

14,15

## Полевые транзисторы с высокой подвижностью и малым гистерезисом передаточных характеристик на основе пленок $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$

© А.Н. Алешин, И.П. Щербаков, И.Н. Трапезникова, В.Н. Петров

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: aleshin@transport.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 3 апреля 2017 г.)

Получены полевые транзисторные (ПТ) структуры на основе растворимых металлорганических перовскитов —  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  и исследованы их электрические свойства. Показано, что ПТ на основе пленок  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  демонстрируют вольт-амперные характеристики (ВАХ), характерные для амбиполярных ПТ с режимом насыщения. Обнаружено, что передаточные характеристики ПТ на основе  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  обладают незначительным гистерезисом и слабо зависят от напряжения на стоке–исток. Значения подвижности носителей заряда (дырок), рассчитанные из ВАХ ПТ на основе  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  при 300 К в режимах насыщения и слабых полей, составили  $\sim 5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  и  $\sim 2 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  соответственно, а подвижность электронов  $\sim 3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ , что превышает значение подвижности  $\sim 1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ , полученное ранее для ПТ на основе  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ .

Работа выполнена при частичной поддержке Программ фундаментальных исследований ПРАН 1.8П и 1.25П и гранта РФФИ № 15-02-01897.

DOI: 10.21883/FTT.2017.12.45248.108

### 1. Введение

Материалы на основе металлорганических перовскитов в настоящее время привлекают очень большое внимание в связи с перспективами их использования в качестве активных слоев высокоэффективных солнечных элементов (СЭ) [1,2]. В 2016 г. КПД СЭ на основе металлорганических перовскитов  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{MX}_3$  ( $M = \text{Pb}, \text{Sn}, X = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$ ) достиг  $\sim 22.1\%$  [1,3,4]. Такой высокий КПД перовскитовых СЭ стал возможен благодаря эффективному поглощению света в видимом спектральном диапазоне, сбалансированным транспортным свойствам и большой диффузионной длине носителей заряда в таких материалах [5]. Эти свойства делают материалы на основе металлорганических перовскитов перспективными для применения в качестве активных полупроводниковых слоев в полевых транзисторах (ПТ). В последние годы были получены и исследованы свойства ПТ на основе пленок различных металлорганических перовскитов. Так, в ПТ на основе пленок  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ , нанесенных центрифугированием, были получены значения полевой подвижности дырок ( $\mu_{\text{hole}}$ ) при 300 К  $\mu_{\text{hole}} \sim 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{Vs}$  [6] и  $\mu_{\text{hole}} \sim 2.1 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{Vs}$  [7], а значения подвижности электронов ( $\mu_{\text{elec}}$ )  $\sim 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{Vs}$  [7,8], тогда как в ПТ на основе микрокристаллов  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  значения подвижности составили  $\mu_{\text{hole}} \sim 1-2.5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  [9]. В ПТ на основе  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$  был продемонстрирован амбиполярный режим работы при 300 К со сбалансированными значениями  $\mu_{\text{hole}}$  и  $\mu_{\text{elec}}$  ( $\sim 1.3$  и  $\sim 1.0 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  соответственно) [5]. С другой стороны,

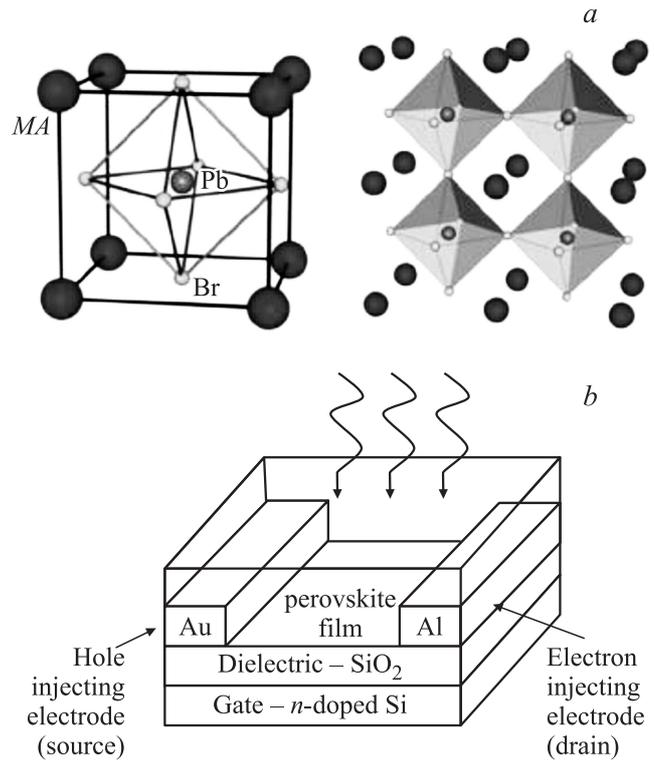
значения  $\mu_{\text{hole}}$  (300)  $\sim 0.6, 2.6$ , и  $\sim 0.78 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  были получены для 2D-пленок металлорганических перовскитов  $(\text{C}_6\text{H}_5\text{C}_2\text{H}_4\text{NH}_3)_2\text{SnI}_4$ , нанесенных на подложки методом центрифугирования [10] и напылением в вакууме [11] соответственно. Недавно рекордные значения  $\mu_{\text{hole}} \sim 15 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  при 300 К с незначительным гистерезисом вольт-амперных характеристик (ВАХ) были получены в ПТ на основе  $(\text{C}_6\text{H}_5\text{C}_2\text{H}_4\text{NH}_3)_2\text{SnI}_4$  при предварительном нанесении на подложки монослоя самоорганизующихся молекул, содержащих концевые группы иодида аммония ( $\text{NH}_3\text{I}-\text{SAM}$ ) [12]. Возможными источниками относительно низких значений  $\mu_{\text{hole}}$  и  $\mu_{\text{elec}}$  наблюдаемых в перовскитовых ПТ, являются невысокое качество пленок металлорганических перовскитов, высокая плотность ловушек и неэффективная инжекция носителей заряда. Наблюдавшийся в большинстве работ большой гистерезис выходных и передаточных характеристик, детально исследованный в работе [13] для ПТ на основе  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  с максимальной  $\mu_{\text{hole}} \sim 0.5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ , является еще одной серьезной проблемой для повышения подвижности перовскитовых ПТ. Таким образом, природа транспорта в ПТ на основе металлорганических перовскитов остается исследованной недостаточно, а вопросы, связанные с повышением подвижности и уменьшением гистерезиса ВАХ в таких ПТ, в настоящее время являются актуальными и открытыми для обсуждения.

Нами получены ПТ на основе пленок растворимых металлорганических перовскитов —  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  и исследованы их электрические и оптические свойства. Полученные ПТ структуры демонстрируют ВАХ, характерные для амбиполярных ПТ с режимом насыщения. Пе-

редаточные характеристики ПТ на основе  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  обладают незначительным гистерезисом и слабо зависят от напряжения на стоке-истоке. Значения подвижности носителей заряда (дырок) при 300 К, рассчитанные из ВАХ ПТ на основе  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  в режимах насыщения и слабых полей, составляют  $\sim 5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  и  $\sim 2 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ , а подвижность электронов  $\sim 3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ .

## 2. Объекты и методы исследования

Для приготовления образцов были использованы порошки металлорганических перовскитов  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  с шириной запрещенной зоны  $E_g \sim 2.3 \text{ eV}$ , приобретенные у компании Xi'an Polymer Light Technology Corp. и использованные без дополнительной обработки. На рис. 1, *a* показана химическая структура металлорганического перовскита —  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  (обозначается также как  $\text{MAPbBr}_3$ ) [4], использованного в нашей работе. Были изготовлены ПТ-структуры на основе  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ , включающие в себя  $n\text{-Si}/\text{SiO}_2/\text{Au}/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3/\text{Al}$  (рис. 1, *b*). В качестве затвора использовалась подложка из сильно легированного  $n+$  кремния с термическим выращенным слоем  $\text{SiO}_2$  толщиной 200 нм в качестве диэлектрика с нанесенными методом термического испарения золотыми (Au) и алюминиевыми (Al) электродами. Расстояние между Au–Al и Au–Au электродами составляло  $\sim 7 \mu\text{m}$  и  $\sim 15 \mu\text{m}$  соответственно, ширина электродов  $\sim 1 \text{ m}$ . Порошок  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  растворялся в DMA —  $N,N$ -Dimethylacetamide, затем раствор перемешивался ультразвуком в течение 10 min на ультразвуковой мешалке Bandelin Sonopuls HD 2070 ( $f \sim 20 \text{ kHz}$ ). Полученный раствор наносился на  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  подложки с Au и Al электродами методами полива или центрифугирования (при 3000 rpm). Нанесенные таким образом пленки высушивались при  $100^\circ\text{C}$  в атмосфере  $\text{N}_2$  в течение 15 min. Толщина пленок, полученных методом полива, составила  $\sim 0.6 \mu\text{m}$  согласно результатам атомно-силовой микроскопии (АСМ). Спектры поглощения пленок металлорганических перовскитов, нанесенных на кварцевые подложки (толщина  $\sim 1 \mu\text{m}$ ), исследовались с помощью спектрометра Cary-50 (Varian). Морфология пленок  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  исследовалась с помощью АСМ — P47-Solver NT-MDT. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) пленок  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  возбуждались с помощью ультрафиолетового светодиода LED UVTOP280TO39HS с длиной волны излучения 285 nm. Излучение светодиода пропусклось через ультрафиолетовый фильтр UFS-8 и фокусировалось на поверхности образца при помощи кварцевой линзы с углом  $\sim 10^\circ$  к нормали к поверхности образца в пятно диаметром  $\sim 2 \text{ mm}$ . Спектры ФЛ регистрировались высокочувствительным волоконно-оптическим спектрометром со сверхмалым световым рассеянием „AVANTES“ — AvaSpec-ULS12048L-USB2 OEM, работающим в спектральном диапазоне 322–1100 nm со спектральным разрешением 4 nm. ВАХ ПТ на основе



**Рис. 1.** Молекулярная структура  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  (*a*), структура ПТ на основе пленки  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  (*b*).

$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  измерялись в вакууме ( $3 \cdot 10^{-3} \text{ Torr}$ ) в темноте при 300 К на держателе азотного криостата с использованием автоматизированной измерительной установки на основе пикоамперметра Keithley 6487 и программируемого источника питания АКIP-1124. Напряжения на стоке-истоке и на затворе варьировались с переменным шагом в пределах от  $-18$  до  $+18 \text{ V}$ . Электрические контакты к образцам изготавливались с использованием серебряной проволоки, которая крепилась к металлическим электродам серебряной пастой. Полевая подвижность носителей заряда  $\mu_{\text{FET}}$  оценивалась из ВАХ ПТ на основе пленок  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  в режимах насыщения и слабых полей с помощью соотношения [14]:

$$I_{\text{SD}} = (W/2L)\mu_{\text{FET}}C_1(V_G - V_{\text{th}})^2, \quad (1)$$

$$I_{\text{SD}} = (W/L)\mu_{\text{FET}}C_1(V_G - V_{\text{th}})V_{\text{SD}}, \quad (2)$$

где  $W$  и  $L$  — ширина и длина канала соответственно,  $C_1$  — емкость на единицу площади  $\text{SiO}_2$  (для толщины  $\sim 200 \text{ nm}$ ,  $C_1$   $10 \text{ nF}/\text{cm}^2$ ),  $V_G$  — напряжение на затворе,  $V_{\text{th}}$  — пороговое напряжение, соответствующее началу аккумуляционного режима. Величина  $V_{\text{th}}$  определялась из передаточных характеристик — наклона зависимости  $I_{\text{SD}}^{0.5}$  от  $V_G$ .

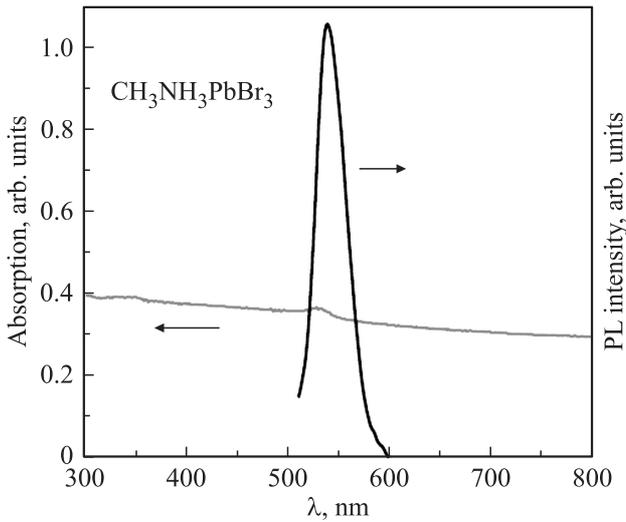


Рис. 2. Спектры поглощения и ФЛ-пленок  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ .

### 3. Результаты и обсуждение

На рис. 2 приведены спектры поглощения и ФЛ-пленок  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ , измеренные при 300 К. Как видно из рис. 2, спектр поглощения пленки  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  имеет край поглощения в спектральном интервале  $\sim 530\text{--}540\text{ nm}$ , что хорошо согласуется с шириной запрещенной зоны  $E_g \sim 2.3\text{ eV}$  исследуемого образца  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ . Спектр ФЛ того же образца лежит в спектральной области  $\sim 500\text{--}600\text{ nm}$  и его максимум

хорошо согласуется с положением края поглощения. На рис. 3 показаны результаты АСМ исследований пленок  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  вне рабочего канала ПТ, нанесенных на подложки методом полива при  $\sim 100^\circ\text{C}$ . Как следует из анализа результатов АСМ, морфология пленок  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  является довольно неоднородной и характеризуется наличием зерен с выраженными границами, при этом средний диаметр зерен составил  $\sim 800\text{ nm}$ , а их высота  $\sim 100\text{ nm}$  (рис. 3). Исследованные пленки  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  обладали значительной шероховатостью (Root Mean Square,  $R_q \sim 23\text{ nm}$ ). На рис. 4 показаны типичные ВАХ ПТ на основе пленки  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  с Au–Al сток–исток электродами, измеренные в вакууме, в темноте и при освещении с помощью имитатора солнечного света, при различных отрицательных напряжениях на затворе,  $V_G$ . Как видно из рис. 4, ВАХ ПТ на основе  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  свидетельствуют о дырочном транспорте и характеризуются хорошо выраженными линейным режимом и режимом насыщения. Важно отметить, что ПТ на основе  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  работают при низких напряжениях на стоке–истоке ( $V_{SD}$ ) и на затворе,  $V_G$  (менее  $15\text{ V}$ ). На рис. 5, а показаны передаточные характеристики и их гистерезис для того же ПТ на основе  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  при отрицательных и положительных напряжениях  $V_G$  в диапазоне от  $-18\text{ V}$  до  $+18\text{ V}$  при  $V_{SD} = -2\text{ V}$  и  $-4\text{ V}$ , измеренные в темноте. Как следует из рис. 5, а, передаточные характеристики, измеренные при  $V_{SD} = -2\text{ V}$  и  $-4\text{ V}$ , почти аналогичны, таким образом они слабо зависят от  $V_{SD}$ . Как видно из рис. 5, а, б, ПТ на основе  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  может работать

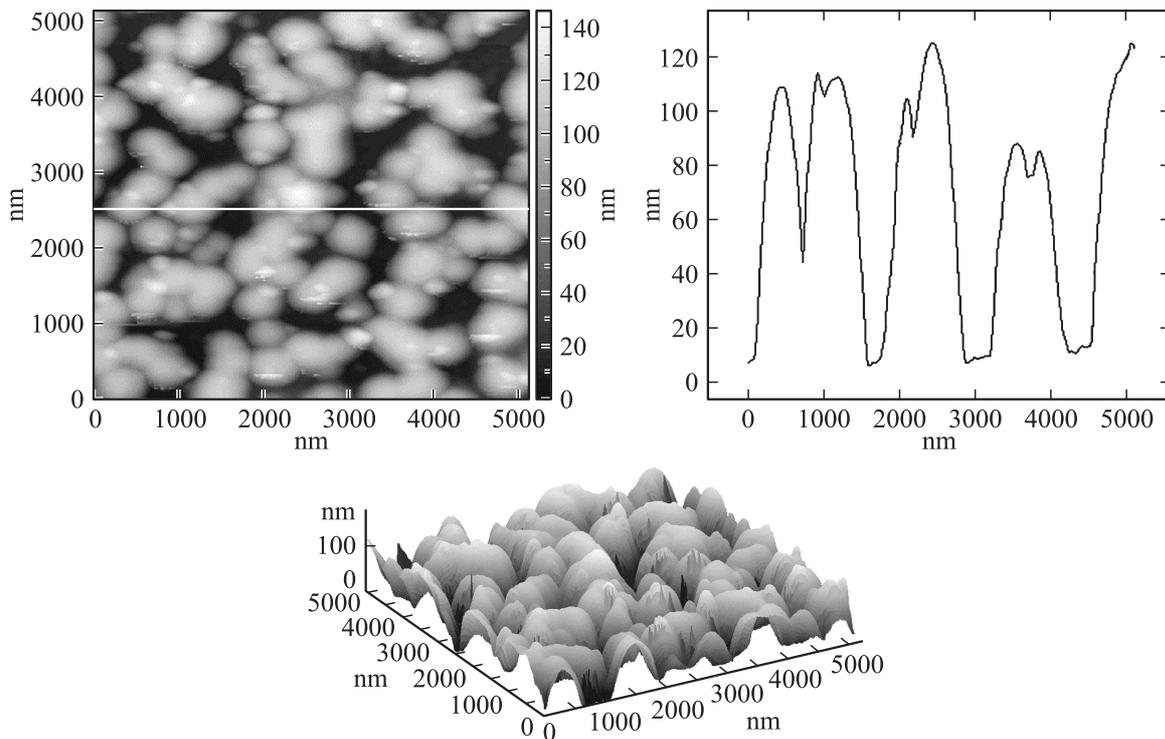
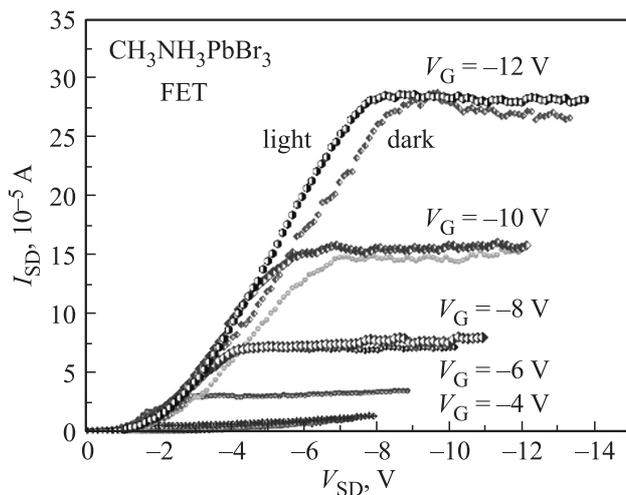


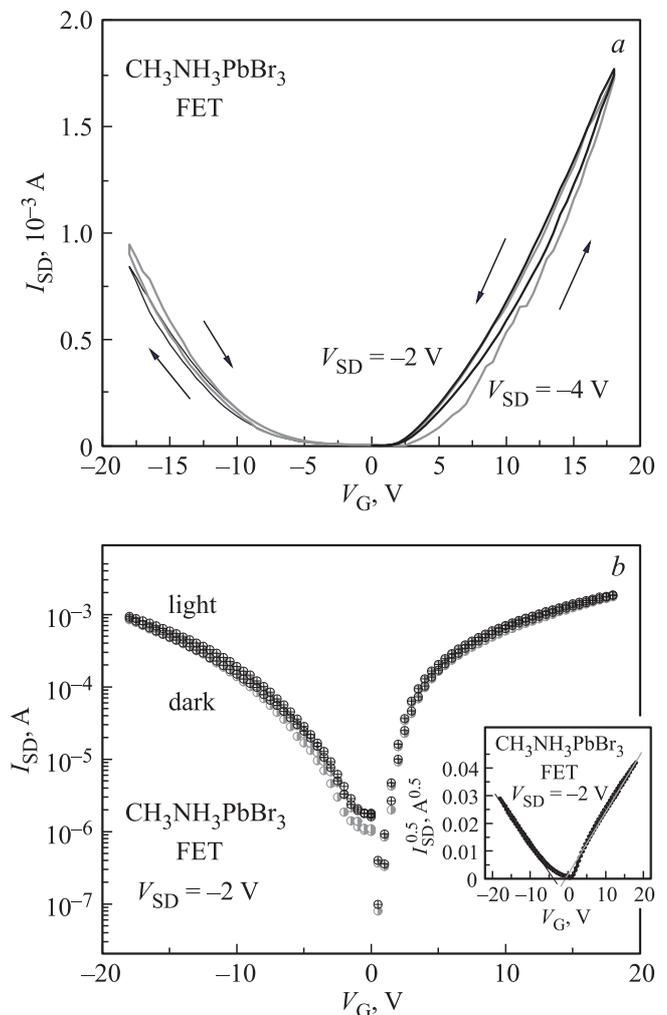
Рис. 3. Результаты АСМ-исследований пленки  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  вне канала ПТ.



**Рис. 4.** ВАХ ПТ на основе  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  для отрицательных значений  $V_G$ , измеренные в темноте и при освещении имитатором солнечного света.

как в режиме накопления дырок, так и электронов, т.е. демонстрирует амбиполярное поведение в темноте и при освещении. Важно отметить небольшой гистерезис передаточных характеристик, наблюдаемый в ПТ на основе  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ , который незначительно возрастает с ростом  $V_{SD}$  (рис. 5, *a*). Наблюдаемый в наших ПТ структурах гистерезис передаточных характеристик значительно меньше, чем гистерезис, наблюдавшийся в ПТ на основе  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  в работе [13], что может означать относительно невысокую плотность ловушек в наших ПТ структурах. Отношение on/off, которое характеризует отношение тока через ПТ при подаче смещения на затвор к току без смещения в исследованных ПТ, достигает  $\sim 10^4$  как при положительных, так и при отрицательных значениях  $V_G$  в интервале от  $-18\text{ V}$  до  $+18\text{ V}$  (рис. 5, *b*). Подвижности дырок при 300 K,  $\mu_{\text{hole}}$  (300 K), в ПТ на основе  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  рассчитывались с использованием формул (1) и (2) для режимов насыщения и слабых полей соответственно. Для ПТ на основе  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ , представленного на рис. 4, 5, пороговые напряжения,  $V_{\text{th}}$ , оценивались из наклона зависимостей  $I_{SD}^{0.5}$  от  $V_G$  при  $V_{SD} = -2\text{ V}$  (см. вставку к рис. 5, *b*) и составили  $\sim -3.6\text{ V}$  и  $-0.8\text{ V}$  для отрицательных и положительных  $V_G$  соответственно. Значения  $\mu_{\text{hole}}$  (300 K), оцененные при 300 K из ВАХ ПТ на основе  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ , составили  $\sim 5\text{ cm}^2/\text{Vs}$  (при  $V_G = -10\text{ V}$  и  $V_{SD} = -8\text{ V}$ ) и  $\sim 2\text{ cm}^2/\text{Vs}$  (при  $V_G = -10\text{ V}$ ) для режимов насыщения и слабых полей соответственно. Подвижность электронов при 300 K для ПТ на основе  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  в режиме слабых полей,  $\mu_{\text{elec}}$  (300 K) составила  $\sim 3\text{ cm}^2/\text{Vs}$  (при  $V_G = 1-2\text{ V}$  и  $V_{SD} = -2\text{ V}$ ). Близкие значения подвижности были получены и для ряда других ПТ на основе  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  с токами отключения порядка  $\sim 8 \cdot 10^{-8} - 10^{-7}\text{ A}$ . Отношения on/off, полученные из передаточных характеристик, показанных на рис. 5, *b*, составляли  $\sim 10^3 - 10^4$  при отрицательных

и положительных  $V_G$  ( $-18\text{ V}$  и  $+18\text{ V}$ ), что по порядку величины близко к значениям on/off, полученным для органических ПТ на основе композитов полимер-наночастицы ZnO [15,16]. При освещении ПТ на основе  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  с помощью имитатора солнечного света наблюдалось слабое увеличение  $I_{SD}$  (8–10% при  $V_{SD} = -10\text{ V}$ ) и небольшой сдвиг порогового напряжения  $V_{\text{th}}$  (от  $\sim -3.6$  и  $\sim -0.8\text{ V}$  в темноте к  $\sim 3.4\text{ V}$  и  $\sim 1.4\text{ V}$  при освещении для отрицательных и положительных  $V_G$  соответственно). Слабая светочувствительность ПТ на основе  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  может быть связана с особенностями поглощения света в композитных (органика–неорганика) полупроводниках, где возбуждение электронов светом сопровождается образованием экситонов. Диссоциация экситонов на границе раздела двух полупроводников (донора и акцептора) приводит к генерации свободных носителей заряда, транспорт которых осуществляется на донорно-акцепторном интер-



**Рис. 5.** Гистерезис передаточных характеристик ПТ на основе  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  при  $V_{SD} = -2\text{ V}$  и  $-4\text{ V}$  (*a*), передаточные характеристики ПТ на основе  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  при  $V_{SD} = -2\text{ V}$ , измеренные в темноте и при освещении имитатором солнечного света (*b*). Зависимость  $I_{SD}^{0.5}$  от  $V_G$  при  $V_{SD} = -2\text{ V}$  для того же ПТ (вставка).

фейсе. Диффузионная длина экситонов в органических полупроводниках ограничена расстоянием  $\sim 10$  nm из-за их низкой подвижности [17], в то время как в перовскитах, таких как  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ , диффузионная длина экситонов достигает  $\sim 100$ – $120$  nm [18]. Вклад в фототок в таких системах дают только фотоны, поглощенные на характерной длине диффузии экситона вблизи плоскости гетероперехода, которые могут эффективно двигаться к интерфейсу, обеспечивая генерацию носителей заряда. В активных слоях СЭ на основе металлорганических перовскитов толщиной несколько сотен nm вклад в фототок дают менее 10% поглощенных фотонов. В ПТ на основе  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  расстояния между планарными электродами Al–Au составляли  $\sim 7$   $\mu\text{m}$ , что значительно превышает длины диффузии экситонов  $\sim 100$  nm и  $\sim 360$  nm в  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  в темноте и при освещении соответственно [19]. В связи с этим большинство фотогенерированных экситонов в таких ПТ-структурах диссоциируют вдали от электродов, не внося вклад в фототок, что приводит к низкой фоточувствительности, наблюдаемой нами в эксперименте.

Полученные нами ПТ на основе  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  демонстрируют при 300 K работу в режимах насыщения и слабых полей, при этом значения дырочной подвижности превышают величины подвижности  $\sim 1$   $\text{cm}^2/\text{Vs}$  в ПТ на основе  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$  [5], а также значения подвижности дырок  $\sim 4.7$   $\text{cm}^2/\text{Vs}$ , полученные для органических ПТ на основе полимерных композитов РЗНТ : [70]PCBM : Ni [20]. По аналогии с результатами работы [13] можно полагать, что улучшение характеристик ПТ на основе  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ , по сравнению с ПТ на основе  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$  [5], может быть связано со снижением концентрации точечных дефектов, расположенных на границах зерен. При этом, согласно модели, предложенной в работе [13], транспорт носителей заряда в исследуемых структурах при 300 K ограничен процессом миграции ионов при наличии точечных дефектов на границах зерен. Другим возможным механизмом, затрудняющим транспорт в ПТ-структурах на основе металлорганических перовскитов, является поляризационная разупорядоченность дипольных моментов  $\text{MA}^+$  катионов при 300 K [13]. Можно полагать, что, по аналогии со свойствами ПТ на основе  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  [7,13], эти механизмы транспорта должны вымражаться при понижении температуры, при этом возможно еще большее увеличение подвижности в ПТ на основе  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ .

## 4. Заключение

Разработаны и исследованы электрические и оптические свойства ПТ-структур на основе растворимых металлорганических перовскитов  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ . Показано, что такие структуры демонстрируют ВАХ, характерные для амбиполярных ПТ с режимом насыщения. Передаточные характеристики ПТ на основе  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  обладают незначительным гистерезисом и слабо зависят от напряжения на стоке–исток. Значения  $\mu_{\text{hole}}$  (300 K), рассчитанные из ВАХ ПТ на основе

$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  в режимах насыщения и слабых полей, составляют  $\sim 5$   $\text{cm}^2/\text{Vs}$  и  $\sim 2$   $\text{cm}^2/\text{Vs}$ , а подвижность электронов  $\mu_{\text{elec}}$  (300 K)  $\sim 3$   $\text{cm}^2/\text{Vs}$ , что превышает значение подвижности  $\sim 1$   $\text{cm}^2/\text{Vs}$ , полученное ранее для полевых транзисторов на основе  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ . Предполагается, что транспорт носителей заряда в ПТ структурах на основе металлорганических перовскитов при 300 K ограничен процессами миграции ионов при наличии точечных дефектов, связанных с границами зерен, а также поляризационной разупорядоченностью дипольных моментов  $\text{MA}^+$  катионов.

## Список литературы

- [1] National Renewable Energy Laboratory, Best Research Cell Efficiencies, [www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency\\_chart.jpg](http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg); accessed: June 2016.
- [2] N.J. Jeon, J.H. Noh, W.S. Yang, Y.C. Kim, S. Ryu, J. Seo, S.I. Seok. *Nature* **517**, 476 (2015).
- [3] H. Zhou, Q. Chen, G. Li, S. Luo, T.-B. Song, H.-S. Duan, Z. Hong, J. You, Y. Liu, Y. Yang. *Science* **345**, 542 (2014).
- [4] H.S. Jung, N.-G. Park. *Small* **11**, 10 (2015).
- [5] V. Mei, C. Zhang, Z.V. Vardeny, O.D. Jurchescu. *MRS Commun.* **5**, 297 (2015).
- [6] J.H. Heo, S.H. Im, J.H. Noh, T.N. Mandal, C.-S. Lim, J.A. Chang, Y.H. Lee, H. Kim, A. Sarkar, M.K. Nazeeruddin, M. Grätzel, S.I. Seok. *Nature Photonics* **7**, 486 (2013).
- [7] X.Y. Chin, D. Cortecchia, J. Yin, A. Bruno, C. Soci. *Nature Commun.* **6**, 7383 (2015).
- [8] J.G. Labram, D.H. Fabiani, E.E. Perry, A.J. Lehner, H. Wang, A.M. Glaudell, G. Wu, H. Evans, D. Buck, R. Cotta, L. Echegoyen, F. Wudl, R. Seshadri, M.L. Chabinyc. *J. Phys. Chem. Lett.* **6**, 3565 (2015).
- [9] G. Wang, D. Li, H.-C. Cheng, Y. Li, C.-Y. Chen, A. Yin, Z. Zhao, Z. Lin, H. Wu, Q. He, M. Ding, Y. Liu, Y. Huang, X. Duan. *Sci. Adv.* **1**, e1500613 (2015).
- [10] C.R. Kagan, D.B. Mitzi, C.D. Dimitrakopoulos. *Science* **286**, 945 (1999).
- [11] T. Matsushima, K. Fujita, T. Tsutsui. *Jpn. J. Appl. Phys.* **43**, L1199 (2004).
- [12] T. Matsushima, S. Hwang, A.S.D. Sandanayaka, C. Qin, S. Terakawa, T. Fujihara, M. Yahiro, C. Adachi. *Adv. Mater.* **28**, 10275 (2016).
- [13] S.P. Senanayak, B. Yang, T.H. Thomas, N. Giesbrecht, W. Huang, E. Gann, B. Nair, K. Goedel, S. Guha, X. Moya, C.R. McNeill, P. Docampo, A. Sadhanala, R.H. Friend, H. Sirringhaus. *Sci. Adv.* **3**, e1601935 (2017).
- [14] C.D. Dimitrakopoulos, P.R.L. Malenfant. *Adv. Mater.* **14**, 99 (2002).
- [15] A.N. Aleshin, I.P. Shcherbakov, V.N. Petrov, A.N. Titkov. *Organic Electron.* **12**, 1285 (2011).
- [16] A.H. Алешин. *УФН*, **183**, 657 (2013).
- [17] D.E. Markov, J.C. Hummelen, P.W.M. Blom, A.B. Sieval. *Phys. Rev. B* **72**, 045216 (2005).
- [18] S.D. Stranks, G.E. Eperon, G. Grancini, C. Menelaou, M.J.P. Alcocer, T. Leijtens, L.M. Herz, A. Petrozza, H.J. Snaith. *Science* **342**, 341 (2013).
- [19] N. Kedem, T.M. Brenner, M. Kulbak, N. Schaefer, S. Levchenko, I. Levine, D. Abou-Ras, G. Hodes, D. Cahen. *J. Phys. Chem. Lett.* **6**, 2469 (2015).
- [20] A.N. Aleshin, I.P. Shcherbakov, I.N. Trapeznikova, V.N. Petrov. *Phys. Solidi. State* **58**, 1882 (2016).