

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ СТРАНЫ

УДК 534 : 621.382

ПОЛЯРНАЯ И РЕТИКУЛЯРНАЯ АНИЗОТРОПИЯ МИКРОТВЁРДОСТИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИКОВ

С.Г. Казанцев, Т.Н. Овчаренко
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

Представлены результаты разработки методики исследований микротвёрдости монокристаллов, основанной на методе статистической обработки данных автоматизированных измерений микротвёрдости при различных нагрузках, прикладываемых к индентору. Приведены результаты исследования микротвёрдости по Кнупу монокристаллов с ковалентной и ионной связью, выполненные по данной методике. В результате проведённых исследований обнаружена полярная и ретикулярная анизотропия микротвёрдости в кристаллах группы лангасита.

Ключевые слова: микротвёрдость по Кнупу, микротвёрдость по Виккерсу, полярная и ретикулярная анизотропия, индентор.

Введение

Испытание материалов на твёрдость – это один из наиболее высокопроизводительных методов неразрушающего контроля качества материалов и их обработки. Являясь тонким и надёжным методом физико-механического анализа, он занимает особое место среди прочностных испытаний.

Микротвёрдость (Н) – это твёрдость материала в его микроскопически малых объёмах. Метод физико-механического анализа микротвёрдости позволяет получать данные о твёрдости отдельных фаз или структурных составляющих кристаллов. Его применение является перспективным для диагностики особо твёрдых и хрупких тел, исследования свойств тончайших поверхностных слоёв и изучения анизотропии пластической деформации кристаллов – зависимости величины микротвёрдости от ориентации структуры кристалла.

Анизотропия механических свойств особенно характерна для материалов, имеющих слоистую структуру, таких как соединения лантан-галлиевых силикатов (ЛГС) и лантан-галлиевых танталатов (ЛГТ), что обусловлено различием ретикулярной плотности атомов и типов химических связей на исследуемых гранях, первичными и вторичными процессами пластической деформации вокруг деформированной области.

Метод микротвёрдости основан на регистрации отпечатков, возникающих при внедрении индентора в поверхность. Их изменение и пове-

дение материала вблизи отпечатков анализируются при изучении механизмов деформирования материала в процессе нагружения [1, 2], подвижности дислокаций [3], трещиностойкости [4], анизотропии деформации [5 – 7], влияния радиационного воздействия на механические свойства материала [8], фотомеханического эффекта [9, 10], эффекта дальнего действия в твёрдых телах [11, 12].

Значительную долю экспериментального материала, представленного в литературных источниках, составляют результаты, полученные при измерении микротвёрдости с помощью неавтоматизированных микротвердомеров, аналогичных отечественному прибору типа ПМТ-3. Однако релевантность этих данных вызывает сомнения в связи с тем, что относительное изменение микротвёрдости, наблюдаемое при исследованиях, сопоставимо с погрешностью измерений (для микротвердомера ПМТ-3 она составляет ~5 – 15 %). Абсолютные показания прибора зависят от фокусировки оптической системы и изменяются при её перенастройке, поэтому результаты измерения микротвёрдости одного и того же образца, полученные разными операторами, могут быть различны.

В работах, посвящённых исследованию материалов по методу микровдавливания [1 – 12], оцениваются абсолютные величины Н и относительное изменение микротвёрдости материала в зависимости от влияния внешних воздействий, ориентации и химического состава образца, од-



Рис. 1. Микротвердомер типа ПМТ-3 с набором калиброванных грузов и насадок

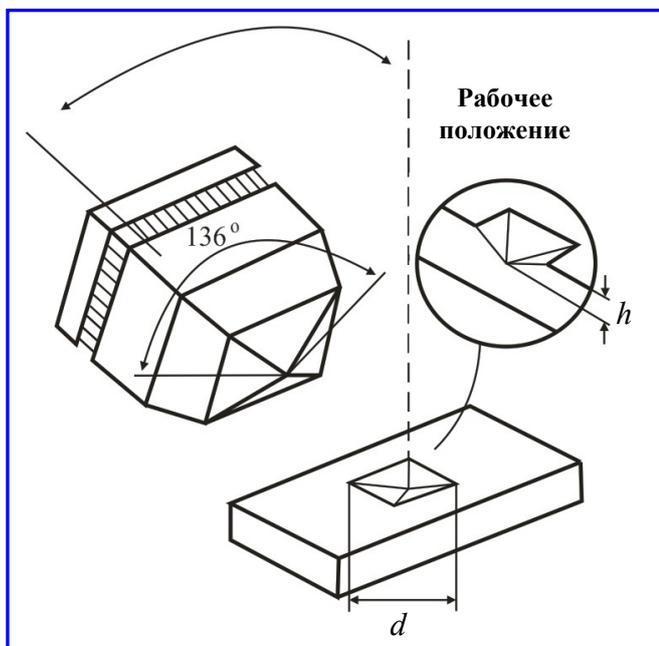


Рис. 2. Геометрические параметры индентора Виккерса и отпечатка на поверхности образца

нако условия испытаний не всегда соответствуют стандартной методике. Выбор нагрузки, прикладываемой на индентор, продолжительности нагружения, времени выдержки под нагрузкой, расстояния между отпечатками на исследуемом образце – факторов, значительно влияющих на результаты измерения, – осуществляется произвольно.

При измерениях абсолютной величины микротвёрдости материала выбор нагрузки P , прикладываемой на индентор, часто бывает обу-

словлен размерами получаемых отпечатков. Чем больше нагрузка, тем крупнее отпечаток индентора на поверхности материала, что позволяет с большей точностью измерить длины его диагоналей при помощи оптической системы микротвердомера. Однако зависимость величины твёрдости от нагрузки на индентор нелинейная: при малых нагрузках микротвёрдость имеет существенно большие значения, чем при увеличении нагрузки, когда величина H приближается к стационарной величине. Это может быть вызвано наличием дефектов в приповерхностном слое [1], а также влиянием масштабного эффекта [13] – упругим восстановлением приповерхностных областей материала. Величина H остаётся постоянной в некотором интервале нагрузок, индивидуальном для каждого материала, и снижается при дальнейшем увеличении P [14].

В связи с этим при исследовании физико-механических свойств материалов по методу микротвёрдости и получения сравнимых величин H необходимо предварительное построение нагрузочной кривой для каждого исследуемого образца. Для исследования анизотропии механических свойств представляется целесообразным выбирать нагрузку в начале горизонтального участка нагрузочной кривой, соответствующего стационарному значению микротвёрдости [15].

В данной работе приведены результаты испытаний на микротвёрдость по Виккерсу и Кнупу монокристаллов ЛГС и ЛГТ, а также исследований полярной и ретикулярной анизотропии микротвёрдости на идентифицированных рентгенодифракционным методом плоскостях кристаллов [10.0], [01.0] и [00.1]. Исследование анизотропии микротвёрдости проводилось с использованием стандартной ромбической пирамиды Кнупа, так как именно в этом случае изменение величины H наиболее чувствительно к анизотропии физико-механических свойств кристаллов.

Методики измерений микротвёрдости

Измерения микротвёрдости по Виккерсу

Для проведения испытаний на твёрдость методом вдавливания имеется ряд специальных приборов, позволяющих осуществлять вдавливание индентора при малых нагрузках, не превышающих единицы-десятки граммов. При этом размеры отпечатков на поверхности образца составляют единицы-десятки микрон. Измерение отпечатков проводится с помощью микроскопа (рис. 1).

На основание прибора установлены предметный столик, имеющий две степени свободы, колонна с резьбой, на которой закреплён кронштейн с микроскопом и нагружающее устройство с индентором.

Индентор Виккерса представляет собой усечённую четырёхгранную алмазную пирамидку с квадратным основанием и с углом при вершине между противоположающимися гранями равными 136° (рис. 2).

Для точного определения числа микротвёрдости оптическая ось микроскопа должна совпадать с осью нагружения при повороте предметного столика на 180° , т. е. необходимо настроить оптическую систему микротвердомера так, чтобы отпечаток наносился именно на том месте, которое было выбрано под микроскопом.

Также необходима правильная установка механизма нагружения по высоте. Юстировку по высоте проводят на эталоне с известной величиной H_V . Регулируя нагружающий механизм, необходимо добиться получения отпечатка с такой диагональю, которая бы соответствовала микротвёрдости эталона.

Для проведения испытаний на микротвёрдость образец крепится на приборное стекло с помощью подложки из пластилина, обеспечивающей при использовании специального пресса параллельность поверхности образца и плоскости приборного столика. На механизм нагружения прибора ПМТ-3 устанавливается диск с прорезью, соответствующий величине нагрузки, при которой будет проводиться испытание. После выбора с помощью микроскопа области для нанесения отпечатка на поверхности образца столик вручную переводится в положение индентирования.

Цикл нанесения отпечатка осуществляется плавным поворотом рукоятки механизма нагружения до упора, выдержкой индентора под нагрузкой и возвратом рукоятки в исходное положение. Для измерения диагоналей полученного отпечатка приборный столик переводится в поле микроскопа. При совмещении перекрестия микроскопа с углами отпечатка считываются соответствующие показания шкалы (сотни микрометров) и лимба (десятки и единицы микрометров) микроскопа (рис. 3).

Для четырёхгранной пирамиды с углом между противоположными гранями при вершине 136° число H_V вычисляется как частное от деления приложенной нагрузки на площадь поверхности полученного отпечатка [16]:

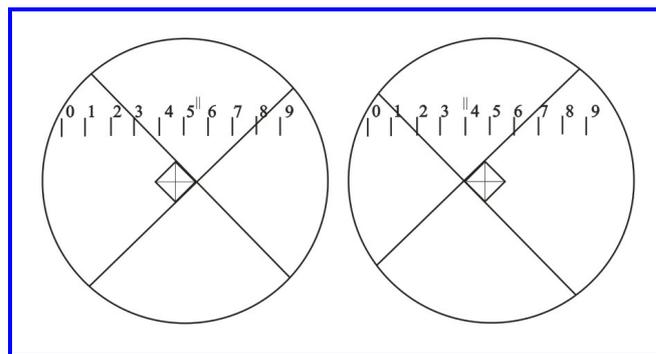


Рис. 3. Измерение диагонали отпечатка индентора Виккерса на приборе ПМТ-3

$$F = \frac{d^2}{2 \sin 68^\circ} = \frac{d^2}{1,854};$$

$$H_V = \frac{1,854P}{d^2},$$

где F – площадь боковой поверхности отпечатка, мм^2 ; d – диагональ отпечатка, мм ; H_V – микротвёрдость по Виккерсу, $\text{кгс}/\text{мм}^2$; P – нагрузка на индентор, кг .

Для получения сравнимых величин микротвёрдости различных материалов на поверхность каждого испытуемого образца наносят отпечатки при различных нагрузках. Расстояние между центрами соседних отпечатков должно составлять не менее двух длин диагонали отпечатка. За абсолютную величину H принимают стационарное значение микротвёрдости, соответствующее горизонтальному участку графика зависимости величины микротвёрдости от нагрузки.

Микротвердомер TUKON-2100 и метод Кнупа

Автоматический твердомер с тензометрическим датчиком нагрузки Tukon-2100 (Instron) представляет собой прибор для испытаний на микротвёрдость методами Кнупа и Виккерса Американского общества по испытаниям материалов (ASTM), описанным в стандартах ASTM E384, EN-ISO 9385, ISO 4546.

Микротвердомер Tukon-2100 оборудован датчиком силы, обеспечивающим точность воспроизведения прилагаемой нагрузки независимо от уровня установки твердомера и усилия оператора (рис. 4). Высокоскоростная электроника с обратной связью обеспечивает высокоточный контроль величины нагрузки, а также позволяет регулировать скорость нагружения индентора, что особенно

актуально при испытаниях на микротвёрдость хрупких материалов.

Цифровой оптический узел микротвердомера и многопозиционная автоматическая поворотная турель для трёх объективов и двух датчиков силы с инденторами (рис. 5) позволяют производить измерения длин диагоналей отпечатков в автоматическом режиме.

Испытание выполняется в два этапа. На первом

этапе индентор автоматически подводится к образцу до соприкосновения с его поверхностью и вдавливается в материал с заданной скоростью и усилием, линейно возрастающим до установленного значения. По истечении заданного перед началом испытания времени выдержки нагрузки индентор автоматически поднимается, и поворотная турель прибора переводится в положение одного из оптических объективов.



Рис. 4. Автоматический микротвердомер Tukon-2100



Рис. 5. Автоматическая поворотная турель микротвердомера Tukon-2100

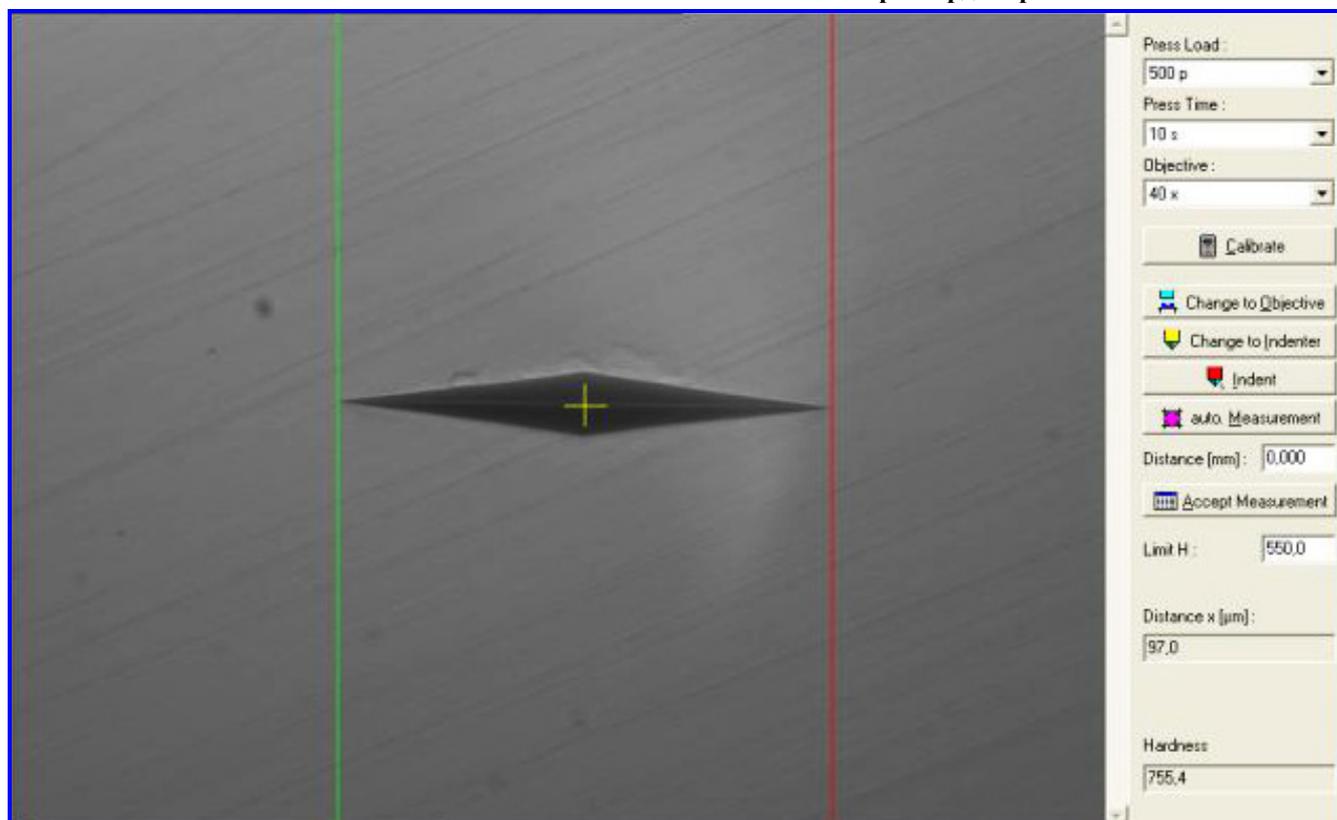


Рис. 6. Измерение длины диагонали отпечатка индентора Кнупа (увеличение 40x) с помощью программного обеспечения прибора Tukon-2100

На втором этапе испытания с помощью цифрового оптического узла и программного обеспечения микротвердомера производится измерение длины диагонали отпечатка индентора, полученного на поверхности образца.

Оптические объективы с различной кратностью увеличения (10×, 40× и 60×) позволяют отчётливо видеть отпечатки любых размеров в мельчайших деталях, а подвижные филиарные линии цифрового оптического узла обеспечивают высокую точность измерения диагонали отпечатка (рис. 6).

Длина диагонали отпечатка автоматически преобразуется в число микротвёрдости Кнупа (H_K) по формуле [17]:

$$H_K = \frac{P}{d^2 C} = \frac{P}{0,07028 d^2} = \frac{14,229 P}{d^2},$$

где P – нагрузка на индентор, кг; d – длина длинной диагонали, мм; C – постоянная индентора, представляющая собой отношение площади проекции отпечатка к квадрату длины длинной диагонали (для идеального индентора $C = 0,07028$).

Особенностью ромбического индентора Кнупа является возможность проведения испытаний на микротвёрдость твёрдых, хрупких материалов и тонких покрытий, что обусловлено малой глубиной вдавливания в материал, которая составляет около 1/30 от длины длинной диагонали (рис. 7).

Также преимуществом ромбического индентора является относительно большой размер отпечатка, получаемого при использовании малых нагрузок, что позволяет проводить более точные измерения (рис. 8).

Различие величин микротвёрдости по Виккерсу и Кнупу одного и того же материала обусловлено геометрией инденторов. При определении числа твёрдости по Виккерсу величина нагрузки относится к площади поверхности восстановленного отпечатка, тогда как при определении числа твёрдости по Кнупу – к площади невосстановленного отпечатка [17], т. е. материалы, обладающие различными упругими свойствами, могут иметь одинаковую твёрдость по Виккерсу, но разные величины H_K .

Таким образом, метод измерения микротвёрдости на приборе Tukon-2100 с помощью ромбического индентора Кнупа является наиболее чувствительным и точным методом, позволяющим оцени-

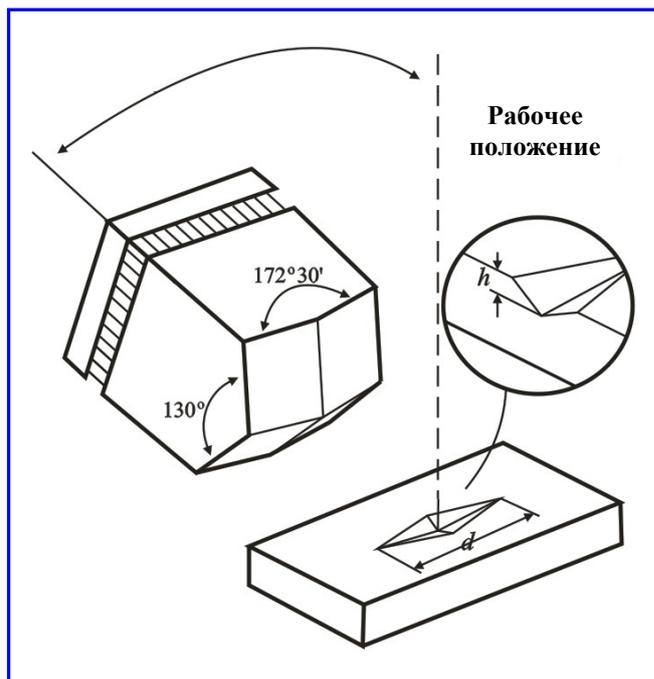


Рис. 7. Геометрические параметры индентора Кнупа

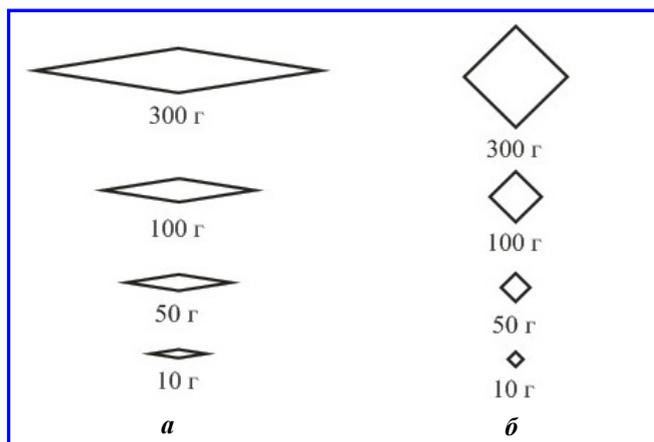


Рис. 8. Относительные размеры отпечатков инденторов Кнупа (а) и Виккерса (б) в зависимости от величины нагрузки

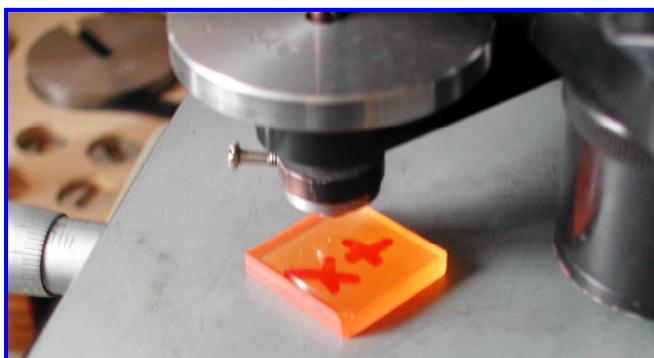


Рис. 9. Образец монокристалла лангасита под нагружающим устройством прибора ПМТ-3

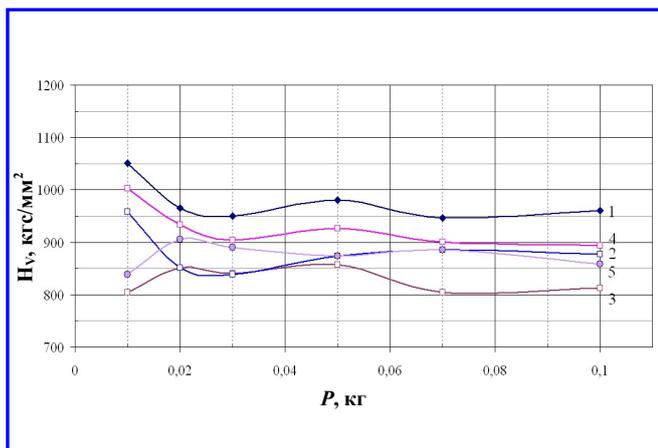


Рис. 10. Кривые нагружения для срезов [10.0] (1), [11.0] (2 – 4) и [00.1] (5) кристаллов ЛГС



Рис. 11. Отпечаток индентора Виккерса (ПМТ-3) на X-срезе монокристалла ЛГС, $P = 0,04$ кг

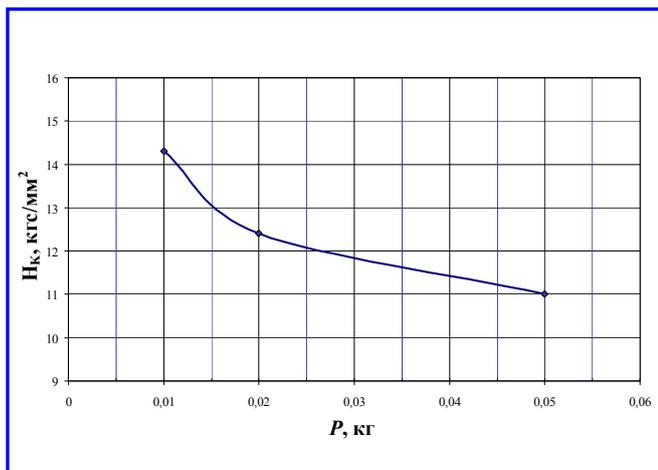


Рис. 12. Кривая нагружения для среза [00.1] монокристалла КСl

вать способность хрупких материалов оказывать сопротивление упругому и пластическому деформированию, а также исследовать анизотропию их физико-механических свойств.

Результаты измерений микротвёрдости монокристаллов с ионной и ковалентной связью

Измерения микротвёрдости на микротвердомере ПМТ-3

Испытания на твёрдость по методу Виккерса монокристаллов группы ЛГС и ионных кристаллов КСl при помощи микротвердомера ПМТ-3 проводились по стандартной методике. Образцы для испытаний представляли собой монокристаллические пластины с оптически полированными поверхностями различной кристаллографической ориентации (рис. 9).

Для исключения ошибок измерения диагоналей отпечатков, связанных с перенастройкой оптической системы прибора, каждая серия измерений проводилась одним оператором и сопровождалась проверкой по контрольному образцу. Индентирование проводилось при комнатной температуре. Продолжительность цикла нанесения отпечатка (нагружение, выдержка и снятие нагрузки) составляла 30 – 35 с.

Результаты измерений H_v при различных нагрузках на индентор (0,01 – 0,07 кг) для пяти образцов кристаллов ЛГС различных срезов представлены на кривых нагружения (рис. 10). Для уменьшения влияния случайных погрешностей величина H_v в каждой точке усреднялась по результатам измерения десяти отпечатков.

При малых нагрузках на индентор (0,01 – 0,03 кг) у краёв отпечатков на плоскостях [11.0] (образец № 3) и [00.1] (образец № 5) наблюдались микротрещины, что обусловлено высокой хрупкостью поверхности кристаллов ЛГС и возможной вибрацией индентора при вдавливании.

При микровдавливании с нагрузкой на индентор 0,04 – 0,07 кг на всех поверхностях монокристаллов ЛГС наблюдались развитые трещины и сколы, соизмеримые по размерам с диаметром отпечатка (рис. 11). Дальнейшее наблюдение за отпечатками показало, что вследствие релаксации напряжений в кристалле разрастание трещин и появление новых сколов происходит в течение получаса после индентирования.

В ходе исследования микротвёрдости кристаллов ЛГС разброс экспериментальных данных

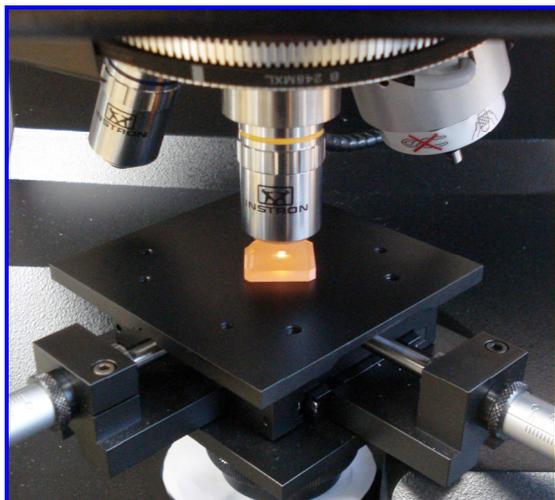


Рис. 13. Образец ЛГС на приборном столике автоматического микротвердомера Tukon-2100

составил 10 – 15 %, что может быть обусловлено неточностью измерения диагоналей отпечатков малых размеров, хрупким разрушением поверхности кристаллов у углов отпечатков. Большой вклад в погрешность измерений вносила приборная ошибка микротвердомера ПМТ-3, составляющая ~7%.

На экспериментальных кривых нагружения кристаллических образцов ЛГС не удалось выявить горизонтальных плато и величин нагрузок, соответствующих стационарным значениям микротвёрдости, характеризующим способность материала оказывать сопротивление упругому и пластическому деформированию. Микроиндентирование кристаллов ЛГС с помощью пирамиды Виккерса даже при самых малых нагрузках вызывает разрушение поверхности, т. е. конечную стадию деформации.

Таким образом, исследования микротвёрдости по методу Виккерса монокристаллов ЛГС различной кристаллографической ориентации показали, что традиционный метод испытания на вдавливание с помощью прибора ПМТ-3 не позволяет точно определять величину микротвёрдости таких твёрдых и хрупких материалов как монокристаллы группы лангасита.

Относительное изменение H_V от образца к образцу часто лежит в пределах погрешности измерения микротвёрдости на приборе ПМТ-3, что не позволяет оценить полярную и ретикулярную анизотропию механических свойств пьезокристаллов группы ЛГС.

На рис. 12 представлены результаты исследования микротвёрдости по Виккерсу ионных кристаллов KCl.

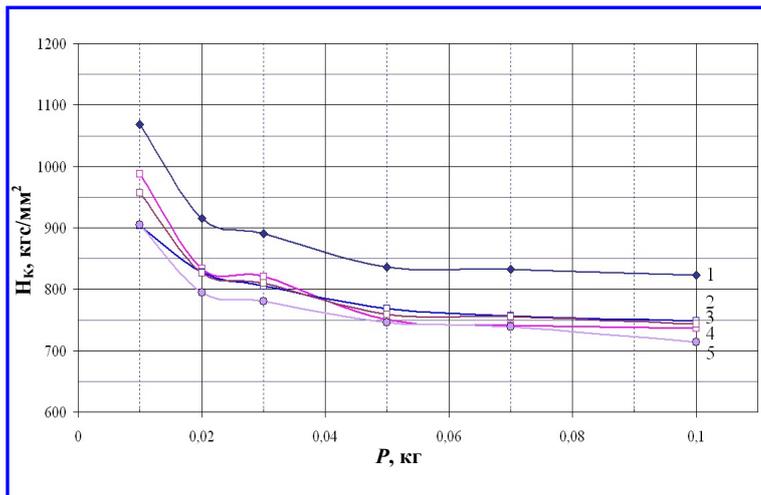


Рис. 14. Кривые нагружения для плоскостей [10.0] (1), [11.0] (2 – 4), [00.1] (5) кристаллов ЛГС, построенные по результатам измерения H_K на приборе Tukon-2100

Измерения микротвёрдости на автоматическом микротвердомере Tukon-2100

Измерение микротвёрдости по методу Кнупа и исследование анизотропии механических свойств пьезоэлектрических монокристаллов группы ЛГС, ионных и полупроводниковых кристаллов при помощи микротвердомера Tukon-2100 (Instron – Wilson Wolpert) проводились с использованием стандартного ромбического индентора Кнупа (рис. 13).

Образцами для исследований служили полированные пластины монокристаллов ЛГС и ЛГТ различной кристаллографической ориентации, выращенных по методу Чохральского в различных атмосферах роста и с различным содержанием примеси.

Величина нагрузки, прикладываемой на индентор для исследования анизотропии микротвёрдости, определялась экспериментально для каждого образца с помощью кривых нагружения (рис. 14).

Оптимальная нагрузка, соответствующая стационарному значению H_K , выбиралась в начале горизонтального участка на графике зависимости $H_K(P)$ и составляла 0,020 – 0,025 кг. Время приложения нагрузки на индентор согласно стандартной методике [18] составляло 11 с, время выдержки под нагрузкой – 3 с.

Исследования показали, что соединения ЛГС обладают ретикулярной анизотропией твёрдости. Установлено, что величина микротвёрдости

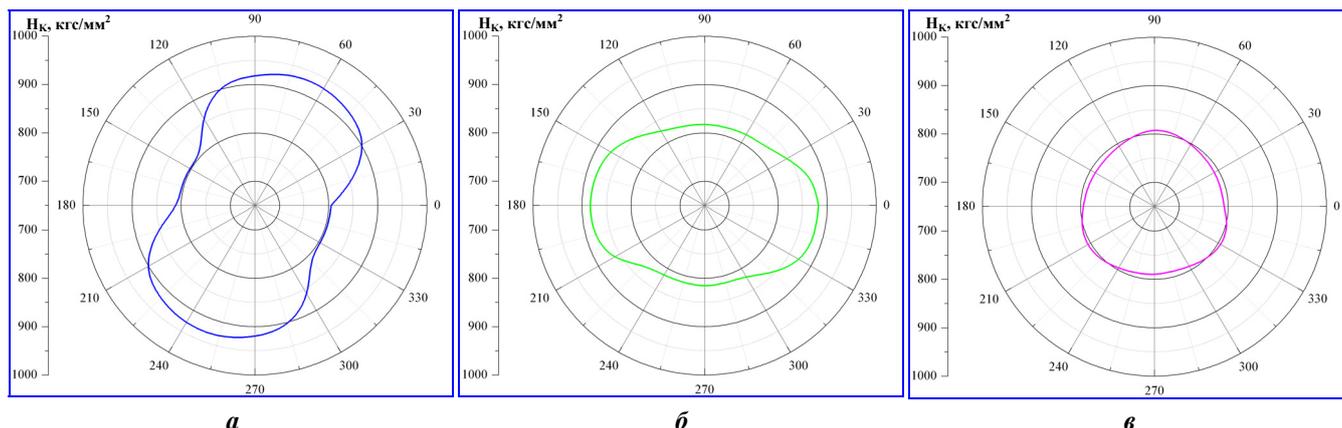


Рис. 15. Полярная анизотропия микротвёрдости на плоскостях X- (а), Y- (б) и Z-срезов (в) кристалла ЛГС

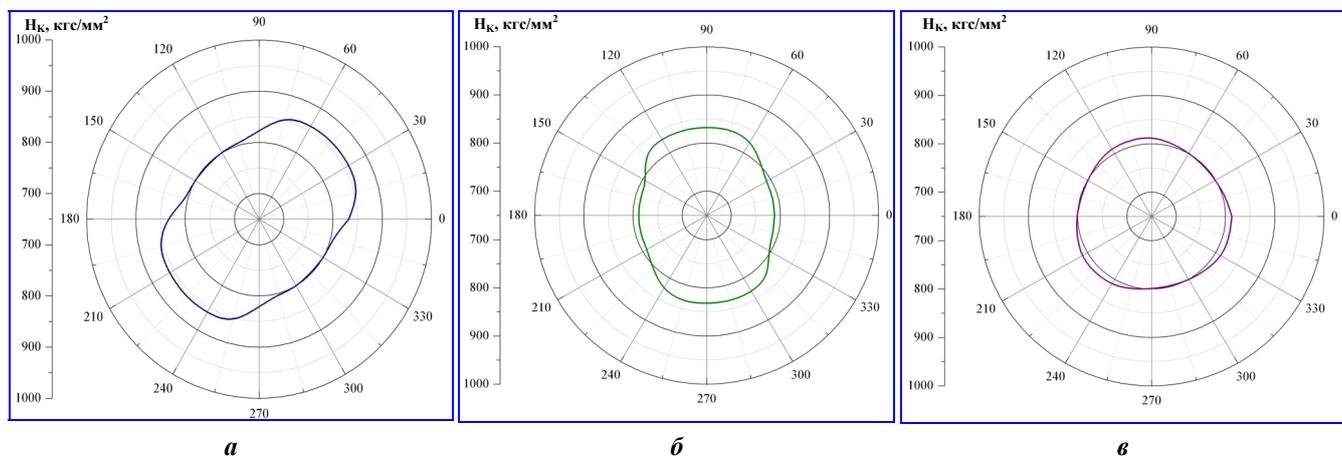


Рис. 16. Полярная анизотропия микротвёрдости на плоскостях X- (а), Y- (б) и Z-срезов (в) кристалла ЛГТ

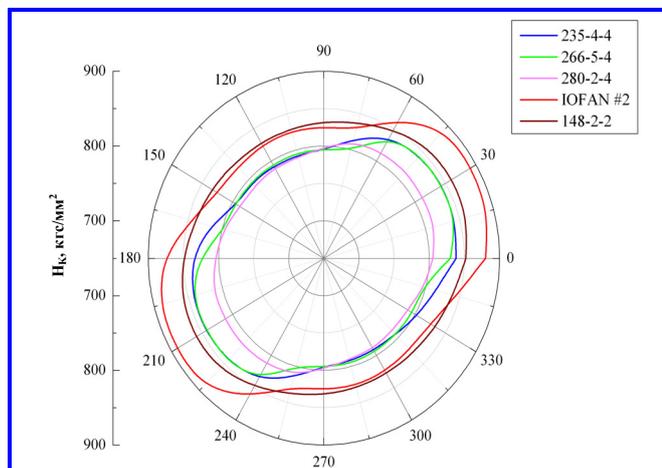


Рис. 17. Зависимость микротвёрдости от направления на плоскостях X-срезов кристаллов ЛГТ, полученных при различных условиях роста

по Кнупу монокристаллов ЛГС составляет 900 кг/мм^2 для X-среза, 820 кг/мм^2 для плоскости $[11.0]$ и 780 кг/мм^2 для Z-среза.

Анизотропия твёрдости ЛГС обусловлена особенностями структуры кристаллов, которая выстраивается путём наложения плотноупакованных

плоскостей в направлении оси Z. В наиболее плотноупакованной плоскости, где межатомные расстояния минимальны, достаточно легко происходит перестройка структурных элементов и скольжение дислокаций, вследствие этого Z-срез кристаллов ЛГС обладает наименьшей твёрдостью.

Исследование зависимости микротвёрдости от направления (полярной анизотропии твёрдости) проводили на плоскостях $[10.0]$, $[01.0]$ и $[00.1]$ кристаллов ЛГС и ЛГТ методом статического вдавливания индентора Кнупа при повороте образцов с шагом азимута $\sim 15^\circ$. Нагрузка, прикладываемая на индентор, составляла $0,020 \text{ кг}$. Исследования показали, что с изменением положения кристаллов группы ЛГС относительно неподвижного индентора наблюдается периодическое изменение величины H_k от минимального до максимального значения. Это значит, что на плоскостях X-, Y- и Z-срезов как монокристаллов ЛГС, так и ЛГТ обнаружена полярная анизотропия микротвёрдости (рис. 15, 16).

Величина H_k зависит от вида искажения кристаллической решётки образца, преобладающего в направлении, вдоль которого располагается длинная диагональ индентора. Минимальное значение микротвёрдости

соответствует такому положению монокристалла относительно индентора, когда происходит поворот и растяжение химических связей, и их разрыв облегчён.

Высокая чувствительность метода измерения микротвёрдости материалов при помощи автоматического микротвердомера Tukon-2100 позволяет точно определять и сравнивать величины твёрдости как кристаллов, принадлежащих к различным классам материалов, так и монокристаллов, принадлежащих к одной группе, но полученных при различных условиях роста (рис. 17, 18). Данные, представленные на рис. 18, б, также наглядно иллюстрируют корреляцию значений H_K с величиной энергии связи кристаллической решётки – чем она выше, тем выше значения микротвёрдости кристалла, т. е. величина H_K уменьшается с ростом ионных радиусов атомов кристалла.

В работах [19, 20] была установлена корреляция лазерной стойкости монокристаллов, применяемых в силовой ИК-оптике, с их фундаментальными характеристиками и, в частности, энергией кристаллической решётки.

Возможно, что методы измерения микротвёрдости кристаллов могут быть использованы также и для качественного сравнения их стойкости к лазерному воздействию.

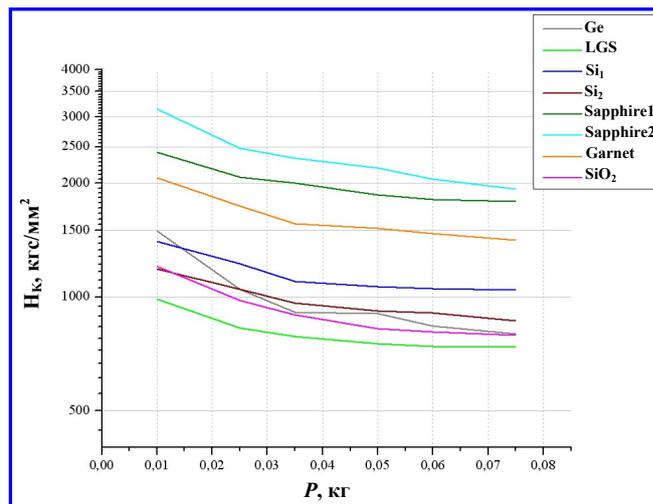
Заключение

Таким образом, проведённые исследования позволяют сделать следующие выводы.

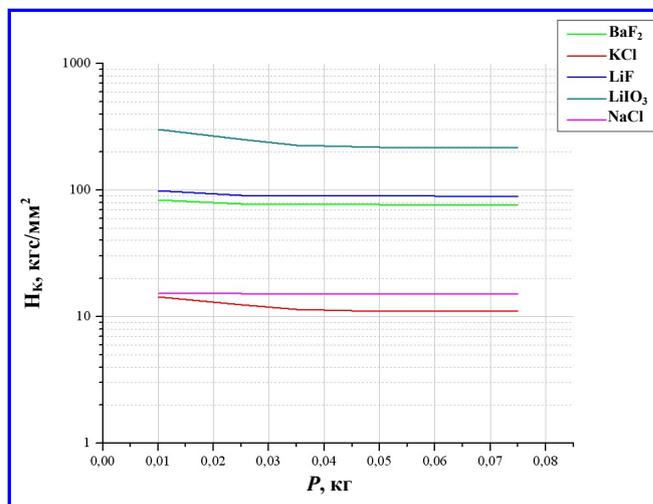
Обнаружена полярная анизотропия микротвёрдости на плоскостях X-, Y- и Z-срезов монокристаллов группы ЛГС и ЛГТ.

Результаты исследований механических свойств диэлектрических, полупроводниковых и ионных кристаллов по методу микровдавливания позволяют утверждать, что традиционные методы измерения микротвёрдости на неавтоматизированных приборах, например типа ПМТ-3, с использованием квадратной пирамиды Виккерса не могут применяться при исследованиях физико-механических свойств перспективных материалов акустоэлектроники. Относительное изменение микротвёрдости, наблюдаемое при исследованиях с помощью ручных микротвердомеров, сопоставимо с погрешностью измерений (10 – 15 %), что не позволяет определять величину H и исследовать её зависимость от ориентации структуры монокристалла.

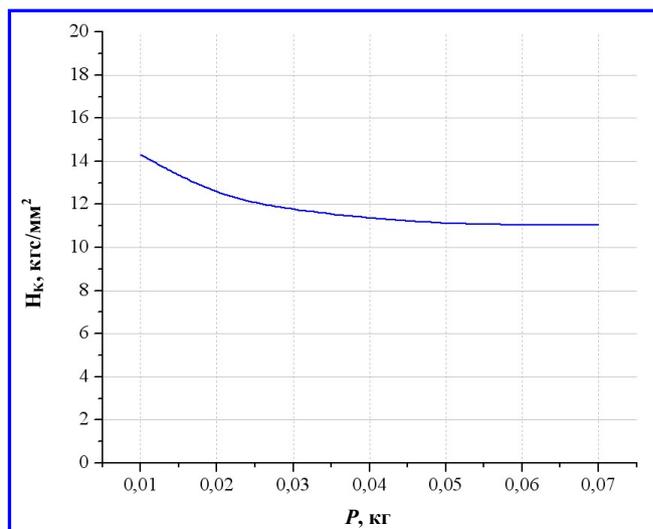
Пьезоэлектрические монокристаллы, применяемые в современных акустоэлектронных устройствах, являются твёрдыми и хрупкими материалами, обладающими сильной анизотропией физических свойств. При исследовании их механических характеристик необходимо предварительное построение графиков



а



б



в

Рис. 18. Кривые нагружения для ионных и полупроводниковых монокристаллов (а), щелочно-галогидный кристалл (б) и монокристаллов KCl (в)

зависимости микротвёрдости от нагрузки при помощи автоматизированного комплекса с возможностью статистической обработки результатов измерений, например типа Tukon-2100, с использованием ромбического индентора Кнупа. Абсолютным значением микротвёрдости для данного кристаллографического направления является величина H , соответствующая горизонтальному участку кривой нагружения, а нагрузка, при которой H достигает стационарного значения, является оптимальной для исследования анизотропии механических свойств материала.

Помимо построения нагрузочной кривой, методика измерения микротвёрдости анизотропных монокристаллов должна включать в себя исследование изменения величины H в зависимости от ориентации кристаллической структуры (полярная и ретикулярная анизотропия), что необходимо для получения сравнимых механических характеристик кристаллов различного химического состава.

Литература

1. О распределении величины микротвёрдости по глубине образца / А. Б. Герасимов, Г. Д. Чирадзе, Н. Г. Кутивадзе [и др.] // Физика твёрдого тела. – 1999. – Т. 41. – № 7. – С. 1225 – 1227.
2. Особенности деформации щёлочно-галоидных кристаллов под действием сосредоточенной нагрузки / З. К. Саралидзе, М. В. Галусташвили, Д. Г. Дрияев // Физика твёрдого тела. – 1999. – Т. 41. – № 11. – С. 1999 – 2003.
3. Подвижность дислокаций в кристаллах LiF, облучённых высокоэнергетическими электронами / А. К. Малик, И. М. Неклюдов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2003. – № 3. – С. 44 – 46.
4. Определение трещиностойкости хрупких материалов с помощью метода непрерывного вдавливания индентора / М. Ю. Литвинов, В. Н. Скворцов, В. П. Алехин [и др.] // Материалы электронной техники – 2001. – № 3. – С. 13 – 15.
5. Анизотропия и масштабный эффект в микротвёрдости кристаллов сверхпроводящих фаз на основе висмута / В. Н. Осипов, В. Н. Гурин, Л. И. Деркаченко [и др.] // Физика твёрдого тела. – 2000. – Т. 42. – № 5. – С. 850 – 853.
6. Последствие при испытании корунда на микротвёрдость / Ю. Г. Носов, Л. И. Деркаченко // Журнал технической физики. – 2003. – Т. 73. – № 10. – С. 139 – 142.
7. Анизотропия микротвёрдости и плотность атомов в элементарном объёме идентичности кристаллов / В. Н. Гурин, М. М. Корсукова, Л. И. Деркаченко // Физика твёрдого тела. – 1998. – Т. 40. – № 3. – С. 481 – 486.
8. Влияние нейтронного облучения на микротвёрдость арсенида галлия / З. В. Джибути, Н. Д. Долидзе, Н. Сихуашвили [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т. 30. – № 17. – С. 45 – 47.
9. Исследование физической природы фотомеханического эффекта / А. Б. Герасимов, Г. Д. Чирадзе, Н. Г. Кутивадзе // Физика и техника полупроводников. – 2001. – Т. 35. – № 1. – С. 70 – 74.
10. Прямое наблюдение эволюции пластических свойств стеклообразных полупроводников при облучении светом / М. Л. Трунов // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т. 30. – № 20. – С. 49 – 54.
11. О применении метода микротвёрдости для исследования эффекта дальнего действия в твёрдых телах / Д. И. Тетельбаум, А. Ю. Азов // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. Серия Физика твёрдого тела. – 2001. – № 2. – С. 120 – 130.
12. Фоточувствительность механических свойств металлов как проявление эффекта дальнего действия / Д. И. Тетельбаум, Е. В. Курильчик, А. Ю. Азов [и др.] // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. Серия: Физика твёрдого тела. – 2003. – № 1. – С. 194 – 204.
13. Боярская Ю. С. Физика процессов микроиндентирования / Ю. С. Боярская, Д. З. Грабко, М. С. Кац. – Кишинев: Штиинца, 1986. – 294 с.
14. Боярская Ю. С. Деформирование кристаллов при испытаниях на микротвёрдость / Ю. С. Боярская. – Кишинев: Штиинца, 1972. – 245 с.
15. Казанцев С. Г. Анизотропия микротвёрдости кристаллов нелинейной оптики / С. Г. Казанцев, Т. Н. Овчаренко // Тезисы докладов симпозиума «Лазеры на парах металлов». Лоо, 22 – 26 сентября 2008. – Ростов-на-Дону: РГУ, 2008. – С. 46.
16. Боярская Ю. С. Актуальные проблемы физики микровдавливания / Ю. С. Боярская. – Кишинев: Штиинца, 1989. – 195 с.
17. Хрущёв М. М. Микротвёрдость, определяемая методом вдавливания / М. М. Хрущёв, Е. С. Беркович. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1943. – 193 с.
18. Прибор для испытаний на твёрдость Tukon® 2100. Руководство серии 2100 (Instron) // Компания «Wilson Wolpert Европа». – 2007. – 86 с.
19. Казанцев С. Г. Лазерная стойкость перспективных материалов силовой ИК-оптики. Часть I. Механизмы повреждения материалов силовой ИК-оптики / С. Г. Казанцев // Оптика атмосферы и океана. – 2003. – Т. 16. – № 4. – С. 390 – 397.
20. Казанцев С. Г. Перспективные материалы проходной оптики мощных ИК-лазеров / С. Г. Казанцев // Ruphys news. Online journal of the United Physical Society of the RF. – Vol. 1. – 2005.

Поступила в редакцию 18.08.2011

Сергей Геннадьевич Казанцев, д-р техн. наук, заместитель генерального директора – генерального конструктора, т. (495) 366-12-01.

Татьяна Николаевна Овчаренко, аспирантка, заместитель начальника лаборатории, т. (495) 366-28-38.

E-mail: vniiem@vniiem.ru.