Uzbek Journal of Physics
DOI: https//doi.org/10.52304/.v25i2.418

Зависимость характеристик фотоэлемента от температуры

Г. Гулямов[1], Г.Н. Мажидова[1], Ф.Р. Мухитдинова[1], Б.Т. Абдулазизов[*2]

[1]Наманганский инженерно-строительный институт, ул. И. Каримова, 12, 160103, Наманган, Узбекистан
[2]Наманганский государственный университет, ул. Уйчи. 316, 716019, Наманган, Узбекистан

Получена 10.10.2022, revised 12.05.2023

* Corresponding author: e-mail: bt_abdulazizov@mail.ru, Phone: +998 91 186 06 05

В работе исследуется влияние горячих электронов, дырок и кристаллической решетки на токи *p-n*-перехода на основе гетероструктур. Анализируются мощность солнечного фотоэлемента, изменения коэффициента заполнения и КПД при различных температурах электронов и дырок, а также их зависимость от сопротивления базы и сопротивления утечки. Теоретические расчеты сравниваются с экспериментальными вольтамперными характеристиками (ВАХ), мощностью, коэффициентом заполнения и коэффициентом полезного действия фотоэлемента. Теоретические выводы объясняю физическую природуэкспериментальных результатов.

Ключевые слова: сопротивление базы, сопротивление утечки, фактор заполнения, гетеропереходы, горячие электроны и дырки, фотоЭДС, термоЭДС, сверхвысокочастотные волны.

In the paper, the influence of hot electrons, holes and a crystal lattice on currents of *p-n*-junction based on heterostructures have been investigated. The power of the solar photocell, the changes in the fill factor and efficiency at various temperatures of electrons and holes, as well as their dependence on the resistance of the base and leakage resistance have been analysed. Theoretical calculations have compared with experimental current-voltages characteristics, power, and efficiency of the photocell. Theoretical conclusions explain the physical nature of experimental results.

Keywords: base resistance, leakage resistance, filling factor, heterojunctions, hot electrons and holes, photoEMF, thermoEMF, ultra-high-frequency waves.

I. Введение

В мире большое внимание уделяется изучению воздействия солнечного света на диоды с потенциальным барьером и полупроводниковые фотоэлементы на их основе, строительству солнечных электростанций с использованием солнечной энергии и решению энергетических проблем [1-3]. Известно, что в настоящее время получение энергии из возобновляемых источников энергии является одним из наиболее широко востребованных методов преобразования в электрическую энергию [4-6].

В настоящее время существует множество типов солнечных фотоэлементов. Например, можно привести кремниевые, перовскитовые и органические фотоэлементы [7-8]. Себестоимость созданных солнечных элементов высока, поэтому возможность их широкого использования в производстве не велика [9-10].

В последнее время в нашей республике значительно возросло внимание к фундаментальным исследованиям в этой области [11-13]. Для повышения эффективности солнечного фотоэлемента важную роль играет изучение мощности фотоэлемента, фактора заполнения, вольтамперной характеристики, коэффициента полезного действия [14-15]. А также влияния горячих электронов и дырок на динамические характеристики полупроводниковых структур, мощность, что вызывает термодинамический дисбаланс в фотоэлементе под действием сверхвысокочастотных волн и света. Рекомбинационные и генерационные токи

горячих электронов и дырок могут вызывать уменьшение мощности фотоэлемента, коэффициента заполнения и коэффициентов полезной работы. В результате изменяется ток насыщения и фототок. Это важный вопрос, который необходимо учитывать, чтобы увеличить КПД фотоэлемента.

В данной работе мы исследовали зависимость мощности, коэффициента заполнения и КПД от температуры горячих электронов и дырок, а также от сопротивления базы и утечки фотоэлемента [16-17].

II. Основные соотношения

Плотность полного тока, протекающего в образце через *p-n*-переход, является суммой плотностей токов электронов и дырок

$$j = j_n + j_h . \tag{1}$$

Когда СВЧ волна падает на диод, температуры фононов, электронов и дырок T, T_e, T_h отличаются от температуры окружающей среды T_0 в термодинамическом равновесии.

$$J = J_{sn}\left(\exp(\frac{qf_0}{kT} - \frac{q(\varphi_0 - U - U_1 + J(R_b - AU)}{kT_e} - 1\right) + \\ + J_{sh}\left(\exp(\frac{q\varphi_0}{kT} - \frac{q(\varphi_0 - U - U_1 + J(R_b - AU)}{kT_h} - 1\right) + \frac{U}{R_l} - J_f . \tag{2}$$

Здесь φ_0 – высота потенциального барьера при термодинамическом равновесии, R_b – сопротивление базы диода, R_l – сопротивление утечки, J_f – фототок, T_e –температура электронов, T_h – температура дырок, J_{sn} и J_{sh} – токи насыщения электронов и дырок, A – коэффициент, q – заряд электронов, U – внешнее напряжение, U_1 – ЭДС, генерируемая на *p-n* переходе за счет выпрямления СВЧ тока.

При нагреве электронов, дырок и фононов рекомбинационные токи резко возрастают. В отсутствие света токи генерации определяются температурой кристаллической решетки и сильно влияют на ток насыщения. Таким образом, изменяя температуры электронов, дырок и фононов, можно управлять рекомбинационными токами *p-n*-переходов. Это позволяет управлять характеристиками диодов и транзисторов с *p-n* переходом [18, 19].

Разогрев носителей заряда и фононов сильно влияет на характеристики диода. В отсутствие разогрева в режиме холостого хода, при разомкнутой цепи I=0, решение этого трансцендентного уравнения (2) дает ЭДС, генерируемую на *p-n*-переходе.

Рассмотрим мощность, выделяемую фотоэлементом во внешней цепи, которая определяется следующем выражением.

$$P = JU , \tag{3}$$

$$P = \left[\begin{array}{l} J_{sn}\left(\exp(\frac{q\varphi_0}{kT} - \frac{q(\varphi_0 - U - U_1)}{kT_e} - 1\right) + \\ + J_{sh}\left(\exp(\frac{q\varphi_0}{kT} - \frac{q(\varphi_0 - U - U_1)}{kT_h} - 1\right) - J_f \end{array}\right] U . \tag{4}$$

Если T=T_e=T_h и U_1=0, то выражение (4) сокращается. Если носители тока электроны, то можно пренебречь током дырок. Тогда выражение (4) выглядит следующим образом

$$P = \left[J_s\left(\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1\right) - J_f\right] U . \tag{5}$$

Для простоты рассмотрим частный случай T_e=T_h

$$J_{sn}\left(\exp\left(\frac{q\varphi_0}{kT} - \frac{q(\varphi_0 - U - U_1)}{kT_e}\right) - 1\right) + \\ + \left(\frac{Ue}{kT_h} J_{sh} \exp\left(\frac{q\varphi_0}{kT} - \frac{q(\varphi_0 - U - U_1)}{kT_h}\right) - 1\right) - J_f = 0 \tag{6}$$

Решая трансцендентное уравнение (6), мы находим, что $U_{\max}$, $I_{\max}$, фактор заполнения, коэффициент полезного действия зависят от температуры носителей зарядов [20-23]. Нагрев кристаллической решетки всегда вызывает резкое увеличение тока насыщения J_s. Это, в свою очередь, сильно влияет на ВАХ фотоэлемента.

$$J = J_s\left(\exp(\frac{q\varphi_0}{kT} - \frac{q(\varphi_0 - U - U_1)}{kT_e} - 1\right) - J_f . \tag{7}$$

Для исследования зависимости фактора заполнения от мощности электромагнитной волны, температуры электрона, дырок и кристаллической решетки воспользуемся вольт-амперной характеристикой *p-n* перехода (2).

III. Численные результаты и обсуждение

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

По определению фактор заполнения имеет следующий вид

$$FF = \frac{J_{\max} U_{\max}}{J_{kz} U_{xx}}, \quad (8)$$

а максимальная мощность равна

$$P_{\max} = J_{\max} U_{\max}, \quad (9)$$

максимальный КПД

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P} = \frac{J_{\max} U_{\max}}{P}. \quad (10)$$

Используя формулы (8, 9, 10), можно получить следующие графики.

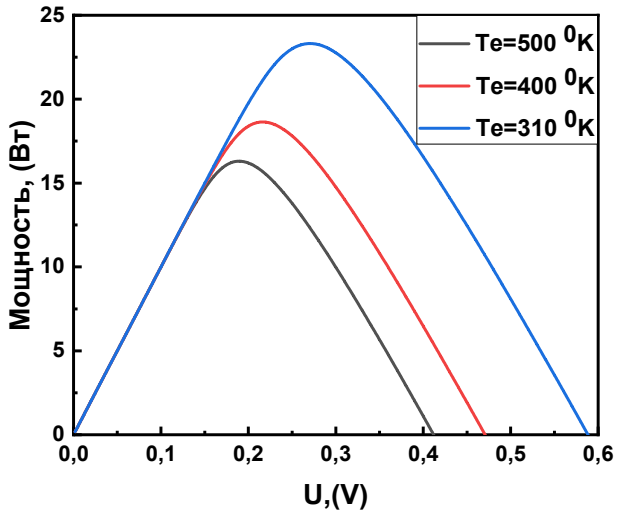


Рисунок 1. Изменение мощности в зависимости от напряжения под действием горячих электронов.

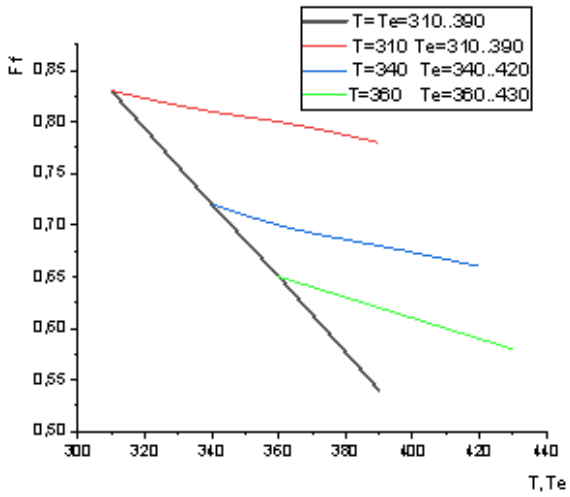


Рисунок 2. Зависимости коэффициента заполнения фотоэлемента от температуры решетки T и температуры электронов.

Из графиков (рис. 1) следует что максимальная полезная мощность, получаемая от фотоэлемента, сильно зависит от температуры электронов и температуры кристаллической решетки [24-27]. Нагрев решетки снижает фактор заполнения фотоэлемента (рис. 2).

Подставив значения T_0=300 К, T=310 К, T_e=310... 500 К в формулу расчета зависимости максимальной эффективности фотоэлемента от температуры горячих электронов (10), получим следующие графики (рис. 3-4).

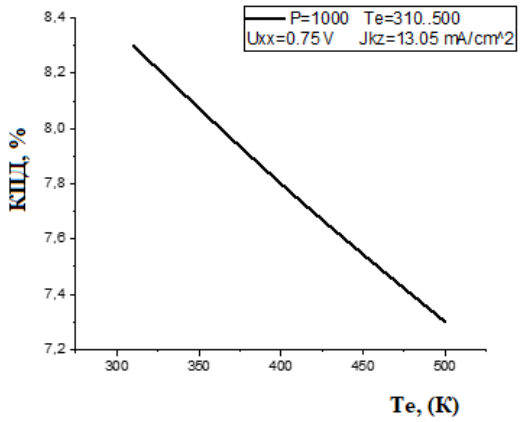


Рисунок 3. Зависимость эффективности фотоэлемента от температуры электронов T_e.

Графики на рис. 2, 3 и 4 показывают, что фактор заполнения и КПД уменьшаются с повышением температуры. Это обусловлено тем, что ток рекомбинации увеличивается при разогреве электронов, ток насыщения увеличивается при нагреве решетки.

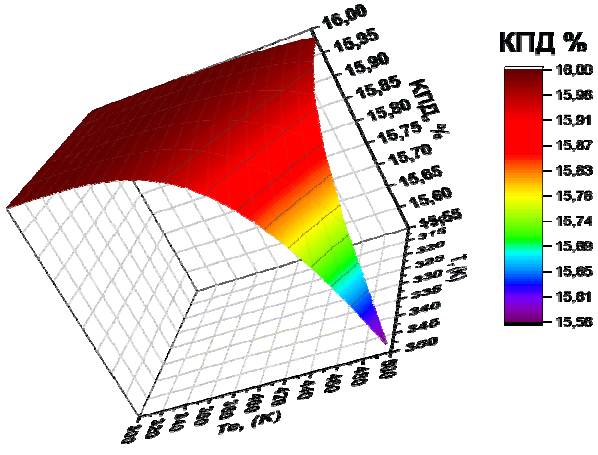


Рисунок 4. Зависимость эффективности фотоэлемента от температуры решетки T и температуры электронов T_e.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

Увеличение тока насыщения приводит к повышению ВАХ для получения положительного напряжения. Токи рекомбинации увеличиваются при нагревании электронов и дырок. Знак рекомбинационного тока противоположен знаку фототока. Освещение диода увеличивает ток генерации.

Поскольку рекомбинационные токи противоположны току генерации, разогрев электронов и дырок снижает результирующей фототок [28-30]. Это снижает КПД солнечного элемента. Кроме того, увеличение сопротивления базы также снижает КПД фотоэлемента. Увеличение сопротивления утечки увеличивает КПД.

IV. Заключение

ВАХ диода можно регулировать величиной интенсивности света (фактор заполнения FF) или интенсивности микроволн. Если токи рекомбинации больше, чем токи генерации, ток, протекающий через диод, будет положительным, в противном случае он будет течь в отрицательном направлении. Если величина ЭДС, генерируемая в диоде, дает постоянный ток, напряжение холостого хода будет отрицательным. ВАХ пересекает ось напряжений при ее отрицательных значениях. Разогрев носителей заряда увеличивает рекомбинационные токи [31].

Это приводит к смещению ВАХ *p*-*n*-перехода в положительном направлении вдоль оси тока и в отрицательном направлении вдоль оси напряжения.

С увеличением рекомбинационного тока напряжение холостого хода перемещается в область отрицательных значений вдоль оси напряжения. При увеличении тока генерации ВАХ пересекает ось напряжений в области положительных значений.

Благодарности. Работа выполнена на основе фундаментальных исследований по гранту ФЗ-20200929243 «Влияние горячих электронов и фононов в сильном электромагнитном поле на характеристики полупроводниковых солнечных фотоэлектрических элементов и наноструктур».

Метаданные

The dependence of the characteristics of the photocell on temperature

G. Gulyamov[1], G.N. Majidova[1], F.R. Muxitdinova[1], B.T. Abdulazizov[2]

[1]Namangan Engineering Construction Institute, I. Karimov str. 12, 160103, Namangan, Uzbekistan
[2]Namangan State University, Uychi str. 316, 716019, Namangan, Uzbekistan

In the paper, the influence of hot electrons, holes and a crystal lattice on currents of *p*-*n*-junction based on heterostructures has been investigated. The power of the solar photocell, the changes in the fill factor and efficiency at various temperatures of electrons and holes, as well as their dependence on the resistance of the base and leakage resistance have been analysed. Theoretical calculations have compared with experimental current-voltages characteristics, power, and efficiency of the photocell. Theoretical conclusions explain the physical nature of experimental results.

Keywords: base resistance, leakage resistance, filling factor, heterojunctions, hot electrons and holes, photoelectromotive force, thermoEMF, ultra high-frequency waves.

Литература (References)

[1] V.L. Bonch-Bruyevich, S.G. Kalashnikov. Fizika Poluprovodnikov (Nauka, Moscow, 1977).
[2] D.Yu. Oleynik, K.V. Kaydakova, A.P. Preobrajenskiy.Voprosi sovremennoy alternativnoy energetiki. Vestnik Voronejskogo instituta visokix texnologiy, № 9, 46-48 (2012).
[3] S.N Mokhnenko, A.P. Preobrajenskiy. Alternativniye istochniki energii. V Mire Nauchnikh Otkritiy №6-1, 153-156 (2010).
[4] I.Ya. Lvovich, S.N. Mokhnenko, A.P. Preobrajenskiy. Vestnik Voronejskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta **7**, №2, 50-52 (2011).
[5] I.Ya. Lvovich, S.N. Moxnenko. Alternativnie istochniki-energii **7**, № 2 (2011).
[6] B.V. Lukutin, O.A. Surjikova, E.B. Shandarova. Vozobnovlyaemaya energetika v detsentralizovannom elektrosnabjenii (Moscow, Energoatomizdat, 2008).
[7] Germany's electricity generation mix 2015. STROM Report Renewable Energy Germany, 2015. http://stromreport.de/renewable-energy.
[8] R.V Gorodov, V.E. Gubin, A.S. Matveev. Netraditsionnie i Vozobnovlyayemie Istochniki Energii: Uchebnoe posobie (Tomsk, Izd-vo Tomskogo Politekh. universiteta, 2009).
[9] Atmospheric Science Data Center. NASA Surface meteorology and Solar Energy №12, 1604 (2016). https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi, 2016.
[10] O.S. Popel, S.E. Fridand Yu. G. Kolomiets. The Distribution of Solar Energy Resources over the Territory of Russia (Moskow,:Izd. MFTI, 2010), p. 83.
[11] Research cell record efficiency chart. The National Center for Photovoltaics (NCPV) at the National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2015. http://www.nrel.gov/ncpv/
[12] Osnovy Vozobnovlyaemoy Energetiki. Kompaniya «Vash Solnechniy Dom», 2016. http: //www.solarhome.ru/ru/basics/pv

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

[13] Ali Sayigh. Comprehensive Renewable Energy. Vol.1. Photovoltaic Solar Energy. Elsevier Ltd. p. 746 (2012). http://www.sciencedirect.com.focus.lib.kth.se/
[14] Levent Bas. Thin film vs. crystalline silicon PV modules. Article, 2010. https://www.civicsolar.com/resource/thin-film-vs-crystalline-silicon-pv-modules
[15] B.T. Abdulazizov, G. Gulyamov, P.J. Baymatov, Sh.T. Inoyatov, M.S. Tokhirjonov and Kh.N. Juraev. SPIN **13**, No.1, 2250002, (2022) World Scientic Publishing Company, DOI:10.1142/S2010324722500023
[16] G. Gulyamov. Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov **30**, №7, 1279-1284 (1996).
[17] P.J. Baymatov, A.G. Gulyamov, B.T. Abdulazizov, Kh.Yu. Mavlyanov, M. Tokhirjonov. International Journal of Modern Physics B No.35, 21500703 (2021). https://doi.org/10.1142/S0217979221500703
[18] G. Gulyamov, B.T. Abdulazizov, P.J. Baymatov. Journal of Nanomaterials (2021). Article ID 5542559, https://doi.org/10.1155/2021/5542559
[19] G. Gulyamov, M.G. Dadamirzayev. World Journal of Condenced Matter **5**, №1, 48-53 (2015).
[20] C.W. Chen and M.H. Lee. Nanotechnology **367**, No.5-6, 523-527 (2004).
[21] S. Schiefer, B. Zimmermann, and U. Würfel. J. Appl. Phys. **115**, No.4, 044506 (2014).
[22] S.F. Hoefler, T. Rath. J. Mater. Chem. A **2**, No.10, 7535-7545 (2018).
[23] A. Giovannitti, J. Karl Thorley, Jun Li, J. Rivnay. Adv. Funct. Mater. **28**, No.17, 1706325 (2018).
[24] G. Gulyamov, A.G. Gulyamov. Semiconductors **49**, 819-822 (2015).
[25] S.H. Shamirzaev, G. Gulyamov, M.G. Dadamirzaev, A.G. Gulyamov. Semiconductors **45**, No.8, 1035-1037 (2011).
[26] G. Gulyamov, M.G. Dadamirzayev. World Journal of Condenced Matter **5**, No.1, 48-53 (2015).
[27] G. Gulyamov, A.G. Gulyamov, G.N. Majidova. Alternative Energy and Ecology (ISJAEE) №15-16, 24-30 (2016).
[28] G. Gulyamov, G.N. Majidova, F.R. Mukhitdinova, and A.X. Suvanov. Journal of Optoelectronics Laser **41**, No.9, 451-459 (2022).
[29] B.B. Shakhobiddinov, G.N. Majidova, and F.R. Mukhiddinova. Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering **3**, No.2, 29-34 (2021).
[30] G. Gulyamov, A.G. Gulyamov, and G.N. Majidova. Scientific Bulletin of Namangan State University **2**, No.4, 8-15 (2020).
[31] G. Gulyamov, A.G. Gulyamov, B. Shahobiddinov, and G. Majidova. Scientific Bulletin of Namangan State University **2**, No.8, 10-19 (2020).

Фотоэлемент характеристикаларини температурага боғлиқлиги

Г. Гулямов[1], Г.Н. Мажидова[1], Ф.Р. Мухитдинова[1], Б.Т. Абдулазизов[2]

[1]Наманган муҳандислик-қурилиш институти, И. Каримов кўчаси, 12 уй, 160103, Наманган, Ўзбекистон
[2]Наманган давлат университети, Уйчи кўчаси, 316, 716019, Наманган, Ўзбекистон

Ушбу ишда электрон, ковак ва кристалл панжаранинг *p-n* ўтишли гетероструктураларнинг токларга таъсири ўрганилган. Бунда қуёш фотоэлементининг қуввати, тўлдириш коэффициенти ва фойдали иш коэффициенти электрон ва ковакларнинг турли температуралардаги ўзгариши, сирқиш ва база қаршиликларга боғлиқлиги тахлил қилинган. Назария асосида бажарилган хисоб китоблар эксперимент асосида олинган гетероструктураларнинг волт-ампер характеристикалари, қуввати, тўлдириш фактори ва фойдали иш коэффициенти билан солиштирилган. Назарий хулосалар тажриба натижаларини физик жихатдан асослаб беради.

Калит сўзлар: база қаршилиги, сирқиш қаршилиги, тўлдириш фактори, гетероўтиш, қизиган электрон ва ковак, фотоэлектр юритувчи куч, термоэлектр юритувчи куч, ўта юқори частотали тўлқин.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.