## ХХ Конференция молодых учёных ИЭФ УрО РАН



## Моделирование рассеяния излучения волоконного иттербиевого лазера в прозрачном порошке из Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и его последующего нагрева

Тихонов Е.В.

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

### Особенности получения нанопорошков CaF2 и 1%Nd:Y2O3

Параметр	Волоконный лазер (λ=1,07 μm)		СО <sub>2</sub> -лазер (λ=10,6 μm)	
	CaF <sub>2</sub>	$Nd:Y_2O_3$	CaF <sub>2</sub>	Nd:Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Производительность получения нанопорошка (Непрерывный режим)	0 g/h!	22 g/h	15 g/h	28 g/h
Показатель поглощения	1,3·10 <sup>-3</sup> cm <sup>-1</sup>	9·10 <sup>-3</sup> cm <sup>-1</sup>	0,31 cm <sup>-1</sup>	Непрозрачен
Показатель преломления	1,4289	1,9029	1,3110	1,6561
Средняя мощность излучения	~600 W		~600 W	

#### $\Phi$ отография мишени $CaF_2$



после испарения





## Полученные в 2017 г. результаты

#### Создана модель рассеяния лазерного излучения в прозрачном пористом диэлектрике. Основные полученные положения:



для $MgF_2$ 

В основе модели – волновое уравнение Гельмгольца  $\Delta E + k^2 \varepsilon_r E = 0$ 

- При рассеянии лазерного излучения на частицах прессованной мишени возникают локальные максимумы, интенсивность в которых на один-два порядка выше интенсивности падающего излучения (0,46 MW/cm<sup>2</sup>)
- Источником разрушения мишени может быть не только поглощающий дефект внутри мишени, но и наличие локального максимума при выполнении условия резонанса!

#### Получены ответы на вопросы:

1. Чем обусловлены различия в абляции материалов с близкими прозрачностями и теплофизическими свойствами?

2. Почему пороговые мощности абляции в пористых материалах на порядок ниже, чем в монокристаллах?

Цель работы:

11111

NNNNNN==

## Расширить созданную модель, дополнив её уравнением теплопроводности и рассчитать динамику нагрева прессованной мишени излучением волоконного лазера

=====

## Описание модели

Моделирование процессов рассеяния выполнялось при помощи программного пакета «COMSOL Multiphysics 5.3a»

Входные параметры модели

<u>Основные параметры излучения волоконного иттербиевого</u> <u>лазера ЛС-07Н</u>

 Плотность мощности излучения на мишени I
 0,46 MBt/cm²

 Размер лазерного пятна на поверхности мишени
 430 µm (400 mm)

 Режим работы лазера
 Непрерывный



<u>Непрерывный волоконный</u> иттербиевый лазер ЛС-07-Н

#### Описание модели

В основе разработанной модели лежит самосогласованное решение волнового уравнения Гельмгольца и уравнения теплопроводности в двумерной постановке

$$\begin{cases} \Delta E + k^2 \varepsilon_r E = \mathbf{0} \\ c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \left( \lambda(T) \nabla(T) \right) + Q_{ir} \end{cases}$$

Поглощение лазерного излучения служит источником тепла в уравнении теплопроводности. Объёмная плотность мощности определяется следующим образом:

$$Q_{in} = \alpha(T)I(x, y, t), \text{ cde } I(x, y, t)$$

определялось из рассчитанной структуры электромагнитного поля

#### Граничные условия задачи:

 $n \times E = n \times E_0$  Условие сохранения тангенциальной составляющей электрического поля на границе раздела воздух-среда

  $n \times (\nabla \times E) - jkn \times (E \times n) = 0$  Условие излучения Зоммерфельда, адаптированное для расчётной области конечного размера

**n** · **q** = **0** Тепловая изоляция границ расчётной области

## Моделируемый материал

#### В качестве материала для моделирования был выбран Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Причины:

- 1. Материал представляет интерес для получения нанопорошков методом лазерной абляции (является материалом для изготовления активных сред)
- 2. Данный материал широко известен, и потому для него существует большое количество справочных данных в частности, <u>температурная зависимость показателя поглощения</u>



#### Параметры Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, используемые в модели

Параметр	Значение	
Показатель преломления	1,75	
Теплопроводность	30 W/m·K	
Температура плавления	2317 К	
Относительная плотность	55%	

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

#### Карта распределения интенсивности электрического поля и температуры



t=2 μs

t=40 µs

Видно, что наиболее сильно нагреваются области, соответствующие локальным максимумам интенсивности излучения.

Развитая вследствие рассеяния Ми структура электромагнитного поля внутри частиц материала компенсируется теплопроводностью материала

Температура внутри частиц распределена достаточно однородно, тепло передаётся в местах соприкосновения частиц



## Сравнение распределения интенсивности электрического поля и температуры для случая монокристалла и прессованного порошка Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Зависимости сняты для момента времени t=10 µs



- **1.** Из-за рассеяния излучения усреднённая по слоям зависимость интенсивности для прессованного порошка быстро спадает с глубиной согласно закону Бугера  $\frac{\partial I}{\partial z} = \alpha(T) \cdot I_0$
- 2. Температурный профиль хорошо соответствует профилю интенсивности лазерного излучения, при этом наибольшая температура реализовывается в областях, соответствующим локальным максимумам интенсивности.

## Динамика нагрева прозрачной пористой мишени из Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



Перегиб зависимости изменения температуры во времени в момент ~30-35 µs соответствует нелинейному возрастанию зависимости показателя поглощения от температуры за счёт образования новых поглощающих дефектов при нагреве

# Эксперимент по определению времени задержки появления лазерного факела от прессованной мишени из Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



Схема экспериментального стенда для определения времени задержки появления лазерного факела

Осциллограмма импульса излучения волоконного лазера ЛС-07Н и свечения лазерного факела.

Длительность импульса излучения **1 мс** Мощность излучения **720 Вт** Задержка появления лазерного факела относительно начала импульса излучения **37 мкс** 

## Выводы

- 1) Разработана модель нагрева прессованной мишени излучением волоконного лазера, основанная на самосогласованном решении двумерных уравнений Гельмгольца и теплопроводности
- 2) Созданная модель позволила объяснить механизм появления лазерного факела в прозрачных материалах на примере прессованного порошка из оксида алюминия. Показано, что возникающий при рассеянии излучения локальный максимум интенсивности, максимальная интенсивность в котором имеет порядок 10<sup>7</sup> Вт/см<sup>2</sup>, является источником инициирования локального нагрева, и за счёт дальнейшего роста концентрации поглощающих дефектов– дальнейшего разрушения образца.
- Показано, что основная часть стадии нагрева, предшевствующая испарению, приходится на нагрев мишени до Т≈1500 К, что соответствует началу резкого роста температурной зависимости показателя поглощения.
- 4) Результаты расчётов неплохо согласуются с экспериментальными данными по получению нанопорошка из прозрачной прессованной мишени Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

# Спасибо за внимание!

Докладчик выражает благодарность заведующему лабораторией **В.В. Осипову, В.В. Лисенкову, В.В. Платонову** и **В.И. Соломонову** за полезное обсуждение результатов.

