

ЭФФЕКТЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ В
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛАХ
Ф. И. Иванов, Е. В. Исакова

EFFECTS OF MECHANICAL FAULT IN THE ENERGETICALLY ACTIVE WHISKERS
F. I. Ivanov, E. V. Isakova

В статье рассмотрены результаты по изгибной деформации, обнаруженной авторами в нитевидных кристаллах (НК) азидов свинца и нитрата калия при воздействии света, электрического поля и температуры. Обсуждение полученных данных проводится с позиций сегнетоэлектрических (доменных) свойств исследуемых объектов. В НК возникают поля спонтанной поляризации, приводящие к изгибной деформации вследствие пьезоэффекта, изменению внутреннего электрополя и влияющие в конечном счете на взрывчатую чувствительность азидов свинца и механизм разложения.

The paper considers the results on flexural deformation detected by the authors in whiskers of lead azides and potassium nitrate when exposed to light, electric field and temperature. The discussion of findings is carried out from the perspective of ferroelectric (domain) properties of the objects investigated. Spontaneous polarization emerge in the whiskers, resulting in flexural deformation due to the piezoelectric effect, changes in internal electric fields and affecting the explosive sensitivity of lead azides and the mechanism of decomposition.

Ключевые слова: нитевидные кристаллы, доменная структура, фото-, электро-, термо-изгибные деформации азидов свинца и нитрата калия, их сегнетоэлектрические свойства, поляризация

Keywords: whiskers, domain structure, photo-, electro-, thermo-bending deformation of lead azide and potassium nitrate, ferroelectric polarization properties.

Введение

Энергетические азиды тяжелых металлов являются штатными иницирующими взрывчатыми веществами, чувствительными к воздействию тепла, удара, трения и электрических полей. Выводы о механизме возбуждения детонации [18], обобщавшие экспериментальные результаты, полученные на поликристаллических прессованных образцах или макрокристаллах, реальная дефектная структура которых не учитывалась или была максимально искаженной, были весьма общими и не отражали реального микромеханизма процессов инициирования. Наиболее совершенными кристаллами, с точки зрения реальной структуры, являются нитевидные кристаллы (НК) [19], в которых прочностные характеристики (модуль Юнга, критическое напряжение разрыва и др.) в наибольшей степени отвечают расчетным. Физически моделируя дефектную структуру при контролируемых внешних энергетических воздействиях, возможно с достаточной степенью надежности исследовать свойства НК, определяемые конкретно наведенными дефектами.

В работах методами декорирования поверхности НК азидов серебра, свинца и таллия были обнаружены зарядовые структуры (домены) с напряженностью электрического поля на границах, определяемых по эффекту Келдыша-Франца [4, 6–9], $10^6 - 10^7$ В/м.

Близкие по порядку величины значения напряженности электрического поля в области ДСП ($10^7 - 10^9$ В/м) получаются из решения уравнения Пуассона [3] для разноименно заряженной границы до-

мена. При этом плотность зарядов определялась визуально из концентрации декорирующих центров или при рассмотрении траектории заряженных декорирующих частиц, движущихся в поле периодического потенциала ДСП [4]. Как для первого, так и для второго случаев концентрация заряженных частиц на единицу площади поверхности составила $10^{14} - 10^{16} \text{ м}^{-2}$.

Исследования динамики формирования доменной электрической структуры на деформированных полосах дислокационного скольжения позволило сделать предположение о диффузионно-дрейфовом механизме разделения заряженных точечных дефектов (вакансий, междоузельных атомов) в полях упругих напряжений, структурных дефектов (дислокаций, полос скольжения или зародышей новой фазы). Существование данного механизма можно считать установленным [5].

Ряд обнаруженных эффектов проявления пьезоэлектричества [6], пиротоков, электрокалорического эффекта и скачков Баркгаузена [7; 8] свидетельствует в пользу сегнетоэлектрической природы кристаллов $\beta\text{-PbN}_6$.

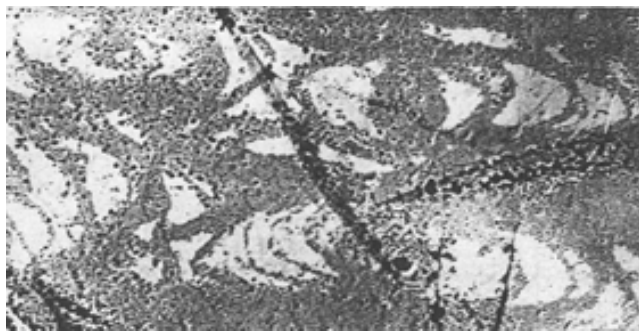


Рис. 1а

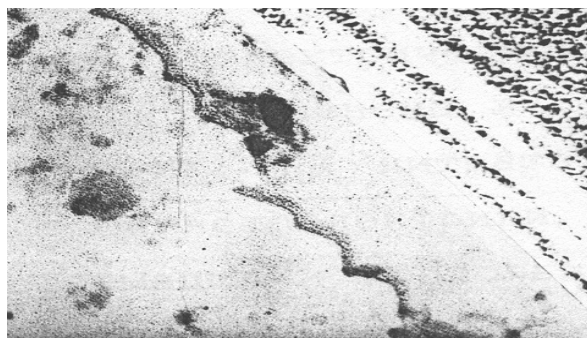


Рис. 1б

Рис. 1а. Области пространственного заряда, выявляемые у отдельных дислокаций методом декорирования золотом на поверхности [100] НК β-азид свинца. Увеличение в 14250 раз;
Рис. 1б. Продольная полидоменная структура НК β-азид свинца, выявляемая на грани [001] методом декорирования золотом. Увеличение в 15250 раз

Исследования пьезоэлектрических свойств проводились при изучении обратного пьезоэффекта, заключающегося в наблюдении разрушения жестко закрепленного НК β-PbN₆ импульсами электрического поля. В сегнетоэлектрических кристаллах под действием электрического поля наблюдаются два вида деформаций: пропорциональная квадрату напряженности E электрического поля, получившая название электрострикции; деформация прямо пропорциональная полю – пьезоэффект. Знак электрострикции, свидетельствующий о расширении или сжатии кристалла, не зависит от направления поля. При пьезоэлектрическом эффекте с изменением направления поля на противоположное изменяется знак деформации. Последнее было обнаружено при исследовании жестко закрепленного НК β-PbN₆ между двумя электродами, один из которых находился на центральной оси механотрона, и механически нагруженного до напряжения $\sigma \approx (0,4 \div 0,5) \sigma_{кр}$ НК β-PbN₆.

В основу метода измерения пьезоконстант был положен экспериментально установленный факт механического разрушения жестко закрепленного между массивными электродами НК β-PbN₆ при подаче на него импульсного электрического поля напряженностью $(3 \div 3,4) \cdot 10^6$ В/м [10]. Площадь поперечного сечения НК β-PbN₆ составляла 300 мкм², а длина 1,5 мм. Установлено, что разрушение НК β-PbN₆ не определяется условиями на контакте НК с электродом, материалом электродов, длительностью электрического импульса, а зависит от напряженности электрического поля и крутизны фронта импульса. На рисунке 2 приведены результаты зависимости критической напряженности электрического поля, при которой происходит разрушение НК β-PbN₆, от длительности импульса. Крутизна фронта импульса не превышает 10^{-9} с.

Пьезомодуль рассчитывался из соотношений

$$\sigma = Y\xi - eE, \quad (1)$$

где σ – критическое напряжение разрыва НК β-PbN₆, изменяющееся от $2,3 \cdot 10^7$ до $3,2 \cdot 10^9$ Н/м²; Y – модуль Юнга; e – пьезомодуль; $E = 3 \cdot 10^6$ В/м – напряженность электрического поля, при которой кристалл разрушается.

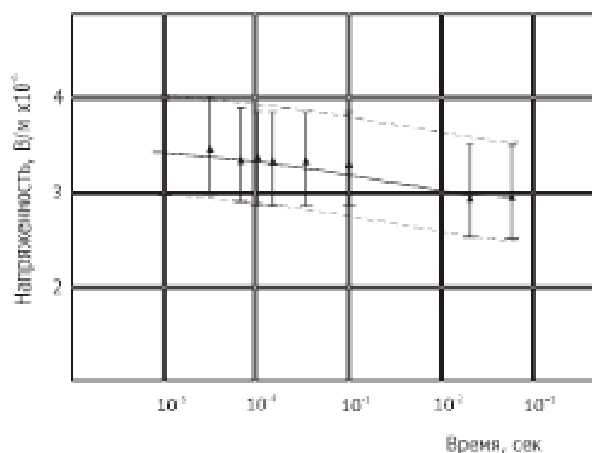


Рис. 2. Зависимость критической напряженности электрического поля, разрушающего НК β-PbN₆, от длительности электрического импульса

Для жестко закрепленного кристалла ($\xi=0$) легко найти

$$\bar{e} = -\frac{\sigma_{кр}}{E_{кр}} = \frac{2,3 \cdot 10^7}{3 \cdot 10^6} = -7,7 \text{ Кл/м}^2, \quad (2)$$

или $d = \bar{e}/Y \approx -4 \cdot 10^{-10}$ м/В и оценить вызываемую электрическим полем критической напряженности деформацию:

$$\xi = \frac{\bar{e}E}{Y} = \frac{7,7 \cdot 10^6}{1,8 \cdot 10^{10}} = 1,3 \cdot 10^{-3}. \quad (3)$$

Значение пьезомодуля, полученное из критических параметров разрушения, является, по-видимому, заниженным, тем не менее оно достаточно высокое и близкое к значениям пьезомодулей, наблюдаемых в сегнетоэлектрических пьезоэлектриках типа $BaTiO_3$, $LiNbO_3$ [12].

Электрокалорический эффект в нитевидных кристаллах β-PbN₆

Природу электрокалорического эффекта удобнее всего понять из термодинамического рассмотрения кристалла, помещаемого в электрическое поле и на-

ходящегося в адиабатических условиях в отсутствие механических напряжений. Естественно ожидать, что температура кристалла, внесенного в электрическое поле, изменится. Исходя из первого начала термодинамики $\Delta S = (C_p / T_0) \Delta T + \overline{P} \overline{E}$, для кристалла в условиях термоизоляции изменение энтропии ΔS равно нулю, а следовательно, изменение температуры составит

$$\Delta T = -(T_0 / C_p) \overline{P} \overline{E} = \overline{\delta}_x \overline{E}, \quad (4)$$

где C_p – теплоемкость единицы объема кристалла при постоянном электрическом поле и постоянных механических напряжениях; \overline{P} – вектор пирозлектрических коэффициентов, размерность которого Кл·м; T_0 – температура термостата; $\overline{\delta}$ – вектор электрокалорических коэффициентов.

Если электрическое поле направлено по вектору пирозлектрических коэффициентов, а угол между векторами \overline{P} и \overline{E} меньше 90° , кристалл, помещенный в электрическое поле, охлаждается. В противном случае – нагревается.

Электрокалорический эффект в НК β -PbN₆ исследовался на микрорадиометре ИКАР-1. НК β -PbN₆ запаивался в специальной ячейке между двумя электродами из жидкого галлия, межэлектродное расстояние выдерживалось равным 1,5 мм, а температура окружающей среды составляла 299⁰ К, затем подавалось постоянное электрическое поле напряженностью $1,7 \cdot 10^5$ В/м. Время, в течение которого осуществлялось сканирующее локальное микрорадиометрирование НК, не превышало 3 с. В результате измерений было зафиксировано локальное изменение температуры до 3⁰ К.

Предполагая, что электрическое поле по длине НК однородно, легко по формуле (5) оценить электрокалорический коэффициент в β -PbN₆

$$\delta = \frac{\Delta T}{\Delta E} = 3 \cdot 10^{-5} \text{ К} \cdot \text{м} / \text{В}. \quad (5)$$

Используя полученное значение δ и не учитывая его возрастания с температурой, отмеченное в работах по сегнетоэлектричеству, можно несколько поиному посмотреть на физические причины вспышки азидов свинца примерно при 600 К без расплавления. Произведя элементарные расчеты, получаем изменение напряженности электрического поля в НК, равное приблизительно 10^7 В/м, вполне достаточное, чтобы вызвать протекание инициирования по цепному механизму лавинно-химического эффекта, аналогично предложенному в работе [15].

Энергетически индуцируемые изгибные эффекты в нитевидных кристаллах β -PbN₆

1. Фотомеханический эффект в НК β -PbN₆

В работах [2; 11; 20] по исследованию фотохимического разложения ряда лабильных соединений (азидов тяжелых металлов, нитратов, [Co(NH₃)₅NO₂]X, (X=Cl⁻, Br⁻, NO₃⁻) и др.) было независимо обнаружено автором настоящей статьи и Е. В. Болдыревой и др. явление фотоизгибной деформации НК. Явление со-

стояло в том, что при облучении светом из области собственного поглощения НК в начальный момент времени, когда концентрация конечных продуктов разложения очень мала и известными методами не фиксируется, изгибаются. В работе [20] нами, не имея ещё ясных представлений о сегнетоэлектрической доменной структуре β -PbN₆, предложена модель этого явления. В модели предполагается пространственное разделение дырок (N_3^0) и электронов, образующихся при освещении, в электрическом поле, создаваемом отрицательно заряженной поверхностью и положительно заряженным объемом. В отсутствие освещения кристалл находится в квазистатическом равновесном состоянии. При освещении светом из области собственного поглощения равновесное зарядовое состояние по толщине НК β -PbN₆ нарушается, возникает неравномерное распределение захваченных на дефектах положительных и отрицательных носителей заряда. Электрическое поле по толщине перераспределяется, что сопровождается изгибом кристалла, возможно, вследствие электрострикционного или пьезоэлектрического эффектов. Анализ экспериментальных фактов доказывает пьезоэлектрическую природу сил наблюдаемого фотохимического изгиба на начальных стадиях.

С целью обнаружения фотомеханического эффекта в других кристаллах нами исследованы НК азидов серебра, таллия, натрия, бария, а также НК NaCl, KNO₃, K₂HPO₄. Изгиб под действием ультрафиолетового облучения обнаружен во всех азидных системах, а также в НК KNO₃ с ярко выраженными фотохимическими и пьезоэлектрическими свойствами. Подробнее эти исследования описаны в работах [6; 7].

2. Электроизгибная деформация нитевидных кристаллов β -PbN₆

Справедливость предлагаемой модели фотомеханического эффекта подтверждается наличием изгиба НК β -PbN₆ в электрическом поле. Отмечено, что при помещении НК β -PbN₆ в электрическое поле плоского конденсатора они изгибаются преимущественно (85 %) к положительной обкладке. Величина изгиба линейно зависит от напряженности электрического поля, когда напряженность поля меньше коэрцитивного, и направление изгиба зависит от полярности. С учетом наличия продольной доменной структуры электроизгибная деформация объясняется пьезоэффектом.

На рисунке 3 приведены зависимости изгиба НК β -PbN₆ и KNO₃ от напряженности электрического поля в поле плоского конденсатора. Величина изгиба оценена в относительном отклонении свободного конца НК. НК KNO₃ выбраны как типичные фотоактивные сегнетоэлектрики, в которых наблюдается фотоизгибная деформация и продольная доменная структура [6]. Наличие гистерезиса на приведенном рисунке выявляется как для НК KNO₃, так и для НК β -PbN₆. Понятно, что если изгиб (деформация) пропорционален электрической индукции в кристалле, то наблюдаемые петли гистерезиса свидетельствуют об антипараллельной ориентации диполей в сегнетоэлек-

трических доменах [12]. Домены могут двигаться в направлении поля, меняя тем самым эволюцию механических напряжений и соответственно величину изгиба. Движение домена может быть связано как с переполаризацией диполей, так и с участием свободных носителей заряда (электронов и дырок), компенсирующее деполаризующее поле за счет электропроводности и способствующих формированию однодоменного образца.

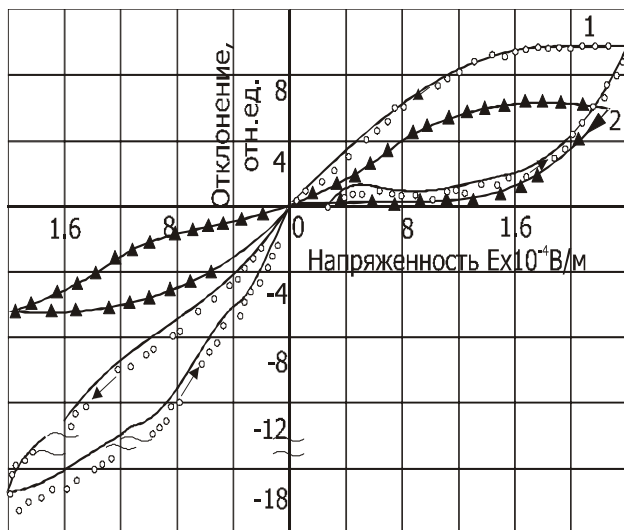


Рис. 3. Зависимость изгиба НК от величины напряженности электрического поля: 1 – НК β -азида свинца; 2 – НК нитрата калия

3. Термоизгибная деформация нитевидных кристаллов β - PbN_6

При исследовании влияния термической активации на фотомеханический эффект в ряде НК (ATM , KNO_3 , $Ba(NO_3)_2$, CdS и $[Co(NH_3)5NO_2]Cl_2$) обнаружена термоизгибная деформация НК, сохраняющаяся при нормальных условиях десятки и сотни часов. Рассмотрим имеющиеся экспериментальные результаты по термоизгибу НК β - PbN_6 и их интерпретацию, используя представления о сегнетоэлектрической природе соединения.

На рисунке 4 приведены зависимости отклонения свободного конца НК β - PbN_6 от температуры при скоростях нагрева 3 К/мин для трех близких по геометрическим размерам НК. Скорость деформации максимальна в области температур 290 – 350⁰ К, затем резко уменьшается до нуля.

Сопоставление наблюдаемых зависимостей по термоизгибу НК с измерением пиротоков при нагревании в режиме терморазряда конденсаторов (ТРК) (см. кривые 1, 2 на рис. 5), а также с закономерностями фотомеханического и электроизгибного эффектов позволяет предположить, что термоизгиб связан с нарушением симметрии зарядовых состояний сегнетоэлектрика. Механизм нарушения симметрии зарядовых состояний при температуре примерно 350 – 360⁰ К, приводящий к термоизгибу НК β - PbN_6 , в настоящее время не имеет однозначной интерпретации. В ранних исследованиях Ю. А. Захаров, Г. Г. Савельев, Г. Т. Шечков [17] обнаружили ряд аномалий

при этих температурах. Это касается исчезновения фото- и темновой проводимости с энергиями активации 0,4 – 0,5 эВ, а также появления на отдельных термограммах азид свинца N-образности с минимумом при 355⁰ К. Эти эффекты авторы связывали с десорбцией воды (H_2O^+) и N_2^+ , обнаруживаемых масс-спектрофотометрически. В связи с ожидаемой разной топоактивностью граней кристалла [1] изгиб НК от температуры можно представить через разность поверхностных натяжений граней.

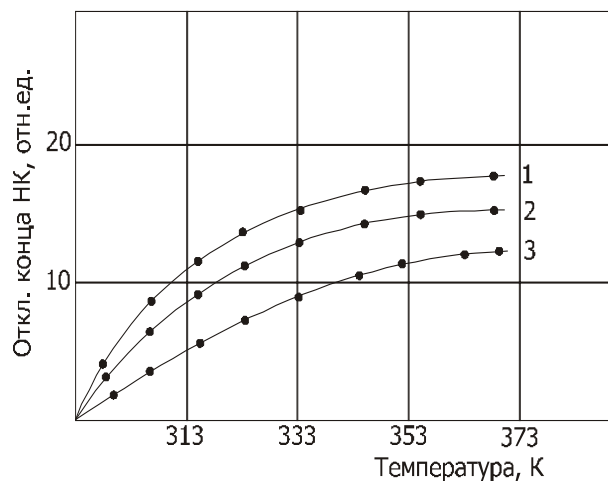


Рис. 4. Зависимость термоизгиба для трех НК β -азида свинца от температуры. Скорость нагрева 3 град/мин

Известно, что адсорбционно-десорбционные процессы протекают при изменении температуры обратимо, следовательно, и изгибная деформация, если она не приводит к изменению поляризации домена, должна быть обратимой, что противоречит эксперименту. Таким образом, первичность десорбции над процессами, связанными с изменением зарядово-поляризационных состояний, явно из наблюдаемых зависимостей не следует. С целью проверки модели зарядово-поляризационных состояний, связанных со структурными переходами, для объяснения изгиба проведены исследования термоизгибной деформации в НК типичных сегнетоэлектриков с известными температурами структурных переходов [13] и эффектами, аналогичными обнаруживаемым в β -азиде свинца. Наиболее подходящим по всем параметрам оказались НК нитрата калия (KNO_3).

Нитевидный кристалл нитрата калия нагревали со скоростью 1 К/мин от комнатной температуры до температуры 453⁰ К, при этом измерялась изгибная деформация. Известно, что нитрат калия существует в трех фазах [21]: фазы II устойчивой до 398⁰ К, фазы I, переход в которую завершается при 403⁰ К, и метастабильной фазы III, возникающей при охлаждении предварительно нагретого до температуры 453⁰ К нитрата калия.

Таким образом, характер зависимости изменения скорости термоизгибной деформации полностью подобен известной температурной зависимости структурных переходов в нитрате калия, а также других

сегнетоэлектрических нитратов [21], т. е. термически стимулированные структурно-поляризационные явления в сегнетоэлектриках могут быть первопричиной термоизгиба НК и десорбции N_2^+ и H_2O^+ .

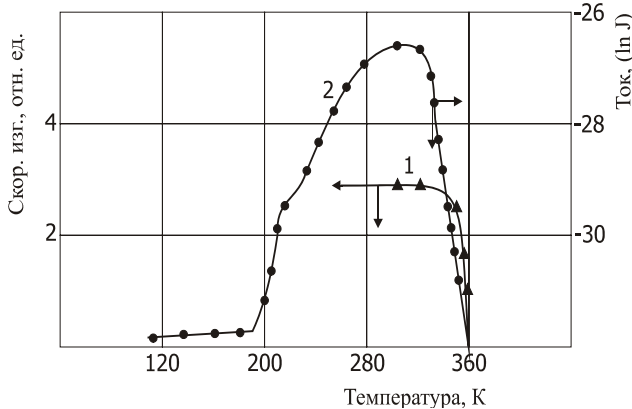


Рис. 5. Кривые скорости термоизгибной деформации (1) и токов ТРК (2) в НК β -азиде свинца

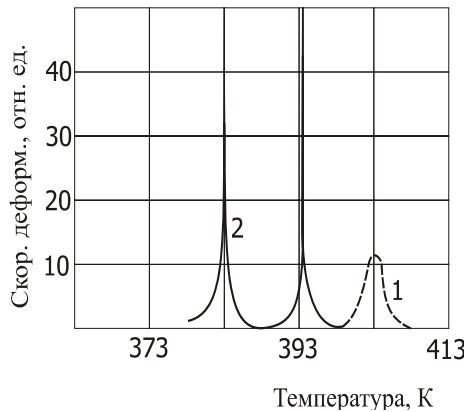


Рис. 6. Зависимость скорости изгибной деформации НК нитрата калия от температуры

4. Эффект Баркгаузена в нитевидных кристаллах β -PbN₆

Процессы поляризации и переполяризации сегнетоэлектриков, протекающие скачкообразно, называют эффектом Баркгаузена [8; 14]. Непосредственное наблюдение за доменной структурой в большой группе сегнетоэлектрических кристаллов семейства триглинсульфата свидетельствует о том, что скачки Баркгаузена обусловлены распадом монодоменного состояния, зарождением новых доменов, смыканием доменных стенок с направлением спонтанной поляризации, противоположному существующему в кристалле. Скачки Баркгаузена зависят от различных внешних факторов: температуры, излучения, скорости изменения электрического поля, освещения, давления и т. д.

Условиями наблюдения механических колебаний в НК β -PbN₆ является [8] одновременное воздействие температуры ($T = 367^0$ К) и освещения ($\lambda = 365$ нм) или электрического поля напряженностью $E \approx 10^5$ В·м⁻¹.

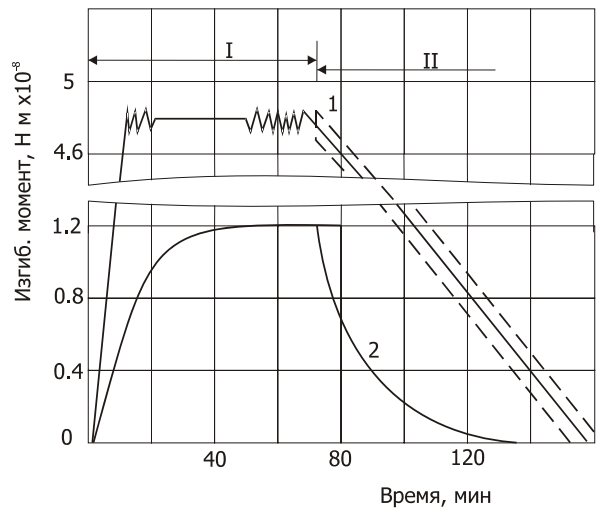


Рис. 7. Закономерности фотоизгибной деформации НК β -азиде свинца от времени облучения, температура 367^0 К: I – время облучения; II – время релаксации; 1 – направления термо- и фотоизгиба совпадают; 2 – направления термо- и фотоизгиба противоположны

На рисунке 7 изображены зависимости фотоизгибной деформации НК β -азиде свинца, предварительно прогретого до температуры 367^0 К НК β -PbN₆, от времени облучения светом длиной волны 365 нм, показаны условия возникновения автоколебаний. Автоколебания, как правило, возникают в НК, в которых направления термо- и фотоизгиба совпадают (кривая 1). При терморелаксации термофотоизогнутого НК β -PbN₆ частота автоколебаний (участок II кривой 2) изменяется от 1 Гц до 0,1 Гц при сохраняющейся амплитуде колебаний, которая показана штриховой линией.

Обнаружено два типа релаксационных кривых, которые описываются уравнением:

$$M = A \exp(B t^n), \quad (6)$$

в котором M – изгибающий момент, t – время релаксации; A , B и n – некоторые постоянные, зависящие от геометрических размеров образца (A , B) и от свойств сегнетоэлектрических доменов, при этом всегда $B < 0$, а $n < 1$ для кривой 1 и $n > 1$ для кривой 2.

Релаксационная кривая типа 1 описывается обычным диффузионным уравнением и объясняется миграцией точечных дефектов в полях упругих напряжений, аналогично «отрицательной ползучести». Коэффициент диффузии, оцененный при температуре 367^0 К, равняется $6 \cdot 10^{-15}$ м²/с, при понижении температуры до комнатной уменьшается на два порядка. Энергия активации, оцененная из кривых релаксации в области температур 300 – 370^0 К, равняется 0,6 – 0,7 эВ и совпадает с энергией активации темновой проводимости свежесинтезированных НК β -PbN₆, исчезающей при повторном нагреве. Совпадение активационных параметров этих двух процессов позволяет связать терморелаксацию с диффузией катионных вакансий или междоузельников.

Скачкообразное изменение состояния НК АТМ проявляется не только в форме скачков деформации механически нагруженных кристаллов, но и скачков

поляризации НК в сильном электрическом поле напряженностью приблизительно 10^5 В/м (рис. 8). Частота скачков меняется от 10^3 до 1 Гц и не зависит от межэлектродного расстояния.

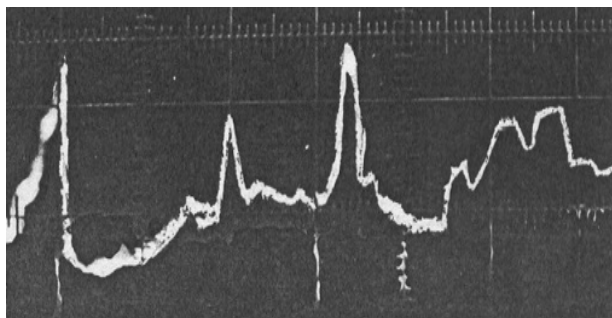


Рис. 8. Оциллограмма скачков переполаризации в НК β -азиде свинца в электрическом поле. Напряженность электрополя $E = 10^5$ В/м

Обнаружение многообразия эффекта Баркгаузена в НК АТМ имеет общезначимое значение как прямая иллюстрация кинетики переходных процессов (в том числе и процессов разложения) при различных энергетических воздействиях. Несмотря на кажущееся различие физических процессов, происходящих в этих явлениях, имеется одно общее: идет зародышеобразование, перестройка, рост и (или) движение доменов.

Механические колебательные эффекты релаксации, а также оптическая наблюдаемость отдельных доменов в НК β -PbN₆ (рис. 2.12, б) [9] позволяет считать НК «механическими» аналогами сегнетоэлектриков, получивших название сегнетоэластиков [12], т. е. в β -PbN₆ «удачно» сочетается взаимосвязь в твердом кристаллическом теле электрических, механических и тепловых свойств через образование сильных предпробивных полей поляризации с их взрывчатой чувствительностью.

Литература

1. Адамсон А. В. Физическая химия поверхностей: учебное пособие. М.: Мир, 1979. 568 с.
2. Болдырева Е. В. Обратная связь и ее влияние на кинетику и пространственное развитие гомогенных бездиффузионных реакций типа «перегруппировка в узле»: автореф. дис. ... канд. хим. наук. Новосибирск, 1988. 19 с.
3. Дистлер Г. И., Власов В. П., Герасимов Ю. М., Кобзарева С. А., Кортуква Е. И., Лебедева В. Н., Москвин В. В., Шенявская Л. А. Декорирование поверхности твердых тел. М.: Наука, 1976. 112 с.
4. Иванов Ф. И., Сарычев В. Д., Урбан Н. А. Об электрической природе инициирования детонации азид свинца при механическом воздействии // Физика горения и взрыва. 1988. № 3. С. 98 – 101.
5. Иванов Ф. И. Напряженно-деформированные и зарядовые состояния нитевидных кристаллов β -азид свинца // Известия вузов. (Серия: Черная металлургия). 1996. Т. 2. С. 62 – 68.
6. Иванов Ф. И., Лобова И. С., Назарова Г. В. Исследование сегнетоэлектрических свойств кристаллов нитрата калия и азид свинца методом индуцируемого изгиба // Изв. АН СССР. (Серия: Физика). 1990. Т. 54. № 6. С. 1180 – 1183.
7. Иванов Ф. И., Крашенинин В. И., Кузьмина Л. В. Эффекты и явления в нитевидных кристаллах азидов тяжелых металлов при действии тепла, света, электрического и магнитных полей // Известия вузов. (Серия: Физика). 2006. Т. 49. № 01. С. 96 – 103.
8. Иванов Ф. И., Захаров Ю. А., Лукин М. А. Эффект Баркгаузена в нитевидных кристаллах β -PbN₆ // Ползуновский вестник. 2004. № 4. С. 83 – 85.
9. Иванов Ф. И., Захаров Ю. А. β -азид свинца. Физико-химические свойства. Разложение: монография. Новокузнецк: НФИ КемГУ, 2010. 232 с.
10. Иванов Ф. И. Развитие представлений о механизме разложения и инициирования детонации в азиде свинца при энергетических воздействиях // Известия СО РАН. Сибирский химический журнал. 1992. № 4. С. 139 – 146.
11. Иванов Ф. И., Урбан Н. А. А. с. 1306288. МКИ⁴ 01J5/38. Способ измерения абсолютной интенсивности света в ультрафиолетовой области (СССР).
12. Лайнс М., Гласс А. Сегнетоэлектрики и родственные им материалы: Монография. М.: Мир, 1981. 736 с.
13. Лобова И. С., Иванов Ф. И., Олесюк О. В., Голодников С. В. Пат. РФ (19)RU (11)2011976 (13)C1, (51)5G01N 25/02. Способ определения температуры структурных переходов в сегнетоэлектрических материалах (Россия).
14. Рудяк В. М. Эффект Баркгаузена // Успехи физических наук. 1970. Т. 101. Вып. 3. С. 429 – 462.
15. Сухушин Ю. Н., Захаров Ю. А., Иванов Ф. И. Разложение азидов тяжелых металлов в сильном электрическом поле. Топография и некоторые макроскопические закономерности разложения монокристаллов PbN₆, AgN₃ и TiN₃ // Хим. высок. энергий. 1973. Т. 7. № 3. С. 261 – 268.
16. Франц В. Туннелирование, сопровождающееся поглощением фотонов (эффект Франца-Келдыша) // Туннельные явления в твердых телах. Гл. 15. С. 199 – 210 / под ред. Э. Бурштейна, С. Лундквиста. М.: Мир, 1973. 424 с.
17. Щечков Г. Т., Захаров Ю. А., Каплин В. А. Изучение начальной стадии термоллиза α -PbN₆ // Кинетика и катализ. 1970. Т. 11. Вып. 3. С. 623 – 627.
18. Faer H. D., Walker R. F. Energetic Materials. New York and London: Plenum Press, 1977. Vol. 1. 485 p.
19. Ivanov F. I. Elastoplastic characteristics of whiskers of heavy metal azides // Applied and Fundamental Studies/ Proceeding of the 3-rd International Academic Conference, St. Louis, Missouri, USA, 30 – 31 August. 2013. P. 32 – 36.

20. Ivanov F. I., Urban N. A. Mechanism of Photomechanical Deformation of β -lead Azide Whisker Crystals // *React. of Solids*. 1986. № 1. P. 165 – 170.

21. Kynce B., Brehat F. Ferroelectric Properties of KNO_3 Single Crystal. Application to the Detection of Thermal Radiation // *Phys. Stat. sol.* 1987. A.P.O. 4. № 2. P. 873 – 877.

Информация об авторах:

Иванов Федор Иванович – доктор химических наук, профессор, член-корреспондент Российской Академии Естественных наук, заместитель директора по научной работе Новокузнецкого института (филиала) КемГУ, 8-906-984-90-96.

Feodor I. Ivanov – Doctor of Chemistry, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Natural Sciences, Deputy Director for Science at Novokuznetsk Institute (branch) of Kemerovo State University.

Исакова Елена Васильевна – кандидат философских наук, доцент Новокузнецкого института (филиала) КемГУ, 8-905-995-51-83.

Elena V. Isakova – Candidate of Philosophy, Assistant Professor at Novokuznetsk Institute (branch) of Kemerovo State University.

Статья поступила в редколлегию 23.09.2014 г.