

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОГЛОЩЕНИЯ РИ В НАГРЕТЫХ MG, AL, SI И GE В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКЕ «ИСКРА-5»

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF X-RAY SPECTRAL ABSORPTION COEFFICIENTS IN HEATED MG, AL, SI AND GE ON THE «ISKRA-5» LASER FACILITY

Р. В. Гаранин, Н. В. Жидков, А. В. Пинегин, Н. А. Суслов, О. О. Шаров
R. V. Garanin, A. V. Pinegin, O. O. Sharov, N. A. Suslov, N. V. Zhidkov

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Нижегородская область, пр. Мира, 37, 607188, Россия
Russian Federal Nuclear Centre – All Russian Scientific Research Institute of Experimental Physic

В докладе представлены результаты экспериментального исследования спектральных коэффициентов поглощения рентгеновского излучения в Mg, Al, Si и Ge, объемно нагретых мягким рентгеновским излучением в экспериментах на лазерной установке «Искра-5». Описана постановка экспериментов с нагревом образцов от двух цилиндрических мишеней с внутренним вводом лазерного излучения. Коэффициенты поглощения рентгеновского излучения исследуются методом спектроскопии поглощения просвечивающего рентгеновского излучения от точечного источника. Представлены результаты исследования спектральных коэффициентов поглощения рентгеновского излучения в спектральном диапазоне $h\nu \approx 1,1 \div 1,8$ кэВ на переходах 1s–2p в Mg, Al и Si и переходах 2p–3d в Ge в образцах, нагретых до температур $\approx 30\text{--}50$ эВ.

The results of experimental investigation of the spectral absorption coefficients of X-rays in Mg, Al, Si and Ge volumetrically heated by soft X-ray radiation in experiments on the «Iskra-5» laser facility are presented in this report. The experimental arrangement with sample heating from two cylindrical targets with inner input of laser energy is described. The spectral absorption coefficients were investigated by the method of absorption spectroscopy with the employment of a backlighting point X-ray source. The results of investigation of spectral absorption coefficient of X-rays in spectral range of $h\nu \approx 1,1 \div 1,8$ keV for 1s–2p transitions in Mg, Al and Si specimens and 2p–3d transitions in Ge ones heated up to $\approx 30\text{--}50$ eV temperature are presented.

Определение спектральных пробегов рентгеновского излучения является важным вопросом физики плазмы. Экспериментальные исследования пробегов излучения в нагретом веществе широко ведутся в ряде стран [1–5]. Во ВНИИЭФ проведен ряд экспериментов по исследованию спектральных пробегов РИ в Mg, Al, Si и Ge образцах.

Принципиальная схема экспериментов по исследованию пробегов РИ представлена на рис. 1.

Исследуемые образцы нагревались мягким РИ от двух цилиндрических мишеней-иллюминаторов, пристыкованных к диагностическому

боксу с исследуемым образцом. Использование двух идентичных, симметрично расположенных иллюминаторов, способно обеспечить равномерный нагрев исследуемого образца по всей его поверхности. В каждый из иллюминаторов через отверстия на его боковой поверхности вводилось по два пучка лазерного излучения на второй гармонике ($\lambda \approx 0,66$ мкм), по одному пучку в каждое отверстие. Образцы со слоем исследуемого вещества размещались внутри диагностического бокса либо на его боковой поверхности.

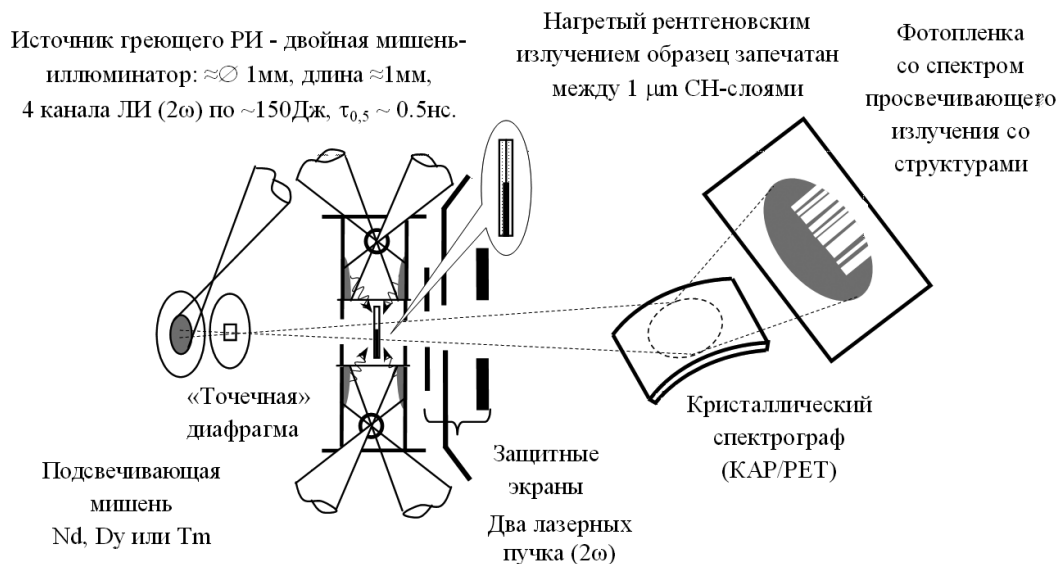


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментов по исследованию спектральных коэффициентов поглощения РИ

Исследование спектральных пробегов РИ проводилось путем измерения коэффициента поглощения РИ методом спектроскопии поглощения. Для этого исследуемый образец просвечивался точечным источником рентгеновского излучения, для формирования которого использовалось лазерное излучение пятого канала установки. Момент зондирования исследуемого образца относительно момента его нагрева задерживался на заданный промежуток времени. Зондирующее РИ, прошедшее через слой исследуемого материала, испытывало поглощение, тогда как излучение, прошедшее мимо него, такого поглощения не испытывало, что позволяло при регистрации спектров с пространственным разрешением путем их сравнения определить поглощение в слое нагретого исследуемого материала.

Спектры РИ от просвечивающего источника, прошедшего сквозь слой исследуемого вещества и вне его, анализировались с помощью кристаллического спектрографа. В опытах с Mg и Ge слоями подсвечивающая мишень была изготовлена из Nd, в опыте с Al слоем из Dy, а в опыте с Si слоем из Tm. В зависимости от материала исследуемого образца в спектрографе использовался либо кристалл КАР, либо РЕТ. Для обеспечения необходимой обзорности наряду с плоскими использовались кристаллы, изогнутые по цилиндру с $R_{\text{крив.}} \approx 80\text{мм}$. Спектральное разрешение спектрографов определялось размером отверстия точечной диафрагмы и геометрией регистрации. Для точного определения энергий зарегистрированных спектров в спектрографе перед пленкой установ-

ливалась тонкая полоска из подходящего материала (Mg, Al или Si), что позволяло по положению на спектрограмме К-скачка коэффициента поглощения этого материала определить энергии зарегистрированных линий поглощения. Спектры регистрировались на рентгеновскую фотопленку УФ - 4.

Для защиты фотопленки от жесткого рентгеновского излучения из мишеней-иллюминаторов, способного вызвать паразитную фоновую засветку фотопленки, а также от осколков мишени использовалась система защитных экранов.

Основная мишень состоит из расположенных вдоль одной оси двух цилиндрических мишеней-иллюминаторов и расположенного между ними диагностического бокса с исследуемым образцом. Внутренняя поверхность иллюминаторов и диагностического бокса была покрыта слоем золота толщиной $\approx 1,5 \div 2\text{мкм}$. Диагностический отсек от иллюминаторов отделялся СН-пленкой толщиной $\approx 0,5\text{мкм}$ со слоем золота толщиной $\approx 0,1\text{мкм}$.

Для ввода лазерного излучения в иллюминаторы в них диаметрально противоположно друг другу на боковой поверхности были изготовлены по два отверстия. Для зондирующего излучения в диагностическом боксе были вырезаны отверстия квадратного сечения. На одном из них непосредственно на боковой поверхности диагностического бокса устанавливался защитный экран из Ta фольги.

Исследуемый образец представлял собой двойной слой СН толщиной по $\approx 1\text{мкм}$. Между слоями СН находился слой исследуемого мате-

риала, который занимал половину площади образца. Толщины слоев исследуемого материала и CH измерялись интерферометрически.

Образцы со слоем Al и Ge были установлены внутри диагностического бокса, а образцы со слоем Mg и Si на его боковой поверхности. Внешний вид одной из мишеней представлен на рис. 2.

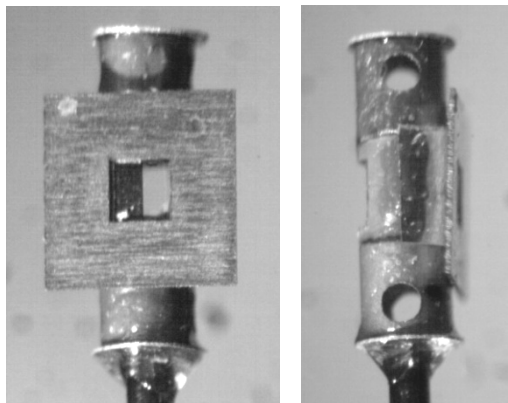


Рис. 2. Внешний вид одной из мишеней.

В опыте с Al образцом толщина слоя Al составляла $0,12 \text{ мкм}$. Спектральное разрешение составляло довольно большую, но ещё приемлемую величину $0,7 \text{ эВ}$. В то же время отметим, что наилучшее спектральное разрешение, достигнутое в одном из экспериментов с наименьшей шириной точечной диафрагмы в 35 мкм в сочетании с использованием кристалла PET , оценивается в $0,4 \text{ эВ}$. Мишень источника просвечивающего РИ в описываемом здесь опыте была изготовлена из Du . Задержка импульса просвечивающего рентгено-

ского излучения относительно момента нагрева образца составляла $\Delta t = 0,7 \text{ нс}$.

Спектрограмма просвечивающего РИ, зарегистрированная в опыте с Al образцом, приведена на рис. 3.

На спектрограмме хорошо видны несколько линий поглощения на $2s-2p$ переходах Al с их тонкой структурой. Результаты обработки спектрограммы в виде спектральной зависимости пропускания нагретого слоя Al приведены на рис. 4 в сравнении с аналогичными результатами американских авторов, которые часто используются для верификации расчетных моделей с различной степенью приближений. Из рисунка видно, что по энергии и по спектральной структуре зарегистрированные в эксперименте линии поглощения хорошо совпадают с результатами, представленными в [1].

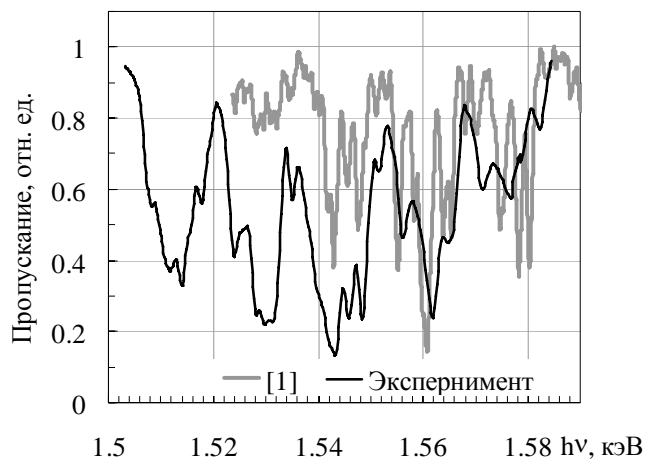


Рис. 4. Пропускание нагретого слоя Al в сравнении с результатами работы [1]

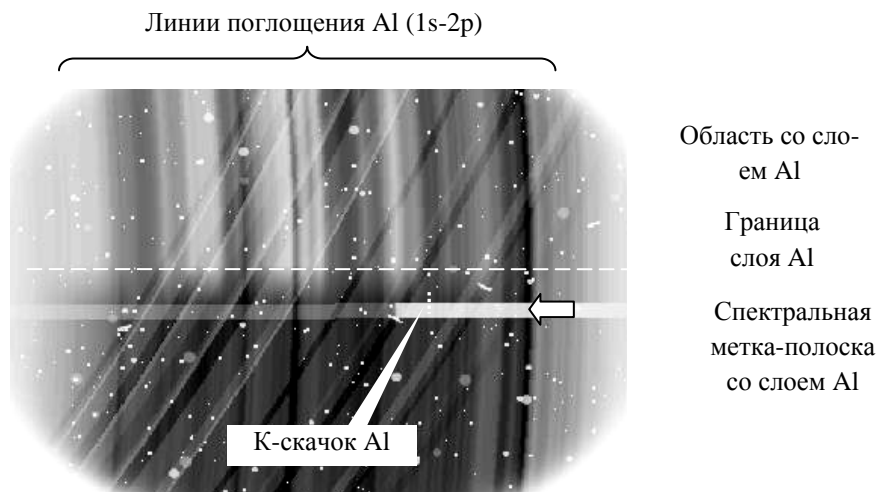


Рис. 3. Спектрограмма РИ в опыте с Al образцом

Для верификации расчетных моделей необходимо расширение диапазона температур исследуемых образцов. Увеличение температуры исследуемого материала приводит к увеличению степени его ионизации. В то же время при равных температурах материалов увеличение степени их ионизации можно получить за счет использования материалов с близкой электронной структурой, но с меньшим зарядом ядра Z , т.е. замена Al на Mg при одинаковых их температурах приведет к более высокой степени ионизации последнего и тем самым с точки зрения расчетных моделей создаст эффект увеличения температуры исследуемого материала.

В опыте с Mg образцом толщина слоя Mg составляла 0,8 мкм. Спектральное разрешение составляло 1,64 эВ. Мишень источника просвечивающего РИ была изготовлена из неодима. Задержка импульса просвечивающего рентгеновского излучения относительно момента нагрева образца мягким рентгеновским излучением составляла $\Delta t = 0,75$ нс.

Результаты обработки спектрограммы, зарегистрированной в этом опыте, приведены на рис. 5. На прописи хорошо видны несколько линий поглощения на $2s-2p$ переходах Mg. Результаты эксперимента представлены в сравнении с результатами численного моделирования по модифицированной модели среднего иона с восстановлением распределения ионов по зарядовым состояниям [6]. Видно, что по спектральному составу и величине поглощения результаты моделирования неплохо совпадают с результатами эксперимента.

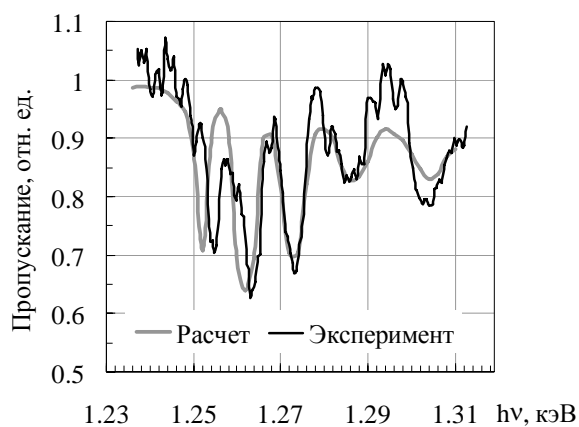


Рис. 5. Пропускание нагретого слоя Mg

Для верификации расчетных моделей наряду с повышением температуры исследуемых слоев не меньший интерес представляет исследование коэффициентов поглощения и при меньших темпе-

ратурах, когда степень ионизации вещества ниже и как следствие количество оставшихся на энергетических уровнях электронов выше. К сожалению, использовать для этой цели Al не удастся, поскольку $1s-2p$ переходы в низкоионизованных ионах Al лежат вне области использования кристалла PET, применение которого обеспечило необходимое высокое спектральное разрешение. Для проведения таких исследований хорошо подходит Si, $1s-2p$ переходы которого в ионах всего диапазона ионизации от 1 до 13 лежат в области использования кристалла PET, а большие энергии переходов ($h\nu \approx (1,7-1,75$ кэВ)) допускают использование более толстых фильтров. Появилось сообщение о проведении таких исследований с образцом Si на установке NIF [6].

В опыте с Si образцом толщина слоя Si составляла 0,3 мкм. Спектральное разрешение составляло 0,9 эВ. Мишень источника просвечивающего РИ была изготовлена из Tm (тулий). Задержка импульса просвечивающего рентгеновского излучения относительно момента нагрева образца составляла $\Delta t = 0,75$ нс.

Результаты обработки зарегистрированной в этом опыте спектрограммы приведены на рисунке 6, на рисунке представлены также результаты численного моделирования поглощения РИ в нагретом Si образце. Зарегистрированные в эксперименте линии поглощения соответствуют поглощению РИ на линиях $1s-2p$ переходов ионов Si разной степени ионизации. Результаты моделирования удовлетворительно описывают спектральную структуру и величину линий поглощения.

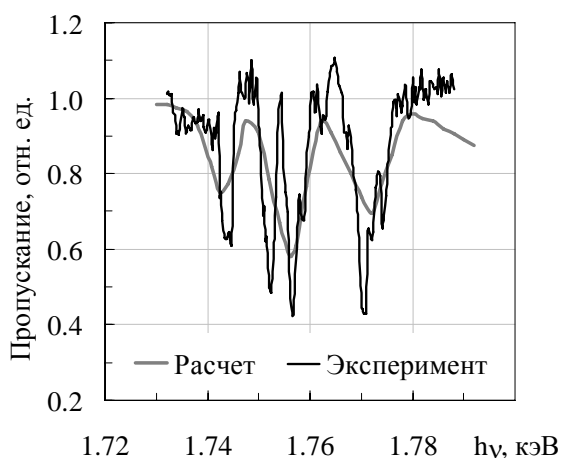


Рис. 6. Пропускание нагретого слоя Si

Спектральные коэффициенты поглощения РИ в материалах с небольшим Z неплохо описываются теоретически. Более сложными для теоретического моделирования являются ионы с большими

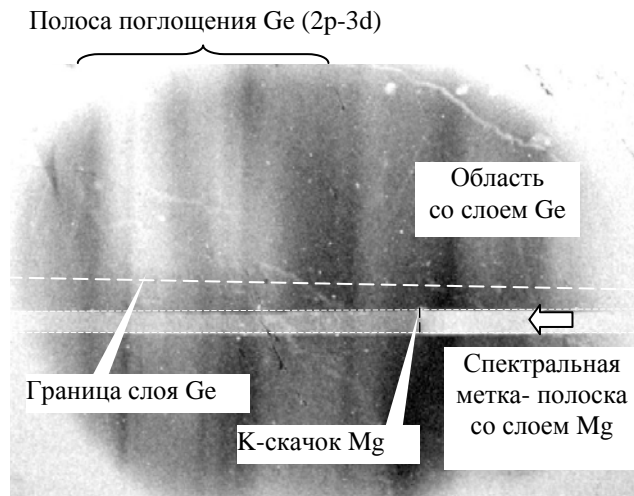


Рис. 7. Спектрограмма РИ в опыте Ge образцом

Z и как следствие с более сложной структурой энергетических уровней и огромным количеством переходов между ними. Наиболее простыми среди таких переходов являются переходы на L-оболочку. В связи с этим экспериментальные исследования коэффициентов поглощения РИ проводятся в таких материалах как Fe, Ni, Ge и Nb [8–11].

Наиболее подходящим материалом в наших условиях является Ge, поэтому наряду с Mg, Al и Si исследования коэффициентов поглощения РИ были проведены Ge образцом. В опыте с Ge образцом толщина слоя Ge составляла 0,25 мкм. Образец был установлен внутри диагностического бокса, при этом осуществлялся двухсторонний нагрев образца. Спектральное разрешение в центре 2p–3d полосы поглощения Ge ($h\nu \approx 1,24$ кэВ) составляло 2,2 эВ. Мишень источника просвечивающего РИ была изготовлена из Nd. Задержка импульса просвечивающего рентгеновского излучения относительно момента нагрева образца мягким рентгеновским излучением составляла $\Delta t \approx 0,7$ нс.

Спектрограмма просвечивающего РИ, зарегистрированная в этом опыте, приведена на рис. 7. На спектрограмме хорошо видна 2p–3d полоса поглощения нагретого Ge. Результаты обработки зарегистрированной спектрограммы представлены на рис. 8. На рисунке наряду с 2p–3d полосой поглощения видно также поглощение, вероятно, на переходах с более высоких уровней возбуждения.

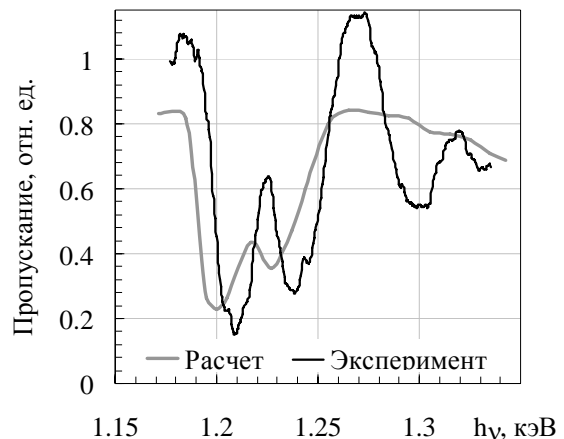


Рис. 8. Пропускание нагретого слоя Ge

На рис. 8 представлен также результат численного моделирования поглощения РИ в нагретом образце Ge, из которого видно, что по величине поглощения результат моделирования неплохо совпадает с результатом эксперимента. В то же время из рисунка видно, что зарегистрированная в эксперименте полоса поглощения по сравнению с результатом моделирования смещена в более жесткую часть спектра на ≈ 10 эВ, что требует более подробного анализа условий эксперимента и результатов моделирования.

На рис. 9 представлены расчетные распределения температуры и плотности плазмы Ge образца, расположенного внутри диагностического бокса. Из рисунка видно, что на момент просвечивания температура образца составляет ≈ 30 эВ, а плотность $\approx 6,3 \cdot 10^{-2}$ г/см³, при этом образец про-

гревается достаточно равномерно: $\Delta T/\bar{T} < 1\%$, $\Delta\rho/\bar{\rho} \approx 3\%$.

рошо описывается для температуры образцов $\sim 30\div 50$ эВ.

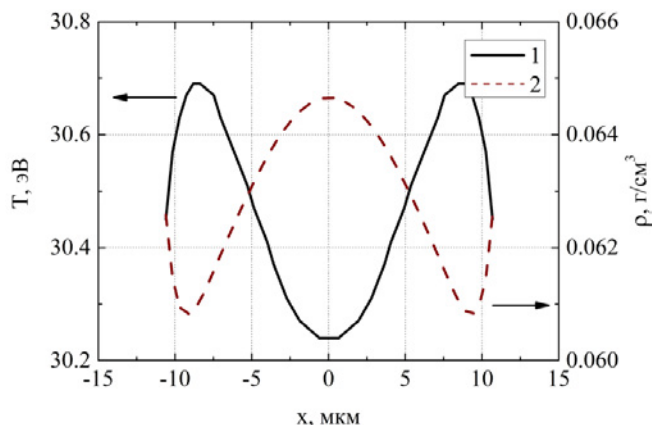


Рис. 9. Температура и плотность плазмы Ge образца на момент максимума просветки

Основные результаты исследований спектральных коэффициентов поглощения рентгеновского излучения в нагретых Mg, Al, Si и Ge состоят в следующем:

1. Разработана постановка экспериментов по исследованию спектральных коэффициентов поглощения рентгеновского излучения в образцах Mg, Al, Si и Ge, нагретых мягким рентгеновским излучением, с использованием 5 каналов лазерной установки «Искра-5».

2. Разработаны и изготовлены мишени с образцами Mg, Al, Si и Ge, запечатанными между СН-обкладками толщиной по ~ 1 мкм.

3. Проведены эксперименты с образцами Mg, Al, Si и Ge толщиной $0,12\div 0,8$ мкм, установленными на поверхности или внутри диагностического бокса. В экспериментах зарегистрированы линии поглощения на переходах $1s-2p$ в Mg, Al и Si и на $2p-3d$ переходах в Ge.

4. Спектральные особенности коэффициента поглощения в Al образце, измеренные с высоким спектральным разрешением, хорошо согласуются с результатами других авторов.

5. Наилучшее спектральное разрешение, достигнутое для Al образца с кристаллом PET, оценивается в $0,4$ эВ.

6. Результаты моделирования показали однородный нагрев образцов, установленных внутри диагностического бокса: $\Delta T/\bar{T} < 1\%$, $\Delta\rho/\bar{\rho} \approx 3\%$.

Экспериментально наблюдаемое поглощение хо-

Список литературы

1. Perry T. S., Bedil K. S., Cauble R. et al., Quantitative measurement of mid-z opacities // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf., 1995, V. 54, P. 317.

2. Eidmann K., Schwanda W., Foldes I. B. et al., Soft x-ray output from a laser-produced plasma // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf., 1994, V. 51, № 1–2, P. 77.

3. Foster J. M., Hoarty D. J., Smith C. C. et al. L-shell absorption spectrum of an open-M-shell germanium plasma: Comparison of experiment data with detailed configuration-accounting calculation // Phys. Rev. Lett., 1991, V. 67, № 23, P. 3255.

4. Chenais-Popovics C., Gilleron F., Fajardo M. et al. Radiative heating of B, Al and Ni thin foils at 15–25 eV temperatures // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf., 2001, V. 65, P. 117.

5. Baohan Zhang, Guohong Yang, Wenhai Zhang et al., Spectroscopic absorption measurement of a low-Z plasma // Physics of Plasmas, 2002. V. 9, № 2, P. 678.

6. Бельков С. А., Шаров О. О. Моделирование экспериментов по исследованию спектральных пробегов рентгеновского излучения на лазерной установке «Искра-5» // Квантовая электроника, 2011. Т.4 1, № 10, С. 901–905.

7. Heeter R. F. Measurements of the opacity of silicon in ICF ablator conditions // LLE 2014 Annual report, P. 287, www.lle.rochester.edu.

8. Springer P. T., Field D. J., Wilson B. G. et al., Spectroscopic absorption measurements of an iron plasma // Phys. Rev. Lett., 1992. V. 69, P. 3735.

9. C. Chenais-Popovics, M. Fajardo, F. Gilleron et al., L-band x-ray absorption of radiatively heated nickel // Phys. Rev. E, 2001. V. 65, P. 016413.

10. Renaudin P., Blancard C., Bruneau J. et al. Absorption experiments on x-ray-heated magnesium and germanium constrained samples // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 2006, V. 99, P. 511.

11. Perry T. S., Springer P. T., Fields D. F. et al. Absorption experiments on x-ray-heated mid-Z constrained samples // Phys. Rev. E, 1996, V. 54, P. 5617.