

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД РАДИАЦИОННО-ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ МОЩНОСТИ В ВАКУУМНЫХ УСЛОВИЯХ

Приведены результаты экспериментального исследования в вакуумных условиях оптических характеристик ряда веществ — оптической прозрачности, коэффициентов поглощения и отражения в ИК- и УФ-областях спектра на стандартных лазерных частотах ($\lambda_l \approx 0,241; 0,4416; 0,6328; 0,693; 1,06; 10,6 \text{ мкм}$) и спектрально-усредненных (групповых) коэффициентов отражения в ВУФ-диапазоне ($h\nu \approx 10 \dots 70 \text{ эВ}$) спектра при до- и сверхпороговой для развитого поверхностного испарения плотности мощности зондирующего излучения.

В настоящее время для решения актуальных задач физики и технологии концентрированных потоков энергии активно разрабатываются и исследуются радиационно-газодинамические установки высокой плотности мощности (лазерные инжекторы и ускорители газово-плазменных потоков, плазменно-оптические конверторы когерентного излучения в коротковолновое широкополосное излучение и электрический ток, генераторы сверхсильных магнитных полей и др. системы) [1, 2]. Применяемый здесь типовой ряд тугоплавких и оптически прозрачных диэлектриков (оксидов бериллия, алюминия, кремния, фторидов магния, бария, стронция) и материалов со специальными оптическими и теплофизическими свойствами [3, 4] находится в условиях интенсивных лучевых, ударно-волновых и тепловых нагрузок, поэтому изучение их оптических характеристик (в том числе эмиссионных и абсорбционных) в широком диапазоне энергий квантов ($h\nu \approx 10^{-1} \dots 10^2 \text{ эВ}$) в условиях многофакторного радиационно-газодинамического воздействия является необходимым не только для количественного описания лазерно-индуцированных фазовых переходов твердое тело–газ–плазма, представляющих общефизический интерес, но и при осуществлении всех циклов разработок и оптимизации лучевых энергогенерирующих и энергопреобразующих установок, контроля их деградационных параметров [5–7] в режиме реального времени.

Экспериментальные условия и результаты. Исследование частотной и температурной зависимостей коэффициентов отражения и

поглощения тугоплавких диэлектриков ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, SiO_2 , MgF_2 , SrF_2), сложных по химическому составу полимеров ($(\text{CH}_2)_n$, $(\text{CH}_2\text{O})_n$) и высокотемпературных компаундов со смешанным характером отражения излучения (типа BNC) проводилось в вакуумных условиях ($p_0 \approx 10$ Па), используя методики ИК- и УФ-спектрорефлектометрии, абсорбционной/эмиссионной спектроскопии и полихроматической пирометрии [8]. Для экспериментального определения коэффициентов отражения, эмиссионных и абсорбционных спектров в ИК- и ВУФ-диапазоне ($h\nu \approx 10^{-1} \dots 10^2$ эВ) и в широком интервале температур (от криогенных до температур фазовых переходов) в условиях интенсивного лучевого воздействия ($I_0 \approx 10^4 \dots 10^{11}$ Вт/см²) на стандартных лазерных частотах и в коротковолновом континууме разработан экспериментально-диагностический оптопеллофизический модуль стенда “Луч СО1”.

Исследовались плоские (в пределах пятна облучения) шлифованные образцы (толщиной $\delta \approx 1 \dots 5$ мм) из высокотемпературных диэлектриков и со случайной, не имеющей выделенного направления структурой шероховатости (т.е. с размером шероховатости, превышающим длину волны зондирующего излучения). Их нагрев осуществлялся с помощью CO_2 -лазера мощностью ≈ 20 Вт. Методическая и инструментальная погрешность экспериментов в области стандартных лазерных частот не превышает $20 \pm 3\%$, для диапазона спектра $h\nu_1 \approx 9,24 \dots 11,2$ эВ составляет $\approx 35 \pm 5\%$, а в области вакуумного ультрафиолета с $h\nu > 11,2$ эВ — $\approx 55 \pm 10\%$. Тестовое исследование зависимости $R(\lambda_n, T)$ для алюминиевых массивных ($\Delta \approx 4$ мм) мишеней в фиксированных частотных интервалах ИК- и УФ-диапазонов спектра (λ_n от 10,6 до 0,241 мкм) коррелирует с характером изменения зависимости $R(\lambda_n, T)$, определяемым теорией Друде для чистых металлов [10].

Некоторые результаты экспериментального определения температурной зависимости коэффициентов отражения ($R(\lambda_n, T)$) на фиксированных лазерных частотах приведены на рис. 1 для условий низкой спектральной плотности мощности ($I_0 \ll I_0^* \approx 10^3$ Вт/см²) зондирующего излучения, т.е. допороговой для начала развития волны испарения поверхности облучаемых мишеней. На рис. 2 представлены результаты измерения спектральной зависимости коэффициентов отражения $R(\lambda)$ 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 усредненные спектрально-групповые коэффициенты отражения $R(\Delta\lambda)$ в ВУФ-области спектра (при $T \approx 300$ К) для диапазонов энергий квантов $h\nu_1 \approx 9,24 \dots 11,2$ эВ; $h\nu_2 \approx 12,1 \dots 22$ эВ; $h\nu_3 \approx 15,8 \dots 28$ эВ; $h\nu_4 \approx 21,6 \dots 50$ эВ; $h\nu_5 \approx 24,6 \dots 65$ эВ. Хорошая воспроизводимость

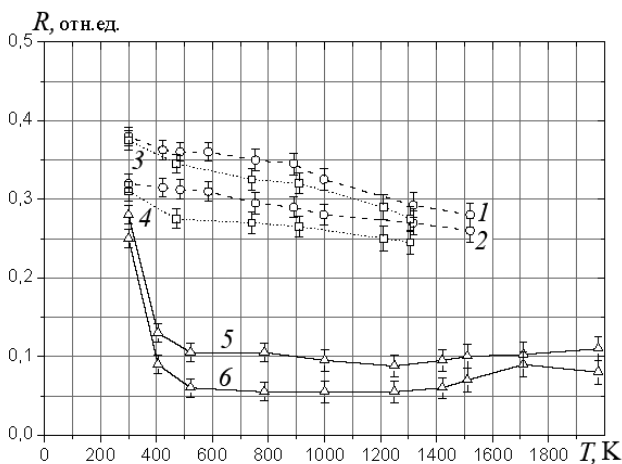


Рис. 1. Температурная зависимость коэффициентов отражения $R(\lambda_l, T)$ тугоплавких диэлектриков на стандартных лазерных частотах ИК-зондирующего излучения:

$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (1 – $\lambda_l = 1,06$ мкм, 2 – $\lambda_l = 10,6$ мкм); $\rho \approx 3,971$ г/см³; SiO_2 (3 – $\lambda_l \approx 1,06$ мкм, 4 – $\lambda_l \approx 10,6$ мкм), $\rho \approx 2,652$ г/см³; BNC (5 – $\lambda_l \approx 1,06$ мкм, 6 – $\lambda_l \approx 10,6$ мкм), $\rho \approx 2,344$ г/см³; $I_0(\lambda_1 = 1,06$ мкм) = $2,3 \cdot 10^{-1}$ Вт/см², $I_0(\lambda_2 = 10,6$ мкм) = 1,4 Вт/см²

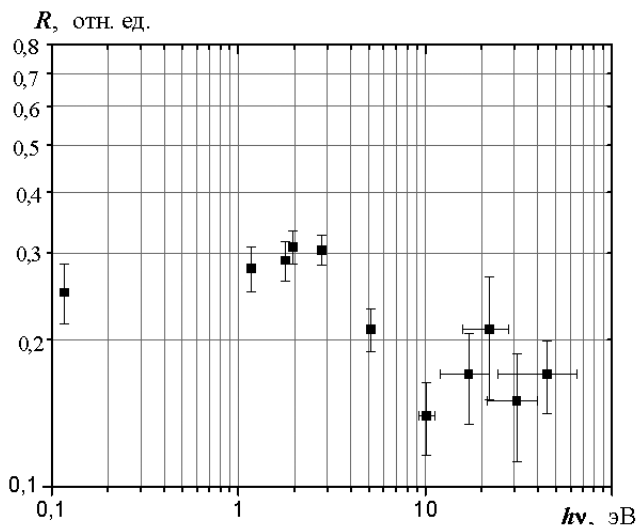


Рис. 2. Спектральная зависимость коэффициентов отражения карбонитрида бора BNC

экспериментальных результатов $R(\lambda_l)$ на лазерных частотах зондирования и $R(\Delta\lambda)$ (при ВУФ-широкополосном) в диапазоне температур $T \approx 300 \dots 850$ К позволяет выявить основные закономерности частотного распределения коэффициентов отражения в ИК- и ВУФ-областях спектра данного класса веществ, которые могут быть использованы для спектрально-энергетического оптимизационного анализа лучевых

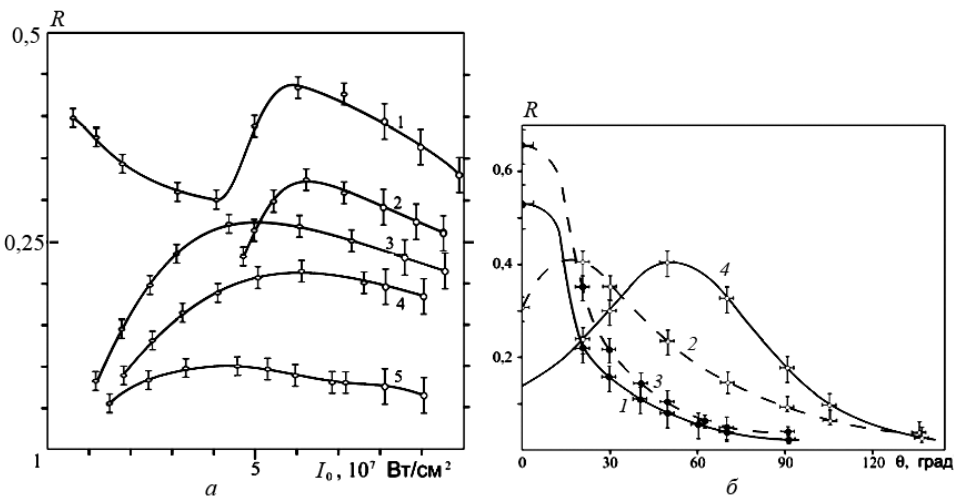


Рис. 3. Экспериментальные значения коэффициентов отражения:
 а — зависимость интегрального коэффициента отражения от плотности потока I_0 лазерного излучения для плоских мишеней различного химического состава: 1 — $(\text{CH}_2\text{O})_n$, $\lambda_2 \approx 1,06$ мкм; 2 — $(\text{CH}_2)_n$, $\lambda_2 \approx 1,06$ мкм; 3 — $((\text{CH}_2)_n + \text{Al})$, $\lambda_1 \approx 10,6$ мкм; 4 — $(\text{C}_2\text{F}_4)_n$, $\lambda_2 \approx 1,06$ мкм; 5 — Al_2O_3 , $\lambda_1 \approx 10,6$ мкм;
 б — зависимость коэффициента отражения от угла рассеяния θ при различных плотностях потока когерентного излучения: 1, 2 — $I_0 \approx 10^7$ $\text{Вт}/\text{см}^2$, $(\text{CH}_2\text{O})_n$ -мишень, $\lambda_2 \approx 1,06$ мкм; 3, 4 — $I_0 \approx 3,5 \cdot 10^7$ $\text{Вт}/\text{см}^2$, $(\text{CH}_2)_n$ -мишень, $\lambda_2 \approx 1,06$ мкм; 1, 3 — нормальное падение луча; 2, 4 — угол падения $\approx 45^\circ$

энергоустановок с применением стандартного фотометрического оборудования. Отметим, что в температурном диапазоне 850...1900 К регистрируется значительный ($\approx 30\%$) разброс значений $R(\Delta\lambda)$ в ВУФ-области спектра, что требует статистического анализа инструментальной погрешности в каждом спектральном интервале и дальнейшего развития данной экспериментальной технологии изучения спектрально-энергетических зависимостей $R(\Delta\lambda, T, I_0)$ с использованием вторичных метрологических эталонов [8].

Характерной особенностью зависимостей $R(I_0)$ (рис. 3) для полимерных мишеней является наличие максимумов отражения, достигаемых (как и начало резкого роста интегрального коэффициента отражения) в области сверхпороговых для развития волны термической ионизации (плазмообразования) значений интенсивностей излучения I_0 ($I_0 \geq I_0^{**}$). При плотности потока $I_0 > 10^7$ $\text{Вт}/\text{см}^2$ и нормальном падении излучения на плоскую мишень (рис. 3, б) диаграмма направленности рассеянного лазерного излучения, соответствующая различной ориентации мишени относительно зондирующего луча, заметно отличается от закона Ламберта; поворот плоской мишени на угол 45° приводит к расширению диаграммы направленности и смещению ее вершины на угол $\theta \approx 50^\circ$. При увеличении плотности потока лазерного излучения до $I_{0\text{max}} \approx 2 \cdot 10^8$ $\text{Вт}/\text{см}^2$ угол поворота

диаграммы направленности уменьшается до $\theta \approx 20^\circ$. Интегрирование диаграммы направленности (для нормального угла падения) в пределах полусферы дает значения полного коэффициента отражения: $R(\lambda_1) \approx 55\%$. Результаты этих измерений, так же как и относительно слабая зависимость диаграммы направленности от угла ориентации мишени при $I_0 > 5 \cdot 10^7$ Вт/см², соответствуют теоретически анализируемым в [8] для более высоких значений I_0 и коррелируют с особенностями динамики волны поглощения лазерного излучения на длине волны $\lambda_1 \approx 10,6$ мкм и $\lambda_2 \approx 1,06$ мкм в газовой-плазменном слое у полимерной мишени в вакууме, спектрально-яркостные характеристики которого иллюстрируются рис. 4, когда при пороговых интенсивностях воздействия $I_0^{**}(\lambda)$ образуется светоиндуцированная детонационная ударная волна (УВ). Оценки плазменных параметров в условиях генерации УВ при $I_0 > I_0^*(\lambda_1)$ показывают существование внутри области поглощения лазерного излучения (между фронтом УВ и плоскостью Жуге) плазменных зон с критической концентрацией электронов ($n_{e\text{ крит}} > 10^{10}$ см⁻³ для лазерного излучения с $\lambda_1 \approx 10,6$ мкм, что является причиной сильного отражения лазерного излучения, наблюдаемого экспериментально. При увеличении I_0 плотность электронов должна превышать критическую уже непосредственно на фронте УВ и поглощение лазерного излучения в этом случае возможно лишь в узком неравновесном релаксационном слое на ее фронте; однако при высоких интенсивностях потока лазерного излучения происходит переход от гидродинамического к радиационному механизму распространения волны поглощения, что сопровождается размытием фронта волны ионизации за счет появления перед УВ слоя прогретого газа, поглощающего лазерное излучение [6], что и является причиной наблюдаемого уменьшения коэффициента отражения от приповерхностной зоны при дальнейшем росте $I_0(t)$. При низких значениях плотностей потока ($I_0 < I_0^{**}$) вследствие возрастания времени плазмообразования $t_{\text{п}}$ увеличивается вклад в полные потери за счет отражения лазерного излучения непосредственно от поверхности

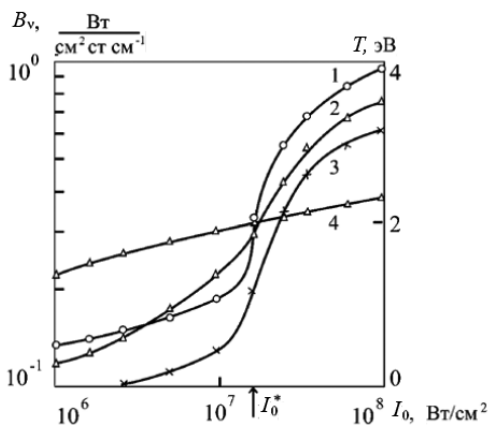


Рис. 4. Спектральная яркость B_n (1-3) и яркостная температура T_n (4) в ВУФ-области спектра приповерхностной лазерной плазмы плоской (СН₂О)_n-мишени, средние по полосам поглощения ксенона (1, 4), гелия (2), оксида азота (3) при $\lambda_n = 1,06$ мкм, $E_n \approx 170$ Дж

на длине волны $\lambda_1 \approx 10,6$ мкм и $\lambda_2 \approx 1,06$ мкм в газовой-плазменном слое у полимерной мишени в вакууме, спектрально-яркостные характеристики которого иллюстрируются рис. 4, когда при пороговых интенсивностях воздействия $I_0^{**}(\lambda)$ образуется светоиндуцированная детонационная ударная волна (УВ). Оценки плазменных параметров в условиях генерации УВ при $I_0 > I_0^*(\lambda_1)$ показывают существование внутри области поглощения лазерного излучения (между фронтом УВ и плоскостью Жуге) плазменных зон с критической концентрацией электронов ($n_{e\text{ крит}} > 10^{10}$ см⁻³ для лазерного излучения с $\lambda_1 \approx 10,6$ мкм, что является причиной сильного отражения лазерного излучения, наблюдаемого экспериментально. При увеличении I_0 плотность электронов должна превышать критическую уже непосредственно на фронте УВ и поглощение лазерного излучения в этом случае возможно лишь в узком неравновесном релаксационном слое на ее фронте; однако при высоких интенсивностях потока лазерного излучения происходит переход от гидродинамического к радиационному механизму распространения волны поглощения, что сопровождается размытием фронта волны ионизации за счет появления перед УВ слоя прогретого газа, поглощающего лазерное излучение [6], что и является причиной наблюдаемого уменьшения коэффициента отражения от приповерхностной зоны при дальнейшем росте $I_0(t)$. При низких значениях плотностей потока ($I_0 < I_0^{**}$) вследствие возрастания времени плазмообразования $t_{\text{п}}$ увеличивается вклад в полные потери за счет отражения лазерного излучения непосредственно от поверхности

мишеней, что объясняет увеличение доли отраженной энергии для мишени с высоким коэффициентом отражения.

Характер относительного распределения зависимости $R(\Delta\lambda)$ в области энергий квантов 12...70 эВ соответствует экспериментальным данным для образцов лейкосапфира и оксида кремния марки КУ-1, полученных на синхротронном источнике при $T \approx 300$ К. В ИК и УФ-области фиксированных лазерных частот зондирования измеренные значения $R(\lambda_{\text{л}})$ для карбонитрида бора (с учетом нелинейного распределения спектральной излучательной способности $A(\lambda)$) в области температур $T < 900$ К удовлетворительно ($\approx 20\%$) соответствуют аналогичным абсолютным значениям $R(\lambda_{\text{л}})$ базы данных NIST и их частотной зависимости. Генерируемый многомерный массив экспериментальных результатов (частотные и температурные зависимости коэффициентов отражения, спектральные, эмиссионные, абсорбционные и рефракционные характеристики ряда наиболее употребимых тугоплавких диэлектриков, полимеров и высокотемпературных компаундов сложного химического состава) является 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 высокой плотности мощности (“ТОТ-МГТУ”), подробное описание структуры которой приводится в [11].

Работа выполнена по гранту Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – докторов наук (МД-4061.2007.8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физика экстремальных состояний вещества / Под ред. В.Е. Фортова. – М.: Изд-во ИПХФ РАН, 2007. – 560 с.
2. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Вводный том. Т. 2 / Под ред. В.Е. Фортова. – М.: Наука, 2001. – С. 125–305.
3. Protasov Yu. S., Protasov Yu. Yu., Suslov V. I. // 35 Intersociety Energy Conversion Engineering Conference: AIAA paper № 2000–2887. N.Y.: AIAA, 2000. 7 p.
4. Протасов Ю. Ю. // 3-й Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии / Сб. материалов. Т. 1. – Иваново, 2002. – С. 469–471.
5. Caruso A., Strangio C. // XXVII European Conf. on Laser Interaction with Matter: Book of Abstracts. Moscow, 2002. – P. 148–149.
6. Hutchinson H. // XXVII European Conf. on Laser Interaction with Matter: Book of Abstracts. – Moscow, 2002. – P. 117–118.
7. Donaldson T. P., Hubbard M., Spalding I. J. // Phys. Rev. Lett. 1976. V. 37, no. 20. – P. 1348–1351.
8. Arves J. P., Akuzlu K. M. / AIAA Paper. – 2000. – No. 2000-92. – 6 p.

9. Протасов Ю. С., Протасов Ю. Ю. // Приборы и техника эксперимента. – 2002. – № 6.
10. Соколов А. В. Оптические свойства металлов. – М.: Физматлит, 1961. – 464 с.
11. Коришев О. В., Ноготков Д. О., Протасов Ю. Ю., Гелех 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, 1999. – 640 с.

Статья поступила в редакцию 15.02.2008

Юрий Юрьевич Протасов — д-р 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 — D.Sc. (Eng.), assoc. 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.

Владимир Владимирович Христофоров — научный сотрудник объединенного УНЦ фотонной энергетики. Автор более 20 научных работ в области оптики конденсированных сред.

V.V. Khristoforov — researcher of United Center for Photon Power-Engineering. Author of over 20 publications in the field of optics of condensed media.

ЖУРНАЛ “ВЕСТНИК МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА имени Н.Э. БАУМАНА”

В журнале публикуются наиболее значимые результаты фундаментальных и прикладных исследований и совместных разработок, выполненных в МГТУ имени Н.Э. Баумана и других научных и промышленных организациях.

Журнал “Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана” в соответствии с постановлением Высшей аттестационной комиссии Федерального агентства по образованию Российской Федерации включен в перечень периодических и научно-технических изданий, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук.

Подписку на журнал “Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана” можно оформить через агентство “Роспечать”.

Подписывайтесь и публикуйтесь!

Подписка по каталогу “Газеты, журналы” агентства “Роспечать”

Индекс	Наименование серии	Объем выпуска	Подписная цена (руб.)	
		Полугодие	3 мес.	6 мес.
72781	“Машиностроение”	2	250	500
72783	“Приборостроение”	2	250	500
79982	“Естественные науки”	2	250	500

Адрес редакции журнала “Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана”: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Тел.: (499) 263-62-60; (499) 263-67-98.

Факс: (495) 261-45-97.

E-mail: press@bmstu.ru