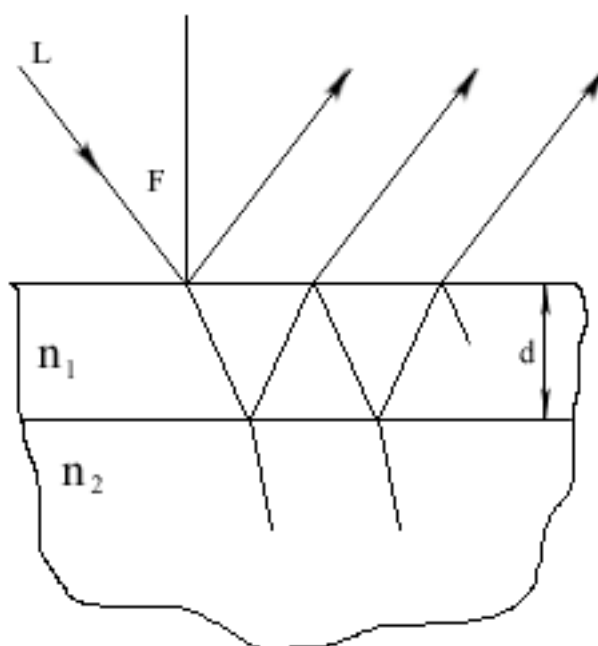

ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Учебное пособие

Под ред. В.Т. Прокопенко



Прокопенко В.Т., Никущенко Е.М., Дмитриев А.Л., Алексеев С.А., Нагибин Ю.Т., Трофимов В.А., Туркобоев А. Оптико-физические измерения. Лабораторный практикум. / Учебное пособие. Под редакцией д.т.н., проф. В.Т. Прокопенко. СПб: СПб ГУ ИТМО, 2006. 58с.

3 4

- « , ».

10 13.06.2006 .)

(

© -

,
,
2006.

© Авторы, 2006.

Содержание

1.	3
2.	1.	4
3.	3.	4
4.	11
5.	4.	16
6.	5.	21
7.	7.	30
8.	38
	51

Введение.

« - »,
:
1. ;
2. , ;
3. ;
4. .
2 6 .
- .
,
.
5, .
:
1. ;
2. ;
3. ;
4. ;
5. ;
6. (),

Лабораторная работа № 1

ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ

Введение (краткая теория).

()

-

.

,

,

,

.

,

-

,

-

.

b

,

,

n_1 n_2 .

Δ ,

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (1)$$

0,003÷0,010.

$a = 3 \div 5$

$a = 25-100$;

$2b = 125 \div 300$.

$n(r)$

$$n(r) = n_1 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^p \right]^{1/2} \quad (2)$$

p -

($p = 2 \dots, \infty$).

(N),

Θ_0

$$NA = n_0 \sin \Theta_0 = n_0 \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (3)$$

n_0 -

(, $n_0 \approx 1$).

,

$$\eta = \frac{\dots}{\dots} \quad (4)$$

$r \leq a$,

$$\eta = (NA)^2 \quad (5)$$

η

()
()

$$a = -10 \lg \eta \quad (6)$$

$\alpha < 1$,

$n(r)$

()

10^9 * ,

$n(r)$

$n(r)$,

$(n_1 - n_2)$

(

$n(r)$.

β

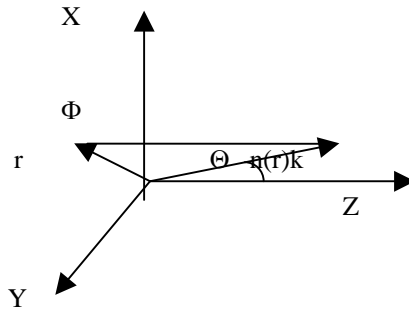
$$n_2 k < \beta < n_1 k \quad (7)$$

$k = 2\pi/\lambda$ (

$n_1 - n_2$)

⊖

$$\beta \quad (1)$$



. 1

Z .

$$\cos \Theta = \frac{\beta}{kn(r)} \quad (8)$$

$$\Theta = \Theta_r, \quad \beta = n_2 k,$$

$$\cos \Theta_r = \frac{n_2}{n(r)} \quad (9)$$

Θ_r

r,

$S(\Theta)$

$dP,$

$d\sigma$

$d\Omega$

$$dP = S(\Theta)d\sigma d\Omega = S(\Theta) \frac{\cos \Theta}{n^2} dW \quad (10)$$

$dW -$

()

(1) (2)

$$\left. \begin{aligned} dW_1 = dW_2 \\ dP_1 = dP_2 \end{aligned} \right\}$$

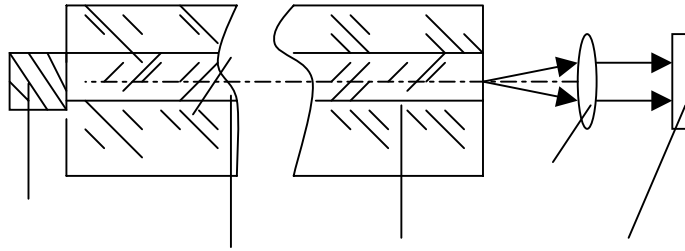
(11)

C

(10)

$$\left(S(\Theta) \frac{\cos \Theta}{n^2} \right)_1 = \left(S(\Theta) \frac{\cos(\Theta)}{n^2} \right)_2 \quad (12)$$

(12) ,
(.2).



.2

$$S(\Theta) \approx S = \text{const} \quad \cos\Theta \approx 1,$$

$$dP = S \frac{n^2(r)}{n_2^2} \sin \Theta d\Theta d\Phi \quad (13)$$

$$P(r) = \frac{S n^2(r)}{n_2^2} \int_0^{2\pi} d\Phi \int_0^{\Theta_2} \sin \Theta d\Theta = 2\pi \frac{S n(r)}{n_2^2} [n(r) - n_2] \quad (14)$$

(13,14) $n_2 -$

$n(r) - n_2 \ll n_2,$

$$P(r) = \frac{n_1(r) - n_2}{n_1 - n_2} P_{\max} \quad (15)$$

$$n_1 = \max_{n(r)} \quad P_{\max} = \max P(r).$$

$P(r)$

$$n(r) = n_2 + (n_1 - n_2) \frac{P(r)}{P_{\max}} \quad (16)$$

$n(r) \quad n_2$, $n(r),$

$$n(r) = \left[(n_1^2 - n_2^2) \frac{P(r)}{P_{\max}} + n_2^2 \right]^{1/2} \quad (17)$$

(16,17)

2.

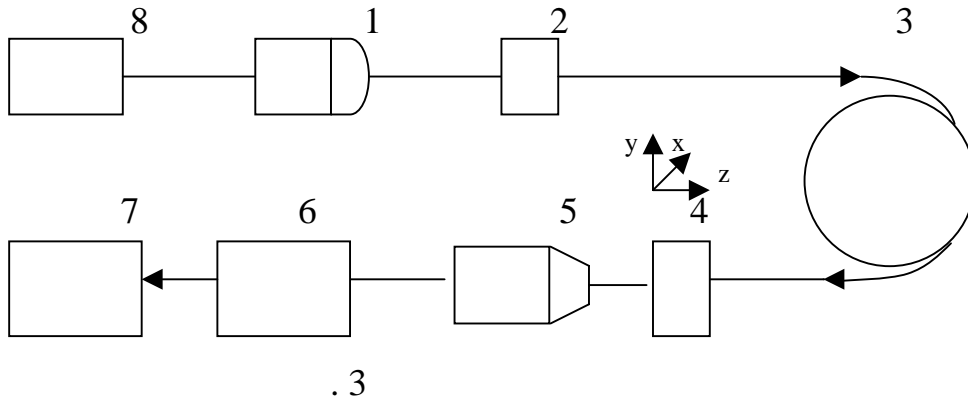
n_2

n_1

$P(r),$

2. Описание экспериментальной установки.

:
 1) ();
 2) .
 1- :
 - ,
 - ,
 - ,
 - .
 2-
 .3.



1- , 2,4- , 3- , 5-
 6- , 7- , 8-

(1)

(3).

(5)

(6).

$P(x,y)$

VEC631.

1. Проведение измерений.

Этап №1 ()

()

3-5 . ,

, , , .

(3-5°).

Этап №2 ()

Перед начало измерений ознакомиться с описанием программы OSC WDM.

Порядок измерений:

- . 3. OSC WDM
- « »/« »
50.
- « » « Y»
P(x) P(y).
- Excel.
- « », « »
OSC WDM .
- Excel.
- (17), $n(r)$
 $n_1=1,490$ $n_2=1,480$.
 $n(r)$.

2. Задание

)
) $P(r)/P_{max}$ $n(r)$ ()
) , . . . , , .

Литература.

1. . . . - .: . . . , 1998.
2. . . . , - .: . . . , 1991.
3. . . . - (. . .) . - .: . . . , 1991.
4. - - .: . . . , 1987.
5. , 1980, 68, .32-57.

Лабораторная работа №3

ИЗМЕРЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТОНКИХ ПЛЕНОК МЕТОДОМ ИНТЕРОФЕРОМЕТРИИ ПЕРЕМЕННОГО УГЛА ПАДЕНИЯ

Цели и задачи работы

-
-

1. Основные теоретические положения

VAMFO (Variable Angle Monochromatic Fringe Observation),

VAMFO

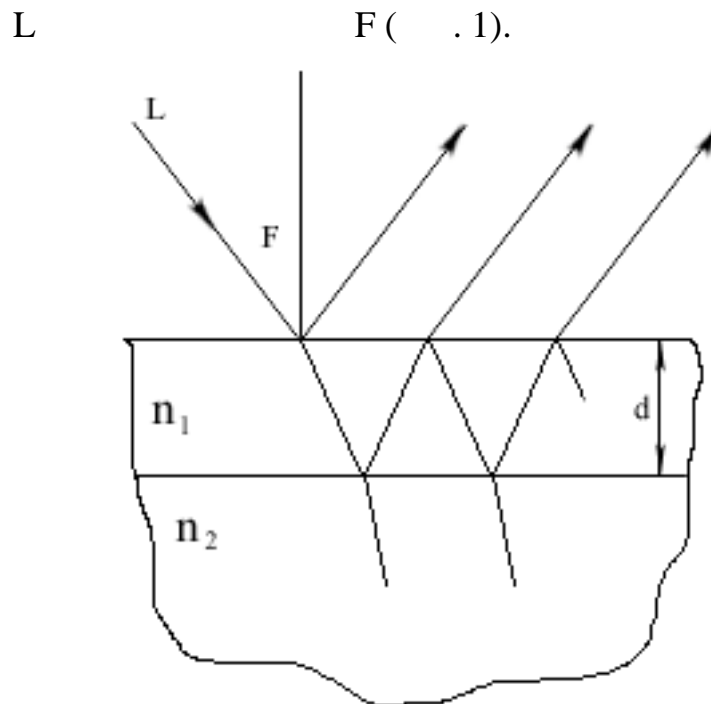
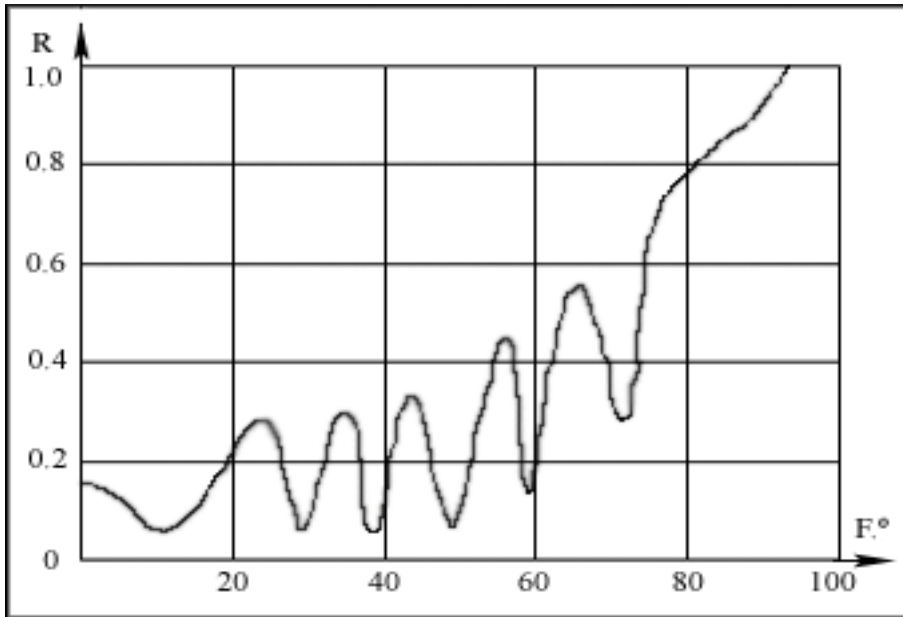


Рис. 1. Ход лучей в тонкой плёнке при наклонном



2. $R(F)$:
 $n=1.45$; $n=2.0, d=7$; $= 0,633$.

δ

:

$$\delta = 2d(n^2 - \sin^2 F)^{1/2} + L/2 \quad (1)$$

$d -$; $n -$,

(. 2). ,

:

$$\begin{aligned} 2d(n^2 - \sin^2 F)^{1/2} &= mL \\ 2d(n^2 - \sin^2 F')^{1/2} &= m'L \end{aligned} \quad (2)$$

$m - m' -$.

(2)

d

:

$$d = (m - m')L / 2[(n^2 - \sin^2 F)^{1/2} - (n^2 - \sin^2 F')^{1/2}] \quad (3)$$

$(m - m')$, (3),

$$F - F' \quad (3)$$

(2),

$$m = (m - m')(n^2 - \sin^2 F)^{1/2} / [(n^2 - \sin^2 F)^{1/2} - (n^2 - \sin^2 F')^{1/2}] \quad (4)$$

m

$F=0$

F F'.

1.

0,2%.

$$Z(n) = \sum_{k=1}^M \{ [m_{2k} - \text{int}(m_{2k})]^2 + [m_{k-1} - \text{int}(m_{2k-1}) + 0.5]^2 \} \quad (5)$$

k=1

$$Z(n) = \sum_{k=1}^M \{ [m_{2k} - \text{int}(m_{2k}) + 0.5]^2 + [m_{k-1} - \text{int}(m_{2k-1})]^2 \} \quad (6)$$

k=1

1.

min, max	F	n = 1,460		n = 1,477		n = 1,476	
		n ² - sin ² F	m	n ² - sin ² F	m	n ² - sin ² F	m
min	14,80	0,9846	12,18	0,985	12,50	0,9849	12,49
max	28,50	0,9451	11,69	0,9463	12,01	0,9463	12,00
min	38,70	0,9037	11,18	0,9059	11,50	0,9059	11,49
max	47,20	0,8645	10,70	0,8678	11,01	0,8677	11,00
min	56,10	0,8227	10,18	0,8271	10,50	0,8269	10,49

2. Содержание экспериментальной части.

45° ... 70°.

He-Ne

0,633

... 1 2
70°.

45°...

45°... 70°.

45°... 70°

20°.

... 1 - 4

3. Обработка и анализ полученных экспериментальных данных.

1. Определение угловой координаты анализируемого экстремума

I(F)

$$I(F) = b_0 + b_1 F + b_2 F^2 \quad (7)$$

I(F).

F_k (

N=5 - 10),

I(F)

20 - 30%

(

).

$$b_0 N + b_1 \sum_{k=1}^N F_k + b_2 \sum_{k=1}^N F_k^2 = \sum_{k=1}^N I_k \quad (8)$$

$$b_0 \sum_{k=1}^N F_k^2 + b_1 \sum_{k=1}^N F_k^3 + b_2 \sum_{k=1}^N F_k^4 = \sum_{k=1}^N F_k I_k \quad (9)$$

$$b_0 \sum_{k=1}^N F_k^3 + b_1 \sum_{k=1}^N F_k^4 + b_2 \sum_{k=1}^N F_k^5 = \sum_{k=1}^N F_k^2 I_k \quad (10)$$

b₀, b₁, b₂,

F_M,

$$F_M = -b_1 / 2b_2 \quad (11)$$

2. *Расчёт толщины и показателя преломления плёнки.*

1 ((5) (6)).

1.
(3)

4. *Контрольные вопросы.*

1.

2.

3.

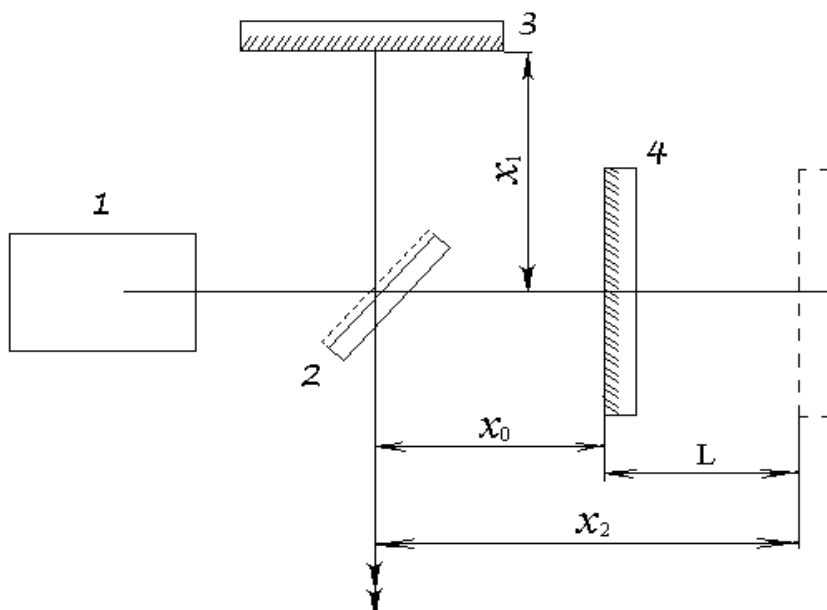
5. Литература.

1. . . . , , 1986.
2. . . . ,1,2 ., 1977

Лабораторная работа № 4
ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО МЕТОДА
ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

1. Введение.

2. Основные теоретические положения.



.1

$E_{1,2} = a_{1,2} \exp\{-i(\omega_{1,2}t + 4\pi x_{1,2})/\lambda_{1,2}\};$ (1)
 $a_{1,2}; \omega_{1,2}; \lambda_{1,2}$
 x_1, x_2

$$E_{1,2} = a_{1,2} \exp\{-i(\omega_{1,2}t + 4\pi x_{1,2})/\lambda_{1,2}\}; \quad (1)$$

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$$

$$I = (E_1 + E_2)(E_1 + E_2)^* = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos[4\pi(x_2 - x_1)/\lambda - (\omega_2 - \omega_1)t]; \quad (2)$$

$$a_1^2 + a_2^2 = A_0; \quad 2a_1a_2 = A; \quad x_2 = x_0 \pm \int_0^t v(t)dt;$$

$$U(t) = A_0 + A \cos[4\pi(x_0 - x)/\lambda \pm (4\pi/\lambda) \int_0^t v(t)dt - (\omega_2 - \omega_1)t]; \quad (3)$$

$$A_0$$

$$x_0 - x_1$$

$$(3) -$$

$$\varphi = (4\pi/\lambda) \int_0^t v(t)dt = (4\pi/\lambda)L; \quad (4)$$

$$L = (\lambda/2)(\varphi/2\pi) = (N + \Delta N)(\lambda/2); \quad (5)$$

N, ...

ΔN

n_e ,

:

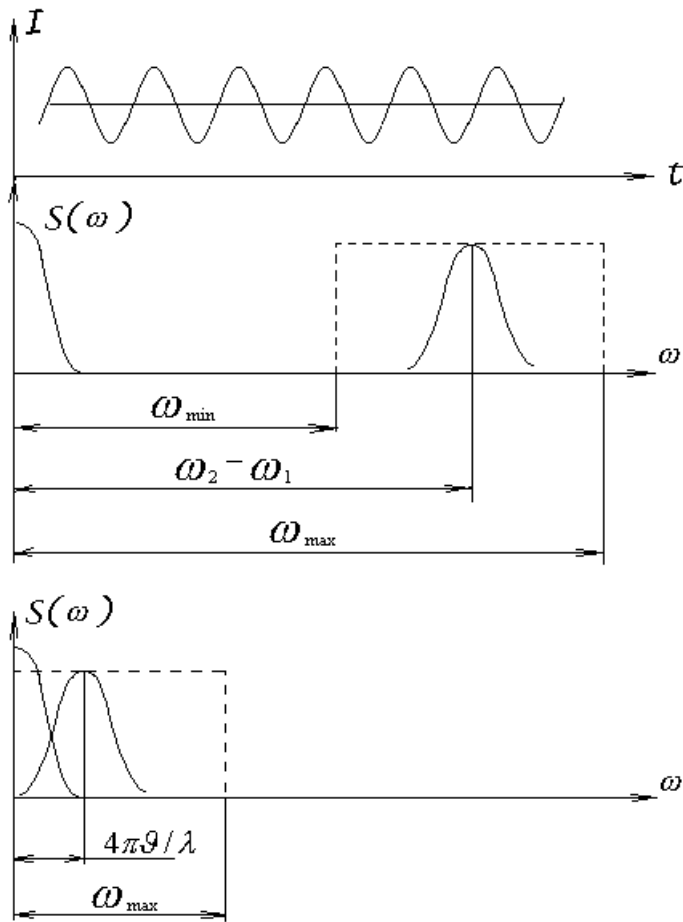
$$L = (N + \Delta N)(\lambda_{BAK} / 2 n_e) ; \quad (6)$$

λ_{BAK}

2

A_0

()



. 2

A_0 ,

$S(\omega)$

I

3 4

$(x_2 - x_1 = const)$,

$\omega_2 - \omega_1$

$$\omega(t) = (\omega_2 - \omega_1) - \omega(t) \quad \text{and} \quad (\omega_2 - \omega_1) + \omega(t)$$

$$\omega_{\max} - \omega_{\min} = 2 \omega_{\max} = 4\pi \nu_{\max} / \lambda$$

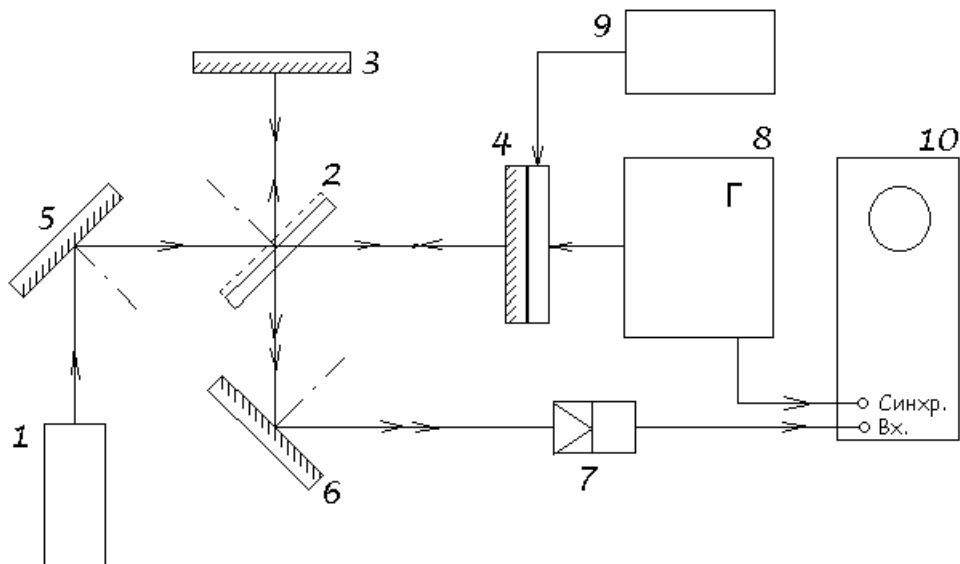
“ $\omega_2 = \omega_1$ ”,

2

ν_{\max}

$$\omega_{\max} = 4\pi \nu_{\max} / \lambda$$

3. Описание экспериментальной установки.



.3

- 1 – ;
- 2 – ;
- 3 – ;
- 4 – ;

- 5,6 – ;
- 7 – ;
- 8 – ;
- 9 – ;
- 10 – . , , , , , , 4 –

4. Содержание работы.

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.
- 6.

Литература

- 1. . . , ., 1976. (. . .).
- 2. , ., 1952.
- 3. . . „ „ , ., 1973.

Лабораторная работа № 5
ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРОВ И КИНЕТИКИ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ
ОРГАНИЧЕСКИХ КРАСИТЕЛЕЙ

Цель работы:

- ,
() ;
- , ,
« - 02 - », ,
.

Основные теоретические положения

· , ,
, ,
, .
, .
, .
, 300 1200
·
, -
(, , ,).
, , $10^{-9} - 10^{-8}$,
·
,
-
 S_0 ,
 S_1 (. . 1).

, $10^{-12} - 10^{-11}$, v_0 S_1 .

S_0 , T_1 , v , v_0 ,

S_0 , (. 2).

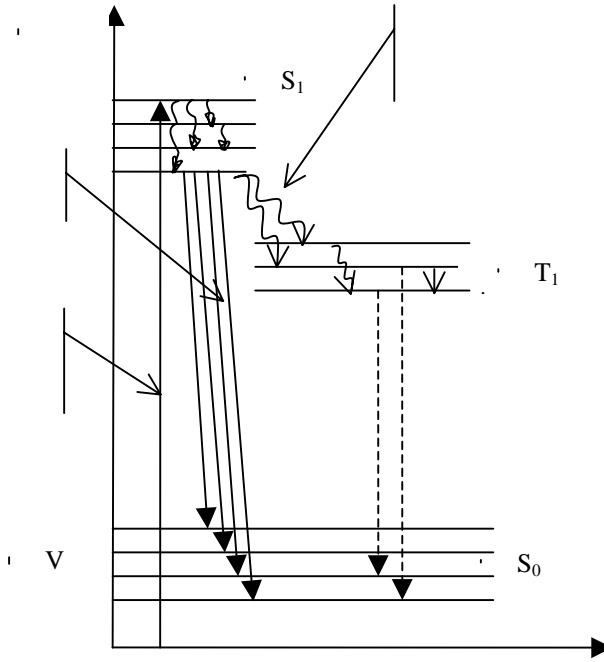
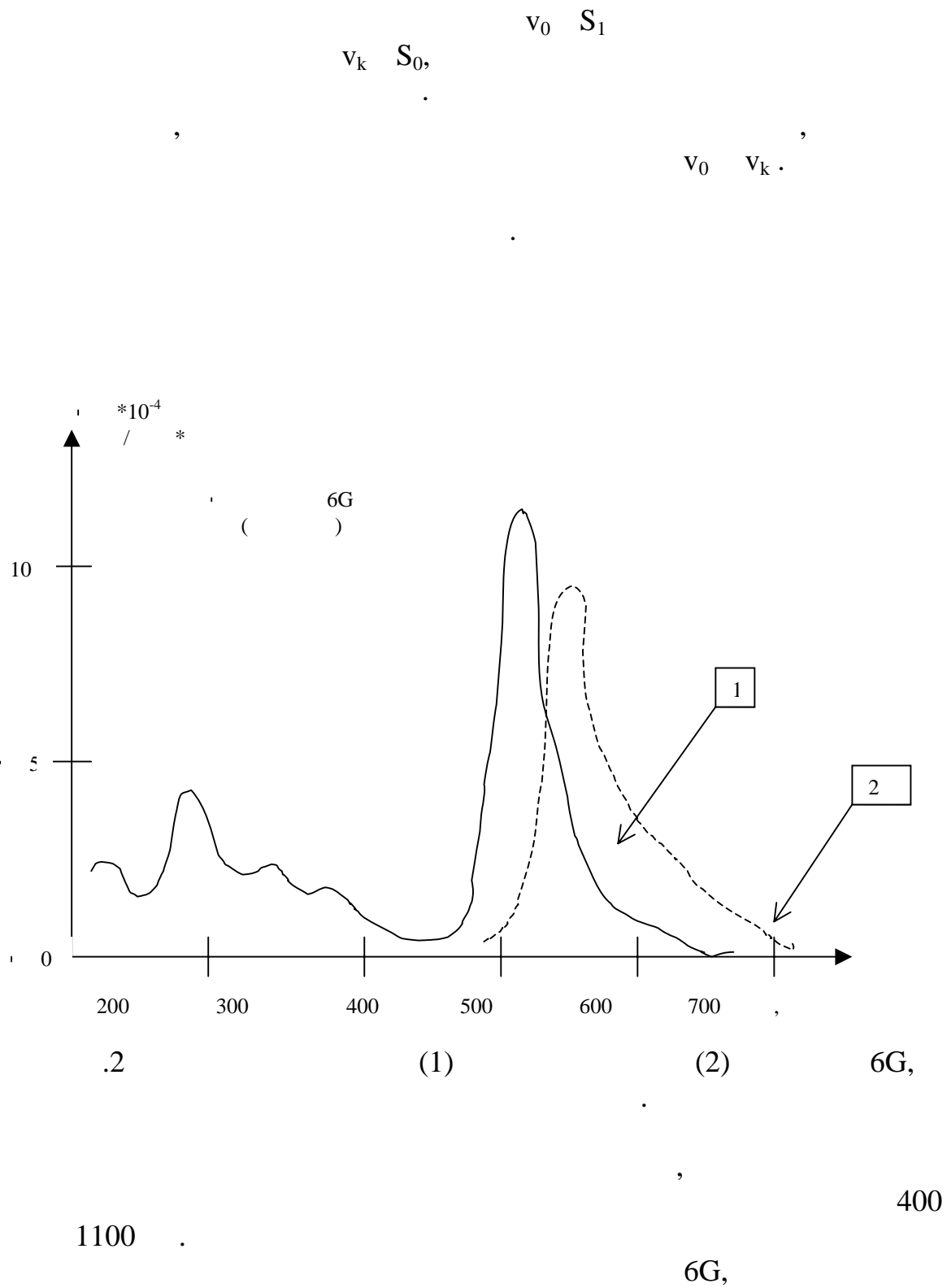


Рис.1 Диаграмма энергетических уровней и



.2.

()

,

,

.

Описание работы спектрофлуориметрического анализатора «ФЛЮОРАТ – 02 – ПАНОРАМА»

.3.

.

:

() "I",

"II",

() "III"

() "IV".

(1) -

(≈ 1)

,

25 .

,

-

(190)

(2.5).

« »

,

,

(

,

500

250),

,

(2)

400 .

,

:

-

210 – 730

-

210 – 730

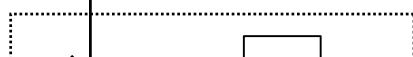
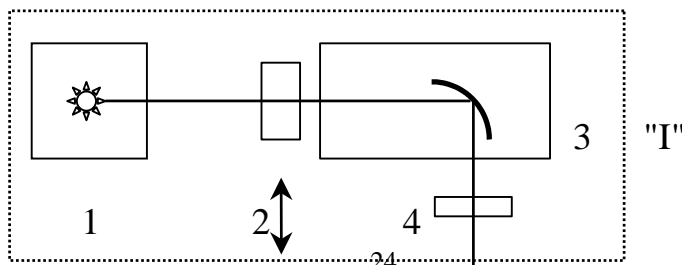
300 – 840

флуориметрическом

(3)

(5)

(6).



5

12 "II"

"IV"

8

6

7

9

10

11 "III"

.3.

« -02- ».

-
- 1 -
- 2 -
- 3 -
- 4 7 -
- 5 10 -
- 6 -
- 8 -
- 9 -
- 11 -
- 12 -

()

()

, (8)

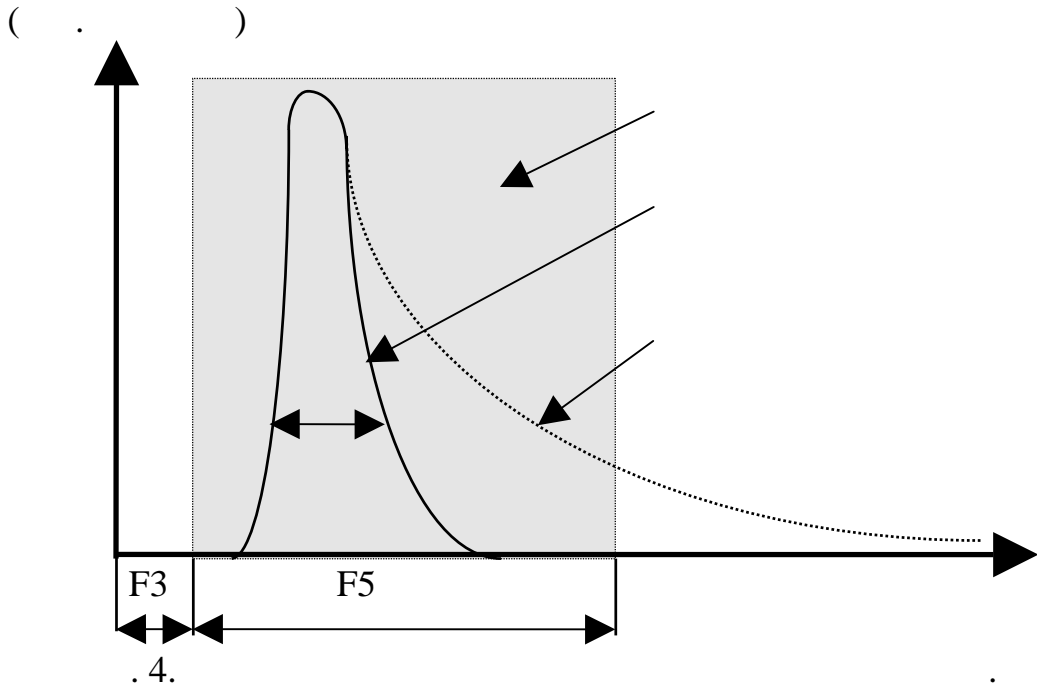
()

, (. .)

(9) -

()

.4.



(),
 ().
 /
 ()

F3)

(F5).

- 1)
- 2)

_____.

(4 7),



(5) (3)


(12)

_____.

- 3 .

Порядок проведения лабораторной работы

1. « -02-
» 220 , 50 .
2. « », .
3. .
4. .
« »
Главное окно
:
()
: *Файл, Прибор, Измерения, Градуировка, Установки, Окно, Помощь.*
5. *Измерения* *Спектральные,*
 ,
 .
Спектральные измерения.
6. :
Синхронное сканирование,
210 600 , 1 ,
10,
120 – 200
Флюориметрический
– *Выкл.*
– *Средняя.*
– 0.05 , – 3 .
7. *Старт.*
()
(
04 – 06,
Старт.

8.  *Маркер на максимум,*
Графика
- 1 90
9. *Коррекция на опору,* 
Маркер на максимум
- обработки*
10.  *Перемещение графика в окно*
Новое окно.
Сканирование по регистрации.
- .9.
- ()
- .6. *Сканирования по регистрации*
- .9
- 800
11. *Старт.*
- Коррекция на опору.*  *Маркер на*
максимум
12. 1. *Сканирование по возбуждению.*
- .11.
- .6.
13. *Старт.*
- Коррекция на опору.*  *Маркер на*
максимум
1. *Файл*
- Сохранить как,* 3
- d:\
- Файл Экспортировать в Excel*
2000. *Окно обработки.*
14. « » *Монохроматор регистрации*,
.11, « » *Монохроматор возбуждения -*
.13.
- Установить.*
15. *Спектральные измерения.*
16. *Измерения* *Кинетику*
люминесценции, 

*Кинетика люминесценции.
Кинетика люминесценции.*

17. :
 - *Стробирования по задержке*
 - 0.05 10 , 0.05 ,
 3 , 10
 - *Коррекция на опору*
 - *– Средняя*
18. *Старт.*
 .
 ()
 , . (04 – 06, *Старт*).
19. ,
20. *Файл* *Сохранить как,*
 , d:\ \ *Экспортировать в*
Excel 2000.
Файл
21. .
22. *Главное окно* .
 « ».
1. . . - .
 . – ,, , 1980. – 126 .
2.
 – ,, , 1994. – 336 .
3. . . . – ,, -
 , 1997. – 200 .
4. « -
 02- ». – ,, « », 2003 – 37 .
5. « -02- ». ,, « », 2003, 39 .

Лабораторная работа № 7

ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ И ОПТИЧЕСКОЙ РАЗНОСТИ ФАЗ

1.1 Цели и задачи работы.

- ;
- " "
- , ;
- .

1.2 Основные теоретические положения.

- .
- ,
- ,
- .

1.2.1 Измерение параметров поляризованного излучения

" (,) , (.) , " " - .

$$E_x := E_{x0} \cdot \sin(\omega \cdot t + \delta_x) \quad (1)$$

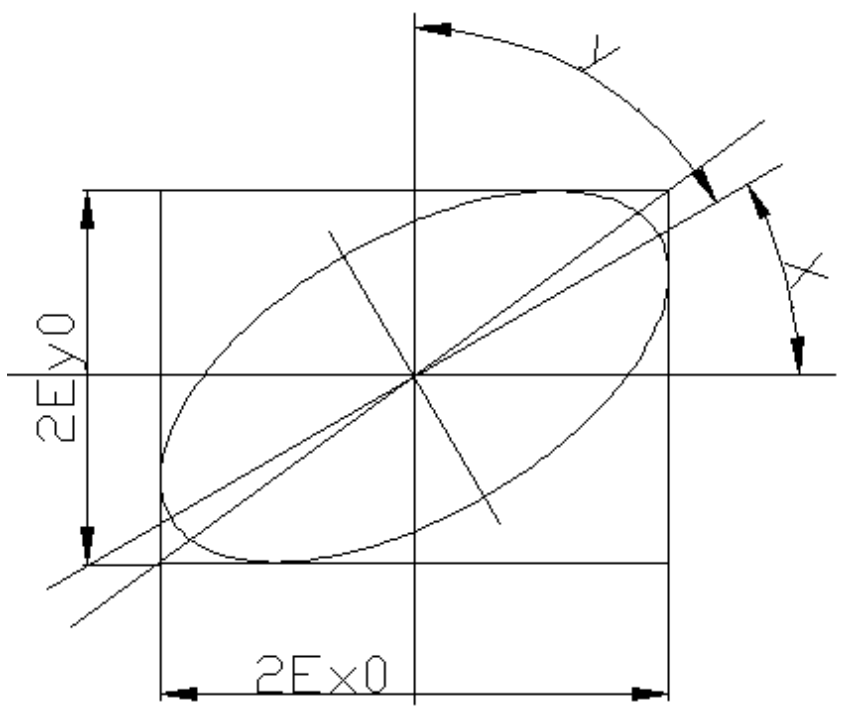
$$E_y := E_{y0} \cdot \sin(\omega \cdot t + \delta_y) \quad (2)$$

(1) (2) XY

$$\text{!} \quad (3)$$
$$\text{!} \quad (4)$$

(.1): ,

$tg\gamma = b/a$ -



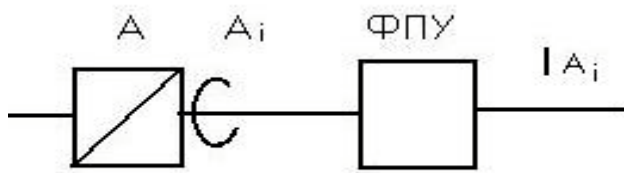
.1.

$$\cos 2\psi := -\cos(2\gamma) \cdot \cos(2\chi) \quad (5)$$

$$tg\delta := \frac{tg(2\gamma)}{\sin(2\chi)} \quad (6)$$

$$tg 2\chi := -tg(2\psi) \cos(\delta) \quad (7)$$

$$\sin 2\gamma := \sin(2\psi) \sin(\delta) \quad (8)$$



.2

«

».

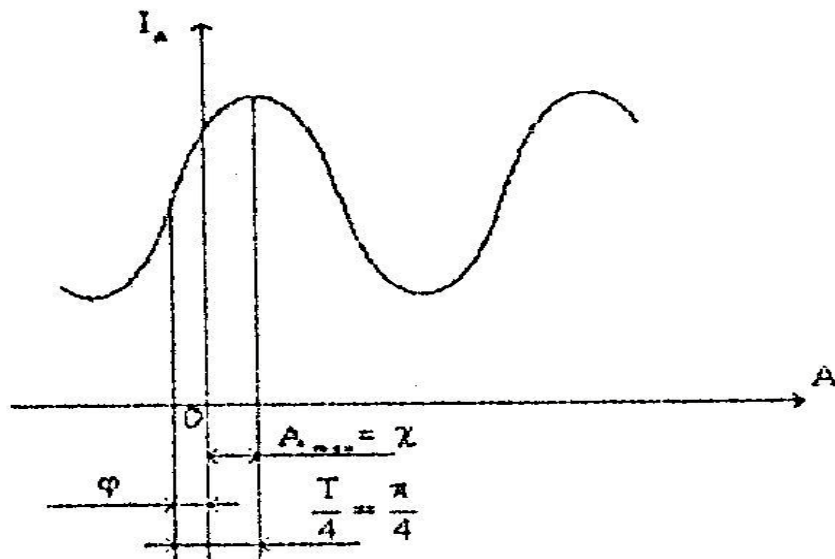
$$I = I_0 + I_m \sin [2(A + \varphi)], \quad (9)$$

I_0 -

I_m -

$I_A(\varphi)$

.3.



.3.

$I_A(\varphi)$

;
 I_A

max»

$$tg \gamma = a/b;$$

$$tg \gamma = \sqrt{\frac{I_{min}}{I_{mfI}}};$$

$$tg \gamma = \sqrt{\frac{I_0 - I_m}{I_0 + I_m}};$$

(10)

$$= (\pi/4) - \dots \quad (11)$$

$$, I_{\min}, I_{\max},$$

$$(9)$$

$$I(A) := a_0 + \left[\sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cdot \cos(kA) + b_k \cdot \sin(kA)) \right] \quad (12)$$

$a_0, a_k, b_k -$

$$(9)$$

$$(12)$$

$$I(A) = a_0 + a_2 \cos(2A) + b_2 \sin(2A) \quad (13)$$

$$(13)$$

$$(9),$$

$$2 = \arctg(b_2/a_2) \quad (14)$$

$$I_m^2 = a_2^2 + b_2^2 \quad (15)$$

$a_0, a_2, b_2,$

$I(A).$

$I_1 = I(A)$

$$A_i = (4\pi/N)i, \quad N -$$

$$a_0 := \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N I_i \quad (16)$$

$$a_2 := \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=0}^N I_i \cdot \cos\left(\frac{4\pi}{N} \cdot i\right) \quad (17)$$

$$b_2 := \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=0}^N I_i \cdot \sin\left(\frac{4\pi}{N} \cdot i\right) \quad (18)$$

$$(10), (11), (14) \quad (15)$$

;

$$= (\pi/4) - (1/2) \arctg(b_2/a_2) \quad (19)$$

$$\operatorname{tg} \gamma := \frac{a_0 - \sqrt{(a_2)^2 + (b_2)^2}}{\sqrt{a_0 + \sqrt{(a_2)^2 + (b_2)^2}}} \quad (20)$$

"Gaertner Scientific" /USA/, ETA "IBM Corporation" /USA/ L115, L116).

1.2.2. Измерение оптической разности фаз, вносимой ,двулучепреломляющим объектом.

... ;

(" ").

;

.

А. Изменение эллиптичности

;" L- ; " F- ;

8

5

(4)

$$\operatorname{tg} \psi = E_x / E_y = 1 / \operatorname{tg} P \quad (21)$$

(8),

$$\sin \delta := \frac{\sin(2 \gamma)}{\sin(2 \psi)} \quad (22)$$

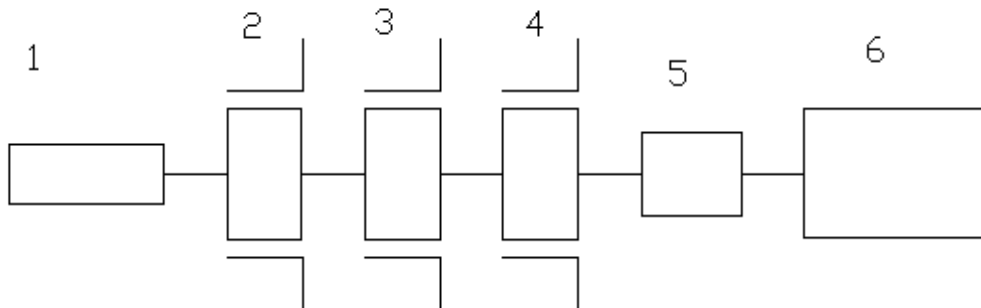
Б. Измерение азимута

... (22),

$$\cos \delta = -\frac{\operatorname{tg} \chi}{\operatorname{tg} \psi} = \operatorname{tg} 2 \chi \operatorname{tg} 2 \rho \quad (23)$$

Содержание экспериментальной части

...
 - " () ;
 - " ().
 ...
 .4.



.4.

1 - (He-Ne);
 2 - ;

- 3 - ();
- 4 - ;
- 5 - ;
- 6 - .

При проведении измерений рекомендуется пользоваться следующей методикой:

1. , .
20 .
2. :
) , I_0 (
));
)
3. $0^0, 10^0, 20^0, \dots, 350^0$ - $I_0, I_1, I_2, \dots, I_{35}$. "
"
4. 3 .
" "
5. F - L -
, 20^0 (.2 3.
6. 22.5^0 .
:
) (
));
)
7. $0^0, 10^0, 20^0, \dots, 350^0$ --- $I_0^s, I_1^s, I_2^s, \dots, I_{35}^s$.
. 3- .

Обработка и анализ полученных экспериментальных данных.

1. .
(16), (17), (18).

a_0 - (16) : $a'_0 = a_0 - I_0$

2.

(19), (20)

(22), (23) .

1.

1

	a'_0	a_0	a_2	b_2	1	γ	$= ' - 0$
0	-	-					0
1							
2							
3							

$0 -$; $P = 20^0$; $1 -$.

Литература

1. ; , 1974.
2. ; , 1974.
3. ; , 1970, . 114 (174), . 76 – 80.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

I. Основные представления теории погрешностей

В физическом эксперименте всегда присутствуют погрешности. Погрешности делятся на систематические и случайные. Систематические погрешности возникают из-за неидеальности приборов, неточности измерений и т.д. Случайные погрешности возникают из-за случайных изменений условий эксперимента.

Систематические погрешности можно обнаружить и устранить. Случайные погрешности можно только уменьшить, увеличив количество измерений.

1) Систематические погрешности. Систематические погрешности возникают из-за неидеальности приборов, неточности измерений и т.д. Систематические погрешности можно обнаружить и устранить.

2) Случайные погрешности. Случайные погрешности возникают из-за случайных изменений условий эксперимента. Случайные погрешности можно только уменьшить, увеличив количество измерений.

3) Погрешности округления. Погрешности округления возникают из-за округления результатов измерений. Погрешности округления можно уменьшить, увеличив количество знаков после запятой.

Среднее значение \bar{x} и дисперсия σ^2 являются основными характеристиками случайных погрешностей. Среднее значение \bar{x} является оценкой истинного значения x_0 . Дисперсия σ^2 является оценкой разброса результатов измерений.

Среднее значение \bar{x} и дисперсия σ^2 определяются по формулам:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$
$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

где n — количество измерений, x_1, x_2, \dots, x_n — результаты измерений, x_0 — истинное значение.

[1].

$$\Delta x = x_i - x_0 \quad \text{i-}$$

$$x_i = x_0 + \Delta x_i .$$

$$\sum_{i=1}^n x_i = nx_0 + \sum_{i=1}^n \Delta x_i , \quad x_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i .$$

$$\sum_{i=1}^n x_i / n = \bar{x} -$$

:

$$x_0 = \bar{x} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i \quad (1)$$

$$n \rightarrow \infty , \dots$$

$$, \quad x_0 \rightarrow \bar{x} ,$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{i=1}^n \Delta x_i / n \right) = 0 \quad ($$

$$\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$$

).

0

\bar{x}

$$x_0 = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{i=1}^n x_i / n \right) \quad (2)$$

i

$$(x + \Delta x),$$

$$(\Delta n \sim n \Delta x).$$

$$\Delta n ,$$

$$\Delta n = f(x) n \Delta x , \quad f(x) -$$

$$\Delta x .$$

$$f(x)$$

i

$$(\Delta x = 1)$$

$$f(x) = \lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ \Delta x \rightarrow 0}} (\Delta n / n) \Delta x$$

$$f(x)$$

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta x^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

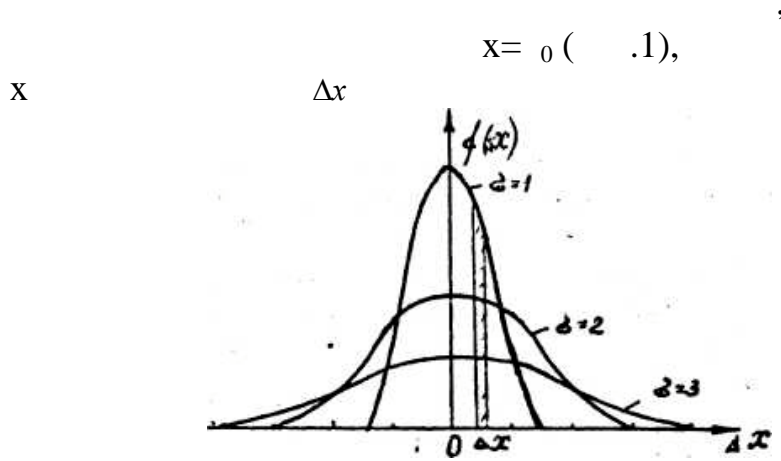
нормального распределения

Гаусса. σ^2 (3)

дисперсией

x)

$$x = 0($$



.1.

σ

.1

σ .

σ^2 ,

$f_{\max}(\Delta x)$. $f(\Delta x)$

$f(\Delta x)\Delta x = \Delta n/n$. .1

, x ($x + \Delta x$) .

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(\Delta x) d(\Delta x) = 1$$

$f(x)$

()

математическое

ожидание случайной величины:

$$x_0 = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx \quad (4)$$

, \bar{x}

$\bar{x} \approx x_0$),

$\Delta \bar{x}$:

$$x_0 = \bar{x} \pm \Delta \bar{x}$$

\bar{x} :

$$\bar{x} - \Delta \bar{x} \leq x_0 \leq \bar{x} + \Delta \bar{x}$$

$\Delta \bar{x}$, , ,

0

S_n ,
n

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (5)$$

S_n^2 - выборочной дисперсией;

S_n - выборочным стандартом;

$\lim_{n \rightarrow \infty} S_n^2 = \sigma^2$ - дисперсией;

$\bar{x}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ - выборочным средним;

n -

$$\sigma^2 = \lim_{\substack{\alpha \rightarrow \infty \\ n \rightarrow \infty}} \int_{-\alpha}^{\alpha} (x - \bar{x}_n)^2 f(x) d(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - x_0)^2 f(x) dx \quad (6)$$

(3)

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - x_0)^2 f(x) dx$$

x ,

$(x_1 \leq x \leq x_2)$:

$$P(x_1 \leq x \leq x_2) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx \quad (7)$$

$$P(x_1 \leq x \leq x_2) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx \quad (7)$$

$\pm \varepsilon$,

$$\varepsilon = (x - x_0)/\sigma, \quad d\varepsilon = dx/\sigma \quad (8)$$

(7)

$$P(-\varepsilon \leq x \leq \varepsilon) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\varepsilon}^{+\varepsilon} e^{-\frac{\varepsilon^2}{2}} d\varepsilon = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\varepsilon} e^{-\frac{\varepsilon^2}{2}} d\varepsilon \quad (9)$$

(интегралом вероятности) (9)

интегралом вероятности

$\Phi(\varepsilon)$.

(9)

ε

(8)

x_i ,

P ,

$$\Delta x_i = \varepsilon \sigma \quad (10)$$

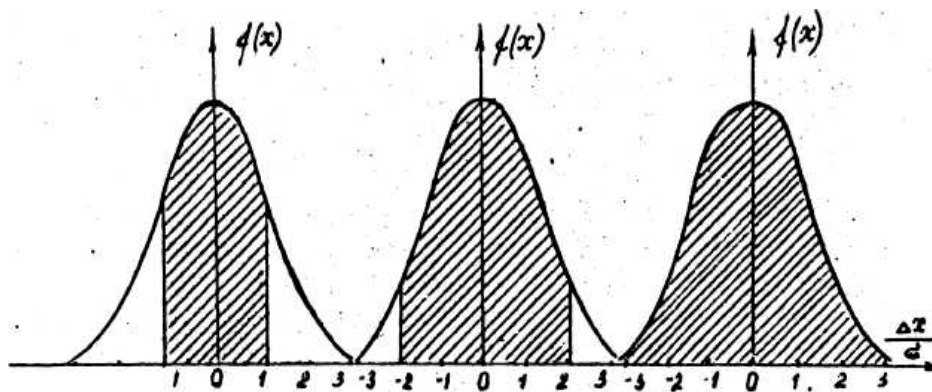
доверительной вероятностью (

- доверительными границами.

$x_0 + \sigma$ 0,683 (68,3%), $x_0 - 2\sigma$ $x_0 + 2\sigma$ 0,950 (95,0%), $x_0 - 3\sigma$
 $x_0 + 3\sigma$ 0,997 (99,7%) (0,997).

$x_0 + 3\sigma$ $x_0 - 3\sigma$ (

правило «трех сигм»).



.2

P

($\Delta x = \sigma, \Delta x = 2\sigma, \Delta x = 3\sigma$).

$$S_x^2 = S_n^2 / n, \quad \sigma_x = \sigma / \sqrt{n} \quad (11)$$

$$\Delta x = \varepsilon \sigma_x = \varepsilon \sigma / \sqrt{n} \quad (12)$$

$$(12) \quad \sigma - \quad (6)$$

$$\left(\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} S_n \right)$$

$$S_n^2 \quad (5)$$

- **распределением Стьюдента.**

$$\varepsilon = (x - x_0) / \sigma$$

$$\varepsilon \quad t_{p,n-1} \quad (8) \quad x_0 \quad \bar{x}$$

$\sigma \quad S_x$):

$$t_{p,n-1} = (x - \bar{x}) / S_x \quad (13)$$

Коэффициент Стьюдента

$$(-(x - \bar{x}), (x - \bar{x}))$$

$$(\quad P) \quad n)$$

$$\Delta_{n,p} \bar{x} = t_{p,n-1} S_x = t_{p,n-1} S_n / \sqrt{n} \quad (12)$$

$$x = \bar{x} \pm \Delta_{n,p} \bar{x} = \bar{x}_n \pm t_{p,n-1} S_{x_n} \quad (14)$$

$$(14) \quad (15),$$

\bar{x}
 Δx
 P
 x_0
 $(n=2 \div 10, P= 0,70 \div 0,95)$.

$$\delta_x = \pm \frac{\Delta_{n,p} \bar{x}}{x_n} 100\% \quad (16)$$

S_{ost}
 S_x
 $S_x > S_{ost}$
 $(n \leq 5), t_{p,n-1} \geq 3$
 $S_x / \sqrt{n} \leq S_{ost}; n \geq S_x / S_{ost}$
 $(5), S_{ost}$
 $n,$
 $5 \div 10.$

2. Математическая обработка результатов прямых измерений

(.1).

Алгоритм вычислений \bar{x}_n и $\Delta_p \bar{x}$ при прямых измерениях низкой точности ($\delta \geq 10\%$)

$$1) \bar{x}_n = \frac{1}{n} [x_i];$$

$$2) S_x = \sqrt{\frac{[x_i^2] - [x_i]^2 / n}{n(n-1)}}$$

$$3) \Delta_p \bar{x} = t_{p,n-1} S_x$$

x_i	x_i^2
x_i	x_i^2
...	...
x_n	x_n^2
$[x_i]$	$[x_i^2]$

$$4) x = (\bar{x}_n \pm \Delta_p \bar{x}) 10^k$$

2) \bar{x}_n . I) [...] - i. 10^k .

Алгоритм вычисления \bar{x}_n и $\Delta_p \bar{x}$ при прямых измерениях высокой точности ($\delta \leq 10\%$)

x_i	$x_i - A$	$(x_i - A)^2$
...
...
...
	$[x_i - A]$	$[(x_i - A)^2]$

Таблица 2

$$1) \bar{x}_n = A + [(x_i - A)] / n$$

$$2) S_x = \sqrt{\frac{[(x_i - A)^2] - (x_i - A)^2 / n}{n(n-1)}}$$

$$3) \Delta_p \bar{x} = t_{p,n-1} S_{\bar{x}}$$

$$4) x = (\bar{x}_n \pm \Delta_p \bar{x}) 10^k$$

$$\Delta_p \bar{x}$$

$$\Delta_p \bar{x}$$

$$\bar{x}_n$$

$$.2,$$

$$\bar{x}_n$$

$$(x_i - A)$$

Пример.

$$A = 3,90.$$

d_i	$(d_i - 3,9) 10^2$	$(d_i - 3,9)^2 10^4$
3,90	0	0
3,85	-5	25
3,88	-2	4
3,97	7	49
3,95	5	25
	5	103

$$1) \bar{d}_n = \left(3,90 + \frac{5 \cdot 10^{-2}}{5} \right) = 3,910 \text{ mm}$$

$$2) S_{\bar{d}} = \sqrt{\frac{103 - 25/5}{5 \cdot 4} \cdot 10^{-4}} = \sqrt{\frac{98}{20} \cdot 10^{-4}} = 0,022 \text{ mm}$$

3)

$$n=5$$

$$p=0,95$$

$$t_{p,n-1} = 3,2 \left(\dots \right)$$

$$\Delta_{0,95} \bar{d} = 3,2 \cdot 0,022 \text{ mm} = 0,070 \text{ mm}$$

4)

$$\delta d = \frac{0,070}{3,910} \cdot 100\% = 1,8\%$$

5)

$$d = (3,910 \pm 0,070 \text{ } p = 0,95) \text{ mm}$$

Примечание.

$$: 3,840 \leq d_0 \leq$$

3,960

p=0,95.

, p= 0,70,

$$t_{p,n-1} = 1,3; \Delta_p \bar{d} = 1,3 \cdot 0,022 = 0,029$$

$$d = (3,910 \pm 0,029 \text{ p}=0,70) \text{мм.}$$

()

$$3,881 \leq d \leq 3,939$$

p=0,70.

3. О приближенных вычислениях

$$X = 2,177 \quad \Delta x < 0,0005,$$

: 1,2,3,....,9, 0()

0,01752; 56,10

0,19; 0,0080

248,9;

$$(\quad , \quad x = 0,02463 \quad \Delta x = 0,00005 \quad).$$

) ()

- : (n+1)- 5, n-

6,673 6,67;

- : (n+1)- 5, n-

1: 8,677 ≈ 8,68;

a) $(n+1)$ - $5,$ $(n+2)$ - $:$
 $n-$ $1:$ $8,6753 \approx 8,68;$
 $)$ $n-$ $I,$
 $,$ $:$ $8,6750 \approx 8,66; 8,6650 \approx 8,66.$

$$x_1 = 4271,4 \quad x_2 = 3,42.$$

$$\Delta x_1 = 0,05 \quad \Delta x_2 = 0,005.$$

$$(\Delta x_2 = \sigma_1 / \Delta x_1)$$

$$\delta_{x_1} = \frac{0,05}{4271,4} \cdot 100 = 0,001\%, \quad \delta_{x_2} = \frac{0,005}{3,42} \cdot 100 = 0,15\%.$$

x_2 , x_1 , 150 , x_2 .

δ_{pr}

$$\delta_{pr} = \frac{\Delta x}{x_{pr}} 100\%$$

x , Δx

$$\delta_{pr} > \delta_x .$$

$$x = 47328$$

$$\Delta x = 50$$

x

$$x = 47300 \pm 50.$$

$$\delta_x = \frac{50}{47328} 100 = 0,1\%, \quad \delta_{pr} = \frac{500}{40000} 100 = 0,12\% .$$

δ_{pr}

- $5\% < \delta_{pr} < 50\%$
- $0,5\% < \delta_{pr} < 5\%$
- $0,05\% < \delta_{pr} < 0,5\%$
- $0,005\% < \delta_{pr} < 0,05\%$
- $0,0005\% < \delta_{pr} < 0,005\%$. . .

1. Сложение и вычитание приближенных чисел.

253,4; 4,853; 0,067; 44,23.

302,6.

$$: 253,4 + 4,9 + 0,1 + 44,2 =$$

При сложении абсолютная погрешность суммы равна сумме погрешностей слагаемых $\Delta S = \Delta x_1 + \Delta x_2 + \dots + \Delta x_n$.

$$, \quad 2,73 - 0,456 \approx 2,73 - 0,46 \approx 2,27.$$

62,49 = 0,79

: 63,28 -

0,05%, . . . 100

2. Умножение и деление приближенных чисел.

$$y = x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n \quad ; \quad y = x_1 / x_2 ;$$

$$\Delta y / y = \Delta x_1 / x_1 + \Delta x_2 / x_2 + \dots + \Delta x_n / x_n ; \quad \Delta y / y = \Delta x_1 / x_1 + \Delta x_2 / x_2 ;$$

Относительная погрешность произведения или частного определяется относительной погрешностью наименее точного заданного приближенного числа.

$$\underline{\hspace{2cm}} \cdot 3755,48 * 0,476 \approx 3760 * 0,476 \approx 1787,760 \approx 1790.$$
$$64,762 : 26,5 \approx 64,8 : 26,5 \approx 2,4483 \approx 2,45.$$

$$\underline{\hspace{2cm}} \cdot 8,49 * 7 \approx 59,43 \approx 59,4; \quad 9,23 : 7 \approx 1,3186 \approx 1,32.$$

3. Приближенные значения некоторых функций при $x \ll 1$.

	$\sqrt[n]{1 \pm x}$	$\frac{1}{1 \pm x}$	$(1 \pm x)^a$	$\frac{\sin x}{\operatorname{tg} x}$	$\cos x$	e^x	$\ln(1+x)$
	$1 \pm \frac{1}{n}x$	$1 \pm x$	$1 \pm ax$	x	$1 - \frac{1}{2}x^2$	$1+x$	x

$\log x$ x x_1/x_2 1, $x_1/x_2 \approx 1 + \frac{x_1 - x_2}{x_2}$ $e^x, \ln x,$
 x , $\sin x, \cos x, \operatorname{tg} x$

Практические указания при приближенных вычислениях

1. , . . .

π , .
2. (, ,) , ;
3. , ,
4. () . , () .

π ; , , () , , , ;

π ;

$c = (2,9979 \pm 0,0004)10^8 /$
 $= (2,99788 \pm 0,00042_{=0,95})10^8 / .$

Распределение Стьюдента

(
1906 .,
)

$$f(t) = \frac{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)}{\sqrt{\pi} \cdot \sqrt{n-1} \cdot \Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{t^2}{n-1}\right)^{n/2}}$$

n - , t - , (n) - ,
(n+1)=n!, $\Gamma(1/2) = \sqrt{\pi}$, $\Gamma(3/2) = \sqrt{\pi}/2$. .).
f(t) , f(x)
n → ∞ (n>20)
(σ=1).

Таблица наиболее употребительных значений коэффициентов Стьюдента

	P=0,70	P=0,80	P=0,90	P=0,95
n=2	2,1	3,1	6,3	12,7
3	1,3	1,9	2,9	4,3
4	1,3	1,6	2,4	3,2
5	1,2	1,5	2,1	2,8
6	1,2	1,5	2,0	2,6
7	1,1	1,4	1,9	2,4
8	1,1	1,4	1,9	2,4
9	1,1	1,4	1,9	2,3
10	1,1	1,4	1,9	2,3

Литература

1. 8.207-76. 16263-70.
2. , 1968.
3. 0. , 1970.
4. , 1965.

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ С ЛАЗЕРАМИ.

1. Общие положения и требования по технике безопасности.

1.1.

1.2.

18

1.3.

1.4.

«

».

1.5.

2. Опасности, возможные при работе с лазерами.

2.1.

10

2.2

2.3

2.4

5000

(,),

Режим работы лазера

Плотность энергии (мощность на входе в глаз)

При облучении глаза:

0.1	$2.7 \cdot 10^{-7} / \text{с}^2$
500	$2.5 \cdot 10^{-8} / \text{с}^2$
30	$2.1 \cdot 10^{-9} / \text{с}^2$

При облучении кожи:

	0.1	$/ \text{с}^2$
5		100
	$/ \text{с}^2$	
5		$1 / \text{с}^2$

Особое внимание и специальные меры предосторожности должны приниматься при работе с лазерами инфракрасной и ультрафиолетовой области спектра, так как эти лазеры излучают в невидимых частях спектра и могут вызвать повреждение глаз и ожоги кожного покрова.

3. Меры предупреждения и защиты. Требования к помещениям и оборудованию.

3.1.

3.2.

3.3.

3.4.

1.0 ,

3.5.

3.6.

(
)
1 .

3.7.

3.8.

3.9.

1 .

3.10.

3.11.

**должны быть установлены
плакаты с предупредительными надписями и
светопоглощающие экраны,**

3.12. « »

3.13. , ,

: « ! ! !»,

4. Индивидуальная защита операторов.

4.1

(

$$\begin{aligned} & - \\ & -22 (\\ & 0.69 \quad 1.06 \quad) \quad -14 (\\ & 0.49 \quad 0.53 \quad) \\ & -22 + \quad - 14; \end{aligned}$$

10.6 .

(1).

4.2

-

-

Необходимо помнить, что на зарядных конденсаторах накапливается остаточное напряжение порядка нескольких киловольт и соблюдение правил электробезопасности обязательно даже при наличии автоматической блокировки.

4.3.

5. Работа на установке.

До начала работы необходимо выполнить следующие условия:

5.1

5.2

« ».

5.3 :

) ;

) ;

) ,

;

) ,

,

Во время работы необходимо:

- 5.4. , , ,
- 5.5. : « ! !».
- 5.6. .
- 5.7. .
- 5.8. , .
- 5.9. , .
- 5.10. .

По окончании работы необходимо:

- 5.11. ,
- 5.12. .

Виктор Трофимович Прокопенко
Евгений Михайлович Никущенко
Александр Леонидович Дмитриев
Сергей Андреевич Алексеев
Юрий Тихонович Нагибин
Владимир Анатольевич Трофимов
Ашурбек Туркобоев

ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

00408 05.11.99.
27.10.06. 973 100