

ФИЗИКА

Научная статья
УДК 5480; 535.6

Анализ механизма пластической деформации плоских микрокристаллов AgBr

Замира Ибрагимовна Карданова¹, Исуф Кадырович Азизов², Адам Музарифович Пшуков³,
Алексей Петрович Савинцев⁴, Аминат Хусеновна Дышекова⁵

^{1,2,3,4,5}Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Кабардино-Балкарская Республика, Нальчик, Россия

¹zam.182@inbox.ru

²kocev.isuf@mail.ru

³pshukov1959@mail.ru

⁴savinal@mail.ru

⁵aminatdh@mail.ru

Аннотация. В работе исследованы условия деформации плоских микрокристаллов бромида серебра и их влияние на структурные и оптические свойства материала. Найдено, что деформация микрокристаллов может существенно изменять интенсивность инфракрасного свечения и параметры кристаллической решётки, что критично для функциональных характеристик устройств.

Ключевые слова: бромид серебра, плоские микрокристаллы, деформация, дефекты Френкеля, ИК люминесценция, рентгеноструктурный анализ, оптическая микроскопия, актиничное освещение

Для цитирования: Карданова З.И., Азизов И.К., Пшуков А.М., Савинцев А.П., Дышекова А.Х. Анализ механизма пластической деформации плоских микрокристаллов AgBr // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, № 2. С. 16–20.

PHYSICS

Original article

Analysis of the plastic deformation mechanism of flat AgBr microcrystals

Zamira I. Kardanova¹, Isuf K. Azizov², Adam M. Pshukov³, Alexey P. Savintsev⁴, Aminat K. Dyshakova⁵

^{1,2,3,4,5}Kabardino-Balkarian State University, Kabardino-Balkarian Republik, Nal'chik, Russia

¹zam.182@inbox.ru

²kocev.isuf@mail.ru

³pshukov1959@mail.ru

⁴savinal@mail.ru

⁵aminatdh@mail.ru

Abstract. The paper studies the deformation conditions of flat microcrystals of silver bromide and their effect on the structural and optical properties of the material. It was found, that the deformation of MCs can significantly alter the intensity of infrared luminescence and the parameters of the crystal lattice, which is critical for the functional characteristics of devices

Keywords: silver bromide, flat microcrystals, deformation, Frankel defects, IR luminescence, X-ray diffraction analysis, optical microscopy, actinic illumination

For citation: Kardanova Z.I., Azizov Is.K., Pshukov A.M., Savintsev A.P., Dyshekova A.Kh. Analysis of the plastic deformation mechanism of flat AgBr microcrystals. *Proceedings Kabardino-Balkarian State University*. 2026;16(2):16–20. (In Russ.).

Введение

Галогениды серебра, в частности бромид серебра (AgBr), занимают особое место в современной фотохимии и материаловедении благодаря уникальным оптическим и люминесцентным свойствам. Микрокристаллы (МК) AgBr широко применяются в производстве фотоэмульсий, оптоэлектронных устройств, и других высокотехнологичных материалов. Особого внимания заслуживают плоские МК AgBr: их структура и свойства во многом определяют функциональные характеристики конечных изделий.

Актуальность исследования обусловлена тем, что деформация плоских МК AgBr может существенно влиять на их оптические и структурные свойства, в частности, на интенсивность инфракрасного (ИК) свечения и параметры кристаллической решётки. Понимание механизмов, вызывающих деформацию МК, необходимо:

- для контроля качества фотоэмульсий;
- оптимизации условий синтеза микрокристаллов с заданными характеристиками;
- разработки новых материалов с улучшенными люминесцентными свойствами;
- прогнозирования стабильности МК AgBr в различных условиях эксплуатации.

Цель работы – выявить условия, при которых происходит деформация плоских микрокристаллов AgBr, и установить связь между этими условиями и изменениями в структуре и люминесцентных свойствах материала.

Методы исследования включали: рентгеноструктурный анализ (определение параметров решётки и межплоскостных расстояний); оптическую микроскопию (наблюдение за формированием и деформацией МК в реальном времени); спектроскопию ИК-люминесценции (анализ свечения и его зависимости от условий синтеза); модельный синтез МК AgBr с контролируемыми параметрами (концентрация реагентов, температура, время выдержки).

Результаты исследований и их обсуждение

Изучая люминесцентные свойства галогенидов серебра [1] автор обнаружил, что плоские МК AgBr имеют люминесцентное свечение в инфракрасной (ИК) области с $\lambda = 760$ нм. Полученные данные показывают зависимость интенсивности полосы ИК свечения от избытка ионов брома в дисперсионной среде и от отношения поверхности к объёму, где отношение диаметра поверхности к толщине h может составлять 10–1000 единиц.

Доказано, что полоса ИК свечения AgBr фотоэмульсионных МК на $\lambda = 760$ нм, является собственной полосой свечения AgBr. При этом центры, ответственные за свечение люминесценции с $\lambda = 760$ нм содержат атомы серебра.

Следует предположить, что большой избыток Br^- ионов при осаждении AgBr МК, особенно в начальной стадии, будет благоприятствовать образованию МК в дисперсионной среде, поверхность которого заряжается отрицательно, стабилизируя огранку $\{111\}$ [2].

Для компенсации избыточного отрицательного заряда поверхности из объёма вытягиваются подвижные Ag^+ -ионы, которые могут локализоваться на поверхностных энергетических уровнях. Такому процессу ничего практически не мешает: во-первых, на поверхности $\{111\}$ имеются незаполненные тетраэдрические пустоты в вершинах которого сидят Br^- (рисунки 1); во-вторых, как видно из рисунка 2, Ag^+ -ионы могут перемещаться по $\{110\}$ плоскостям, так как ионный радиус Ag^+ ($< 1,13$ Å) примерно в два раза меньше расстояния между ближайшими ионами брома в узле кристаллической решётки AgBr ($\Delta l = 2,123$ Å).

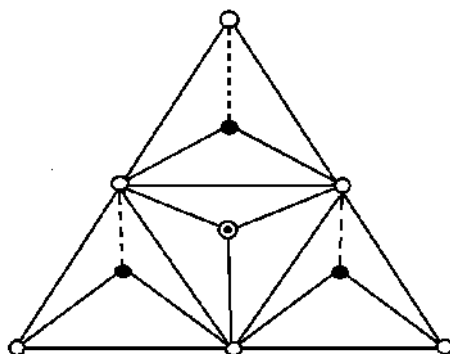


Рисунок 1 – Тетраэдрическая пустота, способная локализовать ион на поверхности {111}

○ – ионы брома первого слоя; ● – ионы серебра второго слоя; ⊙ – ионы брома третьего слоя

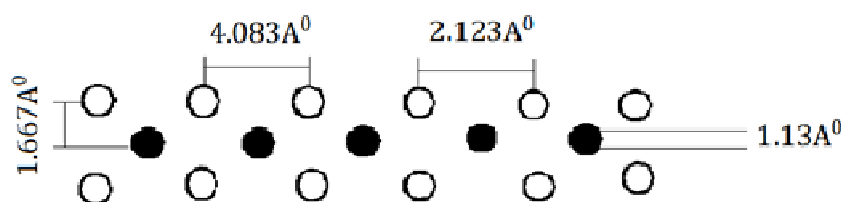
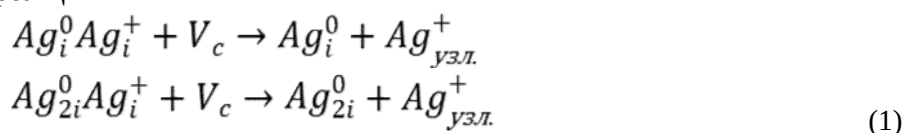


Рисунок 2 – Параметры кристаллической решётки AgBr плоского МК

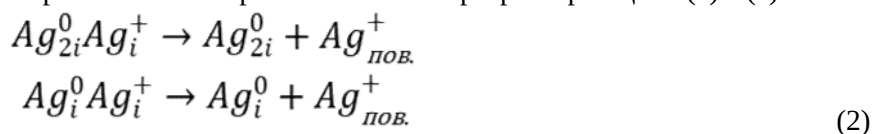
○ – ионы брома; ● – ионы серебра

На самом деле наиболее убедительное объяснение некоторых особенностей динамики решётки AgBr (нарушение соотношения Кочи, смягчения колебательных мод) основано на предположении, что 4-d-оболочки иона серебра подвергается квадрупольной, сигарообразной деформации при взаимодействии Ag^+ -ионов с кристаллическим окружением.

По этим причинам Ag^+ -ионы могут диффундировать на поверхность МК, способствуя тем самым образованию атомов серебра по реакции



Общим результатом нейтрализации отрицательного заряда поверхности межузельными ионами серебра является распад серебряных центров с образованием нейтральных атомов серебра по реакциям (1) и (2)



Из предложенного механизма следует, что любая нейтрализация поверхности AgBr МК приведет к изменению параметров решётки. А также образование Ag^+ -иона и её связывание поверхностью, приводит к возникновению в объёме МК катионной вакансии V_c , то есть образуются дефекты Френкеля. Образование пар Френкеля приводит к изменению параметра решетки [3].

Представляется возможным проверить изложенный механизм дифрактометрическим методом. При этом нужно учесть, что изменение параметра решётки легче проследить на плоских МК AgBr.

В этом методе снималось $Co_{K\alpha}$ излучение от плоских МК AgBr. Результаты рентгеноструктурного анализа представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Усреднённые значения межплоскостных расстояний

Образец	$\alpha(A^0) = \sum_1^n d_i/n; (\pm 5 \cdot 10^{-4} A^0)$			$\alpha(A^0)$	$\frac{\alpha_{200}}{\alpha_{222}} = \sqrt{3}$
	222	200	111		
Плоский AgBr	1,6675	2,8886	3,3355	5,7768	1,7322
Монодисперсн.	1,6669	2,8872	3,3339	5,7745	1,7321

Как видно из таблицы, имеется хорошее соответствие между параметрами решётки в различных кристаллографических направлениях.

Таким образом, изменение параметра решётки AgBr плоского МК можно отнести за счет образования дефектов Френкеля при нейтрализации поверхности кристалла, при котором межузельные ионы серебра вытягиваются в приповерхностную область кристалла.

Существенные изменения параметра решетки плоских МК происходит и при освещении (засветке) МК AgBr актиничным светом [4, 5]

Проведены многочисленные исследования с целью выяснения, при каких условиях могут так сильно деформироваться плоские МК AgBr. Это явления довольно редкое.

Далее проводилась замена двухструнного метода синтеза МК AgBr на модельный. В этом случае 50 мл 1 %-ного азотнокислого серебра в течение 3 мин вливали в 50 мл одно-нормального раствора KBr при температуре 35 °С. Осадок промывали деконтацией и заливали 300 мл 15 %-ного раствора аммиака. Раствор в закрытом сосуде простаивал 1–2 суток при комнатной температуре.

После этого раствор тонким слоем наносили на предметное стекло. Через несколько минут на поверхность стекла оседали крупные МК. Процесс образования МК AgBr наблюдали с помощью оптического микроскопа «Velomel» Карл Цейс. Меняя режим наблюдения с момента нанесения слоев до полного высыхания раствора, обнаружили очень редко деформируемые МК в начале формирования кристаллов.

Так как спектр поглощения AgBr 460–480 нм, то

$$h = \frac{465}{4 \cdot 2,8} = \frac{465}{11,2} = 41,5 \text{ нм},$$

$$h = \frac{475}{2 \cdot 2,8} = \frac{475}{11,2} = 42,4 \text{ нм}.$$

Из экспериментов было установлено, что диапазон толщин МК AgBr, способных эффективно деформироваться, находятся в интервале от 41,5 нм до 42,4 нм. Выявлена роль дефектов Френкеля в изменении параметров решётки и деформации МК, продемонстрировано влияние актиничного освещения на структурную стабильность МК AgBr. Уточнены механизмы диффузии ионов серебра и брома в кристаллической решётке при различных условиях синтеза. Показано, что избыток ионов Br⁻ на стадии осаждения запускает процессы, приводящие к дефектам Френкеля и последующей деформации.

Полученные данные расширяют представления о динамике кристаллической решётки галогенидов серебра и могут служить основой для разработки новых технологических подходов в области фотохимии и материаловедения.

Заключение

Деформация плоских МК AgBr представляет собой комплексный процесс, обусловленный взаимодействием поверхностных зарядовых эффектов, диффузии ионов серебра, образования дефектов Френкеля и фотохимических процессов. Наиболее подвержены деформации кристаллы толщиной 41,5–42,4 нм на начальной стадии роста при избытке ионов Br⁻ в среде.

Полученные результаты расширяют понимание динамики кристаллической решётки галогенидов серебра и могут быть полезны для управления свойствами МК AgBr в практических приложениях (например, в фотоэмульсиях).

Библиография

1. Джеймс Т.Х. Теория фотографического процесса. Л.: Химия, 1980. 672 с.
2. Чибисов К.В. Общая фотография. М., 1984. 448 с.
3. Лиев А.Х. Образование собственных и примесных центров светочувствительности в эмульсионных микрокристаллах бромида серебра: дис...канд. физ.-мат. наук. Нальчик, 1985. 161 с.
4. Forsgard F.G. Silber Bromid Complect in the Mechanism of Ageing Fog // *Potogr. Sciense and Eng.* 1959. V. 3, N 1. P. 23–27.
5. Бреслав Ю.А., Пейсахов В.В., Капчук Л.Я., Анреянов В.В. Механизм образования и свойства Т-кристаллов» // Тез. межд. симп. «Актуальные вопросы физики и химии фотографического процесса». Тбилиси, 1984. С. 8–10.

References

1. James T.H. Theory of the Photographic Process. Leningrad: Chemistry; 1980. 672 p. (In Russ.).
2. Chibisov K.V. General Photography. Moscow: 1984. 448 p. (In Russ.).
3. Liev A.Kh. Formation of Intrinsic and Impurity Photosensitive Centers in Emulsion Microcrystals of Silver Bromide: Dissertation of Cand. Sci. and Mathematics. Nalchik: 1985. 161 p. (In Russ.).
4. Forsgard F.G. Silver Bromid Complex in the Mechanism of Aging Fog. *Potogr. Sciense and Eng.* 1959;3(1):23–27.
5. Breslav Yu.A., Peysakhov V.V., Kapchuk L.Ya., Andreyanov V.V. Mechanism of formation and properties of T-crystals. Abstracts of the int. symp. "Current issues of physics and chemistry of the photographic process". Tbilisi: 1984. pp. 8–10. (In Russ.).