

Работа 4.5.3

Интерференция лазерного излучения

Валеев Рауф Раушанович
группа 825

Теория

Спектр источника света

Каждый атом может находиться в одном из нескольких дискретных состояний, характеризующихся каждое своей энергией. На этом основана определение *спектральной плотности излучения* $I_e(f - f_0)$.

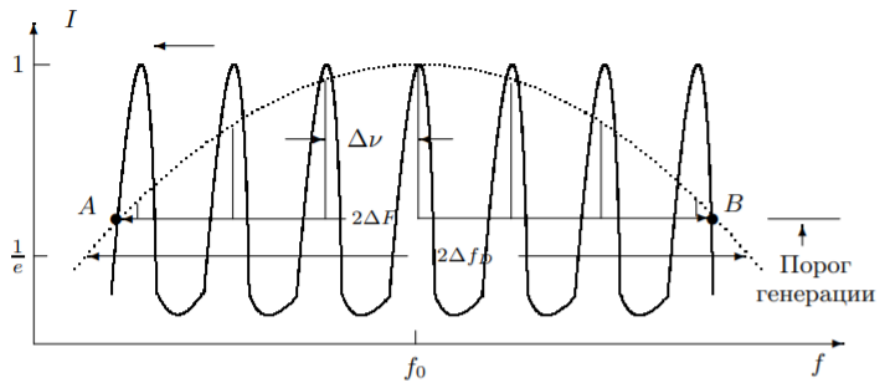


Рис. 1: Доплеровский контур линии излучения. Частотная характеристика резонатора и лазерные моды

Можно вывести, что

$$I_D(f - f_0) \sim e^{-\left(\frac{\Delta f}{\Delta f_D}\right)^2} \quad (1)$$

где $\Delta f = f - f_0$ и $\Delta f_D = f_0 \sqrt{\frac{2kT}{mc^2}}$

Эта функция описывает так называемый *доплеровский контур линии*.

Излучение $He - Ne$ лазера

Схема лазера приведена на рис. 2. Газоразрядная трубка T наполнена смесью гелия и неона. Излучение, распространяющееся вдоль оси трубки и поляризованное в плоскости падения света, не испытывает потерь на отражение. Вследствие этого лазер генерирует линейно поляризованное излучение.

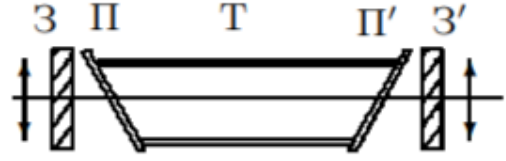


Рис. 2: Принципиальная схема лазера

$$f_m = \frac{c}{\lambda_m} = \frac{mc}{2L} \quad (2)$$

(2) — условие на частоты, чтобы работал интерферометр.

Рассмотрим спектральный состав излучения лазера. Условие возбуждения генерации может быть одновременно выполнено для нескольких колебаний с резонансными частотами f_m , в этом случае лазер будет генерировать сразу несколько световых частот с различными модами.

$$\Delta\nu = f_{m+1} - f_m = \frac{c}{2L} \quad (3)$$

Число мод можно оценить как

$$N \approx 1 + \frac{2\Delta F}{\Delta\nu} \quad (4)$$

Видность интерференционной картины

При сложении двух когерентных световых волн возникает интерференционная картина.

$$\gamma = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (5)$$

γ — параметр видности, меняющийся от 0 до 1 — самая лучшая видность.

Найдем видность для 1 моды. Легко вывести, что она равна

$$\gamma_1 = \frac{2\sqrt{\delta}}{1 + \delta} \quad (6)$$

где параметр

$$\delta = \left(\frac{B_m}{A_m} \right)^2 \quad (7)$$

Выражает отношение интенсивностей интерферирующих волн.

Для нескольких волн

$$I = \sum_m I_m = \sum_m A_m^2 \left[1 + \delta + 2\sqrt{\delta} \cos \left(\frac{2\pi f_m l}{c} \right) \right] \quad (8)$$

$$\gamma = \gamma_1 \gamma_2(l) \quad (9)$$
$$\gamma_2(l) = \frac{\sum_n A_n^2 \cos \frac{2\pi \Delta \nu n l}{c}}{\sum_n A_n^2} \quad (10)$$
$$\gamma_2 = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-(\frac{\nu}{\Delta F})^2} \cdot \cos \frac{2\pi\nu l}{c} d\nu}{\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-(\frac{\nu}{\Delta F})^2} d\nu} = \exp\left(-\left(\frac{\pi\Delta Fl}{c}\right)^2\right) \quad (11)$$

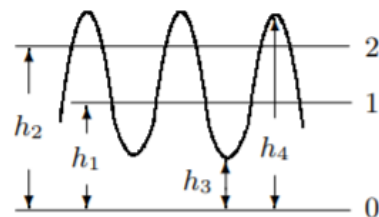
Луч 1 проходит поляроид П1, отражаясь под небольшим углом от зеркала З1, снова проходит поляроид П1 и, частично отражаясь от диагональной плоскости оптической призмы, выходит из интерферометра. Зеркало З1 наклеено на пьезокерамику ПК, которая может осуществлять малые колебания зеркала вдоль падающего луча. Поляроид и зеркало с пьезокерамикой собраны в единый блок Б1, который крепится к вертикально стоящей плите.

Настройка установки

3

Измерение коэффициента видности

Осциллограммы сигналов фотодиода приведены на рис. 5. Осциллограф используется для регистрации следующих сигналов: фоновой засветки (линия 0 — перекрыты оба луча 1 и 2); интенсивности света одного из пучков (линии 1 или 2 — перекрыт луч 2 или 1); максимума и минимума интенсивности интерференционной картины (открыты оба луча).



$$\delta = \frac{h_1}{h_2} \quad (12)$$

$$\gamma = \frac{h_4 - h_3}{h_4 + h_3} \quad (13) \quad \text{Рис. 4: Осциллограмма сигналов}$$

При предположении, что $\gamma_2 = 1$, то есть когда мы будем исследовать γ_3 в зависимости от угла поляризации мы получим формулу

$$\gamma_3 = \frac{\gamma}{\gamma_1} \quad (14)$$

$$\gamma_2(l) = \frac{\gamma}{\gamma_1} \quad (15)$$

Данная формула видна из предположения, что $\gamma_3 = 1$.

Таким образом можно получить для Гауссовой формы излучения с полушириной ΔF формулу

$$l_{1/2} = \frac{c}{\pi \Delta F} \sqrt{\ln 2} \approx \frac{0,26c}{\Delta F} \quad (16)$$

Ход работы

Настройка

1. Настроим установку так, как описано в пункте настройка установки.

Изучение характера поляризации

2. Настроим поляроид на максимальную видность картины на экране.
3. Поворотом поляроида П1 установим максимальную четкость и введем дополнительный луч.
4. Установив дополнительный поляроид. Его поворотом мы видим, что свет у нас поляризованный.

α	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
δ_α	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
h_1 , ед	2,6	2,8	3	3	2,4	2	1,2	0,6	1,1	1	1,20	1,7	2,6
h_2 , ед	1,8	1,5	1,6	1,5	1,4	1,4	1,4	1,2	3,1	3	3	2,7	2,8
h_3 , ед	0,6	0,6	0,8	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	3,8	3,6	3	1,2	1,5
h_4 , ед	3,8	3,7	3,9	3,6	3	2,6	1,8	1,3	4,8	4,2	4,2	2	2,8
δ_h , ед	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
γ	0,73	0,72	0,66	0,60	0,58	0,53	0,38	0,2	0,12	0,08	0,17	0,25	0,30
δ_γ	0,06	0,06	0,05	0,05	0,06	0,07	0,08	0,1	0,02	0,03	0,03	0,06	0,05
δ	0,69	0,54	0,53	0,50	0,58	0,7	0,9	0,5	0,35	0,33	0,40	0,63	0,93
δ_δ	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,1	0,1	0,1	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05
γ_1	0,98	0,95	0,95	0,94	0,96	0,98	1,00	0,9	0,9	0,9	0,9	0,97	1,00
δ_{γ_1}	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,1	0,1	0,1	0,1	0,03	0,01
γ_3	0,7	0,8	0,7	0,6	0,6	0,5	0,4	0,3	0,13	0,09	0,18	0,3	0,30
δ_{γ_3}	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,03	0,03	0,03	0,1	0,05
$\cos \alpha$	1,00	0,98	0,94	0,87	0,77	0,643	0,500	0,342	0,174	0,000	-0,174	-0,342	-0,500
$\delta_{\cos \alpha}$	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,005	0,004	0,002	0,001	0,002	-0,001	-0,001	-0,002

Таблица 1: Входные данные и то, что из них получено при изучении характера поляризации

Измерение коэффициента видности

- Исследуем зависимость видности интерференционной картины от угла поворота поляроида П1 при нулевой разности хода. Для этого измеряем величины h_1, h_2, h_3, h_4 на экране осциллографа. Измерения рекомендуется начинать с угла $\approx 90^\circ$.
- Рассчитаем по формулам коэффициент и запишем все в таблицу 1. Затем представим все эти данные в графике (рис. 5). Все коэффициенты видности и δ рассчитаем по формулам (12), (13), (14), (6)

Все погрешности в таблицу берутся: для α — половина цены деления, для $h_i \forall i \in 1, 2, 3, 4$ так же половина цены деления, для γ погрешность мы считаем, что

$$\delta_\gamma = \gamma \cdot \sqrt{\left(\frac{2\delta_h}{h_4 - h_3}\right)^2 + \left(\frac{2\delta_h}{h_4 + h_3}\right)^2}$$

Она берется из того, что $\delta_{h_4 \pm h_3} = 2\delta_h$. Так же возникает проблема в том, что если $h_4 = h_3$, то мы делим на 0, поэтому для этих случаев просто берем среднюю погрешность. Для δ берем погрешность

$$\delta_\delta = \delta \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta_h}{h_1}\right)^2 + \left(\frac{\delta_h}{h_2}\right)^2}$$

Для γ_1 берем погрешность

$$\delta_{\gamma_1} = \gamma_1 \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial \gamma_1}{\partial \delta}\right)^2} \sigma_\delta^2 = \frac{2}{(1 + \delta)^3} \cdot \sigma_\delta$$

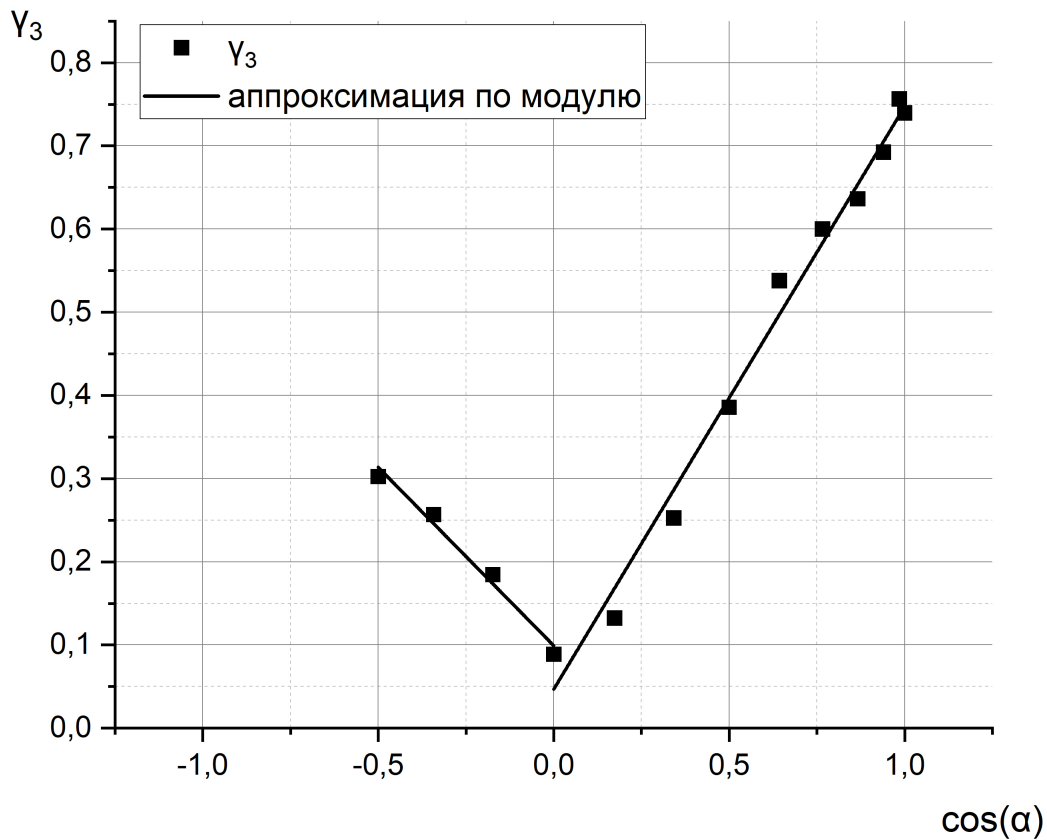


Рис. 5: График зависимости γ_3 от косинуса угла поляризации

$$\delta_{\gamma_2} = \gamma_2 \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta_\gamma}{\gamma}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{\gamma_1}}{\gamma_1}\right)^2}$$

$$\delta_{\gamma_3} = \gamma_3 \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta_\gamma}{\gamma}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{\gamma_1}}{\gamma_1}\right)^2}$$

$$\delta_{\cos \alpha} = |\sin \alpha \cdot \cos \alpha| \sigma_\alpha$$

7. Исследуйте зависимость видности от разности хода между лучами. Для этого установите поляроид П1 в положение, в котором интерференционная картина видна наиболее чётко. И исследуем зависимость h_i от координаты x .
8. Рассчитаем коэффициент γ_2 по формулам и построим график.

Определим по нему $l_{1/2}$, L и $\Delta\nu$ Из установки мы видим, что $L = 65\text{cm}$, $\lambda = 632,8\text{nm}$.

Из графики видим, что $l_{1/2} \approx (4,8 \pm 0,3)$ см, отсюда из формулы (16) можем найти

$$\Delta F \approx \frac{0,26c}{l_{1/2}} \approx (1,5 \pm 0,1) \cdot 10^9 \text{Гц}$$

$$\Delta\nu = \frac{c}{2L} = (2,5 \pm 0,2) \cdot 10^8 \text{ Гц}$$

Что примерно соответствует теоретическим предположениям о том, что $\Delta F \sim 10^9 \div 10^{10}$ Гц.

Теперь по формуле (4) мы можем найти

$$N \approx 1 + \frac{2 \cdot 1,5 \cdot 10^9}{2,5 \cdot 10^8} \approx 7$$

Погрешности находим по формулам, для $l_{1/2}$ находим для 2 разных пиков и усредняем. Для ΔF по формуле

$$\delta_{\Delta F} = \Delta F \cdot \frac{\delta_{l_{1/2}}}{l_{1/2}}$$

$$\delta_{\Delta\nu} = \Delta\nu \cdot \frac{\delta_L}{L}$$

$$\delta_N = N \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta_{\Delta F}}{\Delta F}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{\Delta\nu}}{\Delta\nu}\right)^2}$$

Видим, что $\delta_N \approx 0,4$ а поскольку мы знаем, что N целое, то можно утверждать что $N = 7$ без погрешности.

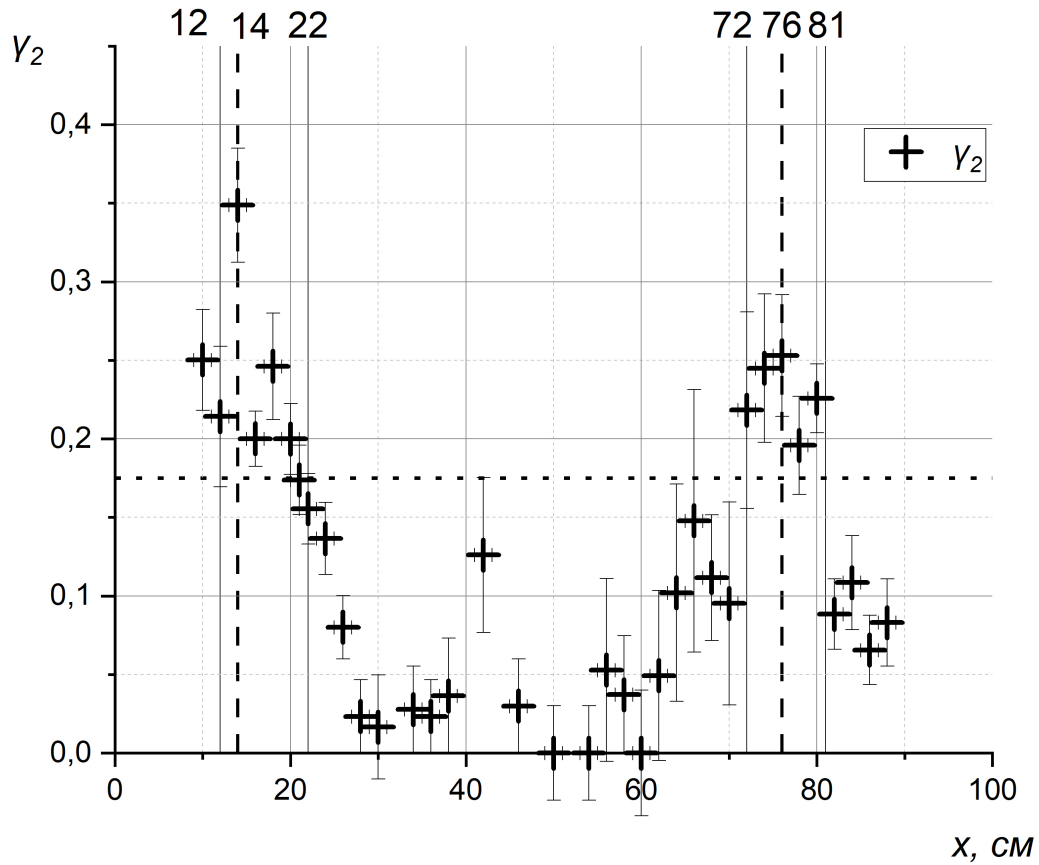


Рис. 6: График зависимости γ_2 от x

Вывод

При изучении зависимости от угла поляризации γ_3 мы видим, что график зависимости γ_3 похож на график модуля $\cos \alpha$, однако умноженный на коэффициент примерно $\frac{1}{2}$. Это может быть связано с тем, что максимум $\gamma_2(x)$ примерно на 16 см. Однако мы могли установить не совсем на 16 см. В итоге мы получаем, что $\gamma_2 = \frac{1}{2}$, что мы и видим.

При изучении зависимости от x , мы видим, что пики на расстоянии между ними 62 см. Что почти равно настоящему значению, а именно 65 см.

x , см	10	12	14	16	18	20	22	21	24	26	28	30
δ_x , см	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
h_1 , ед	2,2	2,3	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
h_2 , ед	2,4	0,8	1,2	3,2	1,2	2,2	2,2	2,2	2	3,9	2	1
h_3 , ед	2,4	2,6	2,3	4,7	2,6	3,6	3,8	3,8	3,8	4,8	4,2	3,2
h_4 , ед	4	3,8	4,6	7	4,2	5,4	5,2	5,4	5	5,6	4,4	3,3
δ_h , ед	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
δ	0,92	0,35	0,55	1,45	0,55	1,00	1,00	1,00	0,91	0,56	0,91	0,45
δ_δ	0,06	0,05	0,05	0,08	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,03	0,06	0,05
γ	0,25	0,19	0,33	0,20	0,24	0,20	0,16	0,17	0,14	0,08	0,02	0,02
δ_γ	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03
γ_1	1,00	0,9	0,96	0,98	0,96	1,00	1,00	1,00	1,00	0,96	1,00	0,9
δ_{γ_1}	0,02	0,1	0,05	0,01	0,05	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,1
γ_2	0,25	0,21	0,35	0,20	0,25	0,20	0,16	0,17	0,14	0,08	0,02	0,02
δ_{γ_2}	0,03	0,04	0,04	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03
x , см	34	36	38	42	46	50	54	56	58	60	62	64
δ_x , см	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
h_1 , ед	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
h_2 , ед	1,4	2	0,8	0,6	1,2	0,8	0,2	0,4	0,8	0,6	0,4	0,4
h_3 , ед	3,6	4,2	3	2,6	3,4	3	2,4	2,6	3	3	2,8	2,6
h_4 , ед	3,8	4,4	3,2	3,2	3,6	3	2,4	2,8	3,2	3	3	3
δ_h , ед	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
δ	0,64	0,91	0,36	0,27	0,55	0,36	0,08	0,17	0,33	0,25	0,17	0,17
δ_δ	0,05	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
γ	0,03	0,02	0,03	0,10	0,03	0,00	0,00	0,04	0,03	0,00	0,03	0,07
δ_γ	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04
γ_1	0,97	1,00	0,9	0,8	0,96	0,9	0,5	0,7	0,9	0,8	0,7	0,7
δ_{γ_1}	0,04	0,02	0,1	0,2	0,05	0,1	0,8	0,3	0,1	0,2	0,3	0,3
γ_2	0,03	0,02	0,04	0,13	0,03	0,00	0,00	0,05	0,04	0,00	0,05	0,1
δ_{γ_2}	0,03	0,02	0,04	0,05	0,03	0,03	0,03	0,06	0,04	0,04	0,05	0,1
x , см	66	68	70	72	74	76	78	80	82	84	86	88
δ_x , см	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
h_1 , ед	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,5	2,8	2,4	3,2	3,4	3,4	3,4
h_2 , ед	0,4	0,8	0,4	0,6	0,8	1	1,2	2,4	1,6	1	1,6	2,2
h_3 , ед	2,6	2,8	2,8	2,6	2,6	2,7	3,2	3,6	4,4	4	4,6	3,4
h_4 , ед	3,2	3,4	3,2	3,7	4	4,3	4,6	5,7	5,2	4,8	5,2	4
δ_h , ед	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
δ	0,17	0,33	0,17	0,25	0,33	0,40	0,43	1,00	0,50	0,29	0,47	0,65
δ_δ	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,06	0,03	0,03	0,03	0,04
γ	0,10	0,10	0,07	0,17	0,21	0,23	0,18	0,23	0,08	0,09	0,06	0,08
δ_γ	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03
γ_1	0,7	0,9	0,7	0,8	0,9	0,9	0,9	1,00	0,94	0,8	0,93	0,98
δ_{γ_1}	0,3	0,1	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,01	0,04	0,1	0,04	0,02
γ_2	0,1	0,11	0,1	0,2	0,24	0,25	0,20	0,23	0,09	0,11	0,07	0,08
δ_{γ_2}	0,1	0,04	0,1	0,1	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03

Таблица 2: Входные данные и все, что из них получено для зависимости от x всех величин.