

Методами изгиба, одноосного нагружения, микротвердости исследованы упруго-пластические характеристики нитевидных кристаллов инициирующих взрывчатых веществ азидов свинца и серебра. Обнаружено влияние света из области собственного поглощения и электрического поля на пластичность нитевидных кристаллов азидов свинца и серебра и предложен диффузионно-дислокационный механизм этого влияния.

Methods of a bend, stretchings along an axis of growth, microhardness are investigated elastic-plastic characteristics of whiskers crystals of initiating explosives azide lead and silver. Discover influence of light from area of own absorption and an electric field on plasticity whiskers crystals azide lead and silver also it is offered diffusion-drift the mechanism of this influence.

Ключевые слова: азиды серебра и свинца, нитевидные кристаллы, деформация, фото и электрополевое разложение

Исследования механических прочностных характеристик нитевидных кристаллов (НК) различных соединений актуальны, так как в силу совершенства структуры прочность их может быть близка к теоретической [1]. Актуальность исследования механических свойств НК возрастает, когда дело касается получения информации о свойствах инициирующих взрывчатых веществ, для которых использование обычных методик механических испытаний на макробразцах затруднено.

Прочностные свойства НК β -PbN₆ и AgN₃ исследовались на специально сконструированных деформационных машинах двух типов:

одна из них позволяет деформировать НК изгибом;

другие – одноосным растяжением.

Анизотропия прочностных характеристик НК β -PbN₆ и AgN₃ исследовалась методом микротвердости.

1. Измерение модуля Юнга

при деформации изгибом НК β -PbN₆

Деформационная машина для измерения модуля Юнга при деформации изгибом позволяет прикладывать изгибающую силу к НК в любом направлении. Установка снабжена часовым микрометром для определения смещения НК при изгибе, гониометрической головкой для установки НК и боковым отсчетным микроскопом.

При исследовании прочностных характеристик НК мы столкнулись с проблемой жесткого крепления кристаллов к держателю, так как использование механических зажимов в силу специфики объектов было невозможно. Были подобраны специальные полимеризационные клеи типа суперцемента с низкой пластичностью и хорошими адгезионными свойствами.

Отклонение свободного конца наблюдали непосредственно на шкале микроскопа, отградуированной по объекту микрометру. Длина l НК также оценивалась под микроскопом. Из теории упругости известно [2], что изгиб тонкой пластины описывается уравнением вида:

$$Dx'''' - K_x = 0, \quad (1)$$

где $D = YI_2 = Yah / 12$ – жесткость на изгиб; Y – модуль Юнга; I_2 – момент инерции вдоль оси X ; a и h –

ширина и толщина НК β -PbN₆; $x'''' = \frac{1}{YI_2} \cdot \frac{d^2 M_x}{dl^2}$;

$M_x = YI_2 x''''$; x'''' – проекция момента силы в направлении изгиба; K_x – сила, действующая на единицу длины НК.

Для случая, когда один конец НК при $Z = 0$ жестко заделан, а другой при $Z = l$ свободен, причем к последнему приложена сосредоточенная сила f в направлении $[001]$, решение уравнения (1) будет иметь вид:

$$\xi = \frac{f}{6YI_2} \cdot Z^2 (3l - Z); \quad \xi = \frac{fl^3}{3YI_2}. \quad (2)$$

Представляя выражение для модуля Юнга в виде $Y_{[001]} = fl^3 / (3\xi I_2)$ и выражая момент инерции соотношением $I_2 = ah^3/12$, вычислим значение модуля Юнга из рисунка 1, которое с учетом погрешности измерений равняется $(2,42 \pm 0,5) \cdot 10^{10}$ Н/м². На рисунке 1 приведена зависимость приведенного прогиба, определяемого из теории упругости как $d = \xi l^3 ah^3 / 4$, от внешней силы, ортогонально прикладываемой к концу НК. Столь большой разброс вычисленного значения модуля Юнга связан не только с ошибками измерения отклонения свободного конца НК под нагрузкой, но и с измерением поперечных размеров кристаллов под микроскопом. Следует заметить, что для уменьшения влияния эффектов, связанных с упруго-пластическими характеристиками суперцемента, длина НК должна быть, по крайней мере, в 100 раз больше толщины.

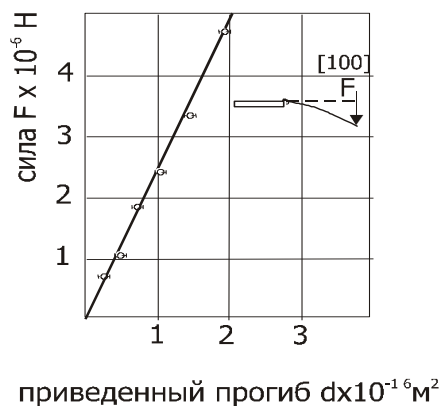


Рис. 1. Зависимость приведенного прогиба от внешней силы, ортогонально прикладываемой к концу НК β -азид свинца

2. Исследование упруго-пластических характеристик нитевидных кристаллов β -PbN₆ при одноосном растяжении

Одноосная деформация вдоль оси роста НК позволяет создавать достаточно однородное распределение напряжений и соответственно относительно равномерную генерацию дефектов кристаллической структуры, сопровождающих пластическую деформацию по одному из механизмов [3]. Деформационные машины для одноосного растяжения НК были двух типов. Горизонтальная (рисунок 2, а) представляет собой пружинное устройство с коэффициентом жесткости пружины $k = 100$ Н/м, которое растягивается со скоростью 5 мкм/с. Степень растяжения пружины фиксируется часовым микрометром, а удлинение кристалла оценивается с помощью оптического микроскопа.

На рисунке 3 приведены деформационные кривые в координатах напряжение (σ) – относительная деформация (ξ) для нитевидных кристаллов β -PbN₆ (кривая 1), и AgN₃ (кривая 2). Из данных кривых определили модуль Юнга, который для НК β -PbN₆ равен $1,8 \cdot 10^{10}$ Н/м², а для НК AgN₃ составляет $5 \cdot 10^8$ Н/м², и критическое напряжение разрыва σ , которое для НК β -PbN₆ изменяется от $2,3 \cdot 10^7$ до $2,8 \cdot 10^8$ Н/м². НК AgN₃ при аналогичных скоростях нагружения почти всегда деформируется пластически с проявлением или без проявления зуба текучести. НК β -PbN₆ при выбранных условиях нагружения разрушаются хрупко. Основными причинами различия пределов текучести НК AgN₃ при строго заданных размерах являются изменения в дислокационной структуре.

Вертикальная деформационная машина, блок-схема которой изображена на рисунке 2б, представляет собой нагружающее устройство, выполненное на базе микроскопа МБР-1. Растягивающие напряжения создаются за счет плавного подъема подвижной части микроскопа при вращении микровинта, осуществляемого двигателем через многоступенчатый редуктор.

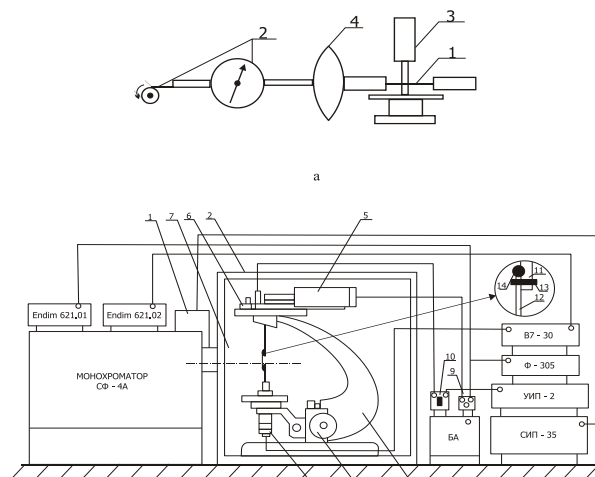


Рис. 2. Деформационные машины для одноосного растяжения НК:
а – горизонтальная (1 – НК; 2 – нагружающее устройство; 3 – микроскоп; 4 – отградуированная часовая пружина);
б – вертикальная (1 – источник света; 2 – экран; 3 – микроскоп; 4 – привод нагружающего устройства; 5 – механотрон; 6 – юстирующее устройство; 7 – конденсатор; 8 – электрометрический вход; 9, 10 – соединительные колодки; 11 – подвижный электрод; 12 – НК; 13 – клей; 14 – металлический галлий)

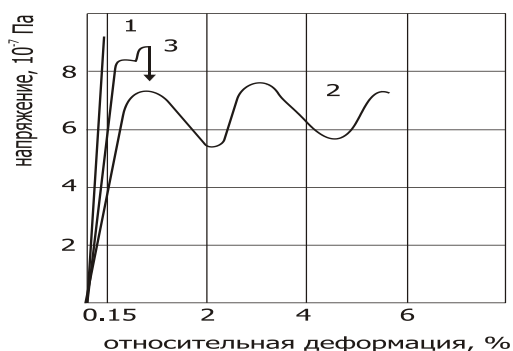


Рис. 3. Деформационные кривые в координатах напряжение – относительная деформация НК:
кривые 1, 3 – НК β -азид свинца;
2 – НК азид серебра

Процесс деформирования может быть остановлен в любой момент времени, т. е. при необходимости под фиксированной нагрузкой НК может находиться длительное время. Регистрация напряжения в процессе деформации осуществляется механотроном 6MX1C, преобразующим силу или смещение в электрический сигнал, который выводится на регистрирующий однокоординатный потенциометр Endim 620.01 и параллельно – на цифровой вольтметр Ф 330. Держатели НК одновременно являлись электродами для электрометрических измерений и для исследования влияния сильных электрических полей на пластичность НК. Данный тип деформационной машины позволяет проводить исследования фотопластичности и фотопроводимости, поскольку

НК находится в фокусе оптической оси монохроматора спектрофотометра СФ-4. Абсолютное удлинение НК, как и дислокационные полосы скольжения, наблюдались в оптический микроскоп. Скорость нагружения при одноосном растяжении на данном типе машины изменялась в пределах $3 \cdot 10^{-4} \div 3 \cdot 10^{-6}$ Н/с при одновременной регистрации спектральной зависимости фотопроводимости НК.

При скоростях нагружения $3 \cdot 10^{-6}$ Н/с наблюдается пластическая деформация НК β -PbN₆ со скоростью удлинения $(4,0 \div 4,3) \cdot 10^{-2}$ мм/мин. Разрушение происходит при относительной деформации 1,5 %, при этом видимой “шейки” в месте разрыва, как это ярко выражено у НК NaCl и AgN₃, не наблюдается, что свидетельствует о преимущественно хрупком разрушении НК β -PbN₆ [4].

3. Упругопластические характеристики нитевидных кристаллов азидов серебра и свинца при фото- и электрополевым воздействии

Ультрафиолетовое облучение НК АТМ также неоднозначно влияет на пластические характеристики при выбранных скоростях нагружения. Первоначально при временах облучения 1÷5 мин. и интенсивности $7,3 \cdot 10^{18}$ квант/(м²·с) наблюдается тенденция к увеличению прочности и уменьшению пластичности; затем, не достигая напряжения пластического течения, НК разрушаются хрупко, причем, например, при облучении НК β -PbN₆ в течение 30 мин. при температуре 293 К предел прочности уменьшается примерно на 30 % и составляет $8,5 \cdot 10^7$ Н/м² (кривая 3 рисунка 3). Происходит изменение пластичности и при действии электрического поля на НК АТМ. Особенно это проявляется в НК β -PbN₆ в режиме стационарной нагрузки, составляющей 80 – 85 % от критического напряжения, при котором наблюдается разрушение кристалла. На рисунке 4 приведена типичная диаграмма растяжения НК β -PbN₆ в электрическом поле. При критической напряженности электрического поля $E=10^5$ В/м, подводимого к зажимам НК β -PbN₆, за 2÷3 с до взрывного разложения, наблюдается резкое возрастание пластичности, зависящее от времени выдержки в электрическом поле.

Влияние света (фотопластический эффект), электрического поля (электропластический эффект) на упругопластические характеристики полупроводников впервые обнаружены и исследованы Ю. А. Осипьяном с соавторами [5 – 6] и объяснены активным взаимодействием движущихся дислокаций с электронной подсистемой кристалла. В отличие от наблюдаемых в работах [5 – 6] закономерностей, которые проявляются в момент непосредственного воздействия света на электронную подсистему кристалла, изменение пластичности АТМ сохраняется и после облучения ультрафиолетовым светом из полосы собственного поглощения и зависит от времени экспозиции [7].

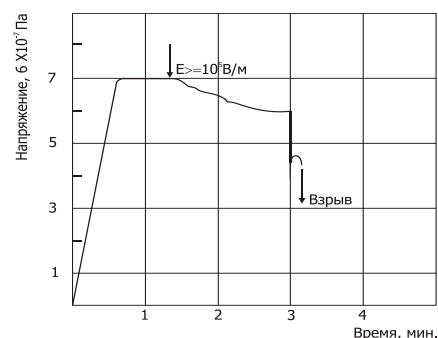


Рис. 4. Диаграмма пластической деформации НК β -азида свинца в электрическом поле напряженностью 10^5 В/м

Измерение пластических характеристик в НК β -PbN₆ и AgN₃ под действием света проводилось методом микротвердости с использованием микротвердомера ПМТ-3. В зависимости от времени облучения наблюдается не только положительный, упрочняющий, пластический эффект, но и при больших временах облучения, когда наблюдается фотохимическое разложение, сопровождающееся выделением металла и молекулярного азота, – отрицательный, разупрочняющий (рис. 5) пластический эффект. Экспериментально, методом ямок травления и лазерной микроинтерферометрии, показано, что фотопластический эффект в режиме упрочнения сопровождается появлением единичных полос скольжения как для НК AgN₃, так и НК β -PbN₆ (рис. 6). В режиме разупрочнения, то есть длительного ультрафиолетового облучения, наблюдается система множественных двойникоующих полос скольжения, которая визуальна наблюдается в поляризованном свете, аналогично описанному в работе [8] (рисунок 6б). В зависимости от характера нагружения и геометрии распределения напряжений в НК β -PbN₆ выявляется пять плоскостей дислокационного скольжения: [100], [001], [011], [010], [110], причем методом декорирования обнаружено размножение дислокаций, возможно, за счет источника Франка-Рида [9].

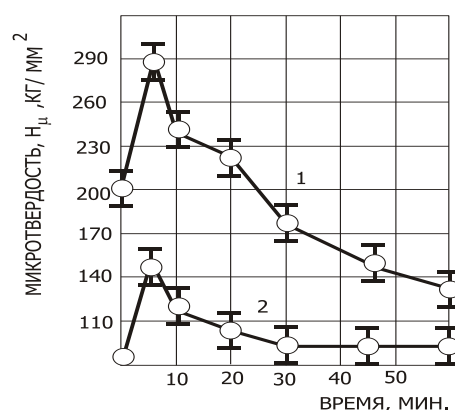


Рис. 5. Зависимость микротвердости НК β -азида свинца и азида серебра от времени облучения: 1 – НК β -азида свинца; 2 – НК азида серебра. Длина световой волны 365нм; интенсивность света 10^{18} квант/(м²·с)

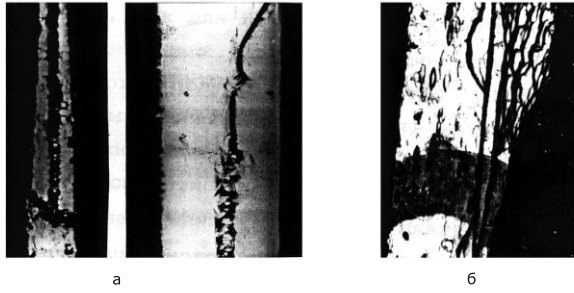


Рис. 6. Полосы дислокационного скольжения в НК β -азида свинца:

а – единичные полосы скольжения $\times 200$;
б – система полос скольжения, наблюдаемая в поляризованном свете $\times 250$

Анализ причин упрочнения и разупрочнения НК АТМ при освещении светом из полосы собственного поглощения проведем на основе рассмотрения взаимодействия между точечными дефектами и имеющимися дислокациями по диффузионному механизму [9] и процессами, протекающими при фотохимическом разложении. Причиной диффузионного потока точечных дефектов на дислокацию может служить не только пересыщение точечных дефектов в объеме кристалла, но и наличие силы, действующей на дислокацию в направлении, нормальном ее плоскости скольжения.

Пусть дислокация находится в поле напряжений, создающих силу $\bar{F}$, приложенную к единице длины дислокации. Тогда при переползании дислокации совершается работа, определяемая в единицу времени величиной $\bar{F}\bar{V}_n$, где $\bar{V}_n$ – составляющая скорости дислокации нормально плоскости ее скольжения. Эта работа, отнесенная к одной вакансии, осевшей на дислокацию, в случае чисто краевой прямолинейной дислокации составляет [9]:

$$\partial R = \frac{a^3}{b_{\perp}^2} [\bar{b}; \bar{r}] \bar{F} = \frac{a^3}{b_{\perp}^2} [\bar{b}; \bar{r}] \bar{F} = a^3 p'_{xx}, \quad (3)$$

где ось OX направлена вдоль вектора Бюргерса дислокации $\bar{b}$; a – параметр решетки; $b_{\perp}$ – составляющая вектора Бюргерса, перпендикулярного линии дислокации в данной точке; $\bar{r}$ – единичный вектор, касательный к дислокации; p'_{xx} – соответствующая компонента тензора-девиатора напряжений.

Полагая, что в процессе переползания дислокаций равновесная концентрация точечных дефектов на оси дислокаций остается постоянной, мы тем самым, не обсуждая кинетику оседания точечных дефектов [9] на дислокации, можем записать граничное условие для изменения химического потенциала $\partial \mu$ на поверхности дислокационной трубки, вытекающее из уравнения (3), в следующем виде:

$$\partial \mu_b \Big|_{r=r_0} = a^3 p'_{xx}. \quad (4)$$

Наличие малого пересыщения вдали от дислокации учитывается следующим условием на бесконечности:

$$\partial \mu_b \Big|_{r=\infty} = \frac{\partial \mu(c)}{\partial c} \delta c = kT \frac{\delta c}{c_0}, \quad (5)$$

где δc – некоторое пересыщение вакансий; c_0 – равновесная концентрация вакансий в отсутствии внешних нагрузок; k – постоянная Больцмана; T – температура.

А. Л. Ройтбурд и Б. А. Вершок [10, 11] показали, что рассматриваемая диффузионная задача сводится к решению уравнения Лапласа, т. е. химический потенциал вакансии μ_b можно считать гармонической функцией, удовлетворяющей условиям (4) и (5). Плотность диффузионного потока в этом случае определяется по формуле:

$$j = -\frac{c_0 \cdot D_b}{a^3 kT} \text{grad} \mu_b, \quad (6)$$

где D_b – коэффициент диффузии вакансий.

Рассмотрим отдельную прямолинейную дислокацию, параллельную оси OZ . Переползание такой дислокации происходит вдоль оси OY со скоростью $V_g = a^3 I / b$ [12]. Подставляя химический потенциал μ_b , удовлетворяющий условиям (4) и (5), вычислим по уравнению (6) полный поток вакансий I , приходящийся на единицу длины дислокации:

$$V_y = -\frac{2\pi c_0 D_b}{b \ln(l/r_0)} \left\{ \frac{a^3 p'_{xx}}{kT} - \frac{\delta c}{c_0} \right\}, \quad (7)$$

где l – длина дислокации или размер кристалла.

В момент установления стационарных диффузионных потоков можно допустить, что концентрация вакансий в кристалле равновесна ($\delta c = 0$). Тогда

$$V_y = -\frac{2\pi c_0 D_b}{b \ln(l/r_0)} \left(\frac{a^3 p'_{xx}}{kT} \right). \quad (8)$$

Переползание дислокации в рассматриваемом случае может завершиться только ее выходом на внешнюю поверхность образца. Подобный выход дислокации на поверхность означает исчезновение лишней атомной полуплоскости в кристалле – ее полное «растворение». Возможность такого растворения атомной полуплоскости может быть обеспечена только наличием в кристалле бесконечно емкого стока для междоузельных атомов (источника для вакансий), который способен поглотить все вещество растворившейся полуплоскости. Не предполагая механизма полного поглощения лишнего вещества, содержащегося в этой полуплоскости, следовало бы учесть его накопление в объеме кристалла. Тогда концентрация точечных дефектов в процессе деформации изменялась бы со временем согласно уравнению (8), а процесс переползания дислокации не мог бы происходить стационарным образом. Похожая ситуация, по-видимому, наблюдается в НК AgN_3 на рисунке 3 (кривая 2) и в НК $\beta\text{-PbN}_6$.

Макроскопическую, т. е. наблюдаемую пластическую деформацию, можно создать лишь при перемещении значительного количества дислокаций. Для упрощения рассмотрения полагаем, что при одноосном растяжении НК имеется большое число одинаковых параллельных краевых дислокаций, которые при их переползании в поле напряжений вы-

зуют среднюю пластическую деформацию со скоростью:

$$\varepsilon_{xx}^{pl} = -\rho_0 b V_y = \frac{2\pi c_0 \rho_0 D_b}{b \ln(l/r_0)} \left(\frac{a^3 p'_{xx}}{kT} \right), \quad (9)$$

где ρ_0 – плотность дислокаций (число дислокаций, проходящих через единицу площади на плоскости Оху).

Если в кристалле имеются две или несколько параллельных полос скольжения дислокаций, плоскости скольжения которых перпендикулярны, то диффузионно-дислокационное течение кристалла происходит со скоростью, пропорциональной при прочих равных условиях концентрации вакансий

$$\varepsilon_{xx}^{pl} = -\varepsilon_{yy}^{pl} \approx \rho_0 c_0 D \frac{a^3 P}{kT} \approx \frac{c_0 D a^3 P}{L^2 kT}, \quad (10)$$

где L – среднее расстояние между дислокациями в плоскости, перпендикулярной их осям ($\rho_0 = L^{-2}$); P – одноосное растягивающее усилие.

Используем полученное выражение для объяснения влияния ультрафиолетового освещения и электрополя на пластичность НК АТМ.

Наиболее непротиворечивая схема образования молекулярного азота при тепловом, фотохимическом и электрополевым разложении АТМ включает стадию локализации дырки (радикала N_3^0) на катионной вакансии ($\square^+$) с образованием V_k -центра. При протекании данной стадии происходит уменьшение равновесной концентрации катионных вакансий, ответственных за пластичность по диффузионно-дислокационному механизму. В дальнейшем, когда концентрация катионных вакансий уменьшится не менее чем в 3 раза, как это показано в нашей работе [13], происходит повторный захват дырки на V_k -центре и выделение молекулярного азота, сопровождающийся либо восстановлением первоначального количества катионных вакансий и возрастанием анионных (механизм, предлагаемый В. Г. Кригером с соавторами [14]), либо значительным увеличением их концентрации за счет образования Френкелевских пар при диссипации энергии 10 эВ, выделяющейся при химической реакции. Таким образом, учет химического взаимодействия между вакансиями и активными радикалами N_3^0 полностью объясняет характер изменения пластических характеристик НК АТМ при облучении светом из области собственного поглощения и в свою очередь является косвенным подтверждением предлагаемых в [13, 14] стадий механизма разложения.

При значительных временах ФХР падение прочностных и увеличение пластических характеристик НК АТМ совпадает с образованием плоских металлических зародышей, ориентированных в плоскости [100] и окруженных дислокационными петлями, которые, по-видимому, и облегчают пластическое течение, являясь источниками дислокаций типа Франка-Рида, или для нашего случая, – диффузионной ползучести типа Бардина-Херринга [9]. Проверку данного предположения проведем, используя теоретические представления А. Л. Ройтбурда и Б. А. Вершок [10 – 11], объясняющие стационарное течение кристалла при наличии источника дислокаций, и нашими результатами по росту зародышей металлического свинца от времени облучения. Полагая, что дислокационная петля рождается, когда размеры скопления междоузельного металла достигают некоторого значения R_0 , тогда для поддержания стационарного течения на протяжении длительного времени необходимо, чтобы скопление постоянно генерировало дислокации. Линейная зависимость уменьшения микротвердости с ростом концентрации зародышей размером более 0,048 мкм, приведенная на рисунке 7 для НК β -PbN₆, свидетельствует в пользу данного механизма при больших временах облучения. Определенный вклад в генерацию дислокационных петель, по-видимому, вносит и схлопывание вакансионных пор, поскольку обнаружить их даже при значительных временах ФХР и электронно-микроскопическом увеличении до 75000 раз не удается.

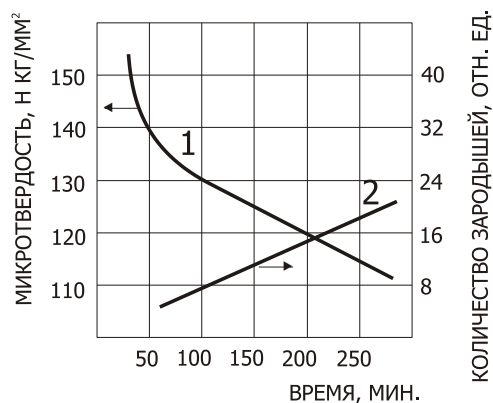


Рис. 7. Зависимость микротвердости (1) и относительного количества зародышей металлического свинца (2) от времени фотохимического разложения. Размеры зародышей более 0,048 мкм

Электропластичность НК АТМ (рис. 4) также находит объяснение в рамках предлагаемого механизма. Пластическое течение в электрополе наступает тогда, когда зародыши металла, образовавшиеся в результате разложения в сильном электрическом поле, способствуют интенсивному образованию дислокационных петель и размножению дислокаций по диффузионному механизму, а образовавшиеся при этом полосы скольжения являются эффективными концентраторами электрического поля [15], которое в дальнейшем инициирует взрывчатое превращение азидов.

Следует отметить, что наряду с исследованиями изменения микротвердости в процессе облучения нами была обнаружена анизотропия микротвердости НК β -PbN₆ и AgN₃ (рис. 8). Максимальное наблюдаемое различие в изменении микротвердости НК при различной ориентации диагонали алмазной пирамиды составляет примерно 2 раза.

Подводя итоги исследования механических свойств азидов свинца и серебра отметим, что удалось не только оценить ряд их упругопластических характеристик, отсутствующий в литературе, но и

показать, что механические свойства азидов таких металлов являются структурно-чувствительными не только к единовременному воздействию света и электрополя, как это было ранее установлено для светочувствительных полупроводников, но и к постпревращениям, происходящим в кристаллических решетках. Приведенные экспериментальные результаты по фото- и электропластичности и их обсуждение расширяют возможные механизмы объяснения явления и для полупроводников типа A_2B_6 , в которых оно было первоначально обнаружено. Предлагаемая диффузионно-дислокационная модель находится в хорошем согласии со сложившимися представлениями о механизме элементарных стадий разложения азидов серебра и свинца, развиваемыми в Кемеровском государственном университете.

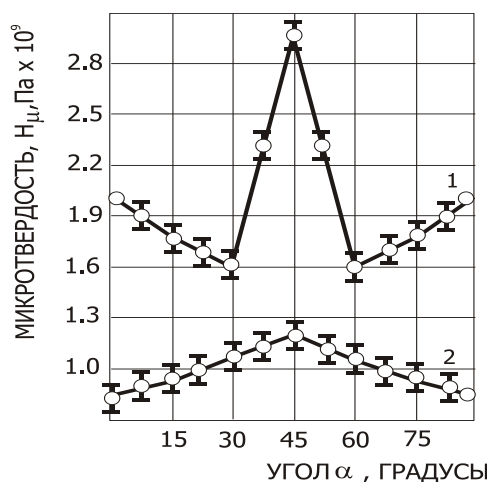


Рис. 8. Анизотропия микротвердости в НК β -азидов свинца (1) и азидов серебра (2)

Литература

- Бережкова, Б. А. Нитевидные кристаллы: монография [Текст] / Б. А. Бережкова. — М.: Наука, 1969. — 260 с.
- Ландау, Л. Д. Теория упругости: учебное пособие [Текст] / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. — М.: Наука, 1987. — 248 с.
- Коттрелл, А. Х. Дислокации и пластическое течение в кристаллах [Текст] / А. Х. Коттрелл: монография. — М.: Мет. изд., 1958. — 268 с.
- Екабори, Т. Физика и механика разрушения и прочности твердых тел [Текст] / Т. Екабори: монография. — М.: Металлургия, 1971. — 263 с.
- Осипьян, Ю. А. Экспериментальные наблюдения влияния света на пластическую деформацию сульфида кадмия [Текст] / Ю. А. Осипьян, И. Б. Савченко // Письма в ЖЭТФ. — 1968. — Т. 78. — Вып. 4. — С. 130 — 133.
- Осипьян, Ю. А. Экспериментальное наблюдение влияния электрического поля на пластическую деформацию кристаллов ZnSe [Текст] / Ю. А. Осипьян, В. Ф. Петренко // Письма в ЖЭТФ. — 1973. — Т. 17. — Вып. 9. — С. 555 — 557.
- Влияние ультрафиолетового облучения на пластичность азидов тяжелых металлов [Текст] / Ф. И. Иванов., Н. А. Урбан., Г. А. Белоконева., О. В. Олесюк // Воздействие ионизирующего излучения и света на гетерогенные системы: тез. докл. 4 Всесоюз. совещ. — Кемерово: КемГУ. — 1986. — С. 103.
- Класен, Н. В. Особенности взаимодействия света с дислокациями в сульфиде кадмия [Текст] / Н. В. Класен, Л. Л. Красильникова, Э. Ф. Табеев // ФТТ. — 1977. — Т. 19, Вып. 2. — С. 521 — 527.
- Косевич, А. М. Дислокации в теории упругости [Текст] / А. М. Косевич: монография. — Киев: Наукова думка, 1978. — 220 с.
- Вершок, Б. А. Неконсервативное движение системы дислокаций и высокотемпературная деформация. Ч. 1. Нестационарное движение параллельных дислокаций [Текст] / Б. А. Вершок, А. Л. Ройтбурд // Физ. метал. и металловедение. — 1971. — Т. 32. — №2. — С. 269 — 280.
- Ройтбурд, А. Л. Неконсервативное движение системы дислокаций и высокотемпературная деформация. Ч. 2. Стационарный режим [Текст] / А. Л. Ройтбурд, Б. А. Вершок // Физ. метал. и металловедение. — 1971. — Т. 32. — № 3. — С. 499 — 509.
- Хирт, Д. Теория дислокаций [Текст] / Д. Хирт, И. Лоте: монография. — М.: Атомиздат, 1972. — 599 с.
- Урбан, Н. А. Дефектообразование при фотохимическом разложении β -PbN₆ [Текст] / Н. А. Урбан, Ф. И. Иванов // Всесоюзная конф. по фотоэлектрическим явлениям в полупроводниках: тез. докл. — Ташкент: Таш.ГУ. — 1989. — С. 78.
- Кригер, В. Г. Анализ механизмов термического разложения азидов тяжелых металлов [Текст] / В. Г. Кригер, А. В. Ханефт, О. Л. Колпаков // Химия твердого состояния; под ред. Ю. А. Захарова. — Кемерово: КемГУ, 1981. — С. 56-68.
- Иванов, Ф. И. Влияние электрического рельефа поверхности на закономерности фотоиндуцируемых превращений в нитевидных кристаллах азидов свинца [Текст] / Ф. И. Иванов, Н. А. Урбан // ЖФХ. — 1991. — Т. 65. — № 6. — С. 1598 — 1603.