

твердых растворов. Показано, что данный способ модификации слоистого кобальтита бария позволяет повысить величину его фактора мощности и может быть использован при разработке новых оксидных термоэлектриков на его основе.

Работа выполнена при поддержке ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии» (подпрограмма «Материаловедение и технологии материалов», задание 1.26).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Oxide Thermoelectrics. Research Signpost / Ed. by K. Koumoto K., I. Terasaki, N. Murayama N. Trivandrum: India, 2002. 255 p.
2. Promising high temperature thermoelectric properties of dense $\text{Ba}_2\text{Co}_9\text{O}_{14}$ ceramics / F. Delorme [et al.] // J. Eur. Ceram. Soc. – 2017. – V. 37. – P. 2615–2620.
3. New Barium Cobaltite Series $\text{Ba}_{n+1}\text{Co}_n\text{O}_{3n+3}(\text{Co}_8\text{O}_8)$: Intergrowth Structure Containing Perovskite and CdI_2 -Type Layers / J. Sun [et al.] // Inorg. Chem. – 2006. – V. 45. – P. 9151–9153.
4. $\text{Ba}_2\text{Co}_9\text{O}_{14}$: New Inorganic Building Blocks with Magnetic Ordering through Super-Super Exchanges Only / G. Ehora [et al.] // Chem. Mater. – 2007. – V. 19. – P. 2180–2188.
5. Spin-state transition in $\text{Ba}_2\text{Co}_9\text{O}_{14}$ / J.-G. Cheng [et al.] // Phys. Rev. B. 2012. – V. 85. – P. 094424 (6 pp.).
6. Magnetic and Transport Properties of $\text{Ba}_2\text{Co}_9\text{O}_{14}$ and $\text{Ba}_{1.9}\text{A}_{0.1}\text{Co}_9\text{O}_{14}$ (A = La or Na) / T. Takami [et al.] // J. Phys. Soc. Jpn. – 2010. – V. 79. – No. 11. – P. 114713 (5 pp.).
7. Raman study of high temperature insulator-insulator transition in $\text{Ba}_2\text{Co}_9\text{O}_{14}$ // M. Zaghrioui [et al.] // Solid State Sci. – 2018. – V. 79. – P. 1–5.
8. Термоэлектрические свойства керамики на основе слоистых кобальтитов натрия и кальция / А.И. Клындюк [и др.] // Термоэлектричество. 2011. – № 4. – С. 49–55.
9. Klyndyuk A.I. Thermoelectric properties of the layered oxides $\text{LnBaCu}(\text{Co})\text{FeO}_{5+\delta}$ (Ln = La, Nd, Sm, Gd) / A.I. Klyndyuk, Ye.A. Chizhova // Funct. Mater. – 2009. – V. 16, No. 1. – P. 17–22.
10. Физикохимические свойства твердых растворов кобальтитов $\text{La}_{1-x}\text{Gd}_x\text{CoO}_3$ / С.В. Курган [и др.] // Весці НАН Беларусі. Сер. хім. навук. – 2005. – № 1. – С. 34–38.
11. Свойства твердых растворов $\text{Nd}_{1-x}\text{Gd}_x\text{CoO}_3$ / С.В. Курган [и др.] // Неорган. матер. – 2004. – Т. 40, № 11. – С. 1389–1394.
12. Мотт Н. Электронные процессы в некристаллических веществах / Н. Мотт, Э. Дэвис. – М.: Мир, 1982. – 368 с.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ ОКСИД ЦИНКА–КРЕМНИЙ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ СОЛНЕЧНЫМ СВЕТОМ

А. А. Курапцова, А. Л. Данилюк

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. Бровки, 6, 220013 Минск, Беларусь,
e-mail: anku21qwerty@gmail.com*

В данной работе приводятся результаты моделирования влияния солнечного света на вольт-амперную характеристику гетероструктуры оксид цинка–кремний. Моделирование проводилось с использованием программы PC1D 5.9. Исследовалось влияние длины волны солнечного излучения на выходной фототок и скорость генерации носителей заряда в гетероструктуре оксид цинка–кремний.

Ключевые слова: оксид цинка; кремний; гетероструктура; фотокатализ; моделирование.

ELECTRICAL PROPERTIES OF THE ZINC OXIDE-SILICON HETEROSTRUCTURE UNDER SOLAR RADIATION

A. A. Kuraptsova, A. L. Danilyuk

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,

Browka str. 6, 220013 Minsk, Belarus

Corresponding author: A. A. Kuraptsova (anku21qwerty@gmail.com)

In this paper, we present the results of modeling the effect of sunlight on the current-voltage characteristic of a zinc oxide - silicon heterostructure. The simulation was carried out using the *PC1D* 5.9 program. The influence of the wavelength of solar radiation on the output photocurrent and the charge carrier generation rate in a zinc oxid–silicon heterostructure was studied.

Key words: zinc oxide; silicon; heterostructures; photocatalysis; modeling.

ВВЕДЕНИЕ

Оксид цинка (ZnO) находит широкое применение в солнечных элементах, сенсорах молекулярного состава газа, фотокаталитическом разложении воды. Одним из перспективных направлений использования оксида цинка является очистка воды и воздуха от органических загрязнителей [1]. Целью данной работы является исследование электрических свойств гетероструктуры оксид цинка–кремний (*n*-ZnO/*p*-Si) в условиях солнечного излучения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Моделирование электрических параметров гетероструктуры *n*-ZnO/*p*-Si проводилось с помощью программы *PC1D* 5.9 [2] на основе диффузионно-дрейфовой одномерной модели. В этой модели решается система одномерных уравнений с использованием дискретной сетки. Система представлена уравнением Пуассона и двумя уравнениями переноса заряда в случае электронов и дырок:

$$\begin{cases} \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}{q} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = p(x) + n(x) + N_d - N_a; \\ -\frac{1}{q} \frac{\partial j_n(x)}{\partial x} = G_n(x) - R_n(x); \\ -\frac{1}{q} \frac{\partial j_p(x)}{\partial x} = G_p(x) - R_p(x), \end{cases}$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость, ε_0 – электрическая постоянная, q – заряд электрона, $p(x)$ и $n(x)$ – концентрация дырок и электронов в слоях, φ – электростатический потенциал, N_D и N_A – концентрации доноров и акцепторов в слоях, j_n и j_p – плотности электронного и дырочного токов, $G_n(x)$ и $G_p(x)$ – скорости ге-

нерации электронов и дырок, $R_n(x)$ и $R_p(x)$ – скорости рекомбинации электронов и дырок.

Использованные параметры материалов для оксида цинка и кремния представлены в таблице.

Таблица

Параметры материалов

	<i>p-Si</i>	<i>n-ZnO</i>
Ширина запрещенной зоны	1,124 эВ	3,37 эВ
Сродство к электрону	4,05 эВ	3,4 эВ
Концентрация носителей заряда в собственном полупроводнике (300 К)	10^{10} см^{-3}	10^6 см^{-3}
Относительная диэлектрическая проницаемость	11,9	8,5
Время жизни носителей заряда	500 мкс	1,48 нс
Концентрация примеси	10^{17} см^{-3}	10^{16} см^{-3}
Толщина	5 мкм	1 мкм

Площадь гетероперехода 1 см^2 , температура 300 К, коэффициенты преломления, поглощения и отражения варьируются от длины волны излучения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Получены вольт-амперные характеристики при мощности излучения $0,1 \text{ Вт/см}^2$ для различных длин волн солнечного излучения (рис. 1) и зависимость тока короткого замыкания I_{sc} от длины волны излучения λ (рис. 2) гетероструктуры оксид цинка - кремний (*n-ZnO/p-Si*) (мощность излучения $0,01 \text{ Вт/см}^2$).

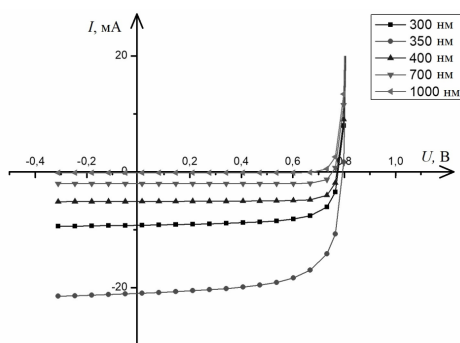


Рисунок 1. – Вольт-амперные характеристики структуры *n-ZnO/p-Si*

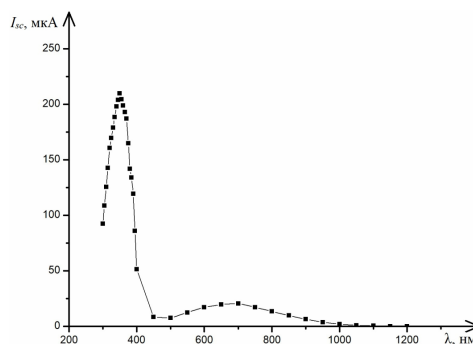


Рисунок 2. – Зависимость тока короткого замыкания I_{sc} от длины волны излучения λ

Как можно видеть из рис. 1, при внешнем смещении $-0,4 < U < 0,6 \text{ В}$ величина тока практически не зависит от прикладываемого потенциала, но существенно зависит от длины волны солнечного света, область $0,6 < U < 0,7 \text{ В}$ является переходной, а при $0,7 < U < 0,8 \text{ В}$ меняется направление тока и наблюдается прямая ветвь ВАХ для гетероперехода, в которой величина тока практически не зависит от длины волны сол-

нечного света, т.е. от концентрации генерированных носителей заряда. Максимум тока при $\lambda = 350$ нм соответствует энергии фотонов, близкой к ширине запрещенной зоны оксида цинка. Этим объясняется также и пик на токе короткого замыкания (рис. 2). При $\lambda = 300$ нм энергия фотонов равна 4.14 эВ и концентрация генерированных носителей заряда меньше, чем при $\lambda = 350$ нм. При $\lambda = 400$ нм энергия фотонов уже меньше ширины запрещенной зоны ZnO и наблюдается снижение тока. Небольшой максимум, наблюдающийся в области $\lambda = 700$ нм, связан, видимо, с наличием дополнительной генерации носителей заряда в кремнии, или за счет примесных состояний оксида цинка. Полученные результаты укладываются в схему, согласно которой рассматриваемая гетероструктура является барьером Шоттки.

Ток короткого замыкания существенно зависит от спектров отражения и поглощения оксида цинка и кремния. Максимуму тока короткого замыкания соответствует длина волны излучения 350 нм, которая попадает в ультрафиолетовый диапазон волн солнечного света. Нелинейная зависимость тока короткого замыкания от длины волны излучения вызвана разной скоростью фотогенерации G носителей заряда в структуре (рис. 3).

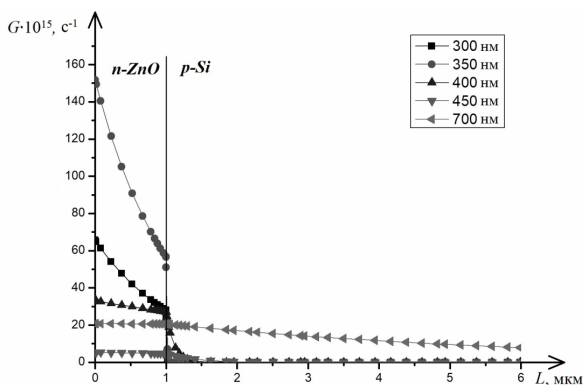


Рисунок 3. – Скорость фотогенерации носителей заряда G в зависимости от расстояния от поверхности L для различных длин волн излучения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное моделирование электрических характеристик гетероструктуры $n\text{-ZnO}/p\text{-Si}$ показало, что ВАХ в условиях освещения солнечным светом характеризуется ростом тока, величина которого нелинейным образом зависит от длины солнечного света. Ток короткого замыкания характеризуется максимумом при длине волны, соответствующей генерации носителей заряда в оксиде цинка с энергией вблизи потолка валентной зоны и дна зоны проводимости. Ширине запрещенной зоны оксида цинка равной 3,37 эВ соответствует энергия кванта с длиной волны 368 нм, что попадает в ультрафиолетовую часть солнечного спектра. Расширение диапазона фотопоглощения оксида цинка возможно за счет легирования различными примесями, что приведет к образованию полос поглощения в видимой области спектра или сужению ширины запрещенной зоны [3].

Полученные результаты необходимы для исследования электронных процессов на поверхности оксида цинка, определяющих его фотокаталитические свойства, которые могут быть значительно усилены при использовании наноразмерных частиц.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Повышение активности фотокатализаторов на основе ZnO, обработанных в плазме высокочастотного разряда / Н. А. Савастенко [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2016. – Т. 83, № 5. – С. 715–723.
2. PC1D Version 5: 32-bit solar cell modeling on personal computers / D.A. Clugston[and al.] // Proc. 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anaheim, 1997 - pp. 207–210.
3. Изучение фотокаталитических и сенсорных свойств нанокompозитных слоев ZnO/SiO₂ / А.С. Божинова [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2013. – Т. 47, вып. 12. – С. 73–79.

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОПТИЧЕСКУЮ ПЛОТНОСТЬ ВОДЫ, ИСПОЛЪЗУЕМУЮ В ТЕХНОЛОГИИ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

В. В. Лукьяница

*УО Белорусский государственный медицинский университет,
кафедра физики, 220116, Минск, пр. Дзержинского, 83. Беларусь
e-mail: Lukyan.1952@mail.ru*

Установлено, что наблюдаемые на эксперименте изменения оптической плотности (D) дистиллированной воды чувствительны к дозе (времени) воздействия переменного магнитного поля (МП) и длине волны диагностирующего света (300 нм–700 нм). Эти дозовые и спектральные зависимости изменений D имеют немонотонный характер и интерпретированы изменением структуры воды при образовании и перестройках молекулярных кластеров под действием МП.

Ключевые слова: вода; переменное магнитное поле; взаимодействие; дозовые и спектральные зависимости оптической плотности воды.

THE INFLUENCE OF ALTERNATING MAGNETIC FIELD ON THE OPTICAL DENSITY OF THE WATER, WHICH IS USING IN MICROELECTRONICS TECHNOLOGY

V. V. Lukyanitsa

*Belarusian state medical University, Department of physics,
220116, Minsk, Dzerzhinsky Ave., 83. Belarus,
Corresponding author: V. V. Lukyanitsa (Lukyan.1952@mail.ru)*

It was found that the observed changes in the optical density (D) of distilled water are sensitive to the dose (time) of the alternating magnetic field (MF) and the wavelength of the diagnostic light (300 nm–700 nm). The non-monotonic dose and spectral dependences of D changes are interpreted by changes in the structure of water during the formation and rearrangement of molecular clusters under the action of MF.

Key words: water; alternating magnetic field; interaction; dose and spectral dependences of optical density of water.