

УДК 535.21.535.55.535-45.53.043

ГЕНЕРАЦИЯ ГИПЕРЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСОВ ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ – НОВОЕ ФИЗИЧЕСКОЕ ЯВЛЕНИЕ

С. Г. Казанцев

Исследована особенность взаимодействия монокристаллических материалов проходной ИК-оптики с импульсным лазерным излучением. Обнаружено новое физическое явление: впервые в прямом эксперименте наблюдалось возникновение и последующее периодическое и стохастическое изменение картины двулучепреломления во всём облучаемом объёме монокристалла при прохождении через него широкоапертурного лазерного импульса микросекундной длительности с длиной волны $\lambda = 10,6$ мкм. Данное явление, а также закономерности возникновения, продолжительность и интенсивность обнаруженных оптико-физических эффектов, зафиксированы методом высокоскоростной фоторегистрации картины двулучепреломления в линейно поляризованном свете со скоростью 500 тысяч кадров в секунду. Установлено, что наблюдаемое явление носит ярко выраженный пороговый характер, а продолжительность изменения картины двулучепреломления более чем на порядок превышает длительность лазерного воздействия и достигает 150 мкс и более. Показано, что изменение картины двулучепреломления является отражением процесса перераспределения внутренних напряжений, который возникает вследствие генерации в монокристаллах KCl и NaCl гиперзвуковых колебаний. Скорость их оценивалась по изменению проекции напряжённых (ненапряжённых) областей картины двулучепреломления и достигала значений ~ 18 км·с⁻¹ и более, что на порядок превышает скорость упругих волн в щёлочногалоидных монокристаллах. На основе полученных результатов экспериментальных исследований выдвинута гипотеза, позволяющая объяснить ряд закономерностей повреждения монокристаллов короткоимпульсным лазерным излучением. Предложен принципиально новый способ повышения стойкости элементов силовой ИК-оптики к воздействию импульсного лазерного излучения за счёт использования анизотропии механических свойств монокристаллов. Сутью данного способа является выбор ориентации монокристалла таким образом, чтобы обеспечить максимальное механическое сопротивление материала силам сжатия-растяжения, возникающим в направлении импульсного лазерного воздействия.

Ключевые слова: высокоскоростная фотосъёмка, поляриод, двулучепреломление, апертура, ИК-оптика, растровая зеркальная система, монокристалл, сингония, кристаллографическая плоскость, импульсное лазерное излучение, болометр, охлаждаемый фотоприёмник, гиперзвуковые колебания, стохастическое перераспределение внутренних напряжений, анизотропия механических свойств.

Введение

Щёлочно-галоидные кристаллы (ЩГК) традиционно используются для изготовления различных элементов ИК-оптики (объективов, линз, призм и т. п.), а также в качестве силовых элементов проходной оптики мощных непрерывных, импульсных и импульсно-периодических СО₂-лазеров, нашедших широкое применение в автоматизированных лазерных технологических комплексах (АЛТК), предназначенных для сварки, резки, модифицирования поверхности и других видов лазерной обработки различных конструкционных материалов и изделий из них [1 – 9]. При этом среди других материалов, используемых для изготовления силовой ИК-оптики, ЩГК имеют наибольшую лазерную стойкость как при импульсном, так и при непрерывном режимах облучения [5 – 19]. Очевидно, что для повышения производительности и расширения сферы применения АЛТК необходимо повышать мощность источников лазерного излучения, однако достигнутые к настоящему моменту значения выходной мощности технологических СО₂-лазеров, как правило, не превышают единиц кВт, а энергия в

импульсе – единиц кДж в непрерывном и импульсном режимах генерации соответственно [1 – 3, 11]. Одним из ограничивающих факторов дальнейшего увеличения выходной мощности лазеров среднего ИК-диапазона является то, что предельные значения лазерной стойкости большинства перспективных материалов силовой ИК-оптики (ЩГК, ZnSe, CdTe и др.) уже достигнуты, при этом простое масштабирование апертуры мощных лазеров нивелируется проявлением размерного эффекта, приводящего к снижению максимально возможной удельной лучевой нагрузки на материал, а также непропорциональным ростом стоимости крупногабаритной силовой ИК-оптики [6, 9 – 11, 13, 17 – 19]. Поэтому добиться повышения мощности (энергии), пропускаемой оптическими элементами, возможно лишь за счёт разработки новых технологических методов повышения лазерной стойкости материалов силовой ИК-оптики, направленных на улучшение их оптического качества, структурного совершенства и механических характеристик [17 – 29], а также путём оптимизации режимов эксплуатации оптических элементов (лазерный и термический отжиг до, после и в

процессе облучения), совершенствования конструкции оптических узлов и разработки альтернативных способов формирования широкоапертурных лазерных пучков в пространстве [17 – 19, 22, 27 – 31].

В связи с этим, исследование механизмов взаимодействия лазерного излучения с материалами силовой ИК-оптики имеет важное прикладное значение и является одним из актуальных направлений физики взаимодействия высокоинтенсивного оптического излучения с конденсированными средами.

В данной статье приводятся результаты исследований взаимодействия широкоапертурного импульсного лазерного излучения микросекундной длительности с длиной волны $\lambda = 10,6$ мкм и ЦГК.

Методика экспериментов

Для выявления и исследования особенностей взаимодействия материалов силовой ИК-оптики с импульсным лазерным излучением проводилась высокоскоростная фоторегистрация картины двулучепреломления в оптических элементах, изготовленных из монокристаллов KCl и NaCl класса симметрии $m3m$ кубической сингонии, в момент прохождения импульсного лазерного излучения, а также непосредственно после воздействия лазерного импульса. Известно, что картина двулучепреломления в линейно поляризованном свете непосредственно связана с распределением внутренних напряжений и позволяет визуализировать состояние внутренней структуры материала.

Оптическая схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

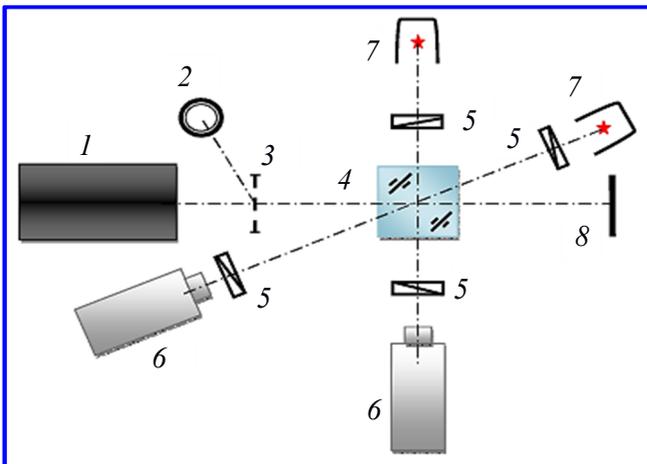


Рис. 1. Оптическая схема экспериментальной установки: 1 – ТЕА CO_2 -лазер; 2 – охлаждаемый фотоприёмник ФСГ 2-23; 3 – проходной решётчатый болометр; 4 – испытуемый образец; 5 – поляризаторы; 6 – высокоскоростные фотокамеры ВСК-5; 7 – излучатели ЭВ-45; 8 – диффузно-рассеивающий экран

Лазерное излучение с помощью системы формирования лазерного пятна (растровой зеркальной системы) подводилось к испытуемому образцу, который помещался между скрещенными поляроидами, что позволяло наблюдать картину двулучепреломления и фиксировать распределение внутренних напряжений в материале образца. Высокоскоростная фотосъёмка проводилась в двух взаимно перпендикулярных направлениях: вдоль и перпендикулярно оси лазерного излучения.

В качестве источника излучения был использован ТЕА CO_2 -лазер, генерирующий импульсы с длительностью по уровню $0,5 \tau_{0,5} = 0,8 - 3$ мкс и по уровню $0,1 \tau_{0,1} = 6 - 10$ мкс (рис. 2), апертура выходного излучения составляла 200×300 мм П-образной формы (рис. 3, а), энергия в импульсе E варьировалась в интервале от 50 Дж до 2 кДж.

Форма лазерных импульсов регистрировалась фотоприёмником ФСГ 2-23, охлаждаемым жидким азотом, который улавливал рассеянное измерительными болометрами ИК-лазерное излучение, и фиксировалась запоминающим осциллографом С 8-13. Погрешность измерений длительности импульса по уровню 0,5 не превышала $\pm 15\%$.

Энергия лазерного излучения измерялась проходными решётчатыми болометрами, рабочее тело которых было изготовлено из никелевой проволоки $\varnothing 80$ мкм, закреплённой на прямоугольных диэлектрических каркасах размером 500×500 мм, в виде металлической сетки с шагом 10 мм в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Показания болометров фиксировались шлейфовыми осциллографами. Применение набора из 2 – 3 болометров, сличение их показаний с образцовыми средствами измерений типа «ОСИ СМ», «Джоуль» через каждые 10 – 15 воздействующих лазерных импульсов обеспечило погрешность измерений E не хуже $\pm 10 - 12\%$.

С помощью 100-элементной растровой системы из медных зеркал исходное П-образное излучение формировалось в лазерное пятно апертурой 80×80 мм в плоскости испытуемого образца (рис. 3, б). Известно, что применение растровых зеркальных систем позволяет не только сформировать пятно лазерного излучения (группу пятен) заданной конфигурации и апертуры, но и значительно снизить неравномерность исходного лазерного излучения [11, 17, 27, 28].

Плотность энергии лазерного излучения W в плоскости испытуемого образца определялась как отношение величины энергии в импульсе к площади лазерного пятна S : $W = E/S$.

Площадь лазерного пятна измерялась с помощью калиброванной фотобумаги путём прямого

экспонирования одним импульсом лазерного излучения. Фотобумага калибровалась на 7 градаций по величине плотности энергии лазерного излучения: менее $0,5 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$; $0,5 - 1,4 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$; $1,4 - 2,7 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$; $2,7 - 5,6 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$; $5,6 - 12 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$; $12 - 20 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$; более $20 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$. По ожогу на фотобумаге дополнительно проводилась верификация расчётных значений величины W , а также оценивалась равномерность распределения интенсивности лазерного излучения в сечении лазерного пучка.

Испытуемые образцы представляли собой оптические элементы размером $80 \times 80 \times 20 \text{ мм}$, $80 \times 80 \times 60 \text{ мм}$ и $100 \times 100 \times 80 \text{ мм}$, изготовленные из монокристаллов КСl и NaCl.

Монокристаллы КСl были выращены в реактивной атмосфере HCl из расплава, сырьём которому служил порошок КСl ОСЧ-5-4 ТУ 6-09-3678-74, предварительно прогретый в динамическом вакууме $\sim 10^{-3} \text{ Торр}$ при температуре $600 - 650 \text{ }^\circ\text{C}$. Монокристаллы NaCl выращивались методом Киропулоса на воздухе.

Заготовки оптических элементов вырезались из монокристаллических булы нитяной пилой и шлифовались безабразивным способом на тканом полировальнике, смоченном 10% раствором этилового спирта высшей очистки в дистиллированной воде. Финишная полировка проводилась с применением микропорошка АСМ 1/0.

Для измерения коэффициента объёмного поглощения монокристаллов на волне $10,6 \text{ мкм}$ β был создан стенд на базе непрерывного CO_2 -лазера ЛГН-701 (рис. 4). Измерения проводились калориметрическим методом с помощью дифференциальной термопары. Величина суммарного коэффициента поглощения кристалла $\beta_{\text{суммарное}}$ (поглощение в объёме и двумя приповерхностными областями оптического элемента $\beta_{\text{суммарное}} = \beta + 2\beta_{\text{поверхностное}}$) рассчитывалась с помощью известных методик калориметрических измерений. При этом использовались эмпирические константы, определяемые по углу наклона касательной начального участка временной зависимости температуры облучаемого непрерывным излучением образца-свидетеля, измеряемой относительно балластного образца равной массы. Временная зависимость автоматически фиксировалась самописцем. Образец-свидетель вырезался из выращенной булы монокристалла и подвергался оптико-механической обработке, аналогичной той, что и испытуемый образец. Это позволило исключить (значительно уменьшить) влияние систематической ошибки при расчёте значений β , обусловленной вкладом поглощения лазерного излучения приповерхностными областями оптического элемента в суммарное значение коэффициента поглощения.

Экспериментально полученные значения β для монокристаллов КСl имели значительный разброс как от булы к буле, так и для различных фрагментов булы и составили $\sim (1,5 - 4) \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$, а для монокристаллов NaCl $\sim (1 - 7) \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$. Это обусловлено как фундаментальными свойствами кристаллов,

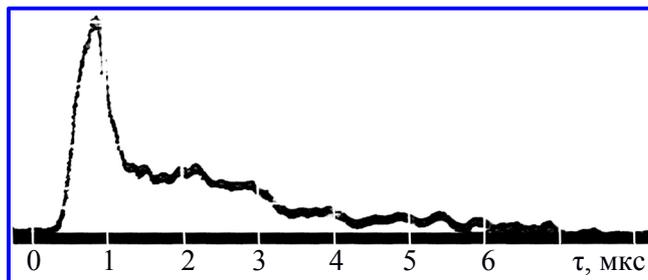


Рис. 2. Характерная форма импульса лазерного излучения

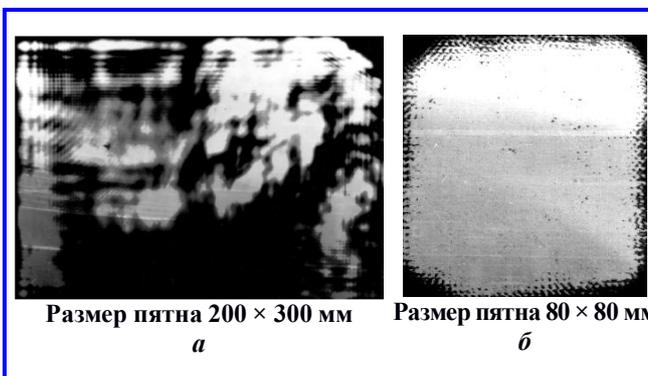


Рис. 3. Фотоснимки пятен ожогов на калиброванной фотобумаге при экспонировании на выходе ТЕА CO_2 -лазера (а) и в плоскости испытуемого образца (б)

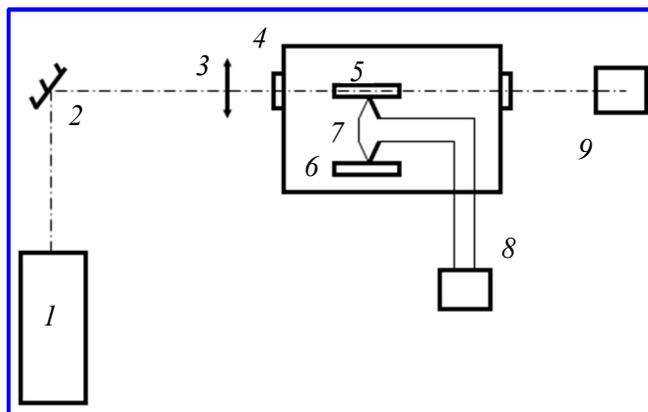


Рис. 4. Оптическая схема стенда для измерения коэффициента поглощения монокристаллов на волне $10,6 \text{ мкм}$ калориметрическим методом: 1 – CO_2 -лазер ЛГН-703; 2 – поворотное зеркало; 3 – фокусирующая линза (NaCl); 4 – калориметр; 5 – образец-свидетель; 6 – балластный образец; 7 – дифференциальная термопара; 8 – микровольтметр + самописец; 9 – измеритель мощности лазерного излучения ИМО-2Н

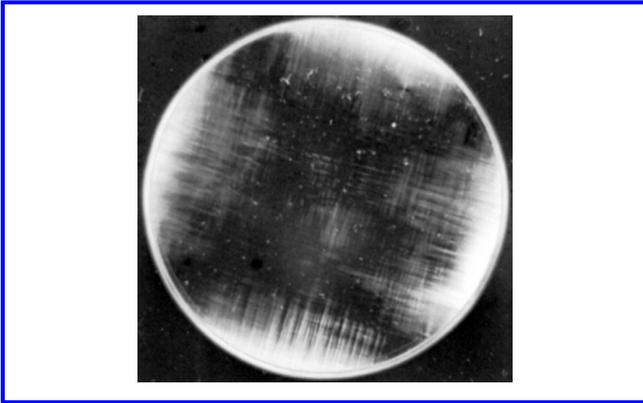


Рис. 5. Типичная картина распределения внутренних напряжений (светлые области) в объёме монокристалла КСl Ø150 мм до воздействия лазерного импульса

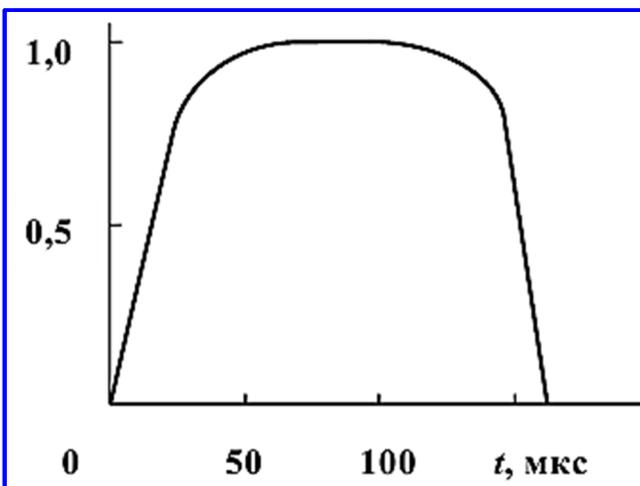


Рис. 6. Среднестатистическая форма импульса подсветки ЭВ-45

так и современным уровнем технологии получения монокристаллов ШГК, а также более широкой вариативной составляющей факторов, влияющих на оптическое качество монокристаллов, выращиваемых на воздухе по сравнению с монокристаллами, выращенными в специально сформированной атмосфере (реактивной, инертной и т. п.).

Фоторегистрация картины двулучепреломления в поляризованном свете показала, что изначально в оптических элементах, изготовленных из ШГК, имеются области с внутренними напряжениями, достигающими значений $\sim 10 - 15 \text{ кг} \cdot \text{см}^{-2}$ (светлые на фото, рис. 5). Причины возникновения внутренних напряжений в монокристаллах могут быть самыми разнообразными: температурные градиенты в процессе роста кристалла, недостаточная продолжительность послеростового термического отжига, термические и механические воздействия в процессе хранения, транспортировки и оптико-механической обработки монокристаллических буль, заготовок и гото-

вых оптических элементов. Иными словами, возникновение внутренних напряжений в ШГК возможно в результате широкого спектра внешних воздействий на кристалл на всех технологических переделах.

Высокоскоростная фоторегистрация картины двулучепреломления проводилась с помощью камеры ВСК-5 в режиме покадровой развёртки со скоростью 500 тыс. кадров в секунду, при этом длительность 1 микрокадра составила $\sim 2 \text{ мкс}$.

При фотосъёмке на такой значительной скорости и, соответственно, с кратковременной экспозицией – менее 2 мкс/микрокадр, для подсветки испытуемого образца через скрещенные поляриды (минимальное светопропускание) необходим яркий точечный источник света со спектром, аналогичным спектру белого света.

В качестве точечного источника света был использован электроискровой высоковольтный разрядник ЭВ-45, обеспечивающий импульсную подсветку длительностью $130 \pm 20 \text{ мкс}$ по уровню 0,7 (рис. 6). При измерении цветовой температуры области электрического пробоя (плазменного образования) было установлено, что её величина достигает значений $\sim 40 \text{ тыс. К}$, т. е., излучающее тело представляет собой аналог абсолютно чёрного тела с соответствующим спектром излучения.

Высокоскоростная фоторегистрация, поджиг искры электроискрового разрядника и генерация лазерного импульса синхронизировались во времени таким образом, чтобы фотосъёмка начиналась до момента прохождения переднего фронта лазерного импульса, а интенсивность подсветки при этом достигала максимального значения. Для этого запуск электроискрового разрядника производился за 10 – 20 мкс, а открытие затвора фотокамеры за 2 – 4 мкс до начала генерации лазерного импульса.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Впервые в прямом эксперименте удалось зарегистрировать возникновение и развитие процесса изменения картины двулучепреломления в монокристалле в момент прохождения через него широкоапертурного лазерного импульса микросекундной длительности. Принципиальным в данном эксперименте является то, что сразу весь объём оптического элемента, находившийся в поле зрения высокоскоростной фотокамеры, подвергался облучению импульсом широкоапертурного лазерного излучения.

Метод визуализации распределения внутренних напряжений в линейно поляризованном свете в стационарном режиме широко используется для

изучения динамики состояния внутренней структуры материалов при различных внешних воздействиях. В частности, регистрация картины двулучепреломления использовалась при исследовании механизмов повреждения ЩГК лазерным излучением в результате накопления термоиндуцированных внутренних напряжений, при этом фиксация картины производилась в стационарном режиме до и после воздействия лазерного излучения [15, 20, 21]. В данном же эксперименте высокоскоростная фоторегистрация картины двулучепреломления была впервые применена в качестве метода исследования быстропротекающего процесса в момент внешнего воздействия на монокристалл.

Высокоскоростная фоторегистрация картины двулучепреломления в линейно поляризованном свете показала, что процесс перераспределения внутренних напряжений, выражающийся в периодическом изменении картины двулучепреломления, начинается с момента прохождения переднего фронта лазерного импульса во всём облучаемом объёме оптического элемента одновременно.

Типичный результат покадровой высокоскоростной фоторегистрации картины двулучепреломления в монокристалле KCl, проводимой одновременно с импульсным лазерным воздействием, представлен в табл. 1. В ней приведены отдельные микрокадры длительностью по ~ 2 мкс каждый, полученные при покадровой высокоскоростной фотосъёмке испытуемого образца. Ориентация испытуемого образца относительно оптической оси лазерного излучения и направления наблюдения (оптической оси высокоскоростной фотокамеры) указана в соответствии с условными обозначениями кристаллографических плоскостей и направлений в монокристаллах кубической сингонии (рис. 7) [32]. Оптическая ось высокоскоростной фотокамеры, поляридов, испытуемого образца и точечного источника света была отъюстирована перпендикулярно оптической оси лазерного излучения, и фотосъёмка производилась в направлении $\langle 010 \rangle$, перпендикулярном плоскости $\{010\}$ монокристалла KCl. Затвор высокоскоростной фотокамеры был открыт за 2 мкс до момента прохождения переднего фронта лазерного импульса (первый микрокадр « $-2 - 0$ мкс» – исходная картина двулучепреломления), затем фотосъёмка производилась во время воздействия лазерного импульса (микрокадры « $0 - 2$, $2 - 4$, $4 - 6$, $6 - 8$ мкс»), а также по окончании лазерного импульса вплоть до погасания импульса подсветки (микрокадр « $8 - 10$ мкс» и далее до « $140 - 142$ мкс»). Длительность лазерного импульса $\tau_{0,1}$ составила ~ 8 мкс, величина $W \sim 4,8$ Дж·см $^{-2}$.

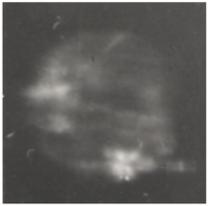
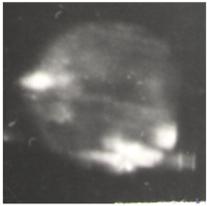
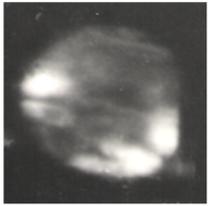
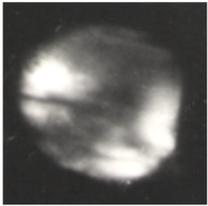
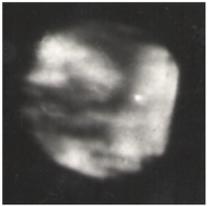
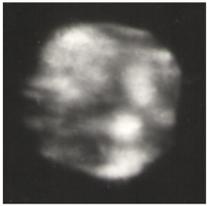
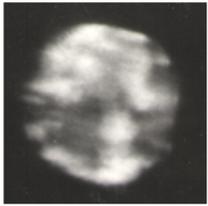
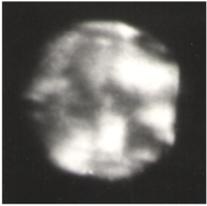
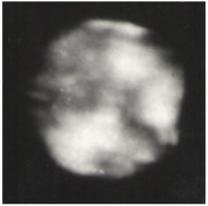
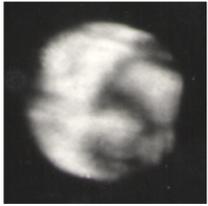
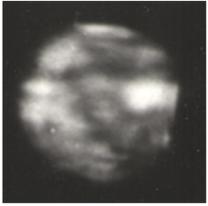
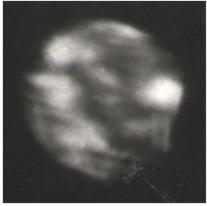
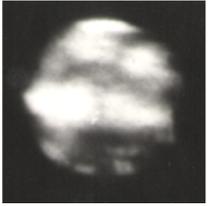
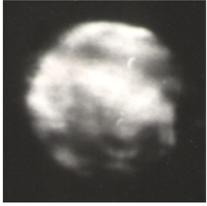
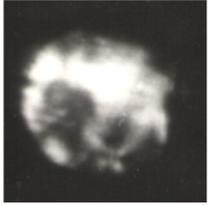
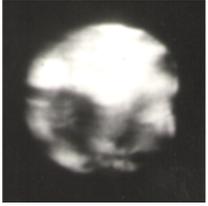
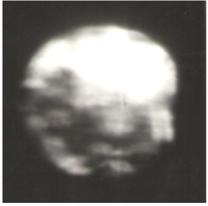
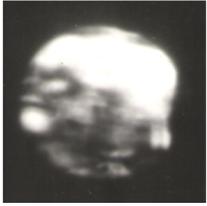
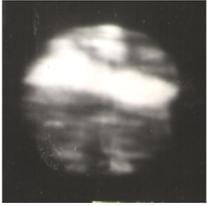
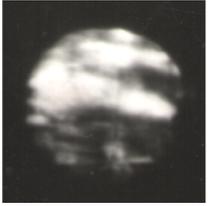
Как следует из табл. 1, на фотоснимках зафиксировано изменение формы и размеров напряжённых (светлых на снимках) и ненапряжённых (тёмных на снимках) областей в объёме монокристалла. При этом изменение размеров напряжённых и ненапряжённых областей и их границ происходит весьма разнообразно: наряду с типичным колебательным процессом, когда фиксируется их поэтапное от микрокадра к микрокадру увеличение с последующим уменьшением, наблюдается также перемещение границ в произвольных направлениях, возникновение и пропадание новых областей, стохастическая деформация их формы и т. п. Сравнение полученных микрокадров показывает, что скорость изменения границ и размеров этих областей также неравномерна в поле зрения и достигает в различных участках и направлениях величин $\sim 1,8 - 18$ км·с $^{-1}$ и более.

Изменение картины двулучепреломления, то есть, изменение упругой деформации и появление соответствующих ей волн внутренних напряжений, означает, что в объёме монокристалла, начиная с момента прохождения переднего фронта лазерного импульса, возбуждаются интенсивные звуковые колебания. Максимальная скорость этих звуковых колебаний оценивалась по изменению проекции напряжённых (ненапряжённых) областей картины двулучепреломления. Полученные значения во много раз превышает скорость упругих волн в монокристаллах KCl и NaCl, составляющую соответственно $v_{s[100]} \sim 1,78$ км·с $^{-1}$ и $2,41$ км·с $^{-1}$ (значения скорости поперечных волн в направлении $\langle 100 \rangle$) [33, 34], а интенсивность их такова, что возникающие при этом волны внутренних напряжений в объёме монокристалла, сопоставимы по величине с исходными остаточными напряжениями или даже могут превышать их. Об этом свидетельствуют резкие градиенты яркости и контрастности отдельных областей и картины двулучепреломления в целом. Оценка величин внутренних напряжений по динамике яркости светлых участков на микрокадрах показала, что они могут изменяться в диапазоне величин от 0 до 20 – 30 кГ·см $^{-2}$ и более.

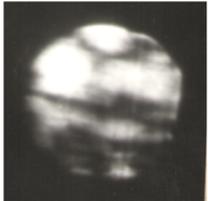
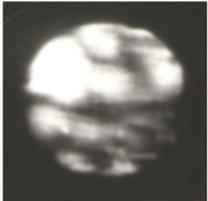
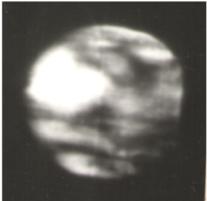
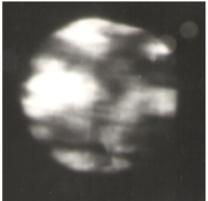
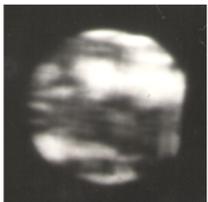
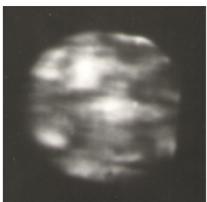
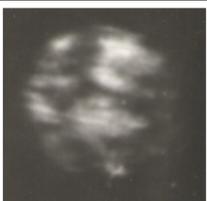
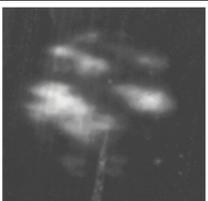
Генерация столь интенсивных звуковых колебаний и возникновение при этом резких градиентов внутренних напряжений может являться причиной раскалывания матрицы монокристалла по плоскостям спайности, происходящей, как известно [9, 14, 21], при достижении значений для монокристаллов KCl и NaCl $\sim 26 - 42$ кГ·см $^{-2}$. Это может послужить объяснением наблюдаемому характеру разрушения оптических элементов из ЩГК, происходящего под действием импульсов лазерного

Таблица 1

Изменение картины двулучепреломления в монокристалле КСl под действием лазерного импульса при наблюдении в плоскости {010}, поле зрения Ø80 мм. Покадровая высокоскоростная фотосъёмка проведена перпендикулярно оптической оси лазерного излучения

					
-2 – 0 мкс	0 – 2 мкс	2 – 4 мкс	4 – 6 мкс	6 – 8 мкс	8 – 10 мкс
					
10 – 12 мкс	12 – 14 мкс	14 – 16 мкс	16 – 18 мкс	18 – 20 мкс	20 – 22 мкс
					
22 – 24 мкс	24 – 26 мкс	26 – 28 мкс	28 – 30 мкс	30 – 32 мкс	32 – 34 мкс
					
34 – 36 мкс	36 – 38 мкс	38 – 40 мкс	40 – 42 мкс	42 – 44 мкс	44 – 46 мкс
					
46 – 48 мкс	49 – 50 мкс	50 – 52 мкс	52 – 54 мкс	54 – 56 мкс	56 – 58 мкс
					
58 – 60 мкс	60 – 62 мкс	62 – 64 мкс	64 – 66 мкс	66 – 68 мкс	68 – 70 мкс

Окончание табл. 1

					
70 – 72 мкс	72 – 74 мкс	74 – 76 мкс	76 – 78 мкс	78 – 80 мкс	80 – 82 мкс
					
82 – 84 мкс	84 – 86 мкс	86 – 88 мкс	88 – 90 мкс	90 – 92 мкс	92 – 94 мкс
					
94 – 96 мкс	96 – 98 мкс	98 – 100 мкс	100 – 102 мкс	102 – 104 мкс	104 – 106 мкс
					
106 – 108 мкс	108 – 110 мкс	110 – 112 мкс	112 – 114 мкс	114 – 116 мкс	116 – 118 мкс
					
118 – 120 мкс	120 – 122 мкс	122 – 124 мкс	124 – 126 мкс	126 – 128 мкс	128 – 130 мкс
					
130 – 132 мкс	132 – 134 мкс	134 – 136 мкс	136 – 138 мкс	138 – 140 мкс	140 – 142 мкс

Примечание: 1. Время экспозиции каждого микрокадра указано относительно переднего фронта лазерного импульса. 2. Момент прохождения лазерного импульса выделен зелёным цветом. 3. Оптико-физические параметры лазерного излучения: $\tau_{0,1} = 8$ мкс, $W = 4,8$ Дж·см⁻², апертура 80 × 80 мм.

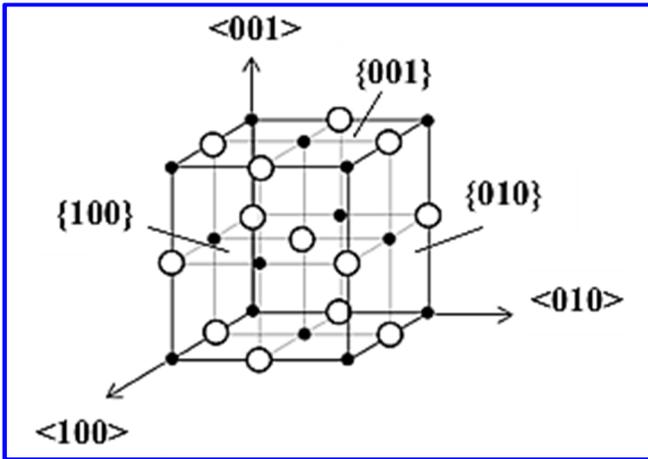


Рис. 7. Обозначения кристаллографических направлений (в треугольных скобках) и плоскостей (в фигурных скобках) в кристаллах кубической сингонии на примере элементарной ячейки NaCl (● – ионы Na^+ ; ○ – ионы Cl)

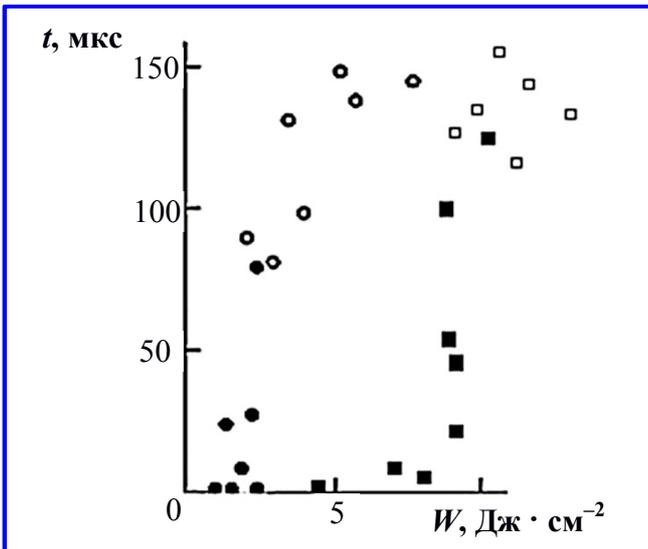


Рис. 8. Зависимости продолжительности перераспределения картины двулучепреломления при наблюдении перпендикулярно (●) и вдоль оси лазерного излучения (■). Светлыми символами обозначены заниженные значения (окончание процесса не достигнуто, реальная продолжительность превысила указанную на рисунке)

излучения с интенсивностью, значительно превышающей пороговые значения возникновения объёмных повреждений в виде микропор и микротрещин.

В ходе эксперимента установлено, что продолжительность процесса перераспределения внутренних напряжений зависит от интенсивности лазерного излучения, носит ярко выраженный пороговый характер и может в десятки и сотни раз превышать длительность лазерного воздействия, достигая десятков и сотен микросекунд.

Наблюдение картины двулучепреломления в двух взаимно перпендикулярных направлениях позволило выявить ещё одну закономерность: порог возникновения данного процесса определяется ориентацией монокристалла относительно оптической оси лазерного излучения.

При лазерном воздействии вдоль направления $\langle 100 \rangle$ и наблюдении (высокоскоростной фотосъёмке) перпендикулярно лазерному излучению изменение картины двулучепреломления в плоскости $\{010\}$ (или $\{001\}$) регистрируется уже при значениях $W \sim 1,5 - 2 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$ (табл. 2). В то же время при такой же интенсивности лазерного излучения изменения картины двулучепреломления в плоскости $\{100\}$ (наблюдение вдоль оси лазерного излучения) ещё не происходит, а регистрируется оно лишь при увеличении W до $\sim 8 - 12 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$. При этом порог возникновения данного процесса менее выражен, чем в первом случае, но его продолжительность также на порядок и более превышает длительность лазерного воздействия.

То есть, существует два порога возникновения изменения картины двулучепреломления в монокристаллах, различающиеся в 4 – 6 раз по величине W : более низкий – при наблюдении перпендикулярно оси лазерного излучения, более высокий – вдоль лазерного луча.

Зависимость порога возникновения и продолжительности процесса перераспределения внутренних напряжений от интенсивности лазерного излучения (плотности энергии в импульсе) и ориентации оси наблюдения (оптической оси высокоскоростной фотосъёмки) картины двулучепреломления в монокристаллах показана на рис. 8.

Результаты покадровой высокоскоростной фоторегистрации картины двулучепреломления в монокристалле KCl, полученные при высокоскоростной фотосъёмке кристаллографической плоскости $\{100\}$ вдоль оптической оси лазерного излучения с $\tau_{0,1} = 7 \text{ мкс}$, $W = 10 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$ и апертурой $80 \times 80 \text{ мм}$, приведены в табл. 3.

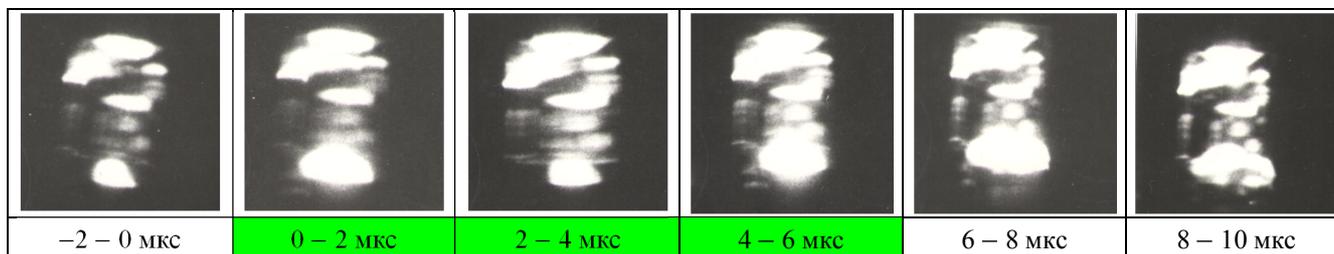
Генерация звука в монокристаллах фиксировалась в виде акустического отклика и в других экспериментах по воздействию лазерного излучения на ЩГК [13, 35], однако в них не определялась скорость генерируемых акустических волн.

Таким образом, можно утверждать, что впервые в прямом эксперименте обнаружена и зафиксирована генерация гиперзвуковых колебаний в конденсированной среде при прохождении через неё широкоапертурного короткоимпульсного лазерного излучения.

Установленные в эксперименте закономерности могут быть положены в основу гипотезы, позволяющей

Таблица 2

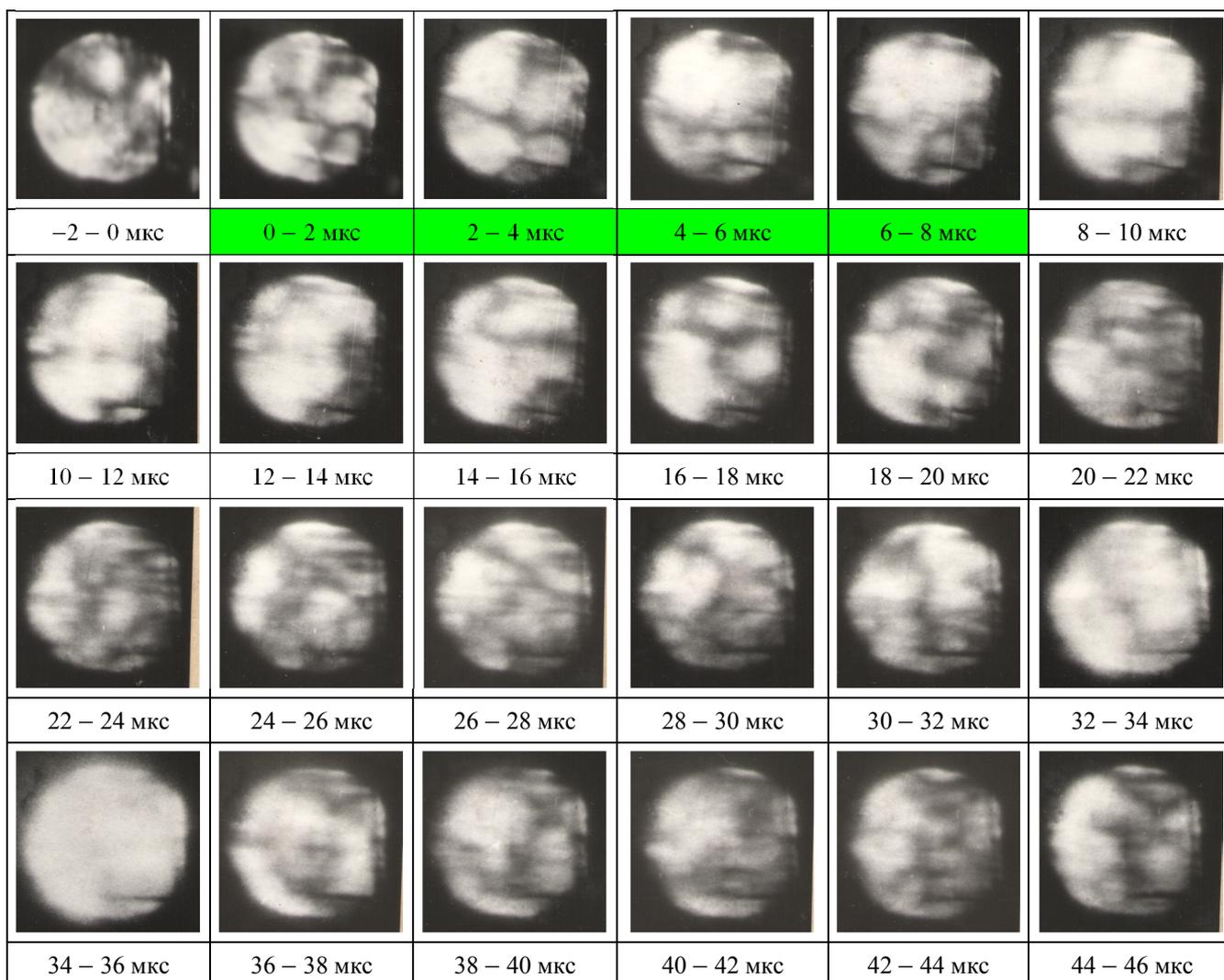
Изменение картины двулучепреломления в монокристалле КС1 под действием лазерного импульса при наблюдении плоскости {010}, поле зрения $\varnothing 80$ мм. Покадровая высокоскоростная фотосъёмка проведена перпендикулярно оптической оси лазерного излучения



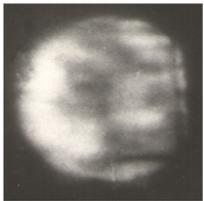
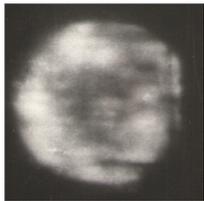
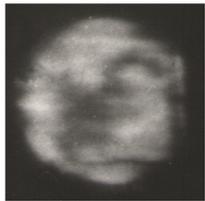
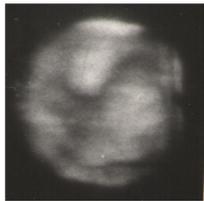
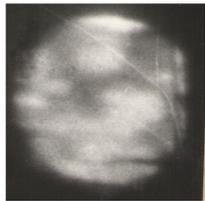
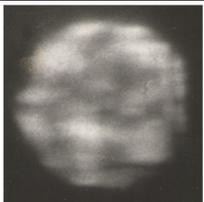
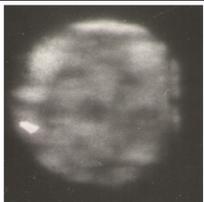
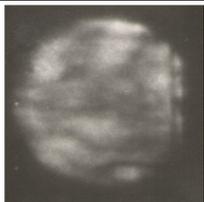
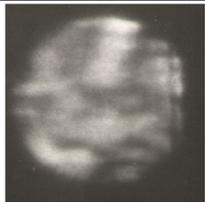
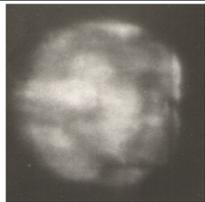
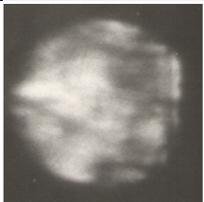
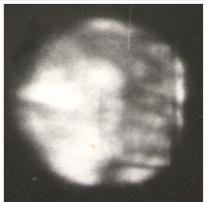
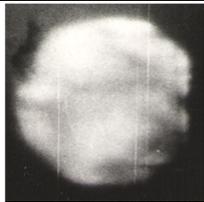
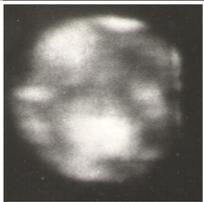
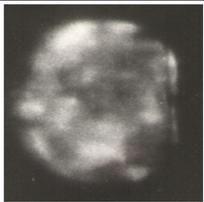
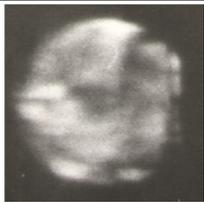
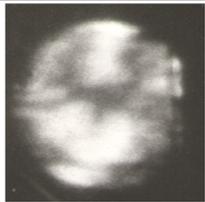
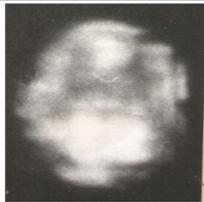
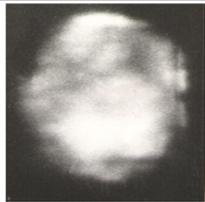
Примечание: 1. Время экспозиции каждого микрокадра указано относительно переднего фронта лазерного импульса. Момент прохождения лазерного импульса выделен зеленым цветом. 3. Оптико-физические параметры лазерного излучения: $\tau_{0,1} = 6$ мкс, $W = 2,0$ Дж·см⁻², апертура 80×80 мм. Размер грани облучаемого оптического элемента 100×60 мм. Изменение картины двулучепреломления при данной интенсивности излучения наблюдалось только в момент прохождения лазерного импульса.

Таблица 3

Изменение картины двулучепреломления в монокристалле КС1 под действием лазерного импульса при наблюдении плоскости {100}, поле зрения $\varnothing 80$ мм. Покадровая высокоскоростная фотосъёмка проведена вдоль оптической оси лазерного излучения



Окончание табл. 2

					
46 – 48 мкс	49 – 50 мкс	50 – 52 мкс	52 – 54 мкс	54 – 56 мкс	56 – 58 мкс
					
58 – 60 мкс	60 – 62 мкс	62 – 64 мкс	64 – 66 мкс	66 – 68 мкс	68 – 70 мкс
					
70 – 72 мкс	72 – 74 мкс	74 – 76 мкс	76 – 78 мкс	78 – 80 мкс	80 – 82 мкс
					
82 – 84 мкс	84 – 86 мкс	86 – 88 мкс	88 – 90 мкс	90 – 92 мкс	92 – 94 мкс

Примечание: 1. Время экспозиции каждого микрокадра указано относительно переднего фронта лазерного импульса. 2. Момент прохождения лазерного импульса выделен зелёным цветом. 3. Оптико-физические параметры лазерного излучения: $\tau_{0,1} = 7$ мкс, $W = 10$ Дж·см⁻², апертура 80 × 80 мм.

качественно объяснить наблюдаемые особенности повреждения оптических элементов из ЦГК под действием высокоинтенсивных лазерных импульсов. Известно, что облучение монокристаллов КСl короткоимпульсным лазерным излучением, характеризующимся высокой мгновенной мощностью, с интенсивностью, превышающей порог повреждения объёма кристалла, приводит к его растрескиванию за весьма короткое время – единицы – десятки микросекунд, начиная от момента воздействия переднего фронта лазерного импульса. Инициаторами возникновения трещин в матрице кристалла являются области лазерного пробоя, инициированного поглощающими микронеоднородностями [11, 13, 17 – 19, 28].

При ориентации монокристалла таким образом, что лазерное излучение входит в него вдоль направления $\langle 100 \rangle$, раскрытие микротрещин (а при боль-

ших значениях W – раскалывание матрицы монокристалла) вокруг области локального объёмного повреждения вначале происходит лишь в плоскости $\{100\}$, перпендикулярной лазерному лучу. В плоскостях же $\{010\}$ и $\{001\}$ монокристалл растрескивается при значительно более высоких интенсивностях лазерного излучения. Для иллюстраций данной особенности повреждения матрицы монокристалла на рис. 9 представлен оптический элемент (входное окно вакуумной камеры) с трещинами, раскрывшимися в плоскости $\{100\}$, перпендикулярной оси прошедшего через него лазерного излучения.

Обращает на себя внимание сходство формы трещин, раскрывающихся в плоскости $\{100\}$ монокристаллической матрицы оптического элемента (рис. 9), и форм сечения указательной поверхности модуля Юнга $E_{Ю}$ плоскостью $\{100\}$ (рис. 10), а

также характерной формы главного сечения указательной поверхности фазовых скоростей упругих волн монокристаллов класса симметрии $m\bar{3}m$ кубической сингонии (рис. 11). Как известно, модуль Юнга характеризует сопротивление материала сжатию/растяжению при упругой деформации, или свойство объекта деформироваться (сжиматься/удлиниться) вдоль направления действующей силы; и определяется как отношение напряжения к деформации удлинения/сжатия (модуль Юнга также называют модулем упругости). Очевидно, что данное сходство указывает на определяющую роль влияния физических процессов, обусловленных возникновением внутренних напряжений в матрице монокристалла и сопровождающихся генерацией звуковых колебаний, на механизм и характерные особенности разрушения матрицы при импульсном лазерном воздействии.

Таким образом, учитывая обнаруженные в эксперименте оптико-физические эффекты и закономерности возникновения и динамики изменения картины двулучепреломления, по-видимому, можно утверждать, что даже при допороговой интенсивности под воздействием короткоимпульсного лазерного излучения в монокристалле начинают действовать силы сжатия-растяжения, направленные в большей степени вдоль оптической оси лазерного излучения. Возникновение и ориентация векторов этих сил как раз и может послужить объяснением такой особенности разрушения оптических элементов, как раскрытие трещин, прежде всего, в плоскости $\{100\}$ с последующим раскалыванием ШГК по плоскостям спайности, перпендикулярным лазерному лучу. Данное утверждение автор выдвигает как *основной постулат гипотезы*, позволяющей качественно объяснить наблюдаемые особенности повреждения оптических элементов из ШГК под действием мощных широкоапертурных лазерных импульсов.

Учитывая данные особенности разрушения оптических элементов, полученные экспериментальные результаты высокоскоростной фоторегистрации картины двулучепреломления и постулат гипотезы, можно предложить *принципиально новый способ повышения стойкости элементов силовой ИК-оптики к воздействию импульсного лазерного излучения, основанный на использовании фундаментальных физико-механических свойств монокристаллов – анизотропии механических параметров*. Для повышения стойкости оптического элемента к импульсному лазерному излучению необходимо ориентацию заготовки монокристалла, из которого он изготавливается, выбрать таким образом,

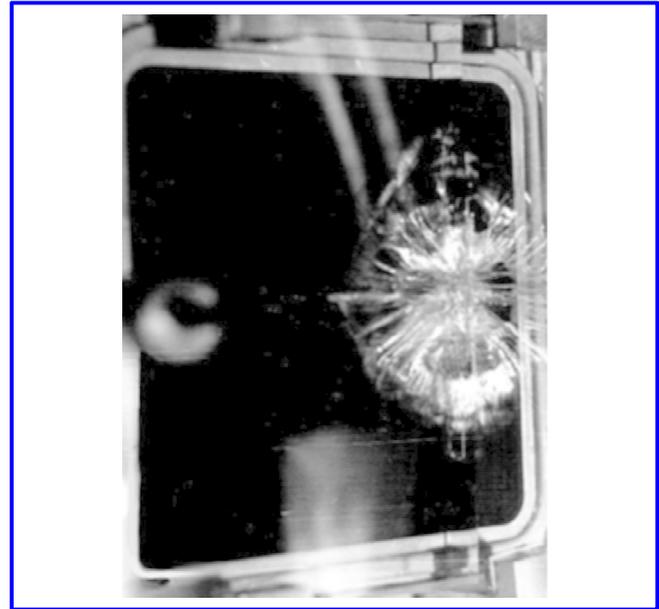


Рис. 9. Фотоснимок оптического элемента размером $175 \times 175 \times 27$ мм, расколовшегося под действием импульса лазерного излучения с $\tau_{0,5} \sim 1$ мкс и $W \sim 12$ Дж·см⁻²

чтобы обеспечить максимальное механическое сопротивление материала силам сжатия-растяжения, возникающим в направлении импульсного лазерного воздействия.

При этом со всей очевидностью можно утверждать, что чем сильнее выражена анизотропия механических свойств в кристалле, тем выше будет выигрыш в стойкости к импульсному лазерному воздействию при оптимальной ориентации монокристалла.

Данное предложение подкрепляется ещё и таким фактом: использованные в эксперименте монокристаллы KCl и NaCl являются изотропными кристаллами кубической сингонии, однако даже и в этом случае проявилась своеобразная анизотропия особенностей и степени повреждения матрицы кристалла, возникновения и развития картины двулучепреломления, генерации гиперзвуковых колебаний.

По-видимому, дальнейшим направлением исследований должно быть изучение закономерностей лазерного повреждения кристаллов при различных ориентациях матриц кристаллов по отношению к лазерному воздействию с учётом анизотропии их механических свойств.

Заключение

Представленные результаты позволяют сделать следующие выводы.

Обнаружено новое физическое явление: впервые в прямом эксперименте наблюдалось возникновение и последующее периодическое и

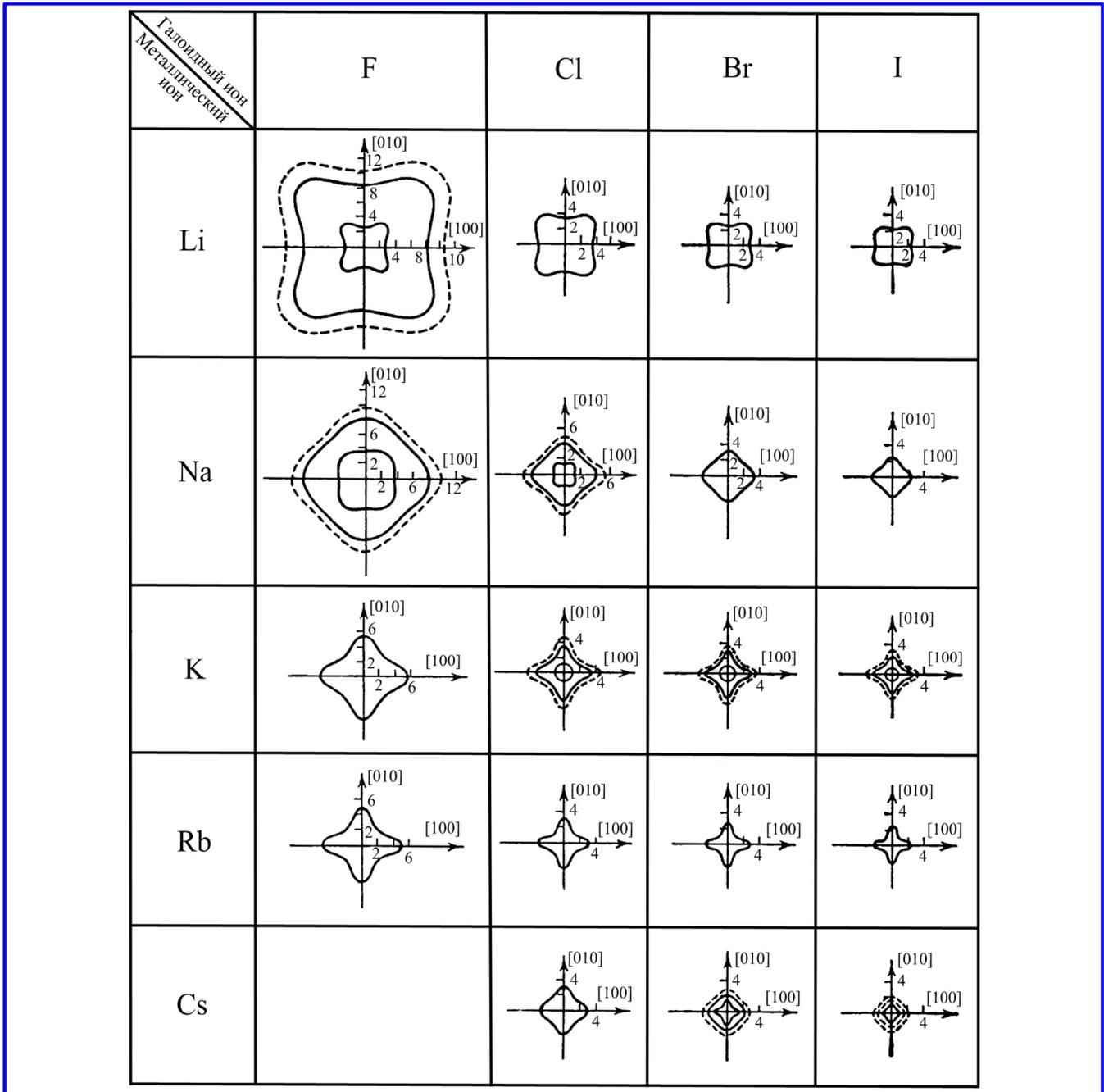


Рис. 10. Сечение указательной поверхности модуля Юнга E_{10} плоскостью $\{100\}$ в NaCl и других ЦГК (величины значений E_{10} по осям даны в 10^{11} дин/см², направления указаны в квадратных скобках) [34]

стохастическое изменение картины двулучепреломления во всём облучаемом объёме монокристалла при прохождении через него широкоапертурных лазерных импульсов микросекундной длительности с длиной волны $\lambda = 10,6$ мкм, а также по окончании лазерного воздействия.

Создана экспериментальная установка, с помощью которой методом высокоскоростной фоторегистрации в поляризованном свете со скоростью 500 тыс. кадров в секунду было зафиксировано данное явление, выявлены закономерности возникнове-

ния, продолжительности и интенсивности обнаруженных оптико-физических эффектов.

Установлено, что под действием короткоимпульсного лазерного излучения в монокристаллах генерируются гиперзвуковые колебания, скорость которых на порядок превышает скорость упругих волн в ЦГК. Зарегистрированные косвенным методом значения достигают ~ 18 км·с⁻¹ и более.

Показано, что продолжительность колебаний в десятки раз превышает длительность лазерного

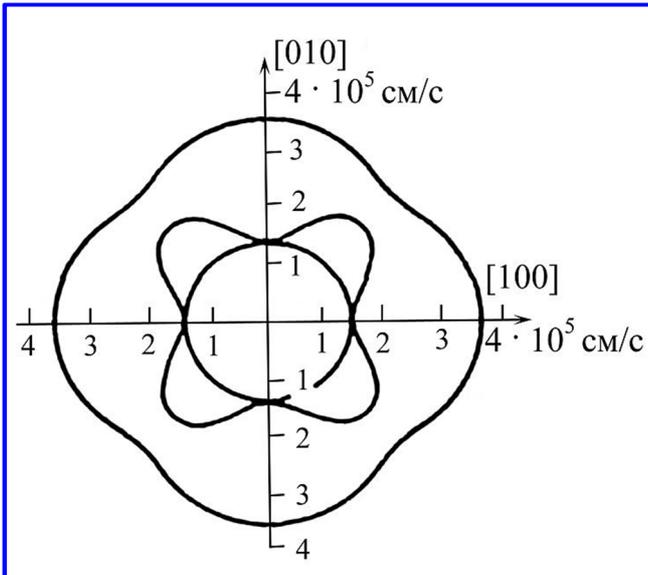


Рис. 11. Главные сечения указательной поверхности фазовых скоростей упругих волн в кубическом кристалле KBr (класс симметрии $m\bar{3}m$) в плоскости $\{100\}$

воздействия. Зарегистрированные значения составляют величину более 150 мкс.

На основе полученных экспериментальных результатов автором выдвинута гипотеза о том, что при облучении широкоапертурным лазерным излучением в монокристаллах возникают значительные силы сжатия-растяжения, направленные прежде всего вдоль лазерного воздействия. Данная гипотеза позволяет объяснить ряд закономерностей катастрофического разрушения монокристаллов мощными лазерными импульсами.

Опираясь на положения данной гипотезы предложен принципиально новый способ повышения стойкости элементов силовой ИК-оптики к воздействию импульсного лазерного излучения за счёт использования явления анизотропии механических свойств монокристаллов: ориентация монокристалла, из которого изготавливается оптический элемент, должна быть выбрана таким образом, чтобы обеспечить максимальное механическое сопротивление материала силам сжатия-растяжения, возникающим в направлении импульсного лазерного воздействия.

Обосновано одно из направлений дальнейших прикладных экспериментальных и теоретических исследований взаимодействия ИК-лазерного излучения с конденсированными средами.

Автор выражает благодарность В. В. Макарову и М. И. Зацепину за помощь в проведении высокоскоростной фотосъёмки и измерении оптико-физических параметров лазерного излучения.

Литература

1. Месяц Г. А., Осипов В. В., Тарасенко В. Ф. Импульсные газовые лазеры. – М.: Наука, 1991. – 272 с.
2. Летохов В. С., Устинов Н. Д. Мощные лазеры и их применение. – М.: Советское радио, 1980. – 112 с.
3. Абилюсипов Г. А., Велихов Е. П., Голубев В. С. и др. Мощные газоразрядные CO₂-лазеры и их применение в технологии. – М.: Наука, 1984. – 108 с.
4. Карась В. Р. Перспективные материалы для окон CO₂-лазеров. Обзорная информация. Серия: Монокристаллы. – М.: НИИТЭХИМ и ВНИИМонокристаллов, 1978. – 52 с.
5. Карлов Н. В., Сисакян Е. В. Оптические материалы для CO₂-лазеров // Известия АН СССР. Серия физическая. – 1980. – Т. 44. – № 8. – С. 1631 – 1638.
6. Ковалев В. И. Исследование механизма пробоя под действием излучения импульсного CO₂-лазера / В. И. Ковалев // Труды ФИАН. – 1982. – Т. 136. – С. 51 – 117.
7. Дацкевич Н. П., Карлов Н. В., Кузьмин Г. П. и др. // Краткие сообщения по физике. – 1983. – № 6. – С. 3 – 7.
8. Воронова И. М., Максимов Ю. П., Савушкин В. Н. Оптические материалы для лазеров ИК-диапазона. Отчет. – ОНТИ-100; Инв. 4548. – М7, 1987. – 45 с.
9. Блистанов А. А., Казанцев С. Г., Кугаенко О. М. ШГК как материал силовой оптики широкоапертурных CO₂-лазеров // Известия вузов. Материалы электронной техники. – 2002. – № 1. – С. 4 – 15.
10. Казанцев С. Г. Размерный эффект и лазерная стойкость материалов ИК оптики при больших пятнах облучения // Квантовая электроника. – 1997. – Т. 24. – № 3. – С. 269 – 270.
11. Казанцев С. Г. Разработка проходной оптики мощных CO₂-лазеров // Доклады Первой республиканской научно-технической конференции «Проблемы создания лазерных систем»: сборник. – Радужный, Влад. обл.: ГосНИИЛЦ РФ «Радуга», 1997. – Т. 1. – С. 89 – 90.
12. Казанцев С. Г. Лучевая прочность оптических элементов из монокристаллов ZnSe и KCl // Оптический журнал. – 1997. – № 6. – С. 63 – 65.
13. Казанцев С. Г. Лазерная стойкость перспективных материалов силовой ИК-оптики // Известия вузов. Физика. – 1998. – № 10. – С. 68 – 84.
14. Казанцев С. Г. Оптический пробой поверхности щёлочно-галогидных кристаллов микросекундными импульсами широкоапертурного CO₂-лазера // Квантовая электроника. – 1998. – Т. 25. – № 4. – С. 333 – 336.
15. Казанцев С. Г. Оптическая стойкость материалов окон широкоапертурных импульсно-периодических CO₂-лазеров // Квантовая электроника. – 1998. – Т. 25. – № 6. – С. 555 – 557.
16. Казанцев С. Г. Лазерная стойкость оптических элементов из монокристаллов ZnSe // Кристаллография. – 1999. – Т. 44. – № 5. – С. 894 – 896.
17. Казанцев С. Г. Проходная оптика мощных широкоапертурных импульсных лазеров среднего ИК-диапазона // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – М.: МИСиС, 2002. – 242 с.
18. Казанцев С. Г. Лазерная стойкость перспективных материалов силовой ИК-оптики / С. Г. Казанцев // Оптика атмосферы и океана. – 2003. – Т. 16. – № 4. – С. 390 – 401.

19. Казанцев С. Г. Перспективные материалы проходной оптики мощных ИК лазеров // *Ruphysnews. Online journal of the United Physical Society of the RF.* V.1, 2005.
20. Блистанов А. А., Волошинская Н. М., Глотов Е. П. [и др.] Пороговые условия разрушения монокристаллов хлористого калия при воздействии излучения непрерывного CO₂-лазера / А. А. Блистанов, Н. М. Волошинская, Е. П. Глотов, Х. З. Губайдуллина, И. А. Заболотских, В. Н. Котеров, О. М. Кугаенко, В. В. Сумерин, В. А. Ульянов, Н. В. Чебуркин, Ю. М. Щербаков // *Квантовая электроника.* – 1984. – Т. 11. – С. 2389 – 2396.
21. Лапинер Х. З. Моделирование условий разрушения кристаллических окон CO₂-лазеров и разработка методов повышения их оптической стойкости // *Дисс. на соиск. уч. степ. канд. физ.-мат. наук.* – Москва. МИСиС, 1987. – 236 с.
22. Казанцев С. Г. Лазерный отжиг элементов проходной оптики широкоапертурных CO₂-лазеров / С. Г. Казанцев // *Оптика атмосферы и океана.* – 1997. – Т. 10. – № 11. – С. 1353 – 1355.
23. Казанцев С. Г. Эволюция дефектной структуры ЦГК при пластической деформации крупногабаритных заготовок окон широкоапертурных CO₂-лазеров / С. Г. Казанцев // *Оптика атмосферы и океана.* – 1998. – Т. 11. – № 2-3. – С. 166 – 170.
24. Kazantsev S. G. Evolution of alkali-halides defective structure at plastic deformation of large-size preparations of wide-aperture CO₂-lasers windows // *SPIE Vol. 3403. 0277-786X/98.* – P. 265 – 269.
25. Блистанов А. А., Казанцев С. Г., Кугаенко О. М. Лазерная стойкость деформационно-упрочнённых щёлочно-галлоидных кристаллов. // *Известия вузов. Материалы электронной техники.* – 1998. – № 4. – С. 20 – 23.
26. Блистанов А. А., Казанцев С. Г., Кугаенко О. М., Петраков В. С. Термомеханическая обработка материалов проходной оптики импульсных лазеров среднего ИК-диапазона // *Известия ВУЗов. Материалы электронной техники.* – 2005. – № 2. – С. 37 – 39.
27. Казанцев С. Г. Создание проходной оптики мощных ТЕА CO₂-лазеров и методы повышения лазерной стойкости материалов силовой ИК-оптики / С. Г. Казанцев // *Известия ВУЗов. Физика.* – 2001. – Т. 44. – № 11. – С. 67 – 77.
28. 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.
29. Блистанов А. А., Васильева Л. А., Казанцев С. Г. [и др.]. Разработка физических основ создания проходной оптики мощных широкоапертурных ИК-лазеров / А. А. Блистанов, Л. А. Васильева, С. Г. Казанцев, О. М. Кугаенко, М. Д. Малинкович, В. С. Петраков // *Известия вузов. Материалы электронной техники.* – 2005. – № 3. – С. 34 – 43.
30. Казанцев С. Г., Кугаенко О. М., Овчаренко Т. Н., Петраков В. С., Васильева Л. А. Создание плоских дифракционных оптических элементов методом пластической деформации щёлочно-галлоидных кристаллов // *Тезисы докладов научно-технической конференции «Лазеры. Измерения. Информация».* – С.-Петербург, 2007, июнь. – СПб. : БГПУ, 2007. – С. 76 – 77.
31. Блистанов А. А., Петраков В. С., Васильева Л. А., Казанцев С. Г., Кугаенко О. М., Малинкович М. Д., Овчаренко Т. Н. Упрочнение монокристаллов КСl под действием непрерывного лазерного излучения // *Материалы IV Международной школы-конференции «Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений» (MPFP).* 24 – 30 июня 2007 г. – Тамбов: ТГУ, 2007. – С. 94 – 95.
32. Шаскольская М. П. Кристаллография: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1984. – 376 с., ил.
33. Блистанов А. А. Кристаллы квантовой и нелинейной оптики: Учеб. пособие для вузов / А. А. Блистанов. – М. : МИСИС, 2000. – 432 с.
34. Блистанов А. А., Бондаренко В. С., Чкалова В. В. и др. Акустические кристаллы: справочник. – М.: Наука, 1982. – 632 с.
35. Казанцев С. Г. Оптико-акустический метод измерения параметров излучения лазерных систем дистанционного зондирования атмосферы / С. Г. Казанцев // *Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ.* – 2011. – Т. 122. – № 3. – С. 21 – 24.

Поступила в редакцию 23.01.2018

Сергей Геннадьевич Казанцев, доктор технических наук, начальник отдела, т. (495) 366-71-89, e-mail: sg.kazantsev@gmail.com. (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

NEW PHYSICAL PHENOMENON: GENERATION OF HYPERSONIC OSCILLATIONS IN CONDENSED MEDIA UNDER THE IMPACT OF INFRARED RADIATION PULSES

S. G. Kazantsev

The article deals with the study of interaction between monocrystalline materials of transmissive IR optics and pulsed laser radiation. A new physical phenomenon has been discovered: for the first time during the direct experiment the formation and subsequent periodical and stochastic changes of the pattern of birefringence in all irradiated volume of a monocrystal at the traveling of a wide-aperture laser pulse of mi-

microsecond duration with the wave length of $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ through the monocrystal were observed. This phenomenon, as well as regularities of formation, duration and intensity of discovered optico-physical effects have been recorded by means of high-speed photographic recording of birefringence pattern in linearly polarized light at the rate of 500 thousand frames per second. It has been determined that the observed phenomenon has a pronounced threshold character, and the duration of birefringence pattern change exceeds the time of laser action more than by one order and reaches $150 \mu\text{s}$ and more. It has been demonstrated that the birefringence pattern change reflects the internal stresses redistribution process which arises due to the generation of hypersonic oscillations in KCl and NaCl monocrystals. The velocity of oscillations has been evaluated according to the change of the projection of stressed (unstressed) areas of the birefringence pattern and reaches the value of $\sim 18 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ and more, which is by one order more than the velocity of elastic waves in alkali halide crystals. On the basis of experimental study results a hypothesis which allows explaining a number of regularities of damage to monocrystals caused by short-pulse laser radiation has been formulated. A fundamentally new method of increasing the resistance of high-power IR optics elements to the impact of pulsed laser radiation using the anisotropy of mechanical properties of monocrystals has been suggested. This method consists in choosing the monocrystal orientation in such a way as to ensure the maximum mechanical resistance of material to compression-decompression forces arising in the direction of the pulsed laser action.

Key words: high-speed photography, polaroid, birefringence, aperture, IR optics, scanning mirror system, monocrystal, syngony, crystallographic plane, pulsed laser radiation, bolometer, cooled photodetector, hypersonic oscillations, stochastic redistribution of internal stresses, anisotropy of mechanical properties.

References

1. Mesiats G. A., Osipov V. V., Tarasenko V. F. Pulsed gas lasers. – M. : Nauka (Science) Publishers, 1991. – 272 p.
2. Letokhov V. S., Ustinov N. D. High-power lasers and application thereof. – M. : Soviet Radio Publishing House, 1980. – 112 p.
3. Abilsiitov G. A., Velikhov E. P., Golubev V. S. et al. High-power gas discharge CO₂ lasers and application thereof in the production process. – M. : Nauka (Science) Publishers, 1984. – 108 p.
4. Karas V. R. Advanced materials for CO₂ lasers windows. Overview. Series: Monocrystals. – M. : Scientific Research Institute of Technical and Economic Studies for the Chemical Industry (NIITEKHIM) and All-Union Scientific Research Institute for Single Crystals, 1978. – 52 p.
5. Karlov N. V., Sisakian E. V. Optical materials for CO₂ lasers // Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Physical series. – 1980. – V. 44. – No. 8. – Pp. 1631 – 1638.
6. Kovalev V. I. Investigation of mechanism of breakdown under the impact of pulsed CO₂ laser radiation / V. I. Kovalev // Proceedings of LPI RAS (Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences). – 1982. – V. 136. – Pp. 51 – 117.
7. Datskevich N. P., Karlov N. V., Kuzmin G. P. et al. // Bulletin of the Lebedev Physical Institute. – 1983. – No. 6. – Pp. 3 – 7.
8. Voronova I. M., Maksimov Iu. P., Savushkin V. N. Optical materials for infrared lasers. Report. – Department of Scientific and Technical Information (ONTI-100); Accession number: 4548. – M7, 1987. – 45 p.
9. Blistanov A. A., Kazantsev S. G., Kugaenko O. M. Alkali halide crystals used as a material for high-power optics of wide-aperture CO₂ lasers // Proceedings of Universities. Matters of Electronics Engineering. – 2002. – No. 1. – Pp. 4 – 15.
10. Kazantsev S. G. Size effect and laser damage resistance of IR optics materials at large radiation spots // Quantum Electronics. – 1997. – V. 24. – No. 3. – Pp. 269 – 270.
11. Kazantsev S. G. Development of transmissive optics of high-power CO₂ lasers // Proceedings of the First Republican Scientific and Technical Conference ‘Problems of Laser Systems Development’ : collected volume. – Raduzhny, Vladimir region. : State Research Laser Center ‘Raduga’, 1997. – V. 1. – Pp. 89 – 90.
12. Kazantsev S. G. Damage threshold of optical elements made of ZnSe and KCl monocrystals // Optics Journal. – 1997. – No. 6. – Pp. 63 – 65.
13. Kazantsev S. G. Laser damage resistance of advanced high-power IR optics materials // Proceedings of Universities. Physics. – 1998. – No. 10. – Pp. 68 – 84.
14. Kazantsev S. G. Optical breakdown of alkali halide crystals surface induced by microsecond pulses of a wide-aperture CO₂ laser // Quantum Electronics. – 1998. – V. 25. – No. 4. – Pp. 333 – 336.
15. Kazantsev S. G. Optical resistance of materials of wide-aperture pulse-periodic CO₂ lasers windows // Quantum Electronics. – 1998. – V. 25. – No. 6. – Pp. 555 – 557.
16. Kazantsev S. G. Laser damage resistance of optical elements made of ZnSe monocrystals // Crystallography. – 1999. – V. 44. – No. 5. – Pp. 894 – 896.
17. Kazantsev S. G. Transmissive optics of high-power wide-aperture pulsed lasers of middle infrared band // Thesis for the Degree of Doctor of Technical Sciences. – M. : National University of Science and Technology (MISIS), 2002. – 242 p.
18. Kazantsev S. G. Laser damage resistance of advanced materials of high-power IR optics / S.G. Kazantsev // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2003. – V. 16. – No. 4. – Pp. 390 – 401.
19. Kazantsev S. G. Advanced materials of transmissive optics of high-power IR lasers // Ruphysnews. Online journal of the United Physical Society of the RF. V.1, 2005.
20. Blistanov A. A., Voloshinskaya N. M., Glotov E. P. [et al.] Threshold conditions of KCl monocrystals damage under the action of continuous-wave CO₂ laser radiation / A. A. Blistanov, N. M. Voloshinskaya, E. P. Glotov, Kh. Z. Gubaidullina, I. A. Zabolotskikh, V. N. Koterov, O. M. Kugaenko, V. V. Sumerin, V. A. Ulianov, N. V. Cheburkin, Iu. M. Shcherbakov // Quantum Electronics. – 1984. – V. 11. – Pp. 2389 – 2396.
21. Lapiner Kh. Z. Simulation of conditions of CO₂ laser crystal windows damage and development of methods of increas-

- ing the optical resistance thereof // Thesis for the Degree of Doctor of Physics and Mathematics. – Moscow. National University of Science and Technology (MISIS), 1987. – 236 p.
22. Kazantsev S. G. Laser annealing of elements of transmissive optics of wide-aperture CO₂ lasers / S.G. Kazantsev // Atmospheric and Oceanic Optics. – 1997. – V. 10. – No. 11. – Pp. 1353 – 1355.
23. Kazantsev S. G. Evolution of defective structure of alkali halide crystals at plastic deformation of large-sized workpieces of wide-aperture CO₂ lasers windows / S.G. Kazantsev // Atmospheric and Oceanic Optics. – 1998. – V. 11. – No. 2-3. – Pp. 166 – 170.
24. Kazantsev S. G. Evolution of alkali-halides defective structure at plastic deformation of large-sized workpieces of wide-aperture CO₂ lasers windows // SPIE Vol. 3403. 0277-786X/98. – P. 265 – 269.
25. Blistanov A. A., Kazantsev S. G., Kugaenko O. M. Laser damage resistance of deformation-strengthened alkali halide crystals. // Proceedings of Universities. Matters of Electronics Engineering. – 1998. – No. 4. – Pp. 20 – 23.
26. Blistanov A. A., Kazantsev S. G., Kugaenko O. M., Petrakov V. S. Thermomechanical processing of materials of transmissive optics for pulsed lasers of middle infrared band // Proceedings of Universities. Matters of Electronics Engineering. – 2005. – No. 2. – Pp. 37 – 39.
27. Kazantsev S. G. Development of transmissive optics of high-power TEA CO₂ lasers and methods of increasing the laser damage resistance of high-power IR optics materials / S. G. Kazantsev // Proceedings of Universities. Physics. – 2001. – V. 44. – No. 11. – Pp. 67 – 77.
28. Kazantsev S. G. Laser damage resistance of advanced materials of high-power IR optics. Part 1. Mechanisms of damage of high-power IR optics materials. Part 2. Methods of increasing the laser damage resistance and lifetime of optical elements / S. G. Kazantsev // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2003. – V. 16. – No. 4. – Pp. 390 – 401.
29. Blistanov A. A., Vasileva L. A., Kazantsev S. G. [et al.]. Elaboration of basic physics of development of transmissive optics for high-power wide-aperture IR lasers / A. A. Blistanov, L. A. Vasileva, S. G. Kazantsev, O. M. Kugaenko, M. D. Malinkovich, V. S. Petrakov // Proceedings of Universities. Matters of Electronics Engineering. – 2005. – No. 3. – Pp. 34 – 43.
30. Kazantsev S. G., Kugaenko O. M., Ovcharenko T. N., Petrakov V. S., Vasileva L. A. Development of flat diffraction optical elements using the method of plastic deformation of alkali halide crystals // Theses of proceedings of Scientific and Technical Conference 'Lasers. Measurements. Information'. – St. Petersburg, July 2007. – St. Petersburg : St. Petersburg Polytechnic University, 2007. – Pp. 76 – 77.
31. Blistanov A. A., Petrakov V. S., Vasileva L. A., Kazantsev S. G., Kugaenko O. M., Malinkovich M. D., Ovcharenko T. N. Strengthening of KCl monocrystals under the action of continuous laser radiation // Proceedings of IVth International Conference 'Micromechanisms of plasticity, destruction and accompanying phenomena' (MPFP). June 24 – 30, 2007. – Tambov: Tambov State University, 2007. – Pp. 94 – 95.
32. Shaskolskaya M. P. Crystallography: Textbook for universities. – 2nd edition, revised and enlarged. – M. : Vysshaya Shkola (High School) Publishers, 1984. – 376 p., with figures.
33. Blistanov A. A. Crystals of quantum and non-linear optics: Textbook for universities / A. A. Blistanov. – M. : National University of Science and Technology (MISIS), 2000. – 432 p.
34. Blistanov A. A., Bondarenko V. S., Chkalova V. V. et al. Acoustic crystals: Handbook. – M. : Nauka (Science) Publishers, 1982. – 632 p.
35. Kazantsev S. G. Optico-acoustic method of measuring parameters of radiation of laser systems for atmosphere remote sensing / S. G. Kazantsev // Matters of Electromechanics. NPP VNIIEEM Proceedings. – 2011. – V. 122. – No. 3. – Pp. 21 – 24.

*Sergey Gannadevich Kazantsev, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Head of Department,
tel.: +7 (495) 366-71-89, e-mail: sg.kazantsev@gmail.com.
(JC «VNIIEEM Corporation»).*