



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-125-7-136-143>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 539.143.5

ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОГО СВЕТА НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ ДИОКСИД ТИТАНА/КРЕМНИЙ

КУРАПЦОВА А.А.¹, ДАНИЛЮК А.Л.¹, ЛЕШОК А.А.¹, БОРИСЕНКО В.Е.^{1,2}

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Российская Федерация

Поступила в редакцию 1 ноября 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019

Аннотация. Представлены результаты теоретического моделирования электрических характеристик гетероструктуры диоксид титана/кремний в условиях солнечного облучения. Моделирование проведено с помощью математического описания процессов генерации и переноса носителей заряда для практически важных гетероструктур $n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}$. Установлено, что величина тока в области малых внешних смещений – до 0,6 В, нелинейным образом зависит от длины волны солнечного света и определяется переходом электронов из кремния в диоксид титана. Максимум тока соответствует длинам волн солнечного излучения в области 600 нм. Полученные результаты объясняются существенным различием коэффициентов поглощения и отражения солнечного излучения диоксида титана и кремния, обуславливающим закономерности генерации неравновесных носителей заряда в гетероструктуре $n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}$. Показано, что в отсутствие внешнего смещения в области длин волн солнечного излучения 500–600 нм электронные переходы из кремния в диоксид титана происходят свободно, а переходы дырок блокированы. Это позволяет при относительно тонком слое диоксида титана эффективно реализовывать процессы каталитической очистки воды и воздуха на его поверхности за счет окисления органических соединений путем захвата электронов на поверхностные состояния. Установленные закономерности перспективны для углубленного анализа электронных процессов на поверхности полупроводниковых широкозонных оксидов металлов и их практического использования в фотокаталитических процессах.

Ключевые слова: диоксид титана, кремний, гетероструктура, фотокатализ, моделирование.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Авторы признательны за финансовую поддержку работы по проекту 16-3131 государственной программы «Конвергенция-2020». В.Е. Борисенко благодарит за частичную финансовую поддержку программы «Повышение конкурентоспособности» Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Московский инженерно-физический институт).

Для цитирования. Курапцова А.А., Данилюк А.Л., Лешок А.А., Борисенко В.Е. Влияние солнечного света на электрические характеристики гетероструктуры диоксид титана/кремний. Доклады БГУИР. 2019; 7 (125): 136-143.

EFFECT OF SUNLIGHT ON THE ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF THE HETEROSTRUCTURE TITANIUM DIOXIDE/SILICON

ANNA A. KURAPTSOVA¹, ALEXANDER L. DANILYUK¹, ANDREW A. LESHOK,
VICTOR E. BORISENKO^{1,2}

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

²National Research Nuclear University “MEPhI”, Moscow, Russian Federation

Submitted 1 November 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2019

Abstract. Electrical characteristics of the heterostructure titanium dioxide/silicon illuminated by the sun light were theoretically modeled. The modeling process includes consideration of generation of the charge carriers and their transport through the practically important heterostructure $n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}$. The current through the structure under small external bias up to 0.6 V was found to depend nonlinearly on the light wavelength. It is controlled by the movement of the electrons from silicon to the titanium dioxide. The highest current corresponds to the wavelengths of about 600 nm. The results obtained are explained by the difference in the absorption coefficients and reflectivity of titanium dioxide and silicon which determine generation of nonequilibrium charge carriers in the heterostructure $n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}$. It was demonstrated that under illumination of the unbiased heterostructure with the light of 500–600 nm the generated electrons freely move from the titanium dioxide to silicon while the movement of holes is blocked. It helps to concentrate electrons in the relatively thin nearsurface layer of titanium dioxide and use them for catalytic purification of water and air by oxidation of organic pollutants at its surface. The regularities observed are important in the detailed analysis of electronic processes at the surface of wide band gap semiconducting metal oxides and their practical application in photocatalytic processes.

Keywords: titanium dioxide, silicon, heterostructure, photocatalysis, modeling.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. The authors acknowledge financial support of the work by the project 16-3131 of the National Program “Convergence-2020”. V. E. Borisenko acknowledges the partial financial support of the “Improving of the Competitiveness” Program of the National Research Nuclear University “MEPhI” (Moscow Engineering Physics Institute).

For citation. Kuraptsova A.A., Danilyuk A.L., Leshok A.A., Borisenko V.E. Effect of sunlight on the electrical characteristics of the heterostructure of titanium dioxide/silicon. Doklady BGUIR. 2019; 7 (125): 136-143.

Введение

В настоящее время неуклонно растет практический интерес к гетероструктурам из полупроводников. Они активно используются в электронике, лазерах, фотовольтаике [1]. Существует значительный интерес к исследованиям электрических свойств гетероструктур на основе кремния и широкозонных прозрачных оксидов. В последние годы оксиды металлов с полупроводниковыми свойствами, в частности, диоксид титана (TiO_2), достаточно широко используются в разных приборах, особенно в фотоэлектрической технике, солнечных элементах, детекторах ультрафиолетового излучения [2, 3]. Он также находит применение в сенсорах молекулярного состава газа и устройствах для фотокатализа [4]. Отличительной особенностью фотокаталитических очистителей является разложение органических загрязнений с экологически чистыми продуктами реакции (H_2O и CO_2) [5]. Применение полупроводниковых оксидов металлов сталкивается с проблемой расширения спектра фотопоглощения материалов на их основе.

В литературе отсутствуют детальные исследования механизмов токопереноса, электрических свойств, а также электронных процессов в гетероструктурах диоксид титана/кремний в условиях облучения солнечным светом. Авторами предложено математическое описание таких процессов и проведено их численное моделирование для практически важных гетероструктур $n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}$.

Модель

Моделирование электрических характеристик гетероструктуры $n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}$ проводили с помощью квазиклассических уравнений токопереноса в полупроводниках [6]:

$$\begin{aligned} J_n &= \mu_n n \nabla E_{Fn}, \\ J_p &= \mu_p p \nabla E_{Fp}, \end{aligned} \quad (1)$$

где J_n и J_p – плотности электронного и дырочного токов, μ_n и μ_p – подвижности электронов и дырок, E_{Fn} и E_{Fp} – энергии квазиуровней Ферми для электронов и дырок.

Связь токопереноса с процессами генерации–рекомбинации носителей заряда устанавливается с помощью стационарных уравнений непрерывности для электронов и дырок:

$$\begin{aligned} -\nabla J_n / q &= G - U_n, \\ \nabla J_p / q &= G - U_p, \end{aligned} \quad (2)$$

где G – скорость генерации электронно-дырочных пар, U_n и U_p – скорости рекомбинации электронов и дырок.

В дополнение к уравнениям (1) и (2), включающим плотности тока как неизвестные величины, используем уравнение Пуассона:

$$\nabla(\epsilon \epsilon_0 \nabla U) = -\rho, \quad (3)$$

где ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость соответствующего полупроводника гетероструктуры, U – электрический потенциал, ρ – объемная плотность заряда, ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума.

При построении энергетической диаграммы гетероструктуры $n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}$ (рис. 1), использовали следующие выражения для вычисления ширины области пространственного заряда (ОПЗ) в TiO_2 (d_n) и Si (d_p) [7]:

$$\begin{aligned} d_n &= \sqrt{\frac{2N_A \epsilon_n \epsilon_p V_D \epsilon_0}{eN_D(\epsilon_n N_D + \epsilon_p N_A)}}, \\ d_p &= \sqrt{\frac{2N_D \epsilon_n \epsilon_p V_D \epsilon_0}{eN_A(\epsilon_n N_D + \epsilon_p N_A)}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где e – заряд электрона, ϵ_n и N_D – относительная диэлектрическая проницаемость и концентрация доноров в полупроводнике с n -типом проводимости, ϵ_p и N_A – относительная диэлектрическая проницаемость и концентрация акцепторов в полупроводнике с p -типом проводимости, V_D – контактная разность потенциалов.

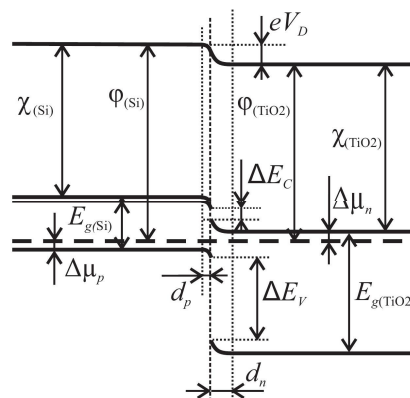


Рис. 1. Энергетическая диаграмма гетероструктуры $n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}$
Fig. 1. Energy diagram of $n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}$ heterostructure

Энергетическая диаграмма гетероструктуры $n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}$ в состоянии равновесия построена согласно модели Андерсона [7], без учета поверхностных электрически заряженных состояний и разделительного диэлектрического слоя. Контактные разности потенциалов, приходящиеся на каждый из полупроводников, связаны между собой соотношением $V_{Dp}/V_{Dn} = N_D\epsilon_n/N_A\epsilon_p$ [7], из которого можно найти их значения, учитывая, что $V_D = V_{Dn} + V_{Dp}$.

Параметры диоксида титана и кремния, использованные для численного моделирования, представлены в табл. 1.

Коэффициенты поглощения α и коэффициенты отражения R , отн. ед. для диоксида титана и кремния в зависимости от длины волны излучения λ представлены на рис. 2, a, b соответственно [8–10]. Зависимость коэффициента преломления от длины волны для кремния приведена в работе [9].

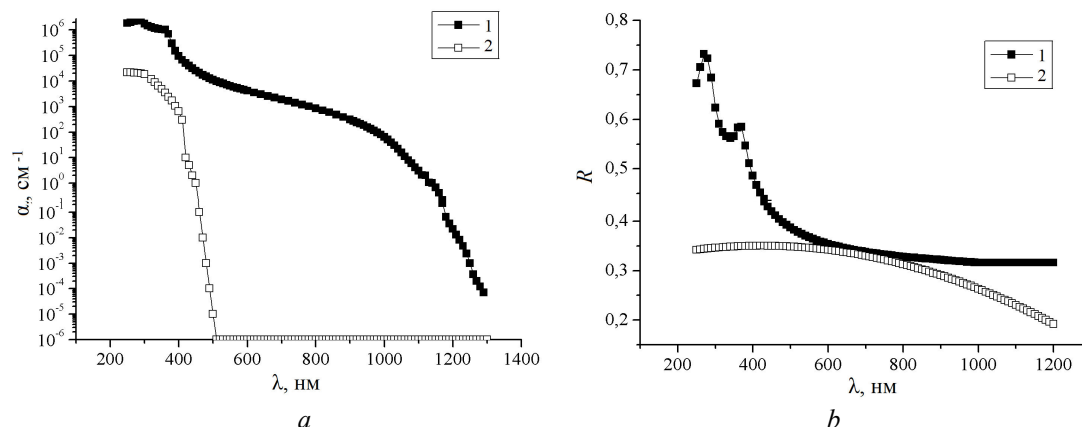


Рис. 2. Спектральная зависимость коэффициентов поглощения (a) и отражения (b) диоксида титана (1) и кремния (2)

Fig. 2. Spectral dependencies of absorption coefficient (a) and reflectivity (b) of titanium dioxide (1) and silicon (2)

Энергетические и электрические параметры гетероструктуры, а также значения ширины областей пространственного заряда представлены в табл. 2.

Таблица 1. Параметры материалов ($T = 300$ К)
Table 1. Material parameters ($T = 300$ K)

Parameter Параметр	$p\text{-Si}$	$n\text{-TiO}_2$
Ширина запрещенной зоны, эВ	1,124	3,2
Сродство к электрону, эВ	4,05	4,3
Относительная диэлектрическая проницаемость	11,9	40
Время жизни носителей заряда, мкс	500	25
Концентрация примеси, см^{-3}	10^{17}	10^{16}
Подвижность электронов, $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	1417	4
Подвижность дырок, $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	470	0,1
Толщина, мкм	5	1
Коэффициент преломления	1,67–6,9	2,5

Таблица 2. Параметры гетероструктуры $n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}$
Table 2. Parameters of $n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}$ heterostructure

Parameter Параметр	$n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}$
$\Delta\mu_{n_2}$, эВ	0,11
$\Delta\mu_{p_2}$, эВ	0,14
d_{n_2} , нм	577
d_{p_2} , нм	130
ΔE_C , эВ	0,25
ΔE_V , эВ	2,33
eV_{D_1} , эВ	0,62
eV_{Dn} , эВ	0,451
eV_{Dp} , эВ	0,167

Несоответствие между рассчитанным $eV_D = 0,62$ эВ и экспериментальными (~ 1 эВ) значениями высоты потенциального барьера исследуемой гетероструктуры $n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}$ при комнатной температуре обычно объясняется наличием поверхностных состояний и электрическими диполями, обусловленными ими [11].

Результаты и обсуждение

С помощью численного решения уравнений (1)–(3) рассчитаны вольт-амперные характеристики гетероструктуры диоксид титана/кремний ($n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}$) площадью 10 см^2 для различной длины волны солнечного излучения (мощность излучения $0,001\text{ Вт/см}^2$), рис. 3, *a*. Также получены зависимости тока короткого замыкания I_{sc} от длины волны излучения при мощности излучения $0,001\text{ Вт/см}^2$ (рис. 3, *b*).

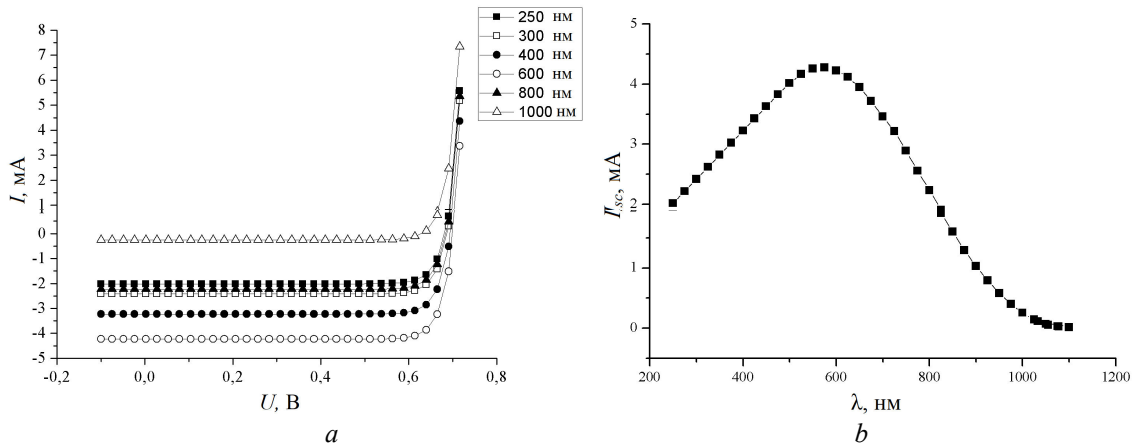


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика гетероструктуры $n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}$ для различной длины волны падающего на него солнечного света (*a*); зависимость тока короткого замыкания от длины волны λ (*b*)

Fig. 3. Current-voltage characteristics of $n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}$ heterostructure illuminated with the light of different wavelengths; short circuit current as a function of the light wavelength (*b*)

При внешних смещениях $-0,1 < U < 0,6\text{ В}$ (рис. 3, *a*) величина тока I через гетероструктуру практически не зависит от прикладываемого внешнего смещения U , но существенно зависит от длины волны солнечного света λ . Область $0,6 < U < 0,7\text{ В}$ является переходной, а при $U > 0,7\text{ В}$ величина тока I практически не зависит от длины волны солнечного света λ , т. е. от концентрации генерированных носителей заряда. В области $U > 0,7\text{ В}$ ток экспоненциально растет с увеличением внешнего смещения. В области внешних смещений $0-0,6\text{ В}$ перенос электронов осуществляется из кремния в диоксид титана из-за отсутствия потенциального барьера для них, а переноса дырок из кремния в диоксид титана нет, так как для них потенциальный барьер составляет порядка $2,33\text{ эВ}$. Туннельный механизм для электронов и дырок также отсутствует ввиду существенной ширины потенциальных барьеров на границе раздела. Поэтому ток в данном случае при $0 < U < 0,6\text{ В}$ обуславливается электронными переходами из кремния в диоксид титана, величина которого при отсутствии излучения крайне мала.

В области внешних смещений $0 < U < 0,6\text{ В}$ при наличии генерации носителей заряда. В этом случае проявляется зависимость тока I от длины волны λ солнечного света. Ток возникает за счет фотогенерации носителей заряда в кремнии в условиях прозрачности слоя диоксида титана для излучения с длины волны $\lambda > 500\text{ нм}$ и полностью определяется концентрацией генерированных электронно-дырочных пар в кремнии. Пик тока I приходится на диапазон длин волн солнечного света $500-600\text{ нм}$, в котором коэффициент поглощения α диоксида титана практически равен нулю, а в кремнии относительно высок – $\alpha \sim 10^4\text{ см}^{-1}$. При дальнейшем уменьшении длины волны наблюдается уменьшение величины тока I , хотя коэффициент поглощения кремния растет (рис. 1, *a*), и энергия генерированных электронно-дырочных пар тоже растет. Данный эффект связан с двумя факторами: ростом темпа генерации электронно-дырочных пар в диоксиде титана (в области длин волн $\lambda < 400\text{ нм}$) и существенным ростом коэффициента отражения R кремния в области длин волн $\lambda < 500\text{ нм}$ (рис. 1, *b*). Ток короткого замыкания I_{sc} в зависимости от длины волны носит нелинейный характер и коррелирует с аналогичной зависимостью тока I , рис. 3, *b*.

На рис. 4. приведены рассчитанные распределения скоростей генерации электронно-дырочных пар в кремнии и диоксиде титана в зависимости от длины волны солнечного света. Генерация носителей заряда при длинах волн $300-400\text{ нм}$ происходит как в кремнии,

так и в диоксиде титана, рис. 4, *a*. При длинах волн 500–900 нм генерация в диоксиде титана практически отсутствует (рис. 4, *b*).

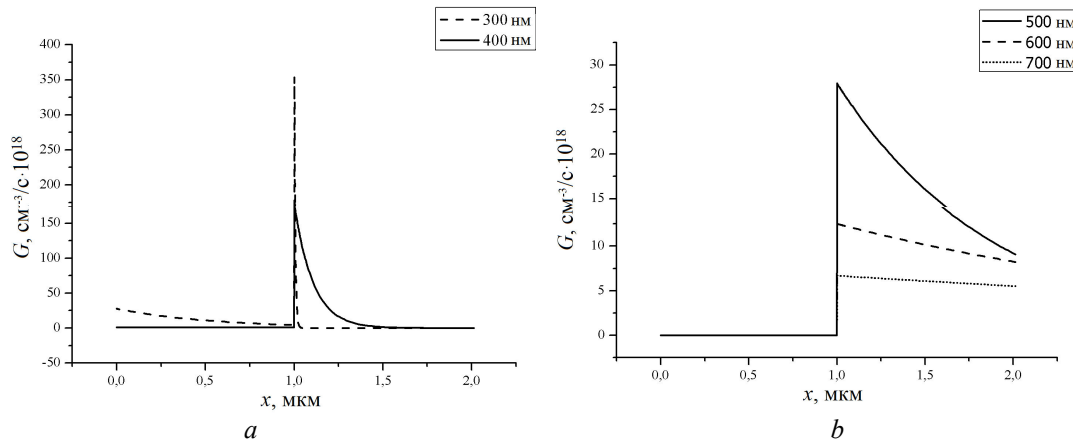


Рис. 4. Зависимости скорости генерации носителей заряда от расстояния до границы раздела $n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}$ для длин волн 300 и 400 нм (*a*); 500, 600 и 700 нм (*b*)

Fig. 4. Carrier generation rate as a function of the distance from the $n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}$ interface for the light with the wavelengths of 300 and 400 nm (*a*); 500, 600 and 700 nm (*b*)

Скорость генерации носителей заряда согласуется с показателями поглощения данных материалов (рис. 1, *a*). Как можно видеть, с ростом длины волны скорость генерации в кремнии падает, и при этом возрастает размер области генерации. Это объясняется падением коэффициента поглощения с увеличением длины волны. В области длин волн $\lambda < 400$ нм, когда сильно возрастает коэффициент отражения R кремния, область генерации существенно уменьшается, рис. 4, *a*. На длине волны $\lambda = 300$ нм она снижается до 40–50 нм. В этом случае, хотя скорость генерации выше, чем при длине волны $\lambda = 400$ нм, существенно уменьшается концентрация генерированных электронно-дырочных пар. Это ведет к уменьшению тока I и, соответственно, тока короткого замыкания I_{sc} . Поэтому нелинейные зависимости I и I_{sc} от длины волны солнечного излучения обуславливаются различной скоростью фотогенерации носителей заряда в гетероструктуре. В конечном итоге ток I и ток короткого замыкания I_{sc} существенно зависят от спектральной зависимости коэффициентов отражения и поглощения диоксида титана и кремния.

Реализация фотокаталитических процессов на поверхности TiO_2 при солнечном облучении обычно осуществляется при отсутствии внешнего смещения. Как можно видеть, в этом случае в гетероструктуре $n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}$ в области длин волн 500–600 нм электроны, генерированные в кремнии, свободно переходят в диоксид титана, а дырки нет. Поэтому при относительно тонком слое TiO_2 может быть эффективно реализован процесс каталитической очистки на поверхности диоксида титана за счет окисления органических соединений путем захвата электронов на поверхностные состояния.

Заключение

Проведенное моделирование электрических характеристик гетероструктуры $n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}$ показало, что величина тока в области малых внешних смещений – до 0,6 В, в условиях освещения солнечным светом нелинейным образом зависит от длины волны и определяется переходом электронов из кремния в диоксид титана. Максимум тока соответствует длинам волн солнечного излучения в области 600 нм. Полученные результаты объясняются существенным различием коэффициентов поглощения и отражения солнечного излучения диоксидом титана и кремния, обуславливающим закономерности генерации неравновесных носителей заряда в гетероструктуре $n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}$.

Выявленные условия реализации фотокаталитической очистки на поверхности диоксида титана за счет электронного окисления органических соединений могут быть рекомендованы для проектирования устройств очистки жидких и газообразных сред от органических загрязнений. Полученные результаты перспективны для исследования

электронных процессов на поверхности широкозонных оксидов металлов, определяющих их фотокаталитические свойства.

Список литературы

1. Алфёров Ж.И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур. *Физика и техника полупроводников*. 1998; 32 (1): 3-18. DOI:10.1134/1.1187350
2. Barrera M., Pla J., Bocchi C., Migliori A. Antireflecting-passivating dielectric films on crystalline silicon solar cells for space applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2008; 92 (9): 1115-1122. DOI: 10.1016/j.solmat.2008.03.021.
3. Brus V.V., Ilashchuk M.I., Kovalyuk Z.D., Maryanchuk P.D., Ulyanytsky K.S. Electrical and photoelectrical properties of photosensitive heterojunctions $n\text{-TiO}_2/p\text{-CdTe}$. *Semicond. Sci. Technol.* 2011; 26 (12): 125006. DOI: 10.1088/0268-1242/26/12/125006.
4. Linsebigler A.L., Lu G., Yates J.T. Photocatalysis on TiO_2 Surfaces: Principles, Mechanisms, and Selected Results. *Chemical Reviews*. 1995; 95 (3): 735-758. DOI: 10.1021/cr00035a013.
5. Zhang H., Chen G., Behnemann D.W. Photoelectrocatalytic materials for environmental applications. *Journal of Materials Chemistry*. 2009; 19 (29): 5089-5121. DOI: 10.1039/B821991E.
6. Зи С. *Физика полупроводниковых приборов*. В 2-х кн. Кн.1. Пер. с англ. М.: Мир; 1984.
7. Шарма Б.Л., Пухорит Р.К. *Полупроводниковые гетеропереходы*. М.: Сов. радио; 1979.
8. Sarkar S., Gupta V., Kumar M., Schubert J., Probst P.T., Joseph J., König T.A.F. Hybridized guided-mode resonances via colloidal plasmonic self-assembled grating. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2019; 11 (14): 13752-13760. DOI: acsami.8b20535.
9. Green M.A. Self-consistent optical parameters of intrinsic silicon at 300K including temperature coefficients. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2008; 92 (11):1305-1310. DOI: 10.1016/j.solmat.2008.06.009.
10. Dou M., Persson C. Comparative study of rutile and anatase SnO_2 and TiO_2 : Band-edge structures, dielectric functions, and polaron effects. *Journal of Applied Physics*. 2013; 113 (8): 083703. DOI: 10.1063/1.4793273.
11. Мостовой А.И., Брус В.В., Марьянчук П.Д. Механизмы токопереноса в анизотипных гетероструктурах $n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}$. *Физика и техника полупроводников*. 2013; 47 (6): 788-792.

References

1. Alferov Zh.I. The history and future of semiconductor heterostructures. *Semiconductors*. 1998; 32 (1): 3-18. DOI:10.1134/1.1187350.
2. Barrera M., Pla J., Bocchi C., Migliori A. Antireflecting-passivating dielectric films on crystalline silicon solar cells for space applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2008; 92 (9): 1115-1122. DOI: 10.1016/j.solmat.2008.03.021.
3. Brus V.V., Ilashchuk M.I., Kovalyuk Z.D., Maryanchuk P.D., Ulyanytsky K.S. Electrical and photoelectrical properties of photosensitive heterojunctions $n\text{-TiO}_2/p\text{-CdTe}$. *Semicond. Sci. Technol.* 2011; 26 (12): 125006. DOI: 10.1088/0268-1242/26/12/125006.
4. Linsebigler A.L., Lu G., Yates J.T. Photocatalysis on TiO_2 Surfaces: Principles, Mechanisms, and Selected Results. *Chemical Reviews*. 1995; 95 (3):735-758. DOI: 10.1021/cr00035a013.
5. Zhang H., Chen G., Behnemann D.W. Photo-electrocatalytic materials for environmental applications. *Journal of Materials Chemistry*. 2009; 19 (29): 5089-5121. DOI: 10.1039/B821991E.
6. Sze S.M. *Semiconductor Devices Physics Technology*. 2nd ed. New York: Wiley-Interscience; 1981.
7. Sharma B.L., Purohit R.K. *Semiconductor heterojunctions*. New York; Oxford: Pergamon Press; 1974.
8. Sarkar S., Gupta V., Kumar M., Schubert J., Probst P.T., Joseph J., König T.A.F. Hybridized guided-mode resonances via colloidal plasmonic self-assembled grating. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2019; 11 (14): 13752-13760. DOI: acsami.8b20535.
9. Green M.A. Self-consistent optical parameters of intrinsic silicon at 300K including temperature coefficients. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2008; 92 (11): 1305–1310. DOI: 10.1016/j.solmat.2008.06.009.
10. Dou M., Persson C. Comparative study of rutile and anatase SnO_2 and TiO_2 : Band-edge structures, dielectric functions, and polaron effects. *Journal of Applied Physics*. 2013; 113 (8): 083703. DOI: 10.1063/1.4793273.
11. Mostovyi A.I., Brus V.V., Maryanchuk P.D. Charge transport mechanisms in anisotype $n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}$ heterostructures. *Semiconductors*. 2013; 47 (6): 799-803. DOI: 10.1134/S1063782613060171.

Вклад авторов

Курапцова А.А. выполнила расчеты вольт-амперных характеристик, тока короткого замыкания, построила энергетическую диаграмму гетероструктуры $n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}$, рассчитала

зависимости скоростей генерации носителей заряда. Принимала участие в интерпретации расчетных результатов.

Данилюк А.Л. выполнил анализ полученных расчетных данных, предложил интерпретацию вольт-амперных характеристик и зависимостей генерации носителей заряда.

Лешок А.А. выполнил анализ частотных характеристик коэффициентов поглощения и отражения, а также принял участие в модификации математического описания для проведения расчетов.

Борисенко В.Е. определил задачи, которые необходимо было решить в ходе проведения исследований, а также принял участие в интерпретации результатов.

Authors contribution

Kuraptsova A.A. performed calculations of the current-voltage characteristics, short circuit current, built an energy diagram of the n -TiO₂/ p -Si heterostructure, calculated the dependences of the charge carrier generation rates. She participated in the interpretation of the calculated results.

Danilyuk A.L. performed an analysis of the calculated data, proposed an interpretation of the current-voltage characteristics and dependences of the generation of charge carriers.

Leshok A.A. performed an analysis of the frequency characteristics of the absorption and reflection coefficients, and also took part in the modification of the mathematical description for calculations.

Borisenko V.E. identified the tasks that needed to be solved during the research, and also participated in the interpretation of the results.

Сведения об авторах

Курапцова А.А., магистр технических наук, аспирант кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Данилюк А.Л., доцент, к.ф.-м.н., доцент кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Лешок А.А., к.ф.-м.н., начальник Центра нанoeлектроники и новых материалов Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Борисенко В.Е., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-25-720-15-39;
e-mail: anku21qwerty@gmail.com
Курапцова Анна Андреевна

Information about the authors

Kuraptsova A.A., master of engineering science, post-graduate student of Micro- and Nanoelectronics Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Danilyuk A.L., PhD., associate professor, associate professor of Micro- and Nanoelectronics Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Leshok A.A., PhD., head of Center Nanoelectronics and Novel Materials of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Borisenko V.E., D.Sci, professor, head of Micro- and Nanoelectronics Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Browki st., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-25-720-15-39;
e-mail: anku21qwerty@gmail.com
Kuraptsova Anna Andreevna