

РАЗДЕЛ 1. ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 541.124; 541.14; 541.17; 544.22.022; 544.431.124; 644.3.03

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.02.001

ЗАРЯДОВЫЕ СОСТОЯНИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РЕЛЬЕФ ПОВЕРХНОСТИ В АЗИДАХ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

Фёдор Иванович Иванов^{1†}, Юрий Александрович Захаров², Елена Васильевна Исакова³

^{1, 3} Кузбасский гуманитарно-педагогический институт ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», ул. Циолковского, 23, 654041, Новокузнецк, Россия

² Институт углехимии и химического материаловедения Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН, пр. Советский, 18, 650000, Кемерово, Россия

¹ ifi3@yandex.ru[†]

² zaharov@kemsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8141-7873>

³ iselva@yandex.ru

Аннотация. В работе с использованием методов избирательной кристаллизации (декорирования) и оптической микроспектрофотометрии, наблюдением эффекта Келдыша-Франца в нитевидных кристаллах азидов тяжелых металлов (β - PbN_6 , AgN_3), исследована топография распределения зарядовых состояний, доменов сильного поля (ДСП), и обсуждены возможные механизмы их образования. Использование методик декорирования на разных уровнях разрешения, выявляемых с помощью оптической и электронной микроскопии, позволило наблюдать электрически активную информационную структуру в азидах свинца и серебра, в которой локализуются процессы, протекающие при энергетических воздействиях радиации, электрического поля и температуры. Картины декорирования в НК АТМ позволили впервые визуализировать сложные элементы электрического микро- и макрорельефа и установить связь электрического рельефа с полями упругих напряжений у дислокаций или в области полос скольжения и оценить напряженность электрических полей создаваемых в этих структурах. Обосновано и доказано существование диффузионно-дрейфового механизма формирования ДСП связанного с разделением заряженных точечных дефектов (вакансий, междоузельных атомов) в полях упругих напряжений, создаваемых структурными дефектами (дислокациями, полосами скольжения или зародышами новой фазы). Исходя из диффузионно-дрейфового механизма формирования доменной электрической структуры в НК β - PbN_6 вокруг дислокаций и полос скольжения, произведена оценка концентрации ионов Pb^+ или Pb^{2+} в области пространственного заряда краевой дислокации и величины напряженности электрического поля $E \approx 10^6$ В/м в ДСП. Оценена объемная концентрация заряженных частиц из теории Дебая-Хюккеля по формуле $L_D = \sqrt{\epsilon\epsilon_0 kT / (2q_i^2 n)}$, в которой L_D – Дебаевская длина экранирования (определяемая экспериментально), дает величину приблизительно 10^{22} м⁻³, что соответствует поверхностной плотности заряда 10^{14} м⁻², наблюдаемой по картинам декорирования. Наличие ДСП подтверждает сегнетоэлектрическую природу азидов свинца и серебра.

Ключевые слова: нитевидные кристаллы, азиды свинца и серебра, декорирование, зарядовые состояния, домены сильного поля, дислокации, полосы скольжения, сегнетоэлектричество.

Для цитирования: Иванов Ф.И., Захаров Ю.А., Исакова Е.В. Зарядовые состояния и электрический рельеф поверхности в азидах тяжелых металлов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2022. Т. 19, № 2. С. 149–156. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.02.001.

Original article

CHARGE STATES AND ELECTRIC SURFACE RELIEF IN HEAVY METAL AZIDES

Fedor I. Ivanov^{1†}, Yuri A. Zakharov², Elena V. Isakova³

^{1, 3} Kuzbass Humanitarian Pedagogical Institute of Kemerovo State University, Tsiolkovsky Str., 23, Novokuznetsk, 654041, Russia

² Institute of Coal Chemistry and Chemical Materials Science of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry SB RAS, Sovetsky Pr., 18, Kemerovo, 650000, Russia

[†] ifi3@yandex.ru

² zaharov@kemsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8141-7873>

³ iselva@yandex.ru

Abstract. In the work using the methods of selective crystallization (decoration) and optical microspectrometry, the observation of the Keldysh-Franz effect in filamentous crystals of heavy metal azides (β -PbN₆, AgN₃), the topography of the distribution of charge conditions, strong field domains (CHIP) was investigated, and the possible mechanisms of their formation were discussed. The use of decorating techniques at different levels of resolution detected using optical and electron microscopy made it possible to visualize an electrically active information structure in lead and silver azides, in which the processes occurring under the energy effects of radiation, electric field and temperature are localized. Paintings of decoration in the ATM NC made it possible for the first time to visualize complex elements of the electrical micro- and macro-relief and to establish a connection between the electric relief and the elastic voltage fields at dislocations or in the region of sliding bands. The existence of a diffusion-drift mechanism for the formation of chipboard associated with the separation of charged point defects (vacancies, internode atoms) in fields of elastic stresses created by structural defects (dislocations, sliding bands or embryos of a new phase) has been substantiated and proved. Based on the diffusion-drift mechanism of formation of the blast furnace electrical structure in NK β -PbN₆ around dislocations and sliding bands), the concentration of Pb⁺ or Pb²⁺ ions in the region of the spatial charge of the marginal dislocation and the magnitude of the electric field strength $E \approx 10^6$ V/m in chipboard. The volumetric concentration of charged particles from the Debye-Hückel theory is estimated using the formula $L_D = \sqrt{\epsilon\epsilon_0 kT / (2q_i^2 n)}$ in which L_D is the Debaev shielding length (determined experimentally), are estimated, gives a value of approximately 10^{22} m⁻³, which corresponds to a surface charge density of 10^{14} m⁻² observed in the decoration paintings. The presence of chipboard confirms the ferroelectric nature of lead and silver azides.

Keywords: filamentous crystals, lead and silver azides, decoration, charge conditions, strong field domains, dislocations, sliding bands, ferroelectricity.

For citation: Ivanov, F. I., Zakharov, Yu. A. & Isakova, E. V. (2022). Charge states and electric surface relief in heavy metal azides. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 2(19), 149–156. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.02.001.

Введение

Метод избирательной кристаллизации декорирующих веществ для визуализации электрически активных элементов поверхности, нашел обоснованное экспериментальное и теоретическое подтверждение [1, 2]. В методах декорирования основными источниками информации о пространственном распределении активных центров являются картины ранних стадий кристаллизации, наблюдаемые с помощью электронной или оптической микроскопии. На более поздних стадиях осаждения – стадиях миграции и коалесценции декорирующих микрокристаллов – картины декорирования дают

представление об электрическом рельефе поверхности [1].

В наших работах методы декорирования впервые применены для исследования электрического рельефа поверхности НК азидов серебра, свинца и таллия. Тождественность зарядовых структур, выявляемых методами декорирования, с доменами сильного поля [3, 4], создаваемыми внешним электрическим полем в приэлектродных областях или на полосах скольжения, нами была доказана путем прямого наблюдения в этих областях эффекта Келдыша-Франца [5], заключающегося в сдвиге края собственного поглощения в сильном электрическом поле в длинноволновую область. Оценка

напряженности электрического поля проведена по формуле [4]

$$E = \frac{-4\sqrt{2m^*}(W_{33} - \hbar\omega)^{3/2}}{3e\hbar n \left[\frac{1 - 10^{-\Delta D}}{K_0} \right]}, \quad (1)$$

где $m^* = 0.5m_0$ – эффективная масса поглощающих свет частиц, m_0 – масса покоя электрона, $W_{33} = 3,55$ эВ – ширина запрещенной зоны кристалла, ω – круговая частота падающего света, e – заряд электрона, $\hbar = h/(2\pi)$ – постоянная Дирака, $\Delta D = D_2 - D_1$ – изменение оптической плотности для длины волны $\lambda = 390$ нм, находится из графика (рис.2),

$$K_0 = \frac{4\sqrt{\hbar\omega(W_{33} - \hbar\omega)}}{\hbar\omega}.$$

Расчет напряженности электрического поля в области ДСП показал, что значение ее на 2÷3 порядка выше средней напряженности по кристаллу.

Близкие по порядку величины значения напряженности электрического поля в области ДСП ($10^7 \div 10^9$ В/м) получаются из решения уравнения Пуассона [3] для разноименно заряженной границы домена. При этом плотность зарядов определяется визуалью из концентрации декорирующих центров и рассмотрения траектории заряженных декорирующих частиц, движущихся в поле периодического потенциала ДСП [3]. Как для первого, так и для второго случаев концентрация заряженных частиц на единицу площади поверхности составила $10^{14} \div 10^{16} \text{ м}^{-2}$.

Методика декорирования и зарядовые структуры в нитевидных кристаллах $\beta\text{-PbN}_6$

В качестве декорирующих агентов поверхности $\beta\text{-PbN}_6$ использовались золото, серебро, хлористое серебро и антрахинон.

Декорирование антрахиноном осуществлялось на воздухе при температуре сублимации 400 К с последующим осаждением его на холодную поверхность кристалла. Наиболее макроскопического пространственного заряда в НК $\beta\text{-PbN}_6$ при их выдержке в электрическом поле (рис.1).

Тонкие элементы электрического рельефа поверхности и объема были выявлены при декорировании золотом, серебром и хлористым серебром в вакууме 10^{-7} Па. Напыление прово-

дилось на вакуумном poste ВУП-2К. Используемые материалы были марки ОХЧ. Распыление проводилось за счет электрического разогрева вольфрамового нагревателя в виде чаши из проволоки диаметром $0,5 \cdot 10^{-3}$ м, через которую пропускался ток 15 А при напряжении 12 В. Навески декорирующего материала подбирались опытным путем. Предварительно или одновременно с напылением НК подогревался до температуры $373 \div 393$ К в течение нескольких секунд за счет разогрева от дополнительного нагревателя. Контроль за температурой нагрева НК осуществлялся встроенной в керамический держатель хромель-копелевой термопарой, соединенной с потенциометром КСП-4. Общее время нагрева НК не превышало 10 с. Время напыления декорирующего материала 3÷5 с. После декорирования поверхности НК на нее напылялась обычная углеродная реплика толщиной $15 \div 20$ нм. НК с репликой растворялся в соответствующем растворителе. Реплика отмывалась в дистиллированной воде и просматривалась на электронном микроскопе.

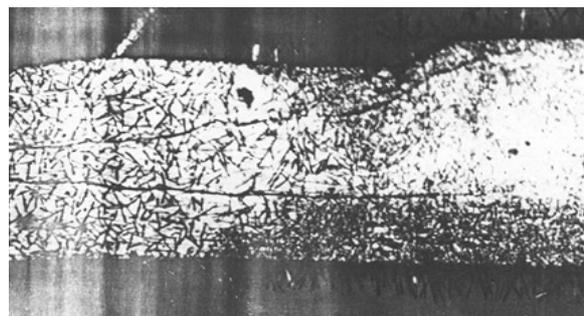


Рис.1. Поверхность НК β -азид свинца, декорированная антрахиноном в электрическом поле

Fig.1. Lead azide surface decorated with anthraquinone in an electric field

Использование декорирования в вакууме и электронной микроскопии позволили выявить тонкие элементы электрического рельефа не только поверхности, но и объема, связанные с пространственными зарядами, локализованными в полях упругих напряжений как в области дислокационных полос скольжения (рис.2), так и у отдельных дислокаций (рис.3). Ориентация плоскостей скольжения, выявляемая методом декорирования (рис.4) и методом ямок травления, идентичны [001], [011], [010], а концентрация и топография распределения дислокаций коррелирует с плотностью зарядовых структур.

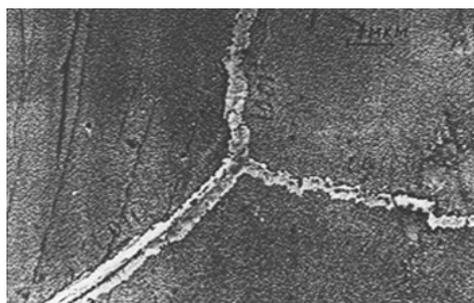


Рис.2. Декорированные полосы скольжения на поверхности [001] НК β -азиды свинца после выдержки в электрическом поле

Fig.2. Decorated sliding strips on the surface [001] of NK β -azide of lead after exposure in an electric field

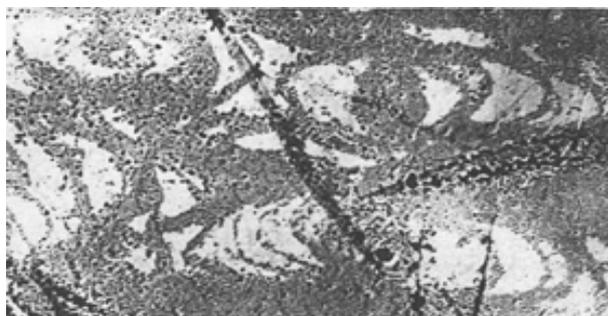


Рис.3. Области пространственного заряда, выявляемые у отдельных дислокаций методом декорирования золотом на поверхности [100] НК β -азиды свинца. Увеличение в 14250 раз

Fig.3. Areas of spatial charge revealed in individual dislocations by the method of decorating with gold on the surface [100] of NK β -azide of lead. An increase of 14250 times

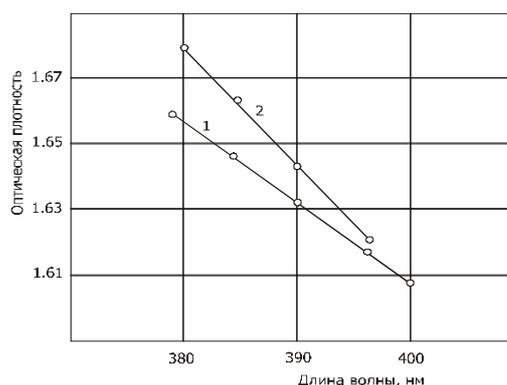


Рис.4. Сдвиг границы спектра собственного поглощения в НК β -азиды свинца в электрическом поле: 1 – НК без поля; 2 – в электрическом поле напряженностью 10^5 В/м

Fig.4. Shift of the boundary of the spectrum of proper absorption in NK β -azide of lead in an electric field: 1 – NK without field; 2 – in an electric field with a voltage of 10^5 V/m

Важным следствием наличия электрически активного рельефа реальной поверхности НК АТМ являются дальнедействующие эффекты, в которых проявляется поверхностный характер объемных явлений. Следствием поверхностного характера объемных явлений является обнаружение методами декорирования золотом и серебром в НК β -PbN₆ [6] источников типа Франка-Рида или Бардина-Херринга в плоскости [100], эффективно взаимодействующих с точечными дефектами в кристалле. Дальнедействующее влияние электрически активных элементов объема кристалла осуществляется, как это следует из рассмотренного эксперимента, через граничный слой по поляризационному механизму и несет информацию о зарядовых состояниях в объеме. Дистлером И.Г. и др. [1] было показано, что расстояния между декорирующими частицами в группировках на внешней стороне граничного слоя имеют тот же порядок величины, как и расстояние между декорирующими частицами в группировках, возникших непосредственно на поверхности или в объеме, т.е. дальнедействующая передача структурной информации происходит линейно.

Копирование электрической структуры твердых тел с помощью граничных слоев может быть осуществлено на разных уровнях, в том числе и на элементарном уровне точечных дефектов. Так, в работе [7] Баймаханов А., Лущик Ч.Б. и др., изучая топографию радиационных дефектов, возникающих при распаде электронных возбуждений в KCl и KBr, методами декорирования показали, что образование дефектов происходит статистически равномерно по объему. В НК β -PbN₆ избирательная кристаллизация золота происходит и на более мелких активных центрах и их скоплениях, как это представлено на рис.5. Хаотические скопления золота на поверхности недеформированного НК β -PbN₆ сменяются в НК, подвергнутом одноосному растяжению, их упорядочением в направлении растяжения. Плотность таких продольных упорядочений на единицу длины составляет 40 мкм^{-1} , при поверхностной плотности центров кристаллизации $(3,4-17,0) \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$. Действительная концентрация активных центров, связанных с точечными дефектами, может превосходить наблюдаемую, поскольку кристаллизация происходит на нескольких близко расположенных активных центрах, образующихся по механизму поляризационных мостиков, предложенному в работе [1]. Выходы дислокаций в полосе скольжения являются местами, где рост зародышей золота происходит наиболее интенсивно (рис.5).

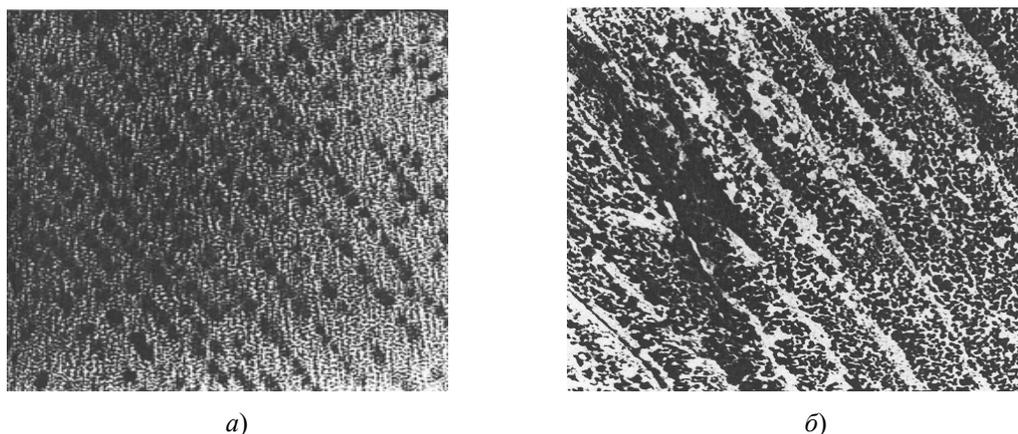


Рис.5. Декорирование золотом поверхности [100] НК β -азида свинца, деформированных одноосным растяжением в направлении [010]: *а* – свежесформированные НК; *б* – НК, состаренные 7 суток. Увеличение в 20550 раз

Fig.5. Decoration with gold of the surface [100] of NK β -azide of lead, deformed by uniaxial stretching in the direction [010]: *a* – freshly deformed NK; *b* – NK, aged 7 days. Magnification by 20550 times

Природа зарядовых состояний и механизм образования доменов сильного поля в азидах тяжелых металлов

Исследование картин декорирования в НК β -PbN₆ позволило впервые визуализировать сложные элементы электрического микро- и макрорельефа [5] и установить связь электрического рельефа с полями упругих напряжений у дислокаций или в области полос скольжения (см. рис.3, 5). Светлые отдекорированные области на фотографии соответствуют положительному пространственно закрепленному заряду, темные – отрицательному, т.е. даже в отсутствие электрического поля кристаллы β -PbN₆ представляют собой систему электрически заряженных доменов, охватывающих всю толщину кристалла.

Механизмы образования таких доменов могут быть различными. Диффузионно-дрейфовый механизм связан с разделением заряженных точечных дефектов (вакансий, междоузельных атомов) в полях упругих напряжений, создаваемых структурными дефектами (дислокациями, полосами скольжения или зародышами новой фазы). Существование данного механизма можно считать установленным [3], так как при декорировании свежей полосы скольжения (рис.5*а*) пространственного разделения зарядов не наблюдается в отличие от состаренных кристаллов β -PbN₆ (рис.5*б*).

Не исключена возможность спонтанной избирательной поляризации областей кристаллов β -PbN₆ по одному из механизмов [8]. Ряд обна-

руженных эффектов, связанных с проявлением пьезоэлектричества [9], пиротоков, а также электрокалорического эффекта [10], свидетельствует в пользу сегнетоэлектрической природы кристаллов β -PbN₆ [15].

Исходя из диффузионно-дрейфового механизма формирования доменной электрической структуры в НК β -PbN₆ вокруг дислокаций и полос скольжения, а также топографических особенностей образования зародышей металлического свинца в области положительного заряда [3], указывающих на обогащенность областей ионами свинца Pb_i²⁺ или Pb⁺, произведена оценка концентрации этих ионов в области пространственного заряда краевой дислокации.

Энергия упругого взаимодействия атома или иона с дислокацией краевого типа определяется выражением [11]

$$W_{y.b} = \frac{4}{3} \frac{1+\nu}{1-\nu} \mu b \xi r_0 \frac{3 \sin \alpha}{r}, \quad (2)$$

где ν – коэффициент Пуассона (для хрупких тел $\nu = 0,2$ [11]), μ – модуль сдвига, равный примерно 10^{10} Н/м² [12]; b – вектор Бюргерса, принимаемый равным минимальному расстоянию между атомами в кристаллической решетке β -PbN₆, $b = 5 \cdot 10^{-10}$ м [13]; ξ – дилатация; r_0 – радиус растворенного атома в кристалле; α – угловая координата; r – расстояние от ядра дислокации.

Максимальное значение энергии упругого взаимодействия, равное приблизительно 2 эВ, найдем, принимая $b \approx r_0 \approx r$, $\nu = 0,2$, $\xi = 0,1$, $\sin \alpha = 1$. Поскольку формула (2), получаемая из

теории упругости, только качественно описывает состояние вблизи ядра дислокаций, результат, вероятно, завышен примерно в два раза. Тем не менее, если энергию взаимодействия надо учитывать для определения соответствующего дрейфового члена в диффузионном уравнении, учет угловой зависимости совершенно не сказывается на получающейся кинетике. Следовательно, размерное взаимодействие можно представить упрощенным выражением

$$W_{y.b} = -\frac{B}{r}, \quad (3)$$

где B – некоторая усредненная величина.

Энергия взаимодействия дислокации с внедренным атомом линейно уменьшается с ростом расстояния, при некотором расстоянии L она будет сопоставима с энергией теплового движения kT , и возможность сегрегации внедренных атомов размывается тепловым движением. Расстояние L изменяется с учетом анизотропии постоянных решетки β -PbN₆ от 10^{-8} до 10^{-7} м. Расчетное максимальное значение L совпадает с минимальным значением наблюдаемых областей зарядовой гетерогенности (доменов). Существование заряженных доменов у отдельных дислокаций или в полосе дислокационного скольжения размерами примерно 10^{-6} м может быть объяснено либо суперпозицией упругих полей отдельных дислокаций, либо дополнительным электростатическим притяжением поля нарушенных или ненасыщенных связей в ядре дислокации, энергия которого также убывает обратно пропорционально расстоянию [11]. Существование отрицательного заряда в ядре дислокации непосред-

ственно следует из наблюдения картин декорирования, декорируются выходы дислокаций на плоскость [100] НК β -PbN₆. Известно [1], что преимущественная кристаллизация при декорировании протекает на отрицательно заряженных дефектах.

Оценка объемной концентрации заряженных частиц из теории Дебая-Хюккеля [14] по формуле

$$L_D = \sqrt{\frac{\epsilon\epsilon_0 kT}{2q_i^2 n}}, \quad (4)$$

в которой L_D – Дебаевская длина экранирования, дает величину приблизительно 10^{22} м⁻³, соответствующую поверхностной плотности заряда 10^{14} м⁻², близкую наблюдаемой по картинкам декорирования, и величину напряженности электрического поля $E \approx 10^6$ В/м.

Важным следствием наличия электрически активного рельефа реальной поверхности НК β -PbN₆ являются дальнедействующие эффекты, в которых проявляется объемный характер поверхностных явлений. Уже упомянутая возможность наблюдения в объеме НК β -PbN₆ источника типа Франка-Рида методом декорирования [12] не ограничивается азидом свинца. В НК азид серебра (рис.6), также удастся наблюдать методиками декорирования за положительными осевыми доменами, ориентированными в направлении роста. Плотность дислокаций в данном направлении, определяемая по методикам [2], совпадает с плотностью областей декорирования, т. е. наблюдается при декорировании копирование электрической объемной дислокационной структуры НК АТМ.

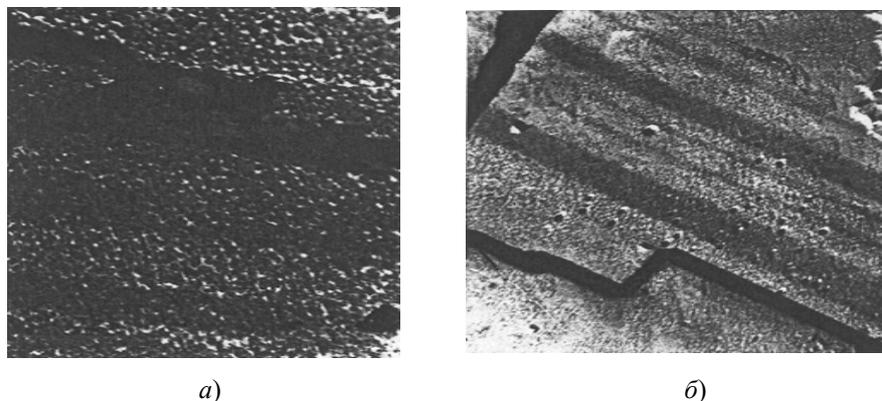


Рис.6. Декорирование золотом НК азид серебра: *a* – положительные осевые домены; *б* – осевые отрицательные домены в деформированных НК. Увеличение в 14100 раз

Fig.6. Silver azide NDT decoration with gold: *a* – positive axial domains; *b* – axial negative domains in deformed NDT. 14100x magnification

Выводы

1. Использование методик декорирования на разных уровнях разрешения позволило визуализировать электрически активную информационную структуру АТМ, в которой локализируются процессы, протекающие при энергетических воздействиях радиации, электрического поля и температуры.

2. Наличие ДСП [15] с совокупностью всего круга явлений, связанных с изменением поляризации кристаллов при изменении температуры [10], пьезополяризации позволило подтвердить сегнетоэлектрическую природу АТМ. Изучению пьезоэлектрического эффекта [9, 16] и его роли в процессах инициирования детонации β -PbN₆ нами было уделено особое внимание.

Список литературы

1. Дистлер Г.И., Власов В.П., Герасимов Ю.М. и др. Декорирование поверхности твердых тел. М.: Наука, 1975. 112 с.

2. Зуев Л.Б., Иванов Ф.И., Лукин М.А., Назарова Г.В. Исследование дислокационной структуры в нитевидных кристаллах азидов свинца // Физика полупроводников и микроэлектроника. 1977. № 4. С. 45–48.

3. Келдыш Л.В. О влиянии сильного электрического поля на оптические характеристики непроводящих кристаллов // ЖЭТФ. 1958. Т. 34, Вып. 5. С. 1138–1141.

4. Франц В. Туннелирование, сопровождающееся поглощением фотонов (эффект Франца-Келдыша). М.: Мир, 1973. 424 с.

5. Иванов Ф.И., Сарычев В.Д., Урбан Н.А. Об электрической природе инициирования детонации азидов свинца при механическом воздействии // Физика горения и взрыва. 1988. № 3. С. 98–101.

6. Фридель Ж. Дислокации: Монография. М.: Мир, 1967. 643 с.

7. Баймаханов А., Ыыги Х.Р., Лущик Ч.Б. Электронно-микроскопическое исследование дефектов, создаваемых в КС1 и КВг при распаде электронных возбуждений // ФТТ. 1986. Т. 28, Вып. 3. С. 684–691.

8. Сиротин Ю.И., Шаскольская М.П. Основы кристаллофизики: Монография. М.: Наука, 1979. 640 с.

9. Иванов Ф.И., Лукин М.А., Сарычев В.Д., Зуев Л.Б. Об электроимпульсном инициировании детонации в поликристаллических взрыв-

чатых веществах, обладающих пьезоэлектрическими свойствами // Мат. 1 Всесоюз. симп. по макроскоп. кинетике и хим. газодинамике. Алма-Ата: АлмГУ, 1984. Т. 2, Ч. 1. С. 17–18.

10. Иванов Ф.И., Лобова И.С., Назарова Г.В. Исследование сегнетоэлектрических свойств кристаллов нитрата калия и азидов свинца методом индуцируемого изгиба // Изв. АН СССР, Сер. физ. 1990. Т. 54, № 6. С. 1180–1183.

11. Хирт Д., Лоте И. Теория дислокаций: Монография. М.: Атомиздат, 1972. 599 с.

12. Иванов Ф.И. О механизме электро- и фотопластического эффектов в нитевидных кристаллах азидов серебра и свинца // Известия СО РАН, Сибирский химический журнал. 1992. № 5. С. 125–133.

13. Azaroff L.V. Structural Investigation of Lead Azide // Z. fur Kristallographic. 1956. Bd. 107. S. 362–369.

14. Лидьярд А. Ионная проводимость кристаллов: Монография. М.: ИЛ, 1962. 302 с.

15. Иванов Ф.И., Захаров Ю.А., Исакова Е.В. Сегнетоэлектрические свойства и механизм инициирования взрыва кристаллического азидов свинца при энергетических воздействиях // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2018. Т. 15, № 2. С. 294–302.

16. Иванов Ф.И., Захаров Ю.А., Исакова Е.В. Особенности разложения нитевидных кристаллов азидов тяжелых металлов в электрическом поле и механизм инициирования детонации в поликристаллических образцах // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2019. Т. 16, № 3. С. 407–410.

Информация об авторах

Ф. И. Иванов – доктор химических наук, профессор Кузбасского гуманитарно-педагогического института ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет».

Ю. А. Захаров – доктор химических наук, профессор, чл.-корр. СО РАН, заведующий лабораторией неорганических наноматериалов института углехимии и химического материаловедения.

Е. В. Исакова – кандидат философских наук Кузбасского гуманитарно-педагогического института ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет».

References

1. Distler, G. I., Vlasov, V. P. & Gerasimov, Yu. M. et al. (1975). Dekorirovaniye poverkhnosti tverdykh tel. M.: Nauka. P. 112. (In Russ.).
2. Zuyev, L. B., Ivanov, F. I., Lukin, M. A. & Nazarova, G. V. (1977). Issledovaniye dislokatsionnoy struktury v nitevidnykh kristallakh azida svintsya. *Fizika poluprovodnikov i mikroelektronika*, 4, 45–48. (In Russ.).
3. Keldysh, L. V. (1958). O vliyaniy sil'nogo elek-tricheskogo polya na opticheskiye kharakteristiki neprovodyashchikh kristallov. *ZHETF*, 5(34), 1138–1141. (In Russ.).
4. Frants, V. (1973). Tunnelirovaniye, soprovozhdayushcheyesya pogloshcheniyem fotonov (effekt Frantsa-Keldysha). M.: Mir. P. 424. (In Russ.).
5. Ivanov, F. I., Sarychev, V. D. & Urban, N. A. (1988). Ob elektricheskoy prirode initsirovaniya detonatsii azida svintsya pri mekhanicheskom vozdeystvii. *Fizika goreniya i vzryva*, 3, 98–101. (In Russ.).
6. Fridel', Zh. (1967). Dislokatsii: Monografiya. M.: Mir. P. 643. (In Russ.).
7. Baymakanov, A., Yygi, Kh. R., Lushchik, Ch. B. (1986). Elektronno-mikroskopicheskoye issledovaniye defektov, sozdavayemykh v KCl i KBr pri raspade elektronnykh vozbuzhdeniy. *FTT*, T. 28, Вып. 3, 684–691. (In Russ.).
8. Sirotin, Yu. I. & Shaskol'skaya, M. P. (1979). Osnovy kristalofiziki: Monografiya. M.: Nauka. P. 640. (In Russ.).
9. Ivanov, F. I., Lukin, M. A., Sarychev, V. D. & Zuyev, L. B. (1984). Ob elektroimpul'snom initsirovaniy detonatsii v polikristallicheskikh vzryvchatykh veshchestvakh, obladayushchikh p'yezoelektricheskimi svoystvami. *Mat. 1 Vsesoyuz. simp. po makroskop. kinetike i khim. gazodinamike*. Alma-Ata: AlmGU, V. 2, Part. 1. 17–18. (In Russ.).
10. Ivanov, F. I., Lobova, I. S. & Nazarova, G. V. (1990). Issledovaniye segnetoelektricheskikh svoystv kristallov nitrata kaliya i azida svintsya metodom indutsiruyemogo izgiba. *Izv. AN SSSR, Ser. fiz.*, 6(54), 1180–1183. (In Russ.).
11. Khirt, D. & Lote, I. (1972). Teoriya dislokatsiy: Monografiya. M.: Atomizdat. P. 599. (In Russ.).
12. Ivanov, F. I. (1992). O mekhanizme elektro- i fotoplasticheskogo effektivov v nitevidnykh kristallakh azidov serebra i svintsya. *Izvestiya SO RAN, Sibirskiy khimicheskii zhurnal*, 5, 125–133. (In Russ.).
13. Azaroff, L. V. (1956). Structural Investigation of Leid Azide. *Z. fur Kristallographic*, (107), 362–369.
14. Lid'yard, A. (1962). Ionnyaya provodimost' kristallov: Monografiya. M.: IL. P. 302. (In Russ.).
15. Ivanov, F. I., Zakharov, Yu. A. & Isakova, E. V. (2018). Segnetoelektricheskiiye svoystva i mekhanizm initsirovaniya vzryva kristallicheskogo azida svintsya pri energeticheskikh vozdeystviyakh. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 2(15), 294–302. (In Russ.).
16. Ivanov, F. I., Zakharov, Yu. A. & Isakova, E. V. (2019). Osobennosti razlozheniya nitevidnykh kristallov azidov tyazhelykh metallov v elektricheskoy pole i mekhanizm initsirovaniya detonatsii v polikristallicheskikh obraztsakh. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 3(16), 407–410. (In Russ.).

Information about the authors

F. I. Ivanov – Doctor of Chemical Sciences, Professor, Kuzbass Humanitarian and Pedagogical Institute of the Kemerovo State University.

Yu. A. Zakharov – Doctor of Chemical Sciences, Professor, Corresponding Member of the SB RAS, Head of Laboratory of Inorganic Nanomaterials, Institute of Coal Chemistry and Materials Chemistry.

E. V. Isakova – Candidate of Philosophical Sciences, Kuzbass Humanitarian and Pedagogical Institute of the Kemerovo State University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 11.04.2022; одобрена после рецензирования 21.04.2022; принята к публикации 27.04.2022.

The article was received by the editorial board on 11 Apr. 22; approved after reviewing on 21 Apr. 22; accepted for publication on 27 Apr. 22.