

Температурные зависимости электрических параметров анизотипных гетеропереходов NiO/CdTe

© Г.П. Пархоменко, М.Н. Солован, А.И. Мостовой, К.С. Ульяницкий, П.Д. Марьянчук

Черновицкий национальный университет им. Юрия Федьковича,
58012 Черновцы, Украина

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

(Получена 28 июня 2016 г. Принята к печати 20 июля 2016 г.)

Изготовлены гетероструктуры NiO/CdTe методом реактивного магнетронного распыления. Измерены вольт-амперные характеристики при различных температурах. Установлено, что основными механизмами токопереноса через гетеропереход NiO/CdTe при прямых смещениях является генерационно-рекомбинационный и туннельный, а при обратных — туннельный. Гетероструктуры генерируют напряжение холостого хода $V_{oc} = 0.26$ В и ток короткого замыкания $I_{sc} = 58.7$ мкА/см² при интенсивности освещения 80 мВт/см².

DOI: 10.21883/FTP.2017.03.44207.8360

1. Введение

На сегодняшний день тонкие пленки оксидов металлов вызывают значительный научный и практический интерес. Прозрачные проводящие слои широко применяются для изготовления приборов электроники, оптоэлектроники и солнечной энергетики [1,2]. Оксид никеля (NiO) является прозрачным проводящим оксидом, имеющим проводимость *p*-типа, обладает хорошими электрическими, термоэлектрическими характеристиками и высокой химической стойкостью [3–6].

Теллурид кадмия является одним из самых перспективных полупроводниковых материалов, используемых в различных высокоэффективных устройствах. Гетеропереходы, в которых одним из компонентов является CdTe, перспективны для создания различного типа детекторов излучения и солнечных элементов. Это обусловлено тем, что ширина запрещенной зоны CdTe оказывается оптимальной для преобразования солнечной энергии в электрическую, высокая радиационная стойкость позволяет использовать приборы в условиях повышенной радиации [7,8].

Кристаллы CdTe, обладающие *p*-типом проводимости [9,10], получили широкое применение, однако существует ряд проблем по созданию омических контактов к этим кристаллам. Преимуществом *n*-CdTe является простота формирования омических контактов.

Благодаря своим физическим свойствам NiO и CdTe являются довольно перспективными полупроводниковыми материалами для использования в различных фотоэлектрических приборах.

Поэтому целью данной работы было создание гетероструктур *p*-NiO/*n*-CdTe, исследование их электрических и фотоэлектрических свойств, а также установление доминирующих механизмов токопереноса при прямом и обратном смещениях.

2. Экспериментальная часть

Для изготовления структур использовали монокристаллы CdTe *n*-типа проводимости, выращенные ме-

тодом Бриджмена при высоких давлениях паров кадмия. Значение удельной электропроводности, концентрации и подвижности носителей заряда полученных кристаллов при комнатной температуре (295 К) составили $\sigma = 2.4$ Ом⁻¹·см⁻¹, $n = 1.9 \cdot 10^{16}$ см⁻³ и $\mu = 775$ см²/В·с соответственно.

Нанесение пленок NiO проводилось на свежесколотые подложки монокристаллического CdTe (типоразмером 5 × 5 × 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 с последующим вращением столика для обеспечения однородности пленок по толщине. Перед началом процесса напыления вакуумная камера откачивалась до остаточного давления 5 · 10⁻⁵ мбар.

Для напыления пленок NiO никелевая мишень (99.99, шайба диаметром 100 мм и толщиной 1 мм) размещалась на столике магнетрона с водяным охлаждением на расстоянии 7 см от подложек. Использовалось кратковременное протравливание бомбардирующими ионами аргона поверхности мишени и подложки для удаления неконтролируемого загрязнения.

С целью повышения гибкости технологических режимов нанесения пленок созданы условия для формирования газовой смеси аргона и кислорода в произвольной пропорции во время технологического процесса из двух независимых источников. Чистый аргон подавался из баллона в вакуумную камеру через регулятор давления, что использовалось для установления и регулирования давления газа в вакуумной системе. Регулирование результирующего давления осуществлялось с помощью магнитного клапана контроля давления с обратной связью. После установки заданного давления аргона магнитный клапан перекрывался и в камеру через клапан натекания запускался другой газ смеси — кислород. В течение процесса напыления парциальные давления в вакуумной камере составляли $\sim 3.4 \cdot 10^{-3}$ мбар для

аргона и $\sim 2.4 \cdot 10^{-4}$ мбар для кислорода. Установленная мощность магнетрона ~ 120 Вт. Процесс напыления длился ~ 10 мин при температуре подложек ~ 373 К.

Фронтальный электрический контакт к тонкой пленке NiO формировался с помощью реактивного магнетронного распыления никеля при температуре подложки 373 К. Тыльный электрический контакт к монокристаллической подложке *n*-CdTe формировался осаждением меди путем восстановления из водного раствора медного купороса с последующим термическим осаждением индия.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) гетероструктур измеряли при различных температурах (*T*) по стандартной методике с использованием источника постоянного тока BVP Electronics, как амперметр использовался точный мультиметр Fluke 5545A, а в качестве вольтметра — Picotest M3500A.

3. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены прямые ветви вольт-амперной характеристики $I(V)$ анизотипного гетероперехода *p*-NiO/*n*-CdTe, измеренные при разных температурах.

Путем экстраполяции линейных участков ВАХ до пересечения с осью напряжений определены значения высоты потенциального барьера ϕ_0 гетероперехода при различных температурах ($\phi_0 = eV_{bi}$, где V_{bi} — контактная разность потенциалов) (рис. 1, вставка). Установлено, что температурная зависимость высоты потенциального барьера гетероструктуры *p*-NiO/*n*-CdTe хорошо описывается уравнением

$$\phi_0(T) = \phi_0(0) - \beta_\phi T,$$

где $\beta_\phi = 3.14 \cdot 10^{-3}$ эВ/К — температурный коэффициент высоты потенциального барьера, а $\phi_0 = 1.55$ эВ — значение высоты потенциального барьера исследуемой гетероструктуры при абсолютном нуле температуры.

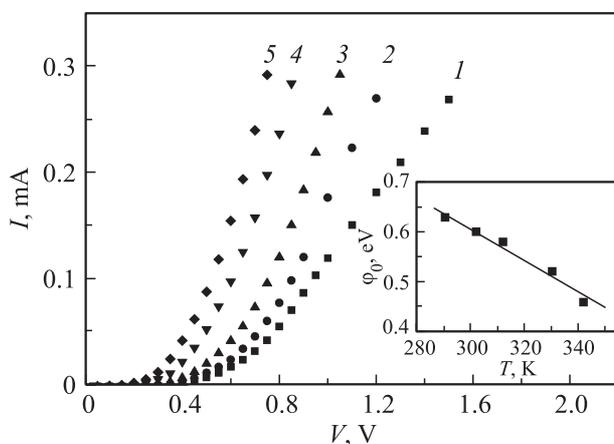


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики гетероперехода *p*-NiO/*n*-CdTe при температурах *T*, К: 1 — 290, 2 — 302, 3 — 312, 4 — 330, 5 — 342. На вставке — температурная зависимость высоты потенциального барьера.

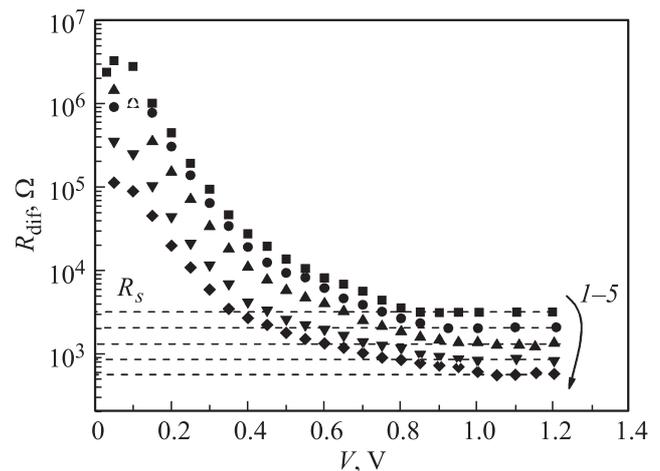


Рис. 2. Зависимость дифференциального сопротивления гетероперехода от напряжения при температурах *T*, К: 1 — 290, 2 — 302, 3 — 312, 4 — 330, 5 — 342.

Большое значение β_ϕ по сравнению с температурным коэффициентом ширины запрещенной зоны для CdTe ($\beta_{Eg} = 4.1 \cdot 10^{-4}$ эВ/К) и несоответствие между экспериментально определенным значением высоты потенциального барьера ($\phi_0 = 0.63$ эВ) и теоретически рассчитанным по разности работ выхода CdTe и NiO (0.83 эВ) обусловлено высокой концентрацией поверхностных состояний (дислокаций несоответствия) N_{ss} на границе раздела гетероперехода. В первом приближении $N_{ss} \sim x^{-2}$ [11], где x — расстояние между дислокациями несоответствия, определяется из выражения

$$x = a_{CdTe} a_{NiO} / (a_{CdTe} - a_{NiO}). \quad (1)$$

Используя значения постоянной решетки NiO $a_{NiO} = 4.19$ Å [12] и CdTe $a_{CdTe} = 6.48$ Å [11], для x и N_{ss} получим 11.85 Å и $7.12 \cdot 10^{13}$ см $^{-2}$, соответственно. При такой плотности поверхностные состояния могут играть роль центров захвата или рекомбинации и существенно влиять на электрические свойства гетероструктур [13,14].

Величину последовательного сопротивления гетероструктуры R_s можно определить из зависимости ее дифференциального сопротивления R_{dif} от напряжения V (рис. 2) [13].

Анализ прямых ветвей ВАХ $I(V)$ структур *p*-NiO/*n*-CdTe в полулогарифмическом масштабе (рис. 3) показал, что зависимость $\ln I = f(V)$ состоит из двух прямолинейных участков, а это свидетельствует об экспоненциальной зависимости тока от напряжения и о наличии двух доминирующих механизмов переноса заряда в исследуемом интервале напряжений. Определены значения коэффициента неидеальности ($\Delta \ln I / \Delta V = e/nkT$, где n — коэффициент неидеальности, k — постоянная Больцмана) для обоих участков напряжений, они составляют $n \approx 2$ ($0 < V < 0.5$ В), $n \approx 10$ ($0.5 < V < 1.2$ В).

Значение показателя неидеальности в интервале прямых смещений $0 < V < 0.5$ В близко к $n = 2$ и не

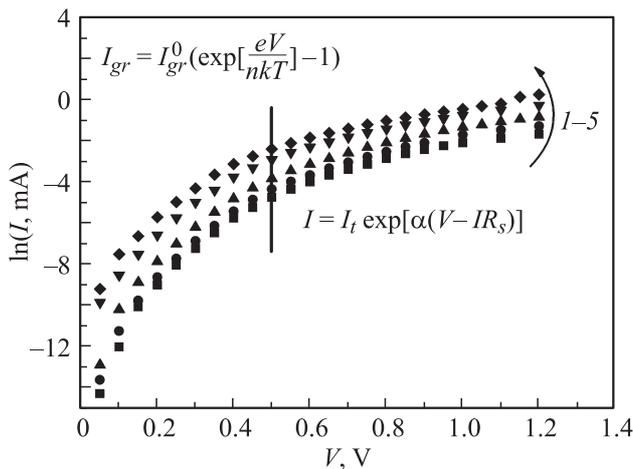


Рис. 3. Прямые ветви ВАХ в полулогарифмическом масштабе при температурах T, K : 1 — 290, 2 — 302, 3 — 312, 4 — 330, 5 — 342.

зависит от температуры, а это дает возможность предположить, что основной механизм токопереноса определяется генерационно-рекомбинационными процессами в области пространственного заряда и ток описывается выражением Саа–Нойса–Шокли [14,15]:

$$I_{gr} = I_{gr}^0 \left(\exp \left[\frac{eV}{nkT} \right] - 1 \right), \quad (2)$$

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

В области напряжений $V > 0.5$ В наклон прямолинейных участков $\Delta \ln I / \Delta V$ не зависит от температуры. Поэтому исключается возможность анализировать механизмы токопереноса, основываясь на генерационно-рекомбинационных процессах в области пространственного заряда, так как для этого случая должна наблюдаться температурная зависимость наклона прямолинейных участков вольт-амперных характеристик в полулогарифмическом масштабе [16].

Небольшой постоянный наклон (большое значение показателя неидеальности $n \approx 10$) экспериментальных зависимостей $\ln I = f(V)$ при различных температурах можно рассматривать как свидетельство туннельной природы механизма токопереноса. Прямолинейные участки с одинаковыми наклонами начинаются при достаточно больших смещениях, при которых область пространственного заряда достаточно тонкая для прямого туннелирования, которое описывается формулой Ньюмена для туннельного механизма токопереноса [17]:

$$I = I_t^0 \exp(\gamma T) \exp[\alpha(V - IR_s)] = I_t \exp[\alpha(V - IR_s)], \quad (3)$$

где $I_t = I_t^0 \exp(\gamma T)$ — ток отсечки, α, γ — константы. Экспериментальное значение $\alpha = 8.5$ было определено из зависимости $\ln I = f(V - IR_s)$.

Логарифмируя выражение (3), получаем

$$\ln I + \alpha IR_s = \ln I_t + \alpha V. \quad (4)$$

Из выражения (4) видно, что зависимости $\ln I + \alpha IR_s = f(V)$ должны быть прямыми линиями, что и наблюдается в эксперименте (рис. 4). Экстраполяцией прямолинейных участков до пересечения с осью ординат было определено значение $\ln I_t$. Температурная зависимость туннельного тока при $V = 0$ В имеет линейный характер (см. вставку к рис. 4), что позволяет определить коэффициенты: $I_t^0 = 3.86 \cdot 10^{-12}$ А, $\gamma = 5.5 \cdot 10^{-2}$ К⁻¹.

Проведенный анализ механизмов токопереноса через исследуемую гетероструктуру p -NiO/ n -CdTe при обратном смещении показал, что обратный ток $I_{rev}(V)$ 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 [13]:

$$I_{rev} \approx a_0 \exp \left(\frac{b_0}{\sqrt{\varphi_0(T)} - eV} \right), \quad (5)$$

где a_0 — параметр, который определяется вероятностью заполнения энергетических уровней, с которых происходит туннелирование, b_0 определяет скорость изменения тока с напряжением. Таким образом, согласно уравнению (5), аппроксимация обратных ветвей ВАХ прямыми линиями в координатах $\ln I_{rev} = f(\varphi_0 - eV)^{-1/2}$ (рис. 5) подтверждает доминирование туннельного механизма токопереноса.

Уменьшение наклона прямолинейных участков на рис. 5 при увеличении температуры связано с уменьшением значения параметра b_0 [16].

Отклонение экспериментальных точек от зависимости (4) в области больших обратных смещений ($|V| > 4$ В) связано с процессами лавинного умножения носителей заряда в результате ударной ионизации [14].

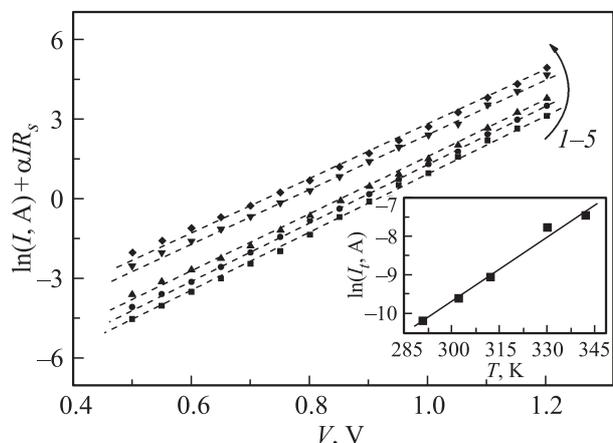


Рис. 4. Прямые ветви ВАХ гетероперехода при смещении $V > 0.5$ В с учетом влияния последовательного сопротивления. Температура, К: 1 — 290, 2 — 302, 3 — 312, 4 — 330, 5 — 342. На вставке — зависимость тока отсечки I_t от температуры.

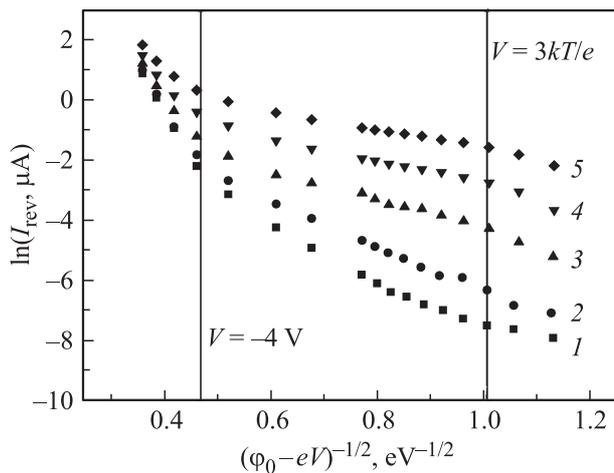


Рис. 5. Зависимости $\ln I_{\text{rev}} = f(\phi_0 - eV)^{1/2}$, характеризующие туннелирование через исследуемый гетеропереход при обратном смещении и T, K : 1 — 290, 2 — 302, 3 — 312, 4 — 330, 5 — 342.

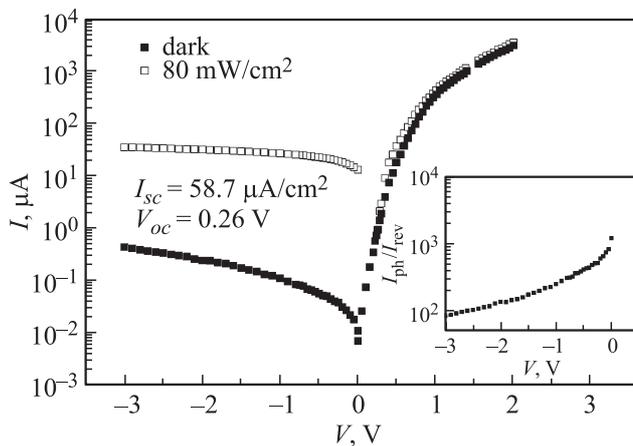


Рис. 6. Темновая и световая вольт-амперные характеристики гетероперехода $p\text{-NiO}/n\text{-CdTe}$ в полулогарифмических координатах. На вставке — зависимость отношения $I_{\text{ph}}/I_{\text{rev}}$ от напряжения.

На рис. 6 представлены темновая и световая ВАХ гетероперехода $p\text{-NiO}/n\text{-CdTe}$. Из световой ВАХ определены следующие параметры: напряжение холостого хода $V_{oc} = 0.26 \text{ В}$, ток короткого замыкания $I_{sc} = 58.7 \text{ мкА}/\text{см}^2$ и коэффициент заполнения $FF = 0.23$ при интенсивности освещения $80 \text{ мВт}/\text{см}^2$. Большое отношение между фототоком и обратным темновым током $I_{\text{ph}}/I_{\text{rev}}$ показывает, что данные гетеропереходы могут успешно использоваться в качестве фотодиода (рис. 6, вставка).

4. Заключение

Изготовлены гетероструктуры $p\text{-NiO}/n\text{-CdTe}$ путем осаждения тонких пленок NiO на подложки $n\text{-CdTe}$ методом реактивного магнетронного напыления.

Проведены исследования электрических свойств гетеропереходов $p\text{-NiO}/n\text{-CdTe}$ в интервале температур 290–342 К.

Установлено, что электрический ток через исследуемую гетероструктуру при прямом смещении ($0 < V < 0.5 \text{ В}$) формируется за счет генерационно-рекомбинационных процессов в области пространственного заряда, при большем прямом смещении ($V > 0.5 \text{ В}$) основным механизмом токопереноса является туннелирование через область пространственного заряда, которое хорошо описывается формулой Ньюмена для туннельного тока. Основным механизмом токопереноса при обратных смещениях является туннелирование через область пространственного заряда, в области обратных напряжений $|V| > 4 \text{ В}$ отклонение от прямых линий обусловлено лавинным умножением носителей заряда в результате ударной ионизации.

Из световой вольт-амперной характеристики определены: напряжение холостого хода $V_{oc} = 0.26 \text{ В}$, ток короткого замыкания $I_{sc} = 58.7 \text{ мкА}/\text{см}^2$, и коэффициент заполнения $FF = 0.23$ при интенсивности освещения $80 \text{ мВт}/\text{см}^2$.

Список литературы

- [1] М.Н. Солован, П.Д. Марьянчук, В.В. Брус, О.А. Парфенюк. Неорг. матер., **48** (10) 1026 (2012).
- [2] V.V. Brus, L.J. Pidkamin, S.L. Abashin, Z.D. Kovalyuk, P.D. Maryanchuk, O.M. Chugai. Optical Mater., **34** (11), 1940 (2012).
- [3] H. Sato, T. Minami, S. Takata, T. Yamada. Thin Sol. Films, **236** (1), 27 (1993).
- [4] M. Guziewicz, J. Grochowski, M. Borysiewicz, E. Kaminska, J.Z. Domagala, W. Rzedkiewicz, B. Witkowski, R. Golaszewska, R. Kruszka, M. Ekielski, A. Piotrowska. Opt. Appl., **41** (2), 431 (2011).
- [5] A.A. Al-Ghamdi, W.E. Mahmoud, S.J. Yagmour, F.M. Al-Marzouki. J. Alloys Comp., **486** (1), 13 (2009).
- [6] A. Chrissanthopoulos, S. Baskoutas, N. Bouropoulos, V. Dracopoulos, P. Pouloupoulos, S.N. Yannopoulos. Photonics and Nanostructures-Fundamentals Appl., **9** (2), 132 (2011).
- [7] *Physics and chemistry of II-VI compounds*, ed. by M. Aven, J.S. Prener (Noord-Hollandsche UM, 1967).
- [8] M.M. Solovan, V.V. Brus, A.I. Mostovyi, P.D. Maryanchuk, E. Tresso, N.M. Gavaleshko. Phys. Status Solidi RRL, **10** (4), 346 (2016).
- [9] J. Britt, C. Ferekides. Appl. Phys. Lett., **62** (22), 2851 (1993).
- [10] В.В. Брус, М.И. Илашук, В.В. Хомяк, З.Д. Ковалюк, П.Д. Марьянчук, К.С. Ульяницкий. ФТП, **46** (9), 1175 (2012).
- [11] К. Чопра, С. Дас. *Тонкопленочные солнечные элементы* (М., Мир, 1986) [Пер. с англ.: K.L. Chopra, S.R. Das. *Thin film solar cells* (Plenum Press, N.Y., 1981)].
- [12] B. Subramanian, M.M. Ibrahim, V. Senthilkumar, K.R. Murali, V.S. Vidhya, C. Sanjeeviraja, M. Jayachandran. Physica B: Condens. Matter, **403** (21), 4104 (2008).
- [13] V.V. Brus. Semicond. Sci. Technol., **28** (2), 025013 (2013).
- [14] M.M. Solovan, V.V. Brus, P.D. Maryanchuk, M.I. Ilashchuk, J. Rappich, N. Nickel, S.L. Abashin. Semicond. Sci. Technol., **29** (1), 015007 (2013).

- [15] S.M. Sze, K. Kwok. *Physics of Semiconductor Devices*, 3rd edn (New Jersey, Wiley, 2007).
- [16] L.A. Kosyachenko, X. Mathew, V.V. Motushchuk, V.M. Sklyarchuk. *Solar Energy*, **80** (2), 148 (2006).
- [17] Б.Л. Шарма, Р.К. Пурохит. *Полупроводниковые гетеропереходы* (М., Сов. радио, 1979) [Пер. с англ.: B.L. Sharma, R.K. Purohit. *Semiconductor heterojunctions* (Pergamon Press, 1974)].

Редактор Л.В. Шаронова

Temperature dependent electrical parameters of anisotype heterojunctions NiO/CdTe

H.P. Parkhomenko, M.N. Solovan, A.I. Mostovyi, K.S. Ulyanytsky, P.D. Maryanchuk

Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,
58012 Chernivtsi, Ukraine

Abstract Heterojunctions NiO/CdTe were fabricated by reactive magnetron sputtering. The current–voltage characteristics of the heterojunctions were measured at different temperatures. The dominating current transport mechanisms through the NiO/CdTe heterojunctions at forward biases are generation–recombination and tunnel, at the reverse biases tunnel current transport mechanisms occur. The heterojunctions under investigation generate open-circuit voltage $V_{oc} = 0.26$ V and short-circuit current $I_{sc} = 58.7 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ under illumination $80 \text{ mW}/\text{cm}^2$.