



РОСАТОМ

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

Экспериментальные исследования на лазерной установке «Луч» генерации сильных ударных волн в мишенях с использованием «ударников»

Белов И.А., Бельков С.А., Воронин А.Ю., Воронич И.Н., Головкин С.Ю., Деркач В.Н., Душина Л.А., Изгородин В.М., Митрофанов Е.И., Стародубцев К.В.

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», ИЛФИ

Преимущества:

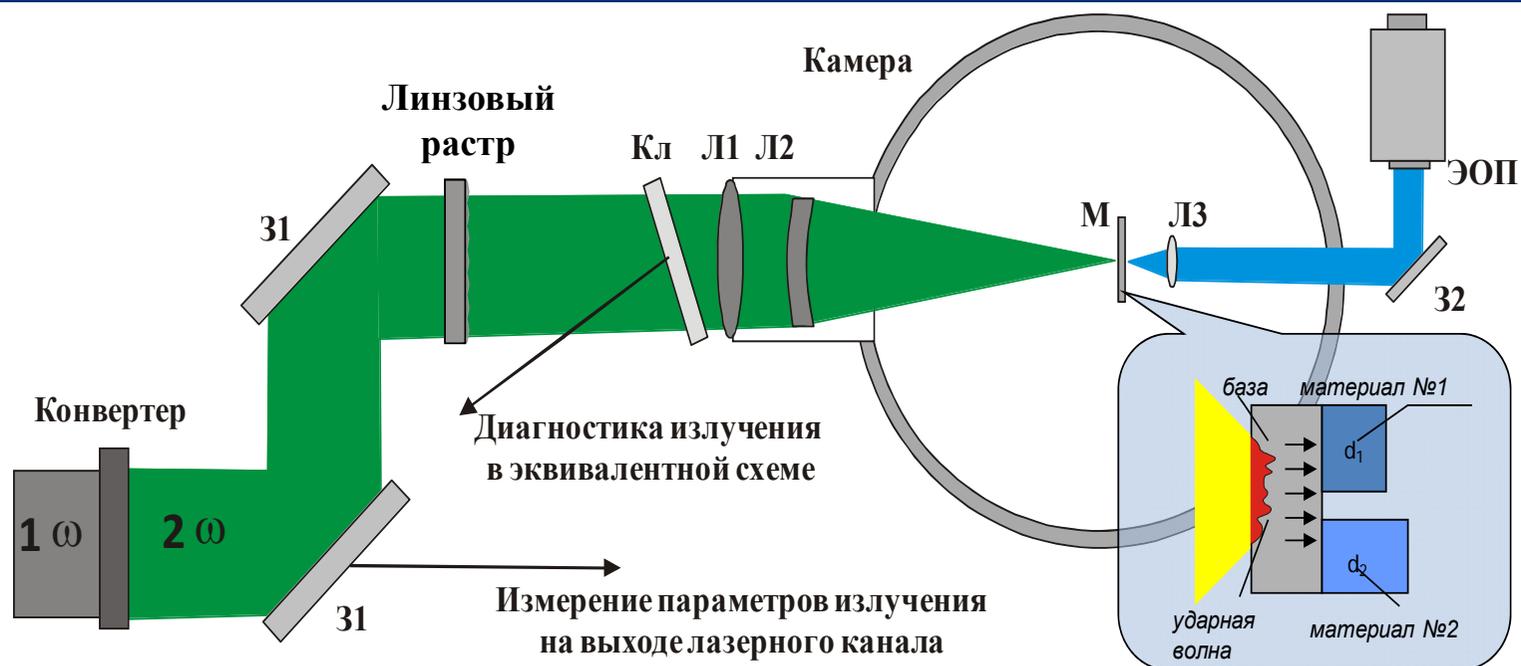
- Диапазон развиваемых давлений составляет 1-100 Мбар, который перекрывает условия, создаваемые взрывчатыми веществами, легкогазовыми пушками, электродинамическими ускорителями, пучками релятивистских ионов, подземными ядерными взрывами
- Возможность многократного повторения опытов при одних и тех же физических условиях
- Низкая, по сравнению с взрывными, стоимость экспериментов

Проблема:

Параметрические неустойчивости и генерация высокоэнергетичных электронов ограничивают подводимую интенсивность лазерного излучения

Решение:

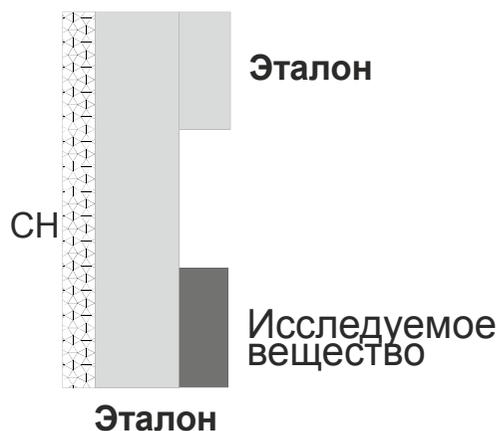
Предложен способ генерации сильных УВ с использованием специальной мишени, где ударное возмущение создается дистанционно размещенным «ударником»



Лазерные параметры:

- длина волны 0,527 мкм;
- энергия до 500Дж;
- длительность импульса 1,8 нс;
- контраст $>10^7$;
- интенсивность до $1,7 \cdot 10^{14}$ Вт/см²

- размер пучка на мишени 600x300 мкм²
- однородная область 360x180 мкм²
- неоднородность пиковая $<7\%$;
- неоднородность среднеквадрат. $<2\%$



Основные типы мишеней и их параметры:

- Ступенчатые, для исследования ударной сжимаемости веществ
- С использованием пенных абляторов, малоплотных абляторов, «ударников» для гидродинамического приращения давления

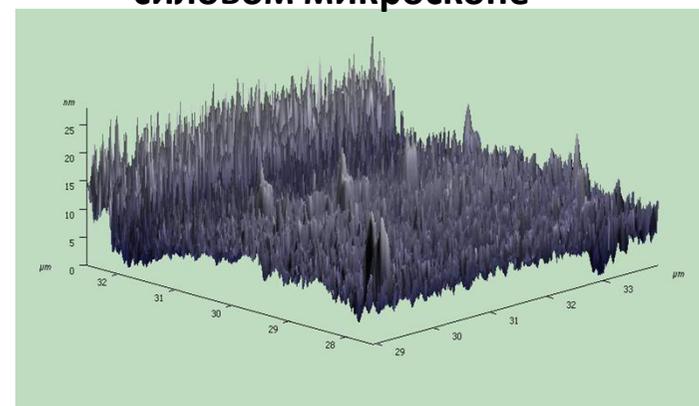
Толщина базы – до 100 мм

Высота ступеней – до 20 мм

Точность измерения <math><0.5\text{ мм}</math>

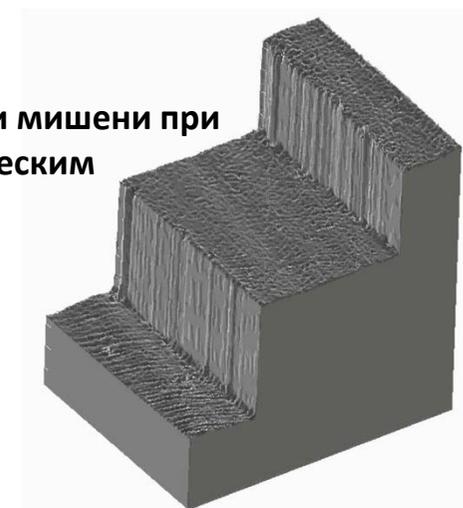
Материалы : Al,Cu,Pb,Au,CH, пены...

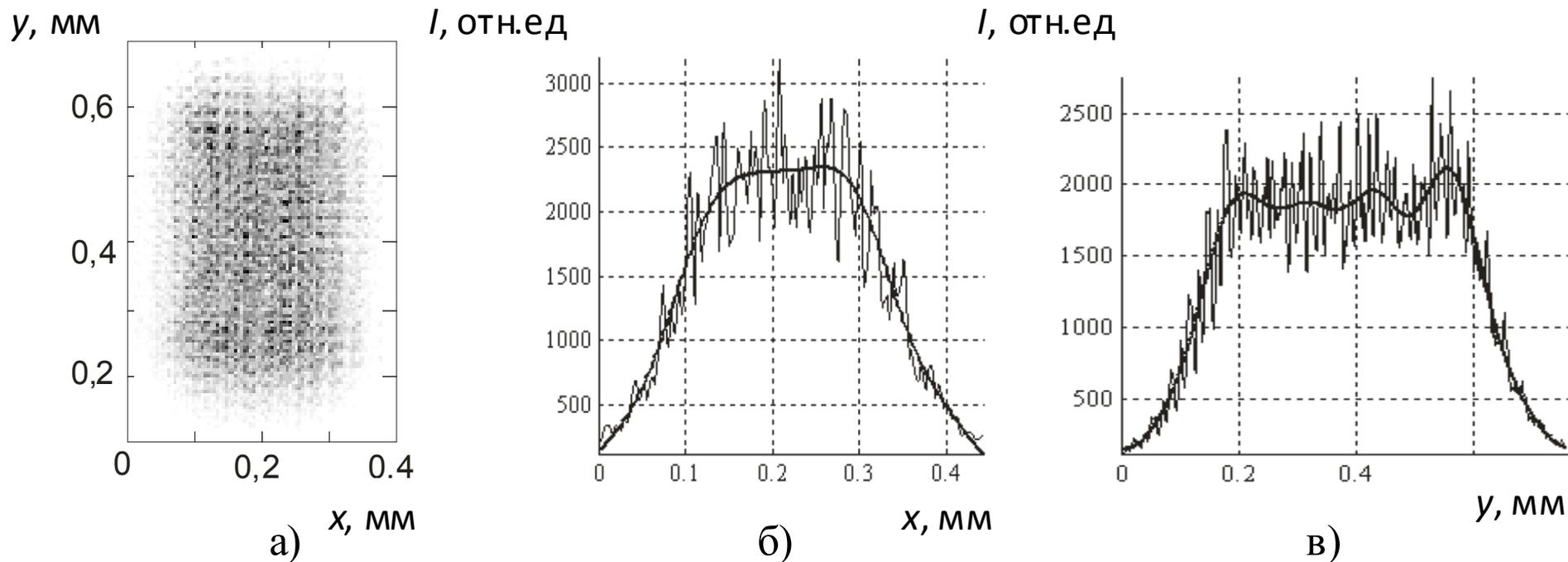
Рельеф поверхности в атомно-силовом микроскопе



Cu, статистика шероховатости поверхности, Оценка RMS: 10 нм по высоте

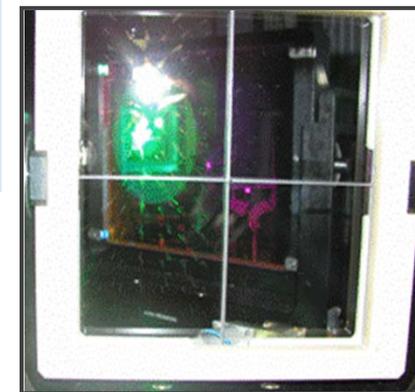
Профиль поверхности мишени при паспортизации оптическим профилометром



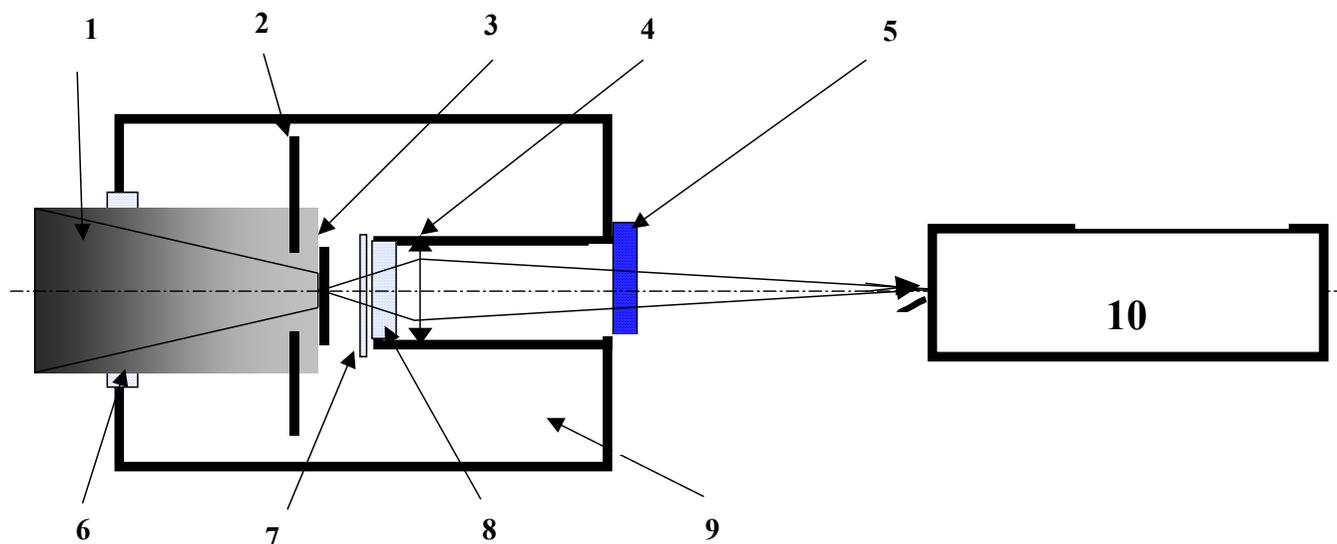


Неоднородность огибающей распределения интенсивности с учетом усреднения по масштабам ≤ 30 мкм, составляет: $<7\%$ по пиковому значению и около 2% по среднеквадратическому

- а) пятно облучения
- б) сечение пятна в горизонтальном направлении
- в) сечение пятна в вертикальном направлении



Оптическая схема регистрации люминесценции ударной волны



1 – лазерное излучение; 2 – бленда;
3 – мишень; 4 – объектив «Юпитер-13»;
5 – светофильтры; 6 – входное окно; 7 –
защитная пластина; 8 – вакуумное
окно; 9 – камера взаимодействия; 10 –
фотохронограф.

Основные характеристики фотохронографа:

- Запуск излучением в схеме реверсера
- Нестабильность запуска ± 100 пс
- Временное разрешение < 10 пс
- Пространственное разрешение < 10 мкм
- Чувствительность метода 0,8-40 эВ
- Динамический диапазон > 400

1. Увеличение энергетики и интенсивности облучения мишени: развитие параметрических неустойчивостей

↓
изменение термодинамического состояния мишени

↓
увеличение толщин мишеней

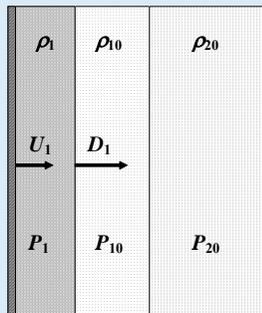
↙ ↘
для исключения предпрогрева

увеличение пятна облучения
для сохранения одномерности УВ

увеличение длительности облучения
для поддержания стационарности УВ

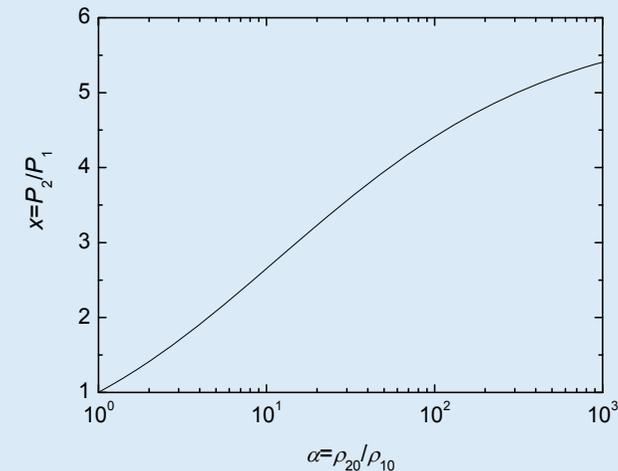
↙ ↘
снижение интенсивности облучения

2. Увеличение давления на распаде разрыва



$$\sqrt{\frac{x}{\alpha}} = 1 - \frac{x-1}{\sqrt{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}x+1}}$$

$$x = \frac{P_2}{P_1}; \alpha = \frac{\rho_{20}}{\rho_{10}}; \gamma = 5/3$$

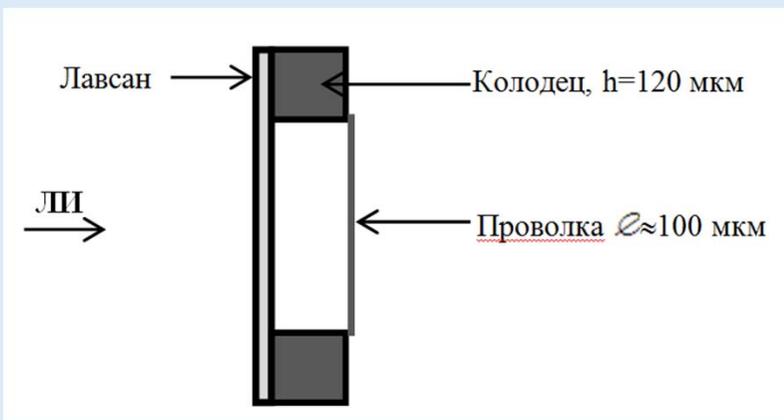


3. Увеличение давления с использованием мишеней «ударников»

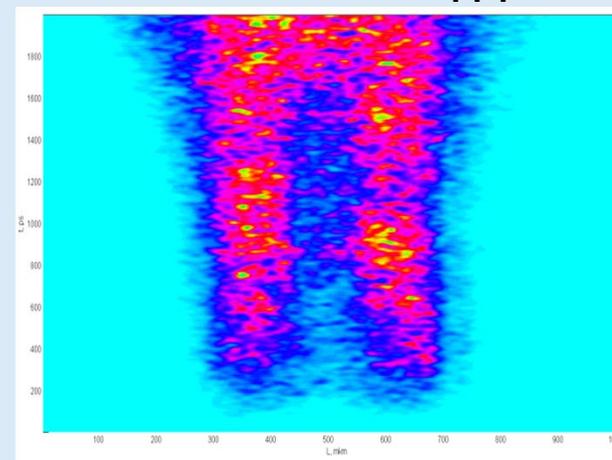
Результаты проведенных опытов: эксперимент по регистрации скорости ударника, эксперимент по определению одномерности УВ в мишенях «ударниках»



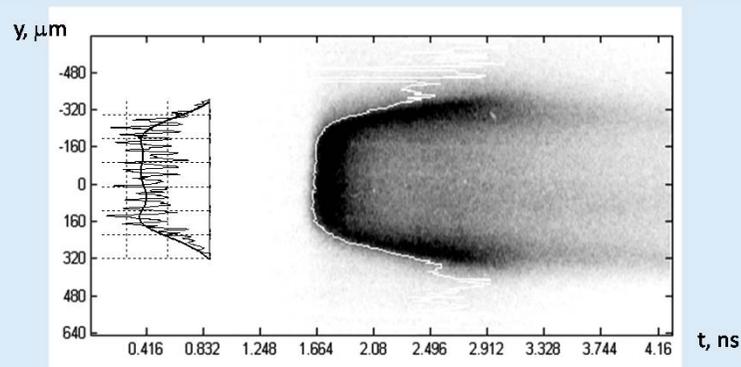
Эскиз мишени



Регистрация свечения ударника при полете в «колодце»



Регистрация сигнала свечения УВ в эксперименте с «ударником» и плоской мишенью

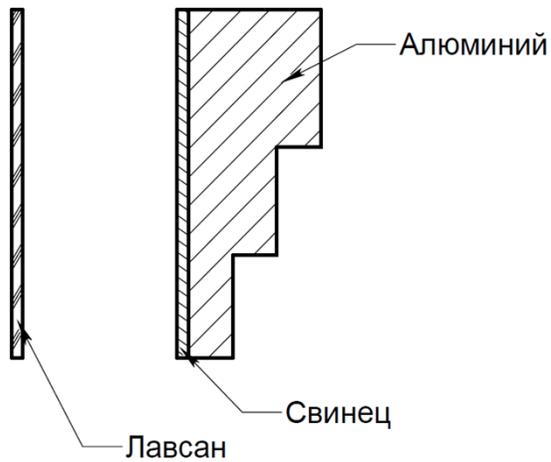


- Скорость ударника 100 ± 20 км/с
- Неодновременность выхода УВ из плоской мишени < 20 пс

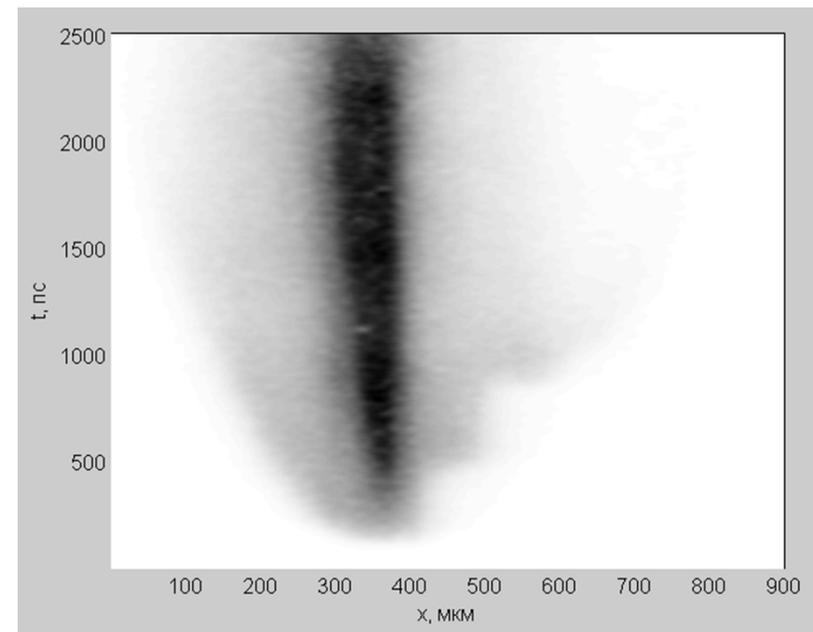
Результаты проведенных опытов: эксперименты по увеличению давления



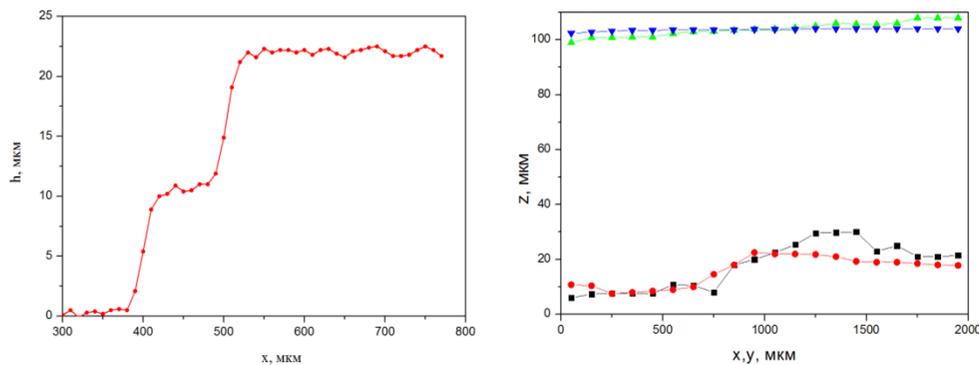
Эскиз мишени



Регистрация свечения УВ в эксперименте



профиль основной мишени, взаимное расположение «ударника» и основной мишени

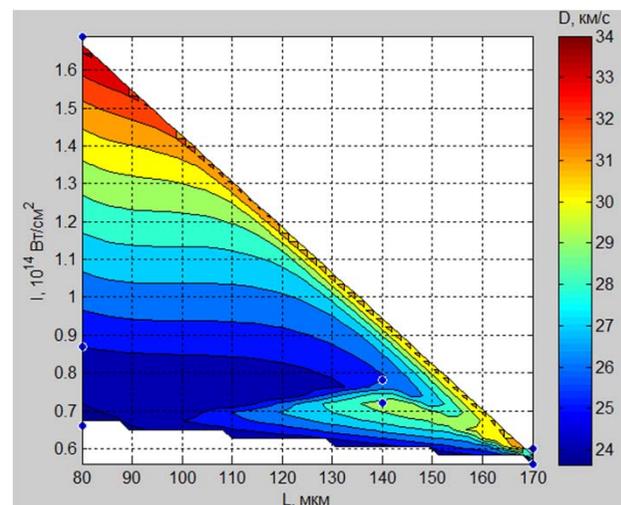
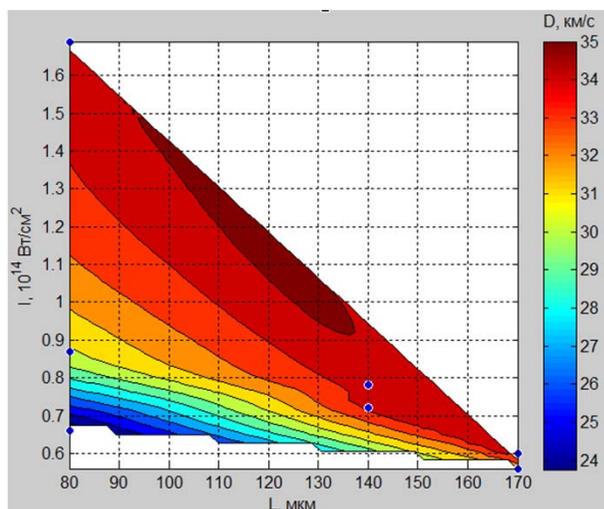


Результаты проведенных опытов: эксперименты по увеличению давления



| № опыта | L, мкм | W, Дж | $I_{2\omega}$, 10^{14} Вт/см ² | Δt_1 , нс | h_1 , мкм | Δt_2 , нс | h_2 , мкм | D_1 , км/с | D_2 , км/с |
|---------|--------|-------|--|-------------------|-------------|-------------------|-------------|--------------|--------------|
| 1 | 80 | 240 | 0,66 | 0,45±0,02 | 10,5±0,3 | 0,46±0,02 | 10,8±0,5 | 23,3±1,2 | 23,5±1,5 |
| 2 | 80 | 315 | 0,87 | 0,34±0,02 | 10,5±0,2 | 0,42±0,02 | 10,5±0,7 | 30,9±1,9 | 25±2,0 |
| 3 | 140 | 261 | 0,72 | 0,31±0,02 | 10,6±0,2 | 0,39±0,02 | 11,5±0,4 | 34,2±2,3 | 29,5±1,8 |
| 4 | 140 | 280 | 0,78 | 0,32±0,02 | 11,0±0,4 | 0,43±0,02 | 11,1±0,4 | 34,4±2,5 | 25,8±1,5 |
| 5 | 170 | 201 | 0,56 | 0,32±0,02 | 10,3±0,2 | 0,43±0,02 | 10,8±0,4 | 32,2±2,1 | 25,1±1,5 |
| 6 | 170 | 215 | 0,60 | 0,30±0,02 | 10,3±0,2 | 0,34±0,02 | 10,9±0,4 | 34,3±2,4 | 32,1±2,2 |
| 7 | 80 | 610* | 1,68 | 0,30±0,02 | 10,5±0,2 | 0,33±0,02 | 11,5±0,2 | 35,0±2,4 | 34,8±2,2 |

L- расстояние от основной мишени до ударника, W – энергия излучения в опыте, $I_{2\omega}$ - интенсивность излучения, подводимого к мишени, h_1 - высота первой ступни, Δt_1 - время распространения УВ по первой ступени, h_2 - высота второй ступни, Δt_2 - время распространения УВ по второй ступени, D_1 - скорость УВ в первой ступени, D_2 - скорость УВ во второй ступени. *- значение приведено оценочно.



Зависимость скорости УВ в ступенях от интенсивности облучения и удаления ударника от основной мишени в первой ступени и во второй ступени

- Измерена скорость ударника, составившая $\approx 100 \pm 20$ км/с.
- Проведены эксперименты по ударному сжатию алюминия с использованием специальных «мишеней-ударников». Получена стационарная ударная волна на толщинах от 10 до 30 мкм от фронтальной стороны Al мишени при удалении ударника относительно основной мишени, составившем от 80 до 100 мкм.
- Для алюминия получена скорость УВ до 35 км/с и давление до 25 Мбар, при идентичных интенсивностях облучения для обычных мишеней получены скорости УВ до 25 км/с и давления до 10 Мбар.
- Использование специальных «мишеней - ударников» обеспечило увеличение давления в 2,5 раза при той же вложенной в мишень энергии импульсного излучения.
- В дальнейшем предлагается провести серию экспериментов для определения оптимального соотношения расположения ударника, профилем импульса облучения и подведенной к нему энергии с целью выявления условий стационарности УВ.