

Г. П. ПАРХОМЕНКО, д. ф.-м. н. П. Д. МАРЬЯНЧУК

Украина, Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича

E-mail: h.parkhomenko@chnu.edu.ua

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОСТРУКТУР $\text{NiO}/p\text{-CdTe}$ и $\text{NiO}/n\text{-CdTe}$

Изготовлены гетероструктуры $\text{NiO}/n\text{-CdTe}$ и $\text{NiO}/p\text{-CdTe}$ методом реактивного магнетронного напыления тонких пленок оксида никеля на подложки из кристаллов CdTe p - и n -типа проводимости, исследованы их темновая и световая вольт-амперные характеристики. Установлено, что основными механизмами токопереноса при прямом смещении является генерационно-рекомбинационный и туннелирование, при обратных смещениях — туннелирование.

Ключевые слова: гетероструктура, тонкая пленка, механизмы токопереноса, NiO , CdTe .

В настоящее время проводится интенсивный поиск и исследование различных перспективных материалов и структур на их основе для применения в высокоэффективных электронных приборах, сенсорах и солнечных элементах. Использование гетероструктур для изготовления приборов полупроводниковой электроники и фотовольтаики расширяет их функциональные возможности и повышает эксплуатационные характеристики по сравнению с фотоэлектрическими приборами на основе гомопереходов. В то же время значительный интерес представляет создание гетеропереходов, в которых в качестве окна используются широкозонные прозрачные оксиды металлов. Это позволяет расширить область их применения и уменьшить расходы на изготовление таких приборов, поскольку технологии изготовления тонкопленочных полупроводников менее затратны, чем объемных.

Одним из перспективных материалов среди прозрачных токопроводящих оксидов является оксид никеля. Использование реактивного магнетронного метода напыления позволяет изменять параметры тонких пленок NiO в широких пределах. Благодаря своим физическим свойствам тонкие пленки NiO широко используются для изготовления различных фотоэлектрических устройств: прозрачные слои (окна) для солнечных элементов, антиотражающие покрытия, газовые сенсоры [1, 2]. В свою очередь перспективным полупроводниковым материалом является CdTe , который имеет выгодную для практического использования совокупность физико-химических параметров (высокий коэффициент поглощения, низкий показатель преломления, небольшая концентрация собственных носителей заряда, хорошие механические и тепловые характеристики) [3]. В настоящее время в научной литературе практически отсутствуют

работы, посвященные детальному изучению гетероструктур на основе NiO и CdTe .

В настоящей работе исследованы гетероструктуры $\text{NiO}/p\text{-CdTe}$ и $\text{NiO}/n\text{-CdTe}$, их темновая и световая вольт-амперные характеристики, а также установлены основные механизмы токопереноса в них.

Методика проведения эксперимента

Для изготовления структур $\text{NiO}/p\text{-CdTe}$ и $\text{NiO}/n\text{-CdTe}$ использовали кристаллы CdTe p - и n -типа проводимости, выращенные методом Бриджмена.

Нанесение пленок NiO проводилось на свежеосколотые подложки CdTe (типоразмером $5 \times 5 \times 1$ мм) в универсальной вакуумной установке Leybold-Heraeus L560 с помощью реактивного магнетронного распыления мишени чистого никеля в атмосфере смеси аргона и кислорода при постоянном напряжении.

Подложки размещались над магнетроном, а для получения однородных по толщине пленок обеспечивалось вращение столика. Перед началом процесса напыления вакуумная камера откачивалась до остаточного давления $5 \cdot 10^{-5}$ мбар.

Для напыления пленок NiO никелевая мишень (шайба диаметром 100 мм и толщиной 1 мм) чистотой 99,99% размещалась на столике магнетрона с водяным охлаждением на расстоянии 7 см от подложек.

Проводилось кратковременное протравливание бомбардирующими ионами аргона поверхности мишени и подложки для удаления неконтролируемых загрязнений.

С целью повышения гибкости технологических режимов нанесения пленок созданы условия для формирования газовой смеси аргона и кислорода в произвольной пропорции из двух независимых источников непосредственно во время проведения технологического процесса.

Для установления и регулирования давления газа в вакуумной системе чистый аргон подается из баллона в вакуумную камеру через регулятор давления. Регулирование результирующего давления осуществляется с помощью магнитного клапана контроля давления с обратной связью. После установки заданного давления аргона магнитный клапан перекрывается, и в камеру через клапан натекания запускается кислород.

В процессе напыления парциальное давление аргона в вакуумной камере составляло примерно $3,4 \cdot 10^{-3}$ мбар, кислорода — $2,4 \cdot 10^{-4}$ мбар. Установленная мощность магнетрона — около 120 Вт. Процесс напыления длился 10 мин при температуре подложек 373 К.

Фронтальный электрический контакт к тонким пленкам NiO формировался с помощью реактивного магнетронного распыления никеля при температуре подложки 373 К. Тыловой электрический контакт к подложкам CdTe формировался осаждением меди путем восстановления из водного раствора медного купороса с последующим термическим осаждением индия.

Толщина пленок NiO измерялась с помощью интерферометра МИИ-4 по стандартной методике, она составляла 280 нм.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) гетероструктур измеряли при комнатной температуре по стандартной методике с использованием источника постоянного тока BVP Electronics, в качестве амперметра использовался точный мультиметр Fluke 5545A, вольтметра — Picotest M3500A.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены вольт-амперные характеристики гетеропереходов NiO/*n*-CdTe и NiO/*p*-CdTe, при использовании которых были получены основные параметры гетеропереходов: коэффициент выпрямления гетеропереходов k , значение высоты потенциального барьера ϕ_0 и значение последовательного сопротивления данных гетеропереходов R_S (табл. 1).

Для удобства анализа механизмов токопереноса через гетеропереходы NiO/*n*-CdTe и NiO/*p*-CdTe с целью установления доминирующих прямых ветви ВАХ были построены в полулогарифмическом масштабе. Как видно из рис. 2, графики зависимости $\ln I = f(V)$ обоих гетеропереходов состоят из двух прямолинейных участков, что свидетельствует об экс-

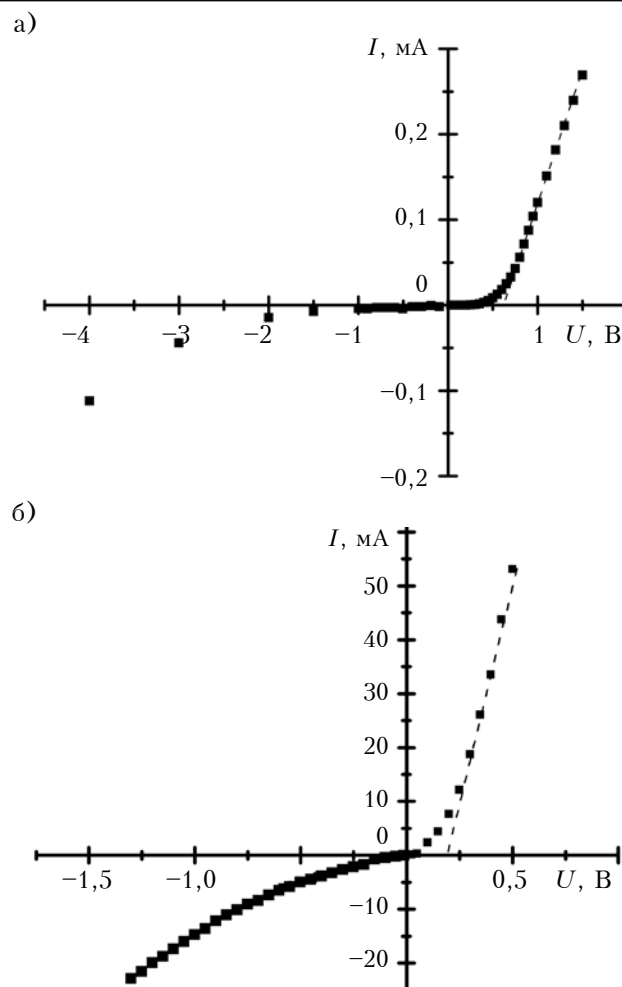


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики гетеропереходов NiO/*n*-CdTe (а) и NiO/*p*-CdTe (б)

поненциальной зависимости тока от напряжения и, соответственно, о наличии двух доминирующих механизмов переноса заряда в исследуемом интервале напряжений. Из выражения $\ln(I)/\Delta U = e/(nkT)$ были получены значения коэффициента неидеальности n для обоих участков напряжений структур, приведенные в табл. 2.

При малых напряжениях в обоих случаях $n \approx 2$, что позволяет предположить, что основной механизм токопереноса в исследуемых гетероструктурах определяется генерационно-рекомбинационными процессами в области про-

Таблица 1

Параметры гетеропереходов NiO/*n*-CdTe и NiO/*p*-CdTe

Гетеропереход	k	ϕ_0 , эВ	R_S , Ом
NiO/ <i>n</i> -CdTe	$1,7 \cdot 10^5$ (при $U=1$ В)	0,66	1880
NiO/ <i>p</i> -CdTe	10 (при $U=0,5$ В)	0,2	5,5

Таблица 2

Примерные значения коэффициента неидеальности гетеропереходов NiO/*n*-CdTe и NiO/*p*-CdTe

Гетеропереход	U , В	n
NiO/ <i>n</i> -CdTe	$0 < U < 0,5$	2
	$0,5 < U < 1,2$	10
NiO/ <i>p</i> -CdTe	$0 < U < 0,15$	2
	$0,15 < U < 0,5$	6

пространственного заряда, а ток описывается выражением Саа – Нойса – Шокли [4, 5]

$$I_{gr} = I_{gr}^0 \left(\exp \frac{eU}{nkT} - 1 \right), \quad (1)$$

где I_{gr}^0 – генерационно-рекомбинационный ток отсечки при $U = 0$.

Большие значения показателя неидеальности ($n \approx 10$ при $U > 0,5$ для $\text{NiO}/n\text{-CdTe}$ и $n \approx 6$ при $U > 0,15$ для $\text{NiO}/p\text{-CdTe}$) можно рассматривать как свидетельство туннельной природы механизма токопереноса. Прямолинейные участки ВАХ начинаются при достаточно больших смещениях, при которых область пространственного заряда достаточно тонкая для прямого туннелирования, которое описывается формулой Ньюмена для туннельного механизма токопереноса [6]

$$I = I_t \exp[\alpha(U)], \quad (2)$$

где I_t – ток отсечки, $I_t = I_t^0 \exp(\gamma T)$;
 α, γ – коэффициенты.

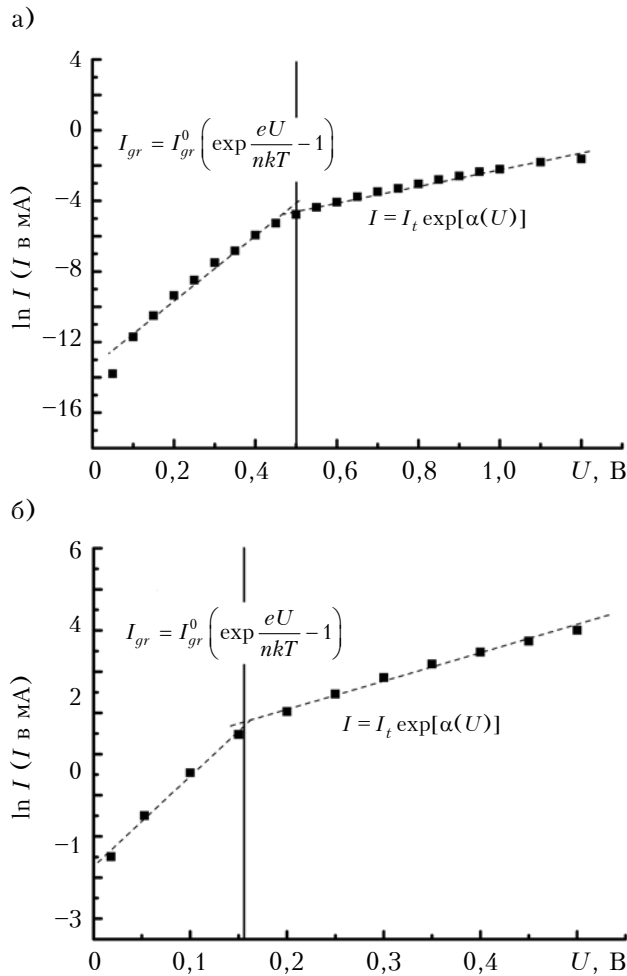


Рис. 2. Прямые ветви ВАХ в полулогарифмическом масштабе для гетероструктур $\text{NiO}/n\text{-CdTe}$ (а) и $\text{NiO}/p\text{-CdTe}$ (б)

Из выражения (2) видно, что наклон прямолинейных участков ВАХ позволяет определить коэффициент α : для $\text{NiO}/p\text{-CdTe}$ $\alpha = 6,5 \text{ эВ}^{-1}$, для $\text{NiO}/n\text{-CdTe}$ $\alpha = 3,58 \text{ эВ}^{-1}$.

Проведенный анализ механизмов токопереноса через исследуемые гетероструктуры $\text{NiO}/p\text{-CdTe}$ и $\text{NiO}/n\text{-CdTe}$ при обратном смещении показал, что зависимость $I_{обр}(U)$ хорошо описывается в рамках туннельной модели токопереноса вследствие очень малых тепловых составляющих.

В случае резкого перехода выражение для туннельного тока при обратном смещении имеет вид [7]

$$I_{rev} \approx a_0 \exp \frac{b_0}{\sqrt{\phi_0(T) - eU}}, \quad (3)$$

где a_0 – параметр, определяемый вероятностью заполнения энергетических уровней, с которых происходит туннелирование;

b_0 – параметр, определяющий скорость изменения тока при изменении напряжения.

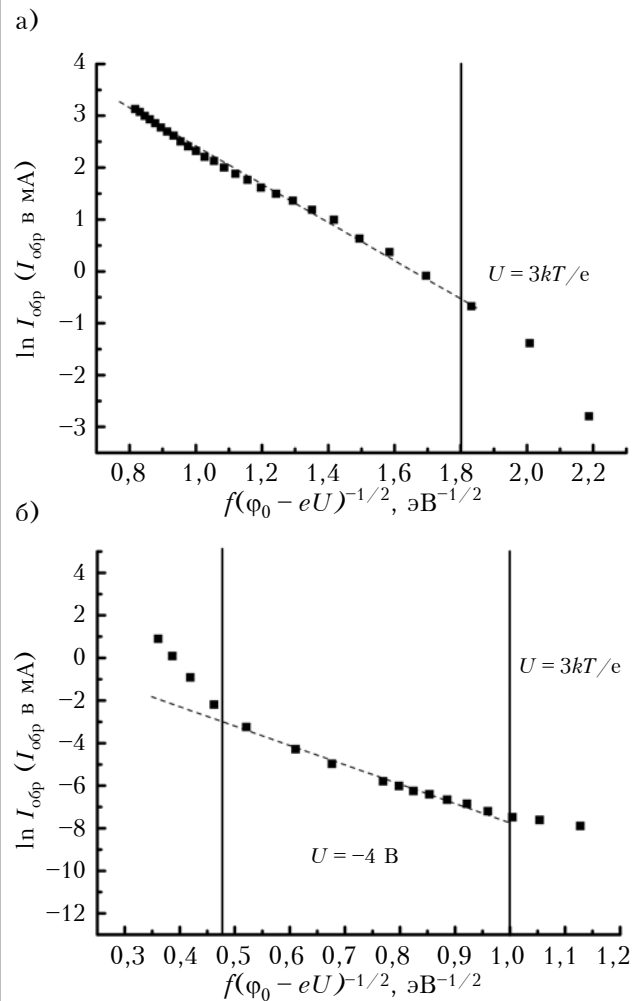


Рис. 3. Обратные ветви ВАХ в полулогарифмическом масштабе для гетероструктур $\text{NiO}/p\text{-CdTe}$ (а) и $\text{NiO}/n\text{-CdTe}$ (б)

Таким образом, согласно уравнению (3), аппроксимация обратных ветвей ВАХ прямыми линиями в координатах $\ln(I_{rev}) = f(\phi_0 - eU)^{-1/2}$ (рис. 3) подтверждает доминирование туннельного механизма токопереноса.

Как видно из рис. 3, б, для гетероперехода NiO/*n*-CdTe в области больших обратных смещений ($U < -4$ В) наблюдается значительное отклонение экспериментальных точек от прямой зависимости, которая описывается формулой (3), что связано с процессами лавинного умножения носителей заряда в результате ударной ионизации [4].

Спектральное распределение квантовой эффективности η исследуемых гетеропереходов определяется как отношение количества носителей заряда, формирующих ток короткого замыкания, к числу падающих фотонов при освещении гетероперехода со стороны пленки NiO за единицу времени и характеризуется шириной полосы на половине его высоты $\delta_{1/2} = 0,36$ мкм (рис. 4).

Энергетическое положение длинноволнового края спектра квантовой эффективности хорошо согласуется с шириной запрещенной зоны

CdTe. Коротковолновой край спектральной фоточувствительности хорошо согласуется с шириной запрещенной зоны NiO. Отсутствие резкого коротковолнового края в спектрах квантовой эффективности связано с малой толщиной пленки NiO и ее поликристаллической структурой.

Из световой ВАХ гетероперехода NiO/*n*-CdTe (рис. 4, б) были определены следующие параметры: напряжение холостого хода $U_{xx} = 0,26$ В, ток короткого замыкания $I_{кз} = 58,7$ мкА/см², коэффициент заполнения $FF = 0,23$ при интенсивности освещения 80 мВт/см².

Выводы

Таким образом, исследования электрических свойств гетеропереходов NiO/*n*-CdTe и NiO/*p*-CdTe при комнатной температуре показали, что электрический ток при небольших прямых смещениях ($0 < U < 0,5$ В для NiO/*n*-CdTe и $0 < U < 0,15$ В для NiO/*p*-CdTe) формируется за счет генерационно-рекомбинационных процессов в области пространственного заряда, при большем прямом смещении ($U > 0,5$ В для NiO/*n*-CdTe, $U > 0,15$ В для NiO/*p*-CdTe) основным механизмом токопереноса является туннелирование через область пространственного заряда, которое хорошо описывается формулой Нюмена для туннельного тока. При обратных смещениях основным механизмом токопереноса для обеих гетероструктур является туннелирование через область пространственного заряда.

Полученные результаты помогут исследователям лучше разобраться в процессах, протекающих в гетеропереходах NiO/*n*-CdTe и NiO/*p*-CdTe, что поможет улучшить их свойства и параметры и применять в электронной технике.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Nel J. M., Auret F. D., Wu L. et al. Fabrication and characterisation of NiO/ZnO structures // Sensors and Actuators B: Chemical. — 2004. — Vol. 100. — P. 270–276. <http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2003.12.054>.
2. Sasi B., Gopchandran K. G., Manoj P. K. et al. Preparation of transparent and semiconducting NiO films // Vacuum. — Vol. 68. — P. 149–154. [http://dx.doi.org/10.1016/S0042-207X\(02\)00299-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0042-207X(02)00299-3)
3. Aven M., Prener J.S. Physics and chemistry of II-VI compounds. — Amsterdam: North-Holland, 1967.
4. Solovan M.N., Brus V.V., Maryanchuk P.D., Ilashchuk M.I., Rappich J., Nickel N., Abashin S.L. Fabrication and characterization of anisotype heterojunctions n-TiN/*p*-CdTe // Semiconductor Science and Technology. — 2014. — Vol. 29, N 015007. <http://dx.doi.org/10.1088/0268-1242/29/1/015007>.
5. Sze S.M., Kwok K. Physics of semiconductor devices. — New Jersey: Wiley, 2007.
6. Шарма Б.Л., Пурохит Р.К. Полупроводниковые гетеропереходы. — Москва: Сов. радио, 1979.
7. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: Теория и эксперимент. — Москва: Энергоатомиздат, 1987.

Дата поступления рукописи
в редакцию 05.09.2016 г.

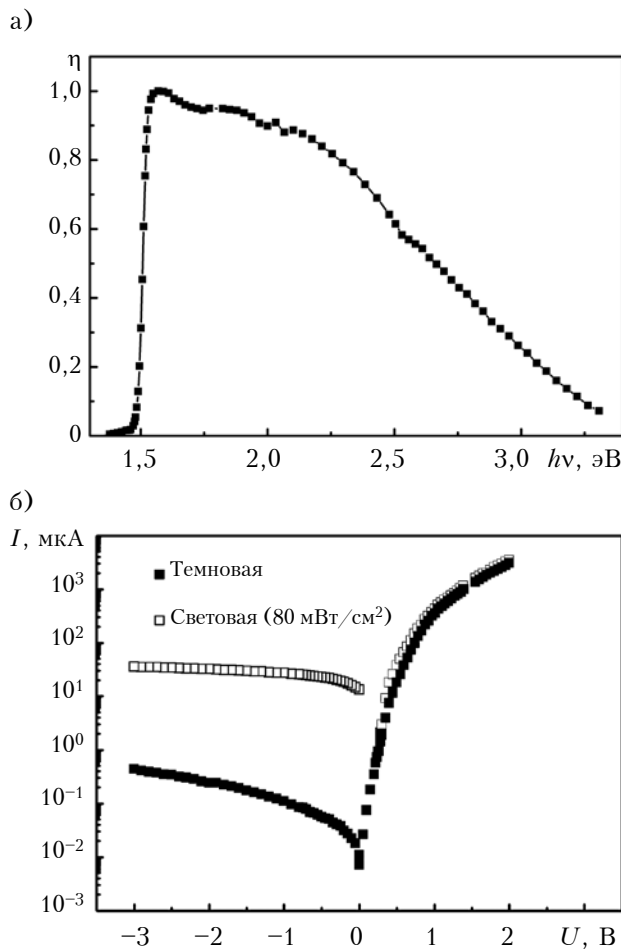


Рис. 4. Спектральное распределение квантовой эффективности гетероперехода NiO/*n*-CdTe (а), а также его темновая и световая ВАХ (б)

Г. П. ПАРХОМЕНКО, П. Д. МАР'ЯНЧУК

Україна, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

E-mail: h.parkhomenko@chnu.edu.ua

ЕЛЕКТРИЧНІ І ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГЕТЕРОСТРУКТУР NiO/p-CdTe ТА NiO/n-CdTe

Методом реактивного магнетронного напилення тонких плівок NiO на підкладки з кристалів CdTe р- та n-типу провідності виготовлено гетероструктури NiO/n-CdTe та NiO/p-CdTe. Досліджено їх темнову і світлову вольт-амперні характеристики. Встановлено, що основними механізмами струмопереносу при прямому зміщенні є генераційно-рекомбінаційний і тунелювання, при зворотньому – тунелювання.

Ключові слова: гетероперехід, тонка плівка, механізми струмопереносу, NiO, CdTe.

DOI: 10.15222/TKEA2016.4-5.29
UDC 621.315.592

H. P. PARKHOMENKO, P. D. MARYANCHUK

Ukraine, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

E-mail: h.parkhomenko@chnu.edu.ua

ELECTRICAL AND PHOTOELECTRIC PROPERTIES OF HETEROSTRUCTURES NiO/p-CdTe AND NiO/n-CdTe

In this study, we investigate the electrical and photoelectric properties of heterostructures formed by the reactive magnetron sputtering of thin film NiO onto p-CdTe and n-CdTe substrates. The current-voltage characteristics of the heterojunctions were measured at room temperature. The dominating current transport mechanisms through the NiO/n-CdTe and NiO/p-CdTe heterojunctions at the forward biases are generation-recombination and tunnel, at the reverse biases is tunnel current transport mechanisms. The heterojunctions under investigation generate open-circuit voltage $U_{oc} = 0.26$ V and short-circuit current $I_{sc} = 58.7 \mu A/cm^2$ under illumination $80 mW/cm^2$.

The research results can be used for better understanding of the processes occurring in heterojunctions NiO/n-CdTe and NiO/p-CdTe, to further improve their properties and parameters.

Keywords: heterojunctions, thin film, charge transport mechanisms, NiO, CdTe.

REFERENCES

1. Nel J. M., Auret F. D., Wu L., Legodi M. J., Meyer W. E., Hayes M. Fabrication and characterisation of NiO/ZnO structures. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2004, vol. 100, pp. 270-276. <http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2003.12.054>.
2. Sasi, B., Gopchandran, K. G., Manoj, P. K., Koshy, P., Rao, P. P., Vaidyan, V. K.. Preparation of transparent and semiconducting NiO films. *Vacuum*, vol. 68, pp. 149-154. [http://dx.doi.org/10.1016/S0042-207X\(02\)00299-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0042-207X(02)00299-3)
3. Aven M., Prener J.S. *Physics and Chemistry of II-VI Compounds*. Amsterdam, North-Holland, 1967, 580 p.

4. Solovan M.N., Brus V.V., Maryanchuk P.D., Ilashchuk M.I., Rappich J., Nickel N., Abashin S.L. Fabrication and characterization of anisotype heterojunctions n-TiN/p-CdTe. *Semiconductor Science and Technology*, 2014, vol. 29, no. 015007. <http://dx.doi.org/10.1088/0268-1242/29/1/015007>.
5. Sze S.M., Kwok K. *Physics of semiconductor devices*, New Jersey, Wiley, 2007, 815 p.
6. Sharma B.L., Purohit R.K. *Semiconductor heterojunctions*, Pergamon Press, 1974.
7. Farenbukh A., B'yub R. [Solar cells: Theory and Experiment]. Moscow, Energoatomizdat, 1987, 278 p.