

03

Исследование вольт-амперных характеристик оптических материалов системы AgBr–AgI

© А. Тураби, Н.Н. Акифьева, А.С. Корсаков, Л.В. Жукова[✉], А.А. Южакова,
Д.Д. Салимгареев, Ю.О. Зеленкова

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002 Екатеринбург, Россия

[✉]e-mail: l.v.zhukova@urfu.ru

Поступила в редакцию 22.02.2022 г.

В окончательной редакции 22.06.2022 г.

Принята к публикации 15.07.2022 г.

Инфракрасные (ИК) световоды на основе кристаллов и керамики системы AgBr–AgI прозрачны в среднем ИК диапазоне от 3 до 26 μm , что востребовано для тепловизионной, лазерной техники и спектроскопии. Высокая фото- и радиационная стойкость делает эти материалы особенно привлекательными для решения задач по передаче оптического излучения в агрессивных внешних условиях. Для проектирования оптического оборудования необходима информация об электрических свойствах материала, наиболее полно характеризующихся вольт-амперной характеристикой (ВАХ). В работе рассмотрены изменения ВАХ оптических материалов, полученных в виде пластин толщиной от 0.1 до 1.7 mm, составов от 4 до 76 mol.% AgI в системе AgBr–AgI в зависимости от состава и температуры в диапазоне 298–453 K. Установлено, что увеличение содержания AgI в кристаллических материалах систем AgBr–AgI приводит к снижению электропроводности. Значения удельной проводимости для керамики системы AgBr–AgI на 2–3 порядка выше, чем для кристаллов при аналогичных температурах и приложенных напряжениях. Значения удельной проводимости для керамики находятся на уровне проводимости твердых электролитов. При температуре 463 K фазового перехода $\beta\text{-AgI}-\alpha\text{-AgI}$ в керамике системы AgBr–AgI наблюдается скачок проводимости, что объясняется фазовым переходом $\beta\text{-AgI}-\alpha\text{-AgI}$. Для исследуемого материала до и после электрического пробоя измерены характеристики пропускания ИК излучения. Было установлено, что электрический пробой приводит к ухудшению пропускания более чем на 20% во всем исследуемом спектральном диапазоне от 1.3 до 25 μm . Информация о значениях напряжения пробоя для материалов различного состава важна для проектирования оптических приборов с использованием материалов системы AgBr–AgI, предназначенных для применения в электротехническом оборудовании, в целях обеспечения надежности и безопасности этих приборов. В работе регистрируется факт ухудшения оптических свойств кристаллических материалов системы AgBr–AgI при применении определенной разности потенциалов, а также величина разрушающей разности потенциалов. Следует также отметить, что значение разрушающей разности потенциалов исследуется путем приложения постоянного напряжения, но это значение также является разрушающим и при приложении переменного напряжения аналогичной амплитуды.

Ключевые слова: твердые растворы системы AgBr–AgI, вольт-амперная характеристика, удельная проводимость, пропускание, электрический пробой, ИК кристаллы, ИК керамика.

DOI: 10.21883/OS.2022.10.53623.3311-22

Введение

На сегодняшний день перспективными оптическими материалами для изготовления ИК световодов, окон, линз и других оптических изделий являются кристаллы и керамика на основе системы AgBr–AgI [1,2]. Такие кристаллы и оптическая керамика прозрачны в спектральном диапазоне от 0.46 до 50 μm [1]. Световоды, полученные на основе данных материалов, прозрачны в диапазоне длин волн от 3 до 26 μm [3,4], что соответствует по закону Планка температурам от 966 до 188 K. Таким образом, рассматриваемые оптические материалы могут найти широкое применение в различных областях науки и техники, в том числе в лазерной, эндоскопической и диагностической медицине, удаленном тепловом и спектральном контроле технологического оборудова-

ния. Материалы системы AgBr–AgI обладают высокой фотостойкостью [5], которая позволяет использовать эти материалы без специальных защитных фильтров. Высокая устойчивость к радиационному облучению позволяет использовать эти кристаллические материалы и ИК световоды из них в условиях повышенного ионизирующего излучения до значений дозы 500 kGy, что открывает широкие возможности для внедрения таких оптических материалов в атомно-энергетические [6,7] и космические технологии [8].

Целью настоящей работы является исследование электрических свойств, знание которых необходимо для практического применения кристаллических материалов системы AgBr–AgI в оптических и электрических приборах. Такие приборы предназначены для работы в электромагнитных полях, в частности в качестве датчиков

температуры вместо термоэлектрических преобразователей на высоковольтном оборудовании.

В результате аварий, неблагоприятных природных явлений (молнии) и т. п. возможно появление наведенного напряжения на изделиях из исследуемых материалов при их эксплуатации на высоковольтном оборудовании (напряжение от 10 до 500 kV). Наведенное напряжение на изделиях из материалов с ионной проводимостью могут создавать проводники, находящиеся под высоким напряжением, а также любые высоковольтные электроустановки, находящиеся вблизи устройств, использующих кристаллические материалы системы AgBr–AgI [9–11].

В этих случаях важно знать уровень значений приложенного напряжения, которые вызывают ухудшение свойства передачи ИК волн, для того чтобы правильно спроектировать устройство и его защиту, а также правильно сформулировать параметры основных и дополнительных по влияющим величинам условий работы датчиков.

Результаты исследований электрических свойств образцов из галогенидов серебра представлены в работах авторов настоящей статьи [1], а также других авторов [12–14]. В перечисленных работах электрические свойства галогенидов серебра исследовались в направлении оценки типа проводимости, сами вольт-амперные характеристики (ВАХ) при этом не приводились.

Наиболее полной характеристикой электрических свойств является ВАХ. ВАХ демонстрирует характер проводимости (проводник, полупроводник, диэлектрик, материал с ионной проводимостью) и потенциал разрушения материала (напряжение пробоя). Используя ВАХ, можно изучать зависимость проводимости от различных факторов: чистоты и состава материала, фазового состояния, температуры и т. д. Эти данные могут потребоваться, например, при построении спектральных волоконно-оптических датчиков, работающих в широком диапазоне длин волн от 3 до 26 μm и позволяющих контролировать химический состав трансформаторного масла, а также волоконных датчиков температуры для контроля состояния высоковольтных трансформаторов, генераторов электростанций и т. д., при работе вблизи которых при определенных условиях возникают электромагнитные помехи с величиной наведенного напряжения, которое может составлять десятки вольт [9–11].

В настоящей работе изучались оптические материалы состава от 4 до 76 mol.% AgI в системе AgBr–AgI. Исследовалась зависимость ВАХ материалов от состава и температуры для тонких пластин толщиной 0.5 и 1.7 mm. Также в последние годы в научной лаборатории „Волоконные технологии и фотоника“ УрФУ авторским коллективом подробно изучаются фазовые диаграммы материалов системы AgBr–AgI (результаты исследования фазового состояния этих систем приведены в работе [1]). Поэтому представляло интерес в рамках настоящей работы для системы AgBr–AgI провести сравнение результатов исследования ВАХ с результатами исследования фазовой диаграммы. Была

также определена удельная проводимость материалов системы AgBr–AgI в сравнении с удельной проводимостью сверхионных материалов α -Ag-I [12,13].

Материалы и методы

Для исследования ВАХ образцы оптических материалов в виде пластин оптических материалов получали методом горячего прессования на ручном гидравлическом прессе Specac 15 Ton (рис. 1, а), используемом для создания плоских поликристаллических пластин. Нагрузка на образец площадью $\sim 78 \text{ mm}^2$ составляла 6 t [15]. Для прессования образцы зажимали между полированными пластинами из нержавеющей стали, а саму оснастку нагревали. Режим прессования пластин показан на рис. 1, d.

В процессе прессования исследуемый образец нагревался до температуры 393 K и выдерживался в течение 20 min (плато на рис. 1, d). Это было необходимо для того, чтобы образец успел прогреться, так как недостаточный прогрев приводит к растрескиванию при приложении нагрузки. По окончании прогрева прикладывалась нагрузка в 6 t, которая поддерживалась в течение одной минуты. Затем полученная пластина охлаждалась до комнатной температуры. Для измерения электрических характеристик кристаллов и керамики системы AgBr–AgI использовалась двухэлектродная (двухконтактная) схема, показанная на рис. 2.

В этом способе напряжение прикладывается к образцу, заключенному между двумя электродами. Для создания электрической цепи в данном эксперименте использовались обратимые электроды, обратимость которых определяется в отношении токопроводящих ионных (в твердых электролитах) и электронных носителей, т. е. сам электрод „содержит“ проводящий ион. Для системы AgBr–AgI материалом обратимых электродов является серебро.

Измерительная схема содержит выпрямитель, защитный и измерительный элементы, необходимые для защиты оборудования и обеспечения многократного повторения эксперимента. В ходе эксперимента через пластину пропускали постоянный ток [15]. Текущие параметры, а именно сила тока и приложенное напряжение, регистрировали с помощью микроамперметра В7-58 с широким диапазоном измерений от 1 μA до 10 A и вольтметра Mastech с диапазоном измерений от 1 μV до 600 V, подключенных к схеме так, как показано на рис. 2. Предварительный тест этой экспериментальной установки описан авторами в предыдущей статье [15]. Испытания проводили на образцах системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$. Результаты измерений, полученные на этих образцах, были соотнесены с известными экспериментальными данными авторов [14], корреляция массивов данных, представленных на рис. 3, составила 0.96.

Нагревательные элементы, показанные на рис. 2, использовались для изучения температурной ВАХ. Исследуемый материал был зажат кольцевыми электродами,

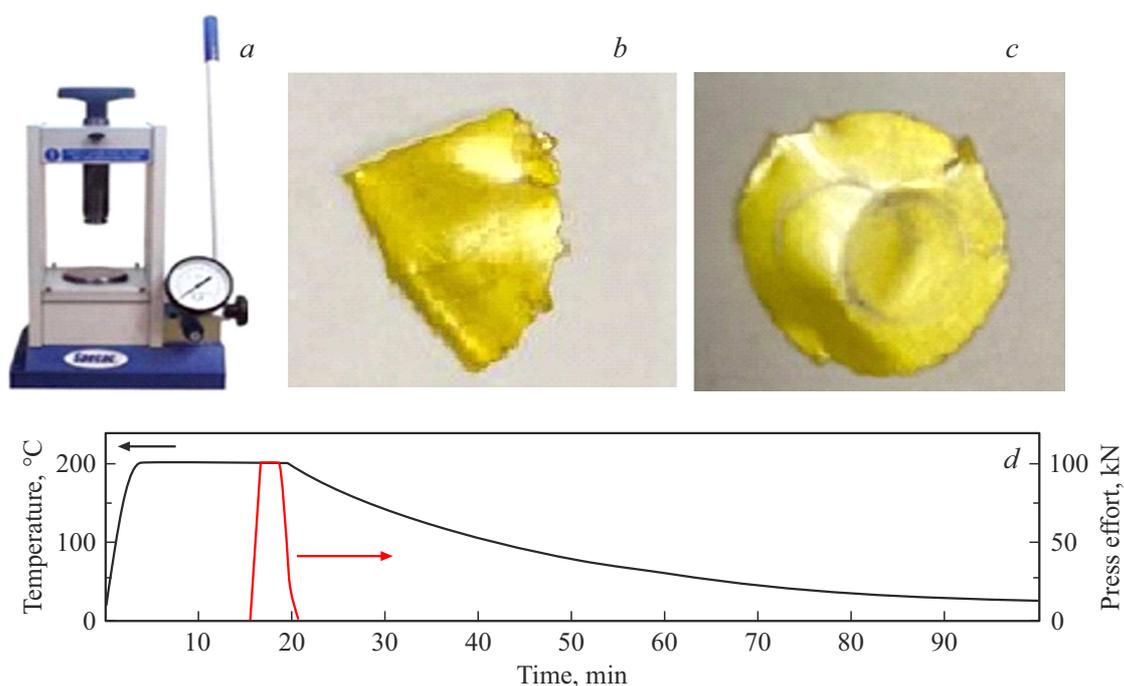


Рис. 1. Ручной гидравлический пресс Spesac 15 Ton: (a) внешний вид установки; (b) образец поликристаллической пластины состава $\text{AgBr}_{0.96}\text{I}_{0.04}$ толщиной 0.5 mm до и (c) после электрического пробоя; (d) температурные условия и режим нагрузки для прессования пластин.

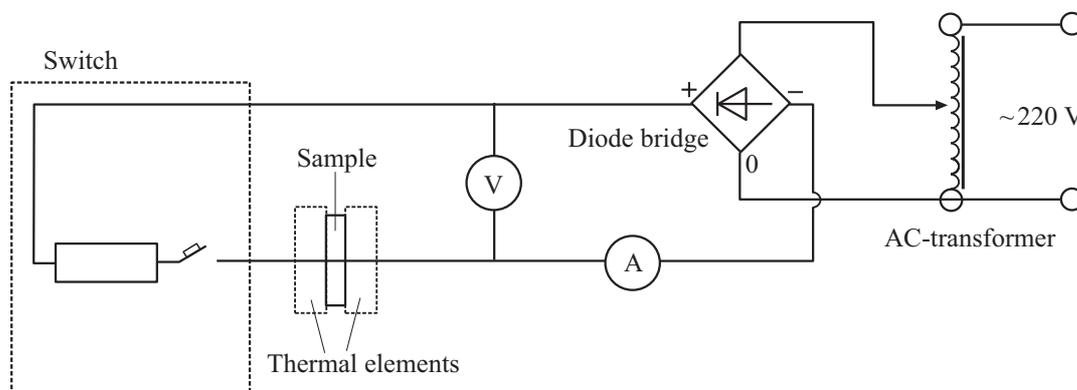


Рис. 2. Схема для измерения ВАХ кристаллов и керамики.

расположенными между двумя нагревательными элементами пресса Spesac 15 Ton. Таким образом, пластина и электроды нагревались до одинаковой температуры, которая поддерживалась с точностью $\pm 1^\circ\text{C}$ с помощью контроллера нагревательных плит серии Atlas. ВАХ измеряли при температурах образца в диапазоне 298–503 K. Выбор температур обусловлен следующими факторами: во-первых, возможными областями применения этих материалов, такими как спектральные и температурные датчики электрического и теплового оборудования; во-вторых, интересом к природе переменного тока в области фазового перехода $\beta\text{-AgI}$ в $\alpha\text{-AgI}$ для керамики [1]. Толщины исследуемых пластин составляли 1.7, 0.5 и 0.1 mm. Для образцов кристаллических

пластин (принцип классификации материалов системы AgBr–AgI на кристалл и керамику будет объяснен далее в настоящей работе) при каждом из выбранных значений температуры подавалось напряжение от 0.6 V до напряжения, при котором наблюдался пробой этой пластины с образованием „серебряного следа“. Пример поверхностной деградации пластины после электрического пробоя показан на фото на рис. 4.

К образцам из керамики при каждом из выбранных значений температуры прикладывалось напряжение от минимального, при котором ток устойчиво фиксируется (для различных составов и толщин образца это от 0.02 до 0.6 V), до напряжения, при котором ток начинает резко возрастать при практически полном отсутствии

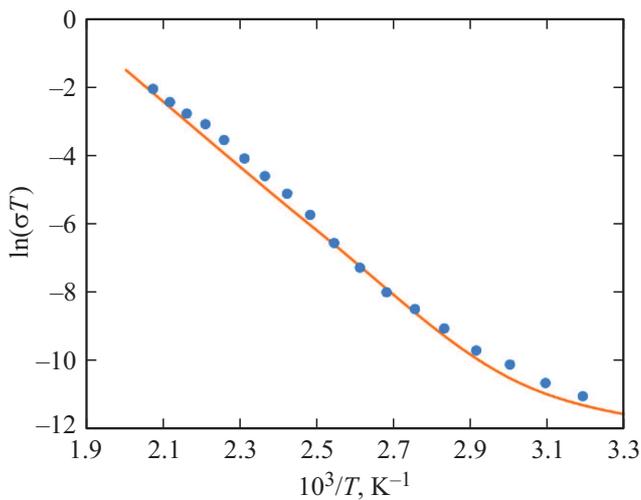


Рис. 3. Сравнение данных авторской группы (точки), полученных двухэлектродным методом, с известными данными [15] (линия) для твердого раствора $\text{AgCl}_x\text{Br}_{1-x}$.

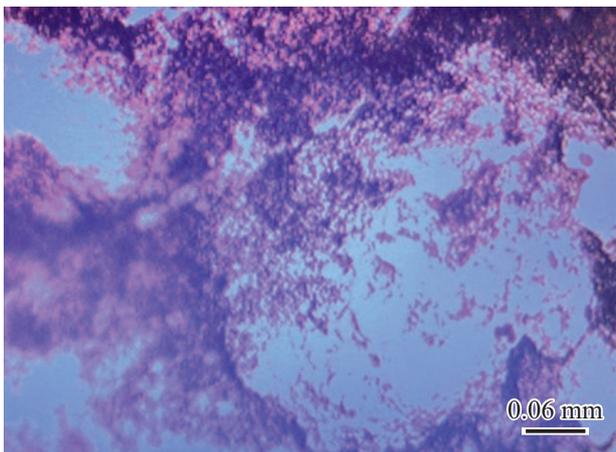


Рис. 4. Фото пластины состава $\text{AgBr}_{0.76}\text{I}_{0.24}$ после электрического пробоя, полученное на оптическом микроскопе с увеличением 200х.

увеличения приложенного напряжения. Следует отметить, что после резкого увеличения тока керамические пластины оставались неповрежденными, и характеристика воспроизводилась после повторения эксперимента.

При исследовании зависимости ВАХ материалов от температуры напряжение прикладывалось к пластинам ступенчато, с выдержкой по меньшей мере 2 min на каждой стадии и последующей паузой 10–15 min, что необходимо для установления нового температурного режима. На рис. 5 показан режим подачи напряжения.

Спектральные характеристики кристаллических пластин на основе твердых растворов системы $\text{AgBr}-\text{AgI}$ измеряли с использованием ИК фурье-спектрометра Shimadzu IRPrestige-21. Параметры работы спектрометра были следующие: рабочий спектральный диапазон от 1.28 до $28.5 \mu\text{m}$, делитель KBr, детектор DLaTGS

(дейтерированный триглицидсульфат, легированный L-аланином), разрешение 4 cm^{-1} ; количество сканированный фона и образцов 20 сканов.

Результаты и обсуждение

Как уже отмечалось во введении, в настоящей работе исследовались ВАХ материалов системы $\text{AgBr}-\text{AgI}$ как в кристаллической, так и в керамической формах. Авторы относят материал к кристаллам, если содержание AgI в системе $\text{AgBr}-\text{AgI}$ находится в диапазоне 0–30 mol.%, что соответствует области гомогенности на фазовой диаграмме $\text{AgBr}-\text{AgI}$. При более высоком содержании AgI материал относится к оптической керамике, так как в твердом состоянии существуют две фазы (кубическая и ромбическая). Данная классификация основана на фазовой диаграмме, полученной в той же лаборатории, в которой проводились исследования ВАХ, описанные в работе [1]. Таким образом, образцы с содержанием AgI 4 и 24 mol.% в $\text{AgBr}-\text{AgI}$ являются кристаллическими, а образцы с содержанием AgI 65–76 mol.% в $\text{AgBr}-\text{AgI}$ были отнесены к керамике.

На рис. 6, а–с показаны ВАХ, полученные для пластин из кристаллов системы $\text{AgBr}-\text{AgI}$ толщиной 0.5 и 1.7 mm, диаметром $10 \pm 1 \text{ mm}$. Зависимость тока от напряжения линейна вплоть до напряжения пробоя. При приближении к напряжению пробоя на графике наблюдается резкий перегиб. При увеличении температуры материала величина напряжения пробоя уменьшается, и ВАХ сглаживается. Значения напряжения пробоя для пластин системы $\text{AgBr}-\text{AgI}$ лежат в диапазоне 2–34 V в зависимости от состава, толщины и температуры. На рис. 7 показаны ВАХ, полученные для пластин из керамики $\text{AgBr}-\text{AgI}$ толщиной 0.5 mm. Как видно из кривых, напряжение пробоя для керамики при одинаковых температурах на порядок меньше, чем напряжение пробоя для пластин из кристаллов (рис. 6).

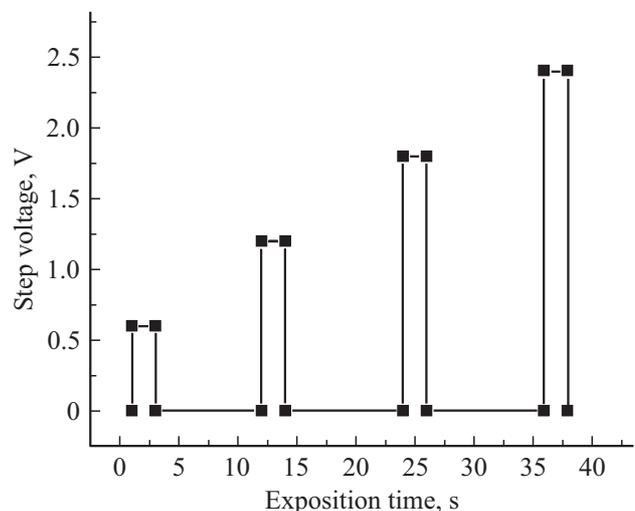


Рис. 5. Режим подачи напряжения на исследуемые пластины.

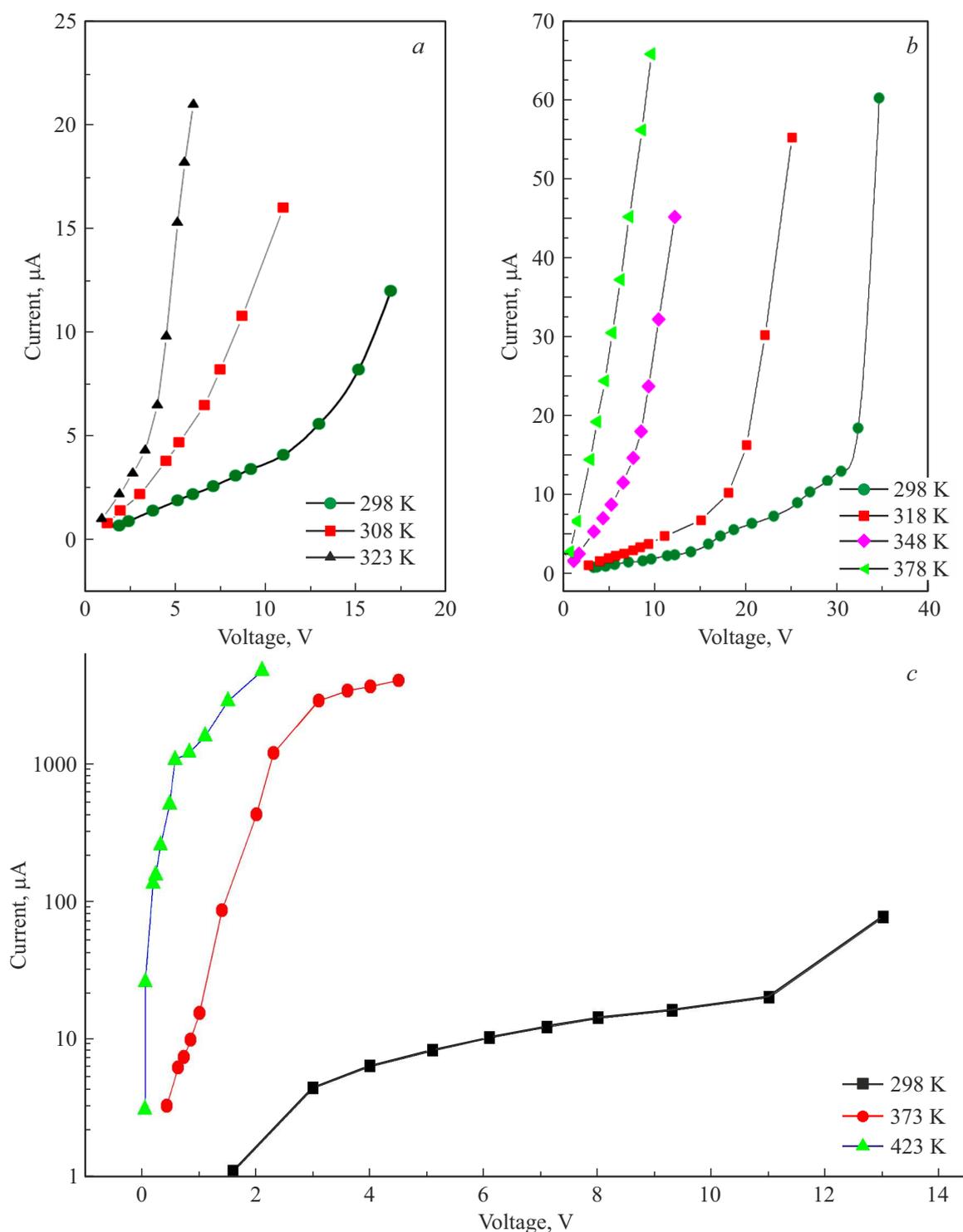


Рис. 6. ВАХ для пластинок из кристаллов систем AgBr–AgI: (a) $\text{AgBr}_{0.76}\text{I}_{0.24}$ толщиной 0.5 mm, (b) $\text{AgBr}_{0.76}\text{I}_{0.24}$ толщиной 1.7 mm, (c) $\text{AgBr}_{0.96}\text{I}_{0.04}$ толщиной 0.5 mm при различных температурах.

Рис. 8 и 9 показывают характеристики пропускания ИК излучения, измеренные для кристаллических пластинок до и после электрического пробоя в диапазоне длин волн от 1.3 до 25.0 μm на ИК фурье-спектрометре IRPrestige 21. Видно, что электрический пробой при-

водит к уменьшению пропускания во всем спектральном диапазоне, так, для пластинок толщиной 0.5 mm уменьшение пропускания составляет около 20%; для пластинок толщиной 1.7 mm — около 40%, причем это уменьшение пропускания более существенно в коротких

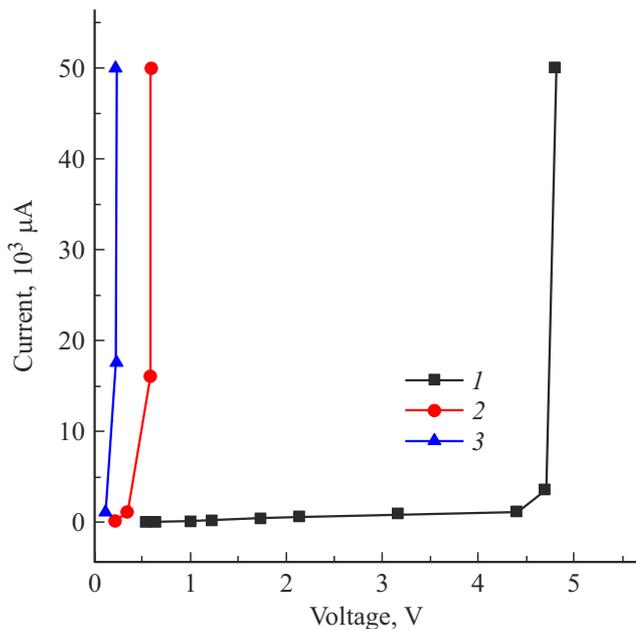


Рис. 7. ВАХ для пластин из керамики $\text{AgBr}_{0.24}\text{I}_{0.76}$ толщиной 0.5 мм: 1 — 298 К, 2 — 373 К, 3 — 423 К.

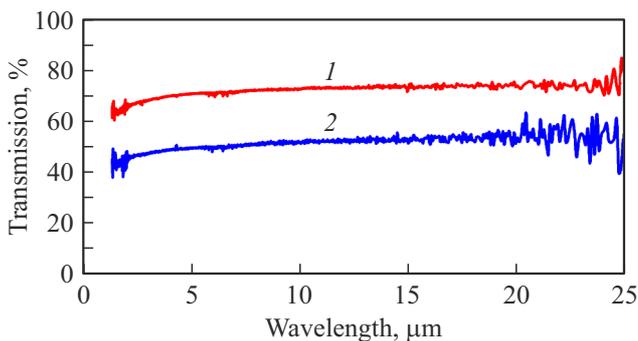


Рис. 8. Спектр пропускания кристаллической пластины $\text{AgBr}_{0.96}\text{I}_{0.04}$ толщиной 0.5 мм: 1 — до пробоя, 2 — после пробоя.

волнах, чем в длинных. Фотографические изображения поликристаллической пластины состава $\text{AgBr}_{0.96}\text{I}_{0.04}$ толщиной 0.5 мм до (рис. 1, *b*) и после (рис. 1, *c*) электрического пробоя показывают внешнее изменение пластин после воздействия электрического тока в случае электрического пробоя.

На рис. 10 показаны характеристики переходного тока при ступенчатом приложении напряжения (рис. 5) к пластине состава $\text{AgBr}_{0.96}\text{I}_{0.04}$ из кристаллического материала. Характеристика получена при температуре 298 К. Отмечено, что, начиная с определенного значения приложенного шагового напряжения, токовая характеристика становится похожей на переходную характеристику колебательного элемента с самовыравниванием. При дальнейшем увеличении значения приложенного шагового напряжения и приближении этого значения к

напряжению пробоя токовая характеристика становится похожей на периодическую переходную характеристику элемента на границе устойчивости.

На рис. 11 и 12 показана удельная проводимость кристаллов и керамики при различной температуре. Удельная проводимость рассчитана по формуле [16]

$$\sigma = L/SR,$$

где L — толщина образца (см), S — площадь электрода (cm^2), а R — сопротивление образца при заданной температуре (Ω).

Полученные результаты согласуются с данными, приведенными в работах других авторов. А именно:

- при температуре фазового перехода 463 К в керамике системы $\text{AgBr}-\text{AgI}$ наблюдается скачок проводимости (кривые 4 — $T = 453$ К; 5 — $T = 503$ К на рис. 12), объясняемый фазовым переходом $\beta\text{-AgI}-\alpha\text{-AgI}$, что совпадает по значениям с результатами авторов [12,13];
- температурные зависимости проводимости системы $\text{AgBr}-\text{AgI}$, полученные в интервале температур от 298 до 373 К, совпадают с данными других публикаций [13];
- для температур выше 373 К данных для сравнения в открытой печати не найдено;
- тенденции показывают, что значения проводимости для керамики находятся на уровне величины проводимости твердых электролитов [17–19]; эти величины составляют от 0.001 до $100 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$.

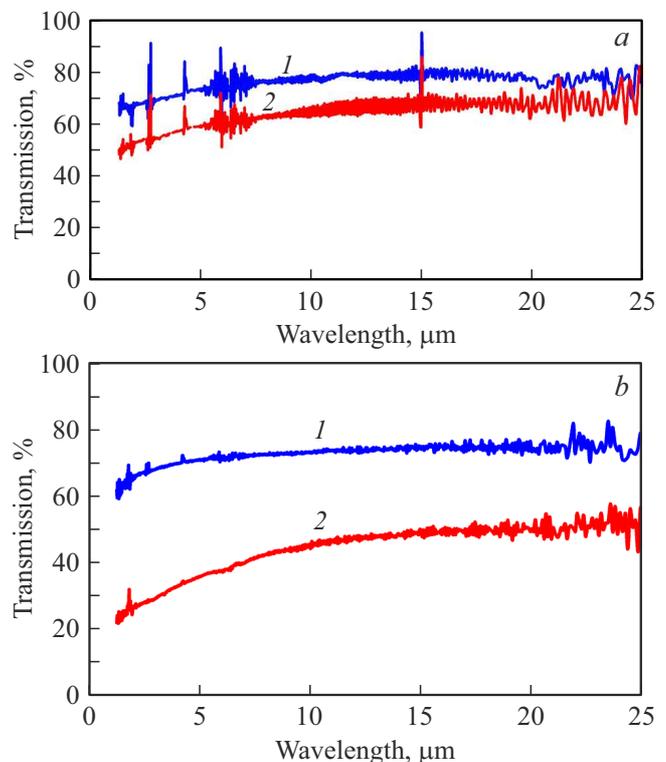


Рис. 9. Спектр пропускания кристаллических пластин: (а) $\text{AgBr}_{0.76}\text{I}_{0.24}$ толщиной 0.5 мм, (б) $\text{AgBr}_{0.76}\text{I}_{0.24}$ толщиной 1.7 мм; 1 — до пробоя, 2 — после пробоя.

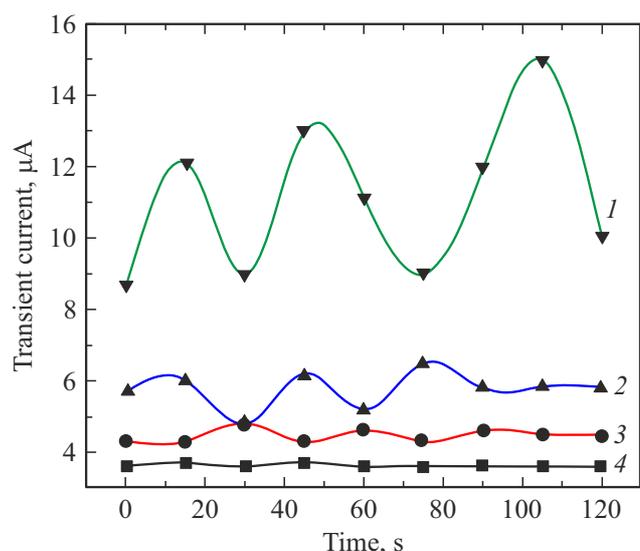


Рис. 10. Переходные характеристики тока при ступенчатом напряжении на пластину $\text{AgBr}_{0.96}\text{I}_{0.04}$ толщиной 0.5 mm при температуре 298 K: 1 — 8.7 V, 2 — 5.7 V, 3 — 4.3 V, 4 — 3.6 V.

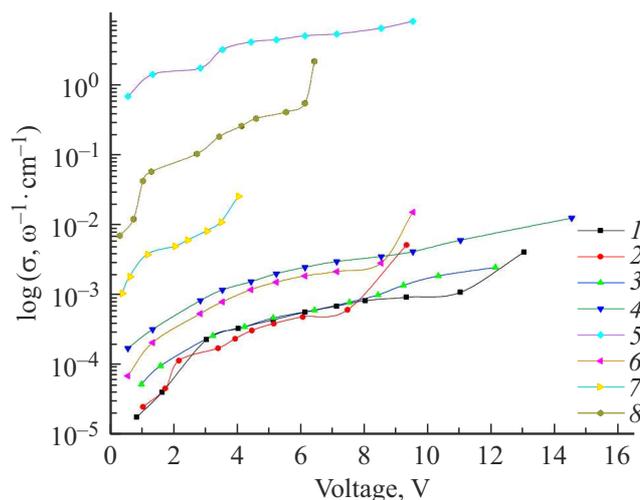


Рис. 11. Удельная проводимость для кристаллических образцов системы AgBr–AgI при различной температуре: 1 — $\text{AgBr}_{0.76}\text{I}_{0.24}$, $t = 298$ K, толщина = 0.1 mm; 2 — $\text{AgBr}_{0.76}\text{I}_{0.24}$, $t = 318$ K, толщина = 0.1 mm; 3 — $\text{AgBr}_{0.96}\text{I}_{0.04}$, $t = 298$ K, толщина = 0.5 mm; 4 — $\text{AgBr}_{0.76}\text{I}_{0.24}$, $t = 358$ K, толщина = 1.7 mm; 5 — $\text{AgBr}_{0.76}\text{I}_{0.24}$, $t = 373$ K, толщина = 0.1 mm; 6 — $\text{AgBr}_{0.76}\text{I}_{0.24}$, $t = 373$ K, толщина = 1.7 mm; 7 — $\text{AgBr}_{0.76}\text{I}_{0.24}$, $t = 423$ K, толщина = 0.1 mm; 8 — $\text{AgBr}_{0.76}\text{I}_{0.24}$, $t = 503$ K, толщина = 1.7 mm.

Увеличение содержания AgI для кристаллических материалов системы AgBr–AgI приводит к снижению электропроводности. Это можно объяснить усилением связей ионных носителей (Ag^+) с узлами кристаллической решетки, образованными ионами йода, которые являются более тяжелыми и менее подвижными, чем ионы брома. Для кристаллических материалов повы-

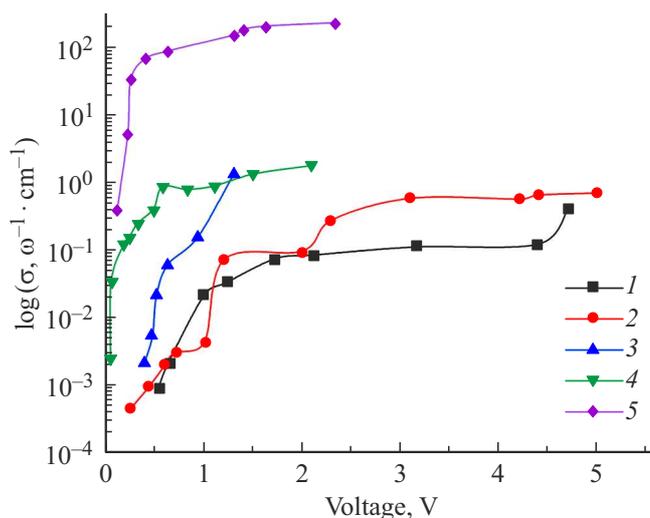


Рис. 12. Удельная проводимость для керамических образцов системы AgBr–AgI толщиной 0.5 mm при различной температуре: 1 — $\text{AgBr}_{0.24}\text{I}_{0.76}$, $t = 298$ K; 2 — $\text{AgBr}_{0.24}\text{I}_{0.76}$, $t = 373$ K; 3 — $\text{AgBr}_{0.24}\text{I}_{0.76}$, $t = 423$ K; 4 — $\text{AgBr}_{0.35}\text{I}_{0.65}$, $t = 453$ K; 5 — $\text{AgBr}_{0.35}\text{I}_{0.65}$, $t = 503$ K.

шение температуры материала приводит к снижению напряжения пробоя.

Выводы

Установлено, что электрический пробой приводит к значительному ухудшению характеристик пропускания ИК излучения во всем исследованном диапазоне длин волн от 1.5 до 25.0 μm . Эти данные, как и значения напряжения пробоя для кристаллических материалов с содержанием AgI 4 и 24 mol.% в AgBr–AgI, важны для проектирования устройств с использованием оптических материалов, в частности устройств автоматики, предназначенных для работы в электрооборудовании.

Керамические материалы системы AgBr–AgI при одинаковых значениях характеризуются более высоким уровнем проводимости, чем кристаллические материалы. Значения удельной проводимости при аналогичных температурах и приложенных напряжениях для оптической керамики на 2–3 порядка выше, чем для кристаллов. Значения удельной проводимости для керамики находятся на уровне проводимости твердых электролитов. Это можно объяснить более слабыми связями ионных носителей (Ag^+) с ионами йода в керамике, чем в кристалле.

ВАХ кристаллов системы AgBr–AgI, измеренные путем приложения напряжения к пластинам толщиной 0.5 и 1.7 mm из этих материалов, до определенного напряжения (около 2–3 V) демонстрируют линейную зависимость тока от приложенного напряжения. Далее наблюдается нелинейная зависимость тока от напряжения, а в характеристиках переходного тока наблюдается периодический участок. ВАХ керамики, измеренные путем

приложения напряжения к пластинам толщиной 0.5 mm из этих материалов, демонстрируют нелинейную зависимость тока от приложенного напряжения.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-73-10108, <https://rscf.ru/project/21-73-10108/>.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D. Salimgareev, A. Lvov, L. Zhukova, D. Belousov, A. Yuzhakova, D. Shatunova, A. Korsakov, A. Ishchenko. *Optics and Laser Technology*, **149**, 107825 (2022). DOI: 10.1016/j.optlastec.2021.107825
- [2] D. Salimgareev, A. Lvov, A. Yuzhakova, D. Shatunova, D. Belousov, A. Korsakov, L. Zhukova. *Optical Materials*, **125**, 112124 (2022).
- [3] Д.Д. Салимгареев, А.А. Южакова, А.Е. Львов, Л.В. Жукова, А.С. Корсаков. *Фотон-экспресс*, **6** (174), 80–81 (2021). DOI: 10.24412/2308-6920-2021-6-80-81
- [4] А.А. Южакова, Д.Д. Салимгареев, А.Е. Львов, А.С. Корсаков, Л.В. Жукова. *Лазерно-информационные технологии: труды XXIX Международной научной конференции* (БГТУ, Новороссийск, 2021), с. 126–127.
- [5] L.V. Zhukova, A.E. Lvov, D.D. Salimgareev, V.S. Korsakov. *Opt. Spectrosc.* **125** (6), 933–943 (2018). DOI: 10.1134/S0030400X18120238
- [6] M.P. Kharain, V.S. Kostarev, N.N. Akif'eva, A.A. Yuzhakova, L.V. Zhukova, A.S. Korsakov. *Containment*. 2021. In: IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., **1089**, 012048 (2021). DOI: 10.1088/1757-899X/1089/1/012048
- [7] A. Turabi, A.S. Korsakov, L.V. Zhukova, B.P. Zhilkin. *Optical Materials*, **109** (4), 110215 (2020). DOI: 10.1016/j.optmat.2020.110215
- [8] E. Korsakova, A. Lvov, D. Salimgareev, A. Korsakov, S. Markham, A. Mani, C. Silien, T.A.M. Syed, L. Zhukova. *Infrared Physics and Technology*, **93**, 171–177 (2018). DOI: 10.1016/j.infrared.2018.07.031"2018.07.031
- [9] Национальный стандарт Российской Федерации „Комплексы для измерений параметров побочных электромагнитных излучений и наводок“, ГОСТ Р 53112-2008. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200075567>
- [10] Стандарт организации ОАО „ФСК ЕЭС“, „Методические указания по определению наведенного напряжения на отключенных воздушных линиях, находящихся вблизи действующих ВЛ“, СТО 56947007-29.240.55.018-2009 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO-56947007-29.240.55.018-2009.pdf>
- [11] J. Wang, S. Wang, L. Cai, D. Lu, Q. Li, M. Zhou, Y. Fan. *IEEE transactions on power delivery*, **35** (4), 1968–1976 (2020). DOI: 10.1109/TPWRD.2019.2958182
- [12] А.К. Иванов-Шиц, И.В. Мурин. *Ионика твердого тела. Т. 1* (СПбГУ, Санкт-Петербург, 2000).
- [13] V.V. Tomaev, Y.S. Tver'yanovich, M.D. Bal'makov. *Crystallography Rep.*, **57** (7), 948–954 (2012).
- [14] L.S. Cain, L.M. Slifkin. *J. Phys. Chem. Solids*, **41**, 173–178 (1978).
- [15] A. Yuzhakova, D. Salimgareev, A. Turabi, A. Korsakov, L. Zhukova. *Optics and Laser Technology*, **139**, 106995 (2021). DOI: 10.1016/j.optlastec.2021.106995
- [16] *Элементарный учебник физики. Под ред. Г.С. Ландсберга. Т. II. Электричество и магнетизм.* (Наука, Москва, 1985) 479 с.
- [17] А.К. Иванов-Шиц, И.В. Мурин. *Ионика твердого тела. Т. 2* (СПбГУ, Санкт-Петербург, 2000)
- [18] S. Ono, R. Tomizawa, T. Nagai. *Phase Transitions*, **93** (9), 856–864 (2020). DOI: 10.1080/01411594.2020.1798956
- [19] T. Tani, H. Mifune, S. Yamashita, S. Aiba, T. Ohzeki, K. Yamane, *J. Imaging Sci. Technol.*, **51** (3), 202–206 (2007) DOI: 10.2352/J.ImagingSci.Technol.(2007)51:3(202)