



## МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЭЛЕМЕНТА НА ОСНОВЕ ТЕЛЛУРИДА КАДМИЯ, ОКСИДА КРЕМНИЯ И КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ С УПРАВЛЕННЫМИ СВОЙСТВАМИ

**Рахмонкулов Махаммаджон Хамрокулович**

Ферганский государственный университет

кандидат физика- математических наук, доцент

***Аннотация.** В статье 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*

***Ключевые слова:** Полупроводниковый элемент, теллурид кадмия (CdTe), оксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ), кристаллический кремний (Si), электропроводность, математическое моделирование, дифференциальные уравнения.*

***Annotation.** The paper presents a study on the derivation of the general dynamic equation of electrical conductivity, which takes into account additional external factors with the creation of a different external field. an illustrative example*

*based on, also given semiconductors and Si organizing a single element. To obtain the corresponding equation, a method of direct derivation of the heat conduction equation from a partial prototype of the Helmholtz equation is touched upon, followed by its reduction to the Laplace equation in electrostatic modeling. Finally, the equation itself, the boundary conditions for the above model and the empirical data obtained from its realization are presented. It is found that by using an external electric field and corona discharge the potential barriers between the layers of semiconductor element in the form of cadmium telluride, silicon oxide and crystalline silicon in the zones of depleted layers are smoothed out, and after heat treatment the recovery also continues. CdTe*

**Keywords:** *Semiconductor element, cadmium telluride (CdTe), silicon oxide (SiO<sub>2</sub>), crystalline silicon (Si), electrical conductivity, mathematical modeling, differential equations.*

## 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 [17-21].

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 этих положений, настоящее явление является актуальным.

## ИССЛЕДОВАНИЕ

Получены поликристаллические (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 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.

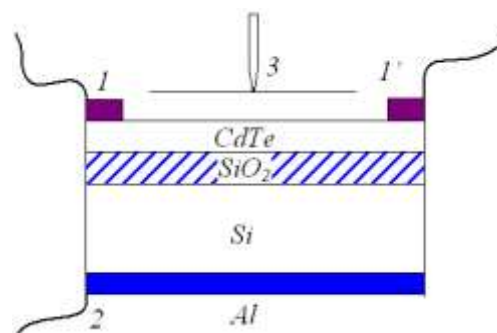


Рис.1 Взаимное расположение слоев структуры CdTe - SiO<sub>2</sub> - Si. 1,2 — контакты; 3 — выбривающие контакты.

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).

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

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.

(2)

$$\begin{aligned} n_{CdTe} &= (1.2 * 10^{-6} * 1.5 * 10^{-2} * 0.5 * 10^{-2}) * \left( \frac{8650 * \frac{127,9044631192}{127,9044631192 + 113,90335852929} +}{+6240 * \frac{113,90335852929}{127,9044631192 + 113,90335852929}} \right) * \\ &* ((127,9044631192 + 113,90335852929) * 1.66 * 10^{-27})^{-1} = 2 * 1.684922249 * 10^{18} \Rightarrow \\ &\Rightarrow q_{CdTe} = 0.53917512 \text{ Kl} \end{aligned}$$

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

$$\Delta\varphi_1(x, y, z) = -\frac{\rho}{\varepsilon_0} = \frac{q}{\varepsilon_0 V} = -\frac{0.53917512}{8.854 \cdot 10^{-12} \cdot \left( \frac{1.2 \cdot 10^{-6} \cdot 1.5 \cdot 10^{-2} \cdot 0.5 \cdot 10^{-2}}{1.684922249 \cdot 10^{18}} \right)} = 6.766246518 \cdot 10^{20}$$

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

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

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

количество свободных электронов в каждой из проекций общей формы (4).

(3)

(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).

$$\varphi = \frac{kq}{r}, r = \rho_n^{-\frac{1}{3}} = 3.766062717 * 10^{-10} \Rightarrow \begin{cases} \varphi_a = 2.577002266 * 10^{11} \\ \varphi_b = 8.590007552 * 10^{10} \\ \varphi_c = 1.073750944 * 10^{15} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \frac{d^2\varphi}{dx^2} = -\frac{q_a}{\varepsilon_0} = -1\,217.924372 \\ \frac{d^2\varphi}{dy^2} = -\frac{q_b}{\varepsilon_0} = -405.9747908 \\ \frac{d^2\varphi}{dz^2} = -\frac{q_c}{\varepsilon_0} = -5\,074\,684.885 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \iint d^2\varphi = -\iint 1\,217.924372 dx^2 \\ \iint d^2\varphi = -\iint 405.9747908 dy^2 \\ \iint d^2\varphi = -\iint 5\,074\,684.885 dz^2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{\varphi^2}{2} + C_1\varphi = -608.9621862x^2 - C_1x \\ \frac{\varphi^2}{2} + C_2\varphi = -202.9873954y^2 - C_2y \\ \frac{\varphi^2}{2} + C_3\varphi = -2\,537\,342.443z^2 - C_3z \end{cases} \quad (6)$$

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.

$$\begin{cases} \varphi_a(x) = -C_1 \pm \sqrt{C_1^2 - 1\,217.924372x^2 - 2C_1x} \\ \varphi_b(y) = -C_2 \pm \sqrt{C_2^2 - 405.9747908y^2 - 2C_2y} \\ \varphi_c(z) = -C_3 \pm \sqrt{C_3^2 - 5\,074\,684.885z^2 - 2C_3z} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \varphi_a(1.2 * 10^{-6}) = -C_1 \pm \sqrt{C_1^2 - 1\,217.924372 * (1.2 * 10^{-6})^2 - 2C_1(1.2 * 10^{-6})} = 2.577002266 * 10^{11} \\ \varphi_b(0.5 * 10^{-2}) = -C_2 \pm \sqrt{C_2^2 - 405.9747908(0.5 * 10^{-2})^2 - 2C_2(0.5 * 10^{-2})} = 8.590007552 * 10^{10} \\ \varphi_c(1.5 * 10^{-2}) = -C_3 \pm \sqrt{C_3^2 - 5\,074\,684.885(1.5 * 10^{-2})^2 - 2C_3(1.5 * 10^{-2})} = 1.073750944 * 10^{15} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} C_1 = -1.288501133 * 10^{11} \\ C_2 = -42\,950\,377\,600 \\ C_3 = -5.368754721 * 10^{14} \end{cases} \quad (7)$$

## 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. Дальнейшая работа в этом направлении также актуальна, наряду с последующим приведением к аналитическому виду сложной совокупности элементов и их комбинаций, участвующих в сборке полупроводникового элемента, исследуемого в данной работе.

### **ССЫЛКИ**

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-Au, 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 SmFeAsO<sub>1-x</sub>H<sub>x</sub>. Nat. Mater. 23. 1370-1378 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41563-024-01952-7>

8. Hackett, L., Корра, М., 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>