

Ю. Ю. Протасов, В. В. Христов

**ОБ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ
ИССЛЕДОВАНИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ
ПРОЗРАЧНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ
В УСЛОВИЯХ МНОГОФАКТОРНЫХ
ЛУЧЕВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

Описан разработанный экспериментально-диагностический модуль для исследования ультрафиолетовой прозрачности оптических кристаллов в условиях многофакторных лучевых воздействий высокой плотности мощности. Кратко рассмотрены спектрально-энергетические характеристики светозрительно-инжектора высокоэнтальпийных интенсивно излучающих газоплазменных потоков и генератора сильных ударных волн в вакууме и газовых средах, необходимые для моделирования радиационно-газодинамических процессов взаимодействия и определения условий проявления эффекта накопления поверхностных и объемных лучевых повреждений оптических материалов.

Для практической реализации импульсно-периодических (ИП) режимов работы плазменно-лазерных устройств высокой плотности мощности (лазерных инжекторов и конверторов лазерного когерентного излучения в электрическую энергию, плазменно-оптических преобразователей [1, 2] и др.) необходима разработка высокоресурсных оптических узлов ввода мощного лазерного и теплового ультрафиолетового (УФ) излучения на основе градиентной и линзовой оптики, оптимально оптически сопряженных с высокотемпературной активной зоной. Наиболее технологически изученными оптическими материалами для частотных (ИП) лазерно-плазменных преобразователей излучения являются УФ-ИК-кристаллы и стекла с комбинированной (и полимерной) матрицей [3]. Перспективными являются и УФ-ВУФ оптические кристаллы фторидов кальция (CaF_2), бария (BaF_2), стронция (SrF_2), лейкосапфира ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) с коротковолновыми границами прозрачности ($\lambda_{\text{гр}} \approx 117; 129; 129$ и 142 нм соответственно) и кварца. Однако применение этих кристаллов в условиях непосредственного контакта с высокотемпературными излучающими газоплазменными средами сопровождается интенсивным испарением приповерхностного слоя и широкополосной экранировкой падающего лазерного (или мощного теплового) излучения продуктами светозрории при проявлении так называемого эффекта обратимой непрозрачности оптических материалов [4] (теплового запираания оптических кристаллов) и ряда других нелинейных радиационно-газодинамических

(РГД) эффектов [5], что приводит к ограничению ресурса оптических трактов в целом. Кроме того, известно, что стойкость оптических материалов к мощному лазерному и тепловому излучению в режиме многократного (в том числе и ИП) воздействия в ИК-УФ-диапазоне спектра существенно ниже, чем при однократном облучении. Среди причин, ответственных за снижение оптической прозрачности, наиболее вероятной является накопление микроразрушений вследствие необратимых изменений в матрице кристалла вокруг инициирующих поглощающих дефектов в ИП-режиме. Динамика таких изменений в оптических материалах изучается различными методами: по кинетике рассеяния падающего излучения и свечения, сопровождающего процесс разрушения, по электронной, инфракрасной, ультразвуковой спектроскопии и лазерной калориметрии [6]. В условиях радиационно-газодинамического воздействия эффект накопления оптических повреждений (на поверхности или/и в объеме оптического материала), проявляющийся в результате воздействия серии импульсов мощного излучения в цуге с интенсивностью I'_0 , ниже порога одноимпульсного разрушения I''_0 , является основным препятствием при создании высокоресурсной оптики. Важное значение имеет анализ поверхностного разрушения оптических элементов и трактов ввода излучения при контакте с активной средой (газо-плазменным потоком), так как спектрально-энергетические и динамические пороги поверхностного разрушения значительно ниже потоков объемного разрушения. В связи с этим исследование РГД-процессов ИП-взаимодействия потоков коротковолнового излучения с различными оптическими материалами представляет несомненный интерес и имеет практическое значение. Как показано в работе [7], поток излучения I'_0 , при котором начинается процесс испарения, например, кварцевых (SiO_2) окон — $I'_0 \sim (At_{\text{исп}} \sim 1,21(\rho c \lambda)^{1/3} A^{1/3} \Delta T_{\text{исп}}^{2/3})$, Вт/см², а пороговая энергия поглощаемого излучения $E'_\Pi \sim 0,5 I'_{0\text{исп}} t_{\text{исп}} \sim 0,73(\rho c \lambda)^{2/3} \Delta T_{\text{исп}}^{4/3} A^{-1/3}$, кДж/см² (для кварца КУ-1 $\Delta T_{\text{исп}} \approx 4$ кК), откуда следует, что чем больше скорость нарастания импульса теплового потока A , тем ниже пороговая энергия, при которой наступает испарение, и тем выше поток излучения, который можно транспортировать через оптическую стенку. Связь между временем начала испарения $t_{\text{исп}}$ (или длительностью фронта импульса τ_Φ) и пороговым тепловым потоком, при котором начинается развитое испарение, например для кварца, можно представить выражением вида $t_{\text{исп}} \sim \tau_\Phi \sim 1,21(\rho c \lambda)^{1/3} (\Delta T_{\text{исп}})^2 / I_{0\text{исп}}^2 \approx 6,9 \times 10^5 / I_{0\text{исп}}^2$. Если излучение активной среды, находящейся в контакте с оптическим кристаллом, близко к излучению черного тела, то уравнение связи теплового потока $I'_{0\text{исп}}$ с эффективной яркостной температу-

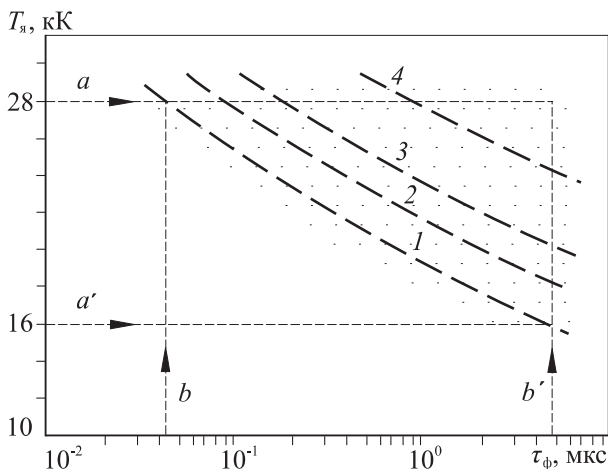


Рис. 1. Зависимость максимальной яркостной температуры излучения $T_{я}$, транспортируемого через оптическую стенку, от длительности переднего фронта светового импульса для кварца следующих марок: КИ, $\lambda_{гр} \sim 1,85$ мкм (1); КВ, $\lambda_{гр} \sim 0,220$ мкм (2); КУ-1, $\lambda_{гр} \sim 0,165$ мкм (3) и флюорита, $\lambda_{гр} \sim 0,125$ мкм (4)

рой $T_{я}$ имеет следующий вид: $I'_{\text{инсп}} \sim \pi \int_{h\nu_{гр}}^{\infty} B_{\nu}(T_{я}) d\nu B_{\nu}$, где $B_{\nu}v(T_{я})$ —

спектральная яркость абсолютно черного тела с температурой $T_{я}$; $h\nu_{гр}$ — коротковолновая граница пропускания ряда оптических материалов окон (рис. 1).

Экспериментальные условия и результаты. Исследования транспортных характеристик оптических окон проводились при анализе их абсорбционных спектров и эмиссионных спектров излучающих газоплазменных активных сред сложного химического состава (как светоэрозийных, так и с добавлением буферных газов-наполнителей (Xe, воздух) различного давления, выполняющих роль газового фильтра для УФ-излучения и модификации эмиссионного (зондирующего) спектра).

Для исследования радиационно-газодинамических процессов взаимодействия с оптическими материалами разработан экспериментальный диагностический модуль на основе инжекторов излучающих газоплазменных потоков различного химического состава, позволяющий моделировать многофакторные процессы лучевого воздействия когерентного и широкополосного (теплового) излучения, ударных волн (УВ) и конвективных потоков с оптическими элементами и конструкционными материалами в ИП-режиме (в том числе и с необходимой для ускоренных ресурсных испытаний оптических узлов плотностью мощности излучения I_0^{Σ}). Модульный принцип созданного экспериментального модуля позволяет использовать различные типы инжекто-

ров высокоэнтальпийных излучающих газоплазменных потоков сложного химического состава.

Экспериментальный модуль состоит из трех сопряженных блоков — блока светоэрозионных инжекторов газоплазменных потоков необходимого химического и ионизационного состава и плазмодинамического генератора сильных ударных волн, камеры транспортировки, нагрева и УВ-ускорения потоков со сменными оптическими узлами и газодинамического насадка, соединенного с ловушкой-калориметром высокоэнтальпийного потока на срезе. В светоэрозионном инжекторе для генерации и нагрева газоплазменного потока используется широкополосное высокояркостное ($T_{\text{я}} \sim 40$ кК) УФ-излучение ($186 < \lambda < 250$ нм) пространственно локализованной ускоренной плазмы. Принцип действия и основные динамические, спектрально-энергетические и яркостные характеристики плазмодинамического источника излучения описаны в работе [7]. Следует отметить, что интенсивные многофакторные процессы взаимодействия радиационных и конвективных тепловых потоков в излучателе представляют непосредственный интерес для проведения ускоренных ресурсных испытаний оптических кристаллов, используемых в окнах и каналах ввода теплового излучения. Схема разработанного светоэрозионного инжектора — генератора ускоренных газоплазменных потоков сложного химического состава — представлена на рис. 2. Инжектор выполнен в виде трех сопряженных в одном корпусе узлов: широкополосного плазмодинамического УФ-излучателя лампового типа I, мишенной камеры II и газодинамического насадка III. Для генерации высокоскоростных плазменных потоков в блоке излучателя применен электромагнитный ускоритель эрозионного типа [1, 8], включенный через тригatronный вакуумный разрядник в электротехнический контур с параметрами $C_0 \sim 48 \dots 96$ мкФ; $U_0 \sim 3,5 \dots 5$ кВ; $W_0 \sim 600 \dots 1200$ Дж; $L_{\Sigma} \approx 40$ нГн. Состав электроразрядной плазмы определяется продуктами разложения диэлектрической $(\text{CH}_2\text{O})_n$ втулки, разделяющей вольфрамовые электроды ускорителя.

При энергии разряда $W_0 \sim 600$ Дж импульс тока содержит три полупериода длительностью $\tau_{u/2} \sim 5$ мкс и максимальным значением тока ~ 100 кА; в первом полупериоде разряда выделяется 85 % запасаемой электрической энергии; пиковая мощность контура составляет ~ 200 МВт. Мишенная камера II светоэрозионного инжектора установлена в цилиндрическом корпусе 11 и содержит диэлектрическую цилиндрическую втулку 9 с аблирующей мишенью 6 (плоской или с развитой поверхностью), установленную в цилиндрическом стакане 10, имеющем подвижку в осевом направлении с помощью юстируемых стержней 12 и фиксируемых в цилиндрическом корпусе стакана с

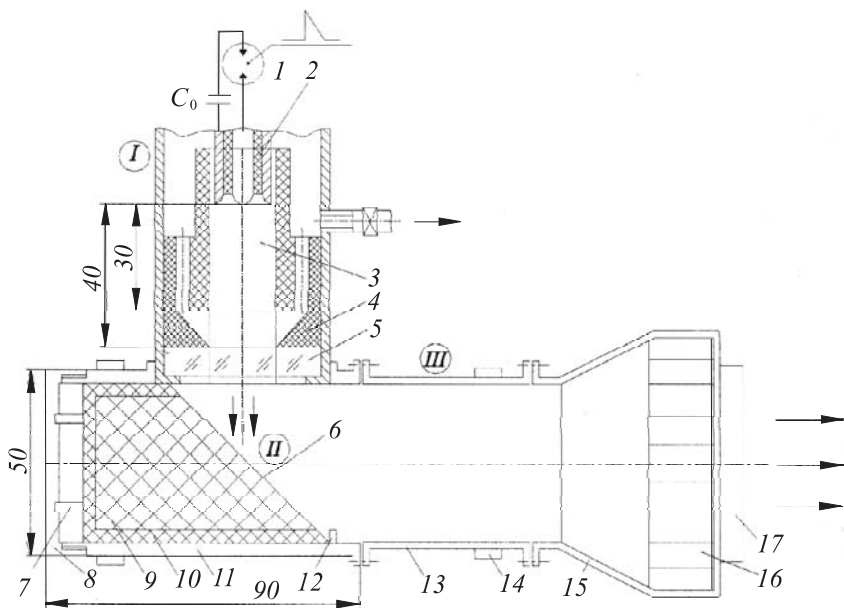


Рис. 2. Схема светорозийного генератора — источника газополазменных потоков:

1 — управляемый разрядник; 2 — магнитный компрессор эрозийного типа; 3 — диэлектрический плазмодод; 4 — диэлектрический конфузор; 5 — кварцевое окно; 6 — мишень; 7 — полукольцевая крышка; 8 — полукольцевая втулка; 9 — опорная втулка; 10 — юстируемый стакан; 11 — корпус мишенильной камеры; 12 — фиксатор; 13 — корпус газодинамического узла; 14 — юстируемые опорные кольца; 15 — ловушка-калориметр; 16 — конфузор-диффузор; 17 — газодинамический насадок

помощью полукольцевых втулок 8 и крышки 7. Секция 13 корпуса источника соединена соосно с газодинамическим насадком 17, который в зависимости от давления в зоне инъекции газоплазменного потока выполняется в виде конического или профилированного конфузора-диффузора 16. С помощью опорных колец 14, установленных на корпусе, и фланцев с прокладками производится радиальная юстировка источника. Формируемый эрозийным ускорителем 2 плазменный поток 3 со скоростью $v_{пл0} \sim 3 \dots 5 \cdot 10^6$ см/с втекает в разрядную камеру 4 с кварцевым (КУ-1) окном 5, заполненную газом (Xe) с начальной плотностью, значительно превышающей плотность высокоскоростной плазмы. При этом 80...90% кинетической энергии высокоскоростного потока переходит во внутреннюю энергию ударно-сжатой плазмы и излучается, причем температура этой плазмы ($T_{пл1} \sim 8 \dots 11$ эВ) определяет сверху уровень достижимых радиационных потоков. Газ за фронтом ударной волны выполняет роль эффективной газовой защиты оптической стенки, поглощая излучение ударно-нагретой плазмы, с длинами волн, короче собственного потенциала ионизации.

Максимальные яркостные температуры излучения $T_{\text{я}} \sim 31 \pm 2 \text{ кК}$ достигаются в спектральной области $\lambda \sim 250 \dots 180 \text{ нм}$. При взаимодействии коротковолнового УФ-излучения источника с плотностью мощности $I_0 \sim 1,0 \dots 1,5 \cdot 10^7 \text{ Вт/см}^2$ в ближней зоне с мишенью β в камере II в результате многофакторных процессов светоэрозии (фотодеструкции полимеров, термического пиролиза) происходит ряд последовательных стадий генерации паро-газового потока аблирующего материала (фазовые переходы “твердое тело–газ”) и нагрев пара в зоне взаимодействия широкополосным УФ-излучением вплоть до температур термической ионизации с образованием УВ в зоне взаимодействия. Скоростные характеристики газоплазменного потока определяются температурой расширяющейся среды в зоне газодинамического ускорения и в зависимости от давления среды за срезом могут изменяться в широких пределах — от дозвукового до сверхзвукового режимов. Для инжектора высокоэнтальпийных излучающих потоков необходимо определенным образом соотносить тепловую и кинетическую составляющие потока за срезом, выбирая размерные соотношения газодинамических узлов $16, 17$ и регулировочные параметры излучателя (W_0, I_0). Измерение масс-расходных характеристик светоэрозионного инжектора выполнено для широкого класса легкоаблирующих сред на основе плазмообразующих элементов полимерного ряда сложного химического состава: $(\text{CH}_2\text{O})_n, (\text{CH}_2)_n, (\text{C}_2\text{F}_4)_n$ $[(\text{CH}_2\text{O})_n + \text{Al} + \text{Bi}]$, некоторые результаты приведены на рис. 3. Основные размерные соотношения узлов излучателя и мишенной камеры модуля выбраны, исходя из условия обеспечения в зоне радиационно-газодинамического взаимодействия максимального поглощения широкополосного УФ-излучения аблирующей мишенью и потоком пара. Частотные характеристики инжектора (частота повторения импульсов и скважность) определяются параметрами формирующего RLC-контура модуля излучателя и ограничены частотными возможностями управляемого вакуумного разрядника I .

Для генерации сильных УВ в светоэрозионном потоке в экспериментальном модуле применен плазмодинамический генератор бестоковых УВ, описанный в работе [8]. На рис. 4 в координатах $T/T', \rho/\rho', x/x'$ приведены графики распределения температуры и плотности, а также результаты автомодельного решения для плоской взрывной волны, формируемой плазмодинамическим генератором.

Совместное применение этих инжекторов существенно расширяет экспериментальные возможности разработанного модуля и позволяет осуществить непосредственный контакт оптических элементов с ускоренным интенсивным излучающим газоплазменным потоком и с

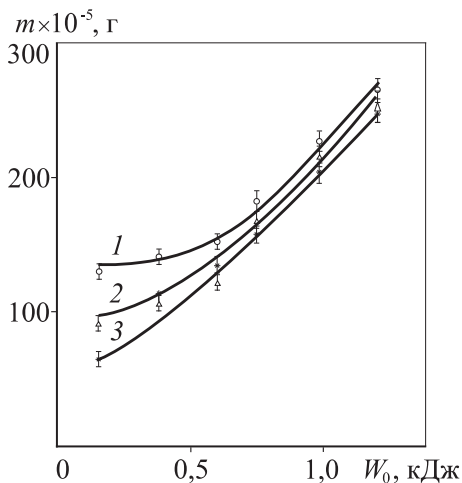


Рис. 3. Масс-расходные характеристики импульсного инжектора в вакууме ($p_0 \sim 10$ Па) для различных аблирующих мишеней:
 $(\text{CH}_2\text{O})_n$ — 1; $(\text{CH}_2)_n$ — 2;
 $(\text{C}_2\text{F}_4)_n$ — 3

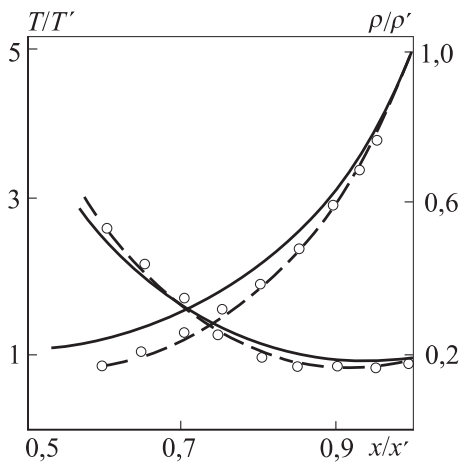


Рис. 4. Графики распределения температуры и плотности в плазменно-динамическом генераторе сильных ударных волн

газовой защитой оптических окон камер, расположенных в патрубках и камерах нагрева и ускорения под различным углом к оси потока.

Выполненный анализ эмиссионных спектров зоны взаимодействия излучающего потока, качественно отражающей эффективность транспортировки зондирующего излучения плазмы через оптические стенки камеры отбора излучения, показывает, что непрерывное излучение потока светоэрозивной плазмы регистрируется

B_v , отн.ед.

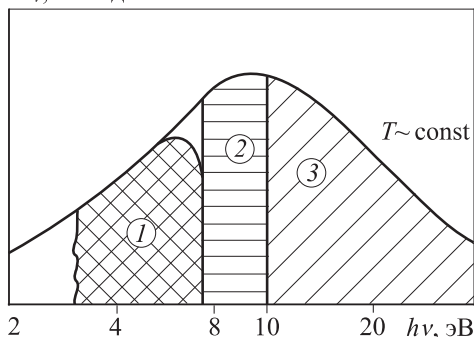


Рис. 5. Об особенностях транспортировки излучения газоплазменного потока через оптические материалы:

1 — поток излучения в зоне воздействия;
 2 — поглощение в окне (лейкосапфир);
 3 — поглощение в холодном газе; изотерма АЧТ $T \sim 3$ эВ

во всей области спектральной чувствительности измерительной аппаратуры. Основные балансовые соотношения при транспортировке излучения потока через оптические материалы представлены на рис. 5, а яркостные характеристики излучающих потоков — на рис. 6. Характерной особенностью спектров излучения, регистрируемых через УФ-кристаллы, является наличие молекулярных полос поглощения кристаллов, обусловленных поглощением электронных (F)-центров окраски, образующихся

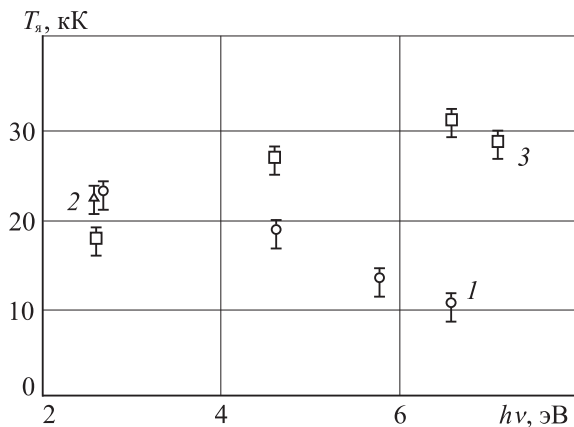


Рис. 6. Спектральные зависимости яркостной температуры излучения для $p \sim 1$ (1) и $p_{Хе} \approx 200$ (2), 10^3 (3) Па

под воздействием излучения в области собственного поглощения. Максимальные спектральные яркости и яркостные температуры при регистрации излучения через эти окна достигаются в ВУФ-области ($\lambda \sim 180 \pm 20$ нм); в коротковолновой области наблюдается спад интенсивности излучения, что связано с уменьшением коэффициента пропускания кристаллов и наступлением обратимой непрозрачности. Наблюдаемое изменение регистрируемой яркости излучения в видимой и ближней УФ-областях спектра связано с существованием наведенных полос поглощения и экранировкой излучения продуктами эрозии кристаллов. Увеличение интенсивности падающего (зондирующего) излучения (при росте вводимой в разряд излучателя энергии) приводит к росту доли жесткой компоненты излучения в эмиссионном спектре и, как следствие, к “тепловому запираению” кристаллов, что соответствует и результатам спектроскопических исследований. Комплекс радиационно-газодинамических процессов взаимодействия излучения с УФ-кристаллами не ограничивается эффектами обратимой непрозрачности кристаллов и появлением наведенных полос поглощения. Воздействие мощных потоков ВУФ-излучения плазмы на кристаллы приводит и к необратимым изменениям поверхностной макроструктуры и их оптических характеристик (т.е. к проявлению эффекта накопления поверхностных повреждений). При росте интенсивности излучения на $\sim 40\%$ скорость фототермической деградации кристаллов увеличивается примерно в 2 раза и наиболее сильно эффект старения кристаллов проявляется в области энергий квантов $h\nu > 6$ эВ, при этом уменьшение прозрачности кристаллов в зоне РГД-воздействия обусловлено радиационными потоками, а не возможной конденсацией продуктов рекомбинации активной среды.

Используя разработанный диагностический модуль, можно исследовать реализацию различных технологических способов повышения ресурса оптических кристаллов в импульсно-периодических режимах взаимодействия с активной газоплазменной средой сложного химического состава и транспортировки мощных потоков УФ-излучения через оптические кристаллы [8–10].

В заключение авторы благодарят Ю.С. Протасова и Т.С. Щепанюка за помощь в работе и обсуждение результатов.

Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации № МД-1476.2005.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиационная плазмотика. Т. 1 / Под ред. Протасова Ю.С. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 860 с.
2. Protasov Yu. S., Protasov Yu. Yu. Telekh V. D. Experimental research of radiative gasdynamic and thermophysical processes in plasma optical converter of laser radiation into AC electrical current // XXVII European Conference on Laser Interaction with Matter: Book of Abstracts. – Moscow, 2002. – PP. 50.
3. Огурцова И. И., Подмошенский И. В., Шелемина В. М. Спектральное поглощение кварцевого стекла при температурах 3000–4000 К // ТВТ. – 1978. – Т. 16; № 4. – С. 744.
4. Подмошенский И. В. Плазменные источники с высокой интенсивностью излучения // ОМП. – 1979. – № 1. – С. 9.
5. Protasov Yu. S., 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. – PP. 51.
6. Гарнова Е. А., Геда 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.
7. Камруков А. С., Козлов Н. П., Протасов Ю. С. Плазмотические источники излучения высокой спектральной яркости. В кн. “Радиационная плазмотика”. Т. 1 / Под ред. Протасова Ю.С. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – С. 11.
8. Энциклопедия низкотемпературной плазмы: Вводный том. Кн. 2 / Под ред. В.Е. Фортова. – М.: Наука, 2001. – С. 125–305.
9. Protasov Yu. Yu. About phase transitions stimulated by laser radiation / in “The Physics of Heat Transfer in Boiling and Condensation” ed A.I. Leontiev. – М.: Nauka, 1997. – PP. 504–511.
10. Protasov Yu. Thermo-Optical characteristics of refractory dielectric materials in a field of high intensity radiation // IEE conference Publication. London, 2000. № 473. – P. 440–445.

Статья поступила в редакцию 11.05.2004

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 Института спектроскопии РАН. Автор более 50 научных работ в области атомно-молекулярной спектроскопии.

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

НАВИГАЦИОННЫЕ И ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.7.054.07

В. В. Лукьянов

ПЕРСОНАЛЬНЫЙ НАВИГАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС

Рассмотрен первый отечественный малогабаритный персональный навигационный комплекс, разработанный в Лаборатории инерциальных геодезических систем МГТУ им. Н.Э.Баумана. Комплекс интегрирует показания инерциальных (акселерометров и гироскопов) и неинерциальных (приемника спутниковых сигналов GPS/ГЛОНАСС, магнитометров, баровысотомера) измерительных датчиков и обеспечивает пользователю непрерывную навигационную информацию в течение всего времени функционирования в любом окружении.

В связи с изменением военно-политической обстановки в мире в ведущих зарубежных странах пересматриваются военные доктрины и принципы строительства вооруженных сил, интенсивно отрабатываются концепции ведения боевых действий армии XXI в. Так, в основе разрабатываемой новой военной доктрины США лежит принцип “быстроты и мобильности”, а во главу угла ставится “способность одновременной синхронизированной атаки на разные цели с применением