

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ МЕДНЫМИ МИШЕНЯМИ

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF ABSORPTION OF FEMTOSECOND LASER PULSES BY SOLID COPPER TARGETS

Д. О. Замураев, А. В. Потанов, Д. С. Гаврилов, А. Л. Шамраев, А. С. Тищенко, В. Ю. Кузьминых, Н. А. Пхайко, В. Н. Горнов

A. V. Potapov, D. O. Zamuraev, D. S. Gavrilov, A. L. Shamraev, A. S. Tishchenko, V. U. Kouzminykh, N. A. Phaiko, V. N. Gornov

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е. И. Забабахина»

Federal nuclear center – All-Russian scientific research institute of technical physics
named after academician E. I. Zababakhin

Приведены результаты измерений коэффициентов отражения и диффузного рассеяния лазерного излучения с длиной волны 800 нм медной пленкой толщиной 1 мкм. Измерения проведены при длительности импульсов 50 фс в диапазоне интенсивностей $8 \cdot 10^{12} \dots 2 \cdot 10^{17}$ Вт/см² при нормальном падении. Облучение мишеней проводилось в вакуумной камере. Приведена оптическая схема эксперимента.

Проведение эксперимента в условиях вакуума позволило избежать влияния нелинейно-оптических эффектов на параметры взаимодействующего с мишенью лазерного излучения. Коэффициент диффузного рассеяния во всём исследованном диапазоне интенсивностей не превышал 0,01. При интенсивности на мишени $> 2 \cdot 10^{15}$ Вт/см² наблюдался рост коэффициента отражения, который может быть обусловлен эффектом «плазменного зеркала».

Results of experimental studies of reflection and diffuse scattering of 800-nm laser radiation by 1 μm thick copper film are reported. Measurements were performed at normal incidence for 50-fs pulse duration in the intensity range of $8 \cdot 10^{12} \dots 2 \cdot 10^{17}$ W/cm². The targets were irradiated in the vacuum chamber. The optical setup of the experiments is also presented.

Realization of experiments in vacuum conditions allowed to prevent the influence of atmospheric nonlinear optical effects on laser pulses interacting with the target. Coefficient of diffuse scattering did not exceed the value of 0.01 in the entire intensity range. For laser intensities $> 2 \cdot 10^{15}$ W/cm², the reflection increase was observed that may be explained by «plasma mirror» effect.

Изучение взаимодействия (поглощения, отражения) фемтосекундного лазерного излучения с металлической поверхностью как функции интенсивности, длины волны и длительности импульса несет важную информацию об электронных свойствах металла. Кроме того, понимание механизма поглощения лазерного излучения в металле важно во многих прикладных областях применения фемтосекундных импульсов, таких как микрообработка поверхности и лазерно-индуцированная взрывная спектроскопия.

В РФЯЦ-ВНИИТФ проводятся работы по численному моделированию процессов взаимодействия фемтосекундных лазерных импульсов (ЛИ) с медной мишенью. В работе [1] представлена расчётно-теоретическая модель, которая опирается на результаты расчётов термодинамических функций по первопринципным моделям, развиваемым в РФЯЦ-ВНИИТФ: полнопотенциальный метод линейных маффин-тин орбиталей (присоединённых плоских волн, FP-LMTO) при температурах электронов $T_e \leq 20$ эВ и химическая

модель плазмы с использованием суперконфигурационного подхода в области температур $Te \geq 30$ эВ.

Для проверки применимости разрабатываемых расчётно-теоретических моделей в РФЯЦ-ВНИИТФ проводились экспериментальные исследования взаимодействия фемтосекундных ЛИ с медными мишенями в воздушной среде [1,2].

Были проведены эксперименты по измерению коэффициентов отражения и диффузного рассеяния фемтосекундных лазерных импульсов с длиной волны $\lambda \approx 800$ нм, длительностью импульсов $\tau_L \approx 40$ фс медью в диапазоне интенсивностей излучения $4 \cdot 10^{12} \dots 3 \cdot 10^{15}$ Вт/см² при нормальном падении.

В качестве мишени использовались медные плёнки толщиной ~ 1 мкм, нанесённые на плоскую стеклянную подложку методом вакуумного распыления. Эксперименты были проведены на 1 ТВт титан-сапфировом (Ti:Sa) фемтосекундном лазере. Оптическая схема экспериментов представлена на рис. 1.

Выходное излучение фемтосекундного лазера поворотными зеркалами М1 и М2 направлялось на фокусирующую линзу L и фокусировалось на мишени Т. Для измерения энергии падающего на мишень ЛИ применялся детектор опорного канала D_0 , на который светоделителем BS отводилась часть излучения. Энергия отражённого мишенью ЛИ измерялась детектором канала

отражения D_R , а энергия диффузно-рассеянного соответствующим детектором D_S , установленным на интегрирующей сфере Ульбрихта IS.

Измерение энергии импульсов E осуществлялось в каждом рабочем пуске лазера при помощи детектора опорного канала D_0 , который был предварительно откалиброван по показаниям калориметра С (Coherent Ultima LabMaster), установленного сразу за линзой L .

Длительность ЛИ τ_L измерялась автокоррелятором SSA, на который излучение направлялось зеркалами М3 и М4. Параметры фокусировки лазерного излучения измерялись перед каждой серией экспериментов при помощи видеосистемы CCD с микрообъективом, которая регистрировала изображение фокального пятна.

На рисунке 2 представлена зависимость коэффициента отражения R от интенсивности излучения на мишени I_L . Для сравнения на этом же рисунке приведены экспериментальные данные других исследователей [3] и результаты расчётов по программе ЭРА [1, 2]. На рисунке 3 приведена зависимость коэффициента диффузного рассеяния S от интенсивности.

Результаты измерения коэффициента отражения в диапазоне интенсивности $I_L \leq 5 \cdot 10^{14}$ Вт/см² согласованы с результатами численного моделирования и других исследователей.

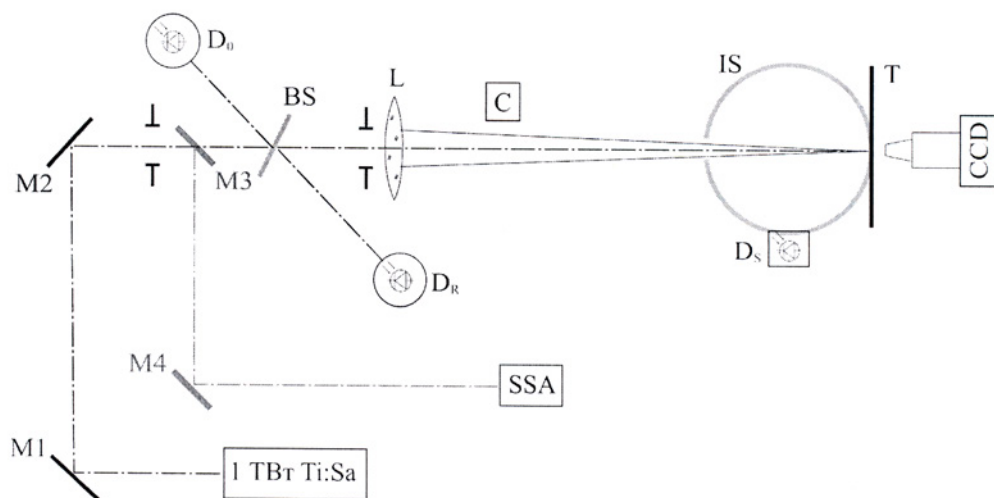


Рис. 1. Оптическая схема эксперимента по измерению коэффициентов отражения и диффузного рассеяния мишени. Обозначения: 1TW Ti:Sa – фемтосекундный лазер; М1, М2 – поворотные зеркала; BS – светоделитель (стеклянная пластина); L – фокусирующая линза ($R = 199$ мм); Т – мишень; D_0 – детектор опорного канала; D_R – детектор канала отражения; IS – интегрирующая сфера; D_S – детектор канала диффузного рассеяния (установлен на IS); М3, М4 – дополнительные зеркала; SSA – автокоррелятор одиночных импульсов; С – калориметр; CCD – видеосистема с микроскопом

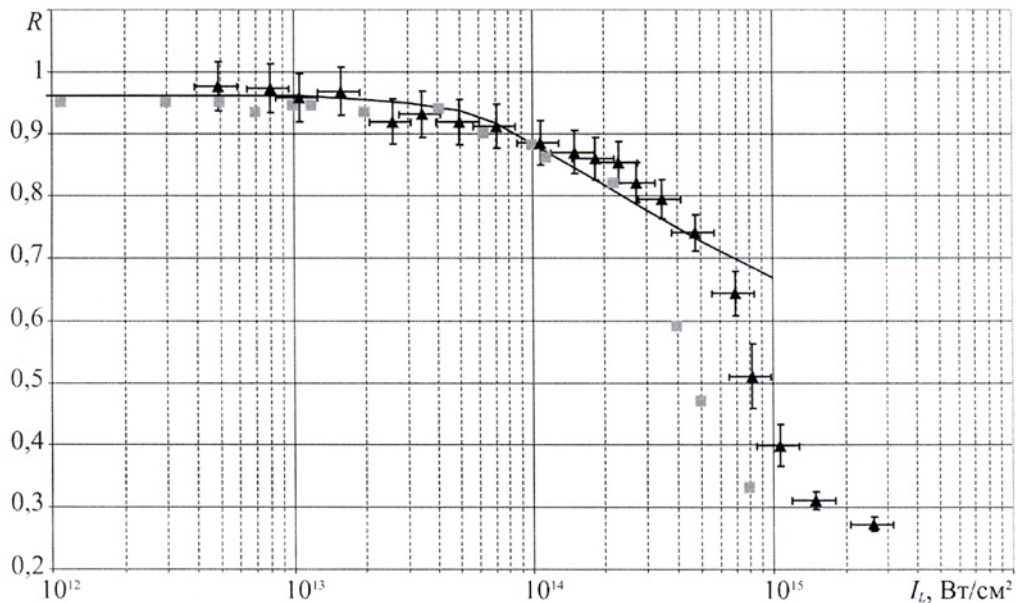


Рис. 2. Зависимость коэффициента отражения фемтосекундных ЛИ медной мишенью от интенсивности излучения. Треугольники – результаты эксперимента РФЯЦ-ВНИИТФ, 40 фс; квадраты – эксперимент Д. Фишер и др., 50 фс (2004) [6]; сплошная линия – расчёт РФЯЦ-ВНИИТФ

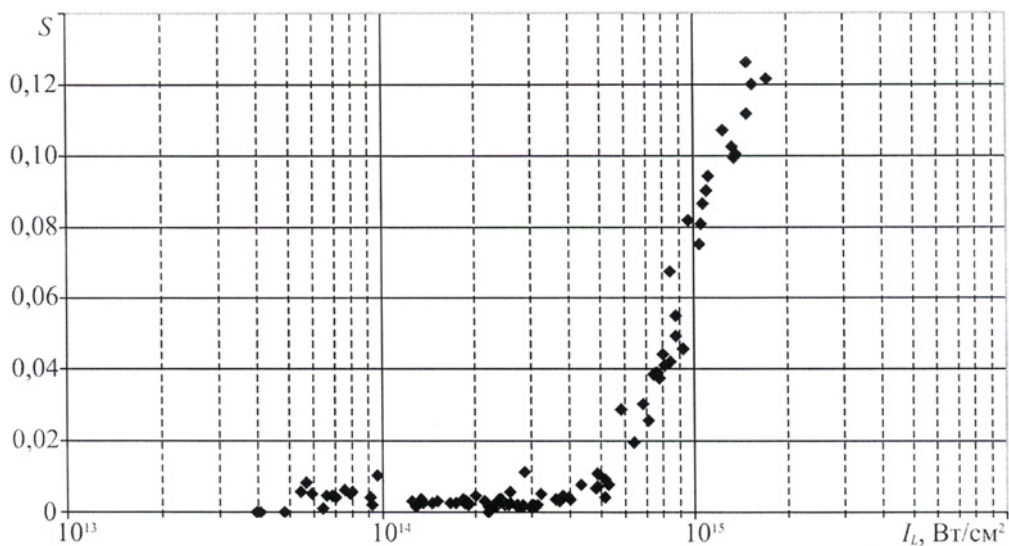


Рис. 3. Зависимость коэффициента диффузного рассеяния фемтосекундных ЛИ медной мишенью от интенсивности излучения

При увеличении интенсивности на мишени $I_L \geq 5 \cdot 10^{14}$ Вт/см² экспериментальная зависимость коэффициента отражения демонстрирует существенный спад, по сравнению с расчётной. Такой ход экспериментальной зависимости может быть обусловлен влиянием нелинейно-оптических эффектов, возникающих при распространении высокоинтенсивного ЛИ в атмосфере, на параметры взаимодействия ЛИ с мишенью. Об этом же кос-

венно свидетельствует резкий рост коэффициента диффузного рассеяния S.

Как известно, при распространении высокоинтенсивного ультракороткого лазерного импульса в среде с нелинейным показателем преломления, возникают эффекты самофокусировки и самомодуляции ЛИ, с последующей филаментацией [4, 5]. В воздухе при длине волны излучения 0,8 мкм, согласно различным экспериментальным данным, диаметр филамента составляет

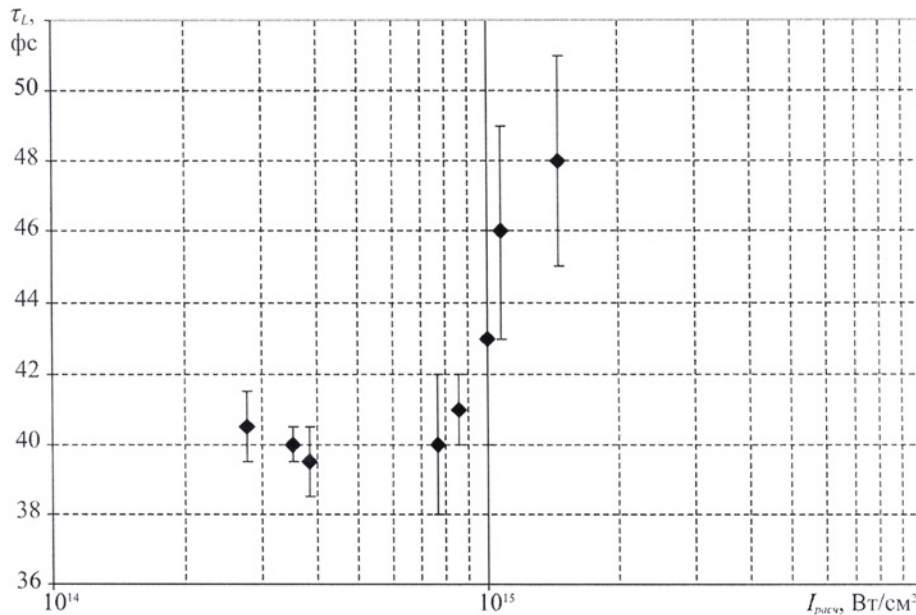


Рис. 4. Зависимость длительности ЛИ от интенсивности в фокусе сферического зеркала ($F = 600$ мм). Измерения длительности проводились автокоррелятором 2-го порядка после коллимации пучка вторым сферическим зеркалом

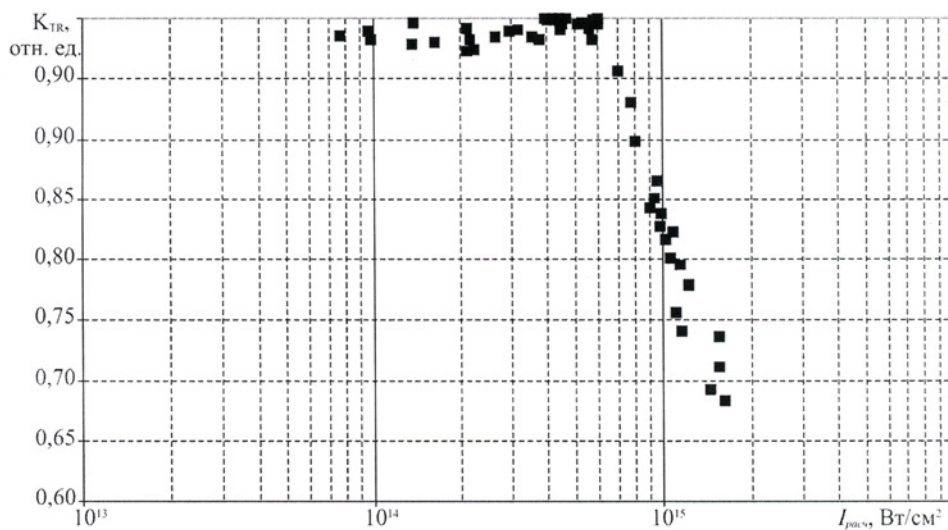


Рис. 5. Зависимость относительного пропускания фемтосекундных ЛИ от интенсивности в фокусе сферического зеркала ($F = 600$ мм) при фокусировке в атмосфере. В эксперименте при различных значениях энергии ЛИ измерялись величины сигналов на детекторах канала пропускания и опорного канала. По результатам измерений была построена зависимость относительного коэффициента пропускания, пропорционального отношению сигналов D_R/D_0 от расчётного значения интенсивности в фокусе

$d_{fil} \approx 100$ мкм, пиковое значение интенсивности – $I_{fil} \approx 10^{13} - 10^{14}$ Вт/см². Особенностью филаментации сфокусированного ультракороткого излучения в отличие от коллимированного пучка является то, что филаментация реализуется в малом объеме фокальной перетяжки.

Для проверки влияния атмосферы на взаимодействие ЛИ с мишенью, были проведены дополнительные исследования, результаты которых представлены на рисунках 4, 5, 6.

Из приведенных выше экспериментальных данных видно, что при интенсивности ЛИ на ми-

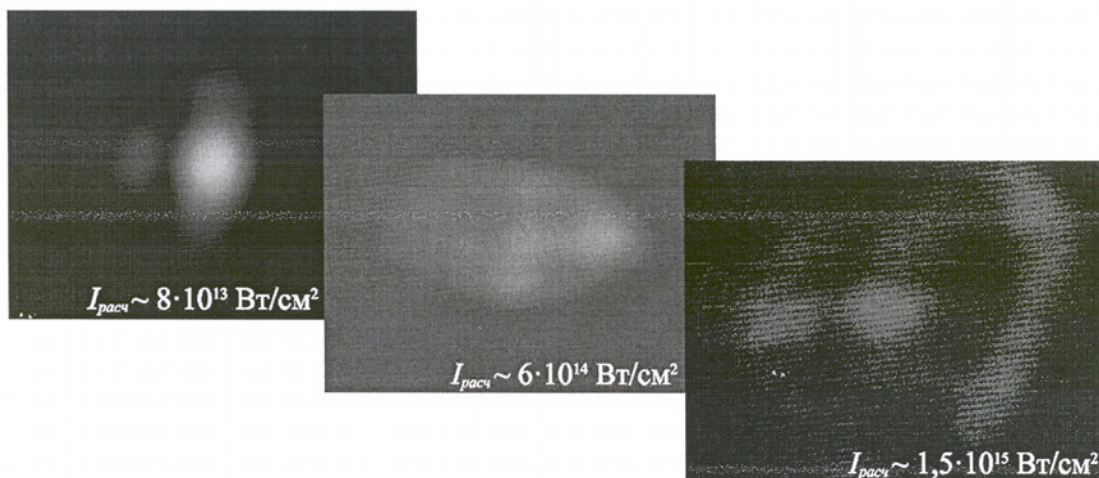


Рис. 6. Изображения фокального пятна фемтосекундных ЛИ при фокусировке сферическим зеркалом ($F = 600$ мм) в атмосфере при различных значениях расчетной интенсивности. При проведении экспериментов изменялась энергия выходного рабочего излучения и микрообъективом регистрировалось изображение фокального пятна на ПЗС-матрице видеокамеры

шени $I_L \geq 5 \cdot 10^{14}$ Вт/см² происходят необратимые изменения параметров рабочего излучения, такие как изменение длительности импульса, изменение пространственного распределения плотности энергии излучения на мишени, уменьшение относительного пропускания рабочего излучения атмосферой вследствие частичной конвертации 800 нм излучения в другие спектральные диапазоны (генерация суперконтинуума). Поэтому, эксперименты с взаимодействием фс-излучения с твердотельными мишенями при интенсивностях $I_L \geq 5 \cdot 10^{14}$ Вт/см² должны проводиться исключительно в условиях вакуума.

Следующим этапом работы стала постановка экспериментов по исследованию взаимодействия фемтосекундных ЛИ с медными мишенями в вакуумной мишенной камере. Были измерены коэффициенты отражения и относительного диффузного рассеяния фемтосекундных лазерных импульсов с длиной волны $\lambda \approx 800$ нм и длительностью импульсов 50 фс, медными пленками толщиной 1 мкм в диапазоне интенсивностей излучения $8 \cdot 10^{12} \dots 2 \cdot 10^{17}$ Вт/см² при нормальном падении. Схема эксперимента представлена на рисунке 7.

Выходной пучок излучения от дифракционных решеток ДР1, ДР2 компрессора Ti:Sa фемтосекундного лазера поворотными зеркалами 31, 32 направлялся в телескопическую систему (С31, С32). Выходя из телескопической систе-

мы, пучок излучения через элеватор 33, 34 направлялся в асферический объектив АО, установленный в мишенной камере МК, и фокусировался на мишени.

Для измерения энергии падающего на мишень ЛИ применялся детектор опорного канала ИС1. Энергия отражённого мишенью ЛИ измерялась детектором канала отражения ИС2. Для измерения относительного коэффициента диффузного рассеяния на окне мишенной камеры был установлен фотодиод ФД-24К с соответствующими фильтрами.

Длительность ЛИ τ_L измерялась непосредственно перед проведением рабочих измерений автокоррелятором 2-го порядка, на который излучение направлялось зеркалами 35 и 36.

На рисунке 8 представлена измеренная зависимость коэффициента отражения R от интенсивности излучения на мишени I_L

В исследованном диапазоне интенсивностей измеренный коэффициент диффузного рассеяния S не превышал 0,01.

Полученная экспериментально зависимость коэффициента отражения от средней интенсивности на мишени в диапазоне до 10^{15} Вт/см² хорошо согласована с результатами численного моделирования. Для диапазона интенсивности $I_L \geq 10^{15}$ Вт/см² на настоящее время отсутствуют численные расчеты.

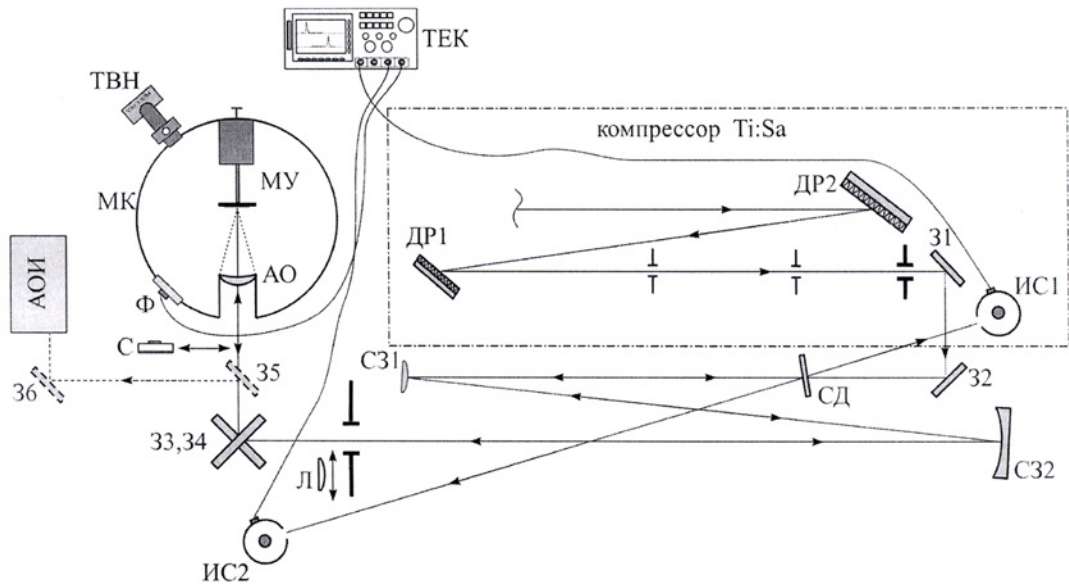


Рис. 7. Оптическая схема эксперимента по измерению коэффициентов отражения и относительного диффузного рассеяния фемтосекундных ЛИ медной мишенью. Обозначения: ДР1, ДР2 – дифракционные решетки; 31, 32 поворотные зеркала; СД – светоделитель (стеклянная пластина); С31 – сферическое зеркало ($R = -2760$ мм); С32 – сферическое зеркало ($R = 676$ мм); ИС1, ИС2 – интегрирующие сферы опорного канала и канала отражения; Л – линза; 33, 34 – зеркала элеватора; 35, 36 – дополнительные поворотные зеркала; С – калориметр; АОИ – автокоррелятор одиночных импульсов; МК – мишенная камера; Ф – детектор канала диффузного рассеяния (установлен на окно мишенной камеры); АО – фокусирующий асферический объектив; МУ – мишенный узел; ТВН – турбомолекулярный вакуумный насос; ТЕК – четырехканальный осциллограф

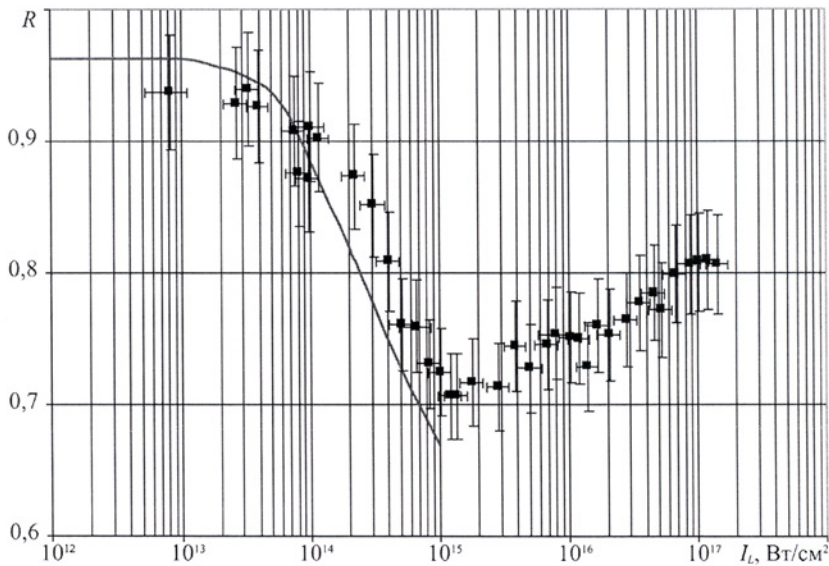


Рис. 8. Зависимость коэффициента отражения фемтосекундных ЛИ медной мишенью от интенсивности излучения. Квадраты – результаты эксперимента; сплошная линия – расчёт РФЯЦ-ВНИИТФ

При достижении интенсивности на мишени $\sim 2 \cdot 10^{15}$ Вт/см² наблюдался рост коэффициента отражения с увеличением интенсивности, который может быть обусловлен эффектом «плазменного зеркала», описанным в работе [6].

Список литературы

1. Лобода П. А., Замураев Д. О., Карлыханов Н. Г. и др. Изучение поглощения фемтосекундных лазерных импульсов медной мишенью //

Забабахинские научные чтения: сборник материалов XI международной конференции. 2012. С. 123–124.

2. Лобода П. А., Замураев Д. О., Карлыханов Н. Г. и др. Теоретическое и экспериментальное изучение поглощения фемтосекундных лазерных импульсов медной мишенью // Забабахинские научные чтения: сборник материалов XII международной конференции. 2014. С. 148–149.

3. Fisher D., Fraenkel M., Hems Z. et al. Intraband and interband absorption of femtosecond laser pulses in copper // XXVIII ECLIM. Rome. 2004.

4. Кандидов В. П., Шленов С. А., Косарева О. Г. Филаментация мощного фемтосекундного

лазерного излучения // Квантовая электроника. 2009. Т.39, № 3. С. 205–228.

5. Букин О. А., Быкова Е. Е., Гейнц Ю. Э. и др. Филаментация остросфокусированного ультракороткого лазерного излучения на 800 и 400 нм. Измерения нелинейного коэффициента преломления воздуха // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24, № 5. С. 351–358.

6. Price D. F., More R. M., Walling R. S. et al. Absorption of ultrashort laser pulses by solid targets heated rapidly to temperatures 1–1000 eV // Phys. Rev. Lett. 1995. Vol.75, N 2. P. 252–256.