

УДК 538.91Ф405; 548.5.01
UDC 538.91F405; 548.5.01

ВПЛИВ ОПТИЧНОГО ОПРОМІНЕННЯ НА ТЕМПЕРАТУРНІ ЗМІНИ СТРУКТУРИ КРИСТАЛІВ ПРУСТИТУ

Гололобов Ю.П., доктор фізико-математичних наук, Національний транспортний університет,
Київ, Україна

Боровий М.О., доктор фізико-математичних наук, Київський національний університет імені
Тараса Шевченка, Київ, Україна

Ісаєнко Г.Л., кандидат фізико-математичних наук, Національний транспортний університет,
Київ, Україна

Сальнік А.В., Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

EFFECT OF OPTICAL RADIATION IN TEMPERATURE RESTRUCTURING OF CRYSTALS PRUSTYTU

Gololobov Yu.P., doctor of sciences, professor, National Transport University, Kyiv, Ukraine

Borovoy N.A., doctor of sciences, associate professor, Taras Shevchenko Kyiv National University,
Kyiv, Ukraine

Isaienko G.L., Ph.D., National Transport University, Kyiv, Ukraine

Salnik A.V., Taras Shevchenko Kyiv National University, Kyiv, Ukraine

ВЛИЯНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРНЕ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ КРИСТАЛЛОВ ПРУСТИТА

Гололобов Ю.П., доктор физико-математических наук, Национальный транспортный
университет, Киев, Украина

Боровой Н.А., доктор физико-математических наук, Киевский национальный университет
имени Тараса Шевченко, Киев, Украина

Исаенко Г.Л., кандидат физико-математических наук, Национальный транспортный
университет, Киев, Украина

Сальник А.В., Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев, Украина

Постановка проблеми.

Кристали напівпровідника-сенгетоелектрика пруститу (Ag_3AsS_3) характеризуються високою іонною провідністю, значною оптичною анізотропією та прозорістю в інфрачервоній області і відносяться до перспективних матеріалів нелінійної оптики, тому їх фізичні характеристики активно досліджуються в діапазоні температур ($4,2 \div 600$) К [1-12]. При кімнатній температурі прустит належить до нецентросиметричного класу тригональної сингонії (просторова група C_{3v}^6) [3,4]. Охолодження кристалів пруститу супроводжується структурними фазовими перетвореннями (ФП), за даними [3] при температурах 56 К (зміна симетрії $C_{3v} \rightarrow C_s$) та 24 К ($C_s \rightarrow C_1$). Комплексні дослідження теплоємності та характеру температурних перетворень спектру ЯКР дозволили авторам [5] вперше зробити висновок про наявність в кристалах Ag_3AsS_3 ФП – II роду при $T_i = (60,5 \pm 0,5)$ К і ФП – I роду при $T_N = (49,5 \pm 0,5)$ К та існування в температурній області між ними неспівмірної фази. Пізніше утворення в пруститі при $T_i = 60$ К модульованої структури було безпосередньо підтверджено рентгенодифракційним та нейтронографічним методами [6, 7]. Подальші дослідження показали, що модульована структура в інтервалі $T=28 \div 50$ К також є неспівмірно модульованою, але з дуже малими змінами періоду [8].

Відносно ФП в пруститі при температурах $T > 100$ К у літературі існують різні точки зору. Зокрема, на підставі виявленого розщеплення Е-моди у спектрах КРС автори [3] вперше висловили припущення про існування у кристалах Ag_3AsS_3 при температурі $T \approx 150$ К фотоіндукованого ФП, фазового перетворення, яке відбувається при наявності оптичного опромінення. Результати

досліджень комбінаційного розсіюванню та розсіюванню Манделштама-Брилюена дозволили дійти до висновку про існування фотоіндукованого ФП в області температур $T = (200 \div 210)$ К [4, 9, 10]. Однак, аномалії, характерні для ФП, на температурних залежностях швидкості розповсюдження повздовжніх ультразвукових хвиль в опромінених зразках пруститу спостерігались при температурі $T \approx 150$ К [11].

Отже, в літературі відсутня єдина точка зору щодо характеру та механізмів впливу температури і оптичного опромінення на фізичні характеристики кристалів пруститу. Крім того, прецизійні вимірювання параметру c елементарної комірки пруститу при температурах $T < 300$ К взагалі не виконувалися. Тому в представленій роботі методом рентгенівської дилатометрії досліджено температурні залежності параметру c елементарної комірки в інтервалі температур $100 \text{ К} < T < 300 \text{ К}$ як при лазерному опроміненні, так і у темновому режимі.

В роботі досліджувалися зразки пруститу, вирощені методом Бріджмена-Стокбаргера (м. Ужгород). Рентгенівські дифрактограми Ag_3AsS_3 були отримані з використанням дифрактометру ДРОН-4-07 (випромінювання $\text{Fe } K\alpha_{1,2}$). Для вивчення залежностей $c(T)$ використовувалися монокристали пруститу, в яких площина $(00l)$ було виведено на фізичну поверхню. Для отримання залежності $c(T)$ реєструвався рефлекс (006) . Максимуми сканувалися з кроком $\delta(2\theta)=0,02^\circ$, час накопичення імпульсів в точці 2 с. При розділенні $K\alpha_{1,2}$ -дублету використовувалися функції Фойгта, які апроксимували компоненти $K\alpha_1$ і $K\alpha_2$. Похибка визначення параметру c за таких експериментальних умов не перевищувала $0,002 \text{ \AA}$. Зразки розміщувалися в стандартній низькотемпературній камері УРНТ-180. Температура зразка підтримувалася з точністю до $0,5 \text{ К}$ з використанням терморегулятора ВРТ-2 і вимірювалася мідь-константовою термопарою. Оптичне опромінювання зразків в процесі охолодження і нагрівання виконувалось за допомогою лазера MGL 500 мВт ($\lambda = 532 \text{ нм}$), потужність випромінювання на зразку складала 40 мВт .

На рис. 1 наведено отримані у режимі охолодження температурні залежності параметру $c(T)$ елементарної комірки кристалу Ag_3AsS_3 як без оптичного опромінення (а), так і при лазерному опроміненні зразка (б). Необхідно відмітити, що залежності $c(T)$ значно відрізняються.

Перш за все, на залежностях $c(T)$ виділяються дві області температур з суттєво відмінними кутами нахилу: діапазон $\Delta T_1 = (220 \div 300) \text{ К}$, в якому параметр c взагалі слабо змінюється з температурою, і $\Delta T_2 = (100 \div 170) \text{ К}$, де кут нахилу вже суттєвий. В області температур $(170 \div 220) \text{ К}$ кут нахилу залежності $c(T)$ монотонно змінюється. Отже, коефіцієнт теплового розширення кристалу вздовж вісі C $\alpha_c = \partial c / \partial T$ в двох температурних діапазонах ΔT_1 та ΔT_2 виявився істотно різним:

$$\alpha_c(\Delta T_1) = 3,5 \cdot 10^{-5} \text{ \AA/К}; \quad \alpha_c(\Delta T_2) = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ \AA/К}.$$

Відзначимо, що у [2] параметри a і c у діапазоні температур $\Delta T = (100 \div 300) \text{ К}$ визначалися зі значно більшою експериментальною похибкою, тому зміна кута нахилу залежності $c(T)$ при переході через область температур $(170 \div 220) \text{ К}$ не спостерігалась. Звертає на себе увагу і той факт, що в інтервалі температур $(170 \div 220) \text{ К}$ залежності $c(T)$ як у випадку опромінених, так і затемнених зразків практично збігаються. Однак при температурі $T < 170 \text{ К}$ спостерігається їх важлива відмінність. А саме, для зразків при темновому режимі охолодження в інтервалі температур $(100 - 170) \text{ К}$ параметр c монотонно зростає зі зменшенням температури за лінійним законом. В той же час, для зразків, які в процесі охолодження опромінювалися лазером, при температурі $T = (144 \div 146) \text{ К}$ спостерігається зростання параметру c на величину $\Delta c \approx (0,002 \div 0,003) \text{ \AA}$. Такий стрибок значень параметру елементарної комірки є характерним для ФП I роду.

Природа виявленого фотоіндукованого ефекту – стрибкоподібної зміни параметру c при $T = (144 \div 146) \text{ К}$ може бути пов'язана з процесами фотостимульованої міграції іонів Ag^+ по кристалографічним позиціям в елементарній комірниці (глибина потенціальної ями для Ag^+ в елементарній комірниці не перевищує $\Delta U = (0,7 \div 1,0) \text{ eV}$ [1,2]). Аналіз структурної амплітуди пруститу показав, що у затемнених зразках при підвищенні температури, починаючи з $T \geq 150 \text{ К}$, відбувається перехід іонів Ag^+ з основних кристалографічних позицій у вакантні головним чином у правогвинтових спіралях (AgS). Однак, одночасна дія лазерного опромінення та температури при $T \geq 150 \text{ К}$ призводить до розупорядкування усієї катіонної підґратки пруститу, тобто прискореного

рівноімовірного виходу іонів срібла як з право-, так і з лівовинтових спіралей (AgS) [12]. При цьому іони Ag^+ можуть переходити у вакантні позиції в межах елементарної комірки, або виходити в області структурних неоднорідностей та на поверхню кристалітів.

Варто також відзначити, що суперечливий характер відомих літературних даних про існування фотоіндукованих змін фізичних параметрів пруститу в області температур (200 ÷ 210) К [1,2] може бути зумовлений "перехідним" станом кристалів пруститу в інтервалі температур (170 ÷ 220) К. Дійсно, у вказаному температурному діапазоні коефіцієнт теплового розширення пруститу α_c змінюється більш ніж втричі, що характерно для розмитого за температурою фазового переходу. Тому оптичне опромінення кристалу пруститу у такому стані, залежно від параметрів підсистеми дефектів, може спричиняти появу різного роду аномалій температурних залежностей електричних, теплових та оптичних характеристик.

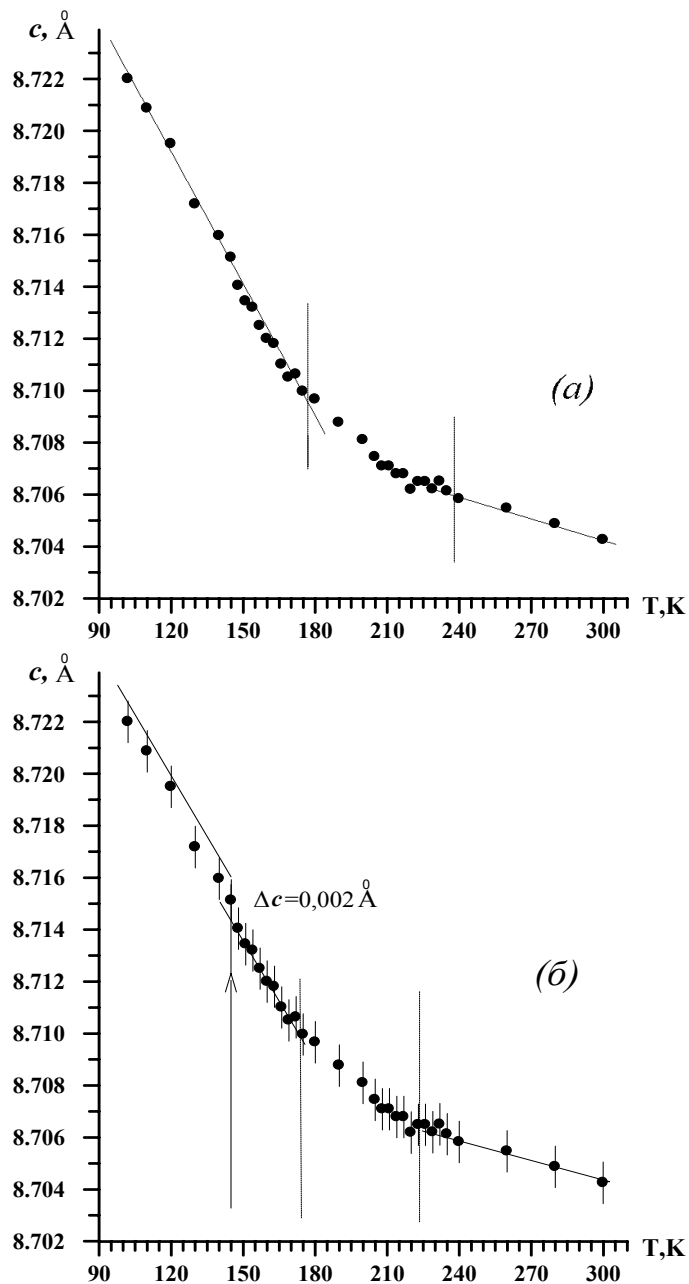


Рисунок 1 – Залежність $c(T)$ для кристалів пруститу: a – без опромінення; b – при лазерному опроміненні

Висновки.

Таким чином, у роботі експериментально виявлено існування двох температурних діапазонів – (220 ÷ 300) К та (100 ÷ 170) К, в яких значення коефіцієнту теплового розширення α_c пруститу змінюється майже втричі. Вперше експериментально спостерігалось фотоіндукована стрибкоподібна зміна параметру c елементарної комірки при $T = (144 \div 146)$ К, що може свідчити про існування в кристалі пруститу фотоіндукованого фазового переходу першого роду при даних температурах.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Gagor A., Pawowski A., Pietraszko A. Silver transfer in proustite Ag_3AsS_3 at high temperatures: Conductivity and single-crystal X-ray studies / A. Gabor, A. Pawowski, A. Pietraszko // *Journal of Solid State Chemistry*. – 2009. – V. 182. – P. 451–456.
2. Schonau K.A., Derfern S.A. High-temperature phase transitions, dielectric relaxation, and ionic mobility of proustite, Ag_3AsS_3 , and pyrargyrite, Ag_3SbS_3 / K.A. Schonau, S.A. Derfern // *Journal of Applied Physics*. – 2002. – V. 92, № 12. – P. 7415-7424.
3. Смоленский Г.А., Синий И.Г., Кузьминов Е.Г., Годовиков А.А. Оптические фононы и мягкая мода в прустите при фазовых переходах / Г.А. Смоленский, И.Г. Синий, Е.Г. Кузьминов, А.А. Годовиков // *ФТТ*. – 1979. – Т. 21, № 8. – С. 233-2341.
4. Смоленский Г.А., Синий И.Г., Прохорова С.Д., Кузьминов Е.Г., Годовиков А.В. Новый фазовый переход в прустите / Г.А. Смоленский, И.Г. Синий, С.Д. Прохорова, Е.Г. Кузьминов, А.А. Годовиков // *Кристаллография*. – 1982. – Т. 27, № 1. – С. 140-145.
5. Бондарь А.Б., Вихнин В.С., Рябченко С.М., Ячменев В.Е. Несоразмерная фаза в области фазового перехода второго рода в прустите / А.Б. Бондарь, В.С. Вихнин, С.М. Рябченко, В.Е. Ячменев // *ФТТ*. – 1983. – Т. 25, № 9. – С. 2602–2609.
6. Хасанов С.С., Шехтман В.Ш., Шмытько И.М. Образование модулированной структуры в прустите / С.С. Хасанов, В.Ш. Шехтман, И.М. Шмытько // *ФТТ*. – 1984. – Т. 26, № 3. – С. 935–938.
7. Nelmeest R.J., Howard C.J., Ryan T.W., David W.I.F., Schultz A.J., Leung P.C. A neutron and diffraction study of the phase transitions in proustite (Ag_3AsS_3) between 35 K and room temperature / R.J. Nelmeest, C.J. Howard, T.W. Ryan, W.I.F. David, A.J. Schultz, P.C. Leung // *J. Phys. C: Solid State Phys.* – 1984. – V. 17, № 32. – P. 861–865.
8. Шмытько И.М., Шехтман В.Ш., Багаутдинов Б.Ш., Афоникова Н.С. Динамические гистерезисные явления в области существования модулированных структур в прустите / И.М. Шмытько, В.Ш. Шехтман, Б.Ш. Багаутдинов, Н.С. Афоникова // *ФТТ*. – 1990. – Т. 32, № 8. – С. 2441–2447.
9. Кот Л.А., Прохорова С.Д., Сандлер Ю.М., Синий И.Г., Флеров И.Н. Фотоиндуцированный фазовый переход в прустите / Л.А. Кот, С.Д. Прохорова, Ю.М. Сандлер, И.Г. Синий, И.Н. Флеров // *ФТТ*. – 1983. – Т. 28, № 5. – С. 1535-1537.
10. Шаурен Я., Тейлор К.Н. Исследование фотоиндуцированного фазового перехода в прустите Ag_3AsS_3 / Я. Шаурен, К.Н. Тейлор // *ФТТ*. – 1986. – Т. 28, № 9. – С. 2604-2607.
11. Гололобов Ю.П. О фотоиндуцированном фазовом переходе в кристаллах Ag_3AsS_3 / Ю.П. Гололобов // *ФТТ*. – 1999. – Т. 41, №4. – С. 702-704.
12. Боровой Н.А., Гололобов Ю.П., Саливонов И.Н. Терморазупорядочение катионной подрешетки прустита / Н.А. Боровой, Ю.П. Гололобов, И.Н. Саливонов // *ФНТ*. – 1999. – Т. 25, Вып. 7. – С. 731-736.

REFERENCES

1. Gagor A., Pawowski A., Pietraszko A. Silver transfer in proustite Ag_3AsS_3 at high temperatures: Conductivity and single-crystal X-ray studies. *Journal of Solid State Chemistry*. 2009. V. 182. P. 451–456.
2. Schonau K.A., Derfern S.A. High-temperature phase transitions, dielectric relaxation, and ionic mobility of proustite, Ag_3AsS_3 , and pyrargyrite, Ag_3SbS_3 . *Journal of Applied Physics*. 2002. V. 92, № 12. P. 7415-7424.
3. Smolenskiy G.A., Siniy I.G., Kuzminov E.G. and Godovikov A.A. Optical phonons and soft mode in proustite at phase transition. *Phys. Solid State*. 1979. 21(8). P. 2338-2341. (Rus)

4. Smolenskiy G.A., Siniy I.G., Prohorova S.D., Kuzminov E.G. and Godovikov A.V. New phase transition in proustite. *Crystallographia*. 1982. 27(1). P. 140-145. (Rus)
5. Bondar A.B., Vihrin V.S., Riabchenko S.M. and Iachmenev V.E. Incommensurate phase near phase transition of the second order in proustite. *Phys. Solid State*. 1983. 25(9). P. 2602-2609. (Rus)
6. Hasanov S.S., Shlehtman V.Sh. and Shmytko I.M. Creation of modulated structure in proustite. *Phys. Solid State*. 1984. 26(3). P. 935-938. (Rus)
7. Nelmest R.J., Howard C.J., Ryan T.W., David W.I.F., Schultz A.J., Leung P.C.W. A neutron and diffraction study of the phase transitions in proustite (Ag_3AsS_3) between 35 K and room temperature. *J. Phys. C: Solid State Phys.* 1984. V. 17, № 32. P. 861–865.
8. Shmytko M., Shlehtman V.Sh., Bagautdinov B.Sh. and Afonikova N.S. Dynamic hysteresis effects near existence of modulated structure in proustite. *Phys. Solid State*. 1990. 32(8). P. 2441-2447. (Rus)
9. Kot L.A., Prohorova S.D., Sandler Iu.M., Siniy I.G. and Flerov I.N. Photostimulated phase transition in proustite. *Phys. Solid State*. 1983. 28(5). P. 1535-1537. (Rus)
10. Shauren Ia. and Teylor K.N. Studing og photo- stimulated phase transition in proustite Ag_3AsS_3 . *Phys. Solid State*. 1986. 28(9). P. 2604-2607. (Rus)
11. Gololobov Yu.P. On photostimulated phase transition in Ag_3AsS_3 crystal. *Phys. Solid State*. 1999. 41(4). P. 702-704. (Rus)
12. Borovoy N.A., Gololobov Iu.P. and Salivonov I.N. Termorearrangement of cation sublattice in proustite. *Low Temp. Phys.* 1999. 25. P. 546-549. (Rus)

РЕФЕРАТ

Гололобов Ю.П. Вплив оптичного опромінення на температурні зміни структури кристалів пруститу / Ю.П. Гололобов, М.О. Боровий, Г.Л. Ісаєнко, А.В. Сальнік // Вісник Національного транспортного університету. Науково-технічний збірник: в 2 ч. Ч. 1: Серія «Технічні науки». – К. : НТУ, 2014. – Вип. 29.

В статті запропоновано підхід, що до ідентифікації впливу температури і оптичного опромінення на фізичні характеристики кристалів пруститу.

Об'єкт дослідження – кристали напівпровідника-сегнетоелектрика пруститу (Ag_3AsS_3).

Мета роботи – визначення впливу оптичного опромінення на температурні зміни структури кристалів пруститу Ag_3AsS_3 .

Метод дослідження – методом рентгенівської дилатометрії досліджено температурні залежності параметру c елементарної комірки пруститу Ag_3AsS_3 в інтервалі температур $100 \text{ K} < T < 300 \text{ K}$ як при лазерному опроміненні, так і у темновому режимі.

В діапазоні температур (100÷300) К були отримані температурні залежності параметрів елементарної комірки $c(T)$ кристалів Ag_3AsS_3 , як в темновому режимі, так і під дією лазерного опромінення, з використанням рентгенівського дилатометричного методу з високою точністю ($\lambda=532 \text{ нм}$). Було визначено, що параметр c зростає практично лінійно з пониженням температури від 300 К до 100 К. В той же час, для зразків, які піддавалися лазерному опроміненню, в процесі охолодження спостерігалось зростання параметра c на значення $\Delta c \approx (0,002-0,003) \text{ \AA}$ при температурі $T_p = (145 \div 147) \text{ K}$. Такий стрибок є типовим для систем в яких спостерігається фазовий перехід другого роду.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ПРУСТИТ, ПАРАМЕТРИ ЕЛЕМЕНТАРНОЇ КОМІРКИ, ФАЗОВИЙ ПЕРЕХІД, ФОТОІНДУКОВАНІ ЕФЕКТИ.

ABSTRACT

Gololobov Yu.P., Borovoy N.A., Isaienko G.L., Salnik A.V. Effect of optical radiation in temperature restructuring of crystals proustite. *Visnyk National Transport University. Scientific and Technical Collection: In Part 2. Part 1: Series «Technical sciences»*. – Kyiv: National Transport University, 2014. – Issue 29.

The paper proposes approach to identify the effects of temperature and optical radiation on the physical properties of crystals proustite.

Object of the study – crystal semiconductor- proustite (Ag_3AsS_3).

Purpose of the study – to determine the effect of optical opromynennya to temperature changes in the structure of crystals proustite.

Method of the study – by X-ray dilatometry the temperature dependence of the unit cell parameter c in the temperature range $100\text{ K} < T < 300\text{ K}$ as in the laser irradiation and in dark mode.

The temperature dependences of the unit cell parameters $c(T)$ of Ag_3AsS_3 were measured by X-ray dilatometry method with high precision in temperature range $(100\div 300)\text{ K}$ in dark mode and during laser irradiation ($\lambda=532\text{ nm}$). It was found that the parameter c increases almost linear with decreasing of temperature from 300 K to 100 K for samples in the dark. At the same time, for samples that were exposed during the cooling at the laser irradiation, the increasing of the parameter c on the value of $\Delta c \approx (0,002\div 0,003)\text{ \AA}$ is observed at temperatures $T_p=(145\div 147)\text{ K}$. This leap is typical for systems in which occurs a phase transition of the first order.

KEY WORDS: PROUSTITE, UNIT CELL PARAMETERS, PHASE TRANSITION, PHOTOINDUCED EFFECTS.

РЕФЕРАТ

Гололобов Ю.П. Влияние оптического излучения на температурные изменения структуры кристаллов прустита. / Ю.П. Гололобов, Н.А. Боровой, Г.Л. Исаенко, А.В. Сальник // Вестник Национального транспортного университета. Научно-технический сборник: в 2 ч. Ч. 1: Серия «Технические науки». – К. : НТУ, 2014. – Вып. 29.

Исследовано влияние температуры и оптического излучения на физические характеристики кристаллов прустита.

Объект исследования – кристаллы полупроводника – селеноелектрика прустита (Ag_3AsS_3).

Цель работы – определение влияния оптического излучения на температурные изменения структуры кристаллов прустита Ag_3AsS_3 .

Метод исследования – методом рентгеновской дилатометрии, исследованы температурные зависимости параметра c элементарной ячейки в интервале температур $100\text{ K} < T < 300\text{ K}$ как при лазерном облучении, так и в темновом режиме.

В диапазоне температур $(100\div 300)\text{ K}$ были получены температурные зависимости параметров элементарной решетки $a(T)$ и $c(T)$ кристаллов Ag_3AsS_3 , как в темновом режиме, так и под воздействием лазерного облучения, используя рентгеновский дилатометрический метод с высокой точностью ($\lambda=532\text{ nm}$). Было определено, что параметр c возрастает практически линейно с понижением температуры от 300 K до 100 K для образцов в темноте. В то же время, для образцов, которые подвергались лазерному облучению, в процессе охлаждения наблюдалось возрастание параметра решетки c на значение $\Delta c \approx (0,002\div 0,003)\text{ \AA}$ при температуре $T_p=(145\div 147)\text{ K}$. Такой скачек является типичным для систем в которых наблюдается фазовый переход второго рода.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ПРУСТИТ, ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ЯЧЕЙКИ, ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД, ФОТОИНДУКОВАННЫЕ ЭФФЕКТЫ.

АВТОРИ:

Гололобов Юрій Павлович, доктор фізико-математичних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри фізики, e-mail: "Yuriy Gololobov" <gololo@ukr.net>, тел. +380442846709, Україна, 01103, м. Київ, вул. Кіквідзе, 42, к. 406.

Боровий Микола Олександрович, доктор фізико-математичних наук, професор, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, завідувач кафедри загальної фізики, e-mail: bogovoy@univ.kiev.ua, тел. +380445262288, Україна, 03680, м. Київ, просп. Акад. Глушкова 2, корпус №1, к. 225.

Исаенко Галина Леонідівна, кандидат фізико-математичних наук, Національний транспортний університет, доцент кафедри фізики, e-mail: gl_isayenko@ukr.net, тел. +380442846709, +380973387759, Україна, 01103, м. Київ, вул. Кіквідзе, 42, к. 410.

Сальнік А.В., Київський національний університет імені Тараса Шевченка, аспірант кафедри загальної фізики, e-mail: alina.salnik@gmail.com, тел. +380969512897, Україна, 03680, м. Київ, просп. Акад. Глушкова 2, корпус №1, к. 225.

AUTHOR:

Gololobov Yurii P., doctor of sciences, professor, National Transport University, head department of physics, Kyiv, e-mail: "Yuriy Gololobov" <gololo@ukr.net>, tel. +380442846709, Ukraine, 01103, Kyiv, Kikvidze str. 42, of. 406.

Borovoy Mikola O., doctor of sciences, associate professor, Kyiv Taras Shevchenko National University, head department of general physics, e-mail: borovoy@univ.kiev.ua, tel. +380445262288, Ukraine, 03680, Kyiv, Acad. Glushkova Prosp.2, build. 1, of. 225.

Isaienko Galina L., Ph. D., National Transport University, associate professor department of physics, e-mail: gl_isayenko@ukr.net, tel. +380442846709, +380973387759, Ukraine, 01103, Kyiv, Kikvidze str. 42, of. 410.

Salnik Alina V., Taras Shevchenko Kyiv National University, postgraduate, department of general physics, e-mail: alina.salnik@gmail.com, tel. +380969512897, Ukraine, 03680, Kyiv, Acad. Glushkova Prosp.2, build. 1, of. 225.

АВТОРЫ:

Гололобов Юрий Павлович, доктор физико-математических наук, профессор, Национальный транспортный университет, заведующий кафедры физики, e-mail: "Yuriy Gololobov" <gololo@ukr.net>, тел. +380442846709, Украина, 01103, г. Киев, ул. Киквидзе, 42, к. 406.

Боровой Николай Александрович, доктор физико-математических наук, доцент, Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, заведующий кафедры общей физики, e-mail: borovoy@univ.kiev.ua, тел. +380445262288, Украина, 03680, г. Киев, просп. Акад. Глушкова 2, корпус №1, к. 225.

Исаенко Галина Леонидовна, кандидат физико-математических наук, Национальный транспортный университет, доцент кафедры физики, e-mail: gl_isayenko@ukr.net, тел. +380442846709, +380973387759, Украина, 01103, г. Киев, ул. Киквидзе, 42, к. 410.

Сальник А.В., Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, аспирант кафедры общей физики, e-mail: alina.salnik@gmail.com, тел. +380969512897, Украина, 03680, г. Киев, просп. Акад. Глушкова 2, корпус №1, к. 225.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Данчук В.Д., доктор фізико-математичних наук, професор, Національний транспортний університет, декан факультету транспортних та інформаційних технологій, Київ, Україна.

Дегода В.Я., доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, провідний науковий співробітник кафедри експериментальної фізики, Київ, Україна.

REVIEWER:

Danchuk V.D., doctor of sciences, professor, dean of the faculty of transport and information technologies, Kyiv, Ukraine.

Degoda V.Ya., doctor of sciences, Kyiv Taras Shevchenko National University, scientist department of experimental physics, Kyiv, Ukraine.