

06.1;07.2

## Особенности вольт-амперных характеристик полевых транзисторов с активными слоями на основе композитных пленок полупроводниковых полимеров с наночастицами неорганических перовскитов

© Е.В. Остроумова, А.Н. Алешин<sup>†</sup>

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

<sup>†</sup> E-mail: aleshin@transport.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 14 июня 2019 г.

В окончательной редакции 14 июня 2019 г.

Принято к публикации 4 сентября 2019 г.

Проведен анализ вольт-амперных характеристик композитных полевых транзисторов с активными слоями на основе неорганических перовскитов — нанокристаллов галогенидов цезия CsPbBr<sub>3</sub>, внедренных в матрицу полупроводникового полимера PFO (PFO:CsPbBr<sub>3</sub>). Обнаружен и объяснен рост коэффициента усиления по току  $\beta$  в вольт-амперных характеристиках таких структур с ростом отрицательного напряжения на затворе. Показано, что при наличии дополнительной инжекции неосновных носителей из электродов в канал транзистора возможно создание композитных светоизлучающих полевых транзисторов с улучшенными характеристиками.

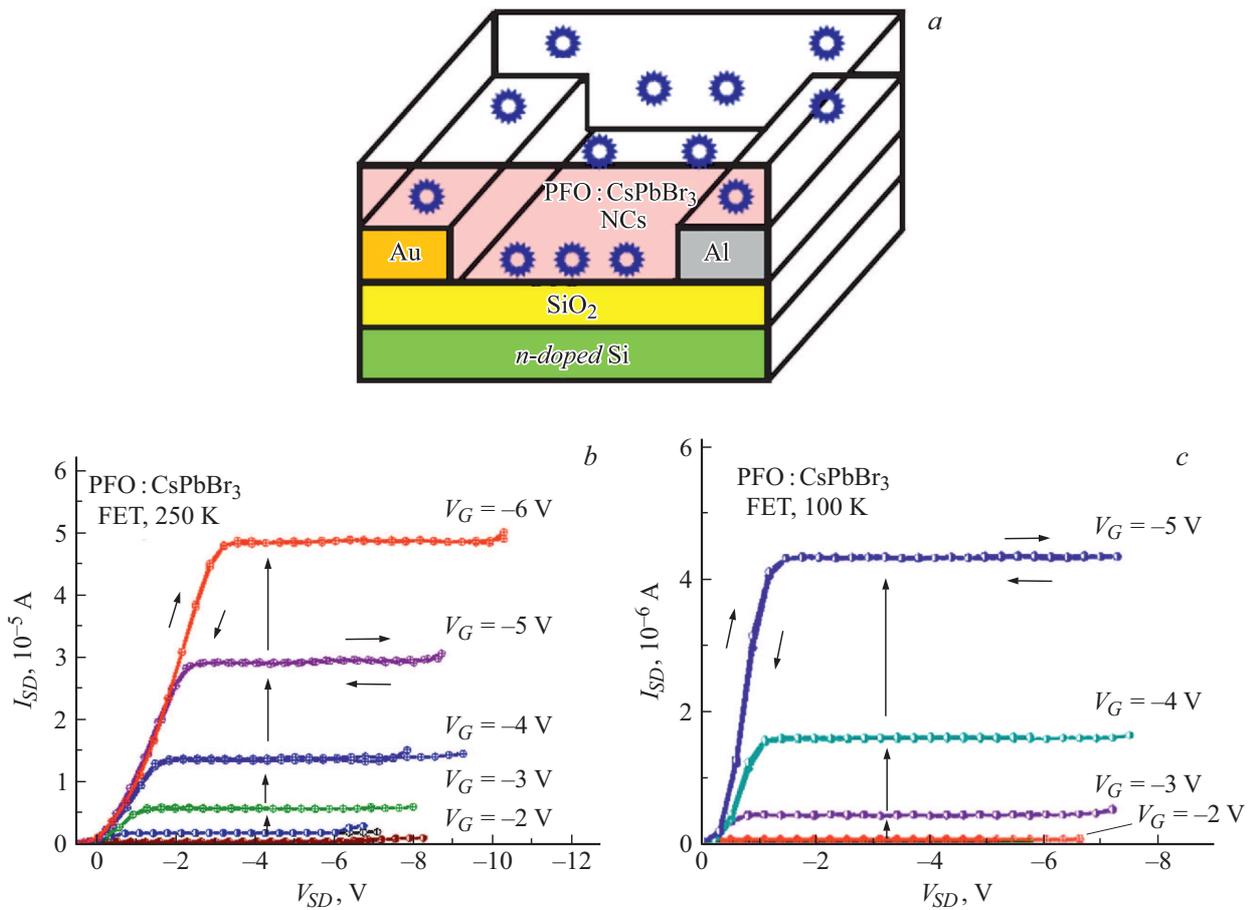
**Ключевые слова:** проводящие полимеры, нанокристаллы перовскитов, полевые транзисторы.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.23.48720.17929

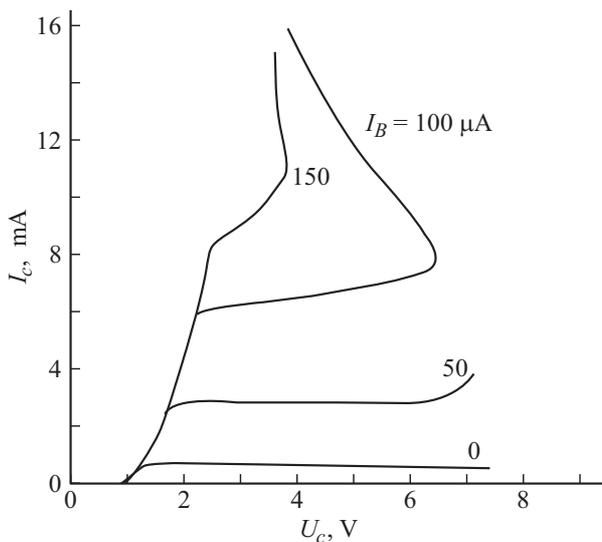
Новые материалы на основе нанокристаллов (НК) неорганических перовскитов CsPb{X}<sub>3</sub>, где X = Cl, Br или I, демонстрируют уникальные оптические и электрические свойства, такие как возможность эффективного поглощения и эмиссии излучения в широком диапазоне энергий, большие времена жизни носителей заряда и их высокая подвижность [1]. При этом важно отметить, что солнечные элементы на основе металлоорганических галогенидных перовскитов обладают очень высокой эффективностью преобразования солнечной энергии (power conversion efficiency) ~ 24.2% (май 2019 г.) [2], что привлекает к ним огромное внимание в мире.

Недавно в наших работах была исследована возможность создания гибридных полевых транзисторов (ПТ, FET) с активными слоями на основе НК неорганических перовскитов — галогенидов цезия CsPbBr<sub>3</sub> (CsPbI<sub>3</sub>), внедренных в матрицу полупроводникового сопряженного полимера — полифлуорена (PFO) (PFO:CsPbBr<sub>3</sub> (CsPbI<sub>3</sub>)) [3,4]. Согласно данным просвечивающей электронной микроскопии и просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения, монодисперсные НК CsPbBr<sub>3</sub> имели кубическую форму, определяемую кристаллической структурой перовскита, а их средний размер составил 8–10 nm [4]. В качестве подложки был использован кремний *n*-типа с изолирующим слоем SiO<sub>2</sub> с нанесенными вакуумным напылением контактами Au и Al (исток–сток), при этом толщина слоя SiO<sub>2</sub> по всей площади, в том числе и под контактами, составляла ~ 200 nm. Расстояние между Au- и Al-контактами составляло 7  $\mu$ m при ширине контактов 1 nm. Раствор сопряженного полимера PFO в толуоле

с нанокристаллами галогенидов цезия CsPbBr<sub>3</sub> в отношении компонентов 1:1 наносился на подложку с контактами методами полива или центрифугирования. На рис. 1, *a* приведена схематическая структура полевого транзистора с композитной пленкой на основе полимера PFO с неорганическими наночастицами CsPbBr<sub>3</sub> [4]. Исследуемая структура (рис. 1, *a*) имеет вид полупроводникового МДП-транзистора (МДП — металл–диэлектрик–полупроводник) с индуцированным (наведенным) каналом. Выходные и передаточные вольт-амперные характеристики (ВАХ) ПТ на основе пленок PFO:CsPbBr<sub>3</sub> измерялись в атмосфере азота в темноте при температурах 100–300 K с использованием азотного оптического криостата optCRYO198 с функцией стабилизации температуры и электронной автоматизированной измерительной системы на основе пикоамперметра Keithley 6487 и программируемого источника напряжения АКIP-1124. На рис. 1, *b, c* представлены выходные ВАХ композитных (полимер PFO–НК CsPbBr<sub>3</sub>) ПТ, измеренные при температурах 250 и 100 K соответственно. Как следует из ВАХ, представленных на рис. 1, *b, c*, в исследованных ПТ-структурах наблюдается значительный рост коэффициента усиления по току  $\beta$  с ростом отрицательного напряжения на затворе  $V_G$  от 0 до  $-6$  V. Аналогичные особенности наблюдались и в ВАХ композитных ПТ с активными слоями на основе PFO с другими неорганическими перовскитными НК — CsPbI<sub>3</sub> (PFO:CsPbI<sub>3</sub>) [3]. Однако эти особенности ВАХ композитных ПТ не были детально объяснены в предыдущих работах.



**Рис. 1.** *a* — структура ПТ на основе композитной пленки, состоящей из НК CsPbBr<sub>3</sub>, внедренных в матрицу полупроводникового полимера PFO (PFO:CsPbBr<sub>3</sub>). *b* и *c* — выходные вольт-амперные характеристики ПТ PFO:CsPbBr<sub>3</sub> (1:1), измеренные в темноте при температурах 250 (*b*) и 100 К (*c*) при различных отрицательных напряжениях на затворе  $V_G$ . Нижние кривые на части *b* соответствуют напряжению на затворе  $-1$  и  $0$  В. Вертикальными стрелками показаны темпы роста коэффициента усиления  $\beta$  при линейном увеличении отрицательного напряжения на затворе  $V_G$ . Наклонные и горизонтальные стрелки указывают на отсутствие гистерезиса ВАХ при увеличении и уменьшении напряжения между истоком и стоком.

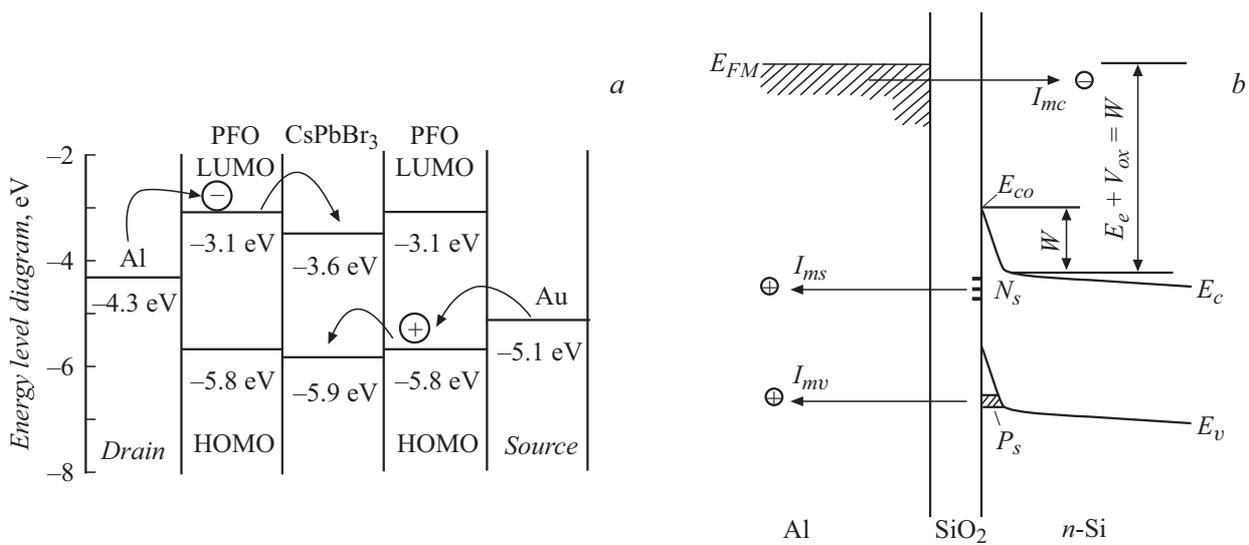


**Рис. 2.** Экспериментальные вольт-амперные характеристики — коллекторные характеристики  $S$ -типа в оже-транзисторе на основе  $n$ -Si-SiO<sub>2</sub>-Al в схеме с общим эмиттером при  $T = 300$  К,  $\alpha \geq 1$  [6].

На наш взгляд, наблюдаемые особенности вольт-амперных характеристик ПТ на основе пленок PFO:CsPbBr<sub>3</sub> (1:1) по аналогии с полупроводниковыми туннельными МДП-транзисторами (рис. 2) могут свидетельствовать о том, что при определенных условиях в объем канала полевого транзистора поступают дополнительные неравновесные носители тока, т.е. происходит инжекция неосновных носителей тока в канал ПТ. В биполярных полупроводниковых транзисторах, включенных в схему с общей базой, коэффициент усиления по току  $\beta$  связан с другим коэффициентом усиления для транзисторов  $\alpha$  соотношением [5]:

$$\beta = \frac{I_c}{I_e} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}, \quad (1)$$

где  $I_c$  и  $I_e$  — коллекторный и эмиттерный токи соответственно, а  $\alpha = \alpha_0$  — коэффициент усиления транзистора по току в схеме с общим эмиттером. В идеальном случае в биполярных транзисторах коэффициент усиления  $\alpha_0$  может достигать единицы. Но когда есть дополнительная



**Рис. 3.** *a* — зонная диаграмма структуры Al/PFO/CsPbBr<sub>3</sub>/Au; *b* — барьер Шоттки и токи инжекции в структурах МДП с индуцированным квантовым колодез на границе раздела металл–диэлектрик [5,6].

инжекция неравновесных носителей в объем, коэффициент усиления может превысить единицу, поэтому в данном случае следует ввести дополнительный коэффициент  $A \geq 0$ , связанный с инжекцией неравновесных электронов (или дырок). Тогда в соотношение (1) необходимо подставить суммарный коэффициент усиления  $A\alpha_0 \geq 1$ , и коэффициент усиления тока  $\beta$  будет связан с коэффициентом усиления тока в схеме с общим эмиттером  $\alpha$  соотношением:

$$\beta = \frac{I_c}{I_e} = \frac{I_c + AI_c}{I_e - (I_c + AI_c)} = \frac{\alpha + A\alpha}{1 - (\alpha + A\alpha)}. \quad (2)$$

При  $A = 0$  (в случае отсутствия дополнительной инжекции) рост коллекторного тока  $I_c$  пропорционален увеличению напряжения на базе. Однако при  $A > 0$  ток может нарастать непропорционально быстро с увеличением поданного на базу транзистора напряжения, как это было рассчитано и экспериментально показано в работе [6] на примере ВАХ туннельных МДП-транзисторов на основе  $n\text{-Si-SiO}_2\text{-Al}$  с туннельно-тонким слоем диэлектрика. На рис. 2 приведены экспериментальные выходные ВАХ оже-транзистора в схеме с общим эмиттером для структуры  $n\text{-Si-SiO}_2\text{-Al}$  с туннельно-проницаемым слоем окисла [6]. Как видно из этих данных, при наличии дополнительного источника неосновных носителей в том случае, когда  $\alpha \geq 1$ , возможно появление неустойчивостей тока вплоть до эффекта переключения.

На ВАХ полевых МДП-транзисторов с активными слоями, выполненными на основе проводящих полимеров и неорганических нанокристаллов перовскитов, представленных на рис. 1, *b, c*, хорошо виден рост коэффициента усиления  $\beta$  для тока  $I_{SD}$  (ток между контактами Au и Al — исток–сток) с ростом отрицательного напряжения на затворе  $V_G$  (аналог базы биполярного транзистора). На рис. 3, *a* представлена энергетическая

зонная диаграмма структуры Al/PFO/CsPbBr<sub>3</sub>(HK)/Au в равновесном состоянии. Ширина запрещенной зоны полимера PFO составляет  $E_g \sim 2.7$  eV, тогда как перовскитные наночастицы CsPbBr<sub>3</sub> имеют ширину запрещенной зоны  $E_g \sim 2.3$  eV, при этом атомы Cs в перовскитных НК находятся в ионизованном состоянии. В отличие от полупроводниковых планарных транзисторов в нашем случае контакты исток–сток выполнены из разных металлов: золото и алюминий.

В исследуемом композитном (полимер–НК перовскита) ПТ слой  $n\text{-Si-SiO}_2$  (база транзистора) является затвором, который управляет индуцированным слоем объемного заряда на границе  $\text{SiO}_2\text{-полимер PFO}$ .  $V_G$  — это напряжение, приложенное к затвору, а  $I_{SD}$  и  $V_{SD}$  — ток и напряжение между контактами Au–Al (исток–сток), аналоги коллекторного тока и напряжения на коллекторе. С ростом отрицательного напряжения на базе  $V_G$  (от 0 до  $-6$  V) на границе раздела (интерфейсе)  $\text{SiO}_2\text{-PFO:CsPbBr}_3$  в полимере PFO электрическим полем индуцируется канал проводимости с положительным зарядом. В этом случае контакты металл (Au, Al)–полимер (PFO) в ПТ можно рассматривать как поверхностные барьеры Шоттки с индуцированным промежуточным слоем диэлектрика, которые будут смещены по-разному: для Al это прямое смещение, а для Au — обратное (рис. 3, *b*). Инжекция носителей заряда (электронов) будет идти из Al в „зону проводимости“ — LUMO (lowest unoccupied molecular orbital) — полимера, и чем больше смещение, тем меньше эффективная толщина потенциального барьера металл–полимер, а вероятность туннелирования носителей заряда (электронов) сквозь барьер значительно возрастает с ростом отрицательного напряжения на затворе. Инжектированные из стока–истока носители заряда могут излучательно рекомбинировать в простран-

ственной области между электродами ПТ, при этом реализуются основные преимущества светоизлучающих ПТ — способность к переключению и эмиссии света, совмещенные в одном приборе [3,4].

Проведен анализ ВАХ гибридных полевых транзисторов с активными слоями на основе PFO:CsPbBr<sub>3</sub>. Объяснен рост коэффициента усиления по току  $\beta$  в ВАХ таких структур с ростом отрицательного напряжения на затворе. Показано, что при дополнительной инжекции неосновных носителей из металлических контактов в объем композитного (полимер PFO–НК CsPbBr<sub>3</sub>) ПТ возможно создание композитных и светоизлучающих ПТ с улучшенными характеристиками.

### Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН № 5 „Фотонные технологии в зондировании неоднородных сред и биообъектов“.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] *Ono L.K., Qi Y.* // J. Phys. D. 2018. V. 51. N 9. P. 093001 (1–27).
- [2] National Renewable Energy Laboratory. Best Research Cell Efficiencies [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency\\_chart.jpg](http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg) (дата обращения: май 2019).
- [3] *Aleshin A.N., Shcherbakov I.P., Gushchina E.V., Matyushkin L.B., Moshnikov V.A.* // Organic Electron. 2017. V. 50. N 1. P. 213–219.
- [4] *Алешин А.Н., Щербаков И.П., Кириленко Д.А., Матюшкин Л.Б., Мошников В.А.* // ФГТ. 2019. Т. 61. В. 2. С. 388–394.
- [5] *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. Кн. 2. 456 с.
- [6] *Остроумова Е.В., Рогачев А.А.* // ФТП. 1994. Т. 28. В. 8. С. 1411–1423.