

# МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ. ДИЭЛЕКТРИКИ

УДК 621.315.61

## ПРОЗРАЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ CO<sub>2</sub>-ЛАЗЕРОВ

© 2012 г. В. Е. Роголин  
ФГУП «НПО Астрофизика»

В одном эксперименте при апертуре луча, сопоставимой с размерами образца, проведено сравнение реальной оптической стойкости основных прозрачных материалов для CO<sub>2</sub>-лазеров: BaF<sub>2</sub>, NaCl, KCl, KBr, RbI, AgCl, CsI, KPC-5, KPC-6, ZnSe, ZnS, GaAs и Ge. Экспериментально и теоретически сопоставлены нелинейные потери в 13 кристаллах при прохождении излучения в диапазоне 10<sup>7</sup>—4 · 10<sup>8</sup> Вт/см<sup>2</sup>. Обнаружено, что «хвост» импульса практически полностью поглощается плазмой низкого порога оптического пробоя воздуха, а «пик», лишь частично, — «горячими» неравновесными носителями заряда в кристалле. Установлено, что потери излучения экспоненциально зависят от ширины запрещенной зоны материала. Исследованы особенности поражения монокристаллов германия импульсом мощного CO<sub>2</sub>-лазера. Впервые разработаны, изготовлены и испытаны окна из Ge диаметром 420 мм. Исследовано влияние на процесс лазерного объемного порообразования в щелочно-галогидных кристаллах параметров кристаллической решетки, примесного состава, структуры радиационных дефектов, варьруемой путем воздействия проникающей радиации и отжига. Выявлена зависимость размера пор от условий воздействия, параметров лазера, энергии кристаллической решетки. Изучена кинетика термического отжига этих пор и предложен механизм их залечивания.

**Ключевые слова:** импульсные CO<sub>2</sub>-лазеры, окно, оптическая стойкость, Ge, GaAs, ZnSe, KPC-5, KPC-6, NaCl, KCl, BaF<sub>2</sub>, монокристалл, щелочно-галогидные кристаллы, плазмообразование, примесные центры, оптический пробой, поглощающие микронеоднородности, микроразрушения, поры.

### Введение

Создание мощных лазерных систем на CO<sub>2</sub>, излучающих в области 10 мкм, — одно из основных направлений развития лазерной техники. Такие системы широко применяют для стимулирования химических реакций, лазерного термоядерного синтеза, разделения изотопов, в лазерных технологиях и т. д. [1—3].

Предельно достижимая интенсивность излучения импульсных CO<sub>2</sub>-лазеров ограничивается недостаточной лучевой стойкостью оптики — окна или полупрозрачного зеркала, разделяющего активное вещество и атмосферу. Рост выходной энергии достигается в основном за счет увеличения апертуры лазера. Апертуры таких лазерных систем с энергией порядка десятков кДж достигают 700 × 700 мм<sup>2</sup> [1], что приводит к резкому росту напряжения в цепях питания.

Поэтому и актуальна задача исследования физики взаимодействия мощного лазерного луча с оптическим элементом. Изучению оптической стойкости различных материалов в области 10 мкм посвящено множество работ, например [4—6]. Но основные усилия сосредоточены в направлении исследования порогов так называемого

собственного механизма разрушения, т. е., по сути дела, определения стойкости идеального материала или порогов разрушения на включениях. Технически это осуществляется собиранием излучения малоомощного одночастотного лазера короткофокусной линзой в объем (или на поверхность) материала в пятно диаметром ~50 мкм. При таком режиме воздействия порог достигает 10<sup>10</sup>—10<sup>11</sup> Вт/см<sup>2</sup> [7, 8], тогда как реальные оптические элементы заметно повреждаются уже при ~10<sup>7</sup> Вт/см<sup>2</sup>. Различия вызвано рядом причин, в первую очередь — наличием в материале многочисленных структурных дефектов, резко снижающих его стойкость, т. е. размерным эффектом.

Исследование влияния дефектов структуры на оптическую стойкость также принято проводить путем измерения порогов повреждения при малых зонах воздействия, что позволяет с максимальной возможной точностью воспроизводить от импульса к импульсу параметры лазерного излучения [9]. Изучение реальной оптической стойкости, что важно для практики, непосредственно на опыте эксплуатации лазерной оптики практикуется редко [10, 11] ввиду трудности получения таким образом однозначных данных о физике процесса.

Цель работы — сопоставление в одной серии экспериментов в условиях, максимально приближенных к реальным, оптической стойкости материалов ИК-техники, прозрачных в районе 10 мкм, а также выявление перспективы их использования для изготовления выходных элементов мощных импульсных CO<sub>2</sub>-лазеров. Кроме того, в задачи исследования входило выяснение причин выхода из строя реальных оптических элементов, поиски путей их реставрации и технологических резервов улучшения качества материала.

### Образцы для исследования

Коэффициент усиления активной среды CO<sub>2</sub>-лазеров обычно составляет 0,03—0,05 см<sup>-1</sup>. При типичной длине модуля 1—2 м пропускание выходного зеркала — 50—70 %. В этих лазерах наиболее распространены полуконфокальные резонаторы, состоящие из «глухого» (обычно медного) зеркала с радиусом 10—50 м и плоского полупрозрачного зеркала, одновременно являющегося окном между атмосферой и активной средой. Применяют и телескопические неустойчивые резонаторы. Излучение выводится через окно [1].

Традиционные оптические материалы — стекла — из-за поглощения на ионах кислорода в большинстве своем непригодны в области спектра 10 мкм. Прозрачные материалы можно разделить по свойствам на следующие группы:

- ионные монокристаллы;
- полупроводниковые монокристаллы;
- халькогенидные стекла;
- оптическая керамика;
- поликристаллические материалы;
- нелинейные кристаллы тройных соединений.

На практике же по ряду причин в CO<sub>2</sub>-лазерах используют лишь некоторые кристаллы: Ge, GaAs, ZnSe, KPC-5, KPC-6, NaCl, KCl, BaF<sub>2</sub>.

Германий имеет самую большую твердость из них, что позволяет формировать высокоточные оптические детали, удобные в эксплуатации, не взаимодействующие с атмосферной влагой, нетоксичные, прочные, с хорошими теплофизическими свойствами. Германий широко применяют в ИК-оптике. Монокристаллы Ge выращивают диаметром до 600 мм [12]. В работах [13, 14] исследована взаимосвязь между электрофизическими параметрами кристаллов и коэффициентом поглощения. К недостаткам Ge относится наличие резкой температурной зависимости коэффициента поглощения. Механические свойства GaAs и ZnSe хуже, но эти кристаллы перспективны, особенно для непрерывных лазеров. Кристаллы KPC-5 и KPC-6 выращивают диаметром до 450 мм [15], но они мягки, пластичны и очень токсичны, что резко сужает возможности их использования. Фторид бария по физико-химическим свойствам

неплохой материал, технологичен (выращивают кристаллы диаметром до 600 мм) [11], но высокий коэффициент поглощения на длине волны 10,6 мкм ( $\sim 0,15 \text{ см}^{-1}$ ) резко снижает возможности его использования в мощных CO<sub>2</sub>-лазерах. Широко применяют щелочно-галлоидные кристаллы (ЩГК) NaCl и KCl, имеющие хорошие оптические свойства, однако они обладают крупным недостатком — водорастворимы и хрупки [16].

Для исследований также были выбраны следующие материалы:

- AgCl — пластичный материал [17], пригодный для изготовления оптических деталей методом штамповки и сохраняющий свои свойства при контакте с морской водой;
- CsI — материал, широко используемый в ИК-технике, технология получения которого хорошо отработана;
- KBr и RbI для исследования (в сопоставлении с NaCl и KCl) влияния кристаллической решетки на оптическую стойкость ЩГК;
- ZnS, часто используемый для нанесения покрытий.

### Результаты исследований и их обсуждение

На первом этапе исследовали порог реальной оптической стойкости 11 кристаллов: NaCl, KCl, KBr, RbI, AgCl, CsI, KPC-5, KPC-6, ZnSe, GaAs, Ge. Облучение импульсным электроразрядным CO<sub>2</sub>-лазером этих материалов проводили в условиях, максимально приближенных к реальным. Параметры использованных лазеров приведены в работах [2, 3]. Излучение собирали длиннофокусной линзой в пятно площадью 0,67 см<sup>2</sup>, т. е., во-первых, на образец воздействовал почти параллельный лазерный луч, а во-вторых, это позволило усреднить влияние отдельных микродефектов кристалла на оптическую стойкость в целом. Проведен анализ морфологии повреждений.

За энергетический порог оптической стойкости реальных оптических элементов принимали такую среднюю плотность энергии импульса лазерного излучения, попадающего на образец  $W_E$ , при которой возникали заметные обратимые или необратимые изменения оптических характеристик детали, либо такие повреждения, которые препятствовали бы ее дальнейшей эксплуатации.

При плотности энергии воздействующего излучения  $W_{E1} \sim 10 \text{ Дж/см}^2$  перед поверхностями большинства образцов возникал низкопороговый оптический пробой воздуха [18]. Плазма генерировалась вблизи как входной, так и выходной грани образца или обеих одновременно (рис. 1). В материалах с низким показателем преломления  $n$  плазма несколько чаще возникала на выходной грани. Последовательный рост  $W_{E1}$  приводил к пробую только вблизи входной грани, в воздухе, без сопри-

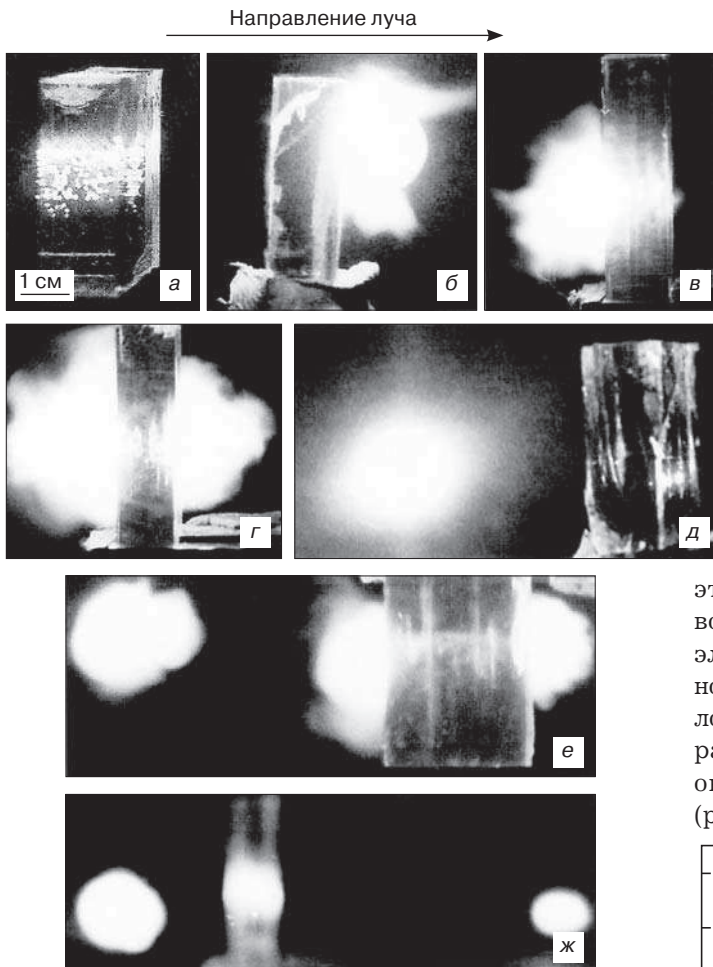


Рис. 1. Оптический пробой в объеме и вблизи поверхности ЩГК, различные варианты плазмообразования (а—ж)

косновения с поверхностью. Увеличение  $n$  влечет рост вероятности плазмообразования вблизи входной грани. Так, при облучении Ge ( $n = 4$ ) и GaAs ( $n = 3,28$ ) плазму наблюдали лишь перед входной поверхностью. Время жизни плазмы факела  $\tau_{\text{ф}} \sim 20 \div 25$  мкс существенно выше длительности лазерного импульса  $\tau_{\text{л}} \sim 5$  мкс (рис. 2). Разница между порогами пробоя на образцах различных материалов практически не превышала величину разброса порогов пробоя разных образцов одного кристалла. Порог пробоя у поверхности прозрачного кристалла на порядок ниже порога оптического пробоя воздуха при том же сечении луча и близок к порогу возникновения «низкопорогового оптического пробоя воздуха перед непрозрачной преградой» [18]. Плазма заметно поглощала лазерный луч, и поэтому порог пробоя, даже в отсутствие заметных следов повреждения образца, принимали за реальный порог оптической стойкости. Излучение допороговой интенсивности существенных повреждений в кристаллах, вызывающих их последующую непригодность, не создавало.

Плазма факела — источник разных вторичных воздействий на оптический элемент. Ее температура составляет  $\sim 10^4$  К, а скорость разлета достаточно

высока [18]. Образование плазмы вблизи поверхности большинства материалов сопровождается характерными повреждениями, видимыми невооруженным глазом.

Повреждение ЩГК заключалось прежде всего в растрескивании приповерхностного слоя грани, соприкасавшейся с плазмой. Глубина трещин достигала 1 мм. В этом слое также возникали короткоживущие центры окраски, отжигавшиеся при комнатной температуре за 2—3 мин. Эти эффекты имели место и вне зоны воздействия на образцах, «опаленных» факелом. Поверхность пластичных кристаллов, соприкасавшаяся с плазмой, деформировалась и приобретала достаточно устойчивую окраску; заметно снижалось пропускание кристалла в ИК-области. Кристаллы Ge и GaAs факелом не поразились.

Повреждения собственно излучением при этом режиме воздействия незначительны и не приводят к немедленному выходу из строя оптического элемента, но ухудшают его качество и имеют склонность к накоплению. В объеме большинства кристаллов после воздействия с  $W_E \approx 2 \div 5$  Дж/см<sup>2</sup> возникали рассеивающие центры размером до 30—100 мкм, окруженные полями внутренних напряжений (рис. 3). Повреждения вызваны пробоем поглощаю-

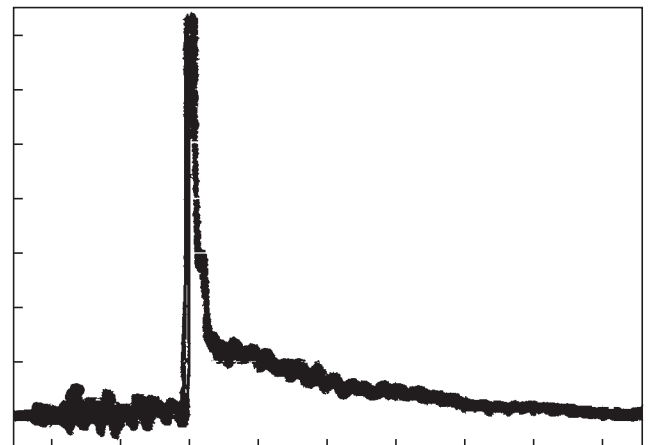


Рис. 2. Форма лазерного импульса (1 мкс/дел.)

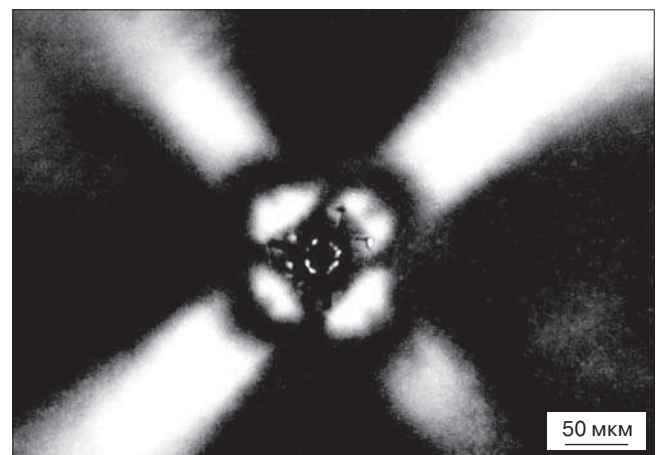


Рис. 3. Поле внутренних напряжений вокруг «лазерной поры» в KCl, визуализированное в поляризованном свете

щих микронеоднородностей, которые нельзя выявить с помощью микроскопа. Подобные структурные дефекты в приповерхностном слое зачастую приводят к образованию микрократеров (рис. 4).

Сопоставление полученных результатов с физико-химическими свойствами материалов позволило сделать следующий вывод: для оптики мощных импульсных  $\text{CO}_2$ -лазеров перспективны Ge, способный без катастрофического разрушения выдерживать значительные лучевые перегрузки, и NaCl, обладающий хорошими оптическими свойствами.

Влияние плазмообразования перед поверхностью на прохождение лазерного импульса исследовали для определения предельных значений плотностей энергии и мощности, которые могут быть выведены через прозрачный элемент.

Прохождение импульса лазера через исследуемые кристаллы в диапазоне  $W_{P1} = (0,1+4) \cdot 10^8 \text{ Вт/см}^2$  измеряли по двухлучевой схеме [19—21]. Излучение фокусировали длиннофокусной линзой. Размеры луча на поверхности кристалла составляли  $3 \times 4 \text{ мм}^2$ . Импульсы генерации  $W_{P1}$  и излучения  $W_{P2}$ , прошедшего через образец, регистрировали фотоприемниками на эффекте фотонного увлечения дырок в Ge.

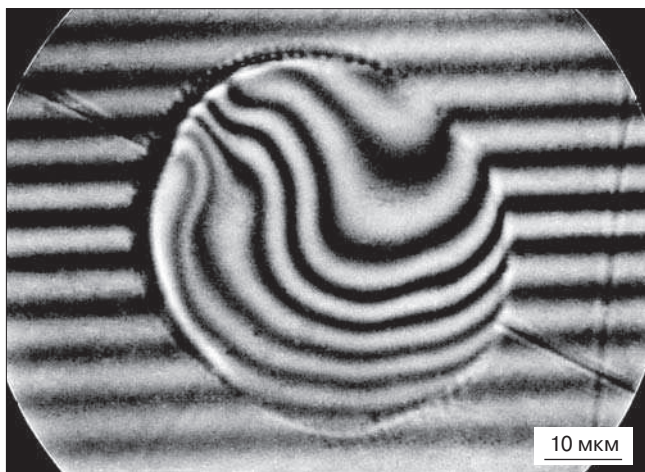


Рис. 4. Микроинтерферограмма поверхности пластины из германия после воздействия (1 импульс,  $W_{P1} \approx 20 \text{ МВт/см}^2$ )

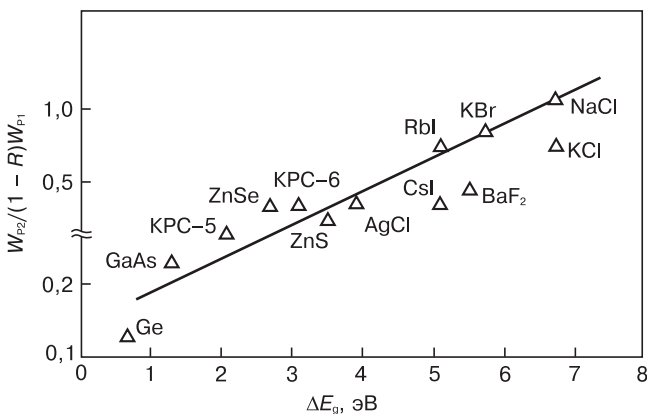


Рис. 5. Зависимость отношения амплитуд прошедшего через образец сигнала к воздействию ( $W_{P2}/(1-R)W_{P1}$ ) от ширины запрещенной зоны ( $\Delta E_g$ ).  $W_{P1} = 370 \text{ МВт/см}^2$

Измеряли также время отсечки  $\tau_{отс}$ , под которым понимали время прозрачности оптического элемента, т. е. время от начала генерации до момента, когда максимальная интенсивность прошедшего излучения снижалась на порядок.

Пробой воздуха лабораторного помещения при размере сечения луча  $3 \times 4 \text{ мм}^2$ , измеренный с целью калибровки, происходил при плотности мощности  $W_{P1} \approx 200 \text{ МВт/см}^2$  с вероятностью 0,5, что соответствует данным работы [22]. Пик импульса проходил через плазму без заметных искажений — амплитуда практически не уменьшалась. При этом время отсечки  $\tau_{отс}$  флуктуировало случайным образом от импульса к импульсу.

Кристалл в фокусе луча резко снижает порог и заметно меняет картину пробоя. Плазма пробоя воздуха становится непрозрачной, т. е. наблюдается эффект отсечки:  $\tau_{отс} \sim 0,2+1,2 \text{ мкс}$ , уменьшается с ростом  $W_{P1}$  и устойчиво наблюдается при  $W_{P1} = 20+50 \text{ МВт/см}^2$ . Эффект хорошо воспроизводится от импульса к импульсу (в пределах точности — 20 %). Следовательно, поглощение «хвоста» импульса происходит главным образом в плазме пробоя воздуха.

Измерены потери при прохождении пика импульса (при  $W_{P1} = (0,1+4) \cdot 10^8 \text{ Вт/см}^2$ ) через  $\text{BaF}_2$ , NaCl, KCl, KBr, RbI, AgCl, CsI, KPC-5, KPC-6, ZnSe, ZnS, GaAs и Ge. В течение действия переднего фронта поле излучения инициирует появление в кристалле горячих неравновесных носителей заряда, поглощающих воздействующее излучение. Нелинейные потери экспоненциально растут с уменьшением ширины запрещенной зоны  $\Delta E_g$  кристалла (рис. 5). При обработке этих данных получена зависимость

$$W_{P2} \approx 0,365(1-R)W_{P1} \exp(0,23\Delta E_g). \quad (1)$$

Коэффициент  $0,365 \approx 1/e$  (где  $e$  — основание натурального логарифма), а коэффициент 0,23 имеет размерность  $1/(2kT)$ , где  $T$  — характеристическая температура;  $k$  — постоянная Больцмана;  $R$  — коэффициент отражения. Тогда уравнение (1) можно записать в виде:

$$W_{P2} = \frac{(1-R)W_{P1}}{\exp\left(1 - \frac{\Delta E_g}{2kT}\right)}, \quad (2)$$

где  $T \approx 2,5 \cdot 10^4 \text{ К}$ .

При многократном воздействии сверхпороговым излучением ШГК выдерживают не более 6—8 импульсов, после чего катастрофически разрушаются. Интенсивность прошедшего излучения снижается на 1,5—2 порядка. Пластичные кристаллы, хотя и не разрушаются катастрофически, но возникшие в них повреждения также препятствуют прохождению излучения. Наиболее стабильны в этом случае кристаллы Ge. Они снижают интенсивность прошедшего света только вдвое после 5—10 импульсов,

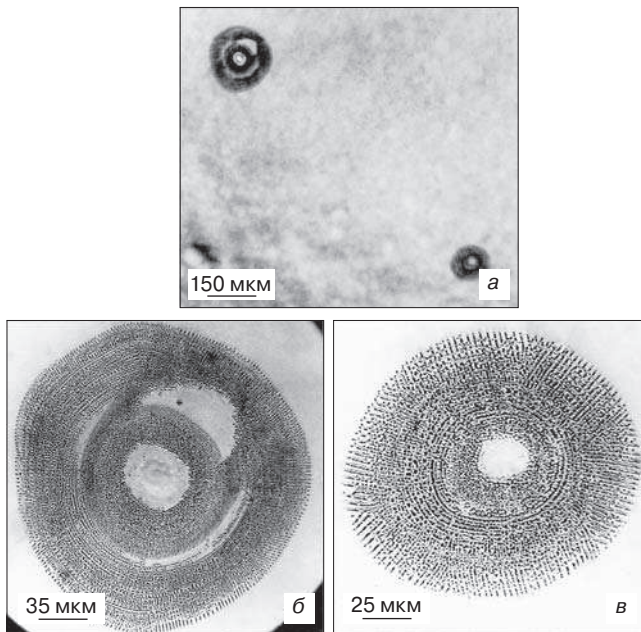


Рис. 6. Микрофотографии дефектов на поверхности Ge. На большом кратере различают две зоны: дальняя — с ориентированными «иголками» и ближняя — с неориентированными «иголками» (направление роста «иголок» —  $\langle 110 \rangle$ ): а — общий вид большого и малого кратеров; б — большой кратер; в — малый кратер

а повреждения локализуются в приповерхностном слое. Очевидно, что с помощью профилирования заднего фронта импульса можно увеличить пиковую мощность проходящего через оптический элемент излучения.

Полученные результаты дали основание провести более подробное исследование морфологии «лазерных» повреждений в монокристаллах Ge [23]. Эксперименты проводили как на промышленных кристаллах марки ГМО (германий монокристаллический оптический), обработанных механически по технологии оптической промышленности, так и на бездислокационных кристаллах, полированных химически.

Методами световой и электронной микроскопии, а также рентгеновской топографии исследовали особенности повреждения кристаллов Ge излучением лазера. В диапазоне амплитуд  $W_{P1} \sim 2 \cdot 10^6 \div 4 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> реализуются два основных типа повреждений. При  $W_{P1} < 4 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup> наблюдаются очаги локальных микроразрушений приповерхностного слоя (рис. 6), а при больших нагрузках в зоне воздействия происходит оплавление слоя глубиной 1—3 мкм.

Локальные микроразрушения, возникающие при  $W_{P1} < 4 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup> вследствие пробоя или на поглощающих микронеоднородностях типа кластеров, находящихся в приповерхностном слое, или на дефектах оптической обработки (рис. 7), являются результатом микровзрыва. Они приводят к образованию кратеров на поверхности, окруженных характерной пленкой продуктов выброса. Вокруг кратеров часто наблюдают волновую картину, являющуюся, видимо, результатом последствия поверхностных

ударных волн с давлением на фронте выше предела упругости материала (рис. 8).

Излучение с  $W_{P1} \geq 4 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup> вызывает лавинный пробой в приповерхностном слое Ge глубиной 1—3 мкм. Поглощение неравновесными носителями заряда приводит к выделению большей части энергии импульса в этом слое и предохраняет объем оптического элемента от повреждения излучением сверхпороговой интенсивности. Благодаря этому эффекту детали из Ge повреждаются излучением лишь частично, что позволяет полностью восстанавливать их путем переполровки.

На рис. 9 приведена фотография выходного узла экспериментального CO<sub>2</sub>-лазера с четырьмя окнами из монокристаллического Ge диаметром 420 мм.

Для выявления эксплуатационных возможностей промышленных кристаллов NaCl и KCl провели серию экспериментов [24—26]. Исследовали морфологию повреждений NaCl, KCl, KBr и RbI излучением мощного импульсного CO<sub>2</sub>-лазера. Исследовали

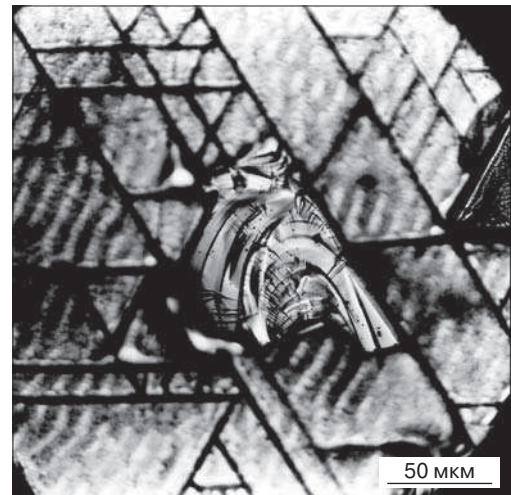


Рис. 7. Поверхностное трещинообразование по плоскостям спайности на поверхности лазерного зеркала из Ge после воздействия 1000—2000 импульсами с энергией ~1—8 Дж/см<sup>2</sup>

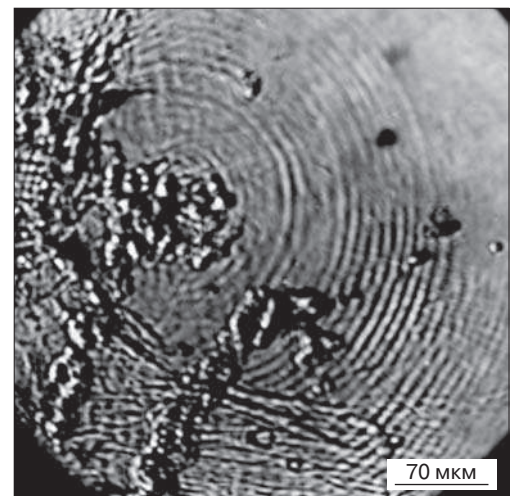


Рис. 8. Край зоны повреждений на поверхности бездислокационного кристалла Ge после воздействия излучением с  $W_{P1} = 230$  МВт/см<sup>2</sup>

как серийно выпускаемые ШГК, так и специально выращенные образцы с контролируемым уровнем примесей; как оптически полированные пластины, так и образцы, выкальваемые из блока по плоскостям спайности {100}. Эти поверхности соприкасались с лабораторным воздухом не более 1 мин, что во многом снижало влияние атмосферной влаги на результаты.

В ШГК, выращенных в атмосфере воздуха, в результате воздействия импульса  $\text{CO}_2$ -лазера с  $W_{\text{P1}} \sim 10^6 \div 10^7$  Вт/см<sup>2</sup> возникают микропоры размером до 30—100 мкм (рис. 10). Их объемная плотность достигает  $\sim 10^5$  см<sup>-3</sup>. Проведен статистический анализ концентрации и распределения пор по размерам в зависимости от параметров излучения.

Поры возникают вследствие оптического пробоя на поглощающих микродефектах, вероятнее всего являющихся результатом коагуляции посторонних примесей, преимущественно анионных. Причем природа этих примесных центров сходна в NaCl, KCl, KBr и RbI. Фотоионизация примесных центров коротковолновой составляющей излучения плазмы факела заметно снижает порог пробоя на этих микро неоднородностях. В NaCl и KCl, специально очищенных от посторонних примесей выращиваем в атмосфере фосгена (содержание как анионных, так и катионных примесей не превышало  $10^{-6}$  % (вес.) [24, 28], следы объемного пробоя отсутствовали и при заметном превышении порога образования факела перед поверхностью (при  $W_E \leq 50$  Дж/см<sup>2</sup>).

Размеры и концентрация пор, возникших при воздействии излучением длительностью до 1 мкс, прошедшим через плазму пробоя воздуха перед входной гранью, идентичны в NaCl, KCl, KBr и RbI. В среднем они составляют  $\sim 20$  мкм и  $\sim 3 \cdot 10^4$  см<sup>-3</sup> соответственно.

Размеры пор в ШГК, возникших при воздействии длительностью до 5 мкс, т. е. в «доплазменном» режиме, определяются свойствами материала. При таком режиме выявляется максимальный размер пор  $d_{\text{max}}$ . При использованных в работе условиях эксперимента  $d_{\text{max}}$  является константой материала, так как определяется предельно допустимой энергией, выделившейся в микроучастке кристалла при фиксированной форме импульса, и не приводит к макроразрушению вследствие развития магистральных трещин. Для KCl предельный размер пор в рассматриваемом случае составляет  $\sim 45$  мкм. Предположим, что полости — это результат действия точечного источника тепла. Тогда

$$\tau = \frac{cd^2}{4K} \approx 10^{-4} \text{ с}, \quad (3)$$

где  $\tau$  — время разогрева области 45 мкм;  $c = 1,347$  Дж/(см<sup>3</sup> · К) — теплоемкость KCl [24];  $K = 0,065$  Вт/(см · К) — теплопроводность [24].

Температурными зависимостями  $c$  и  $K$  (с ростом температуры теплоемкость увеличивается, а те-

плопроводность снижается) пренебрегали. Поэтому время  $\tau$  несколько выше истинного значения. Тем не менее эта величина заметно выше длительности импульса. Однако форма пор, грушевидно утолщающихся навстречу воздействию лучу, — наглядный признак формирования полостей в основном в течение действия лазерного импульса. Размеры пор в этом случае подчиняются экспериментально найденной зависимости среднего значения массы материала  $m_{\text{ср}}$ , вынесенного из полости (в сферическом приближении), от энергии кристаллической решетки  $\xi$  (рис. 11):

$$m_{\text{ср}} \approx 0,07 \exp(-0,09\xi). \quad (4)$$

Принимая, что в выражении (4) коэффициент 0,09 имеет размерность  $1/RT$  (где  $R$  — универсальная газовая постоянная),  $T \approx 5500$  К — характеристическая температура, имеющая физический смысл средней температуры  $T_{\text{п}}$ .

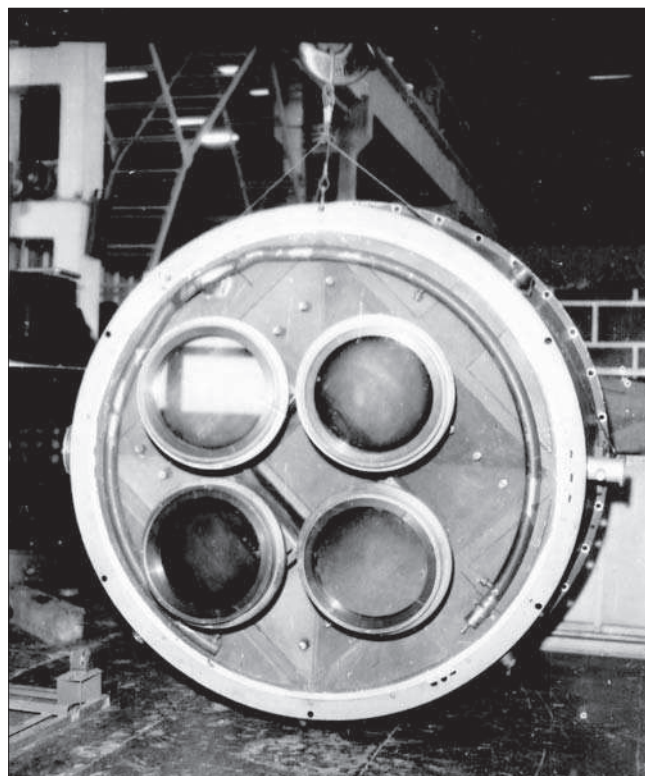


Рис. 9. Выходной узел экспериментального импульсного  $\text{CO}_2$ -лазера с окнами из монокристаллов германия диаметром 420 мм

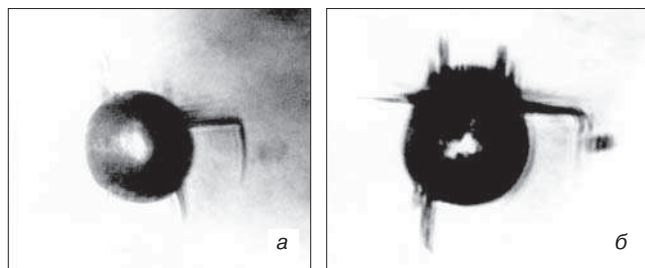


Рис. 10. «Лазерные» поры в KCl. Вид дефекта в плоскости: а — нормальной к лучу лазера; б — параллельной лучу лазера

Анализ данных позволяет считать, что полости образуются вследствие пробоя поглощающих включений, инициирующего создание плазменного образования со средней температурой  $T_n \sim 5500$  К и давлением  $\sim 10^4$  кг/см<sup>2</sup>. Формирование пор происходит в основном во время действия импульса за счет двух основных процессов: испарения на фронте волн поглощения (их скорость оценивается из эксперимента,  $\sim 5$  м/с) и пластической деформации. Данные численно согласуются с теоретическими [27].

Микрополости — центры значительных внутренних напряжений, выявляемых по розеткам двойного лучепреломления размером до  $\sim 1$  мм (см. рис. 3). Кинетика отжига микропор при температуре 973 К (на образцах из кристалла KCl) [26] показала, что полости залечиваются термическим отжигом при атмосферном давлении благодаря релаксации внутренних напряжений, локализованных вокруг них (рис. 12). Это явление может быть использовано для частичной реставрации элементов лазерной оптики из ЦГК.

Экспериментально изучено влияние ионизирующей радиации на процесс объемного порообразования в NaCl при поражении импульсом мощного CO<sub>2</sub>-лазера [25]. Показано, что ни F-, ни M-центры сами по себе не способствуют возникновению пор. Однако эти центры склонны к термически активируемой коагуляции с образованием коллоидальных частиц металла, резко снижающих порог пробоя и инициирующих порообразование [29]. Эти данные необходимо учитывать при разработке оптики электроионизационных и других лазеров, использующих для накачки ионизирующее излучение.

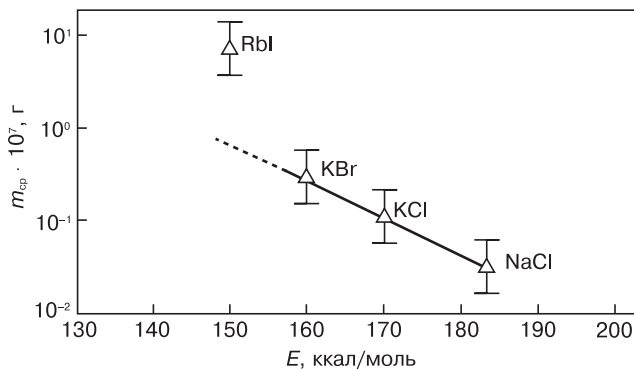


Рис. 11. Зависимость среднего значения массы материала, вынесенного из полости ( $m_{оп}$ ), от энергии кристаллической решетки ( $E$ )

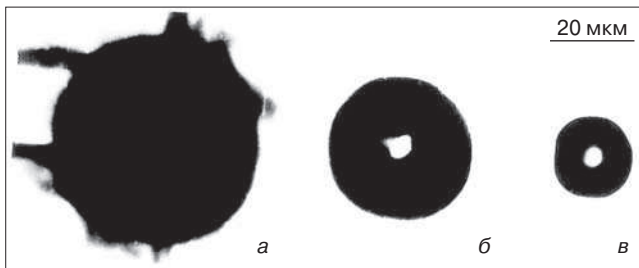


Рис. 12. Кинетика отжига «лазерной» поры в KCl при  $T = 973$  К: а — до отжига; б — после 6 часов отжига; в — после 15 ч отжига

Изложенные результаты свидетельствуют о необходимости дальнейшего поиска оптического материала для CO<sub>2</sub>-лазеров, что способствовало бы дальнейшему прогрессу в области создания мощных газовых лазеров ИК-диапазона. Перспективным материалом для этого является алмаз. Он прозрачен в ИК-диапазоне, всепогоден, обладает рекордными физико-химическими характеристиками [30]. Существует технология получения пластин поликристаллических алмазов диаметром до 200 мм и толщиной до 2 мм методом химического осаждения из газовой фазы при давлении менее атмосферного. Этот материал уже применяется в непрерывных CO<sub>2</sub>-лазерах [30]. Однако для использования в импульсных системах необходимо решить проблему графитизации границ зерен.

### Заключение

В одном эксперименте при апертуре луча, сравнимой с размерами образца, сопоставлена реальная оптическая стойкость основных материалов для оптики CO<sub>2</sub>-лазеров, а именно: BaF<sub>2</sub>, NaCl, KCl, KBr, RbI, AgCl, CsI, KPC-5, KPC-6, ZnSe, ZnS, GaAs и Ge. Показано, что для большинства этих кристаллов основным поражающим фактором является плазма низкого порога пробоя воздуха у поверхности оптического элемента. Определены уровни предельно допустимых лучевых нагрузок на прозрачные оптические элементы мощных широкоапертурных импульсных CO<sub>2</sub>-лазеров. Выбраны наиболее перспективные материалы для этих систем — монокристаллы хлористого натрия и германия.

Экспериментально сопоставлены нелинейные потери в 13 кристаллах при прохождении лазерного импульса с плотностью мощности  $(0,1-4) \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. Хвостовая часть импульса практически полностью поглощается в плазме низкого порога оптического пробоя воздуха вблизи поверхности кристалла, а пиковая частично — «горячими» неравновесными носителями заряда, генерируемыми в материале полем лазерного излучения. Экспериментально и теоретически показано, что потери излучения в кристалле экспоненциально зависят от ширины запрещенной зоны материала.

Исследованы особенности поражения Ge излучением мощного импульсного CO<sub>2</sub>-лазера. Показано, что поражается только приповерхностный слой, лавинный пробой в котором приводит к генерации неравновесных носителей заряда, поглощающих лазерное излучение. Этот слой, толщиной несколько мкм, фактически является аналогом нелинейного фильтра, предохраняющего объем кристалла от повреждения. Обоснована и практически апробирована возможность реставрации германиевых окон и зеркал путем реполировки.

Разработаны, изготовлены и испытаны в составе экспериментального лазерного комплекса окна из монокристалла Ge диаметром 420 мм.

Исследованы особенности процесса объемного порообразования в ЩГК в результате воздействия лазерного импульса при апертуре луча, сопоставимой с размерами образца. Исследована статистика распределения пор по размерам в NaCl, KCl, KBr и RbI.

Выявлена зависимость размера «лазерных» пор от условий воздействия, параметров лазерного импульса, энергии кристаллической решетки.

Исследовано влияние конгломератов точечных дефектов, полученных путем воздействия проникающей радиации и последующего термического отжига, а также благодаря целенаправленному легированию кристалла различными примесями, на процесс «лазерного» порообразования.

Обнаружен эффект залечивания «лазерных» пор в процессе термического отжига при атмосферном давлении окружающей среды. Изучена кинетика данного явления.

#### Библиографический список

1. Баранов, Г. А. Мощные импульсные CO<sub>2</sub>-лазеры высокого давления и их применения / Г. А. Баранов, А. А. Кучинский // Квантовая электроника. – 2005. – Т. 35, № 3. – С. 219—229.
2. Ашурлы, З. И. Электроразрядный импульсный CO<sub>2</sub>-лазер для исследовательских целей / З. И. Ашурлы, Ю. М. Васильевский, И. А. Гордеева, Л. В. Малышев, Р. Е. Ровинский, А. А. Холодилов // Там же. – 1980. – Т. 7, № 7. – С. 1456—1460.
3. Аполлонов, В. В. Мощный электроразрядный CO<sub>2</sub>-лазер с добавками в смесь легкоионизируемых веществ / В. В. Аполлонов, В. М. Васильевский, М. И. Жаворонков, А. М. Прохоров, Р. Е. Ровинский, В. Е. Роголин, Н. Д. Устинов, К. Н. Фирсов, И. С. Ценина, В. А. Ямщикова // Там же. – 1985. – Т. 12, № 1. – С. 5—9.
4. Шмаков, В. А. Силовая оптика / В. А. Шмаков. – М.: Наука, 2004. – 318 с.
5. Атаманюк, В. М. Взаимодействие лазерного излучения с материалами оптико-электронной техники / В. М. Атаманюк, О. В. Володин, И. В. Дяченко, Н. С. Захаров, А. Ф. Коваленко, А. В. Козлов, С. А. Комаров, Т. А. Михайлова, А. В. Никонов, В. Е. Роголин, М. В. Сахаров, И. П. Суханов, Я. А. Суханов, А. В. Федичев. – Сергиев Посад: ЦФТИ МО РФ, 2004. – 176 с.
6. Marsh, J. Infrared optical materials for 8–13 μm / J. Marsh, J. Savage // Infrared Phys. – 1974. – V. 14, N 12. – P. 85—91.
7. Yablonovitch, E. Optical dielectric strength of alkali-halide crystals obtained by laser-induced breakdown / E. Yablonovitch // Appl. Phys. Lett. – 1971. – V. 19, N 11. – P. 495—497.
8. Milam, D. Method and apparatus for determining the mechanism responsible for laser induced damage / D. Milam, R. A. Bradbury, R. H. Picard., M. Bass // Pat. USA, 356-239/G01N21/16/, № 3999865; Заявл. 09.12.74; Опубл. 28.12.76.
9. Горшков, Б. Г. Размерный эффект и статистика лазерного разрушения ЩГК на длине волны 10,6 мкм. / Б. Г. Горшков, Ю. К. Данилейко, А. А. Маненков, А. М. Прохоров, А. В. Сидорин // Квантовая электроника. – 1981. – Т. 8, № 1. – С. 148—154.
10. Дацкевич, Н. П. Оптическая прочность ИК-материалов для импульсных CO<sub>2</sub>-лазеров при больших пятнах облучения. / Н. П. Дацкевич, Н. В. Карлов, Г. П. Кузьмин, А. А. Нестеренко, Е. В. Сисакян // Краткие сообщения по физике. – 1983. – № 6. – С. 3—7.
11. Казанцев, С. Г. Прозрачная оптика мощных широкоапертурных импульсных лазеров среднего ИК-диапазона / С. Г. Казанцев. Автореф. дисс. ... докт. техн. наук. – М.: МИСиС, 2002. – 49 с.
12. Смирнов, Ю. М. Взаимодействие термических условий при росте монокристаллов с диаметрами до 600 мм / Ю. М. Смирнов, И. А. Каплунов // Физика кристаллизации. – Тверь, 1994.
13. Левинзон, Д. И. Поглощение ИК-излучения в германии / Д. И. Левинзон, Р. Е. Ровинский, В. Е. Роголин, Е. П. Рыкун, И. С. Ценина, В. А. Шершель // Материалы IX совещания по получению профилированных кристаллов и изделий способом Степанова и их применению в народном хозяйстве. – Л., 1982. – С. 123—126.
14. Ровинский, Р. Е. Оптические свойства и области применения полупроводниковых монокристаллов германия / Р. Е. Ровинский, В. Е. Роголин, В. А. Шершель // Изв. АН СССР. Сер. физическая. – 1983. – Т. 47, № 2. – С. 432—435.
15. Артюшенко, В. Г. Кристаллы галогенидов таллия с малыми оптическими потерями / В. Г. Артюшенко, Э. П. Бочкарев, С. А. Воронина, Г. Г. Главин, В. Ф. Голованов, Т. И. Дарвойт, Е. И. Дианов, Ю. В. Кормилицин // Квантовая электроника. – 1980. – Т. 7, № 8. – С. 2037—2039.
16. Горилецкий, В. И. Автоматизированное вытягивание из расплава крупногабаритных щелочно-галлоидных монокристаллов / В. И. Горилецкий, В. А. Неменов, В. Г. Проценко, А. В. Радкевич, Л. Г. Эйдельман // Расширенные тез. VI Межд. конф. по росту кристаллов. – М., 1980. – Т. 3. – С. 17—19.
17. Роголин, В. Е. Моделирование процессов проскальзывания на границе на бикристаллах хлористого серебра / В. Е. Роголин, А. В. Шалимова, М. П. Шаскольская // Изв. АН СССР. Сер. физическая. – 1976. – Т. 41, № 7. – С. 1537—1541.
18. Конов, В. И. Оптический пробой газов вблизи поверхности твердых тел / В. И. Конов: Автореф. дисс. ... докт. физ.-мат. наук. – М.: ФИАН, 1982. – 48 с.
19. Куликов, В. Г. Прохождение излучения импульсного CO<sub>2</sub>-лазера через полупроводниковые кристаллы / В. Г. Куликов, Р. Е. Ровинский, В. Е. Роголин, А. А. Холодилов // Тез. докл. IV Всесоюз. совещания по нерезонансному взаимодействию оптического излучения с веществом. – Л.: Наука, 1978. – С. 243—244.
20. Ровинский, Р. Е. Прохождение излучения импульсного CO<sub>2</sub>-лазера через диэлектрические кристаллы / Р. Е. Ровинский, В. Е. Роголин, А. А. Холодилов, В. М. Чутко // Там же. – Л.: Наука, 1978. – С. 321—322.
21. Ровинский, Р. Е. О нелинейном поглощении импульса излучения CO<sub>2</sub>-лазера при его прохождении через оптические материалы / Р. Е. Ровинский, В. Е. Роголин // Там же. – Л.: Наука, 1981. – С. 346—347.
22. Райзер, Ю. П. Лазерная искра и распространение разрядов / Ю. П. Райзер. – М.: Наука, 1974. – 308 с.
23. Левинзон, Д. И. Исследование монокристаллов профильного германия, облученных импульсным CO<sub>2</sub>-лазером / Д. И. Левинзон, Р. Е. Ровинский, В. Е. Роголин, Е. П. Рыкун, А. Л. Трайнин, И. С. Ценина, Э. Г. Шейхет // Изв. АН СССР. Сер. физическая. – 1979. – Т. 43, № 9. – С. 2001—2005.
24. Роголин, В. Е. О порообразовании в щелочно-галлоидных монокристаллах под действием импульса электромагнитного излучения / В. Е. Роголин, Т. И. Самойлова, Н. А. Тищенко, М. П. Шаскольская // ФТТ. – 1980. – Т. 22, № 12. – С. 3549—3554.
25. Роголин, В. Е. О взаимодействии импульса ИК-излучения с центрами окраски в NaCl / В. Е. Роголин, Н. А. Тищенко, М. П. Шаскольская // ЖТФ. – 1980. – Т. 50, № 5. – С. 1077—1079.
26. Роголин, В. Е. Кинетика отжига пор, возникающих при точечном микровзрыве в объеме кристалла / В. Е. Роголин, Т. И. Самойлова, М. П. Шаскольская // Кристаллография. – 1980. – Т. 25, № 5. – С. 1100—1101.
27. Поуровская, И. Е. О волне ионизации, поддерживаемой мощным лазерным излучением / И. Е. Поуровская, М. И. Трибельский, В. И. Фишер // ЖЭТФ. – 1982. – Т. 82, вып. 6. – С. 1840—1852.
28. Voszka, R. Growth of single crystals at the research laboratory for crystal physics / Voszka R. // Acta Physica Acad. Sci. Hung. – 1979. – V. 47, N 1-3. – P. 5—11.
29. Савостьянова, М. В. О природе окрашенной каменной соли / М. В. Савостьянова // Изв. физ.-мат. ин-та им. В. А. Стеклова АН СССР. – 1929. – № 3. – С. 169; Z. Physik. – 1930. – N 64. – С. 262.
30. Роголин, В. Е. Поликристаллические алмазы – новый конструкционный материал для силовой оптики и электроники / В. Е. Роголин // Матер. конф. V Междунар. форума «Лазерные и оптические системы и технологии». – М., 2009. – С. 12—18.

*Автор выражает глубокую признательность проф. Р. Е. Ровинскому, руководившему данной работой. Очень ценная помощь в работе была оказана проф. М. П. Шаскольской — основателем кафедры кристаллографии МИСиС, привившей интерес к научной работе и любовь к кристаллам.*