

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ/CONDENSED MATTER PHYSICS

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.156.27>

ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$

Научная статья

Матиев А.Х.^{1,*}, Эсмурзиева А.А.²

¹Грозненский государственный нефтяной технический университет им. М. Д. Милионщикова, Грозный, Российская Федерация

^{1, 2} Ингушский государственный университет, Магас, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (matiyev-akhmet[at]yandex.ru)

Аннотация

Разработана методика выращивания оптически прозрачных, кристаллов $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ из водного раствора. Установлено, что под действием механической нагрузки, исследуемый кристалл становится оптически анизотропным. Возникающие деформации вызывают наведенное двулучепреломление. При этом направления главных осей эллипсоида диэлектрической проницаемости материала совпадают с направлениями главных осей эллипсоида напряжений. В случае одностороннего сжатия это направление сжатия становится выделенным и играет роль оптической оси. Оптические свойства деформированного таким образом тела соответствуют свойствам одноосного кристалла. Из экспериментальной зависимости величины двулучепреломления кристалла от внешнего механического напряжения, приложенного к кристаллу, определена константа упругооптического эффекта.

Ключевые слова: раствор, кристалл, одноосное напряжение, двойное лучепреломление, анизотропия.

EFFECT OF STRESS ON THE BIREFRINGENCE OF SINGLE CRYSTALS OF $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$

Research article

Matiyev A.H.^{1,*}, Esmurzieva A.A.²

¹Grozny State Oil Technical University named after M. D. Millionshchikov, Grozny, Russian Federation

^{1, 2}Ingush State University, Magas, Russian Federation

* Corresponding author (matiyev-akhmet[at]yandex.ru)

Abstract

The technique of growing optically transparent crystals of $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ from aqueous solution was developed. It has been established that under the action of mechanical load, the studied crystal becomes optically anisotropic. The arising deformations cause induced birefringence. In this case, the directions of the principal axes of the dielectric permeability ellipsoid of the material coincide with the directions of the principal axes of the stress ellipsoid. In the case of one-sided compression, this compression direction becomes highlighted and plays the role of an optical axis. The optical properties of a body deformed in this way correspond to the properties of an uniaxial crystal. From the experimental dependence of the birefringence of the crystal on the external mechanical stress applied to the crystal, the constant of the elastic-optical effect is determined.

Keywords: solution, crystal, uniaxial stress, double refraction, anisotropy.

Введение

Семейство изоструктурных кристаллов с общей формулой $M_1^+M_2^{3+}(SO_4) \cdot 12H_2O$ (где M_1 – Na, K, Rb, Cs, NH_4 и т. д., M_2 – Al, V, Cr, Fe и т. д.) благодаря возможности выращивания крупных монокристаллов хорошего оптического качества, без сложного аппаратурного оформления довольно подробно описано в работе [1]. Кристаллы $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ (алюмокалиевые квасцы) широко используют в медицине благодаря их антимикробным свойствам [2] и способности активировать иммунитет, в связи с чем алюмокалиевые квасцы включают в состав противовирусных вакцин [3]. Кроме того, относительно недавно была показана возможность применения таких монокристаллов в качестве оптических ограничителей [4] и рамановских преобразователей частоты лазеров [5], [6], [7]. Монокристаллы-квасцы $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ обладают изотропными свойствами. Однако известно, что под действием механической нагрузки изотропные материалы становятся оптически анизотропными. Возникающие деформации вызывают наведенное двойное лучепреломление. При этом направления главных осей эллипсоида диэлектрической проницаемости материала совпадают с направлениями главных осей эллипсоида напряжений. В случае одностороннего сжатия это направление сжатия становится выделенным и играет роль оптической оси. Оптические свойства деформированного таким образом тела соответствуют свойствам одноосного кристалла. Разность показателей преломления обычного и необыкновенного лучей $\Delta n = n_0 - n_e$ является мерой возникшей анизотропии и пропорциональна механическому напряжению σ [8], [9], [10], [12]. Кроме того, n_0 и n_e зависят от длины волны (дисперсия двойного лучепреломления), вследствие чего при наблюдении в белом свете искусственно анизотропное тело при скрещенных поляризаторах оказывается пестро окрашенным. Распределение окраски может служить хорошим качественным признаком распределения напряжений; кроме того, возникновение окрашенных полей оказывается более чувствительным признаком проявления анизотропии, чем простое просветление, имеющее место при монохроматическом свете.

Регистрация искусственной анизотропии является очень чувствительным методом наблюдения напряжений, возникающих в прозрачных телах. Его с успехом применяют для наблюдения за напряжениями, возникающими в

стеклянных изделиях (паянных и прессованных), охлаждение которых производилось недостаточно медленно. К сожалению, громадное большинство технически важных материалов непрозрачно (металлы), вследствие чего этот прием к ним непосредственно не приложим. Однако в последнее время получил довольно широкое распространение оптический метод исследования напряжений на искусственных моделях из прозрачных материалов (целлULOид, ксилонит и т.д.). Приготавляя из такого материала модель (обыкновенно уменьшенную), подлежащей исследованию детали, осуществляют нагрузку, имитирующую с соблюдением принципа подобия ту, которая имеет место в действительности, и по картине между скрещенными поляризаторами изучают возникающие напряжения, их распределение, зависимость от соотношения частей модели и т.д.

Целью настоящей работы являлось изучение явления двойного лучепреломления одноосных кристаллов $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, выращенных из водных растворов, повергнутых односторонней деформации сжатия.

Основные результаты

Для выращивания монокристаллов использовали $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ марки ч.д.а., который засыпали в химический стакан 100 г и заливали горячей дистиллированной водой при непрерывном перемешивании до образования насыщенного раствора. После остывания раствор фильтровали несколько раз. Стакан с раствором помещали в прохладное, темное место. На следующий день образовались много маленьких кристалликов. Выбрали два крупных и правильных кристаллика в качестве затравок, а раствор еще раз отфильтровывали. Кристаллы-затравки подвешивали с помощью лески в середине стаканов, накрывали листками бумаги, помещали в темное место не подверженное перепаду температур. Раз в неделю растворы фильтровали от выпадающих маленьких кристалликов. Когда кристаллы выросли до подходящих размеров, их извлекли, промыли в проточной дистиллированной воде, протерли салфеткой и покрыли двумя слоями прозрачного лака. Из полученных двойников (рис. 1.) извлекли крупный монокристалл в форме параллелепипеда с размерами $2 \times 0,6 \times 0,8 \text{ см}^3$ (рис. 2).



Рисунок 1 - Монокристалл $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.156.27.1>

Известно, что если подвергать прозрачное изотропное тело сжатию или растяжению вдоль некоторого направления, то это направление становится выделенным и играет роль оптической оси возникающего квазикристалла. Схема установки по наблюдению оптической анизотропии при механической деформации сжатия монокристалла $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ представлена на рис. 2.

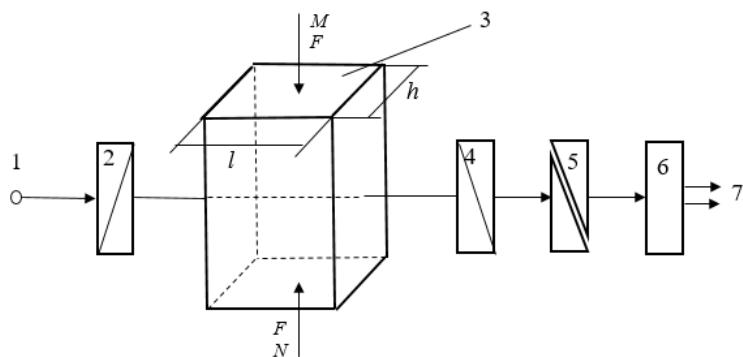


Рисунок 2 - Установка для исследования оптической анизотропии монокристалла $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$:
1 – источник излучения; кристалл; 2 – поляризатор; 3 – исследуемый кристалл; 4 – анализатор; 5 – компенсатор
двойного лучепреломления Бобине Солейля; 6 – ФЭУ-100; 7 – регистрирующее устройство
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.156.27.2>

Исследуемый монокристалл помещали между двумя скрещенными поляризаторами. В отсутствии деформации свет через такую систему не проходил, так как угол между главными направлениями поляризаторов равен 90° .

При сжатии или растяжении тела вдоль направления MN происходило изменение межатомных расстояний в этом направлении, что, в свою очередь, влияло на поляризуемость и, следовательно, на условия распространения световых волн. В деформированном кристалле возникали обыкновенная « o » и необыкновенная « e » волны, которые распространялись в одном направлении, перпендикулярно оптической оси MN кристалла, но с разными скоростями. В точке возникновения « o » и « e » волн разность фаз колебаний между ними кратна (на кристалле падает линейно поляризованный свет). На выходе из кристалла разность фаз колебаний изменится на величину [11]

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_e - n_o)l .$$

В результате этого свет станет эллиптически поляризованным и частично пройдет через второй поляризатор. Таким образом, поле зрения на выходе из системы просветится.

Мерой оптической анизотропии является показатель двойного лучепреломления. Опыты показали, что двойное лучепреломление Δn пропорционально величине механического напряжения $\sigma = F/S = F/hl$, то есть величине силы приходящейся на единицу площади [13], [14].

Таким образом,

$$(n_e - n_o) = \gamma\sigma ,$$

где — постоянная Коттона-Мутона упругооптического эффекта;

l — толщина кристалла;

h — ширина кристалла.

В зависимости от рода вещества может быть как положительной, так и отрицательной величиной. Кроме того, зависит от длины волны.

Поиск постоянной упругооптического эффекта в материалах научно-технической литературы, значение которой необходимо знать для определения показатель двойного лучепреломления исследуемого кристалла, не дал положительных результатов. Поэтому для ее нахождения нами было изготовлено устройство для создания одноосной деформации сжатия с помощью пружин (с жесткостью $k = 3 \cdot 10^3$ Нм) вдоль направления MN , которое становится выделенным, и играет роль оптической оси.

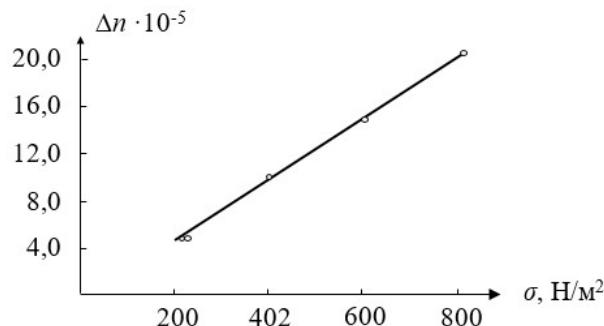


Рисунок 3 - Зависимость двойного лучепреломления кристалла $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ от внешнего, механического напряжения приложенного к нему

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.156.27.3>

Используя градуировочный график зависимости силы упругости от деформации сжатия пружины, определяли силу, действующую на площадь кристалла $S = l \cdot h \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$. На рис. 3 представлена зависимость двойного лучепреломления кристалла $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ от внешнего, механического напряжения приложенного к нему.

Из рисунка 3 видно, что величина двойного лучепреломления, возникающая в кристалле $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ даже при напряжении $8 \cdot 10^2 \text{ Н/м}^2$, имеет маленькое значение $\Delta n = 20 \cdot 10^{-5}$. Среднее значение постоянной упругооптического эффекта, определенное, используя полученные экспериментальные данные, равно $\gamma = 3.18 \cdot 10^{-7} \text{ М}^2/\text{Н}$.

Заключение

- Выращены крупноблочные, одноосные, тетрагональной сингонии монокристаллы хорошего оптического качества.
- Изучена зависимость величины двулучепреломления кристалла $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ от напряжения, приложенного к нему.
- Определена константа упругооптического эффекта в кристалле $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Fliedner L.J. The preparation and preservation of large crystals of chrome alum / L.J. Fliedner // Journal of Chemical Education. — 1932. — Vol. 9. — № 8. — P. 1453–1454.
2. Ali Z.M. Synergistic antibacterial interaction between an alum and antibiotics on some microorganism / Z.M. Ali // Scientific Journal of Medical Research. — 2018. — Vol. 2. — P. 47–51.
3. Ghimire T.R. The mechanisms of action of vaccines containing aluminum adjuvants: an in vitro vs in vivo paradigm / T.R. Ghimire // SpringerPlus. — 2015. — Vol. 4. — № 181. — P. 1–18.
4. Miah M.I. Optical limiting and its mechanism in potash alum / M.I. Miah, U. Acharjee, L. Naheed // Optik. — 2014. — Vol. 125 — P. 6727–6729.
5. Kaminskii A.A. α -Alums: K, Rb, Tl and NH4Al(SO4)2·12H2O — a new family of $\chi(3)$ -active crystalline materials for Raman laser converters with large frequency shifts / A.A. Kaminskii, E. Haussühl, S. Haussühl [et al.] // Laser Physics Letters. — 2004. — Vol. 1. — P. 205–211.
6. Елисеева А.А. Рост кристаллов смешанных двойных сульфатов из водных растворов / А.А. Елисеева, О.В. Князькова [и др.] // Успехи в химии и химической технологии. — 2021. — Т. XXXV. — № 6. — С. 36–38.
7. Сервис myshared. — URL: <http://www.mysharcd.ru/slide/749412/> (дата обращения: 03.02.2025).
8. Нарасимхамурти Т.С. Фотоупругие и электрооптические свойства кристаллов / Т.С. Нарасимхамурти. — Москва: Мир, 1984. — 624 с.
9. Сонин А.Н. Электрооптические кристаллы / А.Н. Сонин, А.С. Василевская. — Москва: Атомиздат, 1971. — 200 с.
10. Ландсберг Г.С. Оптика / Г.С. Ландсберг. — Москва: Наука, 1976. — 927 с.
11. Детлаф А.А. Курс физики. Том III. Волновые процессы. Оптика. Атомная и ядерная физика / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский, М.Б. Милковская. — Москва: Высшая школа, 1979. — 511 с.
12. Ландау Л.Д. Теоретическая физика. В 10-ти т. Т. VIII. Электродинамика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. — Москва: Наука, 1987.
13. Ландсберг Г.С. Оптика / Г.С. Ландсберг. — Москва: Наука, 1976.
14. Егоров-Тисменко Ю.К. Кристаллография и кристаллохимия / Ю.К. Егоров-Тисменко. — Москва: Изд-во КДУ, 2005. — 592 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Fliedner L.J. The preparation and preservation of large crystals of chrome alum / L.J. Fliedner // Journal of Chemical Education. — 1932. — Vol. 9. — № 8. — P. 1453–1454.
2. Ali Z.M. Synergistic antibacterial interaction between an alum and antibiotics on some microorganism / Z.M. Ali // Scientific Journal of Medical Research. — 2018. — Vol. 2. — P. 47–51.
3. Ghimire T.R. The mechanisms of action of vaccines containing aluminum adjuvants: an in vitro vs in vivo paradigm / T.R. Ghimire // SpringerPlus. — 2015. — Vol. 4. — № 181. — P. 1–18.
4. Miah M.I. Optical limiting and its mechanism in potash alum / M.I. Miah, U. Acharjee, L. Naheed // Optik. — 2014. — Vol. 125 — P. 6727–6729.
5. Kaminskii A.A. α -Alums: K, Rb, Tl and NH4Al(SO4)2·12H2O — a new family of $\chi(3)$ -active crystalline materials for Raman laser converters with large frequency shifts / A.A. Kaminskii, E. Haussühl, S. Haussühl [et al.] // Laser Physics Letters. — 2004. — Vol. 1. — P. 205–211.
6. Eliseeva A.A. Rost kristallov smeshannyh dvojnyh sul'fatov iz vodnyh rastvorov [Crystal growth of mixed double sulphates from aqueous solutions] / A.A. Eliseeva, O.V. Knjaz'kova [et al.] // Uspehi v himii i himicheskoy tehnologii [Successes in Chemistry and Chemical Technology]. — 2021. — Vol. XXXV. — № 6. — P. 36–38. [in Russian]
7. Service myshared. — URL: <http://www.mysharcd.ru/slide/749412/> (accessed: 03.02.2025). [in Russian]
8. Narasimhamurti T.S. Fotouprugie i elektroopticheskie svojstva kristallov [Photoelastic and electro-optical properties of crystals] / T.S. Narasimhamurti. — Moscow: Mir, 1984. — 624 p. [in Russian]
9. Sonin A.N. Jelektroopticheskie kristally [Electro-optic crystals] / A.N. Sonin, A.S. Vasilevskaja. — Moscow: Atomizdat, 1971. — 200 p. [in Russian]
10. Landsberg G.S. Optika [Optics] / G.S. Landsberg. — Moscow: Nauka, 1976. — 927 p. [in Russian]
11. Detlaf A.A. KURS FIZIKI. Tom III. Volnovye processy. Optika. Atomnaja i jadernaja fizika [Physics. Volume III. Wave processes. Optics. Atomic and nuclear physics] / A.A. Detlaf, B.M. Javorskij, M.B. Milkovskaja. — Moscow: Higher School, 1979. — 511 p. [in Russian]
12. Landau L.D. Teoreticheskaya fizika. V 10-ти t. T. VIII. Elektrodinamika sploshnyh sred [Theoretical Physics. In 10 vol. T. VIII. Electrodynamics of continuous media] / L.D. Landau, E.M. Lifshic. — Moscow: Nauka, 1987. [in Russian]
13. Landsberg G.S. Optika [Optics] / G.S. Landsberg. — Moscow: Nauka, 1976. [in Russian]

14. Egorov-Tismenko Ju.K. Kristallografija i kristallohimija [Crystallography and crystallochemistry] / Ju.K. Egorov-Tismenko. — Moscow: Publishing House KDU, 2005. — 592 p. [in Russian]