

## Отчет 2015 по проекту РФФИ 15-52-45116

### Взаимодействие длинных и коротких интенсивных лазерных импульсов с малоплотными пенами для получения эффективных рентгеновских источников и гидродинамических исследований

Критическими задачами планов первого года работы над совместным проектом являлась разработка мишеней, соответствующих разрабатываемой лазерной конфигурации и диагностикам, подготавливаемыми в индийской лаборатории коллабораторами, для проведения в дальнейшем лазерных экспериментов по взаимодействию длинных и коротких лазерных импульсов с малоплотными веществами, для краткости называемыми пенами.

В 2015- первом году работы над проектом, были проведены исследования по созданию и измерению параметров мишеней, подходящих для сравнительно невысокой энергии лазера в BARC, и получены следующие результаты:

1. Для опытов по оптимизации выхода рентгеновского излучения из малоплотных пенных мишеней разработана методика производства малоплотных слоев Au разной плотности, при этом части слоя на подложке вновь возвращалась форма плотного золота в виде пленки для сравнительных экспериментов с объемным и с локализованным в виде фольги распределением тяжелого металла.

2. Для имеющихся энергий лазеров совершен переход от компоновки малоплотного слоя Au на пластины к расположению слоя золота на тонкой полимерной пленке с гладкостью 0,2 мкм (rms по сантиметровой поверхности)

3. Для изучения сглаживания спектров лазерного излучения по профилю за счет взаимодействия с малоплотной пеной было желание получить очень тонкие слои малоплотных веществ и соответствующие им сплошные пленки. Для этого опробовано получение на твердотельных подложках для микроэлектроники при магнетронном напылении (с управлением толщиной) слоя в пределах до 2000 ангстрем и соответствующего осаждения малоплотного слоя 1/200-/300 плотности сплошного вещества в пределах толщин 20-50 микрометров.

4. Серия образцов металлических (золото и висмут) наночастиц в форме наноснега на поверхности полимерной подложки или металлической фольги изготавливалась одновременно со свидетелями

процесса нанесения, которые впоследствии были использованы для разрушающего контроля каждого индивидуального образца разработанной для эксперимента пены.

5. Для оценок сравнительных экспериментов по эмиссии электронов и ионов из малоплотных мишеней выполнены расчеты стохастического ускорения электронов в лазерном поле при случайном изменении фазы. Получены характерные неравновесные распределения электронов по энергиям для потоков от  $10^{15}$ - $10^{17}$  Вт/см<sup>2</sup>.

6. Для характеристики слоев нано-снега, а также полимерных слоев разной плотности свыше 50 мг/см<sup>3</sup> в нестандартном режиме микрорадиографии адаптирован рентгеновский микротомограф SkyScan 1074. Точные измерения параметров нано-снега во внутренних полостях индивидуальных образцов выполнялись методом свидетелей: на графитовых стержнях стандартной толщины 0,5 мм, помещенных при производстве мишеней рядом в одинаковые условия осаждения, слой нано-снега на верхнем полированном торце получается идентичным слою мишени. Разработана процедура аппроксимации срезов микрорадиограммы эллиптическими слоями, причем поверхности считались концентрическими. Анализ данных проводился с помощью созданного нами под эту задачу программного обеспечения. Трехмерный анализ свидетелей проводился с помощью томографа SkyScan 1174. Калибровка осуществлена разрушающими образец методами: исследование толстых и тонких срезов пен, отделенных от подложек верифицировала установленную процедуру измерения.

7. Измерениями параметров слоев обнаружен эффект плавного изменения плотности в некоторых режимах формирования малоплотного слоя. Получены слои дейтерированного полиэтилена нескольких плотностей. С использованными в последние годы методиками не удавалось делать полимерные пены плотности более 20 мг/см<sup>3</sup>, сейчас это ограничение снято.

8. Выбраны и согласованы с коллаборатором лазерная и диагностическая схемы ближайших лазерных экспериментов в BARC, запланированных на апрель 2016.

Таким образом, работа выполнена в соответствии с совместно разработанными планами, несмотря на то, что планирование индийской стороной рассчитано на 2 года ровно с апреля 2015 по апрель 2017 с тем, чтобы общее время работ действительно составляло 2 года.

## Материалы и мишени.

### Ультрадисперсные порошки (УДП) металлов

Путём использования испарителя специальной формы удалось снизить средний размер частиц нанопорошка золота с  $\sim 50-100$  нм в предыдущих опытах до 20-40 нм при толщине слоя 100 мкм и более. Получены слои из ультрадисперсного порошка (УДП) в 300 мкм.

При толщине слоя до 50 мкм возможно достичь средний размер частиц до 10-25 нм и среднюю плотность до  $1/350$  от плотности исходного вещества.

Разработана технология упрочнения слоя при ступенчатом повышении температуры. После проведенных операций слой становится более прочным и не боится перемещений и резких толчков. Таким образом, можно предположить, что слой не разрушится при манипуляциях с мишенью и при установке ее в вакуумной камере.

Получены образцы со слоем УДП Au плотностью  $\sim 1/250$  от плотности сплошного вещества с толщиной слоя 150 мкм на полимерной пленке толщиной 0.4 мкм, закрепленной на металлических держателях.

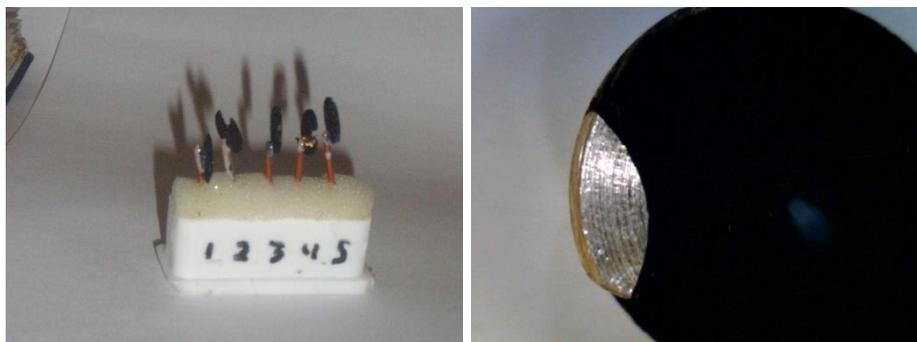


Рисунок. Слева – мишенные образцы со слоем УДП из золота. Справа – Слой УДП золота, нанесенный на неровную подложку. Верхняя поверхность малоугольного слоя ровная и не воспроизводит шероховатости подложки.

Получены образцы со слоем УДП Vi плотностью  $1/60$  до  $1/200$  плотности сплошного вещества. Образцы получены в среде Ar-He при разной температуре окружающей среды.

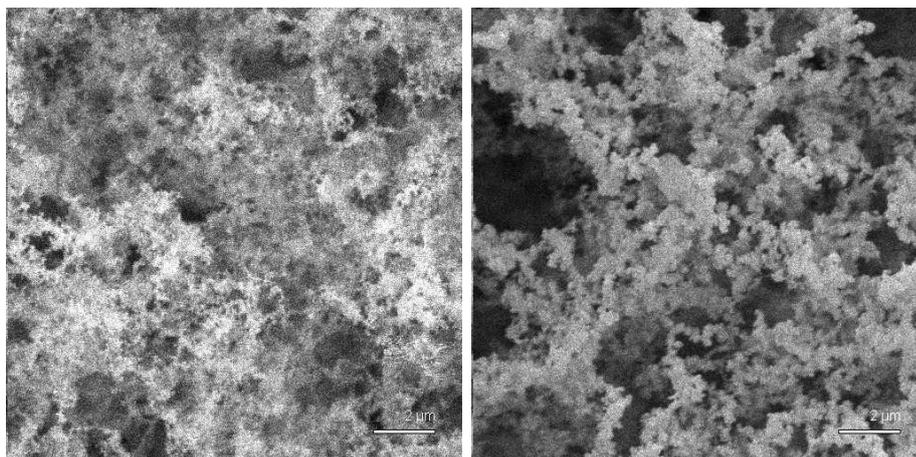


Рисунок. СЭМ изображения УДП висмута разной плотности. Масштаб слева – 10 мкм, справа – 2 мкм.

Для получения пары слоев (более плотного и менее плотного) применялось прессование слоев УДП золота, полученных при одном напылении. Спрессованные образцы выглядят как сплошное золото, что показывает чистоту напыленного порошка.

Спрессованные слои имеют плотность до 30% от плотности сплошного вещества.

В отличие от спекания УДП, при сжатии не увеличивается размеры структурных элементов.



Рисунок. Слева - УДП золота. В центре и справа – спрессованный УДП золота с давлением около 300 бар.

### **Полимерные материалы**

На сканирующем электронном микроскопе исследовались торцы сломов полимерных пленок.

На изображениях ниже видно, что внутренняя структура материала внутри толстых пленок имеет включения, неоднородности и пузыри. Такая структура создаст при применении в мишенях неконтролируемые неоднородности в лазерной плазме.

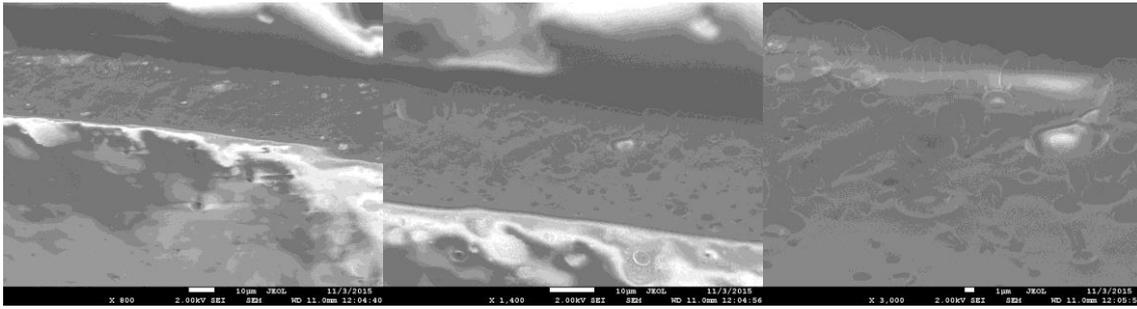


Рисунок. Изображение торца полимерной пленки с внутренними дефектами

На верхней поверхности пленки практически не наблюдается дефектов, в то время как нижняя поверхность сильно неровная из-за технологического процесса. Ведется работа по получению пленок с одинаковыми свойствами поверхностей.

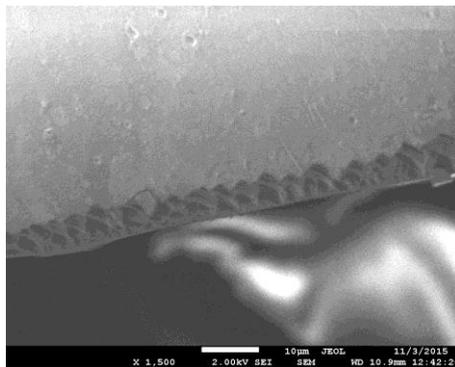


Рисунок. Изображение торца полимерной пленки без видимых дефектов

Разные участки сломов пленок отличаются по своему виду. Считаем, что на это влияет неравномерность полимерной структуры по площади образца. Необходимы дальнейшие улучшения методики производства, чтобы исключить разницу в свойствах материала в разных геометрических точках.

Тонкие полимерные пленки из нитроцеллюлозы изготавливаются для использования в качестве легкой подложки для других мишеных материалов.

Изучена гладкость поверхности пленки из нитроцеллюлозы, которая используется в качестве тонкой и легкой подложки для тонких и малоплотных слоев металла. Измерения проводились на оптическом профилометре Zygo NewView с объективом 20X.

Среднеквадратичное отклонение высоты поверхности составило менее 0,5 мкм, что удовлетворяет качеству для планируемых лазерных экспериментов.

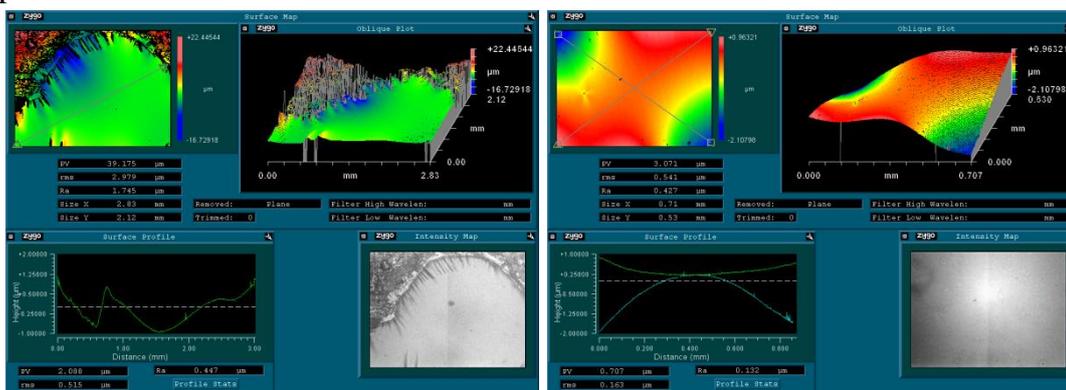


Рисунок. Изображение поверхности пленки из нитроцеллюлозы

Изготовлены и исследованы плоские образцы из дейтерированного полиэтилена.

Образцы с толщиной 150-200 мкм имеют плотность около 0,3 г/см<sup>3</sup> и может варьироваться от 0,06 г/см<sup>3</sup> до 1,06 г/см<sup>3</sup> (полноплотный материал).

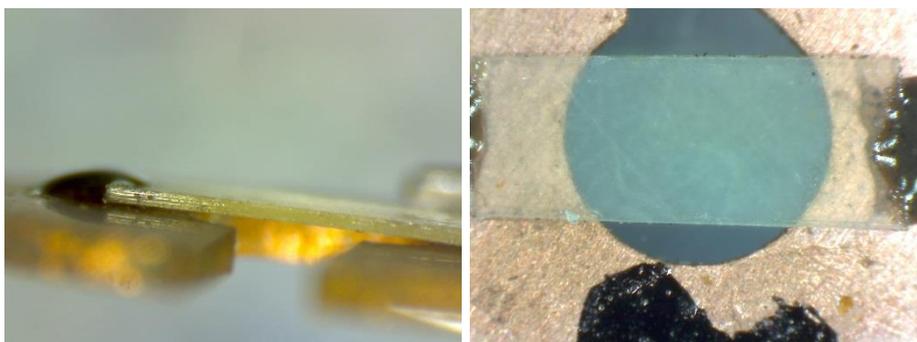


Рисунок. Полоса из дейтерированного полиэтилена наклеенная на металлическую шайбу.

### Ускорение электронов

В примененной модели ускорения стохастических электронов [1] движение электронов провоцируется скачками фазы мощного электромагнитного поля. Такое случайное изменение фазы может быть вызвано неоднородностями и спекл-структурой лазерного пучка, либо неоднородностями плазмы, образующейся при облучении малоплотных микроструктурированных мишеней со случайным распределением структурных элементов.

Начаты работы по созданию малоплотных металлических слоев, которые могли бы выступить источником мелкомасштабных неоднородностей в плазме. В соответствии с рассчитанной моделью должны

образоваться высокоэнергетичные электроны, с энергией превышающий среднюю температуру плазмы.

[1] Крыленко, Ю. В., Михайлов, Ю. А., Орехов, А. С., Склизков, Г. В., Филиппов, А. А. ЗАВИСИМОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ СТОХАСТИЧЕСКИ НАГРЕВАЕМЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ОТ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МИШЕНИ. *Краткие сообщения по физике*, №10 (2010), стр. 46-54.

### Экспериментальная схема

Схема экспериментальной установки приведена ниже.

Лазерный пучок может иметь следующие параметры энергия/длительность: 1 Дж/8 нс, 30 Дж/300-900 пс, 1 Дж/1 пс.

Имеются следующие диагностики: двухкадровая система регистрации теневых картин с подсветкой излучением второй гармоники, электронно-оптические камеры видимого и рентгеновского диапазонов, рентгеновский спектрометр с ПЗС-камерой, 5 каналов рентгеновских диодов, набор ионных коллекторов.

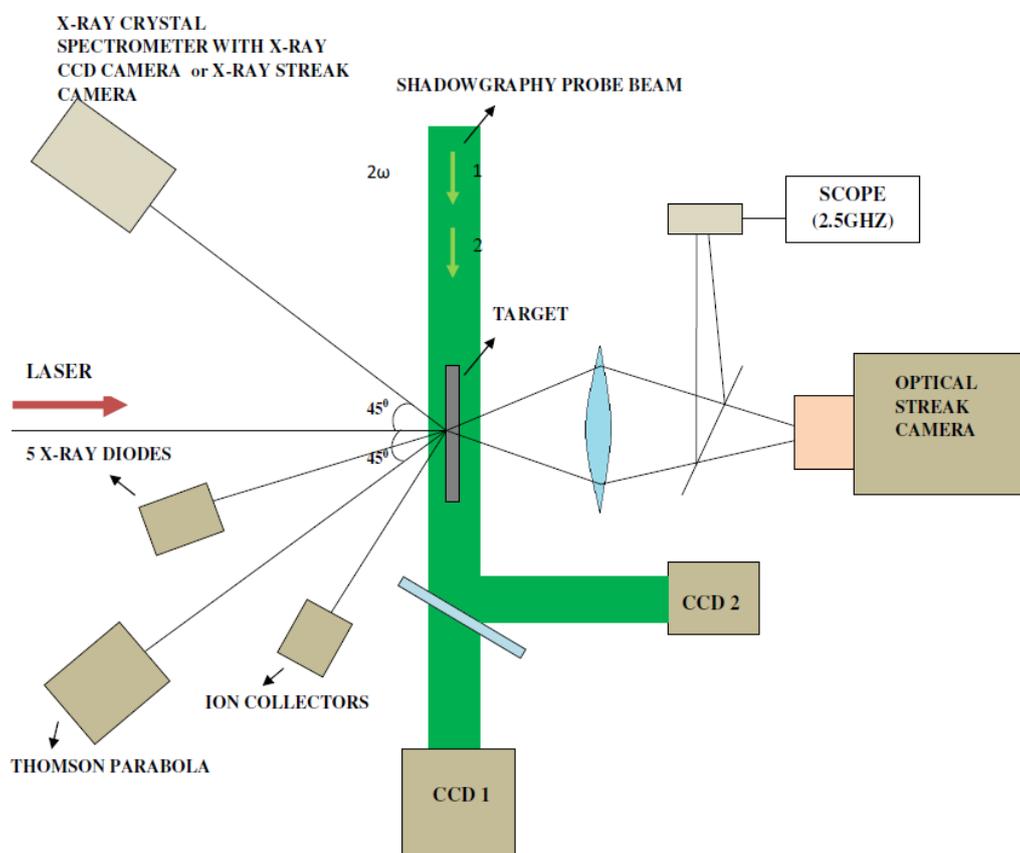


Рисунок. Схема экспериментальной лазерной установки.

## Заключение

В первом году работы над проектом были проведены исследования по созданию и измерению параметров мишеней, подходящих для сравнительно невысокой энергии лазера в BARC, и получены следующие результаты:

1. Для опытов по оптимизации выхода рентгеновского излучения из малоплотных пенных мишеней разработана методика производства малоплотных слоев Au различающейся плотности, при этом части слоя на подложке вновь возвращалась форма плотного золота в виде пленки для сравнительных экспериментов с объемным и с локализованным в виде фольги распределением тяжелого металла.
2. Для изучения сглаживания спеклов лазерного излучения по профилю за счет взаимодействия с малоплотной пеной было желание получить очень тонкие слои малоплотных веществ и соответствующие им сплошные пленки. Для этого опробовано получение на твердотельных подложках для микроэлектроники при магнетронном напылении (с управлением толщиной) слоя в пределах до 2000 ангстрем и соответствующего осаждения малоплотного слоя 1/200-/300 плотности сплошного вещества в пределах толщин 20-50 микрометров.
3. Серия образцов металлических (золото и висмут) наночастиц в форме наноснега на поверхности полимерной подложки или металлической фольги изготавливалась одновременно со свидетелями процесса нанесения, которые впоследствии были использованы для разрушающего контроля каждого индивидуального образца разработанной для эксперимента пены.
4. Для оценок сравнительных экспериментов по эмиссии электронов и ионов из малоплотных мишеней выполнены расчеты стохастического ускорения электронов в лазерном поле при случайном изменении фазы. Получены характерные неравновесные распределения электронов по энергиям для потоков от  $10^{15}$ - $10^{17}$  Вт/см<sup>2</sup>
5. Для характеристики слоев нано-снега в нестандартном режиме микрорадиографии адаптирован рентгеновский микротомограф SkyScan 1074. Точные измерения параметров нано-снега во внутренних полостях индивидуальных образцов выполнялись методом свидетелей: на графитовых стержнях стандартной толщины 0,5 мм, помещенных при производстве мишеней рядом в одинаковые

условия осаждения, слой нано-снега на верхнем полированном торце получается идентичным слою мишени. Разработана процедура аппроксимации срезов микрорадиограммы эллиптическими слоями, причем поверхности считались концентрическими. Анализ данных проводился с помощью созданного нами под эту задачу программного обеспечения. Трехмерный анализ свидетелей проводился с помощью томографа SkyScan 1174. Калибровка осуществлена разрушающими образец методами: исследование толстых и тонких срезов пен, отделенных от подложек верифицировала установленную процедуру измерения.

6. Измерениями параметров слоев обнаружен эффект плавного изменения плотности в некоторых режимах формирования малоплотного слоя.
7. Выбраны и согласованы с коллаборатором лазерная и диагностическая схемы ближайших лазерных экспериментов в BARC

Таким образом, планы и задачи 2015 года выполнены сполна