

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ СТРАНЫ

УДК 621.373.826.029.71/73

ИК-ОПТИКА СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АЭРОЗОЛЬНЫХ И ГАЗОВЫХ КОМПОНЕНТ АТМОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ ФТОРИДА БАРИЯ

С.Г. Казанцев
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

Представлены результаты экспериментальных исследований по применению монокристаллов BaF_2 в качестве материала элементов оптических трактов широкоапертурных импульсных лазеров среднего ИК-диапазона, применяемых в лидарных системах дистанционного зондирования аэрозольных и газовых компонент атмосферы.

Ключевые слова: лидар, аэрозольные и газовые компоненты, дистанционное зондирование атмосферы, монокристалл, CO_2 -лазер, плазменные образования.

Лидар – это технология получения и обработки информации об удаленных объектах с помощью активных лазерных систем, основанная на отражении и рассеянии лазерного излучения в прозрачных средах.

В частности, дистанционное зондирование аэрозольных и газовых компонент атмосферы позволяет проводить регистрацию ее оптико-физических параметров: тонкой структуры колебательно-вращательных спектров молекул, неселективного поглощения оптического излучения молекулами и аэрозольными микрочастицами, нелинейного поглощения лазерного излучения молекулами и др.

Как прибор лидар представляет собой, как минимум, активный лазерный дальномер, с помощью которого возможно производить обнаружение, определение координат и распознавание различных объектов. Для этих целей наиболее предпочтительны импульсные CO_2 -лазеры ($\lambda = 10,6$ мкм), имеющие высокий КПД (~10%) и мощность излучения, достигающую в импульсном режиме $10^4 - 10^{10}$ Вт [1 – 4].

Разработка проходной оптики мощных широкоапертурных импульсных лазеров среднего ИК-диапазона сопряжена с необходимостью обоснованного выбора материалов, удовлетворяющих определенным требованиям, основными из которых являются [5 – 8]:

- низкий коэффициент объемного поглощения β на рабочей длине волны λ ;
- низкий показатель преломления n , определяющий потери энергии на отражение R от граней оптического элемента, и его низкая температурная зависимость dn/dt ;
- низкий коэффициент линейного расширения α ;
- высокая теплоёмкость c и теплопроводность k ;
- высокие механические свойства (модуль Юнга E , модуль разрыва σ_r , твёрдость);
- высокая температура плавления, T_s ;

- устойчивость к воздействию атмосферы;
- возможность получения заготовок больших размеров D_{max} и наличие их промышленного производства;
- технологичность оптической обработки;
- низкая стоимость материала и готового оптического элемента.

Наиболее перспективными для оптики мощных импульсных CO_2 -лазеров по совокупности оптико-физических, технологических и коммерческих параметров считаются монокристаллы $ZnSe$, $CdTe$, KCl и $NaCl$ [5, 6].

Монокристаллы BaF_2 традиционно используются для изготовления элементов проходной оптики химических (HF, DF) и CO -лазеров, так как на волне 10,6 мкм, приходящейся на длинноволновый край спектрального диапазона кристаллов, имеют высокий коэффициент поглощения. Однако они выгодно отличаются от полупроводниковых кристаллов низким коэффициентом преломления, а от ионных – низкой гигроскопичностью и более высокими теплофизическими и механическими свойствами. Кроме того, имеются экспериментальные данные о более высокой стойкости BaF_2 к воздействию сфокусированного импульсного лазерного излучения с $\beta = 10,6$ мкм по сравнению с KCl , $NaCl$ и $ZnSe$ [7, 9, 10].

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований стойкости монокристаллов BaF_2 к воздействию широкоапертурного излучения CO_2 -лазера, морфологии и механизмов их повреждения, а также возможности применения в качестве материала для изготовления элементов силовой лазерной оптики.

Основные оптические характеристики кристаллов, традиционно применяемых для изготовления элементов силовой ИК-оптики, а также монокристаллов BaF_2 , приведены в таблице [7, 8, 11].

Основные оптические характеристики материалов силовой ИК-оптики

Кристалл	Область прозрачности, мкм	Коэффициент поглощения (10,6 мкм)		Коэффициент преломления n (10,6 мкм)	dn/dt , 10^{-5} K^{-1}	R , % (10,6 мкм)
		β_{th} , см^{-1}	β_{exp} , см^{-1}			
Ge	1,8 – 20	$2 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$	4,0026	26,8	52,9
CdTe	0,9 – 31	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$	2,67	10,7	37
GaAs	1,0 – 15	$1 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-3}$	3,04	18,7	45
ZnSe	0,5 – 22	$1 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$	2,4033	6,28	31,1
ZnS	1,0 – 12	$1 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	2,1935	4,25	27
KRS-5	0,6 – 40	$8 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-4}$	2,3713	-23,7	36
KRS-6	0,4 – 30	$6 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$	2,18	-18,6	25
NaCl	0,17 – 17	$1 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	1,4947	-3,63	8,7
KCl	0,18 – 20	$7 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-5}$	1,4540	-3,62	7,6
KBr	0,21 – 25	$2 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-3}$	1,5250	-4,0	9,1
BaF₂	0,15 – 12	$1,3 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$	1,39	-1,55	7,2

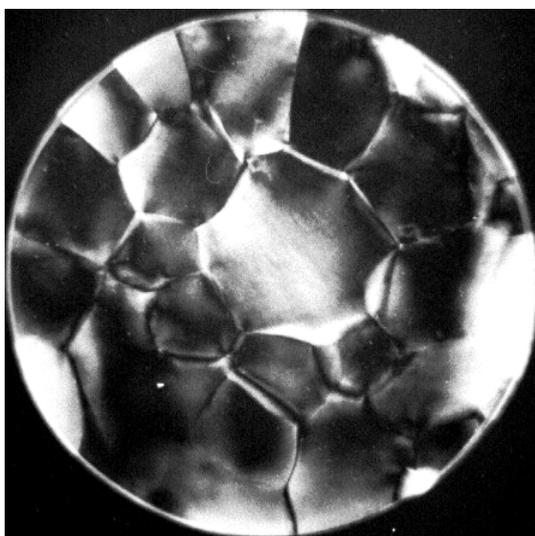


Рис. 1. Вид оптического элемента в поляризованном свете

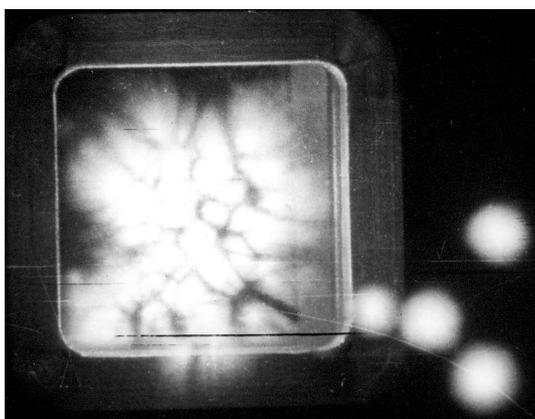


Рис. 2. Плазменные образования, возникающие при оптическом пробое вблизи поверхности оптического элемента

Как видно из таблицы, монокристаллы BaF₂ оптимально сочетают низкие потери на отражение при минимальной температурной зависимости коэффициента преломления, что весьма важно для оптических трактов лидаров, зондирующих атмосферу на значительных расстояниях, и может иметь решающее значение при выборе материала для изготовления оптических элементов.

Для исследования лазерной стойкости монокристаллического BaF₂ были изготовлены оптические элементы из кристаллов промышленного качества. Из каждой монокристаллической заготовки вырезался образец-свидетель для определения коэффициента поглощения калориметрическим методом.

Монокристаллы BaF₂ были выращены способом направленной кристаллизации, имели крупноблочную структуру с характерными размерами блоков 5 – 100 мм (рис. 1), β составлял $\sim 0,15 - 0,17 \text{ см}^{-1}$. Оптические элементы изготавливались методом глубокой шлифовки-полировки на стеклянном полировальнике шлифпорошками М28, М14, М5 в 7% растворе H₂SO₄ с финишной полировкой на микропорошке АСМ 1/0 в 2% растворе H₂SO₄ и представляли пластины размером $\varnothing 150 \times 23 \text{ мм}$.

В качестве источников излучения были использованы CO₂-лазеры трех типов: импульсные и импульсно-периодические ТЕА, квазинепрерывный газодинамический и непрерывный электроионизационный. Оптические схемы испытательных стендов и параметры лазеров подробно описаны в работах [12 – 15].

Для исследования динамики временных, пространственных и спектральных характеристик плазменных образований, возникающих при оптическом пробое (рис. 2), использовались регистрационные и высокоскоростные фотокамеры со спектральными насадками в режиме непрерывной и покадровой развёртки.

В результате испытаний установлено, что в зависимости от режима облучения и интенсивности подводимого лазерного излучения в кристаллах возникают повреждения, отличающиеся порогом образования и степенью разрушения оптического элемента. При импульсном воздействии по мере увеличения интенсивности излучения от импульса к импульсу вначале происходит абляция поверхности кристалла, затем в объёме образуются сферические поры, каверны произвольной формы и трещины.

Повреждения поверхности оптических элементов представляют собой мелкую сетку трещин глубиной 0,1 – 1 мм и протяжённостью 1 – 20 мм, ориентированных по плоскостям {100}, направления которых соответствуют ориентации блоков, выходящих на поверхность кристалла (рис. 3).

Значения плотности энергии лазерного излучения W , при которых возникали повреждения поверхности, составляли 6 – 12 Дж·см⁻² (для импульсов длительностью $\tau \sim 1$ мкс).

Спектрофотометрические исследования плазменных образований, возникающих при оптическом пробое вблизи поверхности оптических элементов, проведённые по методике, аналогичной [13, 15], свидетельствуют в пользу многостадийного механизма повреждения поверхности монокристаллов ВаF₂, предложенному в работе [13] для щёлочно-галогидных кристаллов.

При сопоставлении вида плазмообразования и картины двулучепреломления в кристаллах ВаF₂ было обнаружено структурирование плазмы оптического пробоя вблизи поверхности оптического элемента в соответствии со структурой кристалла (см. рис. 1, 2). Причиной этого возможно является взаимодействие плазмы оптического пробоя с лазерным излучением, отражённым от внутренних граней блоков кристалла. Что в свою очередь также может подтверждать справедливость предположения об определяющем влиянии взаимодействия подводимого и отражённого от поверхности излучения на ранних стадиях возникновения и развития оптического пробоя, предложенного в [13, 15].

Под действием импульсов лазерного излучения с более высокой интенсивностью в результате оптического пробоя на поглощающих микронеоднородностях в объёме кристаллов возникали повреждения, представляющие собой сферические полости диаметром не более 5 – 10 мкм, окружённые докритическими микротрещинами, ориентированными по плоскостям спайности (рис. 4, а). Установлено, что полости являются локальными концентраторами внутренних напряжений – вокруг них наблюдаются розетки двулучепреломления, длина лучей которых достигает 100 – 300 мкм (рис. 4, б).

Значения W , при которых возникали объёмные повреждения, составили 10 – 22 Дж·см⁻² ($\tau \sim 1$ мкс).

Повреждения, возникавшие в кристаллах под действием коротких серий импульсов ($t_p \leq 0,1 - 1$ с) при импульсно-периодическом режиме облучения, сходны с теми, что возникают при импульсном облучении, при этом заметного изменения величины внутренних напряжений не происходит.

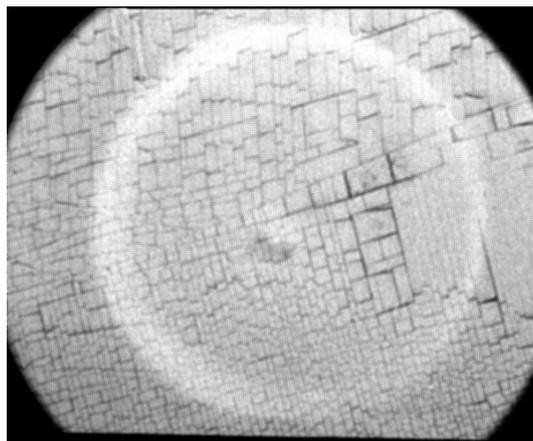
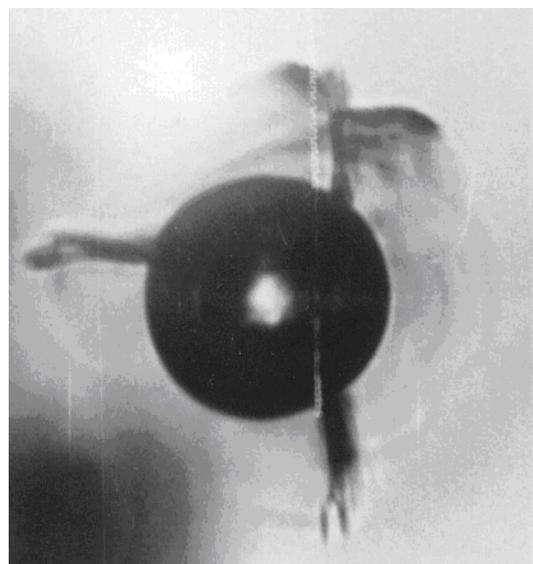
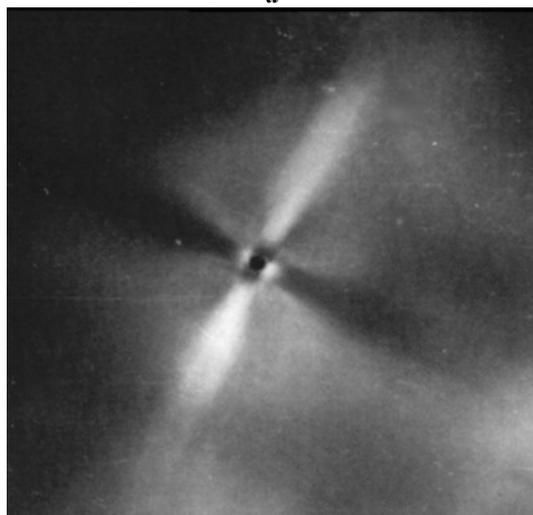


Рис. 3. Растрескивание поверхности монокристалла ВаF₂



а



б

Рис. 4. Вид сферической полости диаметром 10 мкм с докритическими трещинами в видимом (а) и поляризованном (б) свете

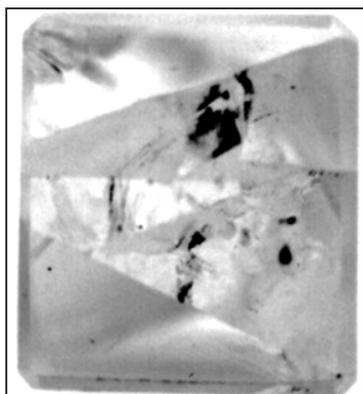


Рис. 5. Раскалывание оптического элемента по границам блоков под действием непрерывного лазерного излучения с плотностью мощности $q \sim 50 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-2}$

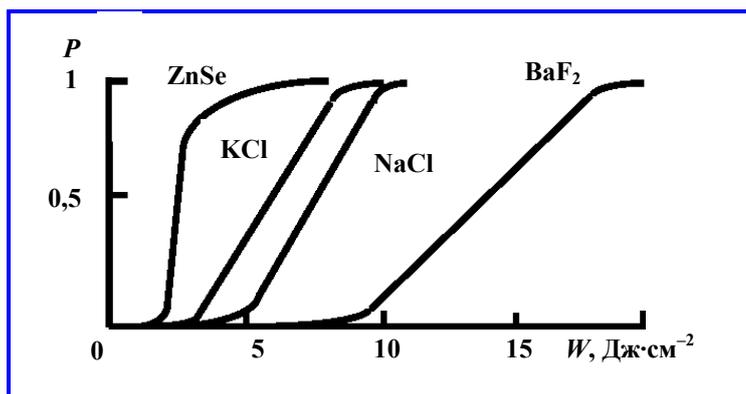


Рис. 6. Зависимости вероятности повреждения ионных и полупроводниковых монокристаллов от величины плотности энергии лазерного излучения

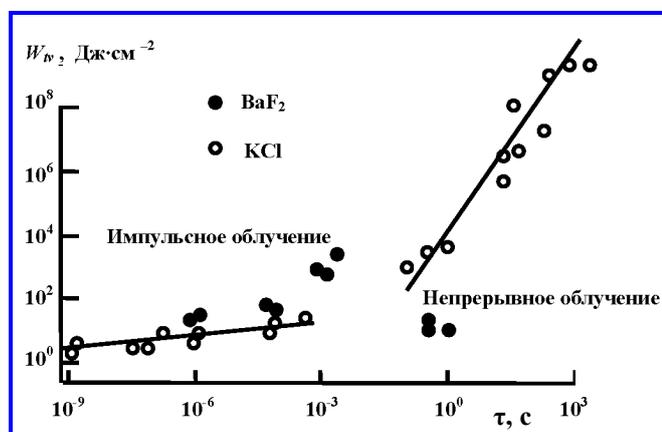


Рис. 7. Зависимости порогов повреждения объёма ионных кристаллов от длительности лазерного воздействия

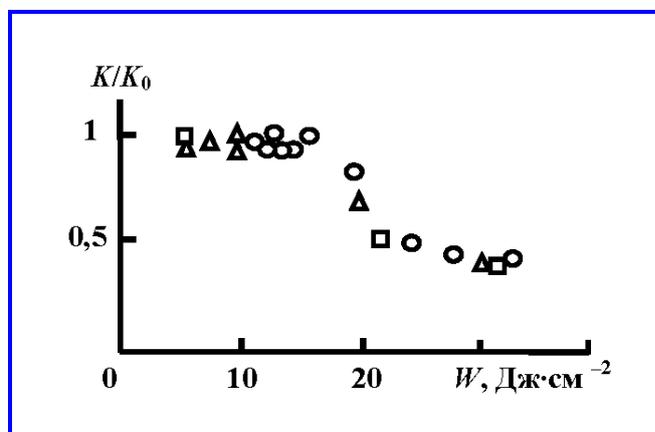


Рис. 8. Зависимости относительного пропускания монокристаллов BaF₂ от величины плотности энергии импульсного лазерного излучения с $\tau \sim 1 \text{ мкс}$

Однако при длительном облучении оптических элементов излучением с допороговой интенсивностью ($\leq 10 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$) в них наблюдается постепенное накопление внутренних напряжений. После облучения кристаллов сериями импульсов с $\tau \sim 30 - 40 \text{ мкс}$ и $t_p \geq 1 - 15 \text{ с}$ при суммарном числе импульсов $N \sim 10^3 - 10^4$ импульсов с $W \sim 1 - 6 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$ внутренние напряжения в них достигали $20 - 40 \text{ кГ}\cdot\text{см}^{-2}$, что вызывало раскалывание кристаллов по границам блоков соответственно. То есть разрушение в этом случае имеет термомеханический характер, свойственный непрерывному режиму облучения.

Повреждение монокристаллов BaF₂ при непрерывном режиме облучения с плотностью мощности $< 0,1 - 0,5 \text{ кВт}\cdot\text{см}^{-2}$ происходило в результате постепенного накопления внутренних напряжений и сопровождалось их раскалыванием по границам блоков (рис. 5).

Для определения граничных условий и возможной области применения монокристаллов BaF₂ в качестве материала для элементов оптических трактов CO₂-лазеров было исследовано влияние режимов облучения на стойкость кристаллов к лазерному воздействию различной длительности и коэффициента пропускания K оптического элемента.

Для исключения влияния систематической погрешности измерения W для каждого оптического элемента исследовалась зависимость относительного коэффициента пропускания – отношения K/K_0 от величины W (где K_0 – значение K , измеренное в доплазменном режиме облучения при $W < 0,5 - 1 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$). Кроме того, для снижения погрешности измерения абсолютного значения энергии лазерного излучения проводилась калибровка средств измерений по эталонному калори-

метрическому измерителю энергии через каждые 10 импульсов, что позволило снизить величину абсолютной погрешности до 5 – 7 %.

Значения порогов повреждения объёма W_{tv} (величины W при вероятности повреждения $P = 0,5$) монокристаллов BaF_2 в сравнении с KCl , $NaCl$ и $ZnSe$ при воздействии лазерного излучения с $\tau \sim 1$ мкс приведены на рис. 6.

Как следует из рисунка, монокристаллы BaF_2 обладают наибольшей стойкостью к воздействию короткоимпульсного лазерного излучения.

Исследования стойкости монокристаллов BaF_2 к воздействию лазерного излучения различной длительности (рис. 7) показали, что при увеличении длительности лазерных импульсов свыше 10 – 100 мс наблюдается снижение порога повреждения объёма. Это вызвано сменой механизма повреждения монокристаллов BaF_2 – при больших длительностях начинает доминировать термомеханический механизм, при котором происходит раскалывание кристалла в результате постепенного накопления термоиндуцированных внутренних напряжений.

На зависимостях $K/K_0 = f(W)$ для трёх произвольно взятых оптических элементов (рис. 8) видно резкое снижение пропускания при увеличении плотности энергии свыше $16 - 20 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$, что объясняется частичной экранировкой лазерного излучения плазменными образованиями. Следовательно, рабочий диапазон оптических элементов на основе монокристаллов BaF_2 по величине плотности энергии для короткоимпульсного лазерного излучения ограничен лишь значениями порога повреждения объёма, что для излучения с $\tau \sim 1$ мкс составляет величину $14 \pm 2 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$.

Таким образом, полученные в работе данные по лазерной стойкости оптических элементов, изготовленных из монокристаллического BaF_2 , позволяют сделать вывод о возможности использования его для изготовления оптики широкоапертурных CO_2 -лазеров лидарных систем дистанционного зондирования аэрозольных и газовых компонент атмосферы при условии, что длительность импульсов излучения не должна превышать 10 мс. При этом оптика на основе монокристаллов BaF_2 выгодно отличается от широко используемых кристаллов более высокими порогами повреждения, низкой гигроскопичностью, высокими теплофизическими и механическими свойствами.

Обнаружено новое оптико-физическое явление – структурирование плазменных образований, возникающих при оптическом пробое вблизи поверхности, в соответствии с границами блоков кристалла.

Литература

1. Месяц Г. А. Импульсные газовые лазеры / Г. А. Месяц, В. В. Осипов, В. Ф. Тарасенко. – М. : Наука, 1991. – 272 с.
2. Абильсиитов Г. А. Мощные газоразрядные CO_2 -лазеры и их применение в технологии / Г. А. Абильсиитов, Е. П. Велихов, В. С. Голубев [и др.]. – М. : Наука, 1984. – 108 с.
3. Летохов В. С. Мощные лазеры и их применение / В. С. Летохов, Н. Д. Устинов. – М. : Советское радио, 1980. – 112 с.
4. Агишев Р. Р. Лидарный мониторинг атмосферы / Р. Р. Агишев. – М. : Физматлит, 2009. – 314 с.
5. Карлов Н. В. Оптические материалы для CO_2 -лазеров / Н. В. Карлов, Е. В. Сисакян // Известия АН СССР. Серия физическая. – 1980. – Т. 44. – № 8. – С. 1631 – 1638.
6. Карась В. Р. Перспективные материалы для окон CO_2 -лазеров. Обзорная информация / В. Р. Карась. – М. : НИИТЭХИМ, 1978. – 52 с.
7. Казанцев С. Г. Создание проходной оптики мощных ТЕА CO_2 -лазеров и методы повышения лазерной стойкости материалов силовой ИК-оптики / С. Г. Казанцев // Известия ВУЗов. Физика. – 2001. – Т. 44. – № 11. – С. 67 – 77.
8. Казанцев С. Г. Лазерная стойкость перспективных материалов силовой ИК оптики. Часть 1. Механизмы повреждения материалов силовой ИК-оптики. Часть 2. Способы повышения лазерной стойкости и срока службы оптических элементов / С. Г. Казанцев // Оптика атмосферы и океана. – 2003. – Т. 16. – № 4. – С. 390 – 401.
9. Блистанов А. А. ЩГК как материал силовой оптики широкоапертурных CO_2 -лазеров / А. А. Блистанов, С. Г. Казанцев, О. М. Кугаенко // Известия ВУЗов. Материалы электронной техники. – 2002. – № 1. – С. 4 – 15.
10. Ковалев В. И. Исследование механизма пробоя под действием излучения импульсного CO_2 -лазера / В. И. Ковалев // Труды ФИАН. – 1982. – Т. 136. – С. 51 – 117.
11. Блистанов А. А. Акустические кристаллы : справочник / А. А. Блистанов, В. С. Бондаренко, В. В. Чкалова [и др.]; под ред. М. П. Шаскольской. – М. : Наука, 1982. – 632 с.
12. Казанцев С. Г. Размерный эффект и лазерная стойкость материалов ИК-оптики при больших пятнах облучения / С. Г. Казанцев // Квантовая электроника. – 1997. – Т. 24. – № 3. – С. 269 – 270.
13. Казанцев С. Г. Оптический пробой поверхности щелочно-галогенидных кристаллов микросекунд-

ными импульсами широкоапертурного CO₂-лазера / С. Г. Казанцев // Квантовая электроника. – 1998. – Т. 25. – № 4. – С. 333 – 336.

14. Казанцев С. Г. Оптическая стойкость материалов окон широкоапертурных импульсно-периодических CO₂-лазеров / С. Г. Казанцев //

Квантовая электроника. – 1998. – Т. 25. – № 6. – С. 555 – 557.

15. Казанцев С. Г. Лазерная стойкость перспективных материалов силовой ИК-оптики / С. Г. Казанцев // Известия ВУЗов. Физика. – 1998. – № 10. – С. 68 – 84.

Поступила в редакцию 12.04.2011

Сергей Геннадьевич Казанцев, д-р техн. наук, зам. генерального директора – генерального конструктора, т. 366-12-01, e-mail: vniiem@orc.ru.