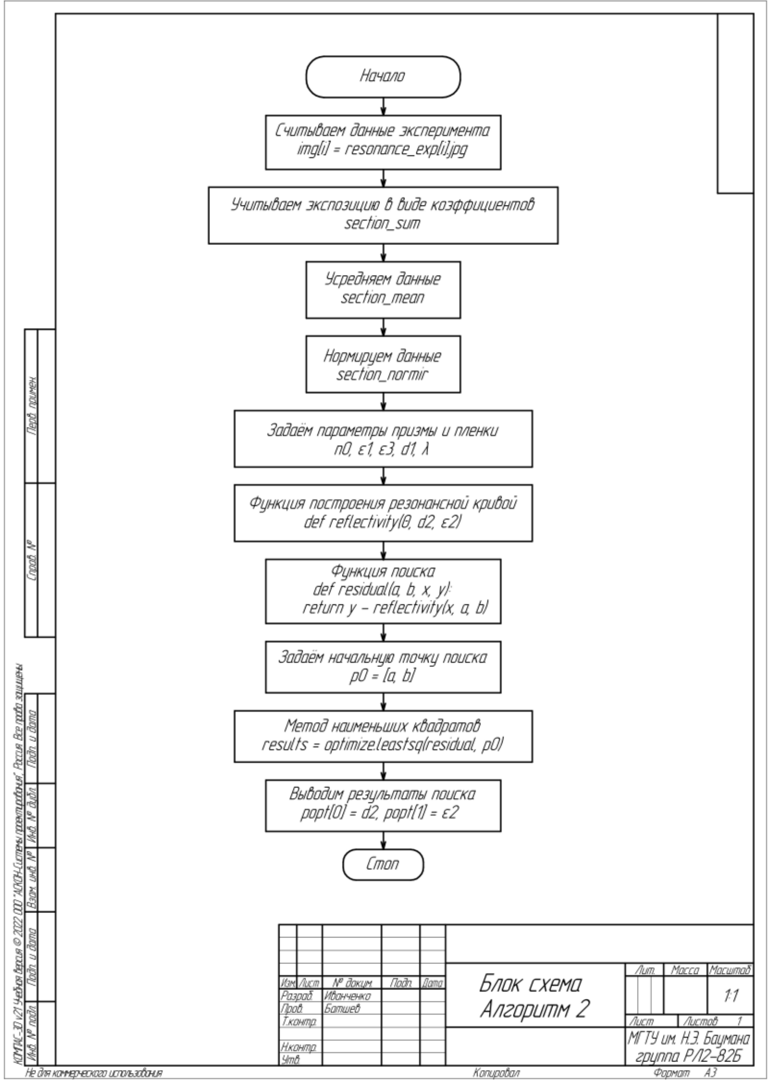
$$R = \left| \frac{r_1^2 + r_2^3 e^{2id_2w_2} + r_3^4 e^{2i(d_2w_2+d_3w_3)} + r_1^2 r_3^3 r_3^4 e^{2id_3w_3}}{1 + r_1^2 r_3^3 e^{2id_2w_2} + r_1^2 r_3^3 e^{2i(d_2w_2+d_3w_3)} + r_3^3 r_3^4 e^{2id_3w_3}} \right|^2 \left| 1 - \left(r_0^1\right)^2 \right|^2$$

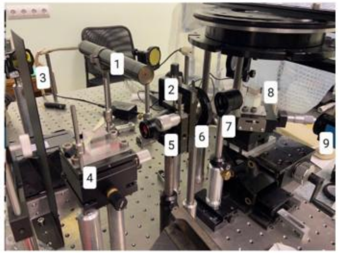
1 – лазер
2 – телескопическая система
3 – поляризатор
4 – собирающая линза
5 – стеклянная призма с
тонким металлическим покрытием
и коррозионным слоем
6 – камера

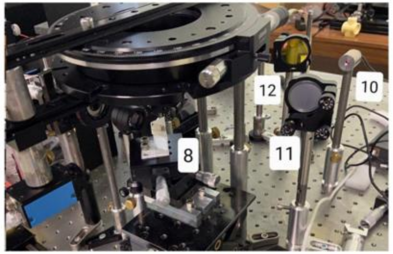
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Индикатор вредных веществ на основе ППР	Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.		Иванченко			Ход лучей в оптической системе			1:1
Пров.		Батшев				Лист	Листов 1	
Т.контр.						МГТУ им. Н.Э. Баумана группа РЛ2-82Б		
Н.контр.								
Утв.								

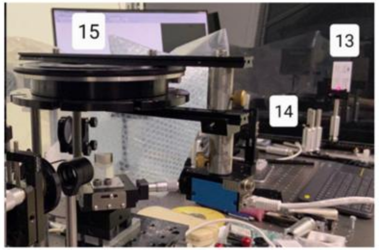
Перв. примен.
Справ. №
Подп. и дата
Инв. № дубл.
Взам. инв. №
Подп. и дата
Инв. № подл.

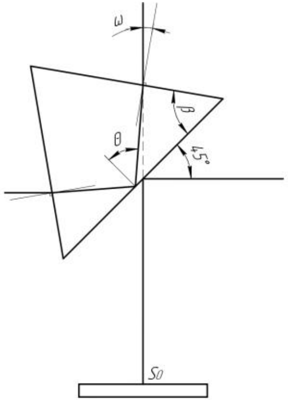

Ra 2,5 (√)
Δnе 2В
Δ(nF'–nC') 2В
Однородн. 2
Дв. лучепр. 2
Светопогл. 1
Бессвильн. 1Б
Пузырность 3А
N1 3
ΔN1 0,3
N2 1
ΔN2 0,2
P1 V
P2 IV
π 3'
δ45° 3'
ε 5''
l 18
12,73±0,2
Rz0,05
2
90°
45°±5'
Св.
ϕ16
5
18d11
1
3
4
18h12
18d11
Rz0,05
0.3 +0.2
2
22
14
1. * – Размер для справок.
2. Допуск линейных размеров ±0.2.
3. ⊗ – ρ (от 380 до 760 нм, от 0° до 30°) < 0.2%
4. – ρ (от 380 до 760 нм, от 0° до 30°) > 96.8%
Изм. Лист № докум. Подп. Дата
Разраб. Иванченко
Пров. Батшев
Т.контр.
Н.контр.
Утв.
Призма
Лит. Масса Масштаб
2:1
Лист Листов 1
Стекло К8 ГОСТ 3514-94
МГТУ им. Н.Э. Баумана
группа РЛ2-82Б
Перв. примен.
Справ. №
Подп. и дата
Инв. № дубл.
Взам. инв. №
Подп. и дата
Инв. № подл.
КОМПАС-3D v21 Учебная версия © 2022 ООО "АСКОН-Системы проектирования", Россия. Все права защищены
Не для коммерческого использования
Копировал
Формат А4

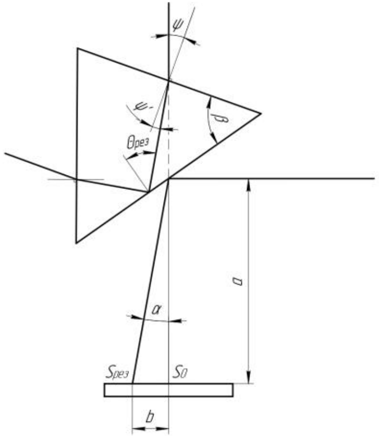

Начало
Считываем данные эксперимента
img[i] = resonance_exp[i].jpg
Учитываем экспозицию в виде коэффициентов
section_sum
Усредняем данные
section_mean
Нормируем данные
section_normir
Задаём параметры призмы и пленки
n0, ε1, ε3, d1, λ
Функция построения резонансной кривой
def reflectivity(θ, d2, ε2)
Функция поиска
def residual(a, b, x, y):
return y – reflectivity(x, a, b)
Задаём начальную точку поиска
p0 = [a, b]
Метод наименьших квадратов
results = optimize.leastsq(residual, p0)
Выводим результаты поиска
popt[0] = d2, popt[1] = ε2
Стоп
Изм. Лист № докум. Подп. Дата
Разраб. Иванченко
Пров. Батшев
Т.контр.
Н.контр.
Утв.
Блок схема
Алгоритм 2
Лит. Масса Масштаб
1:1
Лист Листов 1
МГТУ им. Н.Э. Баумана
группа РЛ2-82Б
Перв. примен.
Справ. №
Подп. и дата
Инв. № дубл.
Взам. инв. №
Подп. и дата
Инв. № подл.
КОМПАС-3D v21 Учебная версия © 2022 ООО "АСКОН-Системы проектирования", Россия. Все права защищены
Не для коммерческого использования
Копировал
Формат А3











1 – He-Ne лазера с длиной волны = 632.8 нм
2, 3 – зеркало
4 – светоделительный куб
5 – телескопическая система
6 – диафрагма
7 – собирающая линза
8 – стеклянной призмы с тонкой серебряной пленкой
9 – камера
10 – светодиод с длиной волны = 654 нм
11, 12 – зеркало
13 – экран
14 – измерительная шкала
15 – монитор

Входные данные:
$n = 1.5147$ (стекло К8 на длине волны λ)
$λ = 632.8$ (He-Ne)
$S_0 = 554$ мм
$S_{рез} = 689$ мм
$a = 1175$ мм

$b = |S_0 - S_{рез}|$
$tg(α) = b/a$
$α = arctg(b/a)$
$γ = α/2$
$ω = 90° - (180° - 45° - β)$
$ψ = γ + ω$
$ψ' = arcsin(sin(ψ)/n)$
$θ = β - ψ' = 50.438°$

Выходные данные:
$θ = 50.438°$

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Расчетно-графический лист 1
Разраб.	Иванченко				
Пров.	Батшев				
Т.контр.					
Н.контр.					
Утв.					

Лит.	Масса	Масштаб
		1:1
Лист	Листов 1	

МГТУ им. Н.Э. Баумана
группа РЛ2-82Б

Перв. примен.
Справ. №
Подп. и дата
Инв. № дубл.
Взам. инв. №
Подп. и дата
Инв. № подл.

Копировал
Формат А2

Experiment

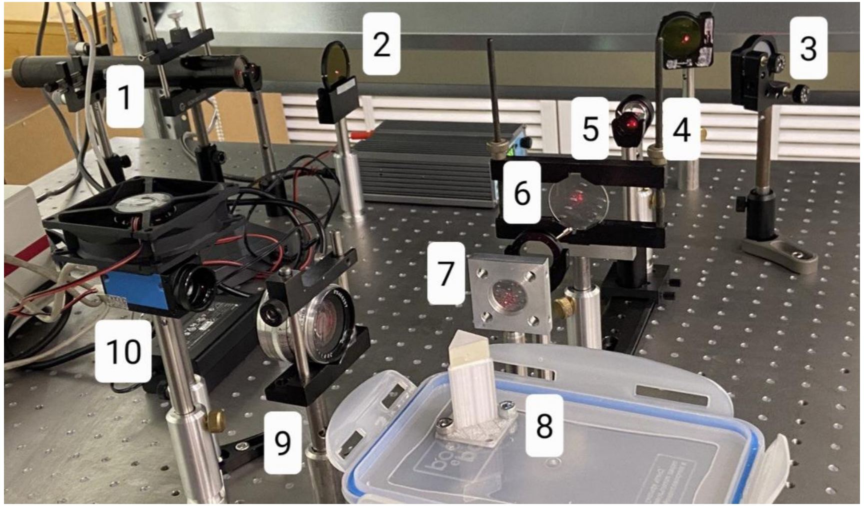


Fig. 5. Experimental setup

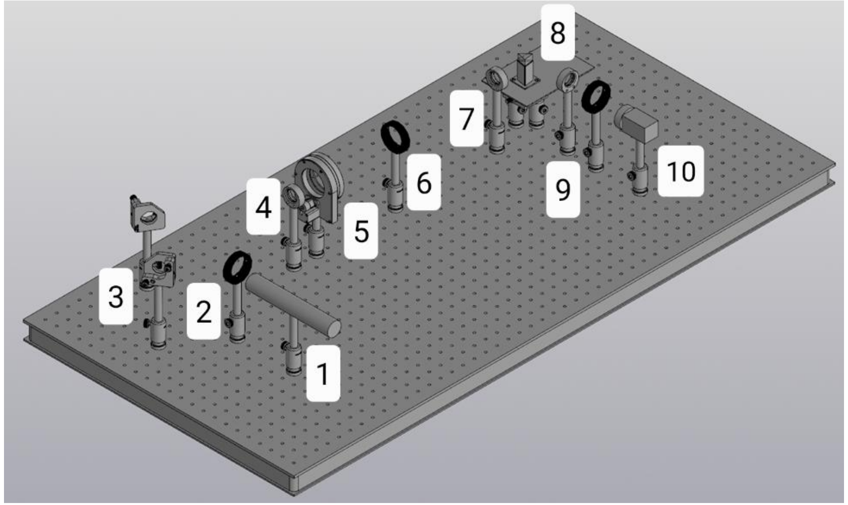
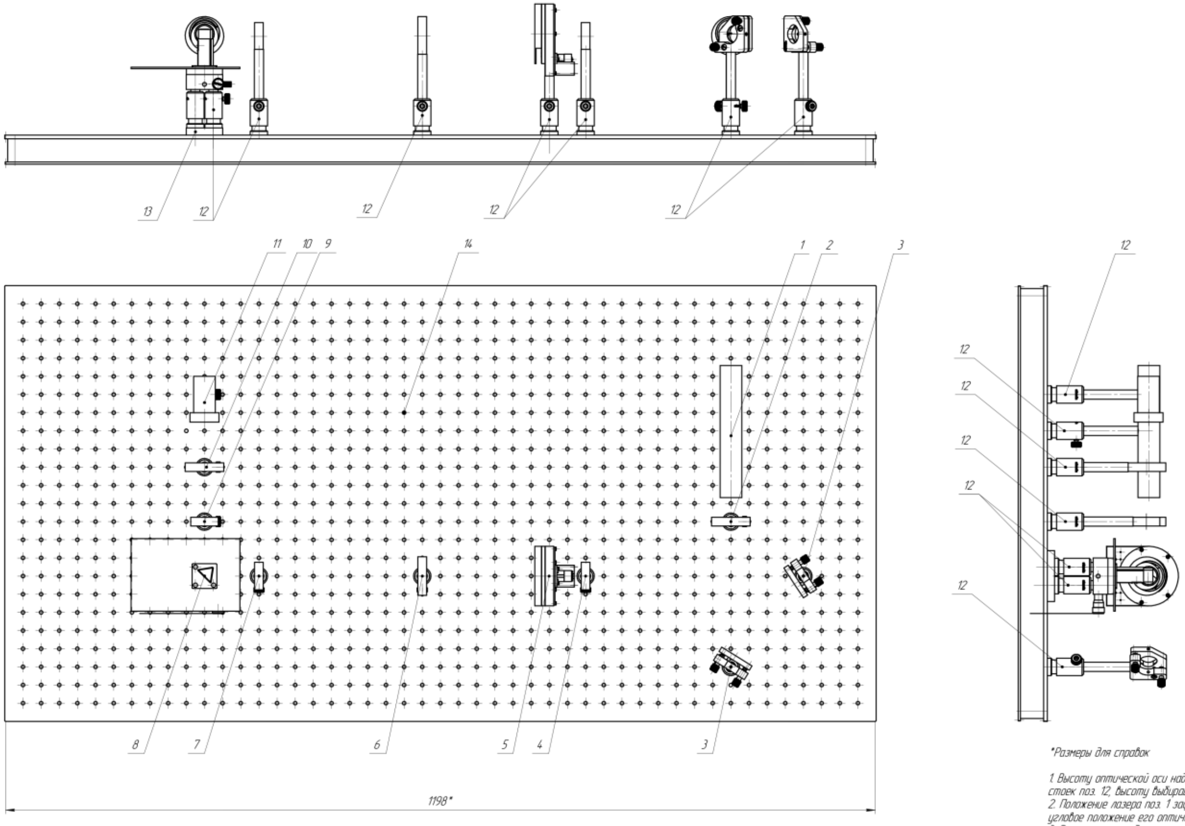


Fig. 6. Three-dimensional model of the experimental setup

1 – He-Ne laser with a wavelength of $\lambda = 632.8$ nm, 2 – polarizer, 3 – mirror system, 4 and 6 – telescopic system for expanding the laser beam, 5 – diaphragm, 7 – collecting lens, 8 – glass prism with silver nanofilm, fixed on the surface of a sealed case, 9 – lens, 10 – camera with a fan



*Размеры для справок

1. Высоту оптической оси над столом поз. 14 настраивать с помощью стоек поз. 12, высоту выбираем произвольно
2. Положение лазера поз. 1 зафиксировать винтами оправы поз. 12, угловое положение его оптической оси регулировать зеркалами поз. 3
3. Расстояние между оптическими компонентами регулировать перемещением стоек поз. 12
4. Стойки поз. 12 крепить к столу поз. 14 винтами М6
5. Юстировку оптических элементов проводить при помощи юстировочных винтов оправ поз. 12
6. Положение стеклянной призмы фиксировать с помощью поз. 8, юстировать с помощью стоек поз.12

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.	Иванченко			
Пров.	Батшев			
Т.контр.				
Н.контр.				
Утв.				

Экспериментальная установка
Сборочный чертеж

Лит.	Масса	Масштаб
	228,87	1:2
Лист	Листов 1	

МГТУ им. Н.Э.Баумана
группа РЛ2-82Б

Копировал
Формат А1

Experiment

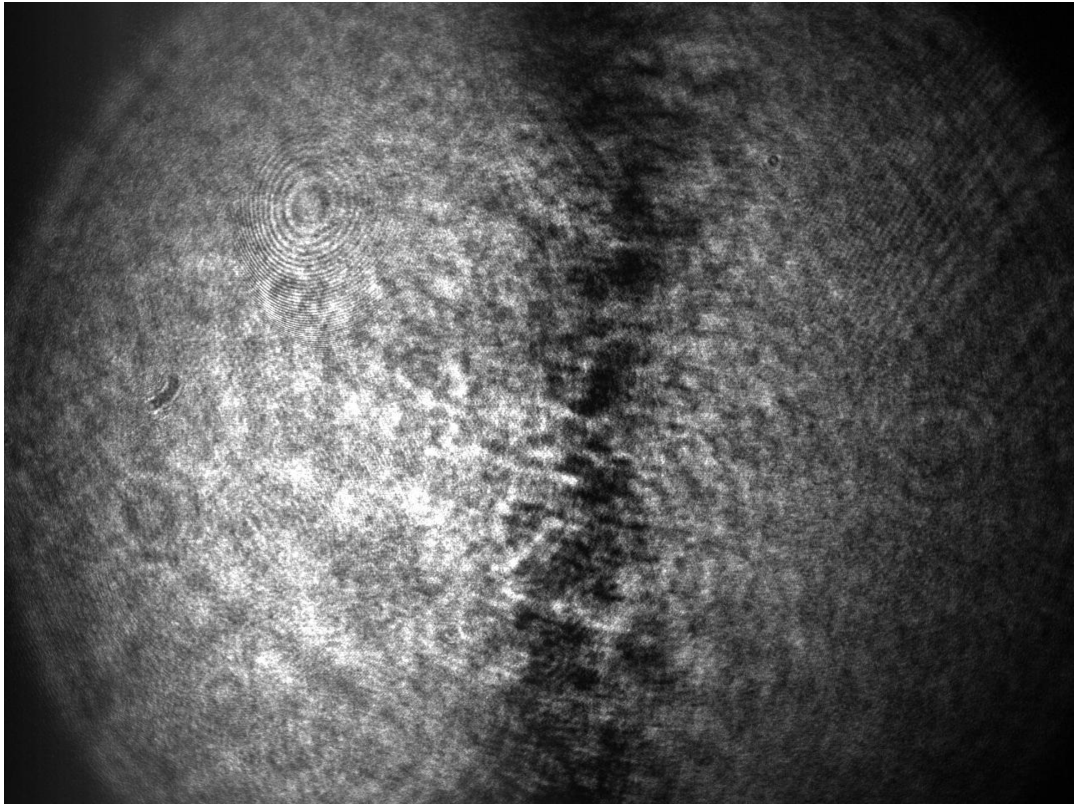
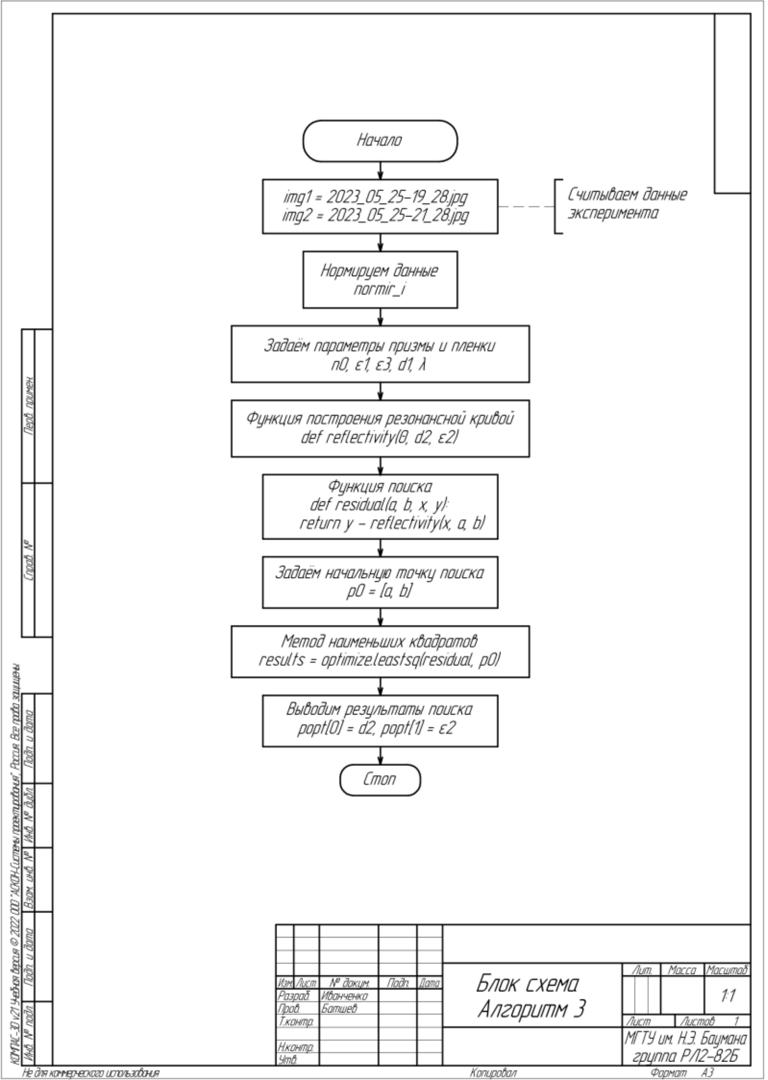


Fig. 7. Changes in SPR images over time

Input data:

Experiment duration t=13 hours
Chlorine concentration C=0.005%
Temperature T°=20°C
Refractive index of the prism n=1.5147
(K8 at the wavelength λ)
Wavelength of the He-Ne laser λ=632.8
Resonant angle θ=50.438°
Container volume V=1100 ml
Bleach volume v=6 ml
Coating thickness Ag d1=50 nm
Dielectric permittivity of Ag
ε1=−18.281+0.48108i
Corrosion layer thickness d2=34 nm
Dielectric permittivity ε2=3



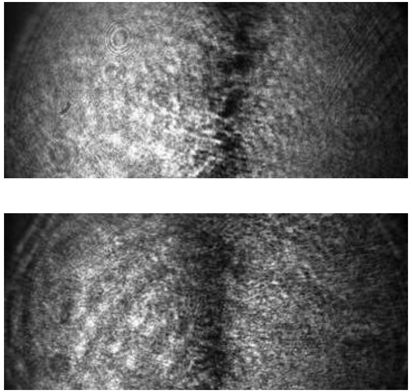


Fig. 8. Images before and after corrosion, t = 2 h

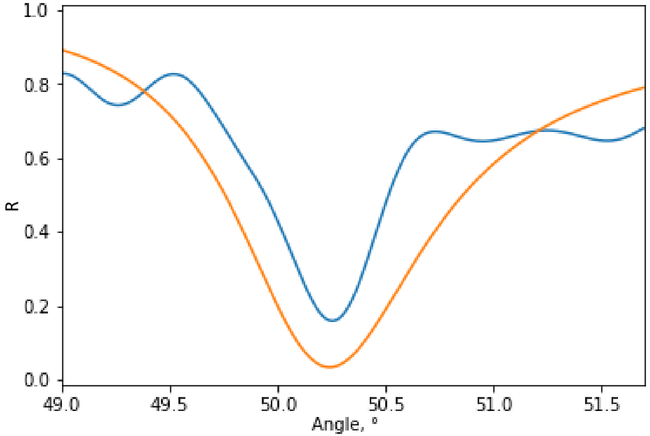


Fig. 9. Reconstruction of the resonance curve using the least squares method

Output Data:

$\varepsilon_2 = 4$ (Dielectric permeability of the corrosion layer)

$d_2 = 26.3$ нм (Thickness of the corrosion layer)

δ(R) = 13.2 % (Relative search error R)

$\delta(\theta)$ = 3,1 % (Relative search error θ)

Optimization. SNR Effect on Error

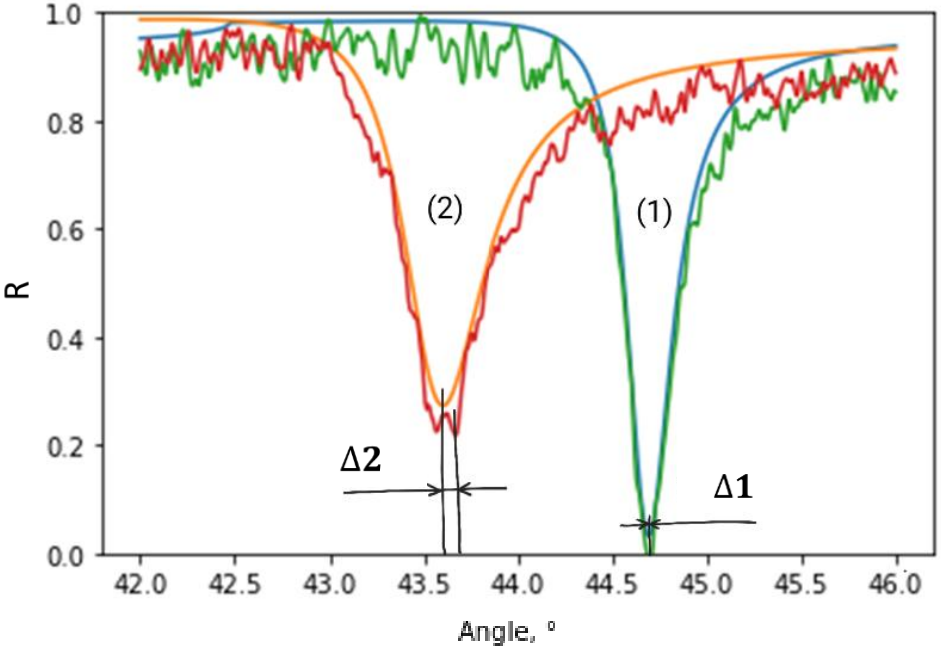


Fig. 10. SNR effect on different types of resonance curves. On the left – resonance curve constructed for n0 = 1.481, eps1 = -18.281 + 0.48108i, d1 = 53.6 nm, λ= 683.5 nm. On the right – n0 = 1.514, eps1 = -18.281 + 0.48108i, d1 = 40 nm, λ= 632.8 nm

<u>Error in the reflection coefficient ΔR when noise appears in the system at SNR = 0.1:</u>

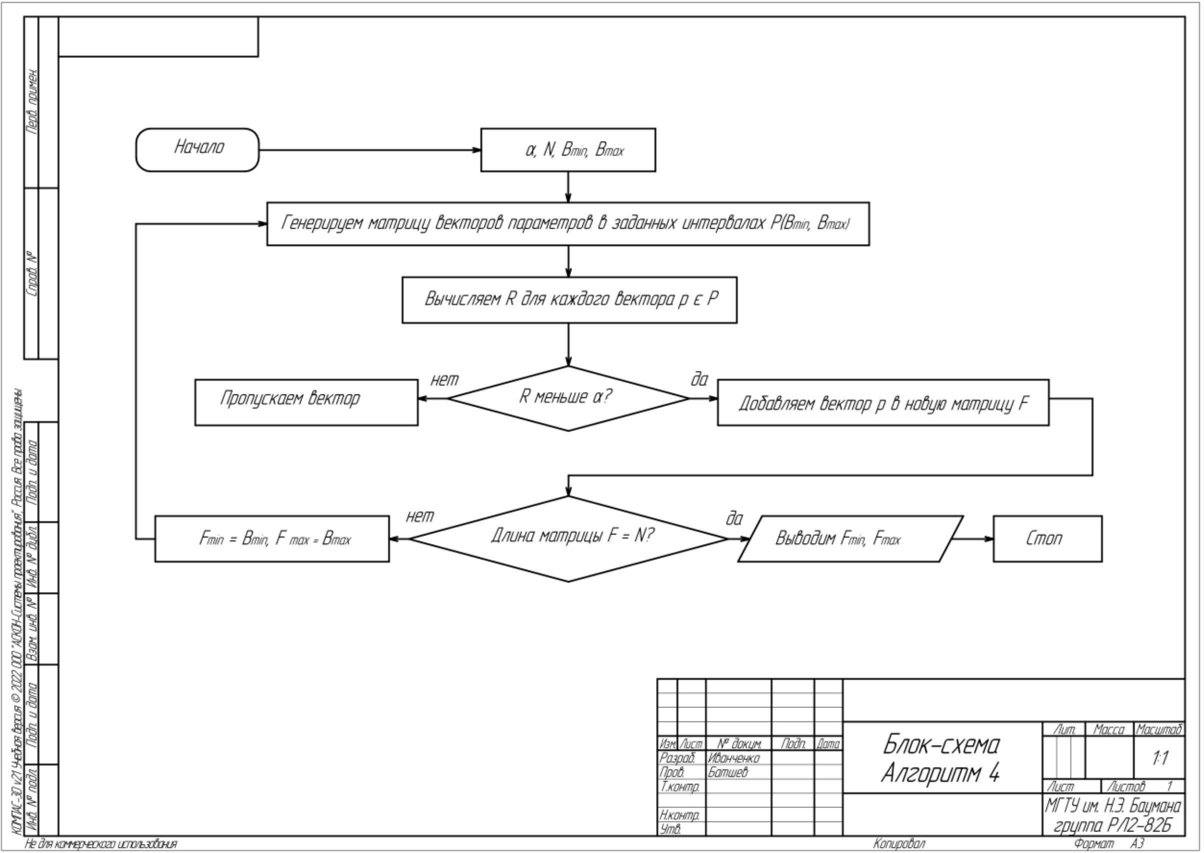
$$\mathbf{\Delta R = R_{max} * 0.1 * r - R_{max} * 0.2 * r} \quad (3)$$

<u>Deviation of the resonant angle value Δ when noise appears in the system:</u>

$$\mathbf{\Delta 2 = |43.6054° - 43.6673°| = 0.0619°}$$

$$\mathbf{\Delta 1 = |44.6934° - 44.6890°| = 0.0044°}$$

Optimization. Monte Carlo Method



Optimization parameters:
d1 - thickness of Ag
ε1 - permittivity of Ag
n0 - refractive index of the prism
λ – wavelength
ε2 - permittivity of AgCl, determined by the Drude model with parameters ωp and γ

Optimization function: R

Optimization criterion: R < 10-2

Method: Monte Carlo

Optimization. Monte Carlo Method

- **Start:** The algorithm begins.
- **Initialization:** Set the initial parameters:

a: some constant or parameter value.
N: number of vectors or iterations.
Vmin, Vmax: minimum and maximum values or bounds.

- **Generate Matrix:** Generate a matrix of vectors with parameters within the given limits Vmin and Vmax.
- **Calculate R:** For each vector p from the set P, calculate R.
- **Check Condition R < a²:**

If R is less than a², proceed to the next step.
If not, skip the vector.

- **Add Vector to Matrix F:** Add the vector p to the set F.
- **Check Length of Matrix F:**

If the length of matrix F is equal to N, proceed to the next step.
If not, return to the initial vector processing step.

- **Output Final Matrix:** Output the final minimum and maximum vectors, Fmin and Fmax.
- **End:** The process ends.

Optimization parameters:
d1 - thickness of Ag
ε1 - permittivity of Ag
n0 - refractive index of the prism
λ – wavelength
ε2 - permittivity of AgCl, determined by the Drude model with parameters ωp and γ

Optimization function: R

Optimization criterion: R < 10-2

Method: Monte Carlo

Optimization. Results

Table 2 – Model parameters before and after optimization with interval volume N = 20000, silver chloride thickness d2 = 1 nm and tolerance on R equal to α = 10-2 The resulting number of iterations is of the order of n = 10000

Parameter	Input interval	Output interval
$d_{1,}$ nm	[40, 60]	[53.52, 53.73]
λ, nm	[635, 700]	[683, 684]
n_2	[1.9004, 2.0668]	[1.9924, 1.9961]
n_0	[1.4, 1.8]	[1.480, 1.482]
ω_p	[69370, 77430]	[71970, 72160]
γ	[145.2; 363.0]	[280.82, 288.61]

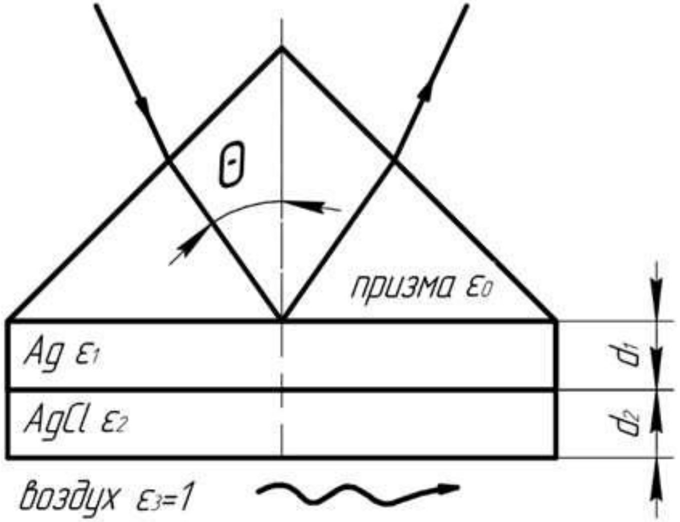


Fig. 11. Configuration of the indicator for corrosion of silver coating by chlorine

Optimization. Effect of AgCl thickness

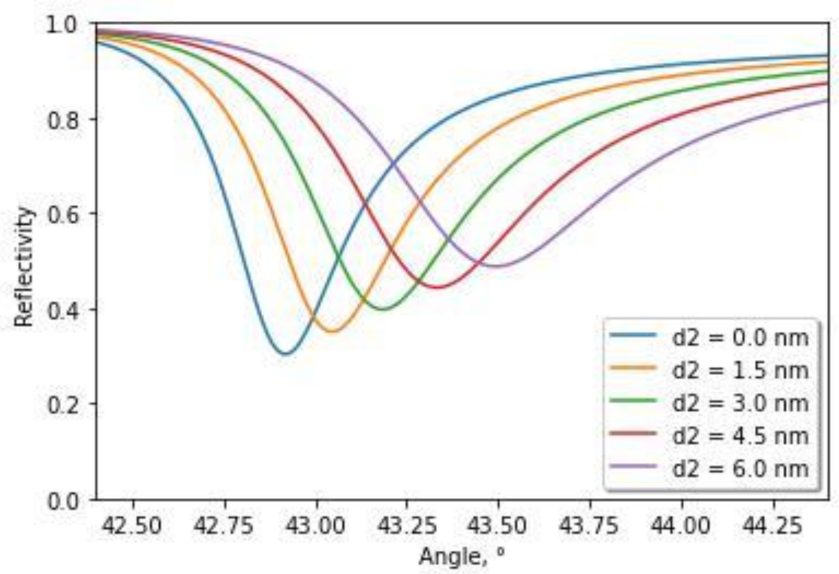


Fig. 12. Resonance curves for the non-optimized indicator. n0 = 1.514, d1 = 40 nm, λ= 632.8 nm, ωp = 69370, γ = 363, n2 = 1.91

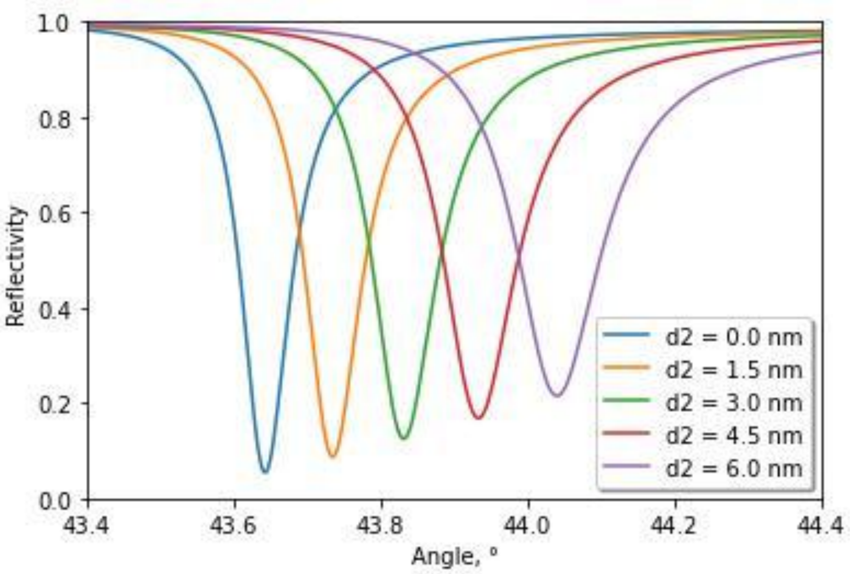


Fig. 13. Resonance curves for the optimized indicator. n0 = 1.481, d1 = 53.6 nm, λ= 683.5 nm, ωp = 72920, γ = 171.4, n2 = 1.995

Conclusions

1. The possibility of using the SPR method for tracking the growth of a corrosion film and detecting low concentrations of harmful substances in the air was demonstrated;
2. 2. The method operation was simulated in Python;
3. 3. An optical scheme of the indicator based on the SPR was developed;
4. 4. An experimental setup was assembled and an experiment was conducted to track the degradation of a thin silver film in the presence of active chlorine in the air;
5. 5. The effect of the SNR on the error of the method was assessed;
6. 6. Optimization of the indicator parameters was carried out using the Monte Carlo method.

In the future, the STC UP RAS plans to develop a working model of the indicator that takes into account a larger number of parameters affecting errors, as well as conduct an experiment using the data obtained as a result of optimization.

Publications

1. Khasanov I.Sh., Ivanchenko A.M., Development of an indicator of the accumulated effect of low concentrations of harmful substances in the air based on surface plasmon resonance // Methods and means of scientific research: Matem. Cand. Sci. 2: STC UP RAS, 2021. Pp. 8-12.

The results of the work were reported at scientific conferences:

1. XXX International scientific and technical conference of students and postgraduates "Radio electronics, electrical engineering and power engineering“
2. XXX All-Russian festival "Russian student spring“
3. Final of the program "UMNIK"

Thank you!

Author:
Student of group RL2-82B
Ivanchenko A.M.
ivanchenko.anna.m@gmail.com
Scientific supervisor: Batshev V.I.