

# 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  $\beta$  на рабочей длине волны  $\lambda$ ;
- 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  $\alpha$ ;
- высокая теплоёмкость  $c$  и теплопроводность  $k$ ;
- высокие механические свойства (модуль Юнга  $E$ , модуль разрыва  $\sigma_r$ , 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)	$dn/dt$ , $10^{-5} \text{ K}^{-1}$	$R$ , % (10,6 мкм)
		$\beta_{th}$ , $\text{см}^{-1}$	$\beta_{exp}$ , $\text{см}^{-1}$			
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
<b>BaF<sub>2</sub></b>	<b>0,15 – 12</b>	<b><math>1,3 \cdot 10^{-1}</math></b>	<b><math>2 \cdot 10^{-1}</math></b>	<b>1,39</b>	<b>-1,55</b>	<b>7,2</b>

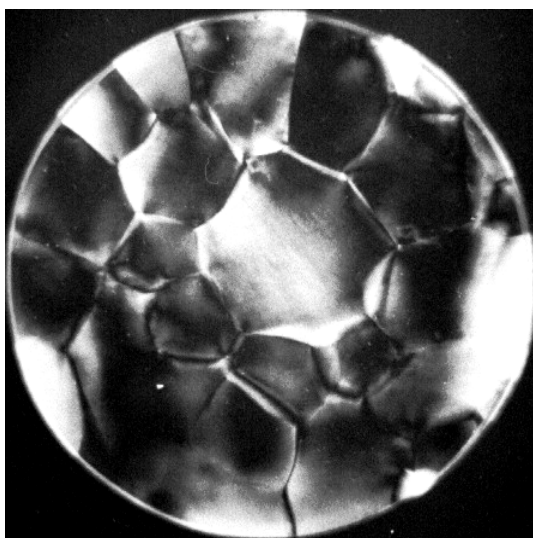


Рис. 1. Вид оптического элемента в поляризованном свете

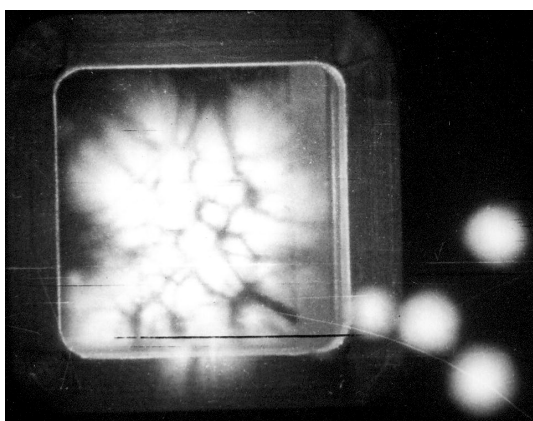


Рис. 2. Плазменные образования, возникающие при оптическом пробое вблизи поверхности оптического элемента

Как видно из таблицы, монокристаллы BaF<sub>2</sub> 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 BaF<sub>2</sub> были изготовлены оптические элементы из кристаллов промышленного качества. Из каждой монокристаллической заготовки вырезался образец-свидетель для определения коэффициента поглощения калориметрическим методом.

Монокристаллы BaF<sub>2</sub> были выращены способом направленной кристаллизации, имели крупноблочную структуру с характерными размерами блоков 5 – 100 мм (рис. 1),  $\beta$  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 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> с финишной полировкой на микропорошке АСМ 1/0 в 2% растворе H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и представляли пластины размером  $\varnothing 150 \times 23 \text{ мм}$ .

В качестве источников излучения были использованы CO<sub>2</sub>-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<sup>-2</sup> (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 ВаF<sub>2</sub>, предложенному в работе [13] для щёлочно-галогидных кристаллов.

При сопоставлении вида плазмообразования и картины двулучепреломления в кристаллах ВаF<sub>2</sub> 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<sup>-2</sup> ( $\tau \sim 1$  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.

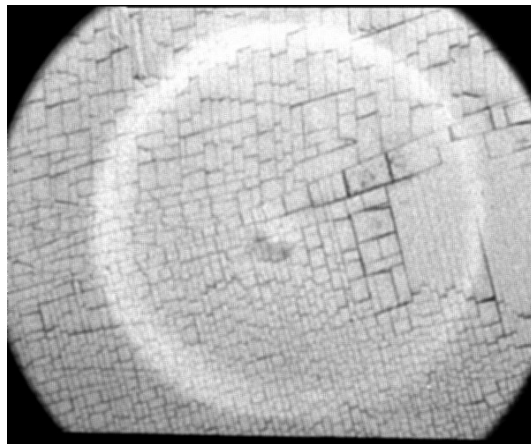
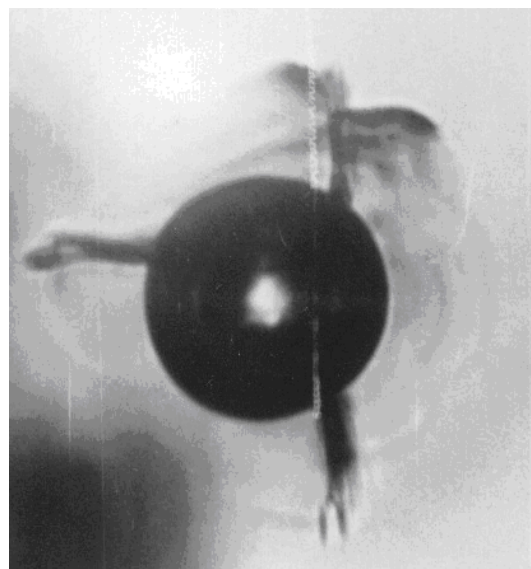
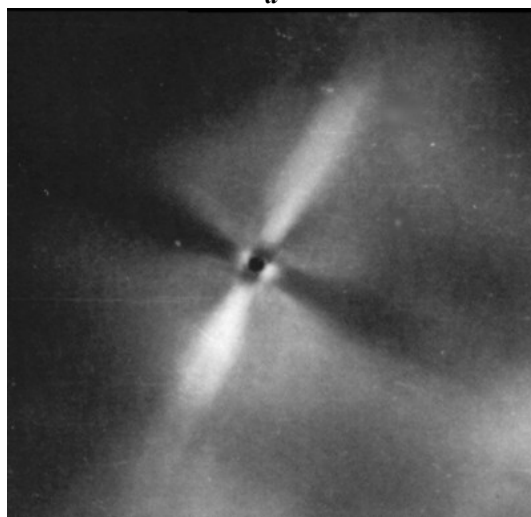


Рис. 3. Растрескивание поверхности монокристалла ВаF<sub>2</sub>



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  $q \sim 50 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-2}$

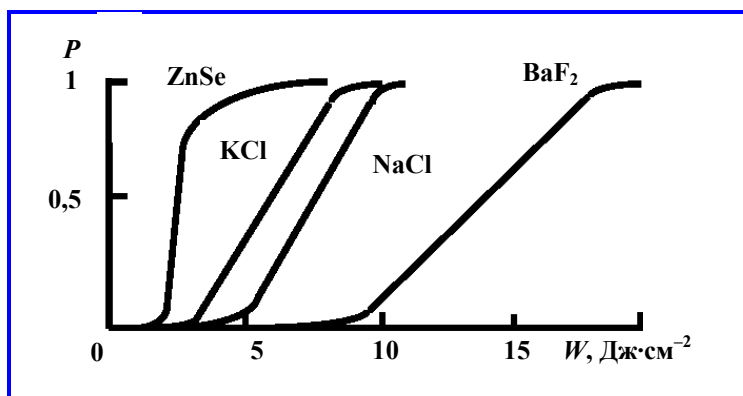


Рис. 6. Зависимости вероятности повреждения ионных и полупроводниковых монокристаллов от величины плотности энергии лазерного излучения

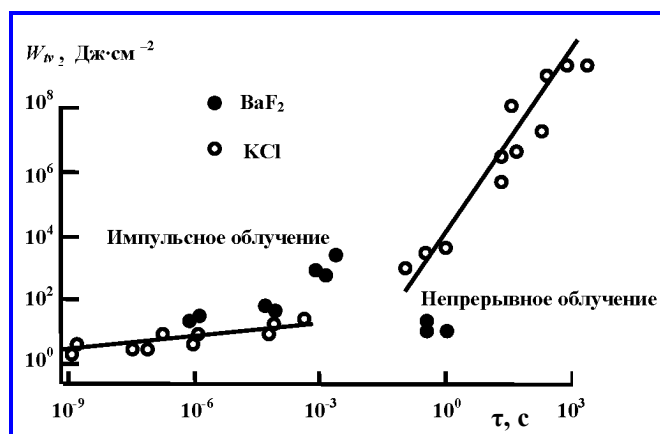


Рис. 7. Зависимости порогов повреждения объёма ионных кристаллов от длительности лазерного воздействия

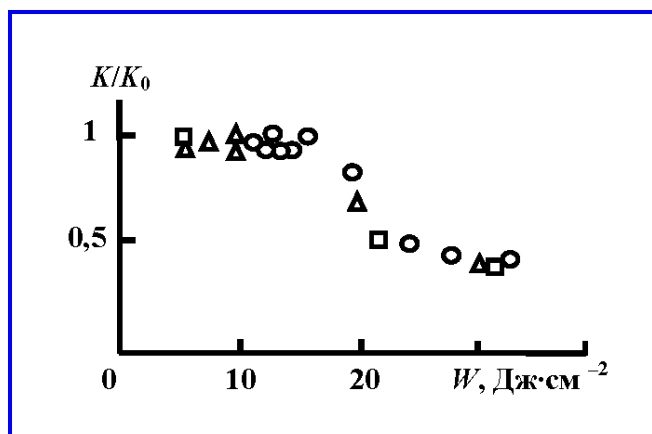


Рис. 8. Зависимости относительного пропускания монокристаллов BaF<sub>2</sub> от величины плотности энергии импульсного лазерного излучения с  $\tau \sim 1 \text{ мкс}$

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 BaF<sub>2</sub> 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 BaF<sub>2</sub> в качестве материала для элементов оптических трактов CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-лазера / С. Г. Казанцев // Квантовая электроника. – 1998. – Т. 25. – № 4. – С. 333 – 336.

14. Казанцев С. Г. Оптическая стойкость материалов окон широкоапертурных импульсно-периодических CO<sub>2</sub>-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.*