



**Влияние показателя преломления на
рассеяние лазерного излучения в
порошковых диэлектрических средах**

Тихонов Е.В.

Институт электрофизики УрО РАН
Лаборатория квантовой электроники
e-mail: tikhonov@iep.uran.ru

Лазерный метод получения наночастиц заключается в испарении твердого вещества излучением лазера и в последующей конденсации паров в буферном газе.

**Непрерывный волоконный
иттербиевый лазер ЛС-07-Н**



**Импульсно-периодический СО₂-лазер
«ЛАЭРТ»**



Разница в длинах
волн излучения



**Излучение
взаимодействует с
материалом
по-разному**

Параметр	ЛС-07Н	«ЛАЭРТ»
КПД	25-30%	~8%
Пиковая мощность излучения	720 W	9 kW
Размер пятна на мишени	430 μm (линза 400 mm)	0,7x0,9 mm
Длина волны излучения	1,07 μm	10,6 μm
Плотность мощности в пятне	0,46 MW/cm ² (линза 400 mm)	1,3 MW/cm ²

Особенности получения нанопорошков CaF_2 и $1\%\text{Nd}:\text{Y}_2\text{O}_3$

Параметр	Волоконный лазер ($\lambda=1,07 \mu\text{m}$)		CO_2 -лазер ($\lambda=10,6 \mu\text{m}$)	
	CaF_2	$\text{Nd}:\text{Y}_2\text{O}_3$	CaF_2	$\text{Nd}:\text{Y}_2\text{O}_3$
Производительность получения нанопорошка (Непрерывный режим)	0 g/h!	22 g/h	15 g/h	28 g/h
Показатель поглощения	$1,3 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$	$9 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$	$0,31 \text{ cm}^{-1}$	Непрозрачен
Показатель преломления	1,4289	1,9029	1,3110	1,6561
Средняя мощность излучения	$\sim 600 \text{ W}$		$\sim 600 \text{ W}$	

Фотография мишени CaF_2
после испарения



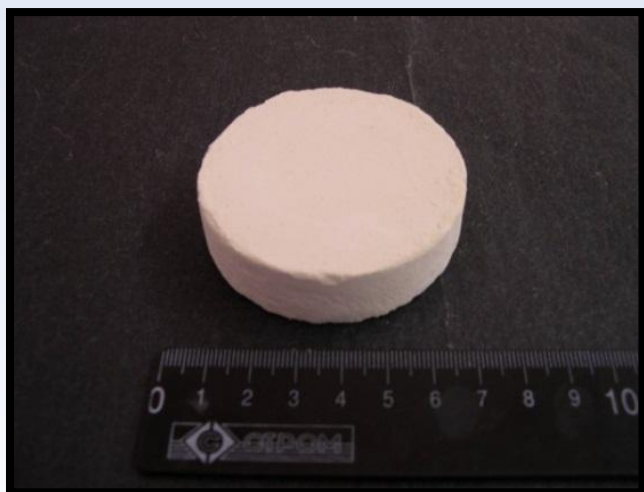
CO₂-лазер «ЛАЭРТ»

 Волоконный лазер ЛС-07Н



Источники рассеяния лазерного излучения в прессованной мишени

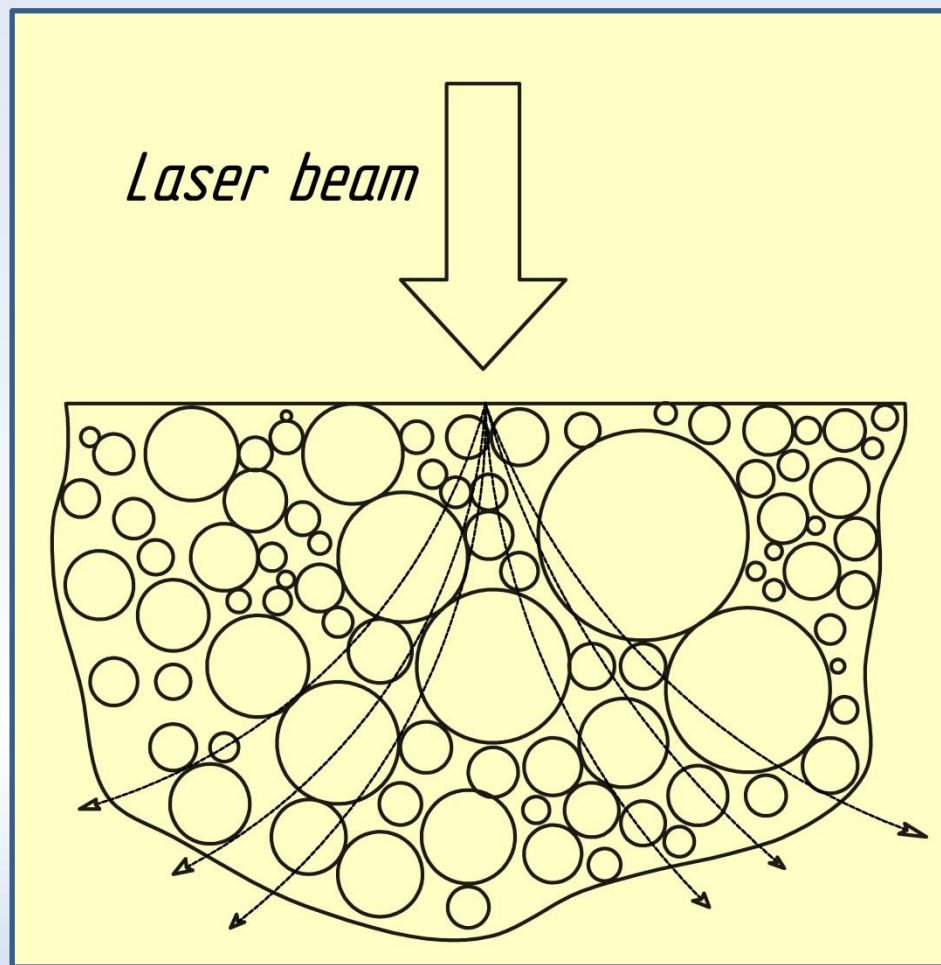
Изображение реальной прессованной мишени из Y_2O_3 , $\rho_{отн} \approx 50\%$



Прессованная мишень – это компакт из плохо припечённых друг к другу микронных крупинок



Множество пор и дефектов



Основная причина низкой производительности получения нанопорошка – рассеяние лазерного излучения в объёме мишени на частицах и порах

Цель работы:

Исследовать влияние показателя преломления материала прессованной мишени на характер взаимодействия с ней излучения волоконного лазера.

Основные результаты

Моделирование процессов рассеяния выполнялось при помощи программного пакета
«COMSOL Multiphysics 5.2»

Входные параметры модели

Основные параметры излучения волоконного иттербиевого лазера ЛС-07Н

Плотность мощности излучения на мишени I _____ **0,46 МВт/см²**
Размер лазерного пятна на поверхности мишени _____ **430 μ m (400 mm)**
Режим работы лазера _____ **Непрерывный**

Мишени для моделирования

Материал	MgF ₂	CaF ₂	BaF ₂	SiO ₂	BeO	MgAl ₂ O ₄	Al ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	YSZ
Показатель преломления	1,38	1,42	1,505	1,54	1,61	1,7	1,75	1,9	2,12

Физические уравнения, описывающие задачу

Волновое уравнение Гельмгольца

$$\nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times E) - k_0^2 \left(\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) E = 0$$

*То же уравнение без учёта поглощения лазерного излучения
в объёме мишени*

$$\nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times E) - k_0^2 \epsilon_r E = 0$$

Тангенциальная составляющая электрического поля, распространяющаяся вдоль оси Oz

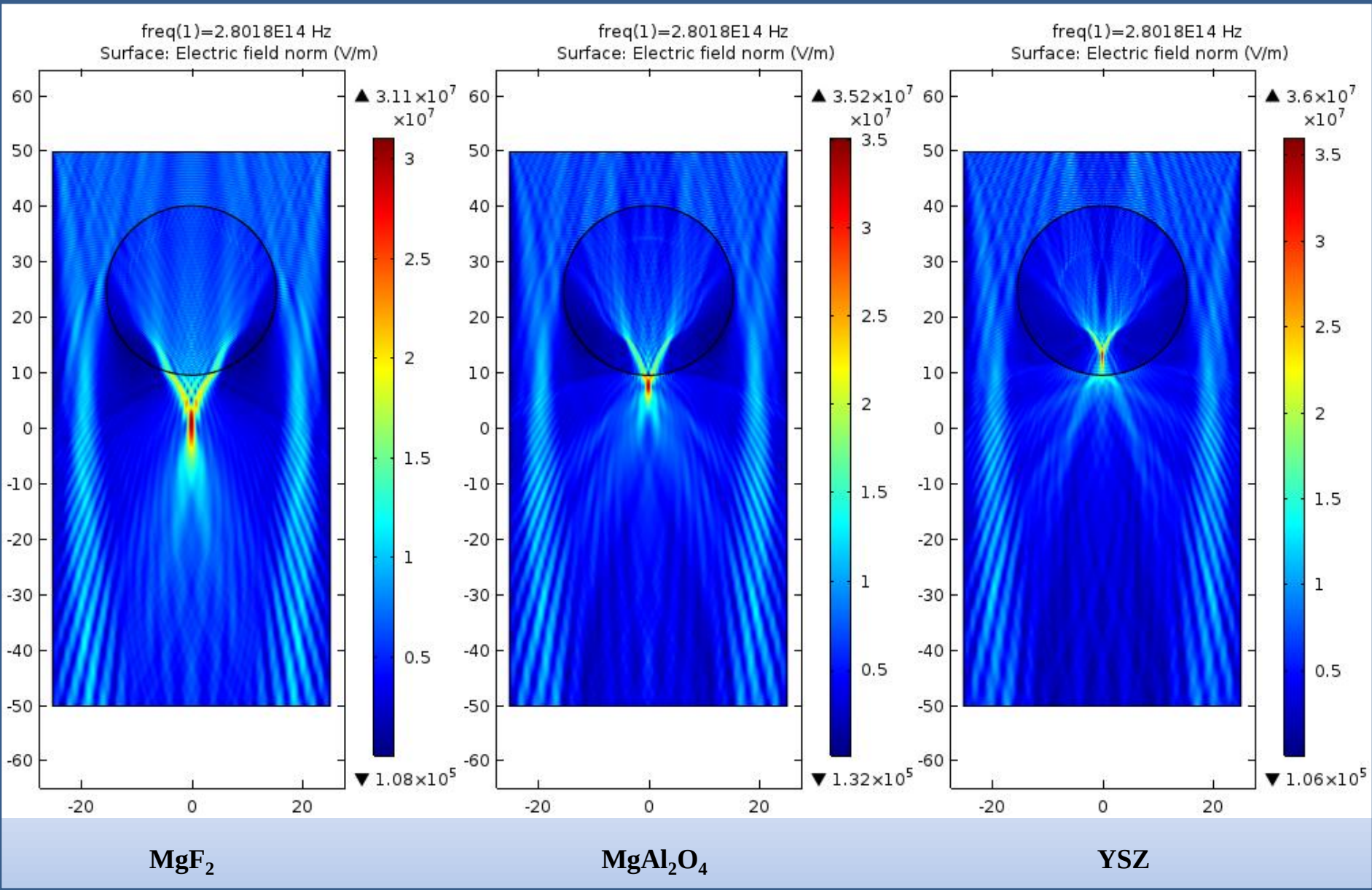
$$E(x,y,z) = E_0(x,y) \exp(-ik_z z),$$

где $k_0 = \omega/c_0$, $\omega = 2\pi/\lambda$, а $E_0(x,y)$ – это фоновое электрическое поле, задаваемое в качестве входного параметра задачи.

Граничные условия

$$\left\{ \begin{array}{ll} \mathbf{n} \times E = \mathbf{n} \times E_0 & \text{-Условие сохранения тангенциальной составляющей электрического поля} \\ \mathbf{n} \times (\nabla \times (E + E_b)) - jk \mathbf{n} \times (E \times \mathbf{n}) = 0 & \text{-условие, делающее стенки геометрии} \\ & \text{прозрачными для излучения} \end{array} \right.$$

Конфигурация электрического поля внутри одной частицы из различных материалов при воздействии на неё излучением волоконного иттербиевого лазера. $I_{\text{rad}}=0,46 \text{ MW/cm}^2$

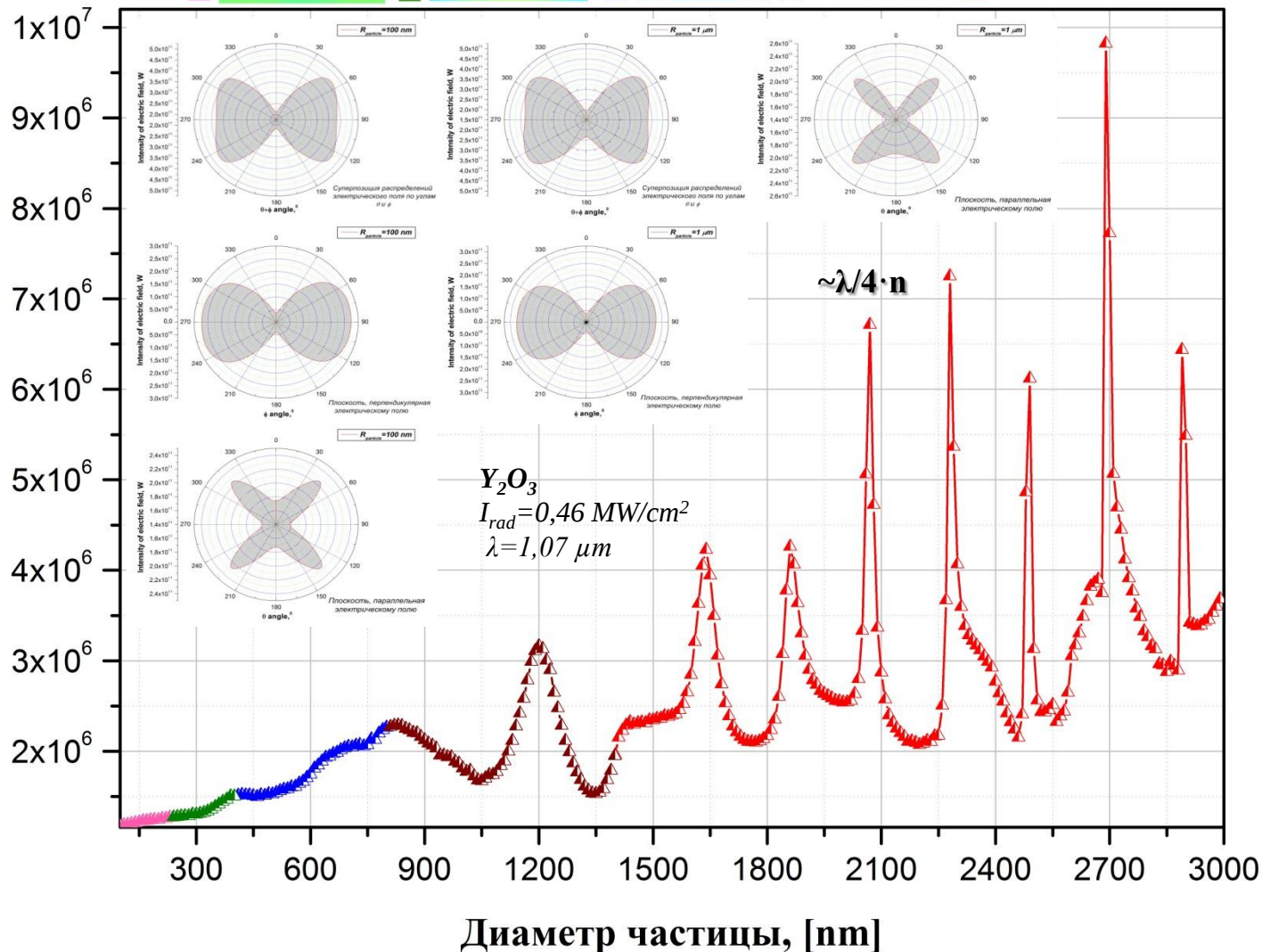


Конфигурация электрического поля сильно зависит от показателя преломления материала

Зависимость максимальной интенсивности излучения от размера частицы

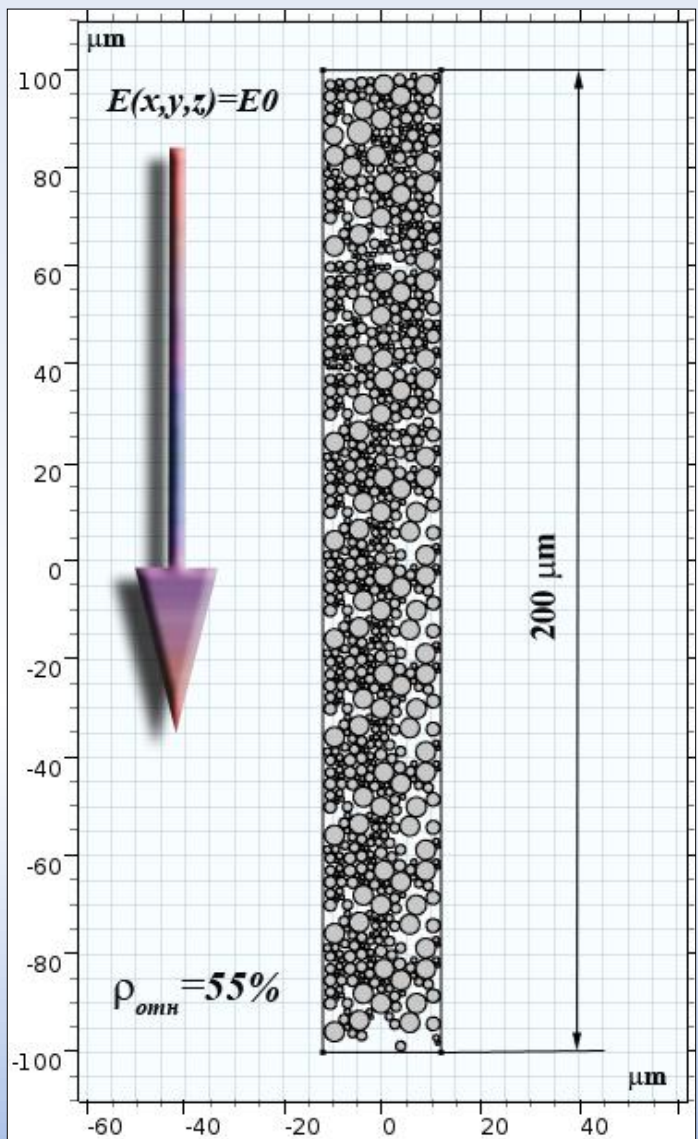
Шаг измерения по диаметру частицы – 10 nm, длина волны излучения - 1,07 μm

Максимальная интенсивность излучения, [W/cm^2]



Геометрия модели прессованной мишени

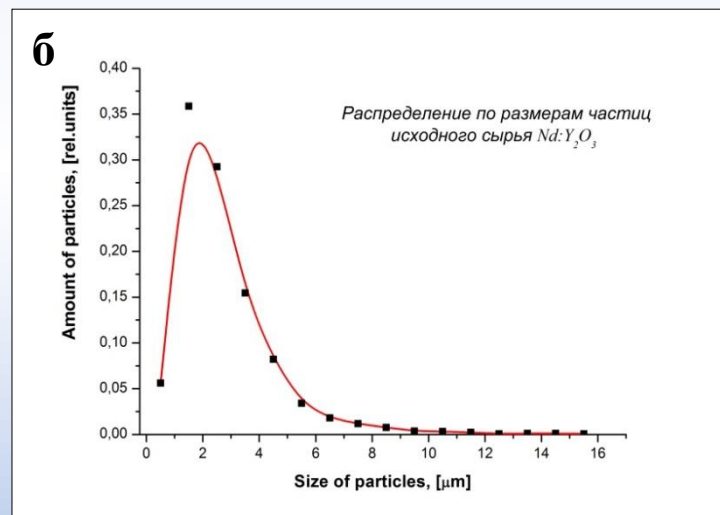
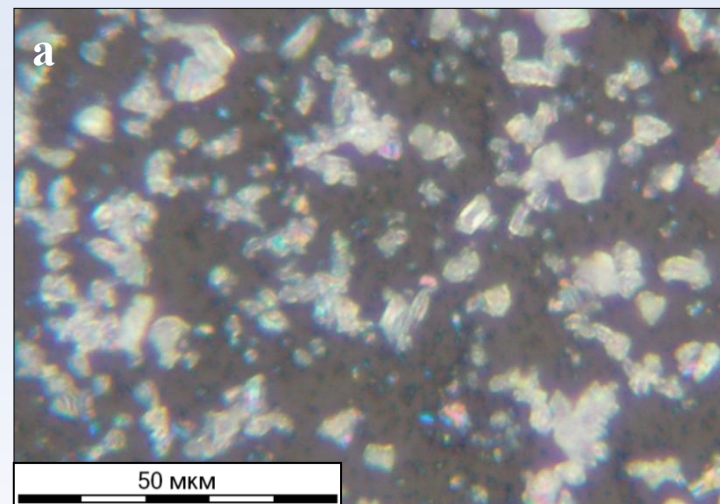
Электрическое поле в моделируемой задаче распространялось **вдоль оси Оу** в направлении, показанном на рисунке



*Расчётная модель,
являющаяся
аналогией
прессованной
мишени с
относительной
плотностью 55%,
испаряемой в
реальных
экспериментах*



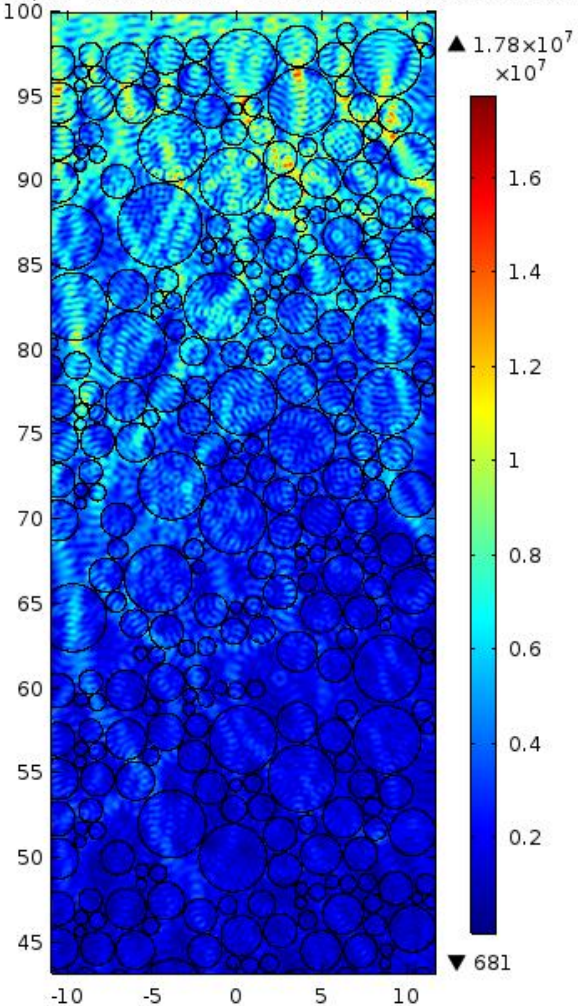
**В исходном
микронном
порошке
преобладают
частички с размерами
от 1,9 до 2,5 μm .**



Фотография исходного сырья Y_2O_3 (а) и
распределение его частиц по размерам (б)

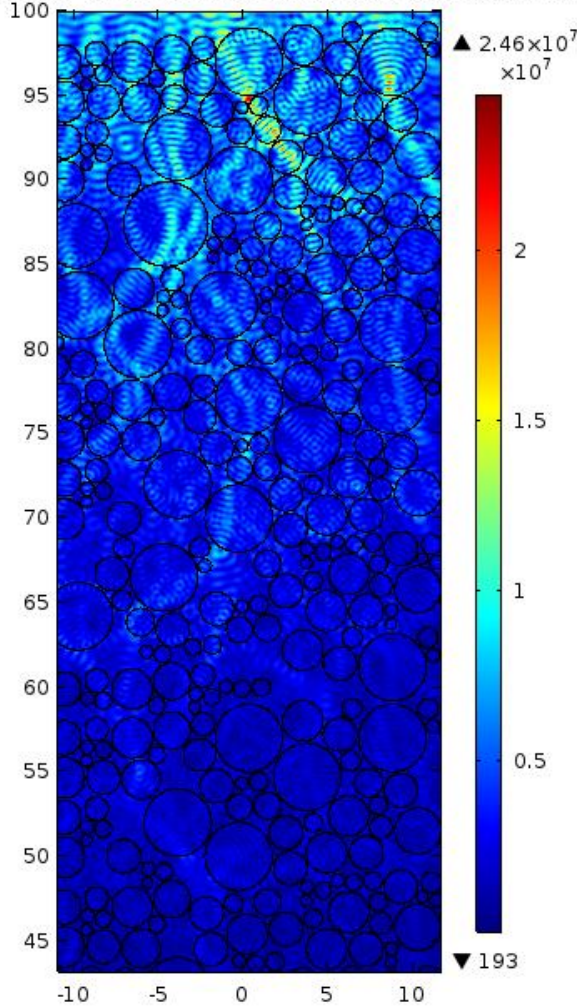
Картина распределения электрического поля

freq(1)=2.8018E14 Hz Surface: Electric field norm (V/m)



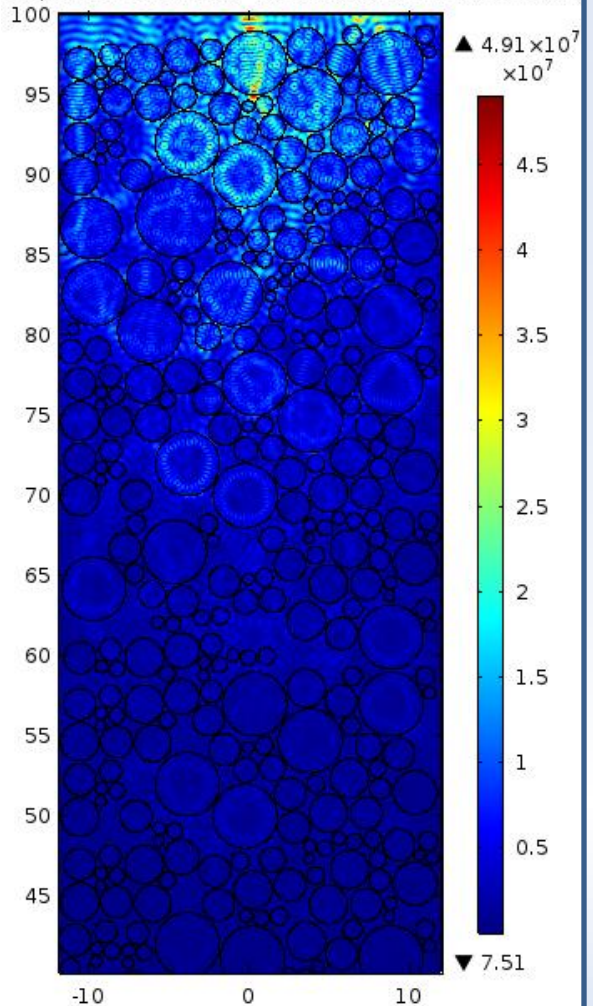
MgF_2

freq(1)=2.8018E14 Hz Surface: Electric field norm (V/m)



SiO_2

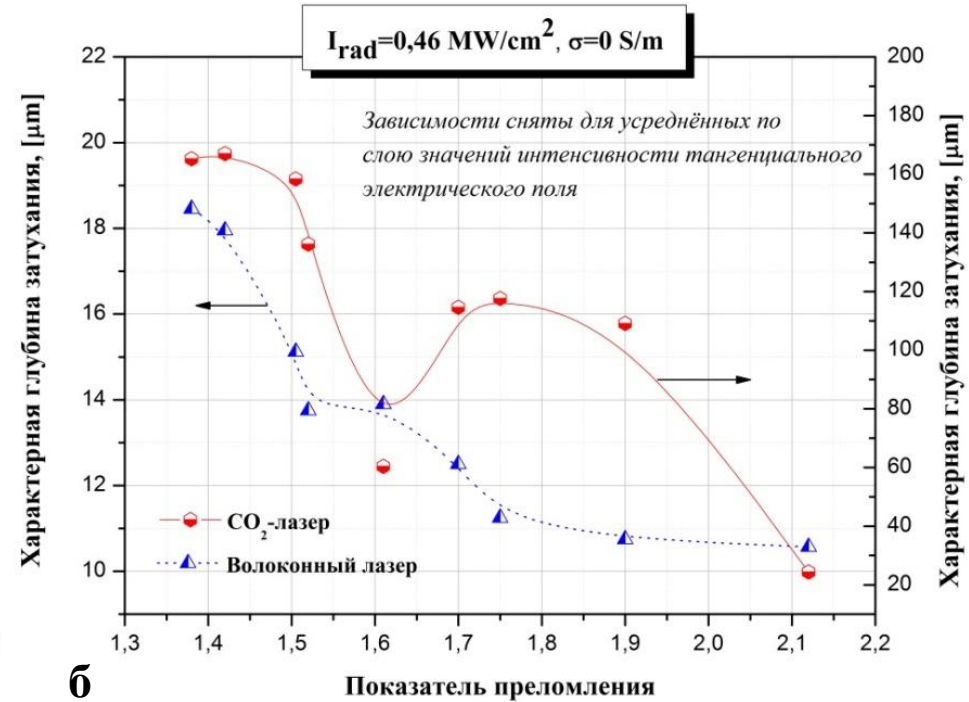
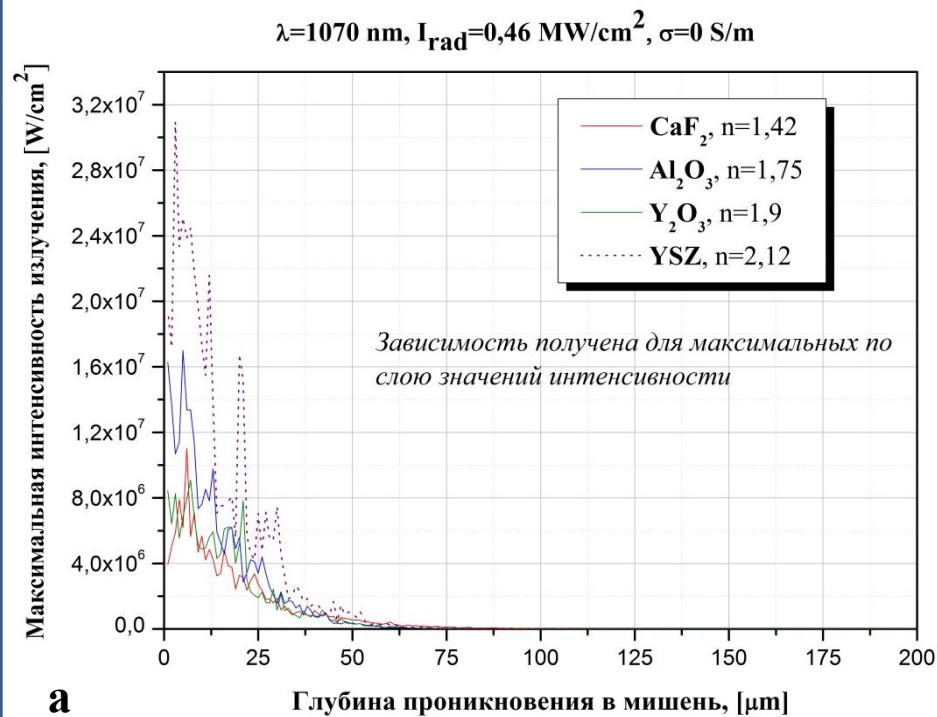
freq(1)=2.8018E14 Hz Surface: Electric field norm (V/m)



YSZ

Видно, что **с ростом показателя преломления материала растёт максимальная интенсивность излучения** и значительно меняется конфигурация электрического поля. *Эффект фокусировки и интерференция* рассеиваемого излучения приводят к **локальному усилению электрического поля на порядок (до 10^7 W/cm^2)**

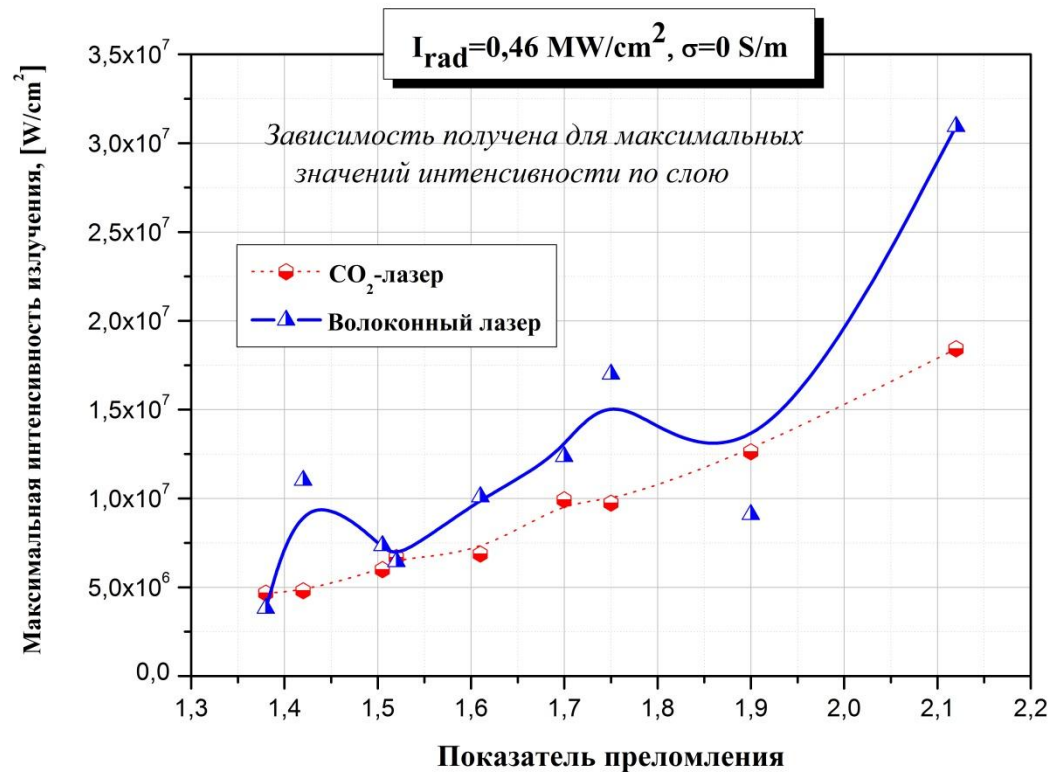
Распределение электрического поля по глубине и зависимость характерной глубины затухания от показателя преломления



Зависимости максимальной интенсивности излучения от глубины проникновения излучения волоконного лазера (а) и характерной глубины затухания излучения от показателя преломления материала (б)

Переход от случая рассеяния на одной частице к случаю прессованной мишени, несмотря на усреднение картины по интенсивности, не снимает наличия локальных максимумов!

Зависимость максимальной интенсивности излучения от показателя преломления материала



С ростом показателя преломления материала растёт максимальная интенсивность излучения и значительно меняется конфигурация электрического поля.

Эффект фокусировки и интерференция рассеиваемого излучения приводят к **локальному усилению электрического поля на порядок (до 10^7 W/cm^2)**

Относительная максимальная интенсивность лазерного излучения

Материал	MgF_2	CaF_2	BaF_2	SiO_2	BeO	MgAl_2O_4	Al_2O_3	Y_2O_3	YSZ
$I_{\text{max}}/I_{\text{rad}}$	n=1,38	n=1,42	n=1,505	n=1,54	n=1,61	n=1,7	n=1,75	n=1,9	n=2,12
CO_2 -лазер	0,58	1,54	1,17	0,98	1,53	1,87	2,58	1,38	4,69
Волоконный лазер	0,58	0,73	0,91	0,98	1,04	1,5	1,48	1,91	2,79

Выводы

- Основной вклад в снижение мощности излучения при получении нанопорошка может давать не поглощение, а рассеяние излучения.
- При рассеянии лазерного излучения на частицах прессованной мишени возникают локальные максимумы, интенсивность в которых на один-два порядка выше интенсивности падающего излучения ($0,46 \text{ MW/cm}^2$)
- Размер центра рассеяния сильно влияет на характер рассеяния излучения и значения интенсивности в локальных максимумах
- Источником разрушения мишени может быть не только поглощающий дефект внутри мишени, но и наличие локального максимума при выполнении условия резонанса.
- С ростом показателя преломления материала увеличивается интенсивность излучения в локальных максимумах
- Зная характерную глубину затухания излучения, мы можем судить о характере взаимодействия излучения с веществом и, руководствуясь конкретными значениями интенсивности в данной области, говорить о том или ином механизме разрушения мишени под действием лазерного излучения.