

ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

doi: 10.51639/2713-0568_2024_4_1_27

УДК 548.55, 544.227, 544.22

ГРНТИ 29.19.13, 31.15.17

ВАК 01.04.18, 02.00.21

Исследование микротвёрдости оптических материалов на основе твёрдых растворов системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}\text{-AgI}$

Щукина А. А., Барыкина С. Е., Воробьева Д. А., Пестерева П. В., Салимгареев Д. Д.,
Южакова А. А., Львов А. Е., * Жукова Л. В.

*Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б. Н. Ельцина, 620062, Екатеринбург, Россия*

email: fisher-alexa@mail.ru, barykina.sof@gmail.com, dariavorobiova111@gmail.com,
p.v.pestereva@urfu.ru, d.d.salimgareev@urfu.ru, a.a.lashova@urfu.ru, a.e.lvov@urfu.ru,
*l.v.zhukova@urfu.ru

Оптические материалы на основе системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}\text{-AgI}$ обладают широким диапазоном пропускания, относительно низким показателем преломления, высокой фото- и радиационной стойкостью, негигроскопичностью и пластичностью, однако механические свойства, такие как микротвёрдость, ранее не были изучены. В данной работе было проведено исследование микротвёрдости по Виккерсу пяти составов образцов на основе монокристаллов 4, 8, 12, 16 и 20 мол. % AgI в $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ и составов (20, 33 мол. % AgI в $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$) на основе двухфазной оптической керамики. В монокристаллах с увеличением содержания AgI в твёрдом растворе $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ наблюдается рост значений микротвёрдости от 19,33 до 33,97, в оптической керамике – уменьшение от 33,83 до 29,52. Максимальное значение микротвёрдости для монокристаллов системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}\text{-AgI}$ составляет 33,97 в образце 16 мол. % AgI в твёрдом растворе $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$, минимальное – 19,33 для 4 мол. % AgI в твёрдом растворе $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$. Полученные данные о микротвёрдости позволяют изготавливать по методу горячего прессования оптические изделия, а также получать инфракрасные световоды методом экструзии.

Ключевые слова: галогениды серебра, микротвердость, монокристаллы, оптическая керамика

Введение

Оптические материалы на основе галогенидов серебра привлекательны для научного сообщества и оптоэлектронной промышленности за счёт исключительных оптических свойств (широкого диапазона пропускания, относительно низкого, в сравнении с халькогенидными стеклами, показателя преломления, высокой фото- и радиационной стойкости, негигроскопичности и пластичности), позволяющих изготавливать на их основе оптические изделия, включая волоконную оптику, широкого назначения. Важными характеристиками твёрдых растворов на основе галогенидов серебра являются их

механические свойства, такие как модуль упругости, коэффициент теплового расширения, температуры плавления и твёрдость, информация о которых оказывает существенное влияние на технологию изготовления оптических изделий, особенно инфракрасных световодов. Последнее из перечисленных свойств – твёрдость материала, зависит от многих факторов, включая упругие свойства, предел текучести, хрупкость, а также от приложенной нагрузки [1]. В случае твёрдых растворов на основе галогенидов серебра механические свойства характеризуются микротвёрдостью, которая отражает способность материала сопротивляться упругой и пластической деформации при взаимодействии с другим телом из более твёрдого материала (индентора) [2], а также оказывает сильное влияние на качество получаемого оптического изделия, включая окна, линзы и световоды, которые находят широкое применение в ИК-спектроскопии, тепловидении, космических исследованиях, лазерной промышленности и волоконной оптике.

В настоящее время известна микротвёрдость лишь некоторых галогенидов серебра, которая была определена по методу Кнупа и составила для AgCl – 9,5, для AgBr – 7, для твёрдого раствора $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ (называемый КРС-13) – 17 [3, 4], либо по методу Мосса, которая в случае AgI равна 2,5 [5]. Твёрдый раствор $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ показал значительно более высокие значения микротвёрдости, в сравнении с индивидуальными галогенидами серебра, такими как AgCl и AgBr , что связано с механизмом твёрдорастворного упрочнения [6, 7], наблюдающемся при образовании твёрдых растворов замещения. Для вновь полученных соединений галогенидов серебра [8], как и для твёрдых растворов системы $\text{AgCl}-\text{AgBr}$, микротвёрдость не исследовалась, что делает её изучение актуальной задачей оптического материаловедения. Помимо прочего важным является проведение статистически полного, подробного исследования ряда составов твёрдых растворов галогенидсеребряных систем, поскольку оно позволяет обнаружить взаимосвязь между микротвёрдостью материала и его составом, получить объективные фундаментальные данные и прогнозировать механические свойства промежуточных соединений. Дополнительно важное прикладное значение исследования микротвёрдости связано с разработкой технологии изготовления оптических изделий на основе твёрдых растворов галогенидов серебра, особенно волоконной оптики, что обосновано процессами горячего прессования и экструзии, на параметры которых микротвёрдость оказывает непосредственное влияние.

Данная работа посвящена исследованию микротвёрдости новых оптических материалов, а именно монокристаллов и оптической керамики на основе системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}-\text{AgI}$. Поскольку образование твёрдых растворов замещения приводит к увеличению прочности, а йодид серебра обладает высокой твёрдостью, изучение монокристаллов и оптической керамики указанной системы представляет высокую теоретическую и прикладную значимость. Исследование микротвёрдости твёрдых растворов системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}-\text{AgI}$ проводится как для монокристаллов, так и для оптической керамики по методу Виккерса со статистической обработкой данных.

Первый раздел: Монокристаллы и оптическая керамика на основе твёрдых растворов системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}-\text{AgI}$

Твёрдые растворы системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}-\text{AgI}$ были получены коллективом научной лаборатории «Волоконных технологий и фотоники» Уральского федерального университета. Ранее авторами [8] была изучена фазовая диаграмма системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}-\text{AgI}$, по которой были определены область гомогенности, где возможен рост монокристаллов, и гетерогенности, подходящей для синтеза оптической керамики. В соответствии с фазовой диаграммой авторами [8] были получены монокристаллы состава

4, 8, 12, 16, 20 мол. % AgI в $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ и оптическая керамика состава 20 и 33 мол. % AgI в $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$. Из состава 20 мол. % AgI в $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ было получено три типа оптических материалов. Состав 20 мол. % AgI в $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ был синтезирован различными методами, что позволило получить на его основе как монокристалл, так и оптическую керамику [8]. Из синтезированных образцов по методу горячего прессования [9] была изготовлена серия плоскопараллельных пластин диаметром 10...17 мм, толщиной 350 ± 5 мкм. Данные пластины обладают высокой плоскопараллельностью и низкой шероховатостью поверхности, что обеспечивается применяемой оснасткой [10, 11]. Для исследования микротвёрдости материалов были использованы полученные плоскопараллельные пластины, поскольку они обладают необходимым качеством поверхности и оптимальными геометрическими параметрами.

Второй раздел: Измерение микротвёрдости по методу Виккерса

Из всех существующих методов измерения твёрдости [1] метод Виккерса является наиболее простым, экспрессным и универсальным. В связи с этим для исследования микротвёрдости была использована установка ПМТ-ЗМ, ЛОМО (Россия), реализующая метод Виккерса.

Для проведения исследования микротвёрдости оптических материалов установка ПМТ-ЗМ была откалибрована путём определения числа твёрдости кристалла поваренной соли (NaCl) при приложенной нагрузке от 0,0196 до 4,9 Н. Прибор был откалиброван по стандартным нагрузкам прибора – 20, 50, 100, 200, 500 г. Полученные для NaCl значения соответствовали справочным данным.

Для исследования микротвёрдости галогенидсеребряных материалов была принята нагрузка 100 г (0,98 Н), поскольку она гарантирует получение отпечатка на образцах любого состава и типа материала системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}\text{-AgI}$. Измерение проводилось на образцах монокристаллов состава 4, 8, 12, 16, 20 мол. % AgI в $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ и оптической керамики 20 и 33 мол. % AgI в $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$. Поверхность пластин была очищена и обезжирена с помощью 95 % этилового спирта и безворсовых салфеток. Образцы размещались на подложке прибора таким образом, чтобы индентор ударял в центр образца для получения корректного значения числа твёрдости. Измерение микротвёрдости происходило путём вдавливания алмазной пирамиды с углом при вершине 136° в исследуемый материал под нагрузкой 0,98 Н с выдержкой 15 с. В результате были определены величины диагоналей полученного отпечатка для расчёта числа твёрдости по методу Виккерса.

Микротвёрдость образцов определялась делением нормальной нагрузки, приложенной к алмазному наконечнику, на условную площадь боковой поверхности полученного отпечатка по формуле (1):

$$H_V = 1,8544 \frac{P}{d^2}, \quad (1)$$

где H_V – число микротвёрдости по Виккерсу, гс/мкм²; P – нормальная нагрузка, приложенная к алмазному наконечнику, Н; d – среднее значение длин диагоналей, мкм. Единицы измерения согласуются за счет коэффициента 1,8544 в формуле (1). Согласно действующему ГОСТ 450–76 число микротвёрдости, полученное в гс/мкм², записывают без единиц измерения с указанием нагрузки в ньютонах, например, 33,97 H_V 0,98 (33,97 – число твёрдости; 0,98 – нагрузка). Глубина вдавливания индентора при определении микротвёрдости исследуемых монокристаллов составляет несколько микрометров при нагрузке в 100 г, в связи с чем измерение твёрдости материалов производится в гс/мкм².

По формуле (2) было рассчитано отношение среднего квадратического отклонения длины

диагоналей каждой из десяти пар отпечатков к их среднему арифметическому значению (в дальнейшем называемое коэффициентом вариации), которое не должно превышать 5 %.

$$K = \Delta d / \langle D \rangle, \quad (2)$$

где Δd – отклонение длин диагоналей десяти отпечатков; $\langle D \rangle$ – среднее арифметическое значение диагоналей отпечатка, мкм;

$$\Delta d = \pm \sqrt{\sum_1^{10} (d - \langle d \rangle)^2 / 9}, \quad (3)$$

где $\langle d \rangle$ – среднее значение диагоналей каждого отпечатка, мкм;

$$\langle D \rangle = \sum_1^{10} d_i / 10, \quad (4)$$

где d_i – среднее значение диагоналей отпечатка, мкм.

Третий раздел: результаты измерения микротвёрдости по методу Виккерса

В результате измерения микротвёрдости были получены значения, представленные в таблицах 1 (для образцов на основе монокристаллов) и 2 (для образцов на основе двухфазной керамики), а также погрешности их определения, называемые коэффициентом вариации.

Исходя из полученных данных, представленных в таблицах 1 и 2, была построена зависимость микротвёрдости материалов от их состава, как показано на рисунке 1. В образцах на основе монокристаллов с увеличением содержания AgI в твёрдом растворе $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ наблюдается тенденция к росту значений микротвёрдости, измеренной по методу Виккерса. В оптической керамике, напротив, тенденция к уменьшению значений твёрдости.

Таблица 1

Микротвёрдость монокристаллов системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75} - \text{AgI}$

Содержание AgI в $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$, мол. %	Размер диагоналей $\langle d \rangle$, мкм	Число микротвёрдости $\langle H_v \rangle$, Н	Коэффициент вариации K, %
4	98,0	19,33	2,75
8	83,0	27,00	4,42
12	80,0	28,73	0,71
16	73,0	33,97	1,29
20	78,0	30,43	2,41

Таблица 2

Микротвёрдость двухфазной керамики системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75} - \text{AgI}$

Содержание AgI в $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$, мол. %	Размер диагоналей $\langle d \rangle$, мкм	Число микротвёрдости $\langle H_v \rangle$, Н	Коэффициент вариации K, %
20 (шихта после ТЗКС [8])	77,5	30,82	1,38
20 (механическая)	74,0	33,83	1,80

смесь [8])			
33	79,0	29,52	1,48

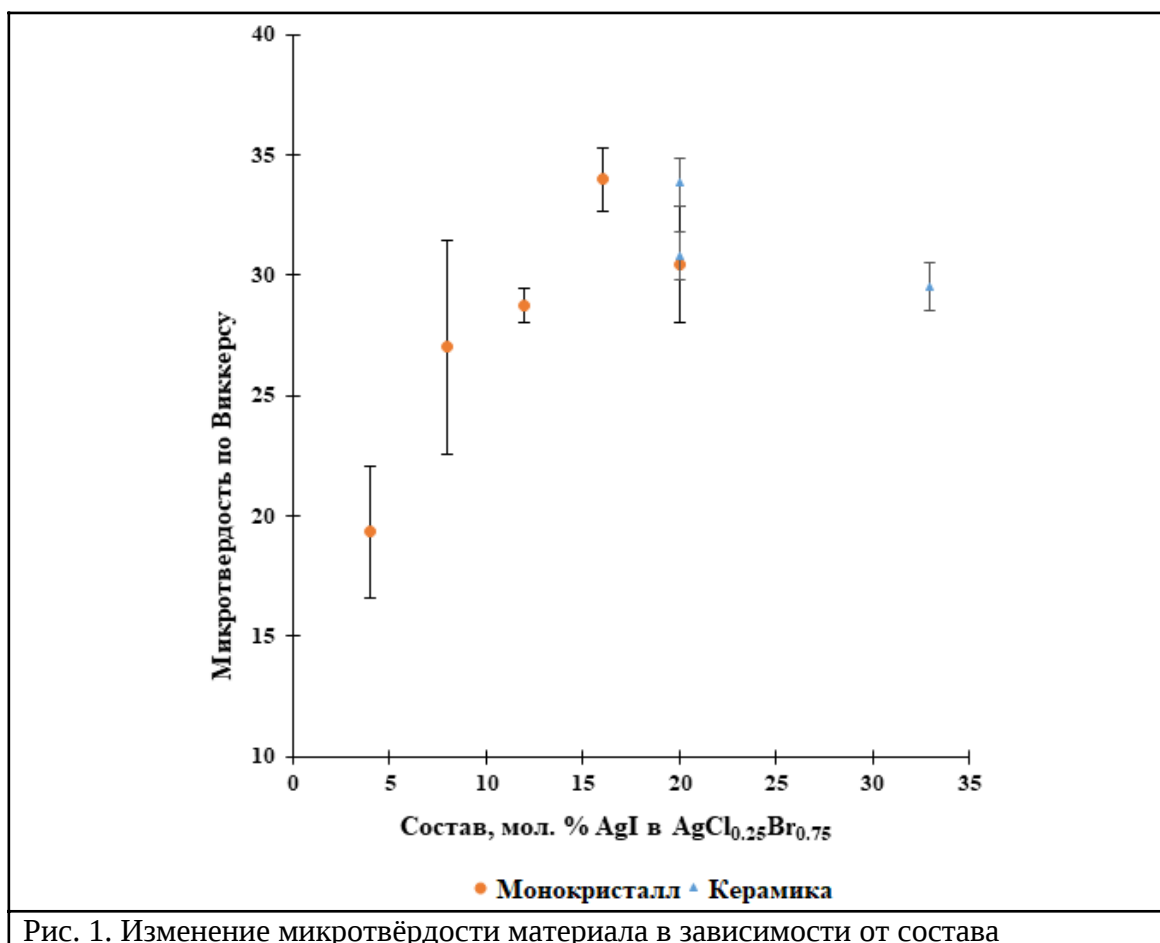


Рис. 1. Изменение микротвёрдости материала в зависимости от состава

Подобное изменение микротвёрдости материала с изменением связано, в первую очередь, со структурой. В случае монокристаллов ключевым фактором, влияющим на зависимость микротвёрдости от состава, является твёрдорастворное упрочнение [6]. С увеличением доли йодида серебра в твердом растворе $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ происходит замена ионов Cl - и Br - на более крупный по атомному диаметру ион йода, что приводит к повышению сопротивления перемещению дислокаций и росту микротвёрдости [12]. Зависимость микротвёрдости от состава является близкой к линейной для монокристаллов внутри области гомогенности фазовой диаграммы системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ -AgI, которая составляет от 0 до 16 мол. % AgI в $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ [8]. Монокристалл 20 мол. % AgI в $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ был получен из области гетерогенности фазовой диаграммы за счёт особых режимов синтеза [8], содержание йодида серебра здесь уже велико, а микротвёрдость данного образца существенно ниже. Это может быть связано как с превышением некоторого критического значения содержания йода, которое уже не приводит к упрочнению материала [6], так и со снижением сопротивления перемещению дислокаций, которое имеет место быть в поликристаллах и нанокерамиках [13].

В случае оптической керамики, которая представляет собой соединение двух кристаллических фаз, с увеличением содержания AgI в твёрдом растворе $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ наблюдается рост доли гексагональной фазы на основе β -AgI в кубической на основе $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$. Рост содержания гексагональной фазы приводит к снижению твёрдости оптической керамики, что также характерно для данных материалов [13].

Максимальное значение микротвёрдости для монокристаллов системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}\text{-AgI}$ составляет 33,97 в образце 16 мол. % AgI в твёрдом растворе $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$, минимальное – 19,33 для 4 мол. % AgI в твёрдом растворе $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$. Это говорит о существенном повышении микротвёрдости материала при легировании йодидом серебра. Тем не менее, в случае оптической керамики значение микротвёрдости также было достаточно высоким от 29,52 до 30,82. Погрешности измерения данного параметра входили в диапазон допустимых значений для галогенидов серебра и не превышают 5 %. Таким образом микротвёрдость монокристаллов и оптической керамики на основе системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}\text{-AgI}$ существенно превышает показатели твёрдого раствора $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$, следовательно, механические характеристики новых материалов являются высокими, что важно для их практического применения.

Заключение

Результаты исследования микротвёрдости монокристаллов и оптической керамики на основе твёрдых растворов системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}\text{-AgI}$ показали достижение высоких значений 29,52...30,82 (при нагрузке 0,98 Н), что указывает на высокие механические свойства и перспективность разработанных материалов для оптики и фотоники [14, 15, 16]. Значение микротвёрдости по Виккерсу для монокристаллов на основе системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}\text{-AgI}$ увеличивается при возрастании доли AgI в твёрдом растворе $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ от 19,33 до 33,97. В случае оптической керамики микротвёрдость уменьшается от 33,83 до 29,52 по мере увеличения содержания AgI в твёрдом растворе $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$. Таким образом, введение йодида серебра в кристаллическую решетку $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ позволяет увеличить микротвёрдость материала с достижением максимальных значений при наибольшем возможном содержании AgI в $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$, согласно области гомогенности фазовой диаграммы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}\text{-AgI}$. Следует отметить, что монокристаллы и оптическая керамика системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}\text{-AgI}$ обладают не только высокой микротвёрдостью, но и являются пластичными, что позволяет использовать их для изготовления по методу горячего прессования оптических изделий [11], а также для получения инфракрасных световодов методом экструзии [17].

Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют, что у них нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами на момент подачи статьи в редакцию журнала, и им ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Государственный контракт № FEUZ-2023-021 (H687.42Б.325/23).

Список литературы

1. Теплоухов А.А. Измерение микротвердости поверхностных слоев материалов: метод. указания. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2017. 35 с.
2. Глазов В.М., Вигдорович В.Н. Микротвердость металлов и полупроводников: 2-е издание. Москва: Изд-во «Металлургия», 1969. 248 с.
3. Примеров Н.В. Синтез и исследование кристаллов $\text{AgCl}_x\text{Br}_{1-x}$, $\text{AgCl}_x\text{Br}_y\text{I}_{1-x-y}$,

легированных редкими элементами, и получение световодов на их основе / Автореф. канд. дис. Екатеринбург: УрФУ, 2010.

4. Воронкова Е.М., Гречушников Б.Н., Дистлер Г.И., Петров И.П. Оптические материалы для инфракрасной техники: Справочное издание / Акад. наук СССР. Ин-т кристаллографии. Москва: Наука, 1965. 335 с.

5. Ксензенко В.И., Стасиневич Д.С. Химия и технология брома, иода и их соединений. Москва: Химия, 1995. 431 с.

6. Иверонова В.И. Близкий порядок в твердых растворах. Москва: Наука, 1989. 255 с.

7. Василевич Ю.В., Неумержицкая Е.Ю., Язневич А.М., Кузменко Н.Н. Измерение твердости металлов. Минск: Белорусский национальный технический университет, 2010. 46 с.

8. Salimgareev D. D., Lvov A. E., Yuzhakova A. A., Shatunova D. V., Pestereva P. V., Yuzhakov I. V., Korsakov A. S., Zhukova L. V. Synthesis and study of single crystals and optical ceramics based on the $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ – AgI system // Applied materials today. 2023. Vol. 32. P. 101809.

9. Жукова Л.В., Корсаков А.С., Врублевский Д.С. Новые инфракрасные материалы: кристаллы и световоды. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. 278 с.

10. Жолобов В.В., Зверев Г.И. Прессование металлов. Москва: Металлургия, 1971. 455 с.

11. Львов А.Е. Технология получения кристаллических материалов системы AgBr – AgI – TlI – TlBr , высокопрозрачных в терагерцовом, инфракрасном и видимом диапазонах / Автореф. канд. дис. Екатеринбург: ХТИУрФУ, 2022.

12. Гуляев А.П. Металловедение: Учебник для вузов. 6-е изд. Москва: Металлургия, 1986. 544 с.

13. Бобылев С.В., Овидько И.А. Зарождение дислокаций на аморфных межзеренных границах в деформируемых нанокерамиках // Физика твердого тела. 2008. Т. 50. вып. 4. С. 617-623.

14. Petrescu M. I. Vickers microhardness and its load size dependence in a group of twelve sulphides and sulphosalts of intermediate hardness // U.P.B. Sci. Bull. Series B. Vol. 62, No. 1-2. 2000.

15. Казанцев С.Г., Овчаренко Т.Н. Полярная и ретикулярная анизотропия микротвердости перспективных пьезоэлектриков // Вопросы электротехники. 2011. Т. 123. С. 41-50.

16. Ozturk O., Gokcen T., Cavdar S., Koralay H., Tasci A. T. A study on nucleation, crystallization kinetics, microstructure and mechanical properties of Ru-Bi partial substituted BSCCO glass ceramics // J Therm Anal Calorim. 2016. Vol. 123, P. 1073-1082.

17. Жукова Л.В., Корсаков А.С., Врублевский Д.С., Шульгин Б.В. Материалы микро- и оптоэлектроники: кристаллы и световоды: учебное пособие. 1-е изд. Москва: Изд-во ЮРАЙТ, 2020. 279 с.

STUDY OF THE MICROHARDNESS OF OPTICAL MATERIALS BASED ON THE $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ – AgI SYSTEM SOLID SOLUTIONS

Shchukina A. A., Barykina S. E., Vorobyova D. A., Pestereva P. V., Salimgareev D. D., Yuzhakova A. A., Lvov A. E., *Zhukova L. V.

Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg

email: fisher-alexa@mail.ru, barykina.sof@gmail.com, dariavorobiova111@gmail.com,
p.v.pestereva@urfu.ru, d.d.salimgareev@urfu.ru, a.a.lashova@urfu.ru, a.e.lvov@urfu.ru,
*l.v.zhukova@urfu.ru

Optical materials based on the $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ – AgI system have a wide transmission range, a relatively low refractive index, high photo- and radiation resistance, non-hygroscopicity, and flexibility, however, mechanical properties such as microhardness have not been studied earlier. In this paper, the Vickers' microhardness of five samples based on single crystals of 4, 8, 12, 16, and 20 mol. % AgI in $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ and compositions 20 and 33 mol.% AgI in $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ based on two-phase optical ceramics were studied. In single crystals, with an increase in the AgI content in the $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ solid solution, a rise in microhardness values from 19.33 to 33.97 is observed. In optical ceramics, with an increase in the AgI content there is a reduction of microhardness from 33.83 to 29.52. The maximum microhardness value for single crystals of the $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ – AgI system is 33.97 in a sample of 16 mol. % AgI in $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$, minimum 19.33 for 4 mol. % AgI in $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$. The received data on microhardness make it possible to manufacture optical products using the hot embossing method, as well as to obtain infrared fibers by extrusion.

Keyword: silver halides, microhardness, single crystals, optical ceramics.

Funding

Funding from Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project FEUZ-2023-0021.

References

1. Teploukhov A.A. Measurement of microhardness of surface layers materials: method. instructions. Omsk: Omsk State Technical University Publishing House, 2017. 35 p.
2. Glasov V.M., Vigdorovich V.N. Microhardness of metals and semiconductors: 2nd edition. Moscow: Publishing house "Metallurgy", 1969. 248 p.
3. Primerov N.V. Synthesis and study of $\text{AgCl}_x\text{Br}_{1-x}$, $\text{AgCl}_x\text{Br}_y\text{I}_{1-x-y}$ crystals doped with rare elements, and production of light guides based on them / Abstract. Ph.D. dis. Ekaterinburg: UrFU, 2010.
4. Voronkova E.M., Grechushnikov B.N., Distler G.I., Petrov I.P. Optical materials for infrared technology: Reference publication / Acad. Sciences of the USSR. Institute of Crystallography. Moscow: Nauka, 1965. 335p.
5. Ksenzenko V.I., Stasinevich D.S. Chemistry and technology of bromine, iodine and their compounds. Moscow: Chemistry, 1995. 431p.
6. Iveronova V.I. Short-range order in solid solutions. Moscow: Nauka, 1989. 255 p.
7. Vasilevich Yu.V., Neumerzhitskaya E.Yu., Yaznevich A.M., Kuzmenko N.N. Measuring the hardness of metals. Minsk: Belarusian National Technical University, 2010. 46 p.
8. Salimgareev D.D., Lvov A.E., Yuzhakova A.A., Shatunova D.V., Pestereva P.V., Yuzhakov I.V., Korsakov A.S., Zhukova L.V. Synthesis and study of single crystals and optical ceramics based on the $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ – AgI system // Applied material today. 2023. Vol. 32. P. 101809.
9. Zhukova L.V., Korsakov A.S., Vrublevsky D.S. New infrared materials: crystals and light guides. Ekaterinburg: Ural Publishing House. Univ., 2014. 278 p.
10. Zholobov V.V., Zverev G.I. Metal pressing. Moscow: Metallurgy, 1971. 455 p.
11. Lvov A.E. Technology for producing crystalline materials of the AgBr – AgI – TlI – TlBr system, highly transparent in the terahertz, infrared and visible ranges / Abstract. Ph.D. dis.

Ekaterinburg: KhTIUrFU, 2022.

12. Gulyaev A.P. Metallurgy: Textbook for universities. 6th ed. Moscow: Metallurgy, 1986. 544 p.
13. Bobylev S.V., Ovidko I.A. Nucleation of dislocations at amorphous grain boundaries in deformable nanoceramics // Solid State Physics. 2008. T. 50. Is. 4. PP. 617-623.
14. Petrescu M.I. Vickers microhardness and its load size dependence in a group of twelve sulphides and sulphosalts of intermediate hardness // U.P.B. Sci. Bull. Series B. Vol. 62, No. 1-2. 2000.
15. Kazantsev S.G., Ovcharenko T.N. Polar and reticular anisotropy of microhardness of promising piezoelectrics // Problems of electrical engineering. 2011. T. 123. PP. 41-50.
16. Ozturk O., Gokcen T., Cavdar S., Koralay H., Tasci A.T. A study on nucleation, crystallization kinetics, microstructure and mechanical properties of Ru-Bi partial substituted BSCCO glass ceramics // J Therm Anal Calorim. 2016. Vol. 123, P. 1073-1082.
17. Zhukova L.V., Korsakov A.S., Vrublevsky D.S., Shulgin B.V. Micro- and optoelectronics materials: crystals and light guides: textbook. 1st ed. Moscow: YURAIT PublishingHouse, 2020. 279 p.