

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ СПЕКТРОСКОПИИ
Российской академии наук
(ИСАН)**

142190, г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, д. 5
Тел. +7 495 851 0579, факс +7 495 851 0886
isan@isan.troitsk.ru, www.isan.troitsk.ru

18.11.2016 № 11221-02-2171

На № _____

УТВЕРЖДАЮ

Директор

Федерального государственного
бюджетного учреждения науки

«Институт Спектроскопии РАН»

В.Н. Задков



_____ 2016 г.

Отзыв ведущей организации на диссертацию Цыгвинцева Ильи Павловича
«Трёхмерное моделирование коротковолнового источника излучения на основе
лазерной плазмы», представленную на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое
моделирование, численные методы и комплексы программ»

Троицк, Москва, 2016

Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа Цыгвинцева Ильи Павловича «Трёхмерное моделирование коротковолнового источника излучения на основе лазерной плазмы» посвящена построению трехмерной модели горячей плазмы, индуцируемой короткими субмикросекундными лазерными импульсами. Такая лазерная плазма в настоящее время представляет интерес с точки зрения, например, лазерного термоядерного синтеза, получения коротковолнового излучения в экстремальном ультрафиолетовом и мягком рентгеновском диапазоне, а также получения высокоэнергетических ионных пучков методом лазерного кильватерного ускорения.

Данная работа затрагивает моделирование лазерной плазмы олова, которую используют как источник экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) излучения с длиной волны 13,5 нм. Источник излучения с такой длиной волны используется в ЭУФ-литографии — одной из ключевых технологий производства кремниевых микросхем, которую предполагается использовать в технологических процессах от 16 нм и ниже. В современном промышленном источнике излучения ЭУФ-излучающая плазма создаётся лазерным импульсом CO₂-лазера, который фокусируется на оловянную каплю диаметром в несколько десятков микрон. Для того, чтобы повысить коэффициент преобразования лазерной энергии в энергию ЭУФ-излучения вблизи 13,5 нм, из капли формируют мишень так называемым предимпульсом. Предимпульс — это лазерный импульс более низкой энергии, предшествующий основному импульсу; он деформирует каплю, и она образует мишень более сложной формы. Взаимодействие лазерного излучения с веществом в обоих случаях (как в предимпульсе, так и в основном импульсе) является сложным процессом с большим количеством степеней свободы, и его корректное описание требует численного моделирования. Существует ряд моделей, в которых уравнения радиационной газовой динамики (РГД) решаются в двумерном пространстве; такие модели хорошо описывают взаимодействие лазерного излучения с веществом в случае осесимметричной геометрии. Очевидно, двумерные модели нельзя использовать для задач, в которых осевая симметрия отсутствует. В диссертации «Трёхмерное моделирование коротковолнового источника излучения на основе лазерной плазмы» описана разработка трехмерного РГД-кода, который подходит для описания взаимодействия лазерного излучения с веществом в трехмерной геометрии и может применяться для решения таких задач.

В свете вышесказанного, диссертационную работу Цыгвинцева Ильи Павлови-

ча «Трёхмерное моделирование коротковолнового источника излучения на основе лазерной плазмы», рассматривающая трёхмерное моделирование лазерной плазмы олова, используемой в источниках ЭУФ-излучения, можно считать актуальной. Содержание диссертации полностью соответствует специальности 05.13.18 - «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Научная и прикладная значимость диссертации

К научным результатам диссертации Цыгвинцева Ильи Павловича, имеющим фундаментальную значимость, можно отнести следующие:

- Создана гибридная модель распространения лазерного излучения в плазме, сочетающая методы геометрической и волновой оптики и корректно описывающая поглощение лазерного излучения на скачке диэлектрической проницаемости.
- Разработан трехмерный радиационный газодинамический код, основанный на классической полностью консервативной лагранжевой конечно-разностной схеме для уравнений РГД.
- С помощью разработанной модели исследованы различия в эволюции сферической оловянной мишени при облучении вдоль оси и при внеосевом облучении. В частности, при разлёте плазмы показано появление «струи» в направлении, «зеркальном» к направлению внеосевого импульса.

К практически значимым результатам диссертации Цыгвинцева И.П. относится применение разработанного трёхмерного кода для прикладных задач моделирования источника ЭУФ-излучения. Особое внимание в данной работе уделяется влиянию отклонений геометрии системы мишень+импульс от осесимметричной. Моделирование источника в трёхмерном пространстве даёт новые возможности исследования как формирования мишени предимпульсом, так и зажигания плазмы основным импульсом и, как следствие, управления коэффициентом конверсии и корпускулярными потоками.

Результаты диссертационной работы Цыгвинцева И.П. можно рекомендовать к использованию в ряде научно-исследовательских институтов - в Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН, Институте спектроскопии РАН, а также в ряде высокотехнологических компаний в России и за рубежом - в ISTEQ, ASML, IMEC, TNO,

Сумер, Gigaphoton, ЭУФ-Лабс, РнД-ИСАН. Кроме того, результаты данной диссертационной работы могут найти применение в учебном процессе в вузах и при подготовке специалистов в области математического моделирования физических процессов.

Апробация работы

Материалы диссертационной работы были опубликованы в 12 печатных работах, в том числе, в трёх публикациях в рецензируемых научных журналах. Также материалы диссертации докладывались на семи международных конференциях.

Основные замечания по диссертационной работе

1. В тексте диссертации отсутствуют подробности об уравнении состояния для олова. Из-за этого затруднительно понять, какие механизмы в модели отвечают за испарение олова и деформацию оловянной мишени.
2. В главе 3 проведён ряд проверок модели на аналитически решаемых задачах, однако нет ни одного сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными.

Данные замечания не являются принципиальными и не снижают общего качества представленной диссертационной работы.

Итоговое заключение

В диссертации Цыгвинцева Ильи Павловича «Трёхмерное моделирование коротковолнового источника излучения на основе лазерной плазмы» решена актуальная задача по разработке и применению трехмерной РГД-модели взаимодействия лазерного излучения с веществом в источнике экстремального ультрафиолетового излучения на основе оловянной плазмы для литографии нового поколения. Новые научные результаты, полученные диссертантом, имеют существенное значение для науки и практики.

Диссертационная работа Цыгвинцева И.П. удовлетворяет всем критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, согласно Постановлению Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 г.

Автор диссертации, Цыгвинцев Илья Павлович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Отзыв на диссертацию был обсужден на научном семинаре отдела атомной спектроскопии Института Спектроскопии РАН под руководством д.ф.-м.н. А.Н. Рябцева 15 ноября 2016 года.

Отзыв подготовил старший научный сотрудник сектора плазменных источников излучения отдела атомной спектроскопии Института Спектроскопии РАН, В. В. Медведев.

Старший научный сотрудник
сектора плазменных источников излучения
отдела атомной спектроскопии
Института Спектроскопии РАН
к.ф.-м.н.

В.В. Медведев

Заведующий отделом атомной спектроскопии,
Института Спектроскопии РАН
д.ф.-м.н.

А.Н. Рябцев

Подписи А.Н. Рябцева и В.В. Медведева заверяю
Ученый секретарь Института Спектроскопии РАН
к.ф.-м.н.

Е.Б. Перминов