

03,15

Термоэлектрические свойства $\text{Pr}_2\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_6$ ($-0.2 \leq x \leq 0.2$) в области высоких температур

© А.Е. Степанов, С.В. Наумов, Б.А. Гижевский, Е.В. Мостовщикова

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

E-mail: stepanov_ae_01@mail.ru

Поступила в Редакцию 7 апреля 2026 г.

В окончательной редакции 29 мая 2026 г.

Принята к публикации 1 июня 2026 г.

Приведены результаты исследований термоэлектрических свойств двойных перовскитов $\text{Pr}_2\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_6$ ($x = -0.2, 0, 0.2$) в температурном интервале (300–1200 К) в атмосферах воздуха, кислорода и аргона. Измерения в различных атмосферах демонстрируют стабильность термоэлектрических свойств $\text{Pr}_2\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_6$. Образцы $\text{Pr}_2\text{CoMnO}_6$ и $\text{Pr}_2\text{Co}_{1.2}\text{Mn}_{0.8}\text{O}_6$ обладают дырочным типом проводимости во всем интервале температур. Для образца $\text{Pr}_2\text{Co}_{0.8}\text{Mn}_{1.2}\text{O}_6$ наблюдается переход от p -типа проводимости к n -типу в области температур от 590 до 917 К и обратный переход к p -типу при дальнейшем повышении температуры. Поведение термоэдс соединений $\text{Pr}_2\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_6$ определяется суммарным вкладом от двух взаимодействующих систем $\text{Pr}-\text{Co}-\text{O}$ и $\text{Pr}-\text{Mn}-\text{O}$. Температурные зависимости электропроводности и термоэдс проанализированы в модели малых поляронов.

Ключевые слова: термоэдс, проводимость, двойные перовскиты, малые поляроны.

DOI: 10.61011/FTT.2026.05.63439.9400

1. Введение

Замещение катиона в B -позиции в перовските ABO_3 двумя катионами переходных металлов B и B' приводит к более сложной упорядоченной структуре двойных перовскитов $\text{A}_2\text{BB}'\text{O}_6$, (где A — редкоземельный ион, B и B' — ионы переходных металлов, таких как Co и Mn). Интерес к двойным перовскитам типа $\text{A}_2\text{BB}'\text{O}_6$ обусловлен широким спектром их функциональных свойств. Такие соединения демонстрируют интересные магнитные характеристики [1,2], обладают значительным потенциалом для применения в устройствах магнитокалоритики [3], катодных и анодных материалов твердопливных элементов, катализаторов и фотокатализаторов, а также спинтронных устройств [4,5].

На электронные, магнитные, электрические и диэлектрические свойства двойных перовскитов A_2CoMnO_6 влияют размер редкоземельного иона, угол связи $\text{Co}-\text{O}-\text{Mn}$ и длина связи $\text{Co}/\text{Mn}-\text{O}$ [5].

Ранее было показано, что свойства перовскитов критически зависят от легирования в катионной подрешетке [6], а целенаправленное изменение катионного состава представляет собой эффективный метод управления их электротранспортными характеристиками [7,8]. Предыдущие исследования, в т.ч. наши [9], показали, что соединения $\text{Pr}_2\text{CoMnO}_6$ могут существовать с отклонениями в катионной подрешетке. Вместе с тем, свойства данной системы, особенно в зависимости от соотношения $\text{Co}:\text{Mn}$, в различных газовых средах, при высоких температурах практически не изучены.

Цель работы — установить влияние соотношения $\text{Co}:\text{Mn}$ на высокотемпературные транспортные свойства

$\text{Pr}_2\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_6$ ($x = -0.2, 0, 0.2$), определить механизм проводимости, тип носителей заряда, а также оценить стабильность электрических параметров, включая возможные изменения типа и характера проводимости в зависимости от газовой среды в которой проводятся исследования.

Для достижения поставленной цели были синтезированы образцы $\text{Pr}_2\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_6$ ($x = -0.2, 0, 0.2$), проведен их рентгенофазовый и рентгеноструктурный анализы. В диапазоне 300–1200 К проведены измерения температурных зависимостей электропроводности и термоэдс в атмосферах кислорода, воздуха и аргона для проверки устойчивости системы к высоким температурам и окислительным/восстановительным атмосферам, проанализированы механизмы проводимости.

2. Материалы и методы

Поликристаллические образцы $\text{Pr}_2\text{Co}_{0.8}\text{Mn}_{1.2}\text{O}_6$, $\text{Pr}_2\text{CoMnO}_6$, $\text{Pr}_2\text{Co}_{1.2}\text{Mn}_{0.8}\text{O}_6$ были получены методом твердофазного синтеза. В качестве исходных материалов использовали оксиды: Co_3O_4 (особо чистый, осч), Pr_6O_{11} (99.99%) и Mn_3O_4 (осч). Смесь прекурсоров, взятых в соответствии с химической формулой, перемешивали в агатовой ступке до полной гомогенизации. Полученную смесь отжигали в течение 24 h при температурах от 900 до 1100 °С на воздухе с промежуточными перетирками через каждые 8 h и повышением температуры на 100 °С. Образцы после каждого отжига охлаждались вместе с печью. Далее порошки были спрессованы в прямоугольные бруски размером $24 \times 5 \times 3 \text{ mm}^3$ при давлении 50 МПа и спечены при 1200 °С в течение 24 h

на воздухе. Поскольку на сопротивление образцов влияет такой фактор, как границы зерен [10], выбор температуры финального отжига обусловлен большей площадью межзеренного контакта: ранее для перовскита состава $\text{Pr}_2\text{CoMnO}_6$ по данным сканирующей электронной микроскопии в нашей работе [9] было показано, что наиболее плотным и однородным со средним размером зерна $\sim 5 \mu\text{m}$ является поликристалл, спеченный при 1200°C . Плотность всех исследованных в настоящей работе образцов составляла $\sim 75\%$ от рентгеновской плотности.

После приготовления полученные поликристаллические образцы были аттестованы методом рентгенофазового анализа с использованием дифрактометра ДРОН-2 в $\text{CrK}\alpha$ -излучении. Электропроводность измеряли 4-контактным методом на автоматическом контроллере ZirconiaM („Исследовательские технологии“, Россия). На этом же приборе измерялся и коэффициент Зеебека. Для создания качественного контакта между образцом и платиновыми электродами на образец в месте предполагаемого соединения с платиновой проволокой была нанесена платиновая чернь. Подготовленный образец был прикреплен с использованием платиновой проволоки к четырем контактам держателя, расположенным в ряд. Поверх платиновой черни наносились платиновые контакты. Далее контакты были присоединены к потенциальным и измерительным выводам, проведенным через керамический держатель. Образец на керамическом держателе был помещен в вертикальную печь для выжигания связанной с платиновой чернью органики, а также проведения последующих температурных измерений. Градиент температуры на образце создавался естественной неравномерностью прогреваемой зоны нагревательной системы. Регулятор нагревателя, за счёт настройки пропорционально-интегрально-дифференцирующих коэффициентов и конструкции печи, позволяет сохранять значения $\Delta T \approx 5^\circ\text{C}$ в широкой температурной области, которые не зависят от атмосферы. Стабильность ΔT контролировалась в процессе измерений.

Измерения в атмосфере (газ высокой чистоты) аргона (Ar) или кислорода (O_2) проводились с установлением давления 0.1 MPa внутри измерительной камеры в интервале от 300 до 1200 K со скоростью 5 K/min . Измерения на воздухе производились без избыточного давления в аналогичном температурном интервале.

Измерения термоэдс скорректированы с учетом термоэдс Pt-выводов [11]. Погрешность ZirconiaM при измерении температуры на образце не более 2°C , погрешность измерения сопротивления оценивалась как $\pm 0.1\%$, а погрешность измерения термоэдс как $\pm 6\%$.

3. Результаты

3.1. Аттестация образцов

Дифрактограммы образцов $\text{Pr}_2\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_6$ представлены на рис. 1. Все образцы были однофазными и

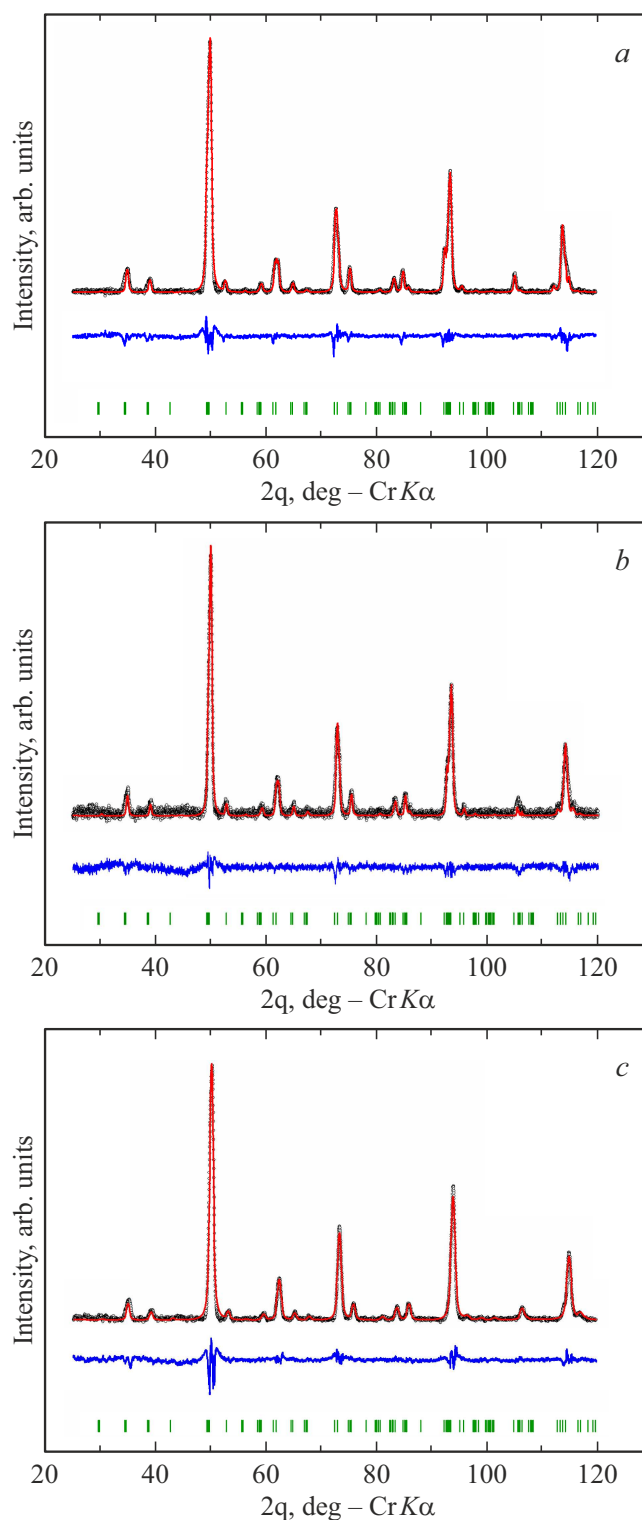


Рис. 1. Дифрактограммы образцов $\text{Pr}_2\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_6$: а) $\text{Pr}_2\text{Co}_{0.8}\text{Mn}_{1.2}\text{O}_6$, б) $\text{Pr}_2\text{CoMnO}_6$, в) $\text{Pr}_2\text{Co}_{1.2}\text{Mn}_{0.8}\text{O}_6$, и результаты их уточнения. Черные кружки — экспериментальные данные, красная сплошная линия — результат подгонки, синяя линия — разница между расчетной и наблюдаемой интенсивностями рентгеновских пиков; вертикальные зеленые отметки относятся к брэгговским углам структуры P21/c , #14.

Таблица 1. Состав исследованного образца, параметры и объем элементарной ячейки $\text{Pr}_2\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_6$ ($-0.2 \leq x \leq 0.2$). SG — пространственная группа. Для сравнения приведены параметры и объем элементарной ячейки образцов PrCoO_3 , PrMnO_3 , взятые из литературы

Состав	a , Å	b , Å	c , Å	β , deg	V , Å ³	SG
$\text{Pr}_2\text{Co}_{0.8}\text{Mn}_{1.2}\text{O}_6$	5.5103	5.4692	7.7094	90.4	232.33	$P2_1/c$
$\text{Pr}_2\text{CoMnO}_6$	5.5025	5.4658	7.7116	90.2	231.93	$P2_1/c$
$\text{Pr}_2\text{Co}_{1.2}\text{Mn}_{0.8}\text{O}_6$	5.4446	5.4649	7.6901	90.1	228.73	$P2_1/c$
PrMnO_3 [13]	5.450(1)	5.786(1)	7.589(2)	—	239.31	Pbnm
PrCoO_3 [14]	5.377	5.342	7.577	—	217.69	Pbnm

соответствовали моноклинной структуре. В табл. 1 приведены параметры и объем элементарной ячейки трех составов; параметры были уточнены с использованием пространственной группы $P2_1/c$ в программном пакете PowderCell 2.4 [12].

Из табл. 1 следует, что увеличение содержания кобальта приводит к уменьшению параметров a, b и объема элементарной ячейки V . Параметр c имеет максимальное значение для стехиометрического состава $\text{Pr}_2\text{CoMnO}_6$. Сравнение структурных характеристик наших образцов и образцов PrMnO_3 и PrCoO_3 [13,14] показывает общую тенденцию: при переходе от Co к Mn объем элементарной ячейки увеличивается, т.е. замещение более крупного иона марганца на более мелкий ион кобальта сжимает кристаллическую решётку.

3.2. Транспортные свойства

Удельное сопротивление (ρ) и термоэдс (S) системы $\text{Pr}_2\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_6$ измерялись одновременно в области температур 300–1200 К при постоянном токе. В этой области температур перовскиты $\text{Pr}_2\text{CoMnO}_6$ находятся в парамагнитном состоянии [9]. Температурные зависимости удельного сопротивления и термоэдс приведены на рис. 2 и 3 соответственно. Многократные температурные измерения электросопротивления в указанном интервале температур и в различных атмосферах приводили к изменениям исходного удельного электросопротивления всех образцов не более чем на 5%. Это указывает на стабильность электрических свойств наших образцов $\text{Pr}_2\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_6$ в области температур от комнатной до 1200 К в окислительной и восстановительной атмосферах. Приведенные значения были получены путем анализа данных, полученных при охлаждении, т.е. после воздействия на систему высоких температур в установленной атмосфере.

В соответствии с литературными данными [15,16], электронный транспорт в подобных системах смешанных кобальт-марганцевых перовскитов происходит посредством механизма малых поляронов Мотта и Дэвиса [17]. В этом случае для описания ρ и S используются следующие выражения:

$$\rho = \rho_0 T \cdot \exp^{E_\rho/(k_B T)}, \quad (1)$$

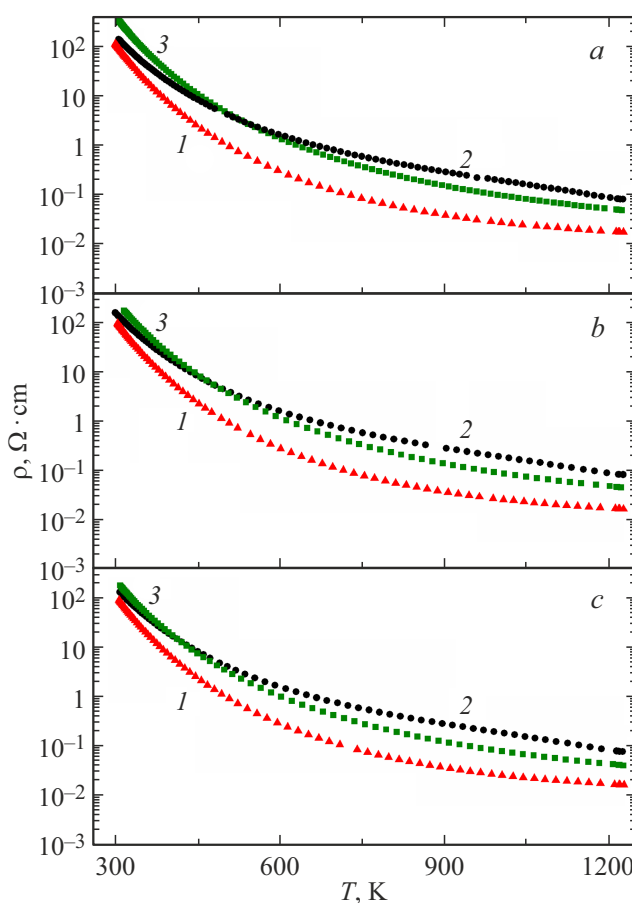


Рис. 2. Температурная зависимость удельного сопротивления образцов $\text{Pr}_2\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_6$, измеренная в различных атмосферах: кривая 1 — $\text{Pr}_2\text{Co}_{0.8}\text{Mn}_{1.2}\text{O}_6$, 2 — $\text{Pr}_2\text{CoMnO}_6$, 3 — $\text{Pr}_2\text{Co}_{1.2}\text{Mn}_{0.8}\text{O}_6$.

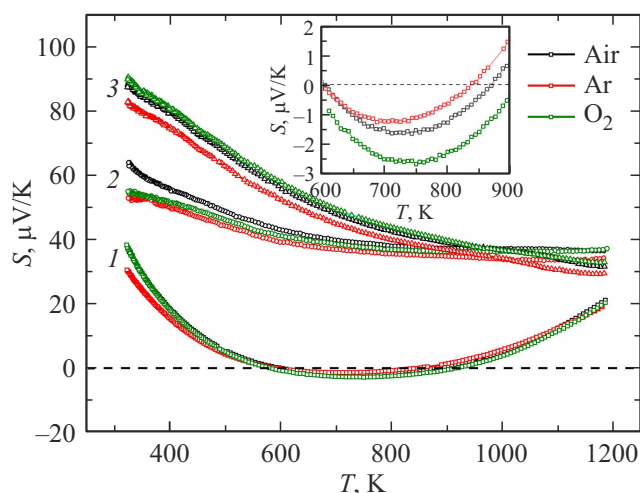
где E_ρ — энергия активации электросопротивления, ρ_0 — постоянная величина для данного образца, T — абсолютная температура, а k_B — постоянная Больцмана;

$$S(T) = \frac{k_B}{e} \frac{E_S}{k_B T} + S_\infty, \quad (2)$$

где E_S — энергия активации термоэдс, e — заряд электрона, S_∞ — постоянная величина.

Таблица 2. Значения энергии активации электросопротивления E_ρ , энергии активации термоэдс E_S образцов $\text{Pr}_2\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_6$

Состав	$\text{Pr}_2\text{Co}_{0.8}\text{Mn}_{1.2}\text{O}_6$			$\text{Pr}_2\text{CoMnO}_6$			$\text{Pr}_2\text{Co}_{1.2}\text{Mn}_{0.8}\text{O}_6$		
Атмосфера	Air	O ₂	Ar	Air	O ₂	Ar	Air	O ₂	Ar
E_ρ , eV	0.34	0.34	0.34	0.40	0.38	0.39	0.40	0.40	0.40
E_S , eV	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02

**Рис. 3.** Температурная зависимость термоэдс образцов $\text{Pr}_2\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_6$, измеренная в различных атмосферах: кривые 1 — $\text{Pr}_2\text{Co}_{0.8}\text{Mn}_{1.2}\text{O}_6$, 2 — $\text{Pr}_2\text{CoMnO}_6$, 3 — $\text{Pr}_2\text{Co}_{1.2}\text{Mn}_{0.8}\text{O}_6$. На вставке: температурная зависимость термоэдс $\text{Pr}_2\text{Co}_{0.8}\text{Mn}_{1.2}\text{O}_6$ в области отрицательных значений.

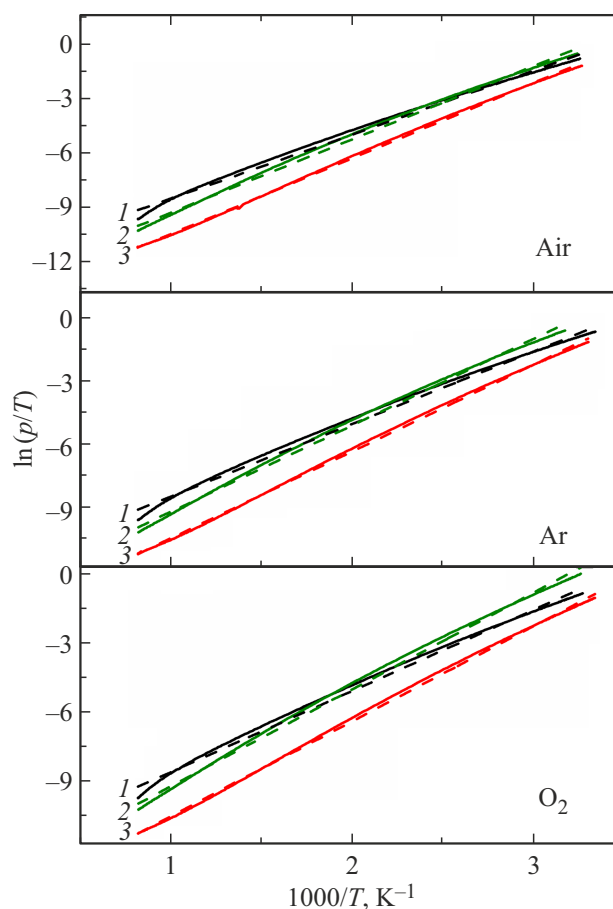
На рис. 4 представлена зависимость $\ln(\rho/T)$ от обратной температуры ($1000/T$, K^{-1}). На рис. 5 представлена зависимость термоэдс S от обратной температуры. Значения E_ρ и E_S , рассчитанные из уравнений (1) и (2), приведены в табл. 2.

4. Обсуждение результатов

Понижение удельного сопротивления наших образцов с повышением температуры во всем измеренном интервале свидетельствует о полупроводниковом типе проводимости (рис. 2). Образец $\text{Pr}_2\text{Co}_{1.2}\text{Mn}_{0.8}\text{O}_6$ обладает более высокими значениями электросопротивления в нашей серии образцов, что коррелирует с результатами, приведенными в литературе: удельное сопротивление у системы PrMnO_3 ($250 \Omega \cdot \text{cm}$) [13] при 300 K выше, чем у системы PrCoO_3 ($24 \Omega \cdot \text{cm}$) [14]. На всех кривых $\ln(\rho/T)$ от $1000/T$ в области температур 860–900 K наблюдается небольшой изгиб — изменение значения энергии активации. Изменение наклона зависимости $\ln(\rho/T)$ от $1000/T$ в этой области и соответствующее изменение E_ρ , скорее всего, связано с изме-

нением зарядового состояния (диспропорционированием) ионов кобальта и марганца. Так, в работе [18] на примере $\text{La}(\text{MnCo})\text{O}_3$ показано, что при нагревании соединения до высоких температур равновесие $\text{Mn}^{3+}-\text{Co}^{3+}$ смещается в сторону $\text{Mn}^{4+}-\text{Co}^{2+}$. Также в этой работе высказано предположение о сосуществовании различных зарядовых состояний Mn и Co (Mn^{3+} , Mn^{4+} , Co^{2+} , Co^{3+}), и то, что полное превращение из $\text{Mn}^{3+}-\text{Co}^{3+}$ в $\text{Mn}^{4+}-\text{Co}^{2+}$ происходит только при более высокой температуре, а для образцов, нагретых в диапазоне температур 700–1300 °C, наблюдается смешанное зарядовое состояние. Мы полагаем, что в системе $\text{Pr}_2\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_6$ наблюдается аналогичное поведение ионов кобальта и марганца при высоких температурах.

Абсолютные значения термоэдс (рис. 3) для образцов $\text{Pr}_2\text{Co}_{1.2}\text{Mn}_{0.8}\text{O}_6$ и $\text{Pr}_2\text{CoMnO}_6$ уменьшаются с ростом температуры примерно до 1170 K, тогда как для образца $\text{Pr}_2\text{Co}_{0.8}\text{Mn}_{1.2}\text{O}_6$ поведение термоэдс характеризуется широким минимумом и ростом термоэдс при высоких температурах. Наименьшее изменение термоэдс во всем интервале температур характерно для образца с равным соотношением Co и Mn. Наибольших значений тер-

**Рис. 4.** Зависимость натурального логарифма ρ/T от обратной температуры: кривая 1 — $\text{Pr}_2\text{Co}_{0.8}\text{Mn}_{1.2}\text{O}_6$, 2 — $\text{Pr}_2\text{CoMnO}_6$, 3 — $\text{Pr}_2\text{Co}_{1.2}\text{Mn}_{0.8}\text{O}_6$. Пунктирные линии — подгонка по формуле (1).

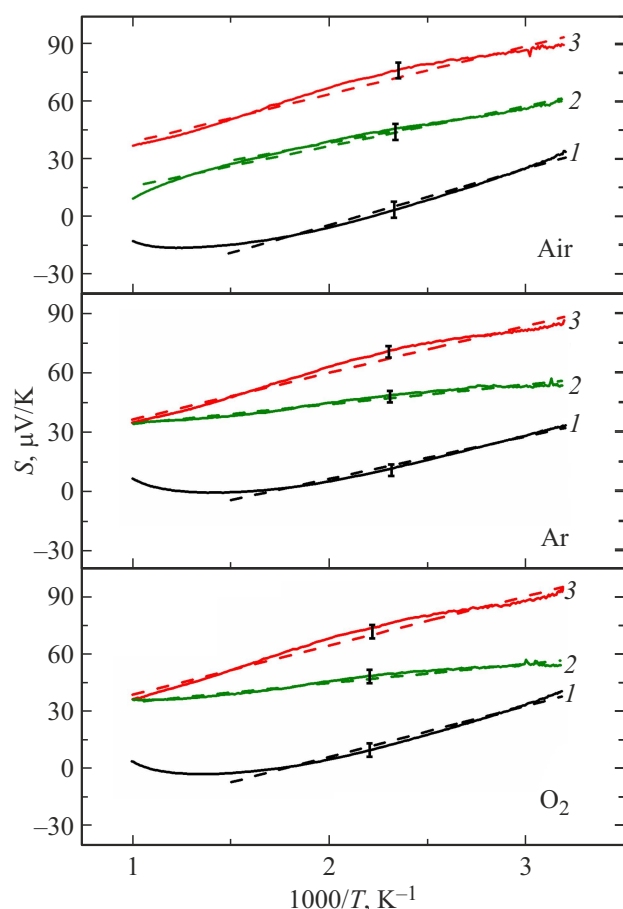


Рис. 5. Зависимость термоэдс от обратной температуры образцов $\text{Pr}_2\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_6$, измеренная в различных атмосферах: кривая 1 — $\text{Pr}_2\text{Co}_{0.8}\text{Mn}_{1.2}\text{O}_6$, 2 — $\text{Pr}_2\text{CoMnO}_6$, 3 — $\text{Pr}_2\text{Co}_{1.2}\text{Mn}_{0.8}\text{O}_6$. Пунктирные линии — подгонка по формуле (2). Символом I указана погрешность определения термоэдс.

моэдс в области низких температур достигает образец с большим содержанием кобальта. Измерения в окислительной и восстановительной среде демонстрируют низкую подверженность влиянию атмосферы. Образцы $\text{Pr}_2\text{Co}_{1.2}\text{Mn}_{0.8}\text{O}_6$ и $\text{Pr}_2\text{CoMnO}_6$ обладают дырочным типом проводимости во всем интервале температур. Для образца $\text{Pr}_2\text{Co}_{0.8}\text{Mn}_{1.2}\text{O}_6$ наблюдается переход от p -типа проводимости к n -типу в области температур от 590 до 917 K и обратный переход к p -типу при дальнейшем повышении температуры. Этот переход не зависит от атмосферы, в которой проводились измерения.

Мы полагаем, что для образца $\text{Pr}_2\text{Co}_{0.8}\text{Mn}_{1.2}\text{O}_6$ такое поведение термоэдс определяется балансом электронных и дырочных вкладов, т.е. суммарным вкладом от двух взаимодействующих систем — $\text{Pr}-\text{Co}-\text{O}$ и $\text{Pr}-\text{Mn}-\text{O}$. Так, в работе [19] исследовались термоэлектрические свойства PrMnO_3 в области температур 100–1200 K, и было показано, что во всей температурной области значения термоэдс являются отрицательными, а кривая $S(T)$ имеет широкий минимум. Подоб-

ная зависимость прослеживается для нашего образца $\text{Pr}_2\text{Co}_{0.8}\text{Mn}_{1.2}\text{O}_6$ (рис. 3, кривая 1). В то же время, по данным [20], для соединения PrCoO_3 температурная зависимость термоэдс имеет положительное значение (p -тип носителей) в области температур 450–900 K, а форма кривой аналогична форме наших зависимостей на рис. 3, кривая 2 ($\text{Pr}_2\text{CoMnO}_6$) и рис. 3, кривая 3 ($\text{Pr}_2\text{Co}_{1.2}\text{Mn}_{0.8}\text{O}_6$). Мы предполагаем, что вклад от двух взаимодействующих систем $\text{Pr}-\text{Co}-\text{O}$ и $\text{Pr}-\text{Mn}-\text{O}$ суммируется и определяет знак термоэдс в системе $\text{Pr}_2\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_6$.

На зависимостях термоэдс от обратной температуры для образцов $\text{Pr}_2\text{CoMnO}_6$ и $\text{Pr}_2\text{Co}_{1.2}\text{Mn}_{0.8}\text{O}_6$ выполняется линейная зависимость S от $1/T$ практически во всей температурной области с учетом погрешности измерений термоэдс и температуры.

Для образца $\text{Pr}_2\text{Co}_{0.8}\text{Mn}_{1.2}\text{O}_6$ при температурах выше 670 K наблюдается отклонение от линейной зависимости S от $1/T$, вызванное ростом термоэдс в температурной области 700–1100 K. В этом образце соотношение $\text{Co}:\text{Mn}$ сдвигается в сторону Mn, а такое поведение термоэдс характерно для манганитов и объясняется за счет диспропорционирования Mn^{3+} на Mn^{2+} и Mn^{4+} , см. например, [21].

По результатам расчетов энергия активации электросопротивления E_ρ незначительно увеличивается с увеличением содержания кобальта. E_ρ значительно больше энергии активации термоэдс ($E_\rho \gg E_S$) для всех образцов (табл. 2), что характерно для модели малых поляронов, где транспорт определяется эффектами подвижности, зависящими от температуры [22,23].

Важной характеристикой соединений, используемых в производстве термоэлектродгенераторов, является такая величина, как фактор мощности (PF) [24], характеризующая электронный перенос в термоэлектрическом материале:

$$\text{PF} = S^2 \sigma, \quad (3)$$

где S — термоэдс, σ — удельная проводимость.

Большой коэффициент мощности означает, что большое напряжение и большой ток могут генерироваться одновременно. Максимальное значение PF было получено для образца состава $\text{Pr}_2\text{Co}_{1.2}\text{Mn}_{0.8}\text{O}_6$: $\text{PF} \approx 5.80 \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-2}$ при температуре 1100 K. Такое значение фактора мощности является низким по сравнению с другими термоэлектриками [25], однако в сочетании с низкой чувствительностью соединений к воздействию атмосферных условий и со структурной стабильностью при нагреве до высоких температур открывает пути поиска более эффективных термоэлектрических соединений в системах типа $A_2BB'\text{O}_6$.

5. Заключение

Синтезированы однофазные образцы $\text{Pr}_2\text{Co}_{0.8}\text{Mn}_{1.2}\text{O}_6$, $\text{Pr}_2\text{CoMnO}_6$, $\text{Pr}_2\text{Co}_{1.2}\text{Mn}_{0.8}\text{O}_6$. Проведенные измерения электросопротивления и термоэдс демонстрируют

незначительные изменения измеряемых значений в температурном диапазоне 300–1200 К в различных атмосферах: воздух, аргон, кислород. Показана стабильность электрических свойств соединений $\text{Pr}_2\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_6$ ($-0.2 \leq x \leq 0.2$) в широкой области температур.

Образцы $\text{Pr}_2\text{CoMnO}_6$ и $\text{Pr}_2\text{Co}_{1.2}\text{Mn}_{0.8}\text{O}_6$ обладают дырочным типом проводимости во всем интервале температур. Для образца $\text{Pr}_2\text{Co}_{0.8}\text{Mn}_{1.2}\text{O}_6$ наблюдается переход от p -типа проводимости к n -типу в области температур от 590 до 917 К и обратный переход к p -типу при дальнейшем повышении температуры. Поведение термоэдс соединений $\text{Pr}_2\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_6$ определяется суммарным вкладом от двух взаимодействующих систем $\text{Pr}-\text{Co}-\text{O}$ и $\text{Pr}-\text{Mn}-\text{O}$. Термоэлектрические свойства образцов $\text{Pr}_2\text{Co}_{1.2}\text{Mn}_{0.8}\text{O}_6$ и $\text{Pr}_2\text{CoMnO}_6$ аналогичны свойствам PrCoO_3 , тогда как образец со значительным избытком марганца $\text{Pr}_2\text{Co}_{0.8}\text{Mn}_{1.2}\text{O}_6$ подобен перовскиту PrMnO_3 .

Из электросопротивления и термоэдс для всех образцов определены значения энергии активации E_p и E_s соответственно. Показано, что $E_p \gg E_s$ для всех исследованных образцов, что характерно для систем, поведение которых описывается моделью малых поляронов.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ИФМ УрО РАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] S. Vasala, M. Karppinen. Prog. Sol. St. Chem. **43**, 1–2, 1 (2015).
- [2] M. Benaadad, M. Bghour, H. El-Ouaddi, A. Labrag, M. Eddekkar. J. Magn. Magn. Mater. **648**, 174092 (2026).
- [3] K. Rawat, Meenakshi, R.N. Mahato. Mater. Res. Express **5**, 6, 066110 (2018).
- [4] J. He, Y. Liu, R. Funahashi. J. Mater. Res. **26**, 15, 1762 (2011).
- [5] R. Sharma, N. Hooda, A. Hooda, S. Khasa. J. Alloys. Compd. **965**, 171394 (2023).
- [6] Л.И. Королёва, И.К. Баташев, А.С. Морозов, А.М. Балбашов, H. Szymczak, A. Slawska-Waniew. ЖТФ **88**, 2, 228 (2018). [L.I. Koroleva, I.K. Batashev, A.S. Morozov, A.M. Balbashov, H. Szymczak, A. Slawska-Waniew. Tech. Phys. **63**, 2, 220 (2018).]
- [7] S. Araujo-Barbosa, O.J.B.J. Marques, E.L.T. França, F.L.A. Machado, J.C. Mantilla. J. Phys: Condens. Matter **32**, 10, 105803 (2019).
- [8] F.H. Bhat, G. Anjum, J. Asifa, T.A. Dar, R. Kumar, M.A. Malik. J. Magn. Magn. Mater. **615**, 172798 (2025).
- [9] E.V. Mostovshchikova, S.V. Naumov, A.S. Shkvarin, A. Stepanov, D.A. Shishkin, S.A. Maslova, R.G. Chumakov, T.V. Kuznetsova. J. Alloys. Compd. **1041**, 183799 (2025).
- [10] L. Bocher, R. Robert, M.H. Aguirre, S. Malo, S. Hébert, A. Maignan, A. Weidenkaff. Solid State Sci. **10**, 4, 496 (2008).
- [11] R.B. Roberts. Phil. Mag. B **43**, 6, 1125 (1981).
- [12] W. Kraus, G. Nolze. J. Appl. Crystallogr. **29**, 3, 301 (1996).
- [13] Z. Jiráček, J. Hejtmánek, K. Knížek, R. Sonntag. J. Solid State Chem. **132**, 1, 98 (1997).
- [14] P. Tomeš, M.H. Aguirre, R. Robert, A. Shkabko, E.H. Otal, A. Weidenkaff. J. Phys. D: Appl. Phys. **44**, 30, 305402 (2011).
- [15] U. Hira, F. Sher. J. Magn. Magn. Mater. **452**, 64 (2017).
- [16] Q. Li, L. Xing, M. Xu. J. Alloys. Compd. **710**, 771 (2017).
- [17] Н. Мотт, Э. Дэвис. Электронные процессы в некристаллических веществах / Под ред. Б.Т. Коломийца. Мир, М. (1974). 472 с. [N.F. Mott, E.A. Davis. Electronic Processes in Non-Crystalline Materials. Clarendon Press / Oxford University Press (1971).]
- [18] P.A. Joy, Y.B. Kholam, S.K. Date. Phys. Rev. B **62**, 13, 8608 (2000).
- [19] A. Haoui, M. Elchikh, S. Hiadsi, A.H. Baghdad. Phys. B: Condens. Matter **684**, 416001 (2024).
- [20] H. Hashimoto, T. Kusunose, T. Sekino. J. Alloys. Compd. **484**, 1–2, 246 (2009).
- [21] I.A. Leonidov, E.I. Konstantinova, M.V. Patrakeev. J. Solid State Electrochem **21**, 7, 2099 (2017).
- [22] S. Mildner, J. Hoffmann, P.E. Blochl, S. Techert, C. Jooss. Phys. Rev. B **92**, 3, 035145 (2015).
- [23] K.P.M. Jibri, J. Archana, M. Navaneethan, S. Harish. Phys. Chem. Chem. Phys. **25**, 18, 12914 (2023).
- [24] A.M. Dehkordi, M. Zebajadi, J. He, T.M. Tritt. Mater. Sci. Eng.: R. Rep. **97**, 1 (2015).
- [25] R. Jan, M.F. Bhat, N. Ayoub, I. Islam, S. Ghosh, S. Rubab, S.A. Khandy. J. Power Sources **654**, 237806 (2025).

Редактор Е.В. Толстякова