

Ю. Ю. Протасов, Т. С. Щепанюк

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ
КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ**

Представлены результаты экспериментального исследования в вакуумных условиях температурной зависимости коэффициентов отражения $R(\lambda_{\text{п}}, T)$ высокотемпературных диэлектриков (Al_2O_3 , BNC, SiO_2) в широкой области спектра на стандартных лазерных частотах ($\lambda_{\text{п}} = 0,241; 0,4416; 0,6328; 0,693; 1,06; 10,6$ мкм) и спектрально усредненных групповых коэффициентов отражения ($R(\Delta\lambda)$) в диапазоне спектра вакуумного ультрафиолета ($h\nu \sim \sim 10 \dots 70$ эВ) в допороговой (до начала поверхностного испарения) плотности мощности зондирующего излучения.

Высокотемпературные диэлектрики являются важнейшим классом конструкционных материалов плазменных и фотонных энергетических установок высокой плотности мощности [1–4]. Рассматриваемые в настоящей работе тугоплавкие диэлектрики (Al_2O_3 , SiO_2 , BNC) и материалы со специальными оптическими и теплофизическими свойствами и характеристиками [5] находятся в условиях интенсивных лучевых, ударно-волновых и тепловых нагрузок [6], поэтому изучение оптических характеристик (в том числе — эмиссионных и абсорбционных) высокотемпературных диэлектриков в широком диапазоне энергий квантов ($h\nu \sim 0,1 \dots 100$ эВ) и динамики их изменения в условиях многофакторного радиационно-газодинамического воздействия является необходимым не только для количественного описания кинетики фазовых переходов на контактной границе “твердое тело — газ — плазма”, но и при осуществлении всех циклов разработок и инженерной оптимизации лучевых энергогенерирующих и энергопреобразующих установок, для контроля в режиме реального времени их деградационных параметров.

Несмотря на активную генерацию баз и банков данных [7–9] оптических свойств чистых металлов, оксидов, впервые синтезируемых МДП-структур и композитов, объем надежных экспериментальных данных (в том числе — данных по температурной и частотной зависимости коэффициентов отражения $R(\lambda, T)$) крайне ограничен даже для узких температурных и спектральных интервалов. Отметим, что и для относительно хорошо изученных материалов (Al, Cu) результа-

ты исследований величин $R(\lambda, T)$ различными авторами значительно отличаются друг от друга [10, 11].

Исследование частотной и температурной зависимостей коэффициентов отражения наиболее часто используемых тугоплавких диэлектриков и сложных по химическому составу высокотемпературных компаундов проводилось в вакуумных условиях ($p_0 \approx 10$ Па) с использованием диагностических методик спектрорефлектометрии и пирометрии [12, 13]. Для экспериментального определения коэффициентов отражения, эмиссионных и абсорбционных спектров высокотемпературных диэлектриков в диапазоне спектра от инфракрасного излучения до вакуумного ультрафиолета (в ИК–ВУФ-диапазоне, $h\nu \sim 10^{-1} \dots 10^2$ эВ) и в широком интервале температур (от криогенных до температур фазовых переходов) в условиях интенсивного лучевого воздействия ($I_0 \sim 10^4 \dots 10^{11}$ Вт/см²) на стандартных лазерных частотах и в коротковолновом континууме разработан экспериментально-диагностический опто-теплофизический модуль стенда “ЛУЧ”, подробно описанный в работе [14].

Модуль построен на основе унифицированной оптической элементной базы стенда “ЛУЧ”, имеет общую с ним газовакуумную систему, энергосиловую контур и содержит термостатированную мишенную камеру лучевого воздействия объемом $V_k \approx 2,5 \cdot 10^4$ см³, оптически сопряженную с блоками источников широкополосного и когерентного излучения и блоком регистраторов и спектроанализаторов зондирующего и отраженного излучения. Блок широкополосных тепловых излучателей ($h\nu \sim 1 \dots 70$ эВ) содержит плазменные источники высокояркостного излучения на основе капиллярных разрядов с испаряющейся стенкой ($h\nu \sim 1 \dots 10$ эВ), плазмодинамических разрядов в вакууме и газах ($h\nu \sim 6 \dots 70$ эВ), эмиссионные свойства которых в ВУФ-области описаны в работе [6], и высокочастотных импульсных разрядов в газах ($h\nu \sim 1 \dots 6$ эВ) и позволяет транспортировать в зону лучевого воздействия — мишенную камеру — с помощью оптической системы на основе ИК–УФ-монокроматоров предварительной дисперсии и ВУФ-селекторов спектра потоки излучения ИК-ВУФ-диапазона с плотностью мощности $I_0 \sim 10^{-2} \dots 10^6$ Вт/см² и периодом импульсного облучения $\tau_0 \sim 10^{-7} \dots 10^{-2}$ с, а в квазинепрерывном ($\tau_0 \sim 10^{-1} \dots 10^2$ с) режиме — с плотностью мощности $I_0 \sim 10^{-4} \dots 10^4$ Вт/см².

Блок лазерных источников стандартных частот (длины волн $\lambda_n \approx 10,6; 1,03; 1,06; 0,693; 0,6308, 0,4416; 0,241$ мкм и гармоники) выполнен на основе твердотельных и газоразрядных промышленных лазеров с оптическими преобразователями частоты и модуляторами излучения в диапазонах импульсного ($\tau_n \sim 10^{-9} \dots 10^{-3}$ с), импульсно-

периодического ($f \sim 10^{-1} \dots 10^2$ Гц) и непрерывного радиационного воздействия на твердотельные мишени с тонко регулируемые радиационными потоками (спектральной плотностью мощности) и площадью лучевого воздействия (диаметром пятна фокусировки излучения на мишени). Мишенная камера блока лучевого воздействия с высокочастотным индукционным и омическим нагревателем и системой термостабилизации и охлаждения оптических экранов и затворов содержит внутреннюю интегрирующую (фотометрическую) сферу, имеющую диффузно отражающее в ИК–УФ-области спектра покрытие.

Исследуемые образцы промышленных диэлектрических материалов толщиной $\delta \sim 1 \dots 5$ мм устанавливаются с 3D-юстируемой подвижкой внешним приводом в мишенной камере, а их нагрев осуществляется с помощью CO_2 -лазера мощностью ~ 80 Вт, излучение которого через оптический канал камеры подается на тыльную сторону мишени; исследовались плоские (в пределах пятна облучения) шлифованные образцы из высокотемпературных диэлектриков (Al_2O_3 , SiO_2 , BNC) и со случайной, не имеющей выделенного направления структурой шероховатости (т.е. с размером шероховатости, превышающим длину волны зондирующего излучения).

В блоке приемников излучения и энерго-спектроанализаторов для исследуемого диапазона частот помимо стандартных фотоэлектрических и тепловых детекторов применялись открытая и закрытая (газонаполненная) ионизационные двойные камеры, оптическая схема сопряжения которых в конкретном цикле экспериментов определяется спектральными энергоплотностными и пространственно-временными характеристиками регистрируемых потоков отраженного от мишени и зондирующего излучения. Регистрация спектральной и температурной зависимости коэффициентов отражения $R(\lambda, T)$ в измерительной оптической системе диагностического модуля требует учета эмиссионной (излучательной) способности $A(\lambda, T, I_0)$ нагреваемых в мишенной камере образцов изучаемых материалов с поверхностью зондирующего лучевого воздействия $S_0 \sim 0,1 \dots 1$ см² и коэффициентов переизлучения в оптических каналах камеры взаимодействия. Эти величины экспериментально определялись в каждом цикле поверочных измерений в атмосферных и вакуумных ($p_0 \approx 10^2$ Па) условиях для диапазона энергии квантов $h\nu \sim 0,1 \dots 6$ эВ.

Усредненные по спектру (спектрально-групповые) коэффициенты отражения $R(\Delta\lambda)$ определялись при использовании открытой и закрытой ионизационных камер в качестве детектора отраженного излучения в пяти спектральных интервалах: $h\nu_1 \sim 9,24 \dots 11,2$ эВ; $h\nu_2 \sim 12,2 \dots 22$ эВ; $h\nu_3 \sim 15,8 \dots 28,2$ эВ; $h\nu_4 \sim 21,6 \dots 40$ эВ;

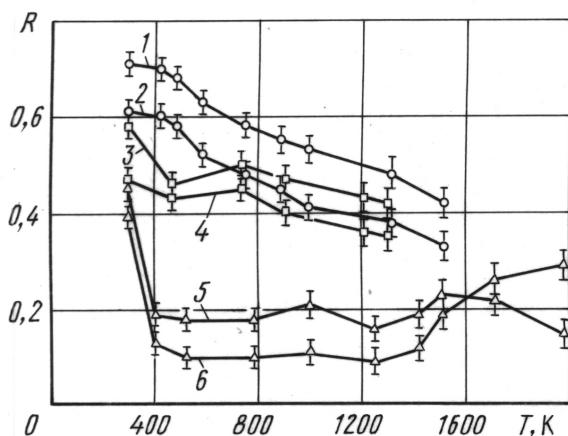


Рис. 1. Температурная зависимость коэффициентов отражения $R(\lambda_p, T)$ тугоплавких диэлектриков на стандартных лазерных частотах ИК-зондирующего излучения:

Al_2O_3 (1 — $\lambda_p = 10,6$ мкм, 2 — $\lambda_p = 1,06$ мкм); SiO_2 (3 — $\lambda_p \approx 10,6$ мкм, 4 — $\lambda_p \approx 1,06$ мкм); BNC (5 — $\lambda_p \approx 10,6$ мкм, 6 — $\lambda_p \approx 1,06$ мкм)

$h\nu_5 \sim 24,6 \dots 65$ эВ, обусловленных возможностями селекции по спектру указанных ионизационных камер. Ионизационная камера наполнялась спектрально чистыми аргоном, ксеноном, неоном и гелием, что позволило выделить достаточно узкие, частично перекрывающиеся спектральные интервалы $h\nu_2 - h\nu_5$, перекрывающие область $h\nu \sim 12 \dots 70$ эВ. Эти интервалы в длинноволновой области ограничены пороговой частотой ионизации соответствующего газа-наполнителя, а в коротковолновой — спадом сечения фотоионизации. Для регистрации отраженного излучения в области $h\nu_1 \sim 9,24 \dots 11,2$ эВ закрытая камера заполнялась окисью азота. В этом случае УФ-граница регистрируемого спектрального интервала определяется коэффициентом пропускания материала окна камеры и потенциалом ионизации газа. Методическая и инструментальная погрешность данной серии экспериментов для диапазона спектра $h\nu_1 \sim 9,24 \dots 11,2$ эВ составляет $35 \pm 5\%$, а в ВУФ-области для диапазона энергий кванта $h\nu > 11,2$ эВ составляет $55 \pm 10\%$. Тестовое исследование показывает, что зависимость $R(\lambda_p, T)$ для алюминиевых мишеней в фиксированных частотных интервалах ИК и УФ диапазонов спектра ($\lambda_p \approx 10,6 \dots 0,241$ мкм) коррелирует с изменением коэффициентов $R(\lambda_p, T)$, описываемым теорией Друде для чистых металлов [12].

На рис. 1 приведены некоторые результаты экспериментального определения температурной зависимости коэффициентов отражения $R(\lambda_p, T, I_0)$ на фиксированных лазерных частотах для ряда тугоплавких диэлектриков в условиях низкой спектральной плотности мощно-

сти ($I_0 \ll 10^3$ Вт/см²) зондирующего излучения — допороговой — для начала развития волны испарения на поверхности исследуемых мишеней. На рис. 2 представлены результаты измерения спектральной зависимости коэффициентов отражения $R(\lambda)$ высокотемпературных диэлектриков в виде плоских шлифованных образцов — Al_2O_3 (а), BNC (б), SiO_2 (в) для ряда стандартных лазерных частот ($\lambda_1 = 0,241$; $\lambda_2 = 0,4416$; $\lambda_3 = 0,6328$; $\lambda_4 = 0,693$; $\lambda_5 = 1,03$; $\lambda_6 = 10,6$ мкм) и усредненные спектрально-групповые коэффициенты отражения $R(\Delta\lambda)$ в ВУФ-области спектра (при $T \approx 300$ К) для диапазонов энергий квантов $h\nu_1 = 9,24 \dots 11,2$ эВ; $h\nu_2 = 12,1 \dots 22$ эВ; $h\nu_3 = 15,8 \dots 28$ эВ; $h\nu_4 = 21,6 \dots 50$ эВ; $h\nu_5 = 24,6 \dots 65$ эВ.

Устойчивая воспроизводимость экспериментально полученных значений $R(\lambda_{\text{л}})$ на лазерных частотах зондирования и значений $R(\Delta\lambda)$ в

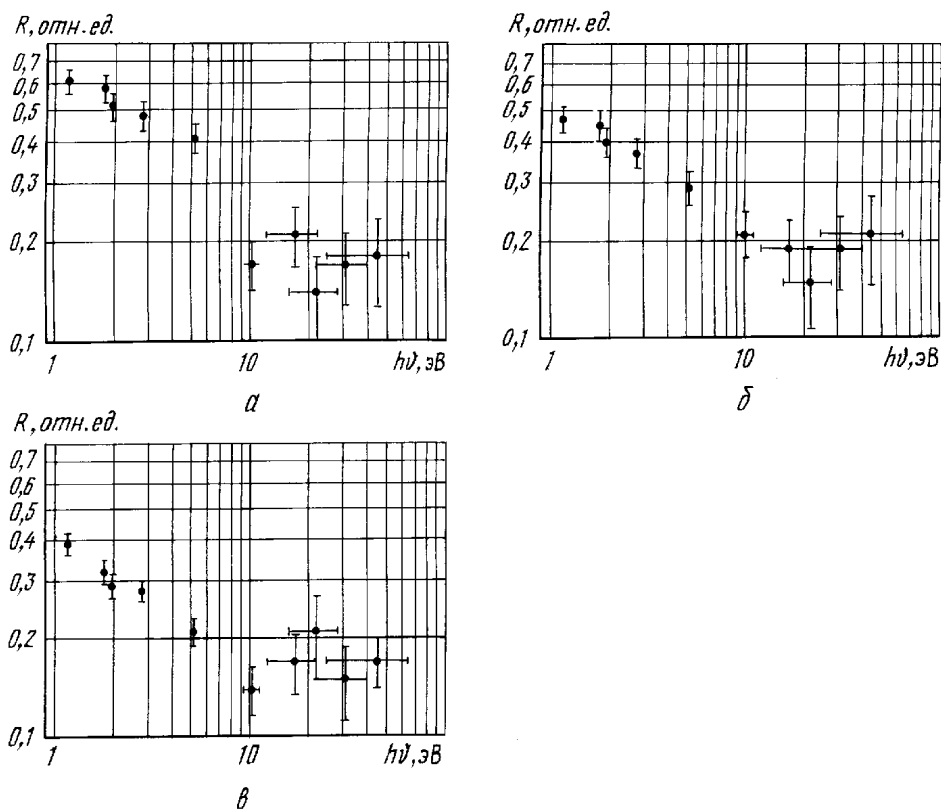


Рис. 2. Спектральная зависимость коэффициентов отражения высокотемпературных диэлектриков Al_2O_3 (а), BNC (б), SiO_2 (в) для стандартных лазерных частот ($\lambda_1 = 0,241$; $\lambda_2 = 0,4416$; $\lambda_3 = 0,6328$; $\lambda_4 = 0,693$; $\lambda_5 = 1,03$; $\lambda_6 = 10,6$ мкм) и усредненных спектрально-групповых коэффициентов отражения в ВУФ-области спектра (при $T \approx 300$ К) для диапазонов энергий квантов $h\nu_1 \sim 9,24 \dots 11,2$ эВ; $h\nu_2 \sim 12,1 \dots 22$ эВ; $h\nu_3 \sim 15,8 \dots 28$ эВ; $h\nu_4 \sim 21,6 \dots 50$ эВ; $h\nu_5 \sim 24,6 \dots 65$ эВ

диапазоне температур $T = 300 \dots 850$ К позволяет выявить основные закономерности частотного распределения коэффициентов отражения в ИК–ВУФ-области спектра, которые могут быть использованы для спектрально-энергетического оптимизационного анализа с применением стандартного фотометрического оборудования. В температурном диапазоне $T = 850 \dots 1900$ К регистрируется значительный ($\sim 30\%$) разброс значений $R(\Delta\lambda)$ в ВУФ-области спектра, поэтому необходим статистический анализ экспериментальной погрешности в каждом спектральном интервале ($h\nu_2 - h\nu_5$) и дальнейшее совершенствование этой экспериментальной технологии определения зависимостей $R(\Delta\lambda, T, I_0)$.

Полученные экспериментальные результаты (частотные и температурные зависимости коэффициентов отражения, эмиссионные, абсорбционные и рефракционные характеристики ряда наиболее употребимых тугоплавких диэлектриков и высокотемпературных компаундов сложного химического состава) являются важным компонентом создаваемой в МГТУ им. Н.Э.Баумана электронной базы экспериментальных и расчетно-теоретических данных термодинамических, оптических и транспортных свойств рабочих веществ и конструкционных материалов плазменных и фотонных энергетических установок (“ТОТ-МГТУ”) высокой плотности мощности. Подробное описание этой базы приводится в работе [15].

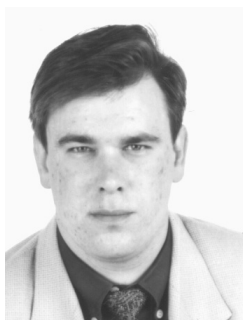
Авторы выражают свою признательность О.Г.Степанову и В.В.Христофорову за помощь в изготовлении и метрологической проверке экспериментально-диагностического оптического модуля стенда, А.М.Самсонову и И.И.Каменеву за участие в проведении серийных экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Phipps C. R., Michaelis M. M. LISP // Laser and Particle Beams. – 1994. – V. 12. – № 1. – P. 23–54.
2. Protasov Yu. S., Protasov Yu. Yu., Telekh V. D. Laser Propulsion: Radiative Gasdynamic and Thermophysical Interchamber Processes of Double-Stage Laser Rocket Thruster // AIAA Paper № 2000-3485. – 2000. – P. 9.
3. Protasov Yu. Yu., Suslov V. I. Photon Energy Conversion: R & D of Plasma Optical Converters of Photon Energy into Electrical Current // Proc. of 35th IECEC (N.Y., 2000). – V. 7. – P. 631.
4. Protasov Yu. S., Protasov Yu. Yu. Laser Propulsion: Solid State Laser Space Thruster // Proc. of 52 International Astronautical Congress (Toulouse, 2001). – Paper № IAF-01.5.6.08. – P. 100.
5. К о р ы ш е в О. В., Н о г о т к о в Д. О., П р о т а с о в Ю. Ю., Т е л е х В. Д. Термодинамические, оптические и транспортные свойства рабочих веществ плазменных и фотонных энергетических установок. Т. 1 / Под ред. Ю.С.Протасова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2000. – 640 с.

6. Радиационная плазмотермика. Т. 1 / Под ред. Ю.С. Протасова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 860 с.
7. Коротченко А.И., Самохин А.А., Успенский А.Б. О поведении поглощательной способности металлов при воздействии лазерного излучения // Квантовая электроника. – 1979. – Т. 6. – № 1. – С. 210–220.
8. Protasov Yu. Thermo-Optical characteristics of refractory dielectric materials in a field of high intensity radiation // IEEE conference Publication (London, 2000). – № 473. – P. 440–445.
9. Гедда Я.М., Снопко В.Н. Монохроматическая пирометрия зеркально-диффузных поверхностей с использованием двунаправленного коэффициента отражения // Теплофизика высоких температур. – 1992. – Т. 30. – № 6. – С. 1238–1241.
10. Курочкин Ю.А., Снопко В.Н. Пространственно-поляризационные характеристики отраженного излучения композитным материалом // Журнал прикладной спектроскопии. – 1998. – Т. 65. – № 6. – С. 926–931.
11. Длугунович В.А., Круплевич Е.А., Курочкин Ю.А. Оптические свойства сверхвысокомодевого материала до и после его нагрева лазерным излучением // Теплофизика высоких температур. – 1999. – Т. 37. – № 5. – С. 725–731.
12. Ujihara. Reflectivity of Metals at High Temperatures // J.Appl. Phys. – 1972. – V. 43. – № 5. – P. 2375–2380.
13. Гарнова Е.А., Гедда Я.М., Длугунович В.А., Снопко В.Н. Экспрессное определение эквивалентных телесных углов отраженного излучения при нормальной подсветке // Измерительная техника. – 1990. – № 6. – С. 26–28.
14. Протасов Ю.Ю., Семенов А.М., Христофоров В.В. Экспериментально-диагностический стенд для исследования оптических характеристик конструкционных материалов плазменных и фотонных энергетических установок. Ч. I // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”. – 2002. – № 4. – С. 199–211.
15. Протасов Ю.С., Протасов Ю.Ю., Телех В.Д. Программный комплекс “ТОТ-МГТУ” // Изв. вузов. Сер. Машиностроение. – 2002. – № 5. – С. 17–32.

Статья поступила в редакцию 10.01.2003



Юрий Юрьевич Протасов — канд. техн. наук, доцент кафедры “Газотурбинные и нетрадиционные установки” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области фотонной энергетики.

Yu.Yu. Protasov — Ph.D. (Eng.), ass professor of “Gas-Turbine and Non-Traditional Facilities” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of over 100 publications in the field of photon power-engineering.

Тадеуш Сигизмундович Щепанюк — канд. техн. наук, научный сотрудник объединенного УНЦ фотонной энергетики. Автор более 20 научных работ в области радиационной динамики плазмы.

T.S. Shchepanyuk — Ph.D. (Eng.), researcher of United Center for Photon Power-Engineering. Author of over 20 publications in the field of radiation plasma dynamics.