


Физика деформирования и разрушения кристалла исландского шпата при выделении энергии в объеме образца

Ушаков И. В. 

(Статья представлена членом редакционной коллегии А. В. Носковым)

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,

Россия, 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4, стр. 1

ushakoviv@mail.ru

Аннотация. Физика деформирования кристаллов исландского шпата в условиях одновременного выделения энергии лазерного импульса в двух близкорасположенных локальных участках в объеме образца, обусловлена спецификой сверхбыстрого локального нагрева и формирования поля высоких механических напряжений сложной геометрии. В кристаллах исландского шпата, деформирующихся при нормальных условиях исключительно двойникованием, в условиях возникновения в объеме образца поля механических напряжений сложной геометрии, возможно трансляционное скольжение. При воздействии самофокусированного лазерного излучения на кристалл исландского шпата удастся сформировать уникальные структуры, такие как внутренние локальные выжженные каналы и каналы Розе второго рода с физически чистыми поверхностями, исследование физических свойств которых является одной из перспективных задач физики конденсированного состояния.

Ключевые слова: двойникование, исландский шпат, канал Розе, физика конденсированного состояния

Для цитирования: Ушаков И. В. 2024. Физика деформирования и разрушения кристалла исландского шпата при выделении энергии в объеме образца. *Прикладная математика & Физика*, 56(3): 234–240.

DOI 10.52575/2687-0959-2024-56-3-234-240

Original Research

Physics of Deformation and Destruction of Iceland Spar Crystal During the Release of Energy in the Sample Volume

Ivan V. Ushakov 

(Article submitted by a member of the editorial board A. V. Noskov)

National Research Technological University "MISIS",

4 building 1 Leninskiy Ave, Moscow, 119049, Russia

ushakoviv@mail.ru

Abstract. The physics of deformation for Iceland spar crystals under conditions of simultaneous release of laser pulse energy in two closely spaced local areas in the sample volume is explained by specifics of ultrafast local heating and the formation of a field of high mechanical stresses of complex geometry. Iceland spar crystals may deform exclusively by twinning under normal condition, but translational sliding is possible in them under conditions of a mechanical stress field formation in the sample volume. Under the influence of self-focused laser radiation on the Iceland spar crystal, it is possible to form unique structures such as internal local burnt channels and Rose channels of the second kind with physically clean surfaces, the investigation of the physical properties of which is one of the promising tasks of condensed matter physics.

Keywords: twinning, Iceland spar, Rose channels, condensed matter physics

For citation: Ushakov I. V. 2024. Physics of Deformation and Destruction of Iceland Spar Crystal During the Release of Energy in the Sample Volume. *Applied Mathematics & Physics*, 56(3): 234–240. (in Russian)

DOI 10.52575/2687-0959-2024-56-3-234-240

1. Введение. Теоретическое и экспериментальное исследование воздействия самофокусированного импульсного лазерного излучения на оптически прозрачный кристалл исландского шпата, который является двулучепреломляющим и деформируется при нормальных условиях исключительно двойникованием, является актуальным направлением физики конденсированного состояния [1, 2, 3, 4]. За счёт уникального комплекса физических свойств исландского шпата существует возможность исследовать закономерности роста двойников, в том числе упругих двойников, в областях самофокусирования обыкновенного и необыкновенного лазерных лучей в объеме образца. При пересечении двойников, развивающихся в плоскостях (110) и (101), (110) и (011), (101) и (011) возможно возникновение упругого канала Розе второго рода по направлениям $[\bar{1}11]$, $[1\bar{1}1]$, $[11\bar{1}]$. Отметим, что исследование каналов Розе

второго рода имеет особое значение для физики конденсированного состояния, так как данный канал, располагаясь целиком в объеме кристалла, имеет физически чистые поверхности.

В зависимости от характеристик лазерного импульса выделение лазерной энергии возможно на поглощающем включении, в локальной области с высоким содержанием примесных атомов, а также в локальной области самофокусирования/фокусирования за счёт многофотонной ионизации или электронной лавины [5, 6, 7]. Вне зависимости от того, что явилось причиной нелинейного роста поглощения лазерного излучения в исходно прозрачном материале, вторая стадия поглощения лазерного импульса приводит к резкому нагреву материала, формированию лазерной плазмы и ударной волны [6, 8, 9, 10]. При этом материал в объеме монокристалла исландского шпата на короткое время переводится в экстремальное состояние, что может инициировать деформирование и разрушение не только по механизму двойникования [1, 11, 12, 13], но и за счёт механизма трансляционного скольжения.

Таким образом, целью данной работы является решение одной из актуальных задач физики конденсированного состояния, связанной с исследованием физических процессов в монокристалле исландского шпата в условиях сверхбыстрого нагрева двух микромасштабных областей в объеме образца самофокусированным лазерным излучением.

2. Методика эксперимента. Экспериментальные исследования проводили на монокристаллах исландского шпата (CaCO_3), количество примесей в которых не превышало 10-6 вес. %. Из исходных крупных монокристаллов по плоскостям спайности выкалывали образцы размером 40x40x40 мм. Затем одну поверхность кристалла ориентировали таким образом, чтобы она была перпендикулярна направлению распространения лазерного излучения. Использовали оптический квантовый генератор ГОС-1001, $\lambda=1060$ нм, $\tau \approx 1$ мс, длительность импульса на полувысоте 0,1 мс [6]. Оптически квантовый генератор работает в режиме хаотической пиковой генерации. Энергию импульсов варьировали от ≈ 25 до 900 Дж.

3. Экспериментальные и теоретические результаты. 1. Специфика деформирования кристаллов исландского шпата при выделении энергии лазерного импульса в объеме материала.

Кинетика деформирования и разрушения кристалла исландского шпата, в условиях выделения в его объеме энергии лазерного импульса, зависит от ряда факторов. Для кристаллов с высоким содержанием примесей основной механизм разрушения связан с оптическим пробоем на поглощающих включениях. В этом случае возможно деформирование, разрушение и даже локальное плавление. В случае оптически более совершенных кристаллов, разрушение, как правило, связано с механизмом электронной лавины или многофотонной ионизации. В этом случае происходит быстрый нагрев и испарение материала в области оптического пробоя. Формирование в объеме кристалла газоплазменного облака приводит к возникновению высоких механических напряжений и механическому разрушению кристалла.

В случае, если плотность мощности лазерного излучения достаточно высока, меняются оптические свойства среды и происходит самофокусирование лазерного излучения. Это приводит к тому, что плотность мощности лазерного импульса возрастает до высоких значений. Существует диапазон плотности мощности лазерного излучения, когда облучение кристалла приводит к самофокусированию излучения без оптического пробоя в области самофокусировки. В этом случае возможно прохождение самософокусированного излучения сквозь кристалл с формированием выжженных каналов на пути обыкновенного и необыкновенного лучей. Инициирование оптического пробоя возможно в случае нахождения на пути распространения самофокусированного лазерного излучения поглощающего включения, поверхности кристалла или другой оптической неоднородности. Следовательно, в случае оптически совершенного кристалла исландского шпата самофокусированное лазерное излучение не повреждает материал в объеме кристалла, однако, оптический пробой и каналы выжженного материала формируются в месте выхода самофокусированного излучения из образца (оптическая прочность выходной грани кристалла всегда меньше объемной оптической прочности). В случае использования лазерных импульсов с энергией 400-900 Дж оптический пробой за счёт многофотонной ионизации формируется в объеме образца в областях самофокусировки обыкновенного и необыкновенного лучей. Расстояние между центрами развития оптического пробоя составляет $\approx 1,5$ мм.

Исследовали кристаллы исландского шпата, разрушенные за счет оптического пробоя на поглощающих включениях, оптического пробоя на выходной поверхности, а также за счёт самофокусирования лазерного излучения. Части кристалла после разрушения были подвергнуты травлению и исследованы методами оптической микроскопии. Обнаружено, что в случае оптического пробоя самофокусированным излучением возможно двойникование по плоскостям $\{02\bar{2}1\}$ и трансляционное скольжение по плоскостям $\{0\bar{1}0\}$ (рис. 1а). Обнаружены многочисленные залеченные каналы Розе второго рода. С учетом характерных скоростей роста двойников можно сделать вывод, что общее время, необходимое для формирования указанных микроструктур составляет 0,1-1 мс, что хорошо согласуется с временем существования газоплазменного облака. В случае оптического пробоя на поверхности или на поглощающем включении обнаружено только двойникование в системах $\{011\}$ (рис. 1б).

В случае достаточно высокой энергии лазерного импульса оптический пробой сопровождается формированием лазерной плазмы (газоплазменного облака). Образующееся плазменное облако непрозрачно

для лазерного излучения. Лазерное излучение поглощается плазмой, при этом материал за плазменным факелом экранируется от лазерного излучения [6, 8, 9]. В случае оптического пробоя мощным лазерным импульсом, характеристики плазмы существенно зависят только от плотности мощности лазерного импульса, его энергии и геометрического распределения мощности излучения «фокальной» области. Однако эксперимент показывает, что особенности деформирования и разрушения кристаллов исландского шпата существенно зависят от геометрии области, в которой инициируется оптический пробой и реализуется первая стадия нагрева материала. Следовательно, возможность инициирования двойникования по плоскостям $\{0\bar{2}21\}$ и трансляционное скольжение по плоскостям $\{010\}$ зависят от геометрии зоны первоначального нагрева и оптического пробоя.

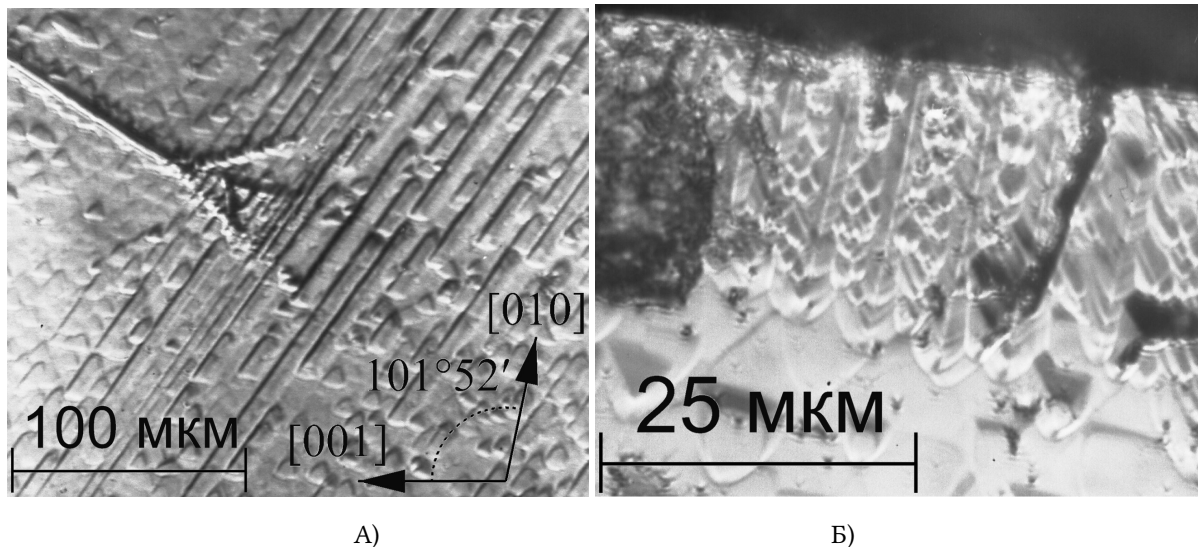


Рис. 1. А) Элементы двойникования и скольжения в образце исландского шпата, разрушенного после оптического пробоя самофокусированным излучением в объеме материала. Б) Двойникование в системах /011/ при оптическом пробое на оптической неоднородности

Fig. 1. A) Elements of twinning and sliding in a sample of Iceland spar destroyed after optical breakdown by self-focused laser irradiation in the volume of the material. B) Twinning in /011/ systems after optical breakdown on optical inhomogeneity

Следовательно, в условиях оптического пробоя в двух близко расположенных областях самофокусированным лазерным излучением возникают сложные напряженные состояния, способные привести к деформированию материала по любым возможным системам двойникования и трансляционного скольжения.

2. Специфика нагрева и деформирования материала в области выделения энергии лазерного импульса. Рассмотрим нагрев локальной области в объеме кристалла исландского шпата самофокусированным излучением. Для решения задачи был использован метод конечных элементов, который реализован на основе свободного программного обеспечения: FreeCAD, версия 0.21.1. В качестве зоны оптического пробоя рассматривали область в объеме кристалла, в которой происходит самофокусирование и инициируется оптический пробой. Рассмотрим специфику нагрева и деформирования области самофокусирования прилегающей к теоретической точке геометрического фокуса (реальная ширина канала распространения самосфокусированного излучения для данных условий существенно больше, не может быть меньше нескольких микрометров). Для решения использовали метод конечных элементов [14]. Распространение тепла в твердом материале без внутренних источников тепла описывали следующим выражением:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T), \quad (1)$$

где T [K] – температура, t [с] – время, λ [Вт/(м·К)] – коэффициент теплопроводности, c [Дж/(кг·К)] – удельная теплоемкость, ρ [кг/м³] – плотность. Для решения задачи необходимо учитывать уравнение связи напряженного и деформированного состояния. Так как в данном расчёте не присутствуют пластические деформации, то использовали обобщённый закон Гука:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x - \sigma_{av} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \sigma_{av} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z - \sigma_{av} \end{pmatrix} = 2G \begin{pmatrix} \varepsilon_x - \varepsilon_{av} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_y - \varepsilon_{av} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \sigma_z - \varepsilon_{av} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где σ – нормальное механическое напряжение, Па; τ – касательное механическое напряжение, Па; σ_{av} – среднее механическое напряжение, Па; G – модуль сдвига, Па; ε – относительная (инженерная) деформация; ε_{av} – средняя относительная (инженерная) деформация. Среднее механическое напряжение находится по формуле 3.

$$\sigma_{av.} = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3}. \quad (3)$$

Модуль сдвига (пренебрегали анизотропией свойств) для однородного и изотропного материала определяли по формуле 4

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}, \quad (4)$$

где E – модуль упругости 1-го рода (модуль Юнга), Па; μ – коэффициент Пуассона. Между средними напряжениями и средними деформациями действует следующее соотношение (формула 5):

$$\varepsilon_{av.} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z}{3} \quad (5)$$

На рисунке 2 схематично изображена исследуемая область и сетка метода конечных элементов.

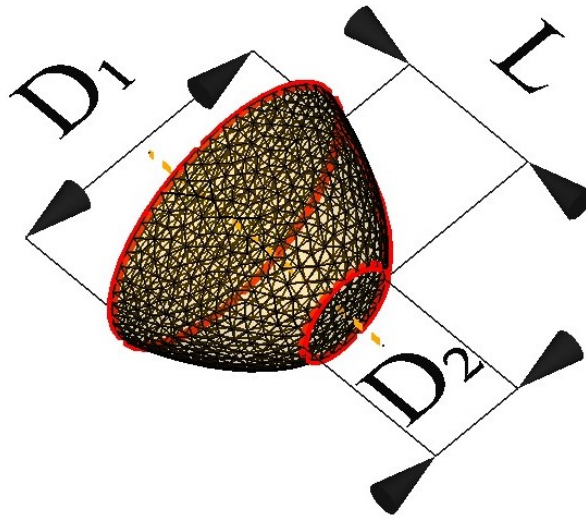


Рис. 3. А) Исоповерхности в анализируемой области в начальной стадии оптического пробоя. Б) Специфика деформирования неравномерно нагретой области. На рисунке использован масштабный коэффициент $k=100$.

R – радиус дуги окружности, описывающей сечение изогнувшейся при термическом расширении входной поверхности. L_1 и L_2 показывают термическое расширение нагретой области в направлении перпендикулярном оси лазерного луча

Fig. 3. А) Isosurfaces in the analyzed area at the initial stage of optical breakdown. Б) The specifics of deformation of an unevenly heated area. The figure uses a scale factor of $k=100$. R is the radius of the arc of the circle describing the section of the input surface bent during thermal expansion. L_1 and L_2 thermal expansion of the heated area in the direction perpendicular to the axis of the laser beam

В результате инициирования оптического пробоя происходит выделение энергии лазерного излучения, которое первоначально приводит к нагреву кристалла в области, показанной на рисунке 2 (по мере развития оптического пробоя будет формироваться газоплазменное облако). Специфика прогрева анализируемой области визуализирована с использованием изоповерхностей (рис. 3а). Следствием прогрева области оптического пробоя происходит изменение/увеличение её геометрических размеров. Нагрев области происходит неравномерно, поэтому геометрия области нагрева расширяется неравномерно и искажается. Специфика изменения размера и геометрических характеристик области нагрева показана на рисунке 2б, при этом анизотропией свойств монокристалла исландского шпата при расчёте пренебрегали, а в целях визуализации термического расширения использован масштабный коэффициент, равный 100.

Таким образом, в ходе нагрева входная поверхность зоны оптического пробоя изогнулась, что на сечении даёт дугу окружности радиуса R . Увеличение радиуса входной поверхности (L_1) больше увеличения радиусов поверхностей (например, L_2), получаемых сечением анализируемой области в плоскостях перпендикулярных направлению распространения лазерного излучения.

Отметим, что исследование явлений деформирования и разрушения при выделении энергии лазерного импульса в кристалле исландского шпата является актуальным для физики конденсированного состояния. Высаживание энергии лазерного импульса, имеющего сверхвысокую плотность мощности в объеме конденсированного вещества, позволяет экспериментально исследовать эволюцию структуры, дефектов, механизмов деформирования и разрушения в конденсированном веществе, находящемся в экстремальном состоянии. Кроме того, экспериментально показана возможность локального формирования двойников систем $\{0221\}$, $\{011\}$ (в том числе упругих), а также возможность формирования упругих каналов

Розе первого рода в объеме кристалла исландского шпата. Это говорит о возможности как выборочного создания микроструктур с заданными свойствами в объеме образца, так и о возможности управления процессами деформирования в кристаллах исландского шпата [15, 16], что является перспективной задачей физики конденсированного состояния.

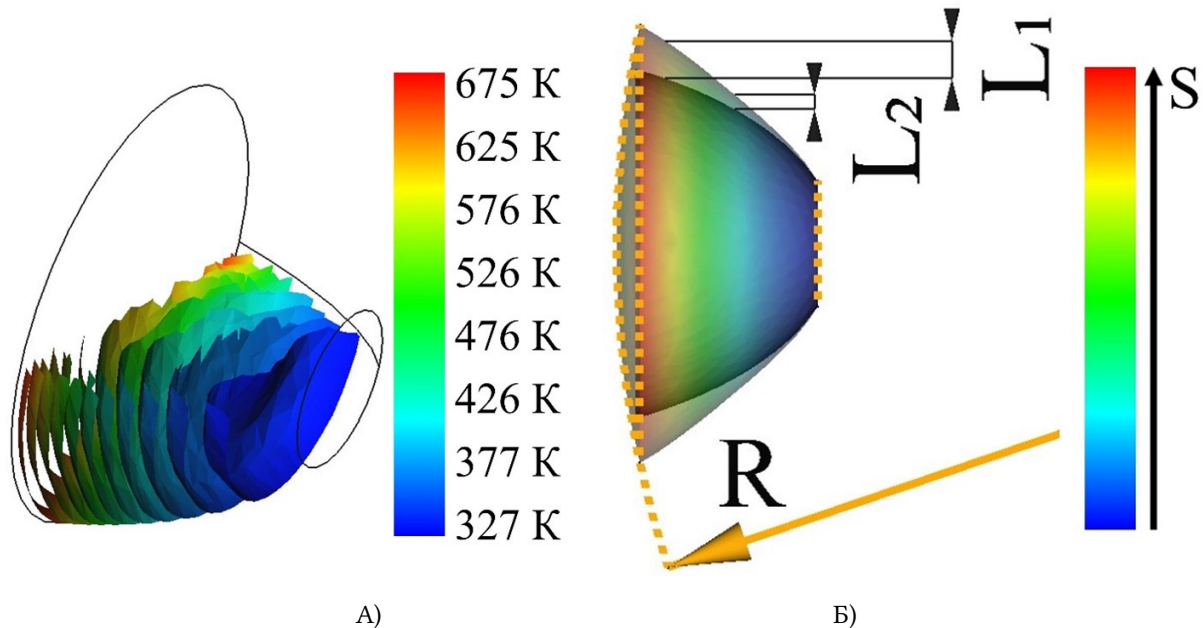


Рис. 2. Общий вид области инициирования оптического пробоя самофокусированным лазерным излучением, с сеткой метода конечных элементов. $D_1 = 90$ мкм – диаметр окружности на входе области оптического пробоя, $D_2 = 30$ мкм – выходная граница области оптического пробоя, инициированного самофокусированным излучением, $L = 50$ мкм – длина области оптического пробоя

Fig. 2. General view of the optical breakdown area initiated by self-focused laser radiation, with a grid of the finite element method. $D_1 = 90 \mu\text{m}$ is the diameter of the circle at the entrance of the optical breakdown area, $D_2 = 30 \mu\text{m}$ is the output boundary of the optical breakdown area initiated by self-focused radiation, $L = 50 \mu\text{m}$ is the length of the optical breakdown area

4. Выводы. 1. Физика деформирования кристаллов исландского шпата в условиях одновременного выделения энергии в двух близкорасположенных локальных участках в объеме образца, обусловлена спецификой локального нагрева и формированием поля высоких механических напряжений сложной геометрии. В кристаллах исландского шпата, деформирующихся при нормальных условиях исключительно двойникованием, в условиях возникновения в объеме образца поля механических напряжений сложной геометрии, возможно трансляционное скольжение.

2. На основе модели сверхбыстрого выделения энергии самофокусированного лазерного излучения в объеме кристалла исландского шпата выполнен расчет специфики нагрева и деформирования локальных областей. Показано, что системы, по которым может реализовываться двойникование определяются геометрией первоначально нагреваемой области.

3. В условиях воздействия самофокусированного лазерного излучения на кристалл исландского шпата удастся сформировать уникальные структуры, такие как внутренние локальные выжженные каналы и каналы Розе второго рода с физически чистыми поверхностями, исследование физических свойств которых является одной из перспективных задач физики конденсированного состояния.

Список литературы

1. Кукуй А.Л., Атабаев К.К., Матвеева О.П. Исландский шпат России. СПб.: СПбГУВК; 2009, 195 с.
2. Скоморовский В.И., Кушталь Г.И., Токарева Л.С. Исландский шпат и разработка интерференционно-поляризационных фильтров (ИПФ). *Солнечно-земная физика*. 2022;8(1):70-86; DOI: <https://doi.org/10.12737/stp-81202209>
3. Nefyodova I.V., Kamenskikh I. Hydrothermal synthesis and optical properties of calcite single crystals. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. 2003;5(3):609-614.
4. Логунова М.Н., Кукуй А.Л. Особенности морфологии и образования двойников исландского шпата сибирской кальцитиноносной провинции. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2016;10:236-241.
5. Ulian G., Valdre G. Study of the variation of the optical properties of calcite with applied stress, useful for specific rock and material mechanics. *Scientific Reports*. 2022;12:299; DOI: 10.1038/s41598-021-04471-6
6. Ushakov I.V. How a crack and the defect material in its neighborhood affect the radiation strength of transparent materials. *Journal of Optical Technology*. 2008;75(2):128-131; DOI: 10.1364/JOT.75.000128

7. Toytman I., Simanovskii D.M., Palanker D. Optical breakdown in transparent media with adjustable axial length and location. *Optics Express*. 2010;18(24):24688-98; DOI: 10.1103/PhysRevApplied.20.064035
8. Rudenko A., Moloney J.V., Polynkin P. Ionization clamping in ultrafast optical breakdown of transparent solids. *Physical review applied*. 2023;20(6); DOI: 10.1103/20.064035
9. Zhokhov P.A., Zheltikov A.M. Optical breakdown of solids by few-cycle laser pulses. *Scientific Reports*. 2018;8:1824; DOI:10.1038/s41598-017-18624-z
10. Berge L, Skupin S., Nuter R., Kasparian J., Wolf JP. Ultrashort filaments of light in weakly ionized, optically transparent media. *Reports on progress in physics*. 2008; 71:109801; DOI 10.1088/0034-4885/71/10/109801
11. Luo Ch., Yang X., Li J. Mechanical Properties of Single-Crystal Calcite and Their Temperature and Strain-Rate Effects. *Materials*. 2022;15(13):4613; DOI: 10.3390/ma15134613
12. Rybacki E., Evans B., Janssen C., et al. Influence of stress, temperature, and strain on calcite twins constrained by deformation experiments. *Tectonophysics*. 2013;601:20-36; DOI: 10.1016/j.tecto.2013.04.021
13. Schuster R., Habler G., Schafner E., et al. Intragranular deformation mechanisms in calcite deformed by high-pressure torsion at room temperature. *Mineralogy and Petrology*. 2020;114(2):105-118; DOI: 10.1007/s00710-019-00690-y
14. Lienhard, J.H., IV; Lienhard, J.H., V. A Heat Transfer Textbook. Cambridge. 2020. 761 p.
15. Ушаков И.В., Сафронов И.С., Ошоров А.Д. Физика залечивания нанопор в конденсированном веществе в условиях воздействия лазерного излучения и высокотемпературной плазмы. *Доклады академии наук высшей школы Российской Федерации*. 2024;62(1):7-18; <http://dx.doi.org/10.17212/1727-2769-2024-1-7-18>
16. Мирзоев Ф.Х., Панченко В.Я., Шелепин Л.А. Лазерное управление процессами в твердом теле. *Успехи физических наук*. 1996;166(1):3-32.

References

1. 1. Kukuy AL., Atabaev KK., Matveeva OP. Islandskiy shpat Rossii (Island spar of Russia). Saint-Petersburg. 2009. 195 p. (In Russian)
2. 2. Skomorovsky VI., Kushtal GI., Tokareva LS. Iceland spar and birefringent filter (BF) development. *Solar-Terrestrial Physics*. 2022;8(1):70-86; DOI: <https://doi.org/10.12737/stp-81202209> (In Russian)
3. Nefyodova IV., Kamenskikh I. Hydrothermal synthesis and optical properties of calcite single crystals. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. 2003;5(3):609-614.
4. Logunova MN., Kukuy AL. Peculiarities of morphology and the formation of twins of iceland spar from siberian calcite province. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2016;10:236-241. (In Russian)
5. Ulian G., Valdre G. Study of the variation of the optical properties of calcite with applied stress, useful for specific rock and material mechanics. *Scientific Reports*. 2022;12:299; DOI: 10.1038/s41598-021-04471-6
6. Ushakov I.V. How a crack and the defect material in its neighborhood affect the radiation strength of transparent materials. *Journal of Optical Technology*. 2008;75(2):128-131; DOI: 10.1364/JOT.75.000128
7. Toytman I., Simanovskii D.M., Palanker D. Optical breakdown in transparent media with adjustable axial length and location. *Optics Express*. 2010;18(24):24688-98; DOI: 10.1103/PhysRevApplied.20.064035
8. Rudenko A., Moloney J.V., Polynkin P. Ionization clamping in ultrafast optical breakdown of transparent solids. *Physical review applied*. 2023;20(6); DOI: 10.1103/20.064035
9. Zhokhov P.A., Zheltikov A.M. Optical breakdown of solids by few-cycle laser pulses. *Scientific Reports*. 2018;8:1824; DOI:10.1038/s41598-017-18624-z
10. Berge L, Skupin S., Nuter R., Kasparian J., Wolf JP. Ultrashort filaments of light in weakly ionized, optically transparent media. *Reports on progress in physics*. 2008; 71:109801; DOI 10.1088/0034-4885/71/10/109801
11. Luo Ch., Yang X., Li J. Mechanical Properties of Single-Crystal Calcite and Their Temperature and Strain-Rate Effects. *Materials*. 2022;15(13):4613; DOI: 10.3390/ma15134613
12. Rybacki E., Evans B., Janssen C., et al. Influence of stress, temperature, and strain on calcite twins constrained by deformation experiments. *Tectonophysics*. 2013;601:20-36; DOI: 10.1016/j.tecto.2013.04.021
13. Schuster R., Habler G., Schafner E., et al. Intragranular deformation mechanisms in calcite deformed by high-pressure torsion at room temperature. *Mineralogy and Petrology*. 2020;114(2):105-118; DOI: 10.1007/s00710-019-00690-y
14. Lienhard, J.H., IV; Lienhard, J.H., V. A Heat Transfer Textbook. Cambridge. 2020. 761 p.
15. Ushakov IV., Safronov IS., Oshorov AD. Fizika zalechivaniya nanopor v kondensirovannom veshchestve v usloviyakh voz-deistviya lazernogo izlucheniya i vysokotemperaturnoi plazmy (Physics of nanopore healing in condensed matter under the influence of laser radiation and high-temperature plasma). *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii*. 2024;62(1):7-18; <http://dx.doi.org/10.17212/1727-2769-2024-1-7-18> (In Russian)
16. Mirzoev FKh., Panchenko Vya., Shelepin LA. Laser control processes in solids. *Physics-Uspokhi*. 1996;166(1):3-32. (In Russian)

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 22.07.2024

Поступила после рецензирования 02.09.2024

Принята к публикации 05.09.2024

Received July 22, 2024

Revised September 2, 2024

Accepted September 5, 2024

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Ушаков Иван Владимирович – доктор технических наук, заведующий кафедрой физики, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ivan V. Ushakov – Doctor of Technical Sciences, Head of Physical Department, National Research Technological University "MISIS", Moscow, Russia

[К содержанию](#)