

SPECKLE NOISE IN TDLS

A.I.Nadezhdinskii

A.M.Prokhorov General Physics Institute

Vavilov str.38, 119991 Moscow, Russia

NAD@nsc.gpi.ru

Abstract

In [1] it was shown that fundamental limit of sensitivity due to Diode Laser (DL) quantum noise can be achieved in TDLS when resonance molecular absorption is considered. This corresponds minimum detectable absorption below 10^{-7} for 1 sec averaging time. At present time one of promising modification of DL based system are systems installed on vehicles, helicopters, airplanes, etc. detecting scattered laser light from topography reflector. When we've started investigation of sensitivity of such systems presence of additional noise was observed (Fig.1) reducing sensitivity more than 1000 times. Characteristic feature of such systems is presence of scattered light from topography reflector and relative system movement with respect to the reflector. Without movement no additional noise was observed. As the origin of this noise speckle pattern of scattered light was assumed. Speckle pattern of scattered light will be analyzed and modeled. Experimental investigations of additional noise will be presented and compared will predictions of analysis and modeling.

[1] A.Nadezhdinskii, in TDLS 2005, Abstracts of papers, Florence, Italy, 2005, p.66.

Presence of additional noise

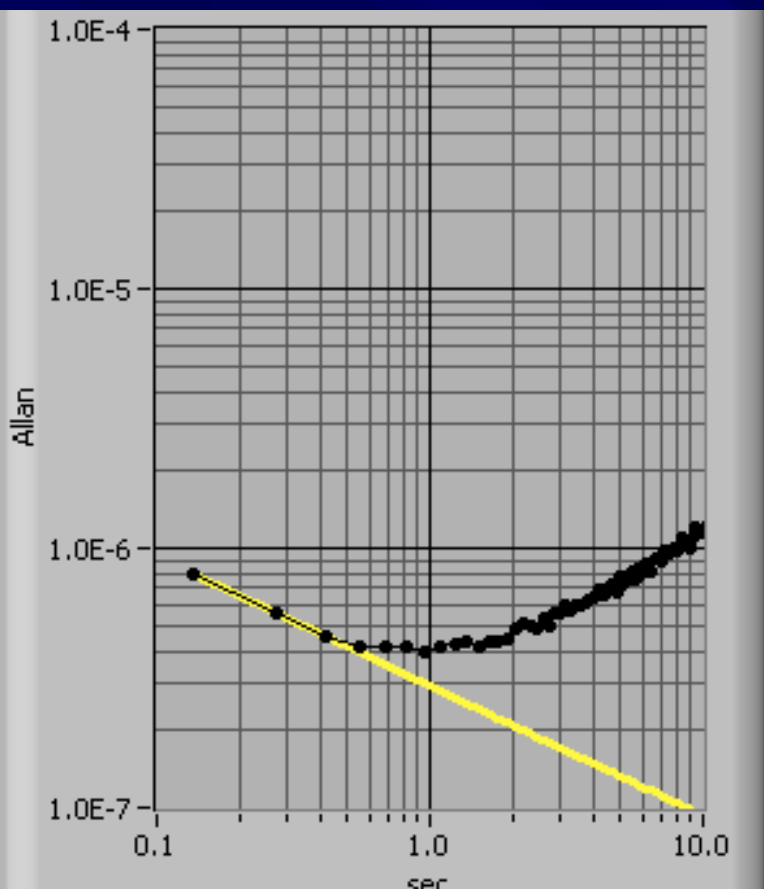
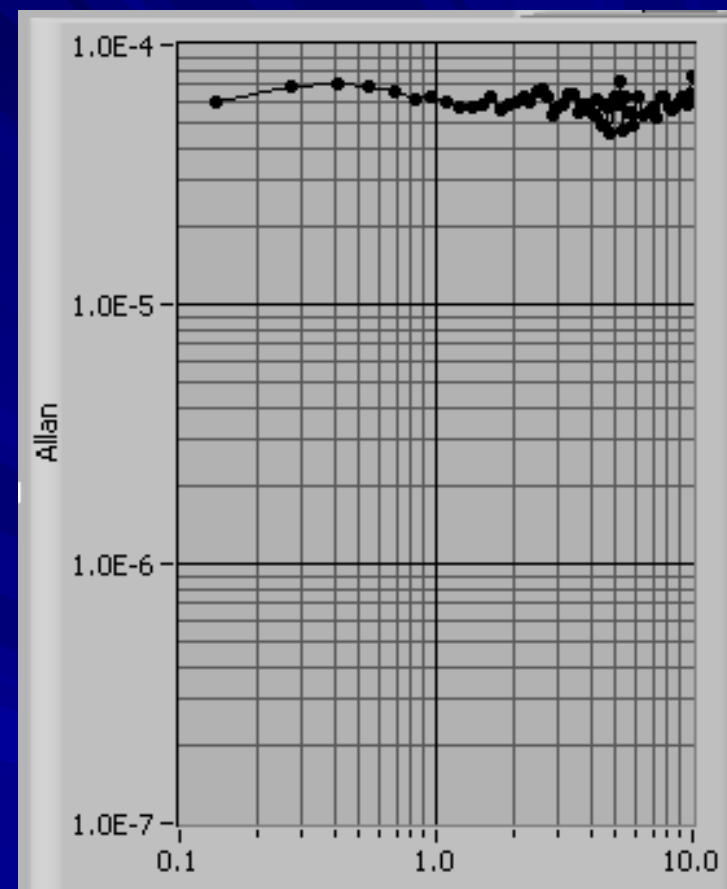


Fig.1 Examples of Allan plots of relative photo-current noise - $\Delta i/i$ for traditional TDLS scheme (left) and system with topography reflector (right)



Conclusions:

1. Because of additional noise presence more than 2 orders of sensitivity were lost
2. Additional noise looks like flicker one

Goal: to identify the noise origin and to suppress it.

Дополнительные шумы

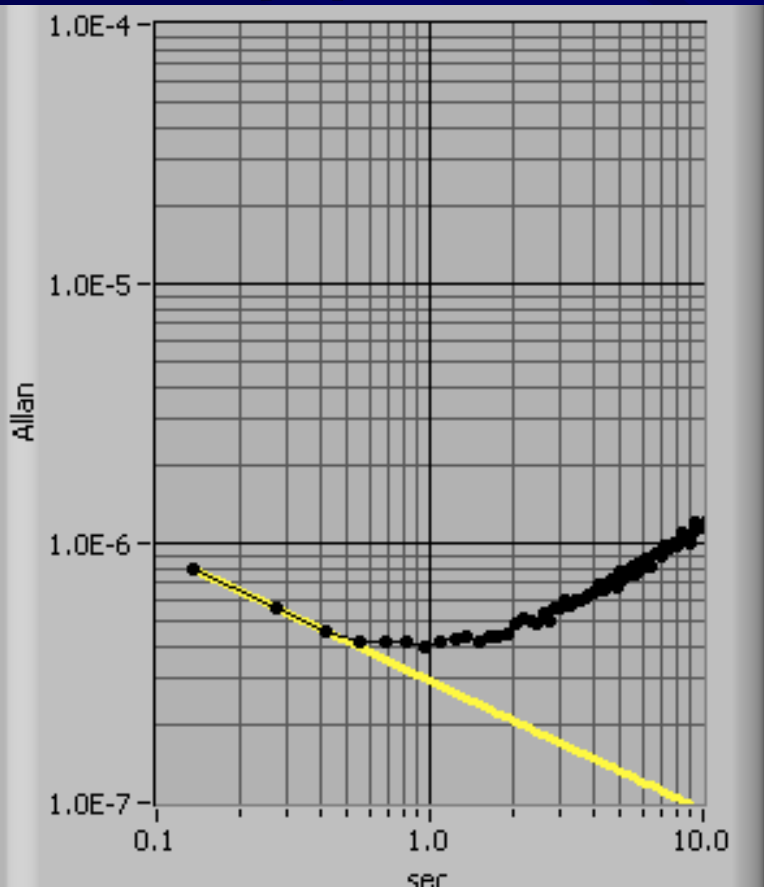
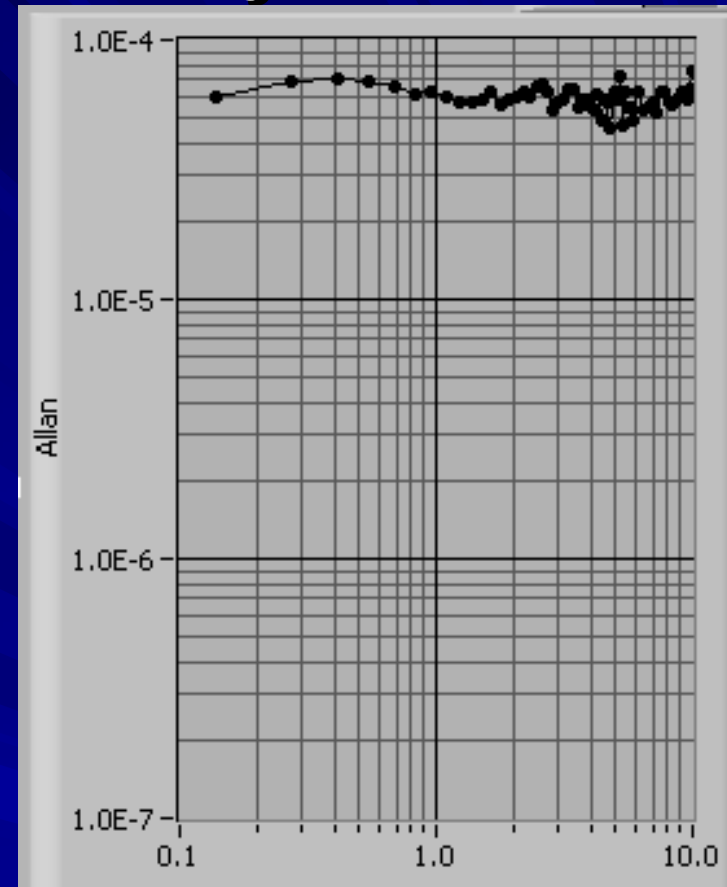


Fig.1 Пример графика Аллана относительного шума фототока - $\Delta i/i$ слева - для традиционной схемы ДЛС, справа для системы с топографически м отражателем



Выводы:

1. Потеря более двух порядков чувствительности из-за присутствия дополнительного шума
2. Дополнительный шум имеет вид фликкерного

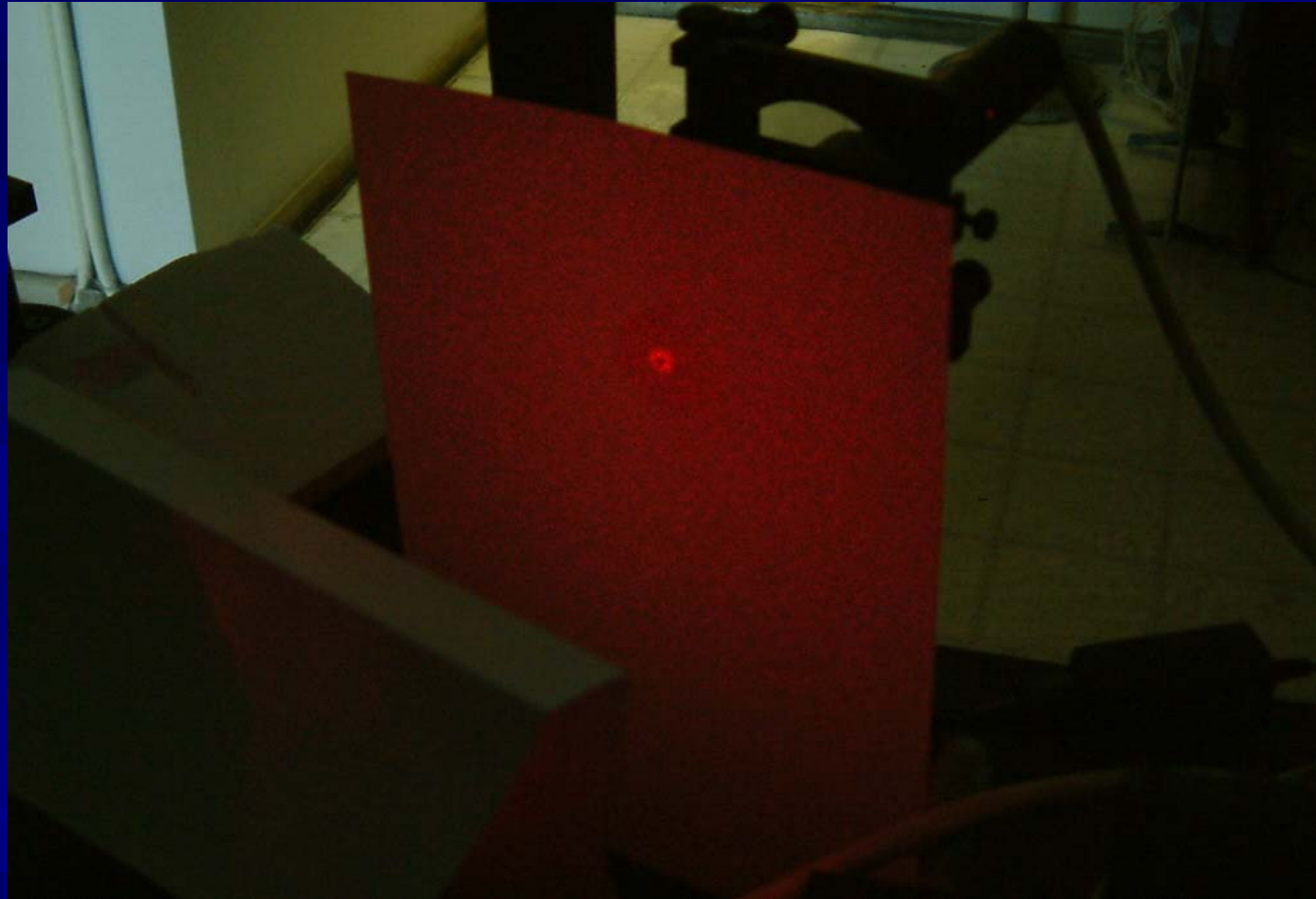
Цель: определить природу этого шума и подавить его

Speckle pattern

Assumption:

Additional noise is to movement of speckle pattern determined by scatted laser light

Speckle pattern
view for He-Ne
laser light
scattered by sheet
of white paper



Up to author knowledge, for the first time this type of noise for TDLS system with topography reflector was considered in [2].

[2] R.Wainner, B.Green, M.Allen, M.White, J.Stafford-Evans, R.Naper, Appl.Phys., B75, 249-254 (2002)

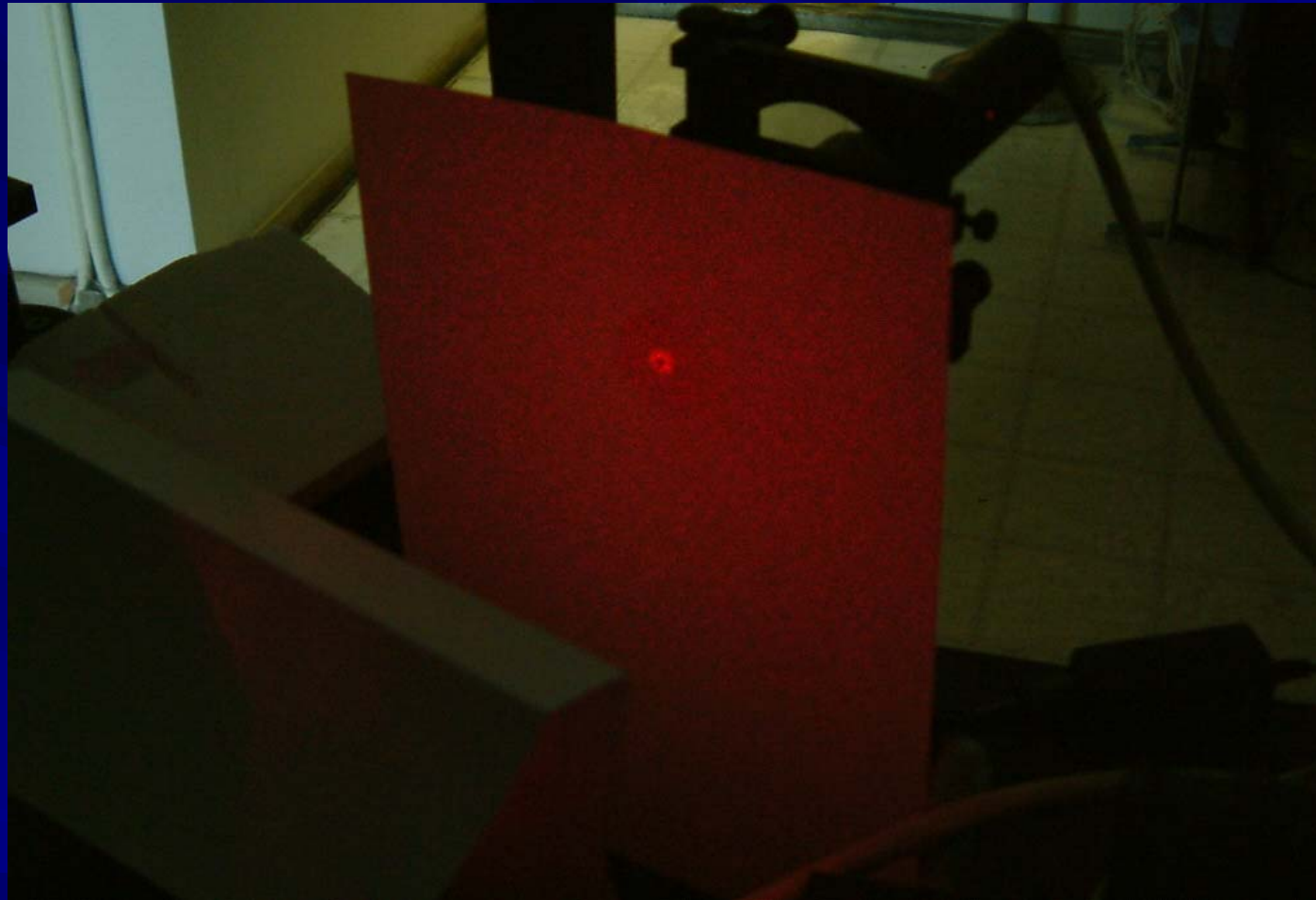
Спекл картина

Speckle - пятно

Гипотеза:

Дополнительный шум обусловлен спекл картиной рассеянного излучения

Внешний вид спекл картины рассеяния излучения He-Ne лазера листом белой бумаги

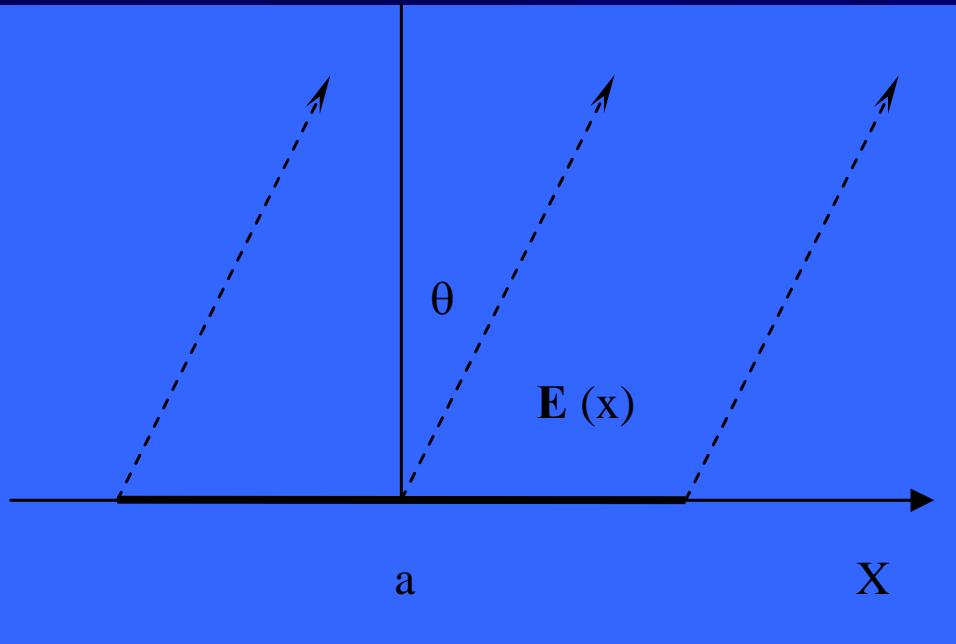


Впервые роль спекл шумов в ДЛС системе с топографическим отражателем была рассмотрена в [2].

[2] R.Wainner, B.Green, M.Allen, M.White, J.Stafford-Evans, R.Naper, Appl.Phys., B75, 249-254 (2002)

Формирование спекл-картины

Спекл-картина является результатом интерференции рассеянного излучения



Ближнее и дальнее поле рассеянного излучения: $E(x)$ и $E(\theta)$, соответственно

$$E(x) = r(x) \exp[i\Delta\varphi(x)] E_0$$

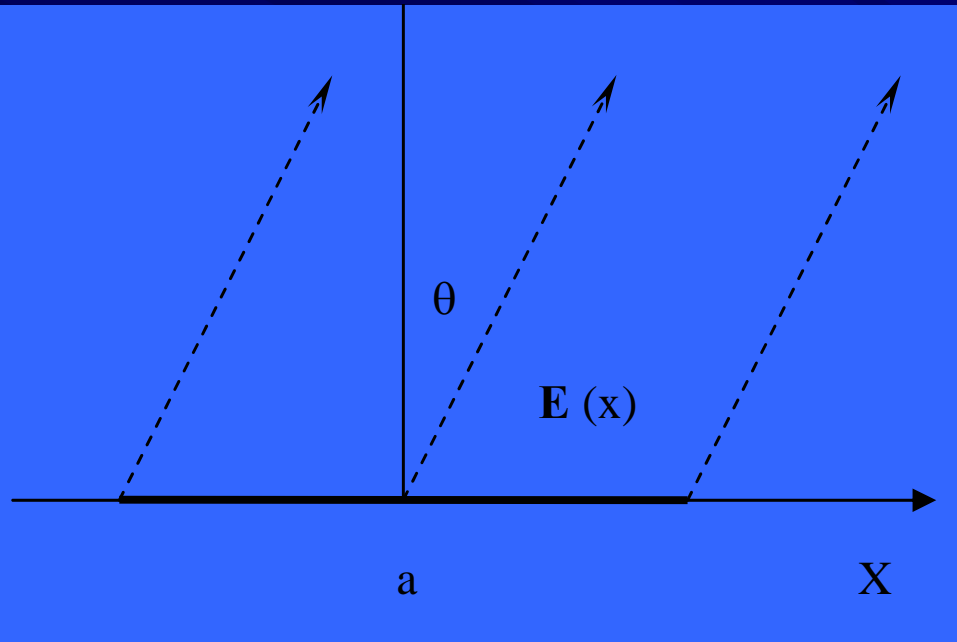
$$E(\theta) = \int_{-a/2}^{a/2} E(x) \exp[ikx \sin(\theta)] dx$$

Угловая зависимость интенсивности рассеянного излучения

$$I(\theta) = 2 \operatorname{Re} \int_{-a/2}^{a/2} dx \int_{-a/2}^{a/2} E(x) E(y) \exp[ik(y-x) \sin(\theta)] dy$$

Speckle pattern formation

Speckle pattern is result of scattered light interference



Near and far field of scattered light: $E(x)$ and $E(\theta)$, respectively

$$E(x) = r(x) \exp[i\Delta\phi(x)] E_0$$

$$E(\theta) = \int_{-a/2}^{a/2} E(x) \exp[ikx \sin(\theta)] dx$$

Angular dependence of scattered light

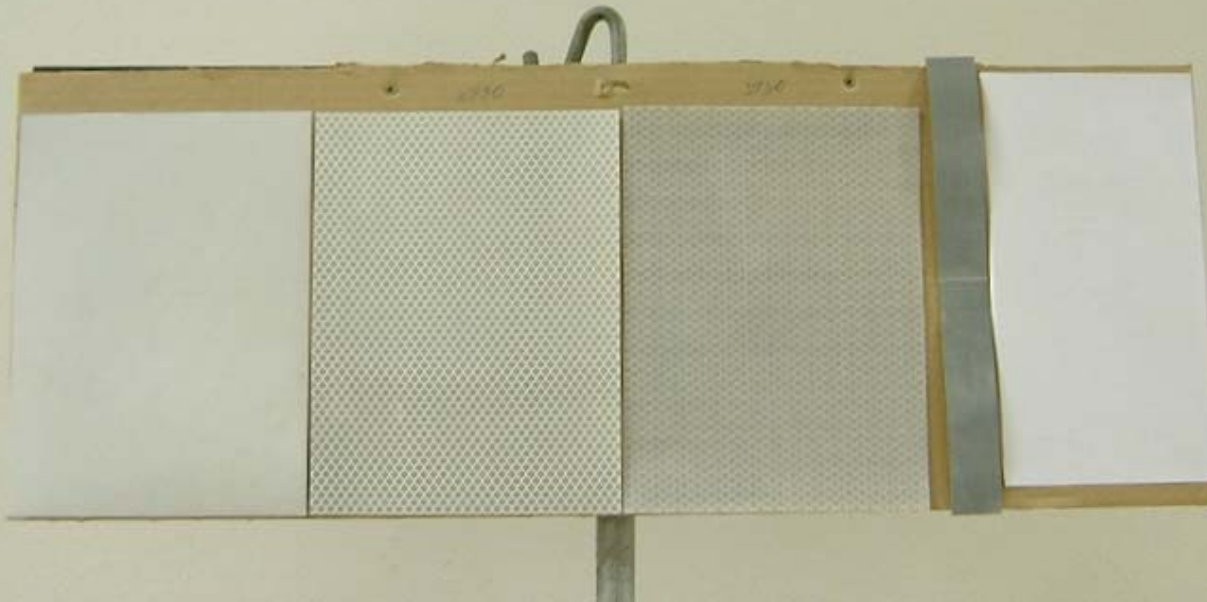
$$I(\theta) = 2 \operatorname{Re} \int_{-a/2}^{a/2} dx \int_{-a/2}^{a/2} E(x) E(y) \exp[ik(y-x) \sin(\theta)] dy$$

Diagram of scattered light

$$\langle I(\theta) \rangle = |E_0|^2 2 \operatorname{Re} \int_{-a/2}^{a/2} dx \int_{-a/2}^{a/2} F(x, y) \exp[ik(y-x)\sin(\theta)] dy$$

$$F(x, y) = \langle r(x)r(y) \exp[i\Delta\varphi(y) - i\Delta\varphi(x)] \rangle$$

Scattered light diagram is FFT of near field correlation function – F



View of tested reflector films

Table. 1 Identification of used reflector films

Identification #	Description	Parameters
1 Series 3200	Micro glass balls which encapsulated in gauzy polymer layer	Diameter – 40 mkμm
2 Series 4090	An optical element are microprisms, which are encapsulated in rhomb-shaped capsules and from outer face they covered with gauzy polymer layer.	Size 100*170 mkμm
3 Series 3930	Film optical elements produced by «full cube» technology. Elements are microprisms, which are encapsulated in rhomb-shaped capsules and from outer face they covered with gauzy polymer layer.	
4 Film from USA		130 mkμm
5 White paper sheet		

Diagram of scattered light

DL radiation scattering diagram for DL radiation with $\lambda = 1.6 \mu$ by white paper surface. Blue line corresponds to isotropic scattering

Scattering diagram is close to isotropic one:

Hence, near field correlation function of white paper has characteristic dimension close to 1.6μ

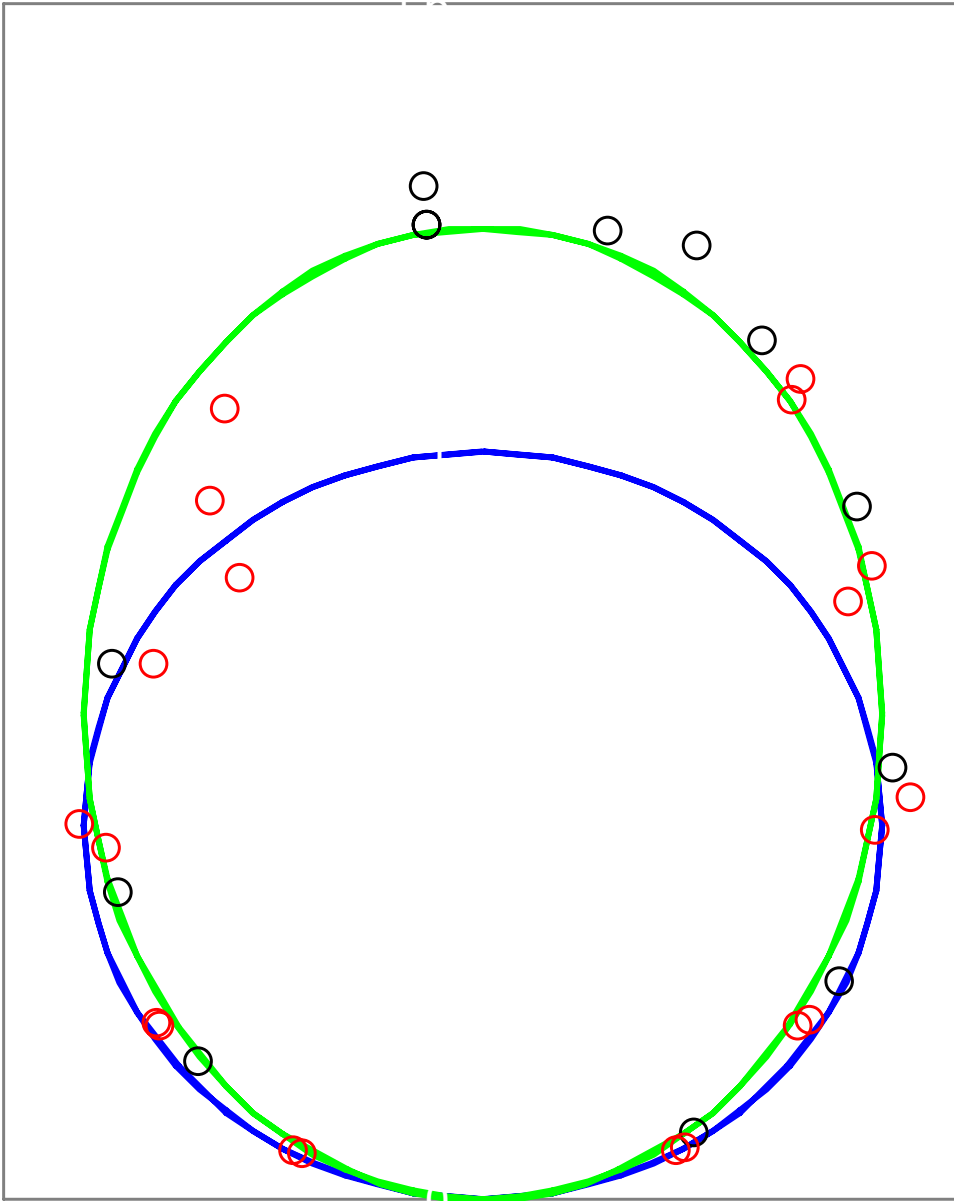
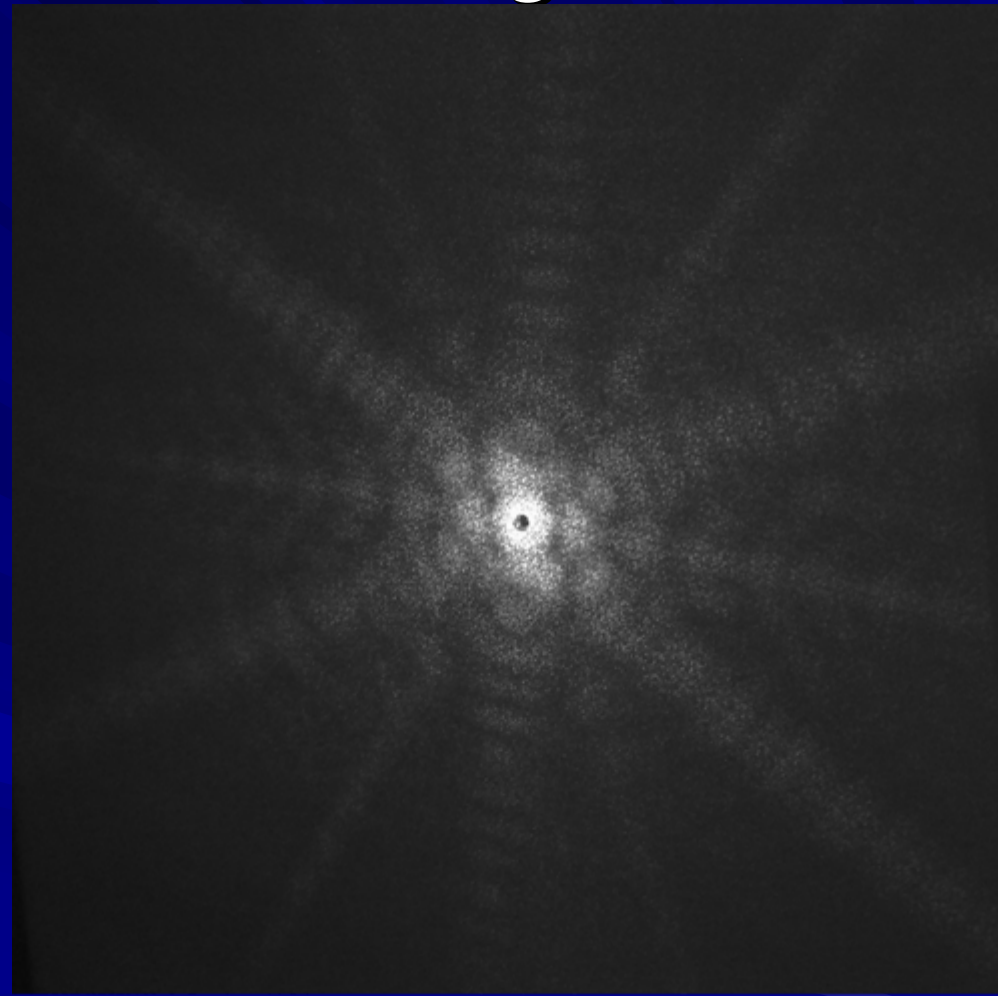
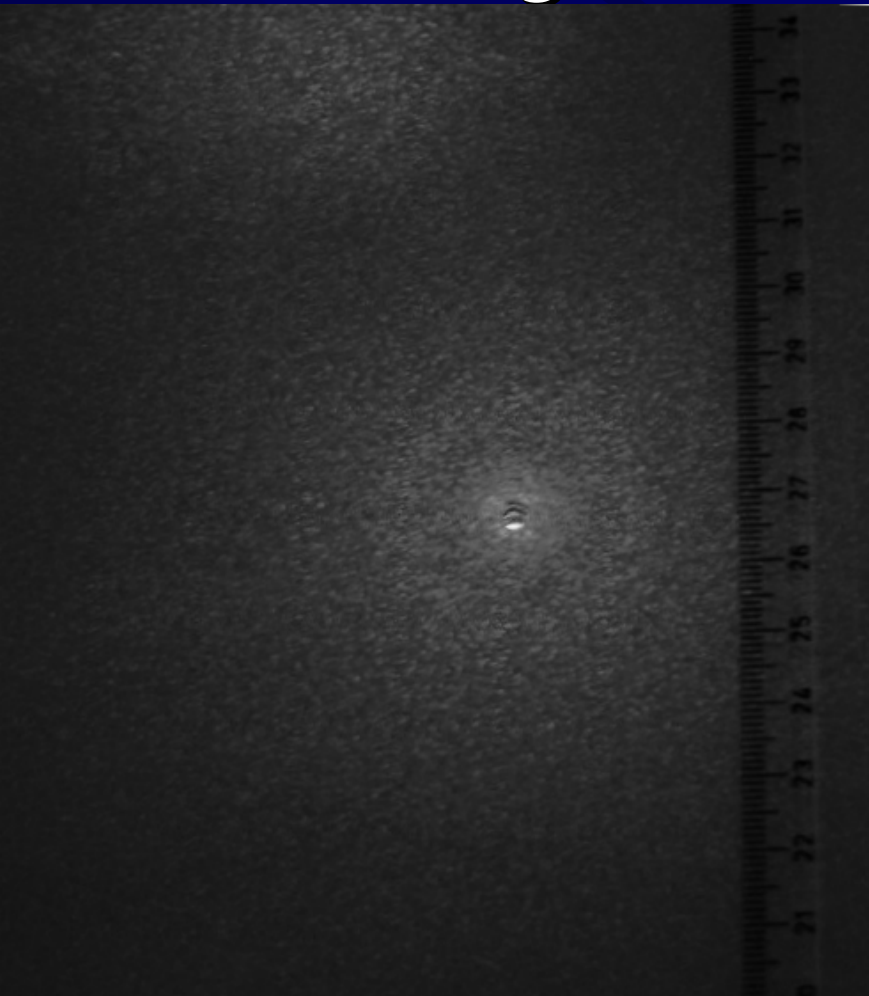


Diagram of scattered light



Scattering diagram for sample №1.

Scattering diagrams for the sample №4.

Diagram of scattered light are totally different.
However, speckle pattern can be easily observed

Диаграмма рассеянного излучения

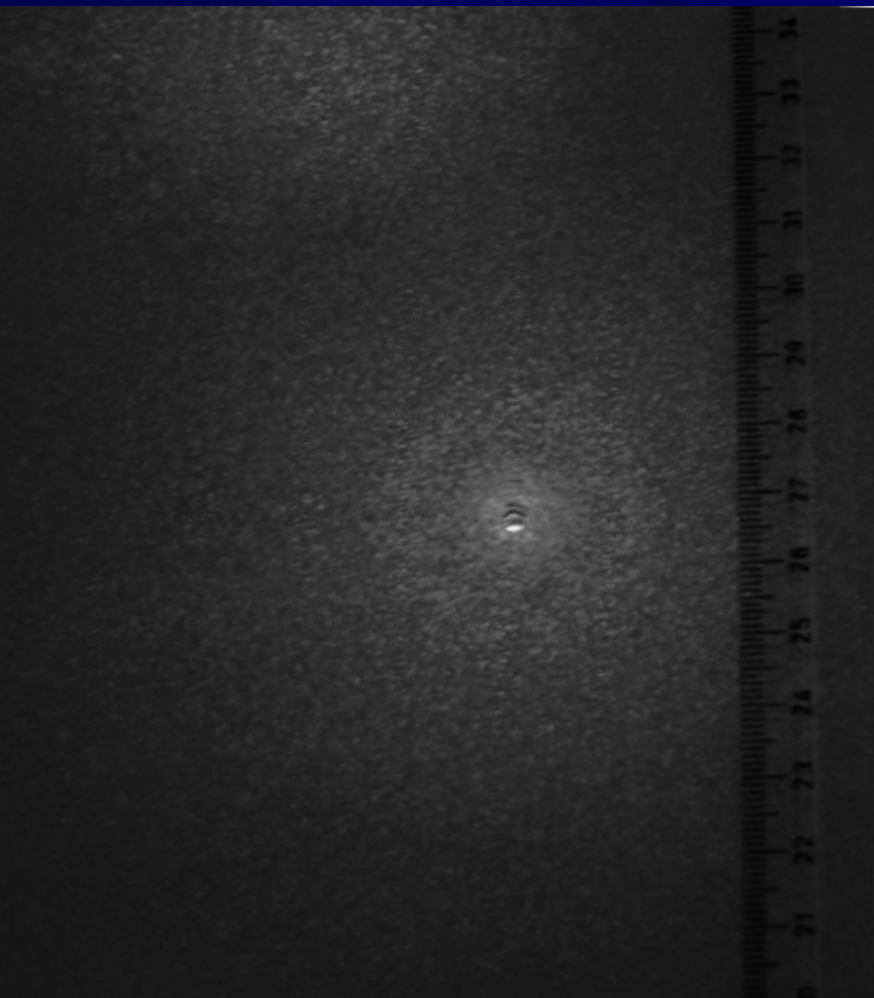


Диаграмма для образца №1.

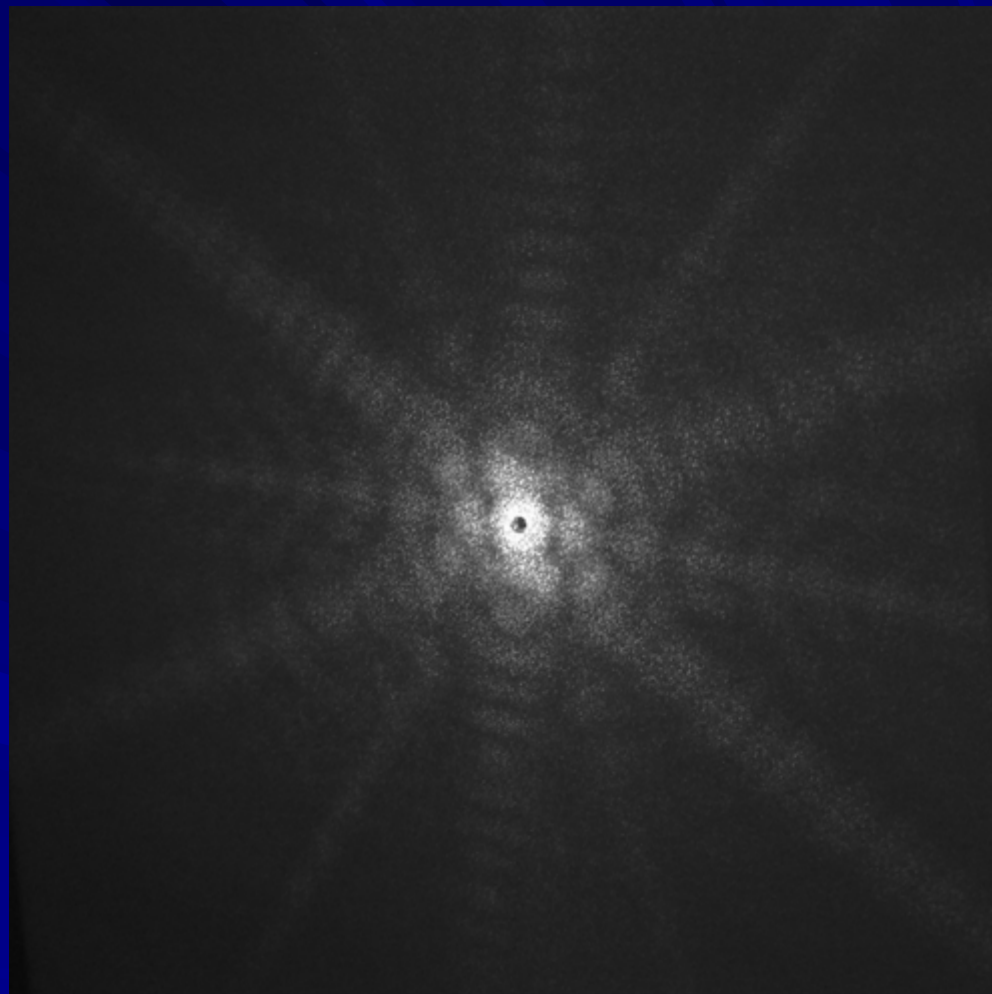
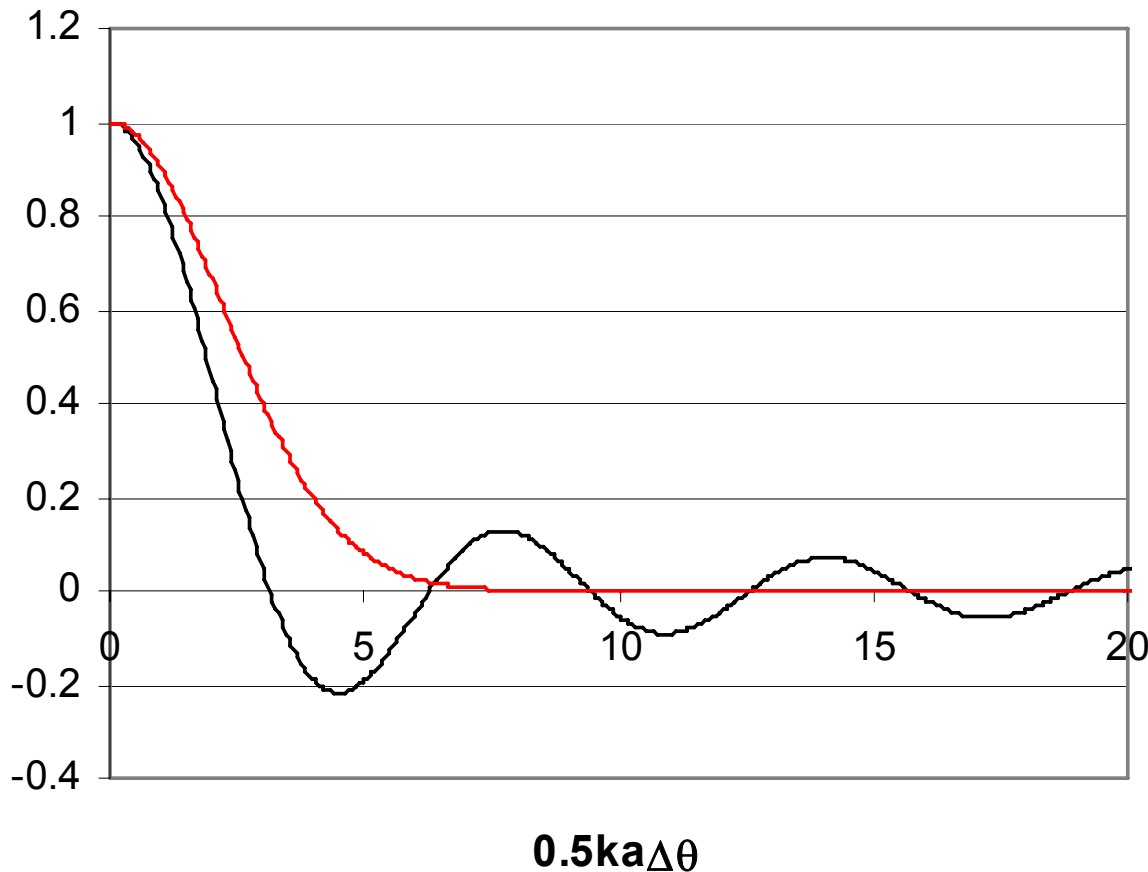


Диаграмма для образца №4.

Диаграммы существенно различаются, но в них отчетливо присутствует спекл-структура

Speckle dimension

$$\langle E(\theta)E^*(\theta + \Delta\theta) \rangle = |E_0|^2 \langle r^2 \rangle 2 \operatorname{Re} \int_{-a/2}^{a/2} \exp[ikx\Delta\theta] dx = 2a|E_0|^2 \langle r^2 \rangle \frac{\sin[0.5ka\Delta\theta]}{0.5ka\Delta\theta}$$



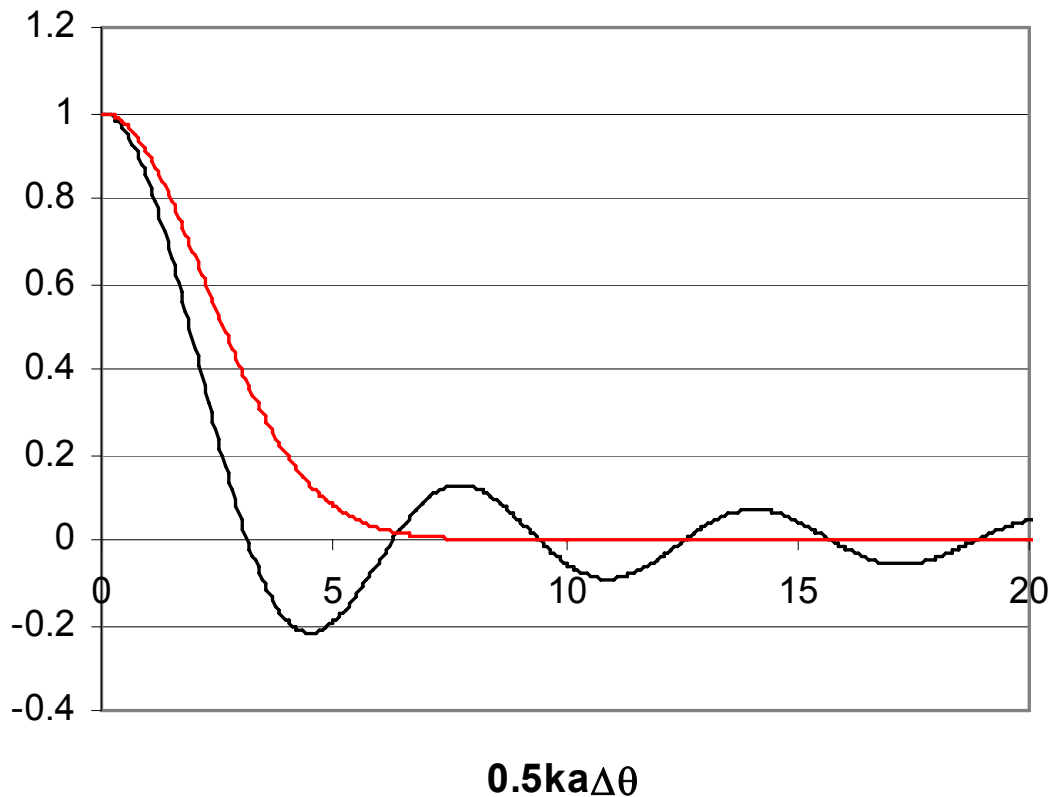
Far field correlation function is determined by diffraction of near field pattern

Rectangular – black

Gaussian - red

Размер элемента спекл-картины

$$\langle E(\theta)E^*(\theta + \Delta\theta) \rangle = |E_0|^2 \langle r^2 \rangle 2 \operatorname{Re} \int_{-a/2}^{a/2} \exp[ikx\Delta\theta] dx = 2a |E_0|^2 \langle r^2 \rangle \frac{\sin[0.5ka\Delta\theta]}{0.5ka\Delta\theta}$$

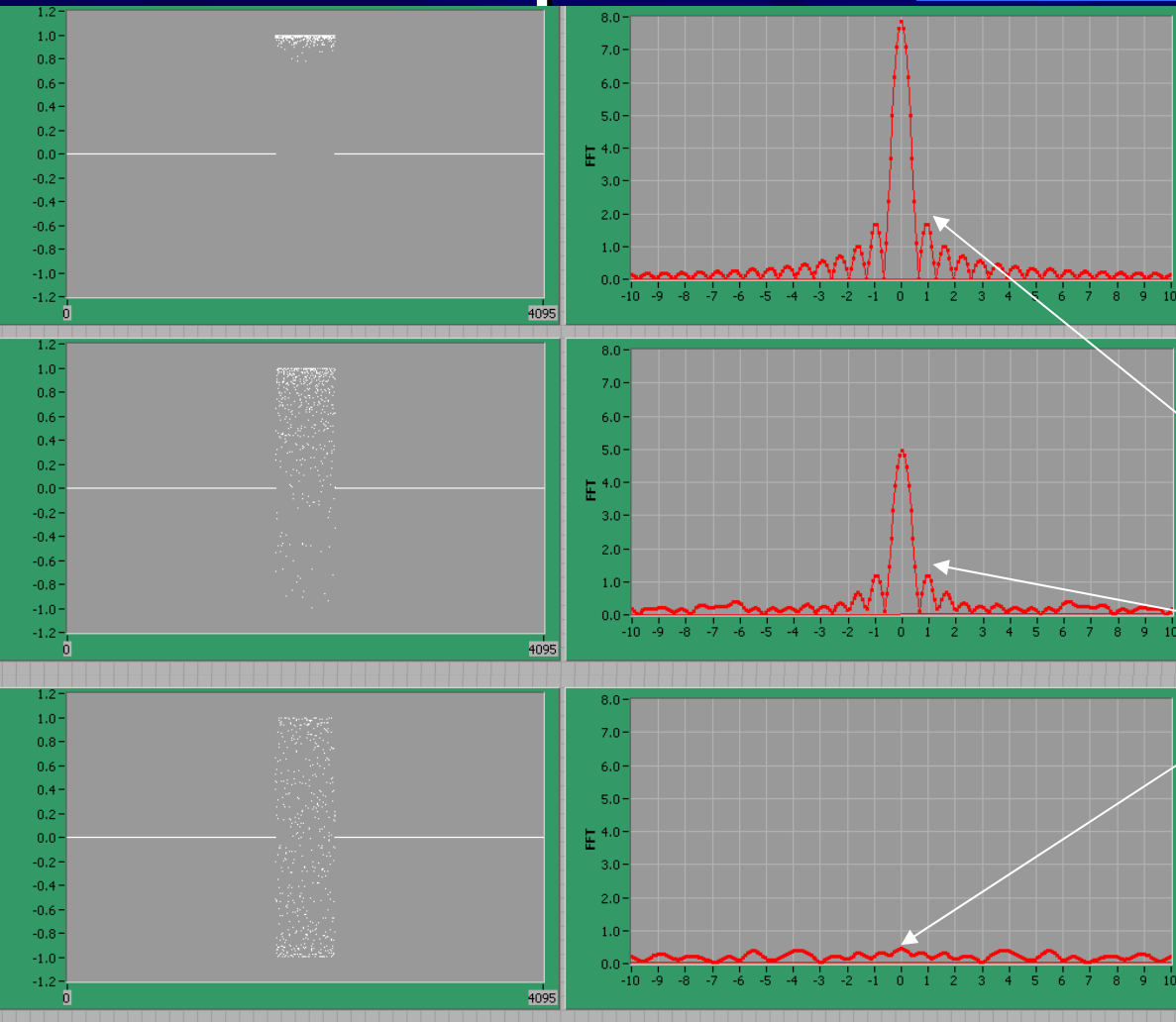


Корреляционная функция дальнего поля рассеяния определяется дифракцией на структуре ближнего поля.

Щель и Гауссово распределение: черная и красная кривые, соответственно

Моделирование спекл-картины

$$\langle I(\theta) \rangle = |E_0|^2 2 \operatorname{Re} \int_{-a/2}^{a/2} dx \int_{-a/2}^{a/2} F(x, y) \exp[ik(y-x) \sin(\theta)] dy$$
$$F(x, y) = \langle \exp[i\Delta\varphi(y) - i\Delta\varphi(x)] \rangle$$



Одномерная модель
рассеяния со случайным
распределением фазы

Зеркальное отражение с
дифракцией на щели

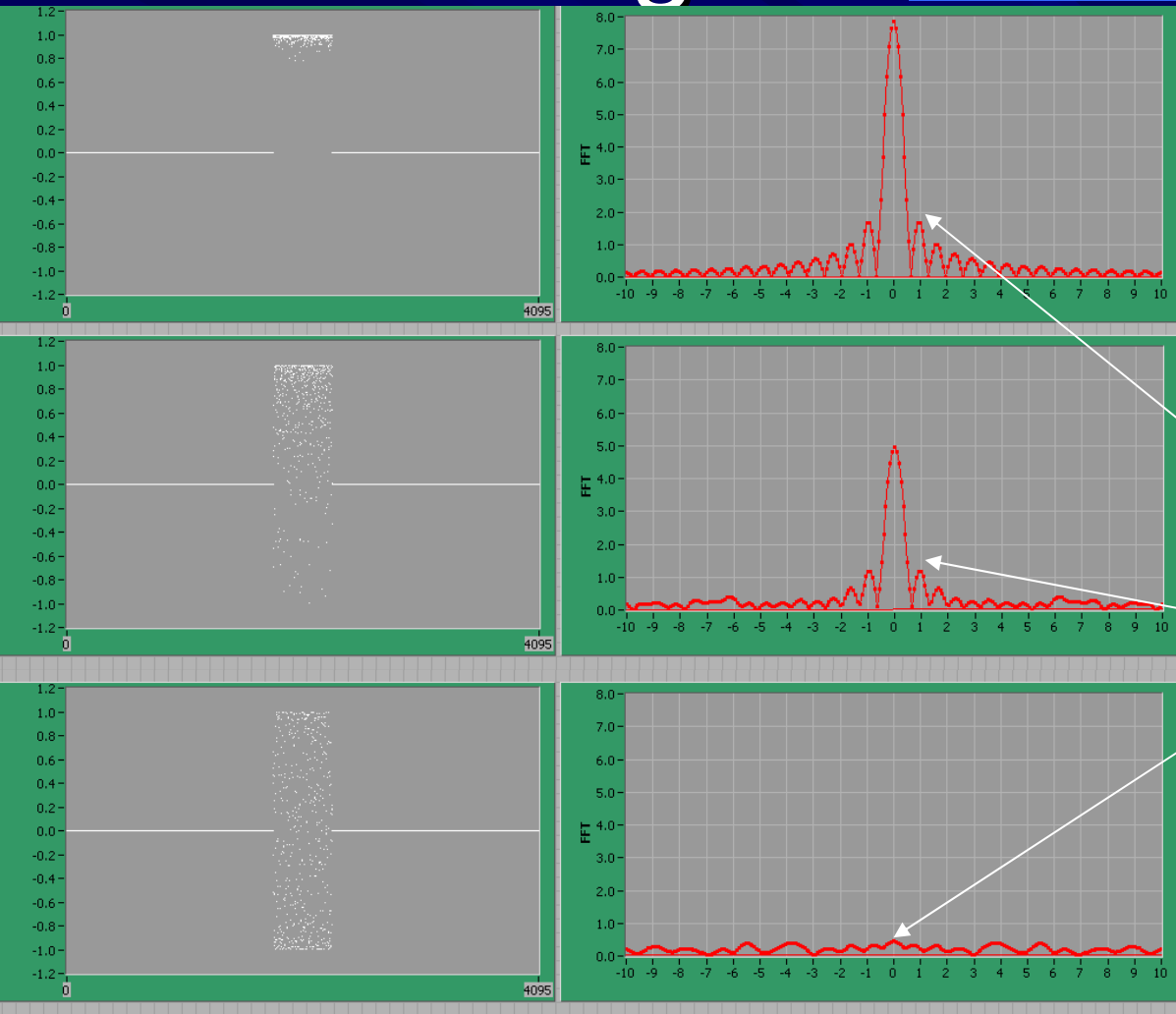
Промежуточная ситуация

Диффузное рассеяние,
спекл-структура

Диаграмма ближнего поля (слева) и дальнего поля (справа) для трех значений std фазы – 0.2, 1, 5

Speckle pattern modeling

$$\langle I(\theta) \rangle = |E_0|^2 2 \operatorname{Re} \int_{-a/2}^{a/2} dx \int_{-a/2}^{a/2} F(x, y) \exp[ik(y-x)\sin(\theta)] dy$$
$$F(x, y) = \langle \exp[i\Delta\varphi(y) - i\Delta\varphi(x)] \rangle$$



One-dimension scattering model with random phase distribution

Ideal reflection with diffraction on slit

Intermediate situation

Diffusion scattering, speckle pattern

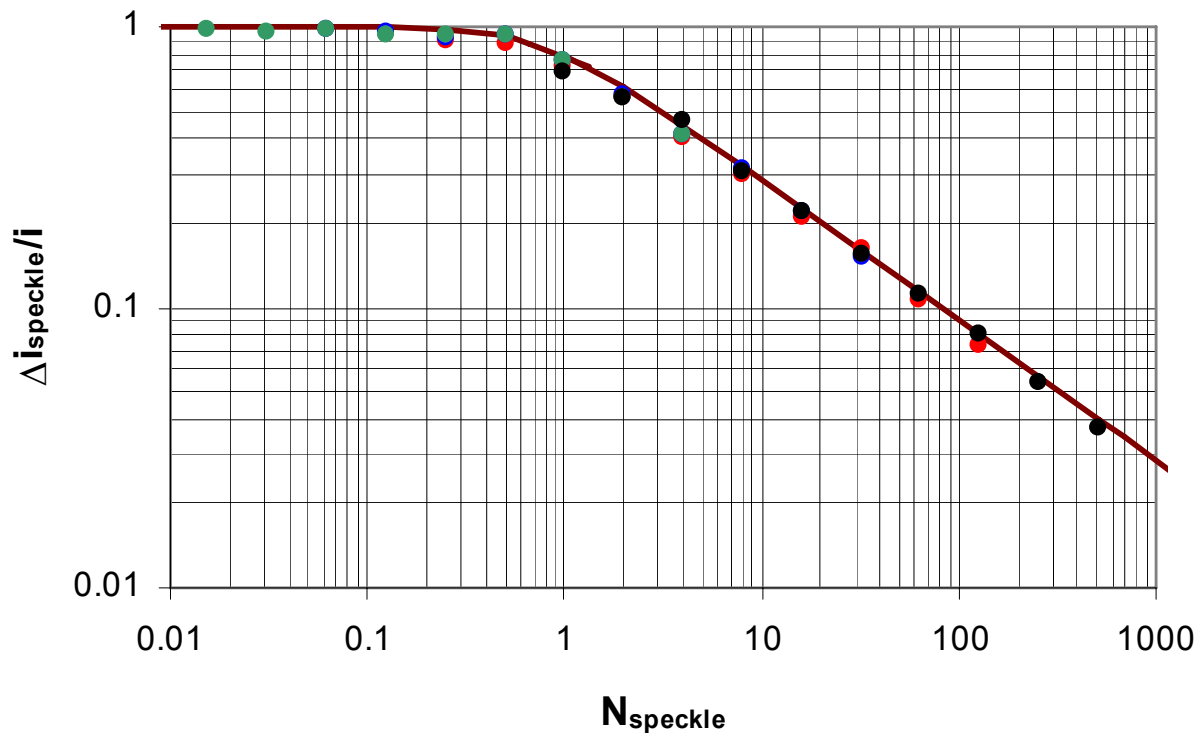
Near (left) and far (right) field diagrams for phase std – 0.2, 1, 5

Speckle noise modeling

$$2 \operatorname{Re} \int_{-\theta_0/2}^{\theta_0/2} E(\theta) E^*(\theta) d\theta = 2 \operatorname{Re} \int_{-a/2}^{a/2} dx \int_{-a/2}^{a/2} E(x) E^*(y) dy \left\{ \frac{\sin[0.5k(y-x)\theta_0]}{0.5k(y-x)} \right\} \quad \text{Photocurrent - } i$$

Speckle pattern is determined by following parameters:

L – distance between TR and receiving optics; a – laser beam dimension on TR; D – diameter of receiving optics; λ – laser wavelength



N_{speckle} – mean speckles number in receiving optics aperture

One dimension

$$\frac{\Delta i_{\text{speckle}}}{i} = \sqrt{N_{\text{speckle}}} = \sqrt{\frac{2\lambda L}{Da}}$$

Two dimensions

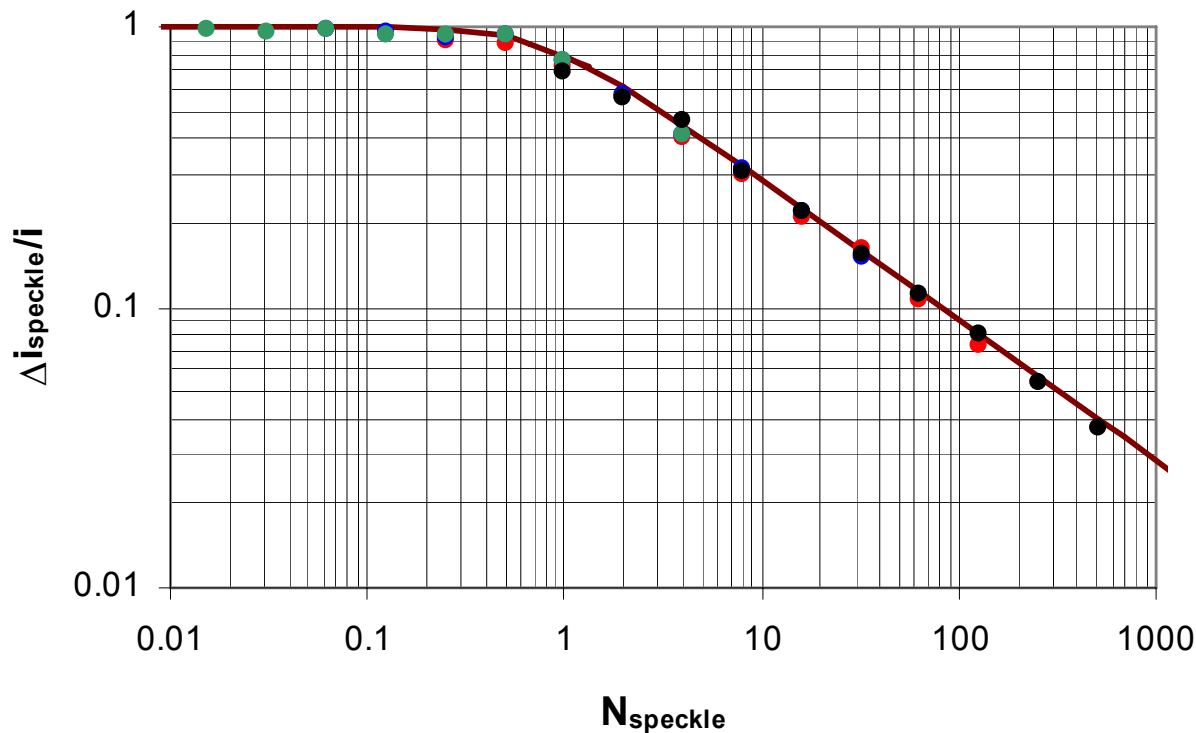
$$\frac{\Delta i_{\text{speckle}}}{i} = \sqrt{N_{\text{speckle}}} = \frac{2\lambda L}{Da}$$

Моделирование спекл-шума

$$2 \operatorname{Re} \int_{-\theta_0/2}^{\theta_0/2} E(\theta) E^*(\theta) d\theta = 2 \operatorname{Re} \int_{-a/2}^{a/2} dx \int_{-a/2}^{a/2} E(x) E^*(y) dy \left\{ \frac{\sin[0.5k(y-x)\theta_0]}{0.5k(y-x)} \right\} \quad \text{Фототок - } i$$

Спекл-картина определяется следующими параметрами:

L – расстояние между топографическим отражателем (ТО) и приемной оптикой; a – диаметр лазерного луча на ТО; D – диаметр приемной оптики; λ – длина волны ДЛ



N_{speckle} – среднее число спекл элементов, попадающих в приемную апертуру

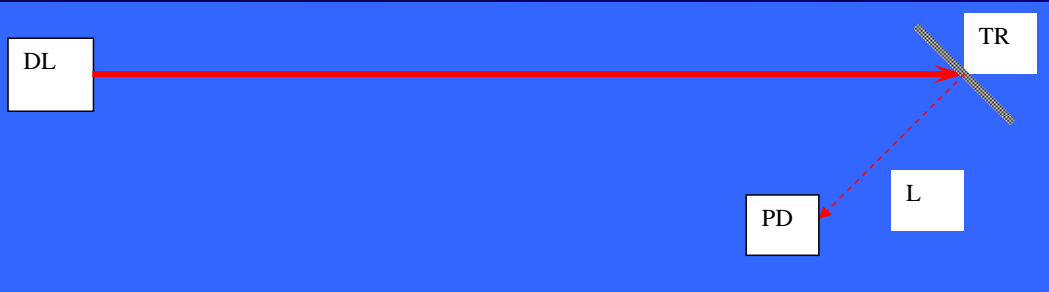
Одномерная задача

$$\frac{\Delta i_{\text{speckle}}}{i} = \sqrt{N_{\text{speckle}}} = \sqrt{\frac{2\lambda L}{Da}}$$

Двухмерная задача

$$\frac{\Delta i_{\text{speckle}}}{i} = \sqrt{N_{\text{speckle}}} = \frac{2\lambda L}{Da}$$

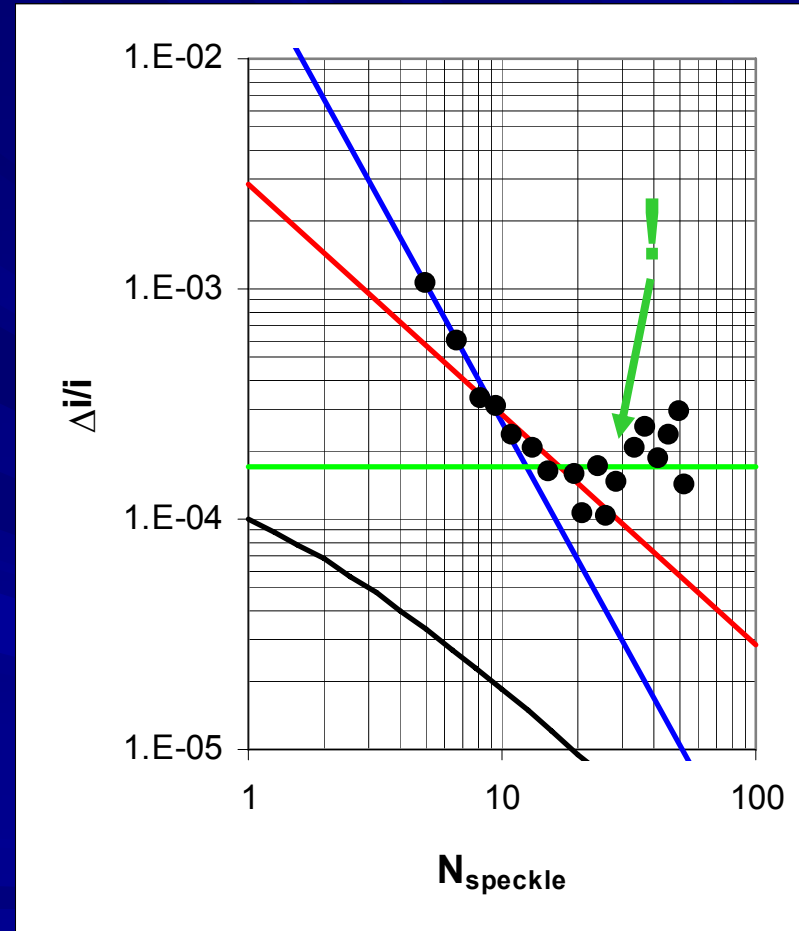
Experimental investigation of additional noise for DL based system with TR



Experimental setup

Relative photocurrent noise dependence on speckles number in receiving aperture.

Speckle noise modeling prediction is shown by black line, blue line – thermal noise of preamplifier resistor, red line – photocurrent shot noise



Additional noise in DL based systems with TR does not depend on N. Hence, it is not due to speckle noise of DL light scattered by TR. This noise is forming on TR itself

Экспериментальное исследование шумов в системе с ТО

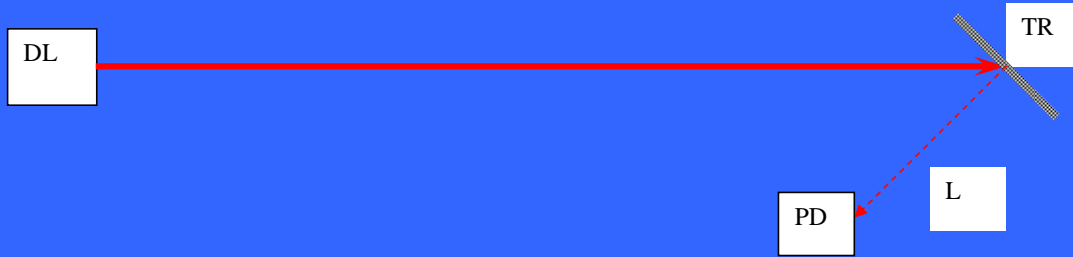
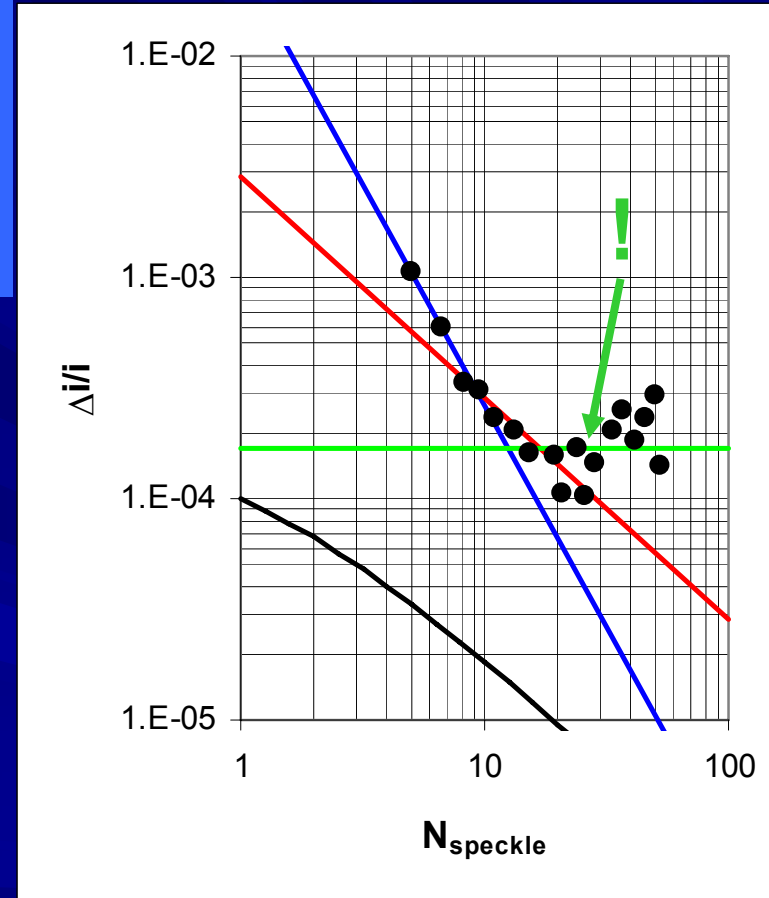


Схема экспериментальной установки

Зависимость относительного шума фототока от числа спекл-элементов в приемной апертуре
Результаты моделирования спекл-шума показаны черной кривой, синяя кривая – тепловые шумы сопротивления предусилителя, красная кривая – дробовые шумы фототока, зеленая прямая – дополнительный шум



Дополнительный шум не зависит от N , поэтому он не является спекл-шумом ДЛ излучения, рассеянного топографическим отражателем. Этот шум формируется на самом топографическом отражателе

Временная зависимость дополнительного шума

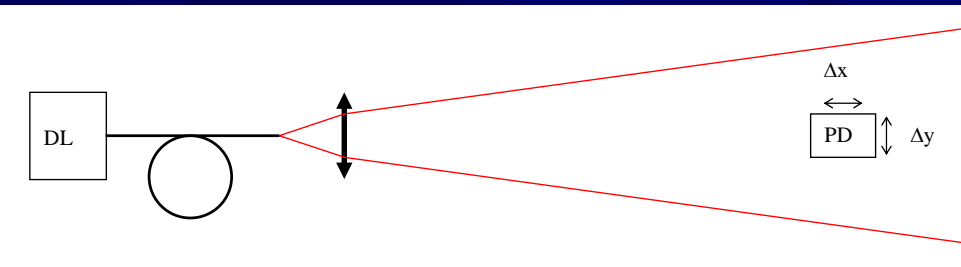
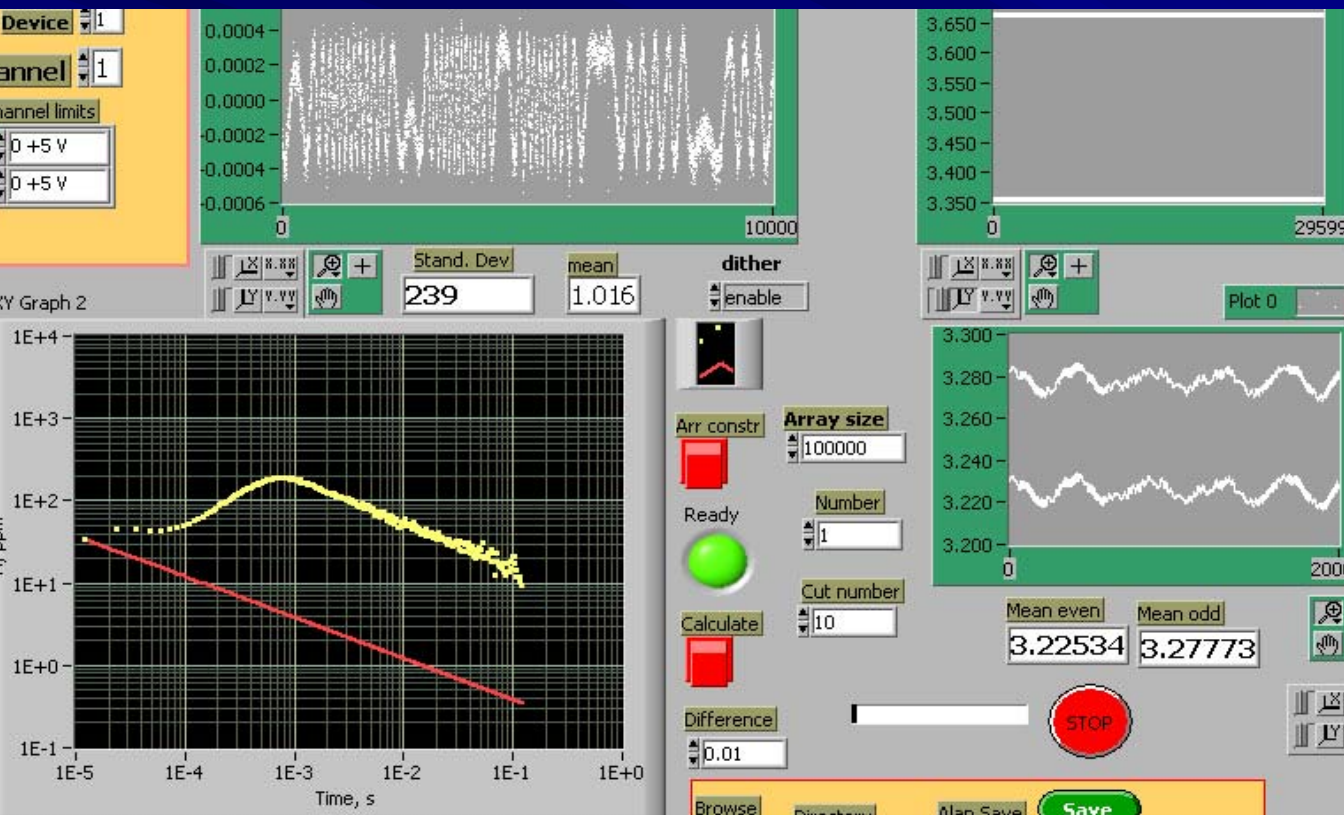


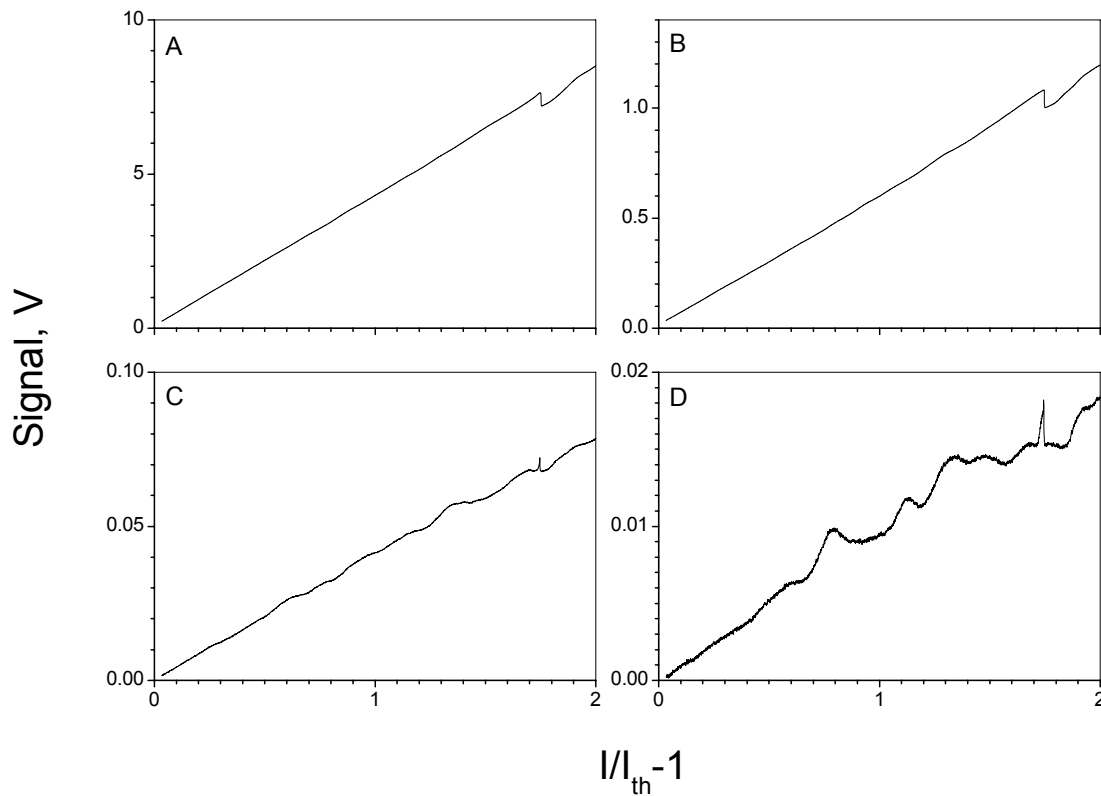
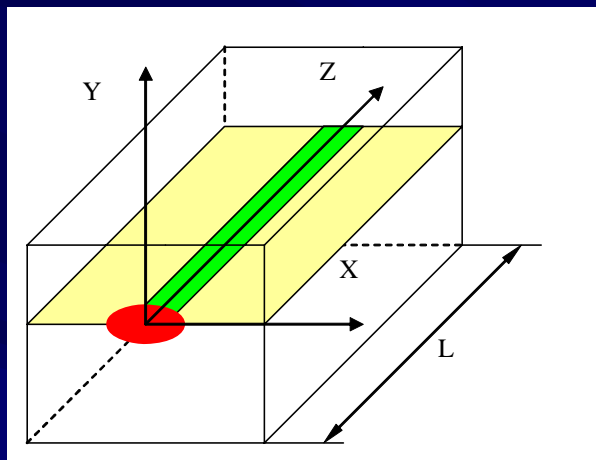
Схема экспериментальной установки, установленной на обычном столе.

Вибрация создавалась работающим вентилятором



Это можно объяснить только в том случае, если предположить наличие тонкой структуры в диаграмме дальнего поля излучения ДЛ

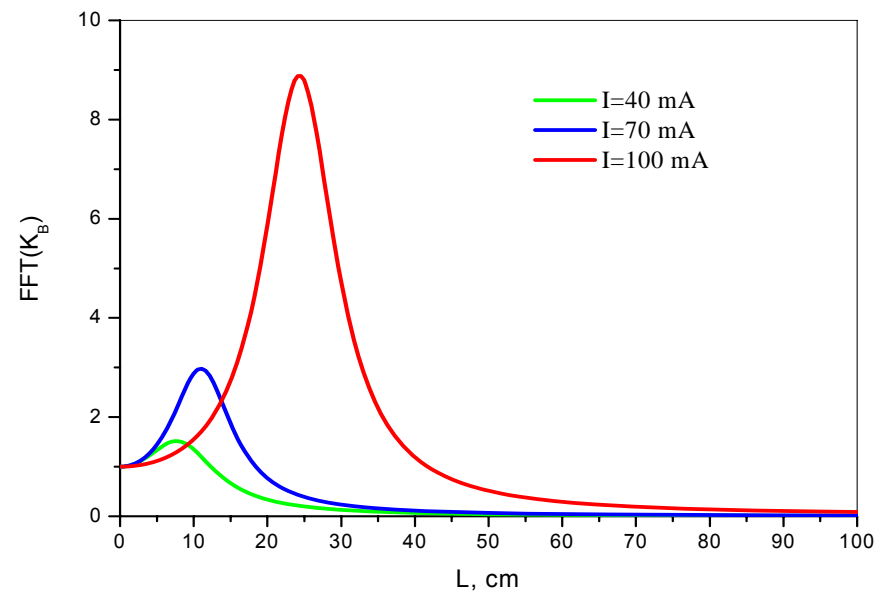
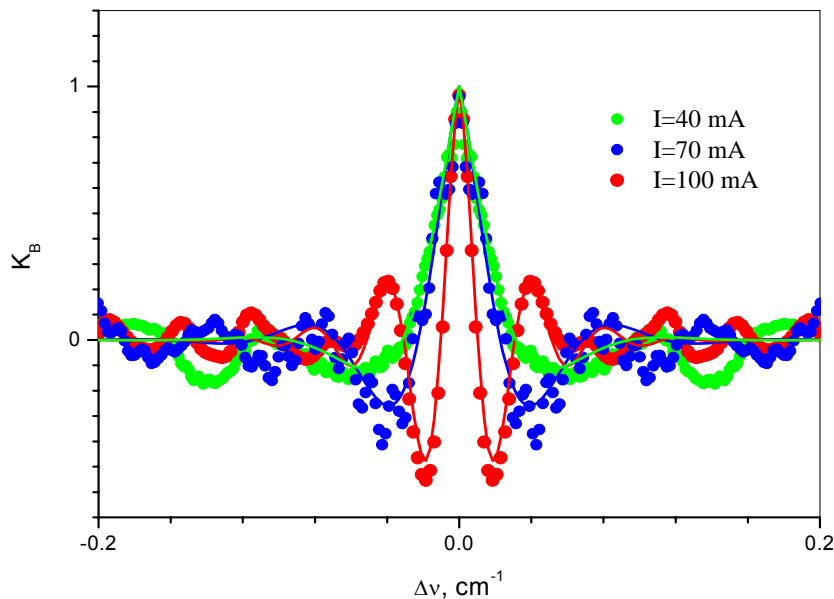
Базовая линия



Пространственная неоднородность излучения ДЛ:

ФД в центре диаграммы излучения ДЛ (А), затем ФД последовательно смещался до положения в котором сигнал был примерно в 10 раз меньше предыдущего (В, С, D)

О природе базовой линии



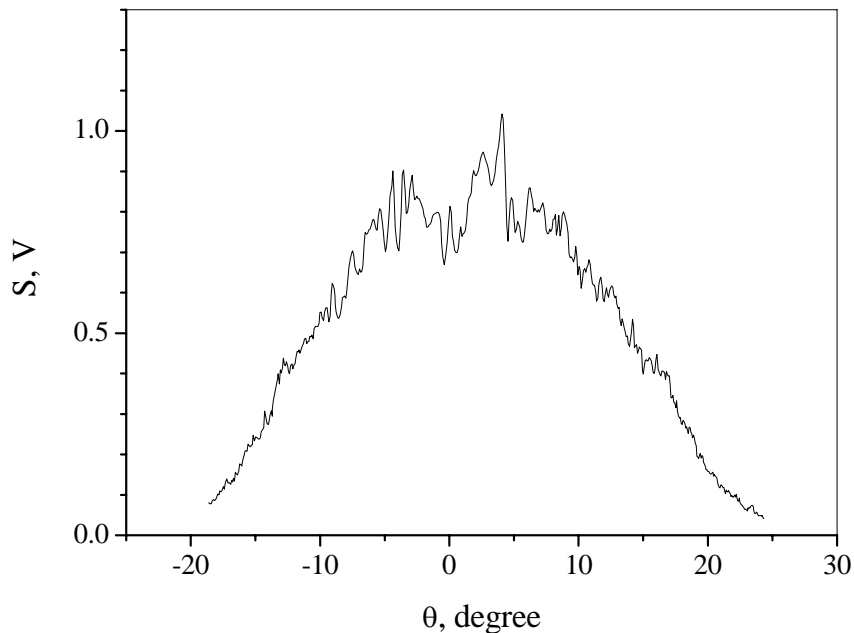
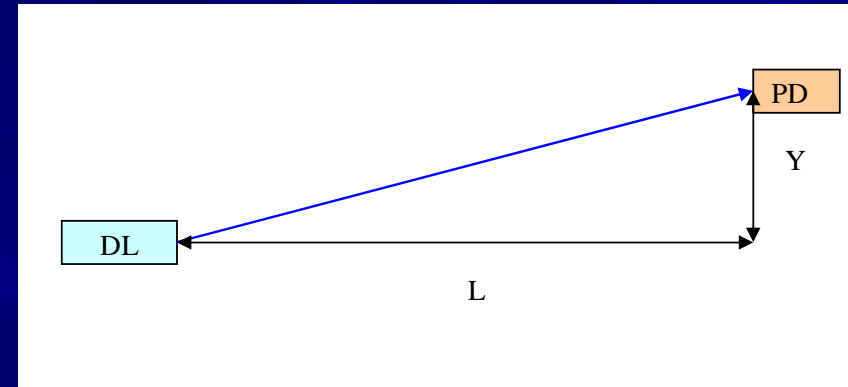
Корреляционные функции базовых линий для разных токов накачки ДЛ и их подгонка

Фурье преобразование корреляционных функций базовых линий для различных токов накачки ДЛ

Вывод: природа базовой линии связана с взаимодействием стоячей волны с неоднородностями в активной области ДЛ и диффузией электронов, а ее свойства определяются системой носителей тока – фотонов в активной среде ДЛ (“релаксационные колебания”)

Тонкая структура диаграммы излучения ДЛ

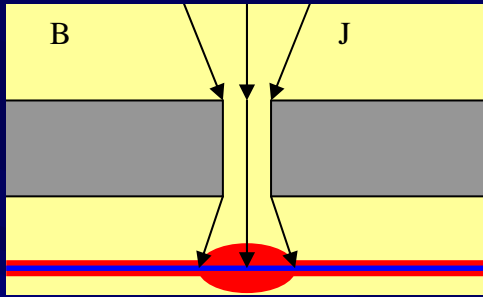
Схема измерения тонкой структуры диаграммы излучения ДЛ (дальнее поле)



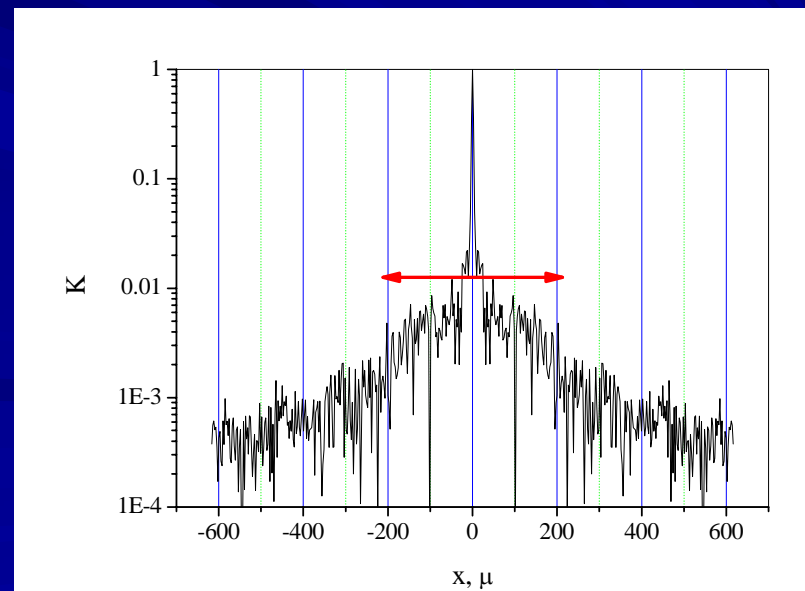
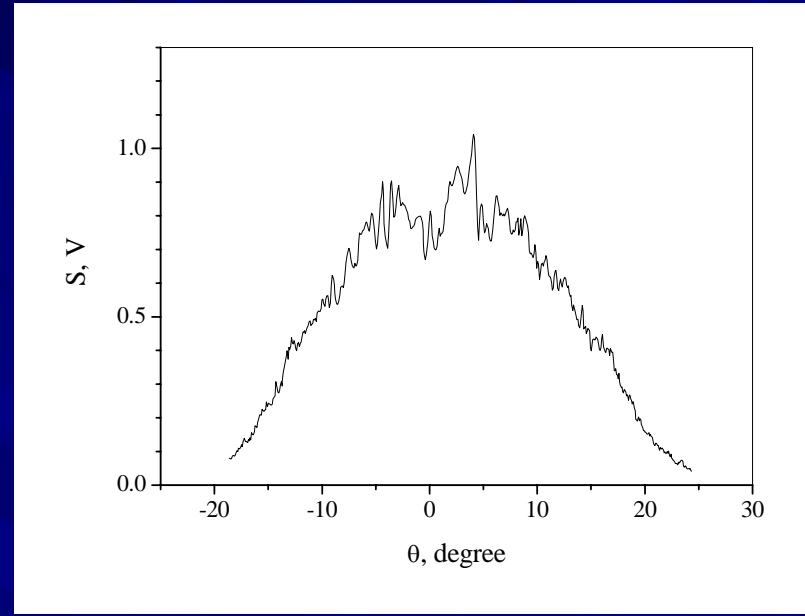
Пример тонкой структуры диаграммы излучения ДЛ (Laser Components) в дальнем поле

Рассеяние внутри чипа ДЛ

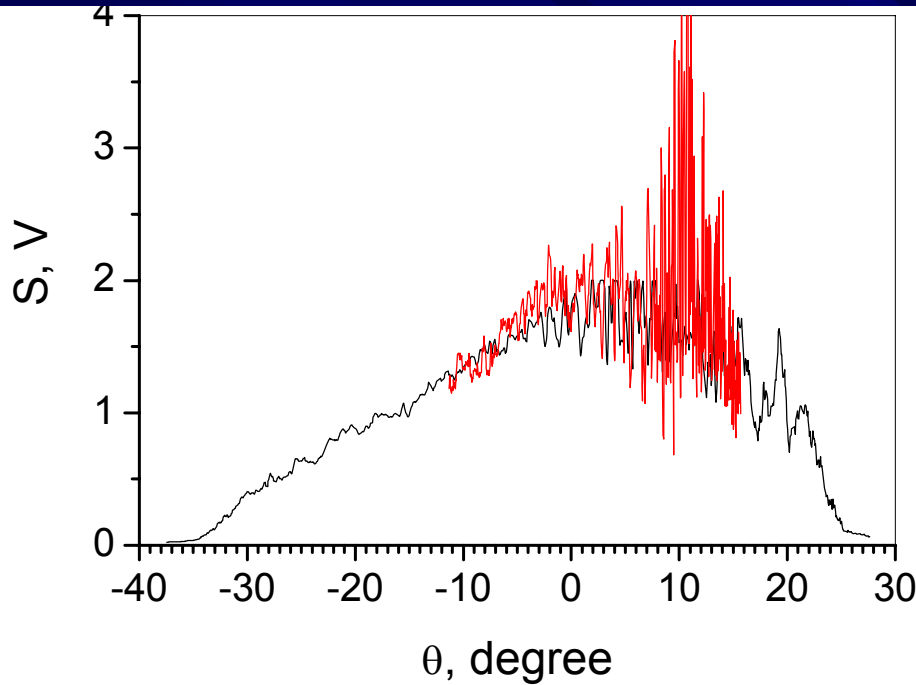
Рассеяние на неоднородностях



Вывод: природа базовой линии связана с рассеянием на неоднородностях в активной области ДЛ и диффузией электронов, а ее свойства определяются системой носителей тока – фотонов в активной среде ДЛ (“релаксационные колебания”)



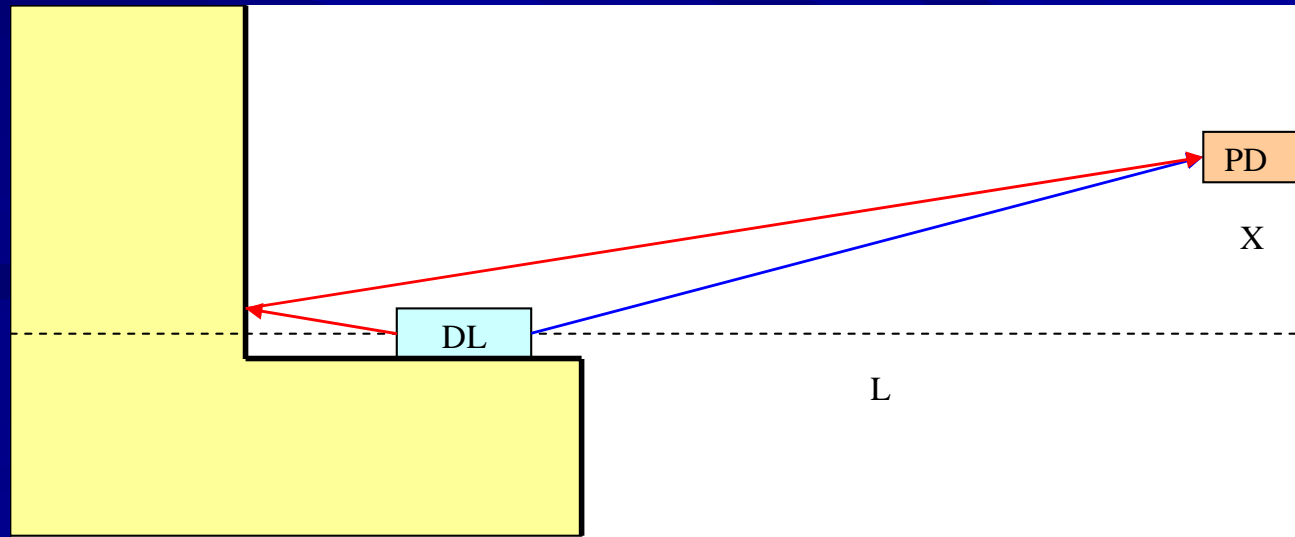
Рассеяние и отражение в модуле ДЛ



Тонкая структура дальнего поля излучения ДЛ при наличии рассеяния и отражения в модуле ДЛ (Laser Components)

Рассеяние и отражение в модуле ДЛ также приводит к тонкой структуре дальнего поля излучения ДЛ, базовой линии и дополнительному шуму

Схема, объясняющая появление тонкой структуры дальнего поля ДЛ при наличии рассеяния и отражения в модуле ДЛ



Спекл картина излучения ДЛ

Рассмотрены следующие механизмы:

1. Взаимодействие стоячей электромагнитной волны с продольными неоднородностями в активной области ДЛ
2. Взаимодействие стоячей электромагнитной волны с поперечными неоднородностями в активной области ДЛ
3. Рассеяние света на неоднородностях в активной области ДЛ
4. Отражение и рассеяние света в модуле ДЛ

Все рассмотренные механизмы приводят к спекл картине излучения ДЛ:

- A. Появлению базовой линии
- B. Неоднородности излучения ДЛ
- C. Тонкой структуре излучения ДЛ в дальнем поле
- D. Дополнительному шуму при наличии относительного движения элементов в системе на основе ДЛ

Наиболее опасными являются механизмы 3 и 4. Для механизмов 1 и 2 разработаны методы их подавления

ДЛ с ВОЛОКНОМ

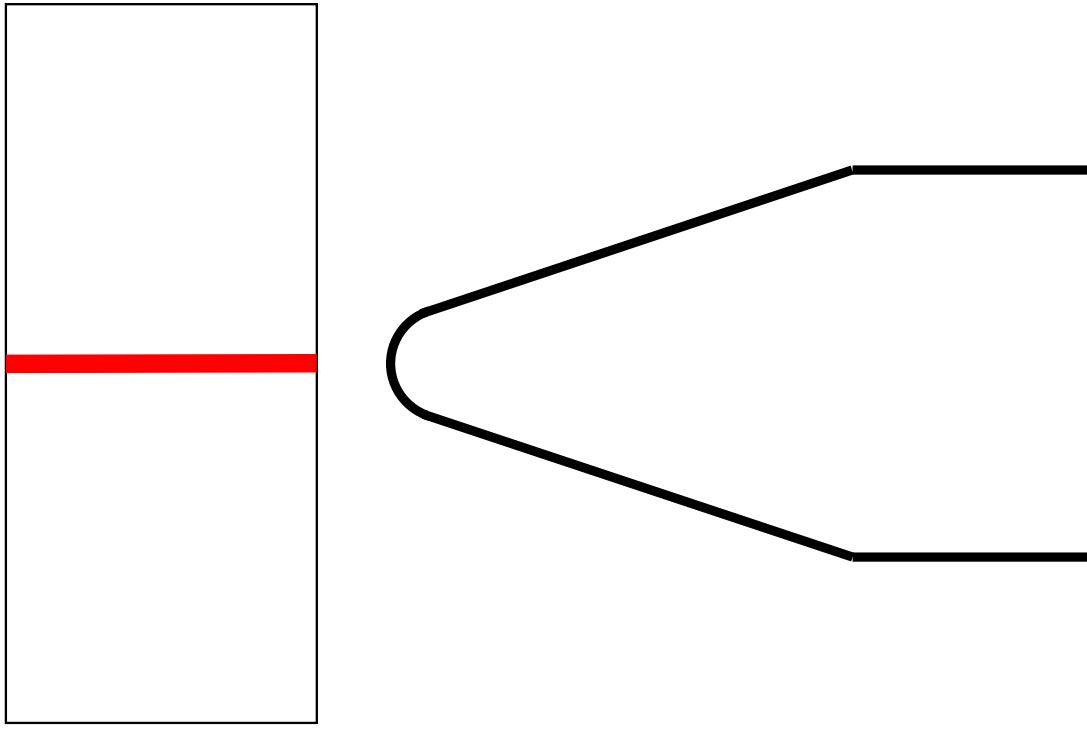


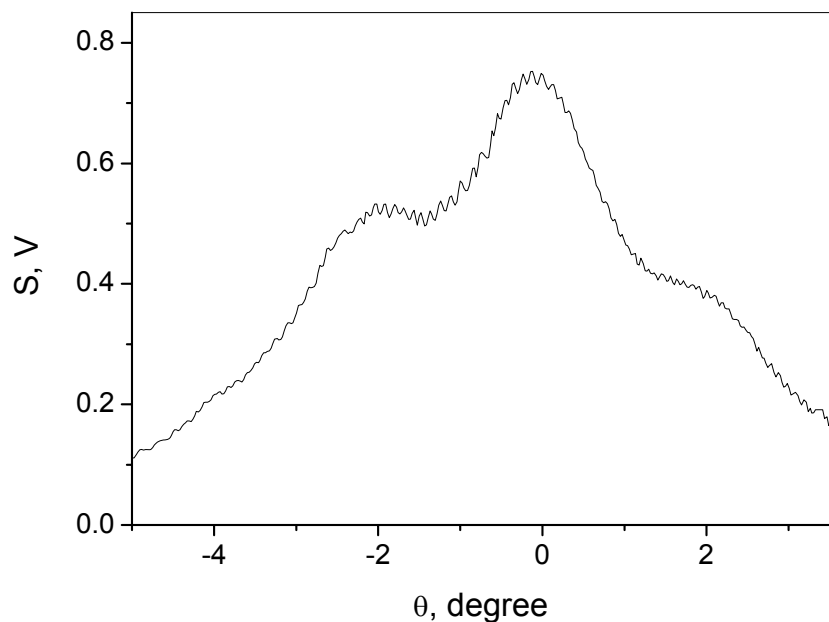
Схема вывода излучения
через одномодовое волокно
с микролинзой

Наличие микролинзы
позволяет выводить через
волокно лишь излучение ДЛ
из активной области

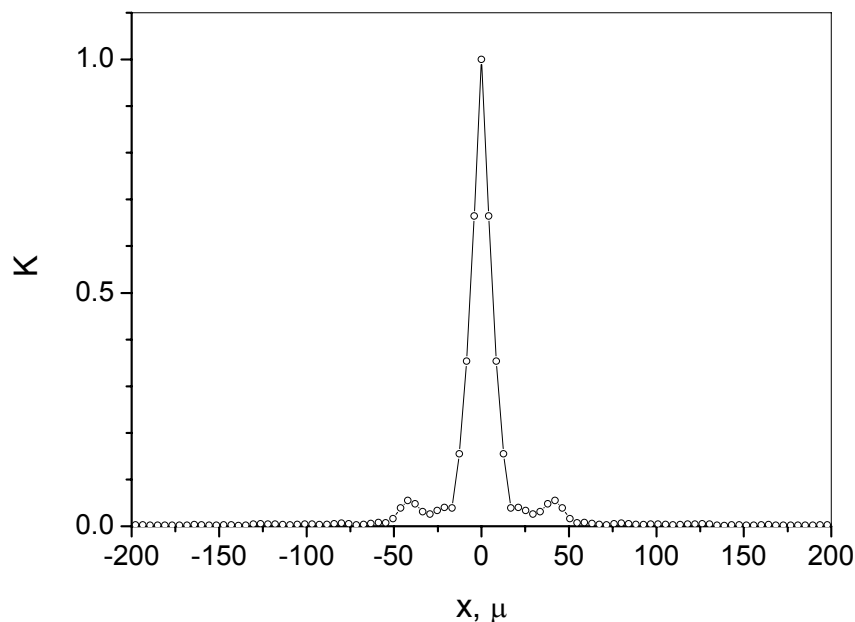
По этой причине использование ДЛ с выводом излучения
через одномодовое волокно является эффективным
способом устранения роли рассеяния внутри чипа ДЛ, а
также модуля ДЛ

Спекл-картина в ДЛ с волокном

Использование ДЛ с выводом излучения через одномодовое волокно является эффективным способом устранения роли рассеяния внутри чипа ДЛ, а также модуля ДЛ



Тонкая структура дальнего поля излучения одномодового волокна



Тонкая структура ближнего поля излучения одномодового волокна

К сожалению, наличие рассеяния внутри одномодового оптического волокна приводит к образованию оболочечных мод и формированию спекл картины излучения на выходном торце волокна

Подавление базовой линии и дополнительного шума

Если известен физический механизм базовой линии и дополнительного шума, то влияние последних может быть устранено

