

Ю. Ю. Протасов, В. В. Христофоров

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
МАТЕРИАЛОВ РАДИАЦИОННО-  
ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ  
УСТАНОВОК ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ  
МОЩНОСТИ**

*Приведены результаты экспериментального исследования в вакуумных условиях оптических характеристик — оптической прозрачности, спектральных коэффициентов поглощения и отражения, индикатрисы рассеяния ряда конструкционных диэлектрических материалов радиационно-газодинамических энергетических установок высокой плотности мощности в ИК- и УФ-областях спектра на стандартных лазерных частотах ( $\lambda_r \sim 0,241; 0,4416; 0,6328; 0,693; 1,06; 10,6 \mu\text{м}$ ) и спектрально-усредненных (групповых) коэффициентов отражения в ВУФ-диапазоне спектра ( $h\nu \sim 10 \dots 70 \text{ эВ}$ ) в условиях до- и сверхпороговой плотности мощности зондирующего излучения для развитого поверхностного испарения.*

Радиационно-газодинамические энергетические 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. активно разрабатываются и исследуются в настоящее время для решения актуальных задач физики и технологии концентрированных потоков энергии [1–4]. Применяемый здесь ряд тугоплавких и оптически прозрачных диэлектриков (оксидов бериллия, алюминия, кремния, фторидов магния, бария, стронция) и материалов со специальными оптическими и теплофизическими свойствами [5, 6] находится в условиях интенсивных лучевых, ударно-волновых и тепловых нагрузок [7], поэтому изучение их оптических характеристик (в том числе эмиссионных и абсорбционных) в широком диапазоне энергий квантов ( $h\nu \sim 10^{-1} \dots 10^2 \text{ эВ}$ ) в условиях многофакторного радиационно-газодинамического воздействия является необходимым не только для количественного описания лазерно-индуцированных фазовых переходов “твердое тело – газ – плазма”, но и при осуществлении всех циклов разработок и инженерной оптимизации лучевых энергогенерирующих и энергопреобразующих установок, контроля их деградационных параметров в режиме реального времени.

Несмотря на активное развитие баз и банков данных оптических характеристик чистых металлов и оксидов, впервые синтезируемых *M-D-II*-структур и композитов, объем надежных экспериментальных данных (в том числе и данных по температурной и частотной зависимости коэффициентов поглощения, отражения  $A, R(\lambda, T)$ ) крайне ограничен даже для узких температурных и спектральных интервалов лучевого воздействия. Следует отметить, что и для относительно хорошо изученных материалов с зеркально-диффузным характером отражения (и тонкопленочных структур на их основе) результаты исследований направленно-полусферических коэффициентов отражения  $R(\lambda, T)$  различными экспериментальными группами значительно отличаются, особенно в коротковолновой области спектра [8–10].

**Экспериментальные условия и результаты.** Исследование частотной и температурной зависимостей коэффициентов отражения и поглощения наиболее употребимого ряда конструкционных материалов на основе тугоплавких диэлектриков ( $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgF}_2$ ,  $\text{SrF}_2$ ), сложных по химическому составу полимеров  $((\text{CH}_2)_n, (\text{CH}_2\text{O})_n)$  на основе элементов полимерного ряда (C, O, H, F, N, SI), высокотемпературных компаундов со смешанным характером отражения излучения (типа BNC) проводилось в вакуумных условиях ( $p_0 \sim 10$  Па), используя методики ИК- и УФ-спектрорефлектометрии, абсорбционной эмиссионной спектроскопии и полихроматической пирометрии [11, 12]. Для экспериментального определения коэффициентов отражения, эмиссионных и абсорбционных спектров 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/см<sup>2</sup>) на стандартных лазерных частотах и в коротковолновом континууме разработан экспериментально-диагностический опто-теплофизический модуль стенда “Луч”, подробно описанный в работе [13]. Модуль построен на основе унифицированной оптической элементной базы стенда “Луч”, имеет общую с ним газовакуумную систему, энергосиловой контур и содержит термостатированную мишенную камеру лучевого воздействия объемом  $V_k \sim 2,5 \cdot 10^4$  см<sup>3</sup>, оптически сопряженную с блоками источников широкополосного и когерентного излучения и блоком регистраторов и спектроанализаторов зондирующего и отраженного излучений (рис. 1). Блок широкополосных тепловых излучателей ( $h\nu \sim 1 \dots 70$  эВ) позволяет транспортировать в зону лучевого воздействия (мишенную камеру) потоки излучения ИК-ВУФ-диапазона с плотностью мощности  $I_0 \sim 10^{-2} \dots 10^6$  Вт/см<sup>2</sup> с помощью оптической системы на основе ИК-УФ-монокроматоров предварительной дисперсии и ВУФ-селекторов спектра с возможным периодом динамического облучения  $\tau_b \sim 10^{-7} \dots 10^{-2}$  с, а в квазинепрерывном режиме



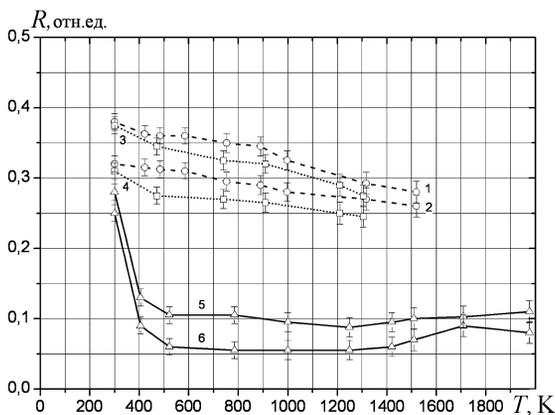
( $\tau_b \sim 10^{-1} \dots 10^2$  с) — с плотностью мощности  $I_0 \sim 10^{-4} \dots 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>. Блок лазерных источников излучения стандартных частот ( $\lambda_l \sim 10,6; 1,03; 1,06; 0,693; 0,6308, 0,4416; 0,241$  мкм) и гармоник выполнен на основе твердотельных и газоразрядных промышленных лазеров с оптическими преобразователями частоты и модуляторами излучения в диапазоне импульсного ( $\tau_{и} \sim 10^{-9} \dots 10^{-3}$  с), импульсно-периодического ( $f \sim 10^{-1} \dots 10^2$  Гц) и непрерывного радиационного воздействия на твердотельные мишени с тонко регулируемыми параметрами радиационных потоков и площадью лучевого воздействия. Мишенная камера блока лучевого воздействия с ВЧ индукционным и омическим нагревателем и системой термостабилизации и охлаждения оптических экранов и затворов содержит внутреннюю интегрирующую (фотометрическую) сферу, имеющую покрытие, диффузно-отражающее излучение в ИК-УФ-области спектра.

В блоке приемников излучения и энерго-спектроанализаторов для исследуемого диапазона частот (помимо стандартных фотоэлектрических и тепловых детекторов) применялись разработанные открытая и закрытая (газонаполненная) ионизационные двойные камеры, оптическая схема сопряжения которых в конкретном цикле экспериментов определяется спектральными, энерго-мощностными и пространственно-временными характеристиками регистрируемых потоков отраженного от мишени и зондирующего излучения.

Исследуемые массивные образцы конструкционных материалов толщиной  $\delta \sim 1 \dots 5$  мм устанавливаются с 3D-юстируемой подвижкой и внешним приводом в мишенной камере, а их нагрев осуществляется с помощью СО<sub>2</sub>-лазера мощностью  $\sim 80$  Вт, коллимированное излучение которого (плотность мощности  $\sim 40 \dots 100$  Вт/см<sup>2</sup>) через ИК-оптический канал камеры подается на тыльную сторону мишени. Объектом исследований служили плоские (в пределах пятна облучения) шлифованные образцы из высокотемпературных диэлектриков ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, MgF<sub>2</sub>, BNC) со случайной, не имеющей выделенного направления, структурой шероховатости (т.е. с размером шероховатости, превышающим длину волны зондирующего излучения).

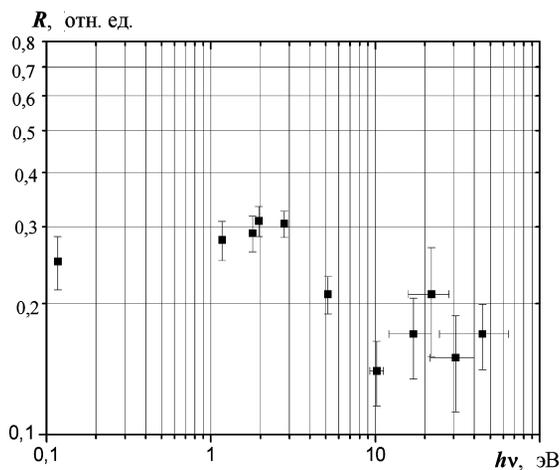
Методическая и инструментальная погрешности данной серии экспериментов в областях стандартных лазерных частот не превышают  $20\% \pm 3\%$ , для диапазона спектра  $h\nu_1 \sim 9,24 \dots 11,2$  эВ составляет  $\sim 35 \pm 5\%$ , а в области вакуумного ультрафиолета с  $h\nu > 11,2$  эВ —  $\sim 55 \pm 10\%$ . Тестовое исследование зависимости  $R(\lambda_l, T)$  для алюминиевых массивных мишеней ( $\Delta \sim 4$  мм) в фиксированных частотных интервалах ИК- и УФ-диапазонов спектра ( $\lambda_l \sim 10,6 \dots 0,241$  мкм) коррелирует с зависимостью  $R(\lambda_l, T)$ , определяемой теорией Друде для чистых металлов.

Некоторые результаты экспериментального определения температурной зависимости коэффициентов отражения ( $R(\lambda_l, T)$ ) на фиксированных лазерных частотах для ряда промышленных образцов конструкционных материалов в условиях воздействия низкой спектральной плотности мощности ( $I_0 \ll I_0^* \sim 10^3 \text{ Вт/см}^2$ ) зондирующего излучения — допороговой — для начала развития волны испарения на поверхности исследуемых мишеней приведены на рис. 2. На рис. 3 представлен пример типичных результатов измерения спектральной зависимости коэффициентов отражения  $R(\lambda)$  промышлен-



**Рис. 2.** 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 —  $\lambda_l = 1,06 \text{ мкм}$ , 2 —  $\lambda_l = 10,6 \text{ мкм}$ ),  $\rho \sim 3,971 \text{ г/см}^3$ ;  $\text{SiO}_2$  (3 —  $\lambda_l \sim 1,06 \text{ мкм}$ , 4 —  $\lambda_l \sim 10,6 \text{ мкм}$ ),  $\rho \sim 2,652 \text{ г/см}^3$ ; BNC (5 —  $\lambda_l \sim 1,06 \text{ мкм}$ , 6 —  $\lambda_l \sim 10,6 \text{ мкм}$ ),  $\rho \sim 2,344 \text{ г/см}^3$ ;  $I_0(\lambda_1 = 1,06 \text{ мкм}) = 2,3 \cdot 10^{-1} \text{ Вт/см}^2$ ,  $I_0(\lambda_2 = 10,6 \text{ мкм}) = 1,4 \text{ Вт/см}^2$

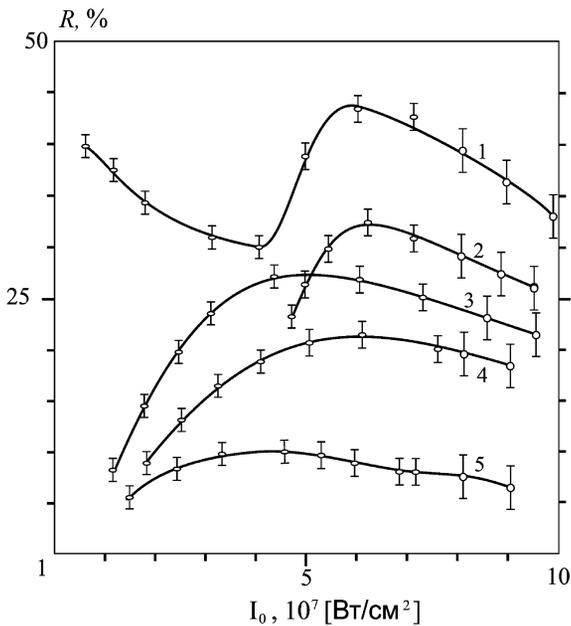


**Рис. 3.** Спектральная зависимость коэффициентов отражения BNC

ных плоских шлифованных образцов высокотемпературных диэлектриков  $[(\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3), \text{SiO}_2, \text{BNC}]$  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  $T \sim 300^\circ \text{K}$ ) 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.

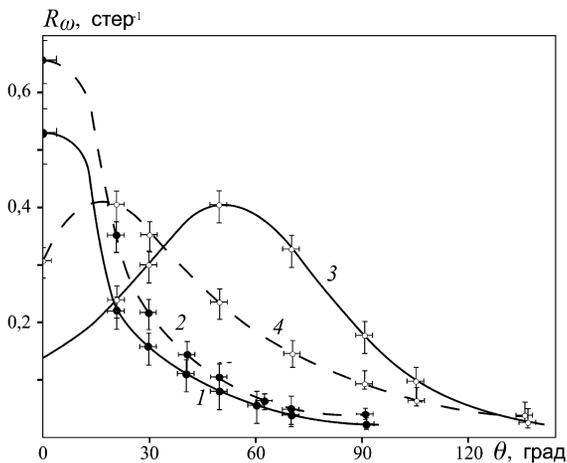
Хорошая воспроизводимость экспериментальных результатов  $R(\lambda_n)$  на лазерных частотах зондирования и  $R(\Delta\lambda)$  (при ВУФ-широкополосном) в диапазоне температур  $T \sim 300 \dots 850^0 \text{K}$  позволяет выявить основные закономерности частотного распределения коэффициентов отражения в ИК-ВУФ-областях спектра данного класса конструкционных материалов, которые могут быть использованы для спектрально-энергетического оптимизационного анализа лучевых энергоустановок с применением стандартного фотометрического оборудования.

В температурном диапазоне  $850 < T < 1900 \text{K}$  регистрируется значительный ( $\sim 30\%$ ) разброс значений  $R(\Delta\lambda)$  в ВУФ-области спектра, что требует статистического анализа инструментальной погрешности в каждом спектральном интервале ( $h\nu_2 \dots h\nu_5$ ) и дальнейшего развития экспериментальной технологии изучения спектрально-энергетических зависимостей  $R(\Delta\lambda, T, I_0)$  с использованием вторичных метрологических эталонов [9]. Характерной особенностью зависимостей  $R(I_0)$  (рис. 4) 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  $I_0$  ( $I_0 \geq I_0^{**}$ ). При плотности мощности потока излучения  $I_0 > 10^7 \text{Вт/см}^2$  и падении излучения по нормали на плоскую мишень (рис. 5) диаграмма направленности рассеянного лазерного излучения, соответствующая различной ориентации мишени относительно зондирующего луча, заметно отличается от закона Ламберта — поворот плоской мишени на угол  $45^\circ$  приводит к расширению диаграммы направленности и смещению ее вершины на угол  $\theta \sim 50^\circ$ . При увеличении плотности мощности потока лазерного излучения до  $I_{0\text{max}} \sim 2 \cdot 10^8 \text{Вт/см}^2$  угол поворота диаграммы направленности уменьшается до  $\theta \sim 20^\circ$ . Интегрирование диаграммы направленности (для нормального угла падения) в пределах полусферы дает значение направленно-полусферического коэффициента отражения  $R(\lambda_1) \sim 55\%$ . Результаты этих измерений, также как и относительно слабая зависимость диаграммы направленности от угла ориентации мишени при  $I_0 > 5 \cdot 10^7 \text{Вт/см}^2$ , соответствуют теоретически анализируемым в работе [9] значениям этой величины для более



**Рис. 4.** Зависимость интегрального коэффициента отражения от плотности потока  $I_0$  лазерного излучения для плоских мишеней различного химического состава:

1 –  $(\text{CH}_2\text{O})_n$ ,  $\lambda_2 \sim 1,06$  мкм; 2 –  $(\text{CH}_2)_n$ ,  $\lambda_2 \sim 1,06$  мкм; 3 –  $((\text{CH}_2)_n + \text{Al})$ ,  $\lambda_1 \sim 10,6$  мкм; 4 –  $(\text{C}_2\text{F}_4)_n$ ,  $\lambda_2 \sim 1,06$  мкм; 5 –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\lambda_1 \sim 10,6$  мкм



**Рис. 5.** Зависимость коэффициента отражения от угла рассеяния  $\theta$  при различных плотностях потока когерентного излучения:

1, 2 –  $I_0 \sim 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>,  $(\text{CH}_2\text{O})_n$ -мишень,  $\lambda_2 \sim 1,06$  мкм; 3, 4 –  $I_0 \sim 3,5 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>,  $(\text{CH}_2)_n$ -мишень,  $\lambda_2 \sim 1,06$  мкм; 1, 3 – нормальное падение луча; 2, 4 – угол падения  $\sim 45^\circ$

высоких значений  $I_0$  и коррелируют с особенностями динамики волны поглощения лазерного излучения на длинах волн  $\lambda_1 \sim 10,6$  мкм и  $\lambda_2 \sim 1,06$  мкм в газовой-плазменном слое у полимерной мишени в вакууме; соответствующие спектрально-яркостные характеристики

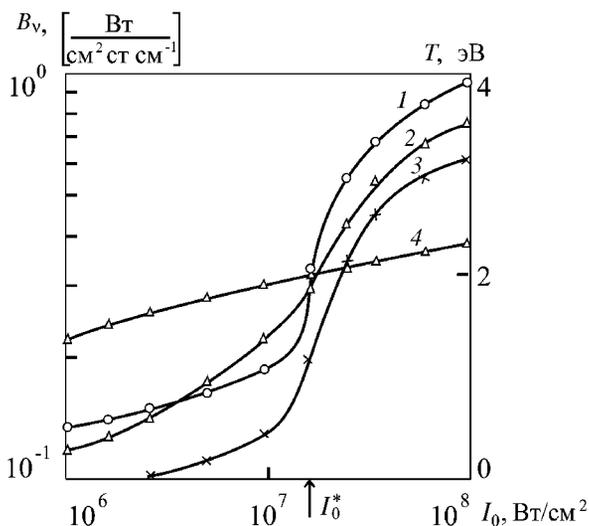


Рис. 6. Спектральная яркость  $B_\nu$  (1-3) и яркостная температура  $T_j$  (4) в ВУФ-области спектра приповерхностной лазерной плазмы плоской  $(\text{CH}_2\text{O})_n$ -мишени, средние по полосам поглощения ксенона (1, 4), гелия (2), оксида азота (3) при  $\lambda_{\text{ж}} = 1,06$  мкм

приведены на рис. 6 для условий, когда при пороговых интенсивностях воздействия  $I_0^{**}(\lambda)$  образуется лазерная детонационная ударная волна (УВ). Оценки плазменных параметров в условиях генерации УВ при  $I_0 > I_0^*(\lambda_1)$  (используя формализм работы [8] и таблицы термодинамических функций и ударных адиабат [9]) показывают существование внутри области поглощения лазерного излучения (между фронтом УВ и плоскостью Жуге) плазменных зон с критической концентрацией электронов ( $n_{e, \text{крит}} > 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ) для лазерного излучения с  $\lambda_1 \sim 10,6$  мкм, что является причиной сильного отражения лазерного излучения, наблюдаемого экспериментально. При увеличении  $I_0$  концентрация 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 [7], что и является причиной наблюдаемого уменьшения коэффициента отражения от приповерхностной зоны при дальнейшем росте  $I_0(t)$ .

При низких значениях плотностей потока излучения ( $I_0 < I_0^{**}$ ), вследствие возрастания времени плазмообразования  $t_{\text{п}}$ , увеличивается вклад в полные потери излучения за счет отражения лазерного

излучения непосредственно от поверхности мишеней, что объясняет увеличение доли отраженной энергии для мишени с высоким коэффициентом отражения. Вид относительного распределения зависимости  $R(\Delta\lambda)$  в области энергий квантов  $12 < h\nu < 70$  эВ соответствует экспериментальным данным для образцов лейкосапфира и оксида кремния марки КУ-1, полученных на синхротронном источнике [17] при  $T \sim 300$  К. В ИК-УФ-области фиксированных лазерных частот зондирования измеренные значения  $R(\lambda_n)$  для карбонирида бора (с учетом нелинейного распределения спектральной излучательной способности  $A(\lambda)$ ) в области температур  $T < 900$  К удовлетворительно (расхождения  $\sim 20\%$ ) соответствуют аналогичным абсолютным значениям  $R(\lambda_n)$  из базы данных NIST [17] и их частотной зависимости.

**Выводы.** Полученный массив экспериментальных результатов (частотные и температурные зависимости коэффициентов отражения, спектральные эмиссионные, абсорбционные и рефракционные характеристики ряда наиболее употребимых тугоплавких диэлектриков и высокотемпературных компаундов сложного химического состава) является частью 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 которой приводится в работе [15].

*Данный цикл исследований выполняется в рамках гранта Президента РФ № МД-1476, 2005.8*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Protasov Yu. S., Protasov Yu. Yu., Suslov V. I. Photon energy conversion: R & D of plasma optical converters of photon energy into electrical current / 35 Intersociety Energy Conversion Engineering Conference: AIAA paper № 2000-2887. N.Y.: AIAA, 2000. – 7 p.
2. Протасов Ю. Ю. Разработка и исследование параметрического ряда лазерных микроинжекторов плазмы сложного химического состава // 3-й Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии: Сборник материалов. Т. 1. Иваново, 2002. – С. 469–471.
3. Protasov Yu. Yu. About the efficiency of laser energy conversion in two stage pulsed laser accelerator // XXVII European Conference on Laser Interaction with Matter: Book of Abstracts. Moscow, 2002. – P. 51.
4. Caruso A., Strangio C. Studies on laser-matter interaction and ICF target design at the Frascati ICF physics and technology group of Enea // XXVII European Conf. on Laser Interaction with Matter: Book of Abstracts. Moscow, 2002. – P. 148–149.
5. Protasov Yu. S., Protasov Yu. Yu., Telekh V. D. Thermo-optical characteristics of refractory dielectric materials in a field of high intensity radiation // VIII International Conference “Dielectric Materials, Measurements and Applications”: IEE Conference Publication No 473. Edinburgh, 2000. No 473. – P. 440–444.

6. Protasov Yu. Yu. About phase transitions stimulated by laser radiation // The Physics of Heat Transfer in Boiling and Condensation / Ed. A.I. Leontiev. – M.: Nauka, 1997. – P. 504–511.
7. Hutchinson H. The high power laser interaction program at the Rutherford appleton laboratory // XXVII European Conf. on Laser Interaction with Matter: Book of Abstracts. Moscow, 2002. – P. 117–118.
8. Donaldson T. P., Hubbard M., Spalding I. J. Reflection and scattering from CO<sub>2</sub>-laser-generated plasma // Phys. Rev. Lett. 1976. V. 37, № 20. – P. 1348–1351.
9. Arves J. P., Akyuzlu K. M. An Analytical Study of the Effect of Combined Radiation and Convection on the Initiation of Ablation in Isotropic solids // AIAA paper. – 2000. – № 2000-92. – 6 p.
10. Протасов Ю. Ю., Щепанюк Т. С. Экспериментальное исследование прозрачности оптических материалов для УФ-излучения в условиях радиационно-газодинамического взаимодействия // ТВТ. – 2003. – Т.41, № 3. – С. 98–107.
11. Protasov Yu. Yu. Spectral-Brightness characteristics of laser-matter near polymeric surface interaction // J. of Applied Spectroscopy. - 2003. – V. 70, № 1. – P. 58–65.
12. Protasov Yu. Yu., Semenov A. M. About the coefficient of reflectivity from lighterossion targets in vacuum // J. of Applied Spectroscopy. – 2003. – Т. 70, № 3. – P. 89–95.
13. Протасов Ю. Ю., Щепанюк Т. С., Христофоров В. В. Экспериментально-диагностический опто-теплофизический модуль стенда “Луч” // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия “Машиностроение”. – 2002. – № 4. – С. 99–107.
14. Газоразрядная электроника / Под. ред. Ю.С.Протасова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2003.
15. Энциклопедия низкотемпературной плазмы: Вводный том / Под ред. В.Е. Фортова. М.: Наука, 2002.

Статья поступила в редакцию 1.07.2005

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 — д-р физ.-мат наук, ведущий научный сотрудник объединенного УНЦ фотонной энергетики. Автор более 70 научных работ в области оптики конденсированных сред.

V.V. Khristoforov — DSc (Phys.-Math.), researcher of United Center for Photon Power-Engineering. Author of over 70 publications in the field of optics of condensed media.