

# ЭФФЕКТ БАРКГАУЗЕНА В НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛАХ $\beta$ -PbN<sub>6</sub>

Ф.И. Иванов, Ю.А. Захаров, М.А. Лукин

Обсуждаются, с точки зрения сегнетоэлектрической природы нитевидных кристаллов (НК)  $\beta$ -азида свинца ( $\beta$ -PbN<sub>6</sub>), экспериментальные результаты по скачкообразному протеканию в них процессов темновой проводимости при деформации, релаксационных процессов после фото - термостимулированного изгиба, поляризационных процессов в сильном электрическом поле. Приведена схема обнаруженных авторами эффектов и явлений при действии тепла, деформации и электрического поля в НК  $\beta$ -PbN<sub>6</sub> самоорганизующая и объясняющая механизм высокой взрывчатой чувствительности соединения к внешним воздействиям.

Поляризация и переполяризация сегнетоэлектриков сопровождается скачкообразными процессами изменения поляризации (эффектом Баркгаузена) [1]. Непосредственное наблюдение за доменной структурой в большой группе сегнетоэлектрических кристаллов семейства триглинсульфата свидетельствует о том, что появляющиеся скачки переполяризации (скачки Баркгаузена) обусловлены распадом монодоменного состояния, зарождением новых доменов, смыканием доменных стенок с направлением спонтанной поляризации, противоположным существующему в кристалле [2-6]. Скачки Баркгаузена зависят от различных внешних факторов: температуры, излучения, скорости изменения электрического поля, освещения, давления и т.д.

Исследования, проведенные В.М. Рудяком и его сотрудниками [2-6], положили начало подробному изучению эффекта Баркгаузена в сегнетоэлектриках.



Рис. 1. Изменение темновой проводимости НК  $\beta$ -азида свинца и азида серебра при деформации: 1 – НК  $\beta$ -азида свинца, скорость деформации  $3 \cdot 10^{-6}$  Н/с; 2 – НК азида серебра, скорость деформации

В работах [6-8] было предложено объяснить скачкообразное протекание тока в НК при растяжении (рис. 1) и скачкообразную колебательную релаксацию термо- и фото-

стимулированного изгиба, используя представления о эффекте Баркгаузена в сегнетоэлектриках [13].

Условиями наблюдения механических колебаний в НК  $\beta$ -PbN<sub>6</sub> является одновременное воздействие температуры ( $T=367$  К) и освещения ( $\lambda=365$  нм) или электрического поля напряженностью  $E \approx 10^5$  В·м<sup>-1</sup>.

На рис. 2 на зависимости фотоизгибной деформации, предварительно прогретого до температуры 367 К НК  $\beta$ -PbN<sub>6</sub>, 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 2).

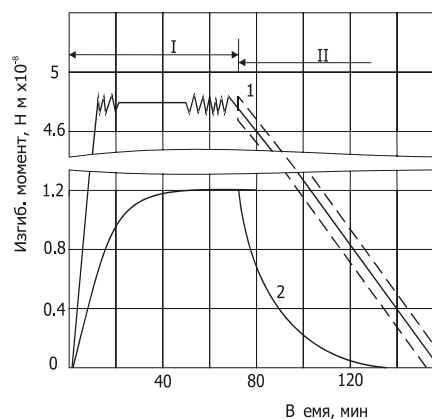


Рис. 2. Закономерности фотоизгибной деформации НК  $\beta$ -азида свинца от времени облучения, температура 367 К: I – время облучения; II – время релаксации; 1 – направления термо- и фотоизгиба совпадают; 2 – направления термо- и фотоизгиба противоположны

При терморелаксации термофотоизогнутого НК  $\beta$ -PbN<sub>6</sub> 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

$$M = A \exp(B t^n), \quad (1)$$

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 понижается на два порядка. Энергия активации диффузии, оцененная из кривых релаксации в области температур 300–370 К, равняется 0,6–0,7 эВ, что совпадает с энергией активации темновой «отрицательной ползучести» обнаруженной в НК NaCl Л.Б. Зуевым [9-10]. Коэффициент диффузии равный  $6 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2/\text{с}$  при температуре 367 К, при комнатной температуре проводимости свежесинтезированных НК  $\beta\text{-PbN}_6$ , исчезающей при повторном нагреве. Совпадение активационных параметров этих двух процессов указывает на общую их природу и позволяет связать терморелаксацию с диффузией катионных вакансий или междоузельников. В рамках данной модели скопление катионных вакансий в сжатой области и междоузельников в области расширения, приводящее к пространственному разделению собственных заряженных точечных дефектов, могут быть поняты результаты по изгибу НК при релаксации в обратную сторону. Предлагаемая модель не противоречит обсужденному ранее диффузионно-дрейфовому механизму образования доменов [7].

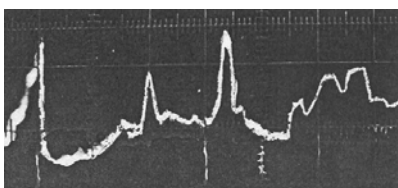


Рис. 3. Оциллограмма скачков переполаризации в НК  $\beta$ -азида свинца в электрическом поле. Напряженность электрополя  $E = 10^5 \text{ В/м}$

Скачкообразное изменение состояния НК АТМ проявляется не только в форме скачков деформации механически нагруженных кристаллов, но и скачков поляризации при помещении НК в сильное электрическое поле напряженностью приблизительно  $10^5 \text{ В/м}$

(рис. 3). Частота скачков меняется от  $10^3$  до 1 Гц и не зависит от межэлектродного расстояния.

Обнаружение многообразия эффекта Баркгаузена в НК АТМ имеет общезначимое значение как прямая иллюстрация кинетики переходных самоорганизующихся процессов 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 [2].

Механизм скачка легко понять, рассмотрев распад монодоменного состояния сегнетоэлектрика или сегнетоэластика при изменении приложенного поля или механического напряжения. Возникают новые домены с направлением спонтанной поляризации или деформации, противоположным тому, которое существовало в кристалле. Скачки, появившиеся при этом, следует считать результатом зародышеобразования. Однако в дальнейшем, когда в кристалле уже имеются домены с различным направлением спонтанной поляризации (деформации), изменение электрического поля (напряжения) неизбежно ведет за собой смещение доменных стенок. В этом случае наряду с зародышеобразованием имеет место механизм скачка, обусловленный динамикой движения доменной стенки благодаря наличию неоднородностей, внутренних напряжений, непостоянства градиента поверхностной плотности энергии граничного слоя, фазовых переходов в непосредственной близости к точке Кюри и т. д.

Механические колебательные эффекты релаксации, а также оптическая наблюдаемость отдельных доменов в НК  $\beta\text{-PbN}_6$  (рис. 4 б) позволяет считать НК «механическими» аналогами сегнетоэлектриков, получивших название сегнетоэластиков [11], т. е. в данном соединении,  $\beta\text{-PbN}_6$  «удачно» сочетается взаимосвязь в твердом кристаллическом теле электрических, механических и тепловых свойств.

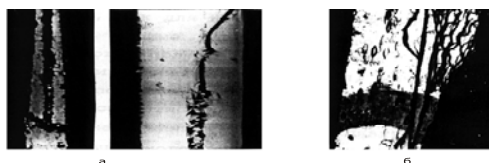


Рис. 4 Полосы дислокационного скольжения в НК  $\beta$ -азида свинца: а – единичные полосы скольжения  $\times 200$ ; б – система полос скольжения, наблюдаемая в поляризованном свете  $\times 250$

Состояние кристалла принято описывать интенсивными и экстенсивными параметрами (обобщенными термодинамическими силами и обобщенными деформациями, термодинамическими координатами, соответственно). К интенсивным параметрам относятся внешние воздействия, такие как электрическое поле  $E$ , температура  $T$ , механическое напряжение  $\sigma$ . Соответствующие внутренние условия представляют собой экстенсивные параметры – индукция  $D$ , энтропия  $S$ , деформация  $\xi$ .

Взаимосвязь между параметрами представляется в форме матрицы термодинамических потенциалов [8], или в виде схемы Д Ная [12]. Принимая во внимание наличие и взаимосвязь обнаруженных эффектов и явлений, возникающих в кристаллах азидов свинца при действии тепла, деформации и электрических полей, мы получаем стройную схему взаимодействия тепловых, электрических и механических явлений (рис. 5). Любая обобщенная термодинамическая сила, приложенная к кристаллу, вызывает, вообще говоря, изменение всех его обобщенных термодинамических коэффициентов, т. е. при рассмотрении механизма инициирования разложения и детонации различные причины могут быть сведены к одной. Этой причиной с учетом сегнетоэлектрических свойств НК  $\beta$ -PbN<sub>6</sub> является ионизация решетки в сильном электрическом поле. Условия для ионизации возникают при суперпозиции напряженности электрического поля домена и поля поляризации, возникающего при энергетическом воздействии.

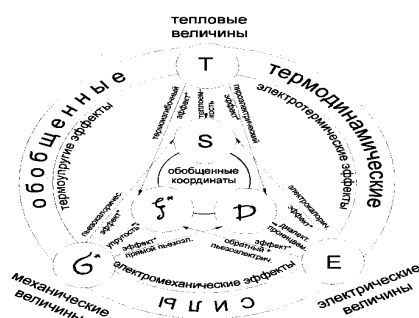


Рис. 5. Взаимосвязь эффектов и явлений при действии тепла, деформации и электрического поля в НК  $\beta$ -азидов свинца, \* – эффекты и явления, обнаруженные впервые

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рудяк В.М. Эффект Баркгаузена / Рудяк В.М. //Успехи физических наук. –1970. –Т.101, вып. 3. – С.429-462.
2. Рудяк В.М. Эффект Баркгаузена в нелинейных кристаллах / Рудяк В.М.//Изв. АН СССР. Сер. физ. –1981. –Т.45, № 9. –С.1586-1606.
3. Афонская И.А. Исследование устойчивости поляризованного состояния кристаллов примесного триглицинсульфата с помощью теплового эффекта Баркгаузена / Афонская И.А., Большакова Н.Н., Корина Р.В. // Изв. АН СССР. Сер. физ. – 1981. –Т.45, № 9. – С.1687-1690.
4. Богомолов А.А. Эффект Баркгаузена в монокристаллах сегнетоэлектрика-полупроводника сульфоиодида сурьмы / Богомолов А.А., Иванов В.В., Рудяк В.М.// Изв. АН СССР. Сер. физ. – 1981. –Т.45, № 9. – С.1676-1682.
5. Рудяк В.М. Эффект Баркгаузена как метод исследования сегнетоэлектрических кристаллов / Рудяк В.М. //Изв. АН СССР. Сер. физ. –1967. –Т.31, № 7. – С.1171-1174.
6. Влияние ультрафиолетового облучения на пластичность азидов тяжелых металлов / Иванов Ф.И., Урбан Н.А., Белоконова Г.А., Олесюк О.В. //Тез.докл. 4 Всесоюз. совещ. «Воздействие ионизирующего излучения и света на гетерогенные системы». КемГУ. Кемерово. 3-6 июня 1986. – Кемерово, 1986. – С.103.
7. Иванов Ф.И. Напряженно - деформированные и зарядовые состояния нитевидных кристаллов  $\beta$ -азидов свинца/Иванов Ф.И. //Изв. ВУЗов, Сер. черн. металлургия. –1996. – Т.2. – С.62-68.
8. Иванов Ф.И. Скачки Баркгаузена при терморелаксации фотодеформированных нитевидных кристаллов  $\beta$ -азидов свинца / Иванов Ф.И., Лобова Н.С., Знайкина О.П. //Тез. докл. 4 Международной конференции «Прочность и пластичность материалов в условиях внешних энергетических воздействий». СибГИУ. Новокузнецк. 11-16 сент.1995. –Новокузнецк, 1995. –С.87-88.
9. Зуев Л.Б. Физика электропластичности щелочно – галлоидных кристаллов: Монография / Л.Б. Зуев. – Новосибирск.: Наука, 1990. –120 с.
10. Деформация нитевидных кристаллов NaCl при электрическом и механическом напряжении / Зуев Л.Б., Мальцев В.Д., Данилов В.И., Нарожный А.Н. //ФТТ. –1975. –Т.17, № 2. – С.501-505.
11. Струков Б.А. Физические основы сегнетоэлектрических явлений в кристаллах: Учебное пособие / Струков Б.А., Леванюк А.П.–М.: Наука. – 1983. – 240 с.
12. Най Д. Физические свойства кристаллов: Монография / Д. Най.–М.: Мир. –1970. –316 с.
13. Лайнс М. Сегнетоэлектрики и родственные им материалы: Монография /Лайнс М., Гласс А. – М.: Мир, 1981. –736 с.