

## Математическое моделирование полупроводникового элемента на основе кадмий теллурида, оксида кремния и кристаллического кремния с управляемыми свойствами.

Ш. Абдуллаев<sup>1</sup>, С. Отажонов<sup>2</sup>, Ж. Бокиров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Farg'ona davlat texnika universiteti, O'zbekiston, 150107, Farg'ona, ko'ch. Farg'ona, 86

<sup>2</sup>Farg'ona davlat universiteti professori, O'zbekiston, 150100, Farg'ona shahri, Murabbiylar ko'chasi, 19-uy.

**Annotatsiya.** Maqolada boshqa tashqi maydonni yaratish bilan qo'shimcha tashqi omillarni hisobga olgan holda elektr o'tkazuvchanligi uchun umumiy dinamik tenglamani chiqarish bo'yicha tadqiqot taqdim etilgan. asoslangan illyustrativ misol, shuningdek berilgan yarimo'tkazgichlar va Si, bitta element tashkil. Tegishli tenglamani olish uchun Helmgolts tenglamasining qisman prototipidan issiqlik o'tkazuvchanlik tenglamasini to'g'ridan-to'g'ri chiqarish usuli va uni elektrostatik modellashtirishda Laplas tenglamasiga qisqartirish ko'rib chiqiladi. Xulosa qilib aytganda, tenglamaning o'zi, belgilangan model uchun chegara shartlari va uni amalga oshirish jarayonida olingan empirik ma'lumotlar keltirilgan. Aniqlanishicha, tashqi elektr maydoni va toj razryadidan foydalanganda yarimo'tkazgich elementining kadmiy telluridi, kremniy oksidi va kristall kremniy ko'rinishidagi qatlamlari orasidagi potentsial to'siqlar yo'qolgan qatlamlar zonalarida tekislanadi va issiqlik bilan ishlov berishdan keyin CdTe ning tiklanishi ham davom etadi. Birinchi marta Poole-Frenkel effekti CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si geterostrukturasi, tashqi elektr maydoni ta'sirida chuqur darajadagi Ec-0,70 eV yaqin infraqizil spektrda yon tomonlarga siljishi kuzatiladi.

**Kalit so'zlar:** Yarimo'tkazgich element, kadmiy tellurid (CdTe), kremniy oksidi (SiO<sub>2</sub>), kristall kremniy (Si), elektr o'tkazuvchanlik, matematik modellashtirish, differensial tenglamalar.

**Аннотация.** В статье представлено исследование по выводу общего динамического уравнения электропроводности, учитывающего дополнительные внешние факторы с созданием иного внешнего поля. иллюстративный пример на основе, также приведен полупроводников и Si, организующих единый элемент. Для получения соответствующего уравнения затрагивается метод прямого вывода уравнения теплопроводности из частичного прототипа уравнения Гельмгольца с последующим его сведением к уравнению Лапласа в электростатическом моделировании. В заключение приводятся само уравнение, граничные условия для указанной модели и эмпирические данные, полученные при ее реализации. Установлено, что при использовании внешнего электрического поля и коронного разряда потенциальные барьеры между слоями полупроводникового элемента в виде теллурида кадмия, оксида кремния и кристаллического кремния в зонах истощенных слоев сглаживаются, а после термообработки восстановление также продолжается CdTe. Впервые наблюдается эффекта Пула-Френкеля в гетероструктуре CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si, смещение глубокого уровня Ec-0,70эВ в стороны в ближе инфракрасного спектра под влиянием внешнего электрического поля

**Ключевые слова:** Полупроводниковый элемент, теллурид кадмия (CdTe), оксид кремния (SiO<sub>2</sub>), кристаллический кремний (Si), электропроводность, математическое моделирование, дифференциальные уравнения.

### 1. Введение

Увеличение разнообразия доступных материалов с различными проводящими свойствами и переменной концентрацией в них свободных зарядов разного типа открывает большие возможности для современной технической науки. К числу подходящих под приведенное выше определение относятся полупроводники с различной структурой с использованием легирования на смежных материалах [1-2; 11]. В то же время существует и технология использования полупроводников для создания одноименных элементов, в качестве которых может выступать и кремний с его примесями, среди которых может выступать чистый кристаллический кремний, смесь кремния и бора, кремния и фосфора, а также другие комбинации полупроводников [2-4; 7-12; 15-16].

При использовании нескольких элементов типа p-n, n-p, p-n-p и n-p-n необходимо

смоделировать ситуацию, которая могла бы описать выбранный случай с помощью соответствующих уравнений. К настоящему времени эмпирические работы в этом направлении активно применяются [5-10; 12-16], в том числе с непосредственным использованием систем квантового моделирования, учитывающих эффекты туннелирования, частичного создания запутанных электронов и другие квантовые эффекты, следующие из известных закономерностей [2; 7-11; 14-15]. Подобная работа также проводилась ранее в рамках исследований CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si [2-6; 8], что также упоминается в данном исследовании. Однако в каждом из представленных случаев исследование не проводилось аналитически с использованием соответствующих дифференциальных уравнений в частных производных.

Известный на сегодняшний день математический аппарат является дискретным,

что исключает возможность учета всех необходимых параметров, что создает проблему, согласно которой слепые зоны могут быть неопределенными в том или ином случае, когда анализируется одно явление. Исходя из всех

$$\begin{cases} Cd_{48} = 1s^2 2s^2 p^6 3s^2 p^6 d^{10} 4s^2 p^6 d^{10} 5s^2 \\ Te_{52} = 1s^2 2s^2 p^6 3s^2 p^6 d^{10} 4s^2 p^6 d^{10} 5s^2 p^4 \end{cases} \Rightarrow n - CdTe - 2e^-$$

этих положений, настоящее явление является актуальным.

## II. Экспериментальные результаты и их обсуждение.

Получены нанокристаллические (размеры зерен составляет 0,05-0,1 мкм) плёнки CdTe на поверхность SiO<sub>2</sub> - Si. CdTe и примеси Ag и Cu испарялись в вакууме 10<sup>-5</sup> мм.рт.ст. из отдельных испарителей на прогретую окисленную поверхность Si. Взаимное расположение слоев структуры CdTe - SiO<sub>2</sub> - Si и омических контактов к ним схематически показано на рис.1. В такой структуре фоточувствительность управляется под действием внешних воздействий, таких как электрическое поле или коронный разряд, которые меняют встроенного поля в

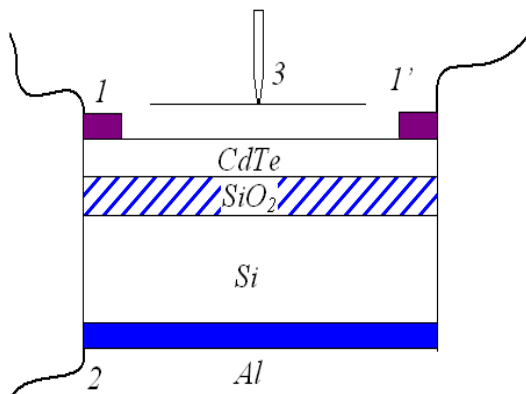


Рис.1 Взаимное расположение слоев структуры CdTe-SiO<sub>2</sub> - Si. 1,2 – контакты; 3 – вынуждающие контакты.

диэлектрике. В этом случае имеем «обратный» полевой транзистор типа CdTe - SiO<sub>2</sub> - Si, когда управляющий заряд находится под слоем

полупроводника, а его поверхность остается открытой.

Вывод дифференциального уравнения того или иного типа основан на преобразовании имеющихся дискретных данных по общей методике дифференциального уравнения смежности. В данном случае необходимо вывести уравнение электропроводности под

действием внешнего электромагнитного поля, для чего необходимо вывести уравнение электропроводности в исходном виде.

Изначально, чтобы понять тип полупроводника теллурида кадмия, необходимо составить представление об электронных оболочках каждого из элементов (1).

Из полученной картины хорошо видно, что кадмий, используемый в соединении, имеет 2 электрона на внешней оболочке, однако на внешней оболочке теллура, которым он легирован, имеется 4 электрона, кроме того, 2 электрона отсутствуют относительно р-орбитали до заполнения внешней орбитали теллура, так что все соединение имеет 2 внешних электрона. Из-за этого в соединении имеется большое количество свободных электронов, общее число которых может быть рассчитано в (2), в том числе и по вычисленному заряду.

$$n_{CdTe} = (1.2 \cdot 10^{-6} \cdot 1.5 \cdot 10^{-2} \cdot 0.5 \cdot 10^{-2}) \cdot \left( \frac{8650 \cdot \frac{127,9044631192}{127,9044631192 + 113,90335852929} + 6240 \cdot \frac{113,90335852929}{127,9044631192 + 113,90335852929} \right) \cdot \left( (127,9044631192 + 113,90335852929) \cdot 1.66 \cdot 10^{-27} \right)^{-1} = 2 \cdot 1.684922249 \cdot 10^{18} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow q_{CdTe} = 0.53917512 \text{ Кл} \quad (2)$$

Полученное выражение можно использовать для уравнения Пуассона электростатики с электронной плотностью (3), но в то же время это уравнение используется в трехмерном пространстве, поэтому необходимо вычислить количество свободных электронов в каждой из проекций общей формы (4).

$$\Delta \varphi_1(x, y, z) = -\frac{\rho}{\epsilon_0} = -\frac{q}{\epsilon_0 V} = -\frac{0.53917512}{8.854 \cdot 10^{-12} \cdot \left( \frac{1.2 \cdot 10^{-6} \cdot 1.5 \cdot 10^{-2} \cdot 0.5 \cdot 10^{-2}}{1.5 \cdot 10^{-2} \cdot 0.5 \cdot 10^{-2}} \right)} = 6.766246518 \cdot 10^{20}$$

$$\rho_n = \frac{1.684922249 \cdot 10^{18}}{1.2 \cdot 10^{-6} \cdot 1.5 \cdot 10^{-2} \cdot 0.5 \cdot 10^{-2}} = 1.872135832 \cdot 10^{28} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{cases} n_a = \rho_n abv = 1.872135832 \cdot 10^{28} \cdot 1.2 \cdot 10^{-6} \cdot 1.5 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-10} \\ n_b = \rho_n acv = 1.872135832 \cdot 10^{28} \cdot 1.2 \cdot 10^{-6} \cdot 0.5 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-10} \\ n_c = \rho_n bcv = 1.872135832 \cdot 10^{28} \cdot 1.5 \cdot 10^{-2} \cdot 0.5 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-10} \end{cases} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{cases} n_a = 33\,698\,444\,980 \\ n_b = 11\,232\,814\,993 \\ n_c = 140\,410\,187\,416\,667 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} q_a = 10.78350239 \text{ нКл} \\ q_b = 3.594500798 \text{ нКл} \\ q_c = 44.93125997 \text{ мкКл} \end{cases} \quad (4)$$

Значения зарядов относительно каждой плоскости можно перевести в значения потенциалов, согласно (5), откуда потенциалы определяются непосредственно в каждой из плоскостей, но чтобы преобразовать полученные константы в функцию, необходимо использовать отдельно взятые электростатические уравнения Пуассона для каждого из измерений (6).

В результате общие виды формируемой функции могут быть сведены к единому виду, в

тот момент, когда введенные три константы могут получить значения, используя указанные в (5) величины в качестве граничных условий в (7).

Важным примечанием к трехмерным графикам будет также важность определения именно того закона, который они демонстрируют, в отличие от показателей, представленных в прямой форме. Так, граничные условия теллурида кадмия были сформулированы на разных масштабах.

$$\varphi = \frac{kq}{r}, r = \rho_n^{-\frac{1}{3}} = 3.766062717 \cdot 10^{-10} \Rightarrow \begin{cases} \varphi_a = 2.577002266 \cdot 10^{11} \\ \varphi_b = 8.59007552 \cdot 10^{10} \\ \varphi_c = 1.073750944 \cdot 10^{15} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{d^2\varphi}{dx^2} = -\frac{q_a}{\varepsilon_0} = -1217.924372 \\ \frac{d^2\varphi}{dy^2} = -\frac{q_b}{\varepsilon_0} = -405.9747908 \\ \frac{d^2\varphi}{dz^2} = -\frac{q_c}{\varepsilon_0} = -5074.684885 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \iint d^2\varphi = -\iint 1217.924372 dx^2 \\ \iint d^2\varphi = -\iint 405.9747908 dy^2 \\ \iint d^2\varphi = -\iint 5074.684885 dz^2 \end{cases} \Rightarrow$$

$$\begin{cases} \frac{\varphi^2}{2} + C_1\varphi = -608.9621862x^2 - C_1x \\ \frac{\varphi^2}{2} + C_2\varphi = -202.9873954y^2 - C_2y \\ \frac{\varphi^2}{2} + C_3\varphi = -2537.342443z^2 - C_3z \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \varphi_a(x) = -C_1 \pm \sqrt{C_1^2 - 1217.924372x^2 - 2C_1x} \\ \varphi_b(y) = -C_2 \pm \sqrt{C_2^2 - 405.9747908y^2 - 2C_2y} \\ \varphi_c(z) = -C_3 \pm \sqrt{C_3^2 - 5074.684885z^2 - 2C_3z} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \varphi_a(1.2 \cdot 10^{-6}) = -C_1 \pm \sqrt{C_1^2 - 1217.924372 \cdot (1.2 \cdot 10^{-6})^2 - 2C_1(1.2 \cdot 10^{-6})} \\ \varphi_b(0.5 \cdot 10^{-2}) = -C_2 \pm \sqrt{C_2^2 - 405.9747908(0.5 \cdot 10^{-2})^2 - 2C_2(0.5 \cdot 10^{-2})} \\ \varphi_c(1.5 \cdot 10^{-2}) = -C_3 \pm \sqrt{C_3^2 - 5074.684885(1.5 \cdot 10^{-2})^2 - 2C_3(1.5 \cdot 10^{-2})} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} C_1 = -1.288501133 \cdot 10^{11} \\ C_2 = -42950377600 \\ C_3 = -5.368754721 \cdot 10^{14} \end{cases} \quad (7)$$

Следующим этапом анализа станет аналогичное рассмотрение ситуации с кристаллическим кремнием. При создании полупроводникового элемента в момент контакта теллурида кадмия с кристаллическим кремнием переход электронов через слой оксида кремния позволяет установить взаимодействие между элементами полупроводникового элемента, в том числе и для направления дополнительного потенциала. Однако для того, чтобы смоделировать ситуацию перехода, необходимо обратить внимание на электронную конфигурацию кристаллического кремния (8).

$$\text{Si}_{14} = 1s^2 2s^2 p^6 3s^2 p^2 \quad (8)$$

Из представленной формулировки хорошо видно, что на внешней орбитали отсутствуют 4 электрона или имеются 4 дырки. Аналогичное моделирование можно провести и для соединения оксида кремния (9).

$$\begin{cases} \text{Si}_{14} = 1s^2 2s^2 p^6 3s^2 p^2 \\ O_8 = 1s^2 2s^2 p^4 \end{cases} \quad (9)$$

В образовавшейся молекуле оксида, благодаря тому, что в ней присутствуют 2 атома кислорода и один атом кремния, появляются 2 дополнительные дырки, что превращает оксид кремния в положительный полупроводниковый элемент. В результате создается картина, в которой теллурид кадмия является элементом, насыщенным свободными электронами, оксид кремния - свободными дырками, а кристаллический кремний - вновь освобожденными электронами. Полученное соединение представляет собой полупроводниковый элемент формы n-p-n, где между каждым из элементов образуется взаимодействие.

В момент запуска тока через теллурид кадмия с одной стороны и кристаллический кремний с другой, в месте контакта слоев создается обедненный слой, в тот момент, когда свободные электроны теллурида кадмия насыщают первые слои оксида кремния с одной стороны, а свободные электроны кристаллического кремния воздействуют на аналогичным образом оксид с другой стороны. В результате образуются 2 обедненных слоя, ширина которых меняется в зависимости не только от приложенного напряжения, но и от внешнего источника. Описанный в данном случае переход можно изобразить в соответствии с рис. 2.

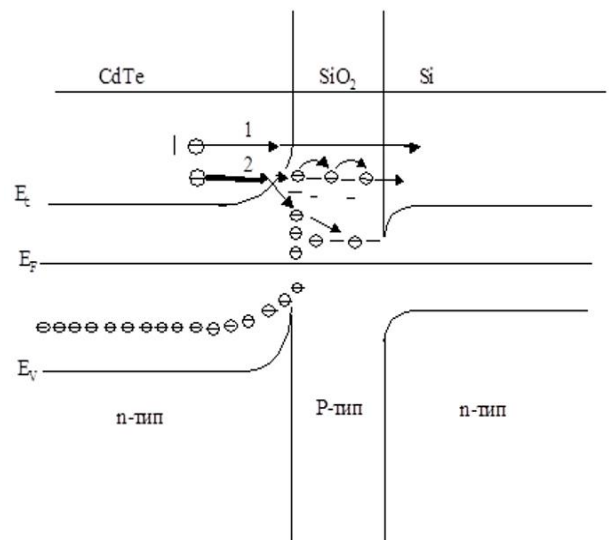


Рис 2. Схема переноса электронов между теллуридом кадмия, оксидом кремния и кристаллическим кремнием. Но для того, чтобы сформировать единый закон, применимый к каждому из слоев, необходимо создать граничные условия, которые на данный момент сформированы для теллурида кадмия, а для оксида кремния, исходя из аналогичного

расчета, могут быть представлены следующим образом.

Первоначально необходимо подсчитать общее количество свободных отверстий и их суммарный заряд (10).

$$n_{SiO_2} = (0.46 \cdot 10^{-6} + 1.5 \cdot 10^{-2} + 0.5 \cdot 10^{-2}) \cdot \left( \frac{2330 \cdot \frac{27.976926535055}{27.976926535055 + 2 \cdot 15.99491461933} + 1428.97 \cdot \frac{27.976926535055 + 2 \cdot 15.99491461933}{27.976926535055 + 2 \cdot 15.99491461933}}{27.976926535055 + 2 \cdot 15.99491461933} \right) \cdot (27.976926535055 + 2 \cdot 15.99491461933) \cdot 1.66 \cdot 10^{-27} = 2 \cdot 6.409387529 \cdot 10^{17} \Rightarrow q_{SiO_2} = 0.205100401 \text{ Kl} \quad (10)$$

Которое можно сформулировать аналогично электростатическому уравнению Пуассона для данной модели (11), после чего рассчитать плотность дырок с представлением относительно каждой из плоскостей, а также далее рассчитать дырки в каждой из плоскостей и аналогичное значение зарядов в тех же плоскостях исследуемого слоя (12).

$$\Delta\varphi_1(x, y, z) = -\frac{\rho}{\epsilon_0} = -\frac{q}{\epsilon_0 V} = -\frac{0.205100401}{6.409387529 \cdot 10^{17}} = 6.714410613 \cdot 10^{20}$$

$$\rho_n = \frac{0.46 \cdot 10^{-6} \cdot 1.5 \cdot 10^{-2} \cdot 0.5 \cdot 10^{-2}}{6.409387529 \cdot 10^{17}} = 1.857793487 \cdot 10^{28} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{cases} n_a = \rho_n a b v = 1.857793487 \cdot 10^{28} \cdot 4.6 \cdot 10^{-7} \cdot 1.5 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-10} \\ n_b = \rho_n a c v = 1.857793487 \cdot 10^{28} \cdot 4.6 \cdot 10^{-7} \cdot 0.5 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-10} \\ n_c = \rho_n b c v = 1.857793487 \cdot 10^{28} \cdot 1.5 \cdot 10^{-2} \cdot 0.5 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-10} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} n_a = 12.818.775.060 \\ n_b = 4.272.925.020 \\ n_c = 1.393.345.115 \cdot 10^{14} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} q_a = 2.05100401 \text{ nKl} \\ q_b = 0.6836680032 \text{ nKl} \\ q_c = 22.29352184 \text{ mKl} \end{cases} \quad (12)$$

Вычисленные значения зарядов могут быть сформированы в значения индивидуальных потенциалов на основе определения потенциала напряженности поля (13).

$$\varphi = \frac{kq}{r}, r = \rho_n^{-\frac{1}{3}} = 3.77572934 \cdot 10^{-10} \Rightarrow \begin{cases} \varphi_a = 48.888.663.421 \\ \varphi_b = 16.296.221.140 \\ \varphi_c = 5.313985154 \cdot 10^{14} \end{cases} \quad (13)$$

В результате моделирования трехмерных графиков хорошо видно, что каждый из них является гладким и простым, в отличие от двух предыдущих примеров, где были задействованы легированные соединения теллурида кадмия и оксида кремния. В данном случае моделируется чистый кристаллический кремний, что и позволяет получить такие графики, которые коррелируют с реальностью.

На основе полученных результатов были сформулированы 3 отдельные модели для теллурида кадмия, оксида кремния и кристаллического кремния, причем в каждом случае функции представлены в трехмерном пространстве. На самом деле, было бы логично расположить все функции друг за другом, создав единую модель полупроводникового элемента.

В результате была получена дискретная общая форма организованного полупроводникового элемента, однако при организованном эмпирическом расчете полученное изменение может быть представлено в соответствии с обнаруженными показателями. Так, спектральные зависимости при взаимодействии с внешним коронным разрядом демонстрируют изменение на рис. 1, когда изменение высоты по шкале потенциального барьера, необходимого для преодоления электронами, может быть представлено согласно рис. 3.

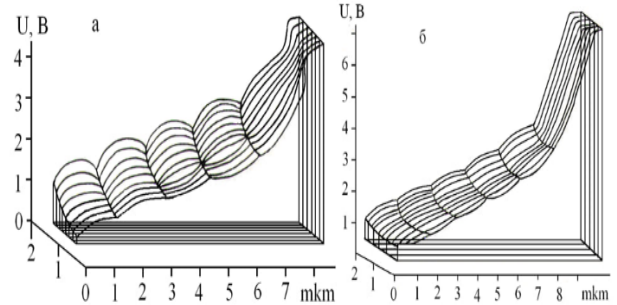


Рис. 3. Рост потенциального барьера электронов при наличии стороннего источника потенциального поля

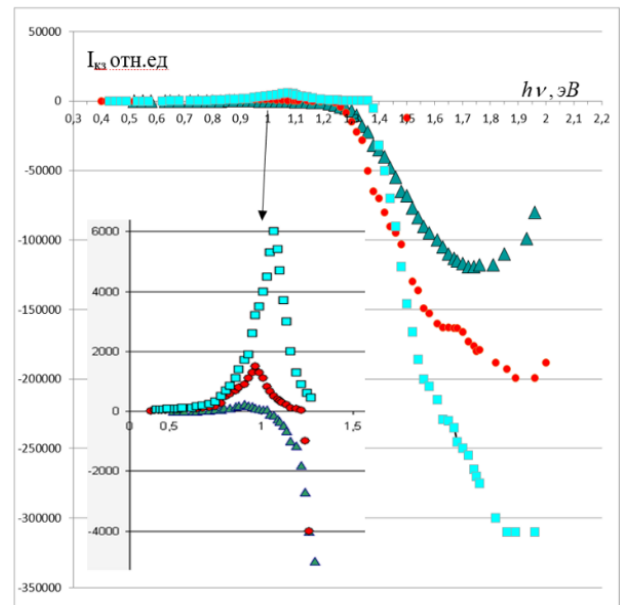


Рис. 4. Спектральный характер взаимодействия под действием внешнего электростатического поля

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** В результате исследования был представлен алгоритм моделирования, позволяющий описывать явления класса электропроводности под воздействием внешнего поля. В частности, большое внимание было уделено непосредственному этапу моделирования в статическом виде полупроводникового элемента типа n-p-n, состоящего из теллурида кадмия, оксида

кремния и кристаллического кремния. Установлено, что под влиянием электрического поля смещается глубокий уровень  $E_c-0,70\text{эВ}$  в стороны в ближе инфра красного спектра и экспериментально доказано эффекта Пула-Френкеля.

#### Литературы:

- [1]. Deng, Z., Li, K., Priimagi, A. et al. Light-steerable locomotion using zero-elastic-energy modes. *Nat. Mater.* (2024). <https://doi.org/10.1038/s41563-024-02026-4>
- [2]. Lee, KJ., Cros, V. & Lee, HW. Индуцированный электрическим полем орбитальный угловой момент в металлах. *Nat. Mater.* 23, 1302-1304 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41563-024-01978-x>
- [3]. Линь, Х., Чжан, С., Ян, М. и др. Семейство суперионных натриевых проводников на основе двух анионов для полностью твердотельных натрий-ионных батарей. *Nat. Mater.* (2024). <https://doi.org/10.1038/s41563-024-02011-x>
- [4]. Подход к идентификации и синтезу мемристорных полупроводников II-V. *Nat. Mater.* 23, 1322-1323 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41563-024-01991-0>
- [5]. Liu, L., Ji, Y., Bianchi, M. et al. Метастабильный пентагональный двумерный материал, синтезированный методом эпитаксии, управляемой симметрией. *Nat. Mater.* 23, 1339-1346 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41563-024-01987-w>
- [6]. Li, Z., Zhai, L., Zhang, Q. et al. 1T'-монослои дихалькогенида переходного металла, стабилизированные на нанопроводах 4H-Ац, для ультрачувствительного обнаружения SERS. *Nat. Mater.* 23, 1355-1362 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41563-024-01860-w>
- [7]. Миура, М., Элей, С., Иида, К. и др. Четырехкратное увеличение плотности тока в сверхпроводнике на основе железа высачивания  $\text{SmFeAsO}_{1-x}\text{H}_x$ . *Nat. Mater.* 23, 1370-1378 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41563-024-01952-7>
- [8]. Hackett, L., Kopra, M., Smith, B. et al. Гигантская электронно-опосредованная фононная нелинейность в полупроводниково-пьезоэлектрических гетероструктурах. *Nat. Mater.* 23, 1386-1393 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41563-024-01882-4>
- [9]. Bae, J., Won, J., Kim, T. et al. Cation-eutaxy-enabled III-V-derived van der Waals crystals as memristive semiconductors. *Nat. Mater.* 23, 1402-1410 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41563-024-01986-x>
- [10]. Ванг, Х., Пан, К., Ся, Н. и др. Усиление мощности в гидрогелевой пусковой установке за счет разлома. *Nat. Mater.* 23, 1428-1435 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41563-024-01955-4>
- [11]. Figgner, J., van Ouwkerk, J., Haberschusz, D. et al. Многолетние полевые измерения домашних систем хранения и их использование для оценки емкости. *Nat Energy* (2024). <https://doi.org/10.1038/s41560-024-01620-9>
- [12]. Трегнаго, Г. Комбинирование фотоэлектрических элементов. *Nat Energy* 9, 1052 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41560-024-01647-y>
- [13]. Гибкое участие электросинтеза в динамических рынках электроэнергии. *Nat Energy* 9, 1062-1063 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41560-024-01584-w>
- [14]. Choo, S., Lee, J., Şişik, B. et al. Геометрический дизайн термоэлектрических материалов на основе  $\text{Cu}_2\text{Se}$  для повышения выработки электроэнергии. *Nat Energy* 9, 1105-1116 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41560-024-01589-5>
- [15]. Ванг, Дж., Чортос, А. Показатели производительности для устройств, изменяющих форму. *Nat Rev Mater* 9, 738-751 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41578-024-00714-w>

#### Mualliflar haqida ma'lumot

1. Otajonov Salim Madraximovich – f.m.f.d., professor, Farg'ona davlat universiteti, Fizika kafedrası, professor. E-mail: [otajonov\\_s@mail.ru](mailto:otajonov_s@mail.ru). Tel.: +99893-643-14-33;
2. Abdullaev Sherzod Shuxratjon o'g'li – Farg'ona davlat texnika universiteti, Fizika kafedrası, tayanch doktoranti. E-mail: [sherzod19962004@gmail.com](mailto:sherzod19962004@gmail.com). Tel.: +99893-980-44-16;
3. Bokirov J– Farg'ona davlat universiteti, Fizika kafedrası, magistranti.