

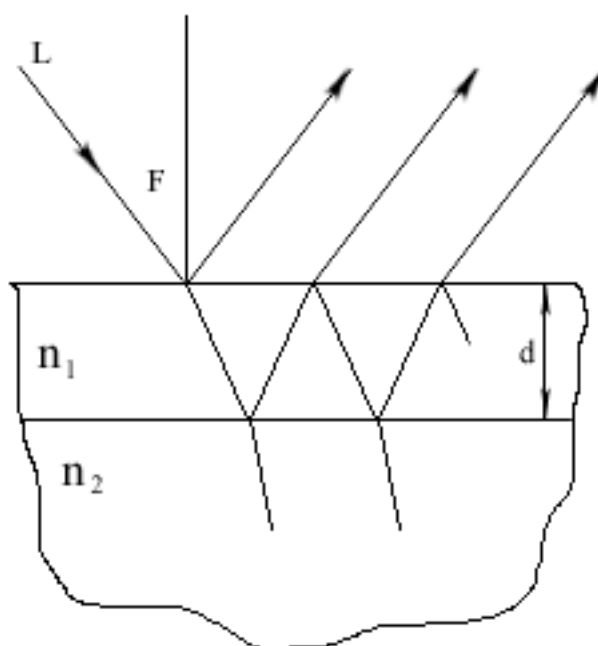
---

# 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.    | 11 |
| 4. | ..... | 16 |
| 5. | 4.    | 21 |
| 6. | 5.    | 30 |
| 7. | 7.    | 38 |
| 8. | ..... | 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

,

,

$n_1$   $n_2$ .

$\Delta$ ,

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

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 ),

$\Theta_0$

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

$n_0$ -

( ,  $n_0 \approx 1$ ).

,

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

$r \leq a$ ,

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

$\eta$

( )  
( )

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

$\alpha < 1$  ,

$n(r)$

( )

$10^9$  \* ,

$n(r)$

$n(r)$  ,

$(n_1 - n_2)$

(

$n(r)$ .

$\beta$

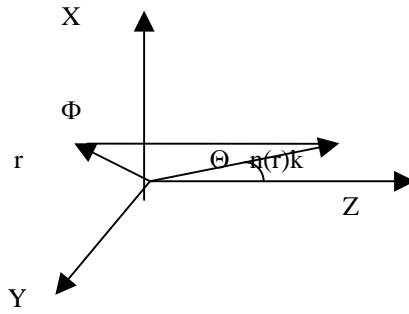
$$n_2 k < \beta < n_1 k \quad (7)$$

$k = 2\pi/\lambda$  (

$n_1 - n_2$ )

⊖

$$\beta \quad (1)$$



.1

Z.

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

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

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

$\Theta_r$

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)

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

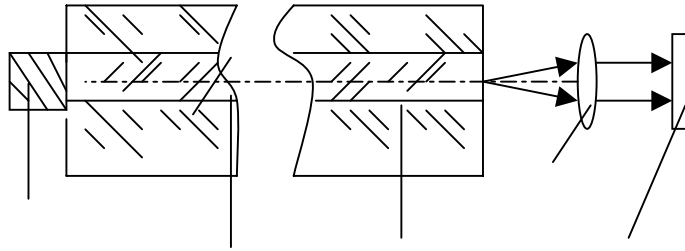
(11)

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)  $n_2 -$

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

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

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

$P(r)$

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

$n(r) \quad n_2,$

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

(16,17)

2.

$n_2$

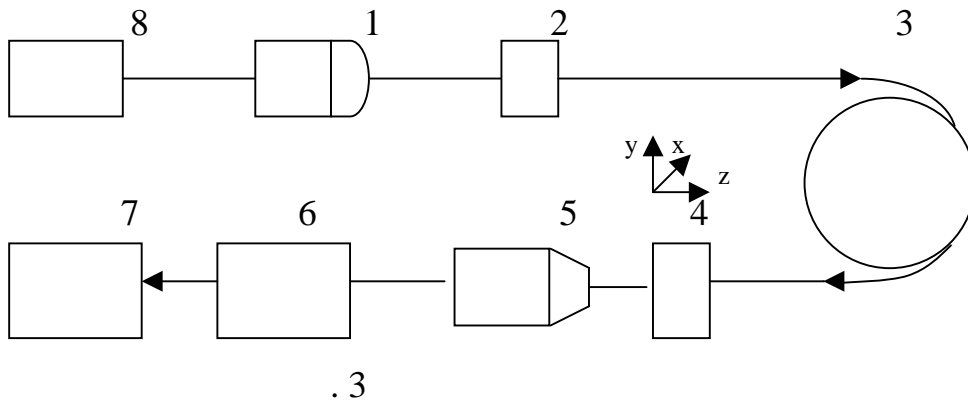
$n_1$

$P(r),$



## 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<sub>max</sub> 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

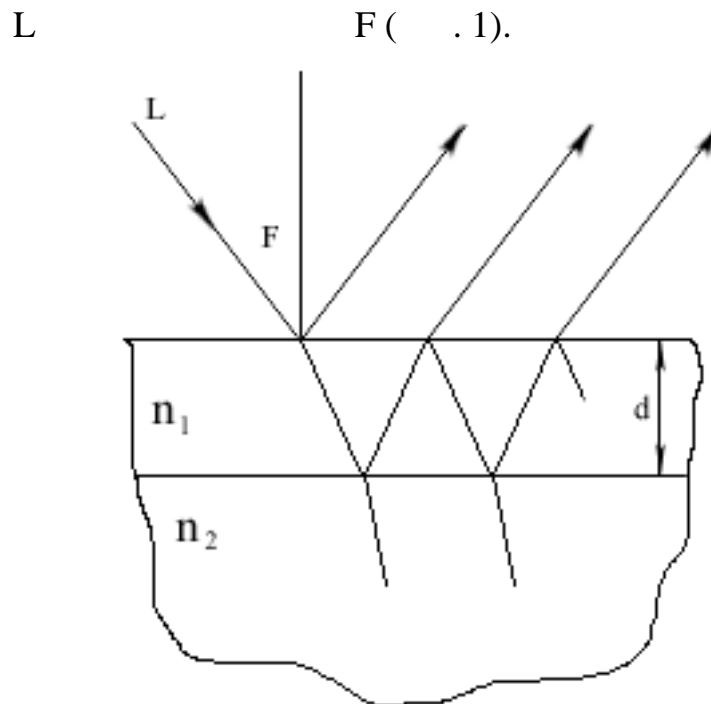
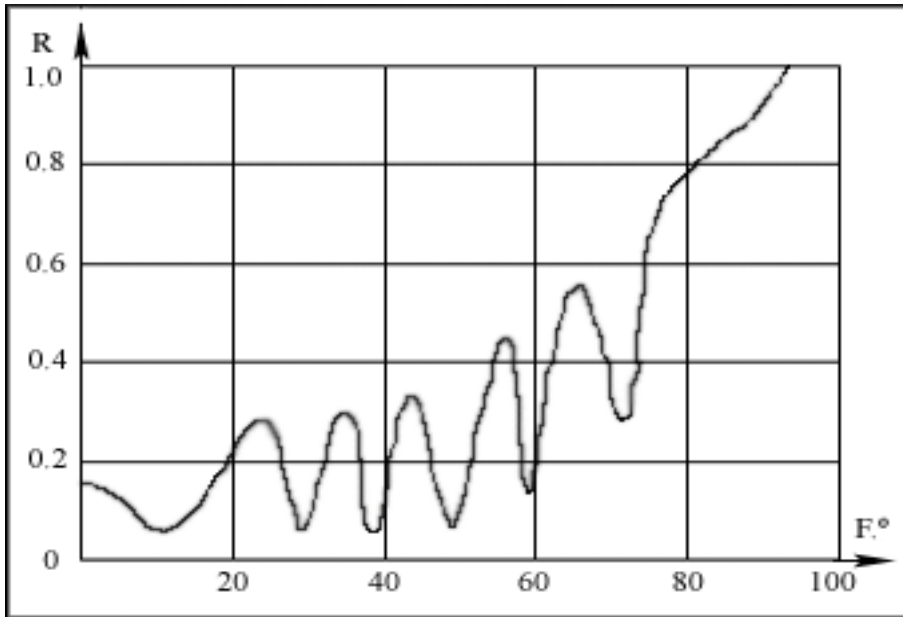


Рис. 1. Ход лучей в тонкой плёнке при наклонном



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

$\delta$

:

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

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' - . d

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

(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%.

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

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

1.

| min,<br>max | F     | n = 1,460                           |       | n = 1,477                           |       | n = 1,476                           |       |
|-------------|-------|-------------------------------------|-------|-------------------------------------|-------|-------------------------------------|-------|
|             |       | n <sup>2</sup> - sin <sup>2</sup> F | m     | n <sup>2</sup> - sin <sup>2</sup> F | m     | n <sup>2</sup> - sin <sup>2</sup> 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<sub>k</sub> (

N=5 - 10),

I(F)

20 - 30%

(

).

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

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

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

b<sub>0</sub>, b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>,

F<sub>M</sub>,

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

2. *Расчёт толщины и показателя преломления плёнки.*

1 ( (5) (6)).

1.  
(3)

4. *Контрольные вопросы.*

1.

2.

3.

**5. Литература.**

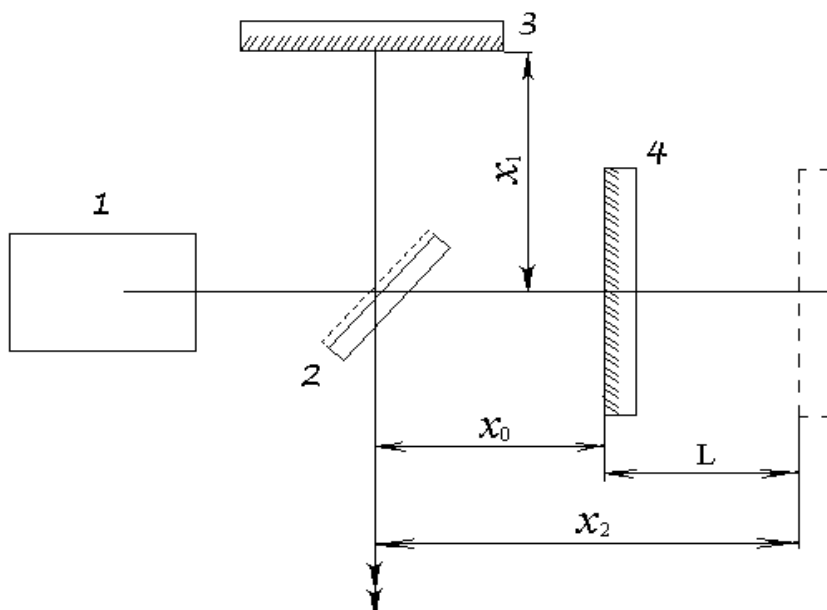
1. . . . , . . . . , 1986.
2. . . . , . . . . .1,2 ., . . . . 1977



**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, ...

$\Delta N$

$n_e$ ,

:

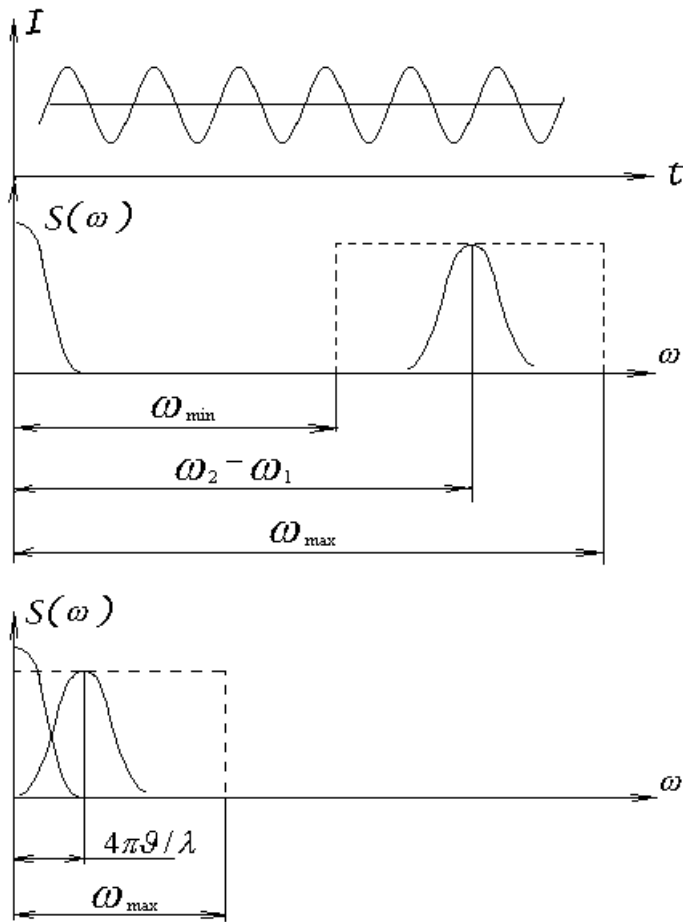
$$L = (N + \Delta N)(\lambda_{BAK} / 2 n_e) ; \quad (6)$$

$\lambda_{BAK}$

2

$A_0$

( )



. 2

$A_0$ ,

$S(\omega)$

I

3 4

$(x_2 - x_1 = const)$ ,

$\omega_2 - \omega_1$

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

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

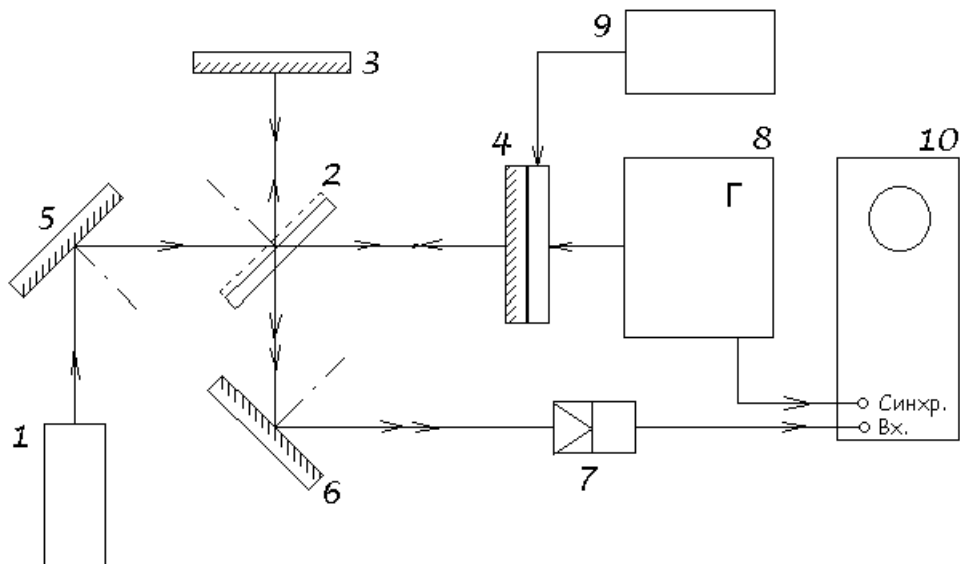
“  $\omega_2 = \omega_1$  ”,

2

$\nu_{\max}$

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

**3. Описание экспериментальной установки.**



.3

- 1 – ;
- 2 – ;
- 3 – ;
- 4 – ;





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

$S_0$ ,  $T_1$ ,  $v$ ,  $v_0$ ,

$S_0$ , ( . 2).

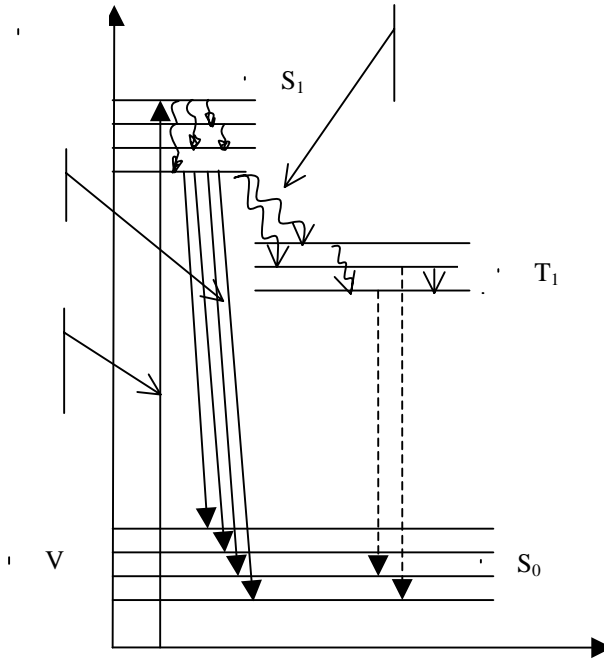
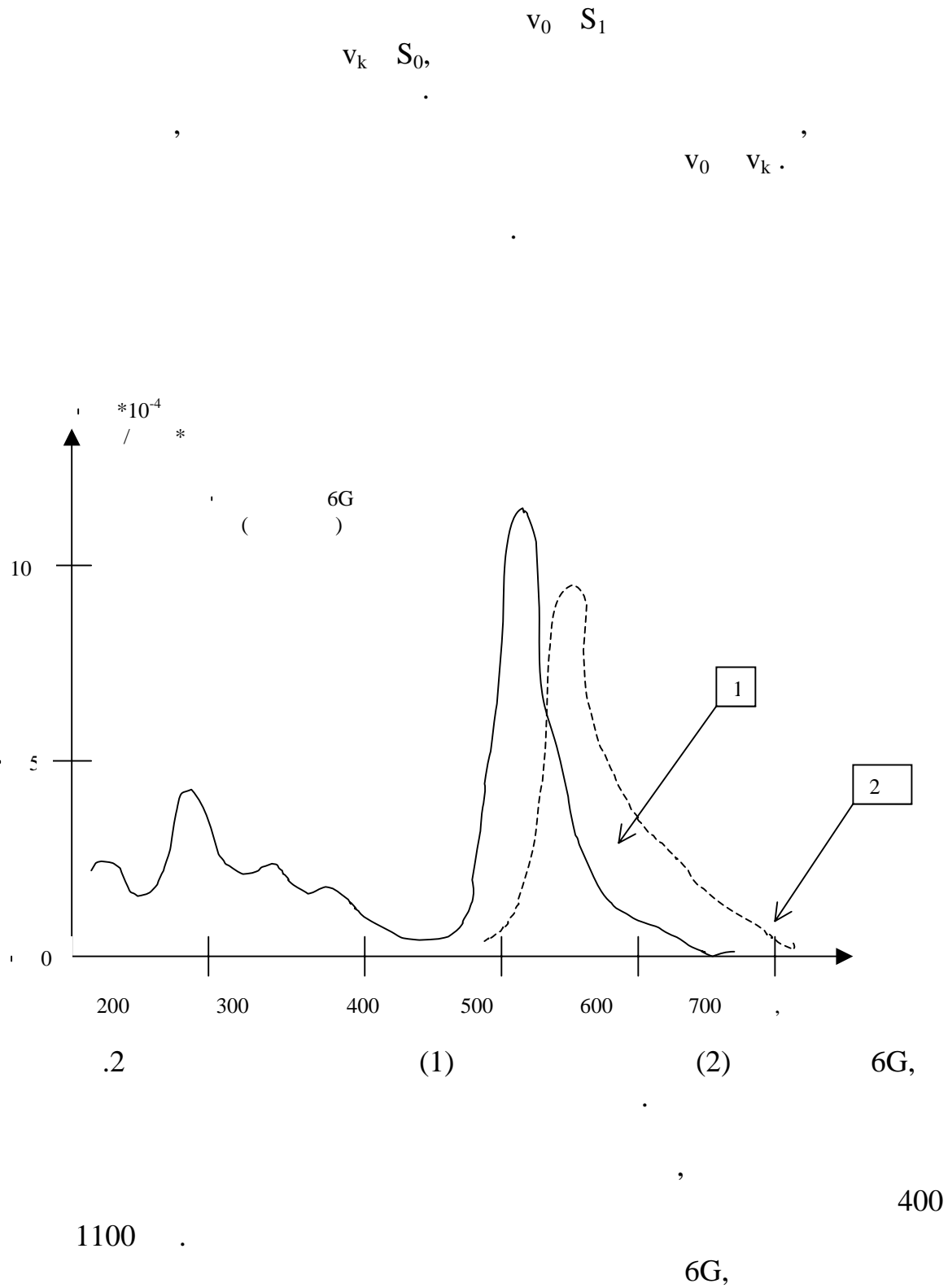


Рис.1 Диаграмма энергетических уровней и





.2.

( )

,

,

.

### Описание работы спектрофлуориметрического анализатора «ФЛЮОРАТ – 02 – ПАНОРАМА»

.3.

.

:

( ) "I",

"II",

( ) "III"

( ) "IV".

(1) -

( $\approx 1$  )

25 .

(190 )

(2.5 ).

« »

500

250 ),

(2)

400 .

:

210 – 730

210 – 730

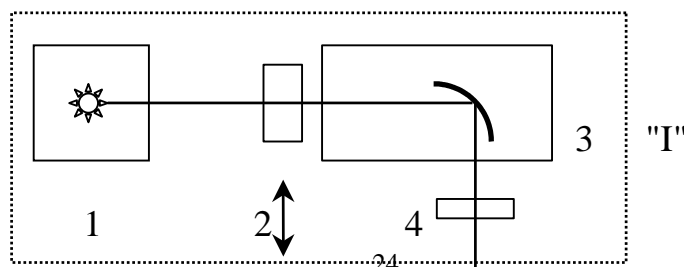
300 – 840

*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)

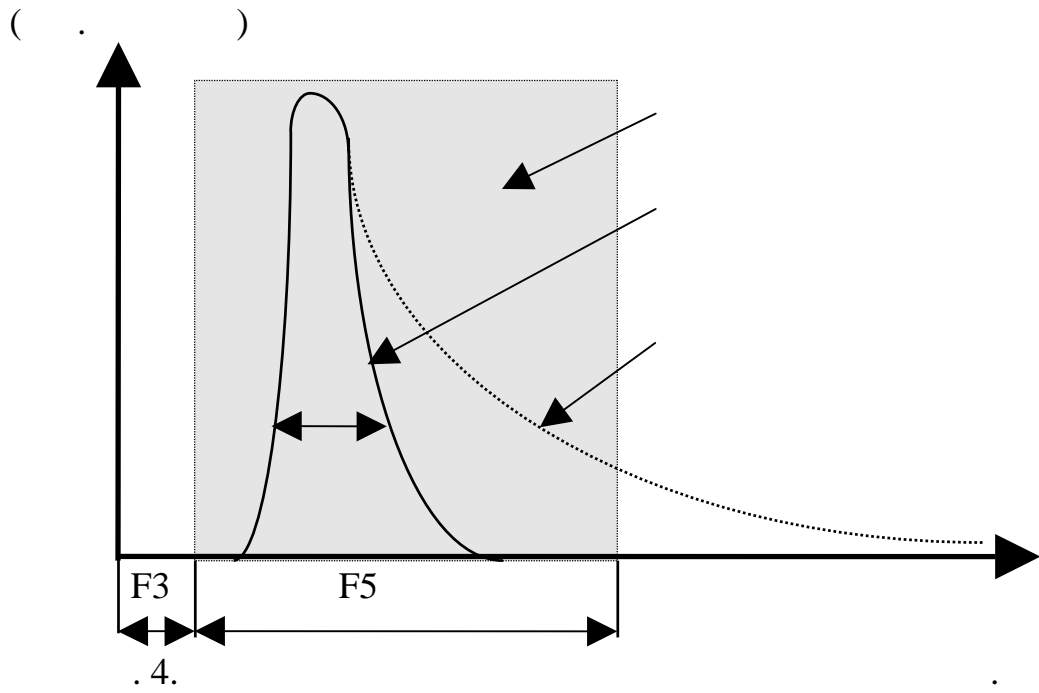
( )

, ( . . )

(9) -

( )

.4.



( ),  
 ( ).  
 /  
 ( )

F3)

( F5).

- 1)
- 2)

\_\_\_\_\_.



(4 7),


(5) (3)

(12)

\_\_\_\_\_.

## 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:\ \  
*Файл* *Экспортировать в*  
*Excel 2000.*
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

" " -

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

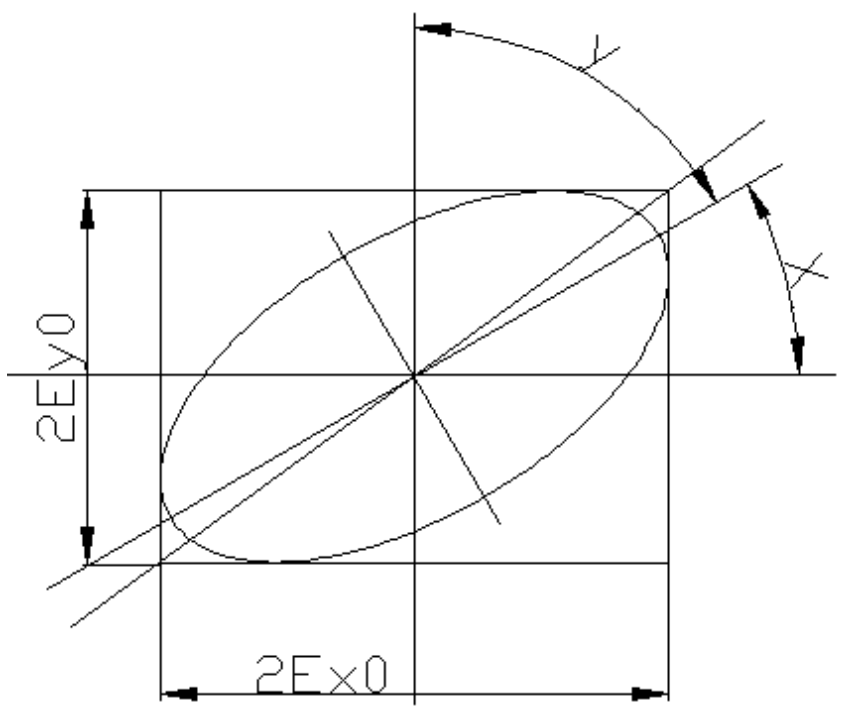
$$E_y := E_{y0} \cdot \sin(\omega \cdot t + \delta_y) \quad (2)$$

(1) (2) XY

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

( .1):

$tg\gamma = b/a$  -



.1.

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

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

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

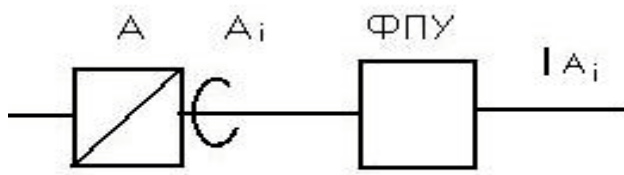
$$\sin 2\gamma := \sin(2\psi) \sin(\delta) \quad (8)$$

( , y, ) .

» .2. «

( , , )





.2

«

».

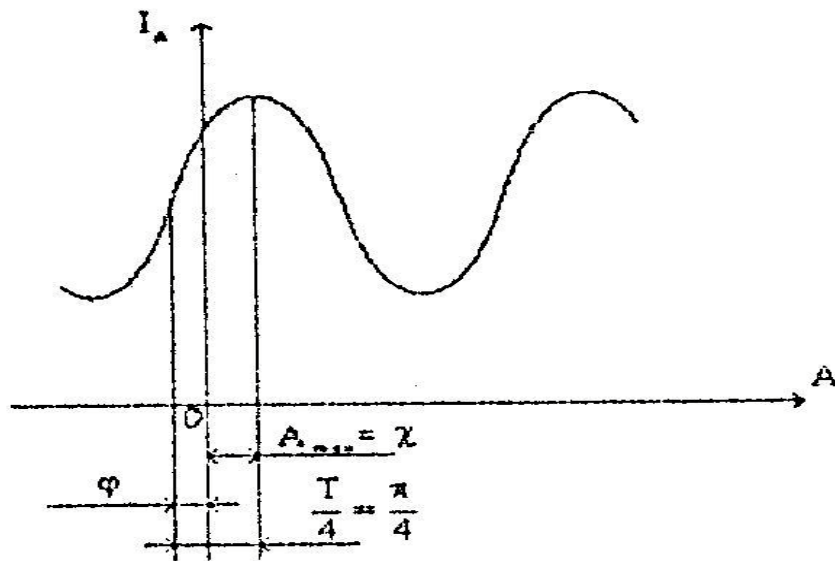
$$I = I_0 + I_m \sin [2(A + \varphi)], \quad (9)$$

$I_0$  -

$I_m$  -

$I_A(\ )$

.3.



.3.

$I_A(\ )$

;  
 $I_A$

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),



- 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 .  
" ,  
F - L -  
, .2 3.
5.  $20^0$  (  
,  
 $22.5^0$ ).
6. :  
) (  
) );  
)
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).  
(16) :  $a'_0 = a_0 - I_0$   
 $a_0$  - .

2.

(19), (20)

(22), (23) .

1.

1

|   | $a'_0$ | $a_0$ | $a_2$ | $b_2$ | $^1$ | $\gamma$ | $= ' - 0$ |
|---|--------|-------|-------|-------|------|----------|-----------|
| 0 | -      | -     |       |       |      |          | 0         |
| 1 |        |       |       |       |      |          |           |
| 2 |        |       |       |       |      |          |           |
| 3 |        |       |       |       |      |          |           |

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

### Литература

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



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

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

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

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

:

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

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

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

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

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

).

0

$\bar{x}$

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

i

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

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

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

$$\Delta x .$$

$$f(x)$$

$$(\Delta x = 1)$$

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

$$f(x)$$

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

**нормального распределения**

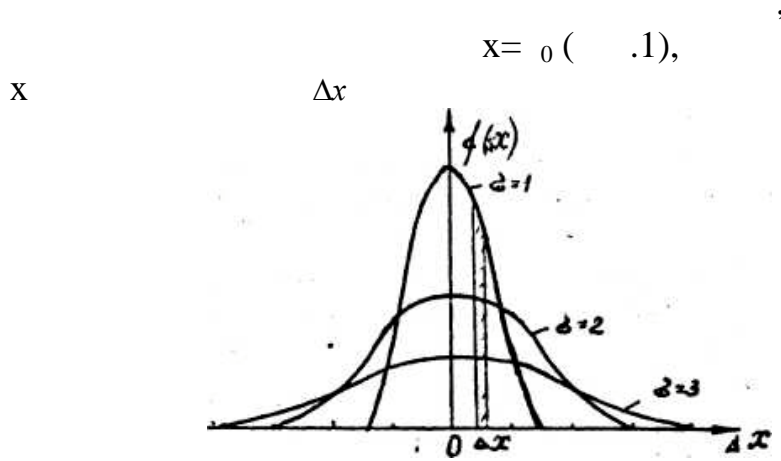
**Гаусса.**  $\sigma^2$  (3)

**дисперсией**

x)

$$x = 0($$





.1.

$\sigma$

.1

$\sigma$ .

$\sigma^2$ ,

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

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

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

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

$f(x)$

( )

**математическое**

**ожидание случайной величины:**

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

,  $\bar{x}$

$\bar{x} \approx x_0$  ,

$\Delta \bar{x}$  :

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

,

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

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

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

0

$S_n$  ,  
n

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

$S_n^2$  - 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)

$\sigma^2$

(6).

$f(x)$

$x$ ,

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

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

$$(7) \quad \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1 \quad (3)$$

$\pm \varepsilon$ ,

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

(7)

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

( ) (9)

**интегралом вероятности**

$\Phi(\varepsilon)$ .

(9)

$\varepsilon$

(8)

$x_i$

$P$

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

(10)

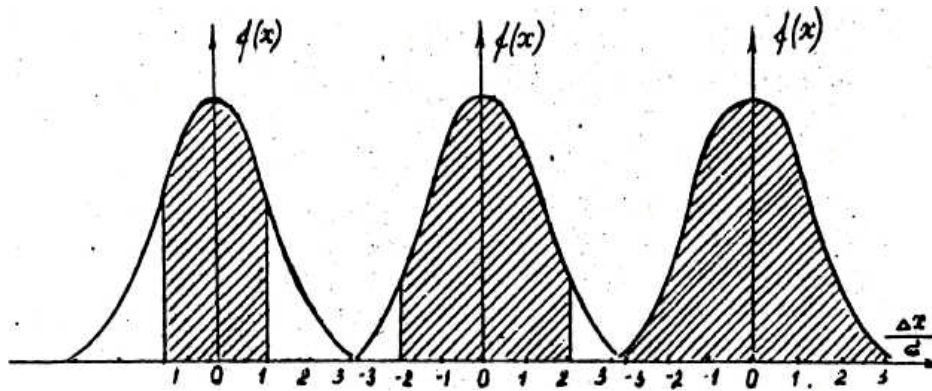
**доверительной вероятностью (**

**— 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%) ( ) .

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

**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**

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

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

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

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

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

(  $n$   $x_0$   $P$  ).

. 3 (  $n=2 \div 10, P= 0,70 \div 0,95$ ).

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

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

(  $S_{ost}$  )

f  $S_x$  . . .

,  $S_x > S_{ost}$  ( , ) .

, ,  $10 \div 50\%$  ( - )

(  $n \leq 5$  ),  $t_{p,n-1} \geq 3$  , .

, ,  $S_x = S_x / \sqrt{n} \leq S_{ost}; \quad n \geq S_x / S_{ost}$

$S_x$  ( , )  $(5), S_{ost}$   $n$ ,

,  $5 \div 10$  .

## 2. Математическая обработка результатов прямых измерений

(.1).

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

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

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

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

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

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

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**

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

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

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

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

$$\Delta_p \bar{x}$$

$$\Delta_p \bar{x}$$

$$\bar{x}_n$$

$$.2,$$

$$\bar{x}_n$$

$$(x_i - A)$$

### 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                  |

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

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

3)

$$n=5$$

$$p=0,95$$

$$t_{p,n-1} = 3,2 \text{ ( . . )}$$

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

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.

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



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

$x_1 = 4271,4$   $x_2 = 3,42.$   
 $\Delta x_1 = 0,05$   $\Delta x_2 = 0,005.$   
 $(\Delta x_2 = \sigma_1 / \Delta x_1)$

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

$x_2$   $,$   $x_1,$   $150$   $x,$   $x_2.$

$\delta_{pr}$

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

$x$   
 $,$   $\Delta x$

$\delta_{pr} > \delta_x.$

$x = 47328$

$\Delta x = 50$

$x$

$x = 47300 \pm 50.$

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

$\delta_{pr}$

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



## 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 -

$$0,05\%, \dots 100$$

## 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.**

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

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



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