ISSN 1025-8817 (Print)
ISSN 2181-077X(Online)

Академия Наук Республики Узбекистан

УЗБЕКСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том 22, № 4, Июль-Август 2020

Журнал основан в 1957 году

Учредитель: Академия Наук Республики Узбекистан

Издается на базе Института ионно-плазменных и лазерных технологий им. У.А. Арифова АН РУз

СОДЕРЖАНИЕ

И.Ш. Муждабаев. Самогравитирующий шаровой слой гипотетического релятивистского газа 199

С. Кутлимуратов, И. Таджибаев, С. Нуритдинов. Специальный сводный каталог карликовых галактик во вселенной до расстояний 121 Мпк …… 203

М.С. Надирбеков, С.Н. Кудиратов, М. Туламетов. Коллективные состояния четно-четных ядер в приближении произвольной неаксиальности …… 218

М.М. Хашаев. Обобщенная сферически-симметричная метрика …. 223

А.Г. Камилов. Влияние воздействия обратным смещением на пара-метры солнечных элементов на основе CIGS ……. 227

Д.Э. Назиров, М.Ф. Жураева, Ш.Ю.Фармонова. Исследование диффузии и электрофизических свойств эрбия, тулия, самария и иттербия в кремнии …… 237

И. Хидиров, С.ДЖ. Рахманов, А.С. Парпиев, Ш.А. Махмудов, В.В. Гетманский. Определение среднеквадратичного смещения атомов в сплаве $TI_{0.70}Mo_{0.30}C$ методом дифракции нейтронов ……... 243

А.А. Абдукаримов, Р.Г. Икрамов, О.О. Маматкаримов, А.К.М. Ароф. Зависимость характеристик сенсибилизированных красителем солнечных элементов от количества тетрапропиламмоний йодида …….. 250

А.А. Холмуминов, Б.М. Матякубов. Анизотропные свойства нановолоконных пористых материалов фиброина шелка и хлопковой целлюлозы …… 254

© Академия наук Республики Узбекистан, 2020 г.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Б.Ж. Ахмедов, д.ф.м.н., Астрономический институт АН РУз, Ташкент, Узбекистан, +99897-7088068, ahmedov@astrin.uz - главный редактор
М.Ш. Курбанов, д.т.н., Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, Ташкент, Узбекистан, +99897-7521485, kurbanov@iplt.uz – зам.главного редактора
Ф.Т. Умарова, к.ф.м.н., Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, Ташкент, Узбекистан, +99890-3251531, umarova_inp@mail.ru - ответственный секретарь
Ф.Х. Абдуллаев, д.ф.м.н., Физико-технический институт АН РУз, Ташкент, Узбекистан, fatkhulla@yahoo.com
М.Х. Ашуров, акад., «Фонон», Ташкент, Узбекистан, ashurov49@mail.ru
Х.Б. Ашуров, д.т.н., Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, Ташкент, Узбекистан, ashurov@iplt.uz
С.А. Бахрамов, акад., Академия наук РУз, Ташкент, Узбекистан, bahramov@mail.ru
М.К.С. Бахадирханов, акад., проф. Технического университета РУз, Ташкент, Узбекистан, bahazeb@yandex.ru
Р.А. Ганеев, д.ф.м.н., Воронежский государственный университет, Россия, rashid_ganeev@mail.ru
С.В. Гарнов, проф. Директор Института общей физики им. Прохорова, Москва, Россия, garnov@kapella.gpi.ru
К.Г. Гуламов, акад., Физико-технический институт АН РУз, Ташкент, Узбекистан, gulamov@uzsci.net
А. Джурахалов, д.ф.м.н., BDC Benelux, Бельгия, dzhurakhalov@mail.ru
А.А. Захидов, проф., Техасский университет, Даллас,США, zakhidov@utdallas.edu
Э.М. Ибрагимова, д.ф.м.н., Институт ядерной физики АН РУз, Узбекистан, ibragimova@inp.uz
К.К. Кадиржанов, проф. Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева, Нур Султан, kadyrzhanov1945@gmail.com
Д.И. Казаков, д.ф.м.н., Директор Боголюбовской лаборатории теоретической физики, Дубна, kazakovd@theor.jinr.ru
Т. Kajino Toshitaka, проф., Национальная астрономическая обсерватория, Япония, kajino@nao.ac.jp
С. Кивалов, Doctor Sc., Государственный университет, Олбани, Нью Йорк, США, skivalov@albany.edu
А.П. Кузнецовh, д.ф.м.н., Национальный исследовательский ядерный университет, Россия, APKuznetsov@merphi.ru
Г. Лубатти, проф. Вашингстонского университета, США, lubatti@uw.edu
Н.Т. огли Мамедов, акад., Директор Института физики Национальной академии Азербайджана, director@physics.ab.az
З.А. Мансуров, проф.,Институт проблем горения, Казахстан, ZMansurov@kaznu.kz.
С.З. Мирзаев, д.ф.м.н., Академия наук РУз, Узбекистан, mirzaev@web.de
К.М. Мукимов, акад., Национальный университет РУз, Ташкент, Узбекистан, kmukimov@mail.ru
Р.А. Муминов, акад., Физико-технический институт АН РУз, Ташкент, Узбекистан, detector@uzsci.net
Т.М. Муминов, акад., Национальный университет РУз, Ташкент, Узбекистан, kholbaev-ik@mail.ru
М.М. Мусаханов, акад., Национальный университет РУз,Ташкент, Узбекистан, yousufmm@list.ru
А.И. Никифоров,д.ф.м.н., Институт физики полупроводников им. Ржанова, Сибирское отделение РАН, nikif@isp.nsc.ru
С. Киномия, PhD, Университет Яманаши, Япония, sninomiya@yamanashi.ac.jp
Б.Л. Оксенгендлер, д.ф.м.н., Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, Ташкент, Узбекистан, oksengendlerbl@yandex.ru
В.А. Орлович, акад., Ин-т физики им. Степанова Национальной Академии наук, Беларусь v.orlovich@dragon.bas-net.by
В.Я. Панченко, акад., Председатель Chairman of the board RFBR, Москва, Россия, vpanch@rfbr.ru
Л. Реззолла, проф., Директор Института теоретической физики, Франкфурт, Германия, rezzolla@itp.uni-frankfurt.de
Л.М. Сабиров, д.ф.м.н., Самаркандский университет, Самарканд, Узбекистан, sabirov@gmail.com
Г.Ф. Смут, проф., Калифорнийский университет, США, <gfsmoot@lbl.gov>
М. Ж. Soileau, проф., вице-президент Научного Университета, Флорида, MJ@ucf.edu
М.Ю. Ташметов, д.ф.-м.н., Институт ядерной физики АН РУз, Ташкент, Узбекистан, mannab@inp.uz
Ф.Ф. Умаров, проф., Казахско-Британский технический университет, Казахстан, farid1945@yahoo.com
Т.Б. Усманов, акад., Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, Ташкент, Узбекистан, timurbek_usmanov@mail.ru
И.Г. Хидиров, д.ф.-м.н., Институт ядерной физики АН РУз, Узбекистан, khidirov@inp.uz
А.М. Шалагин, акад., Институт автоматики и электрометрии, Новосибирск, Россия, shalagin@iae.nsc.su
И.А. Щербаков, акад., Институт общей физики им. Прохорова, Москва, Россия, ivan@kapella.gpi.ru
Ш.А. Эгамбердиев, акад., Астрономический институт АН РУз, Узбекистан,. shuhrat@astrin.uz
Б.С. Юлдашев, акад., Академия наук РУз, Ташкент, Узбекистан, yuldbekh@gmail.com

Издание зарегистрировано Агентством по печати и информации Республики Узбекистан 22.12.2006.
Регистрационный номер 0045
Набор и верстка выполнены в редакции журнала «Узбекский физический журнал»

Подписано в печать 22.12.2020. Формат 60×84 ⅛ . Усл. печ. л. 6,95. Уч. изд. л. 5,89. Тираж 55. Заказ № 05-2020
Адрес редакции: Ташкент, Мирзо Улугбекский р-н, ул. Дўрмон йўли, 33, Институт ионно-плазменных и лазерных технологий им. У.А. Арифова АН РУз
Тел.: 998-71-262-31-82, +998903251531, Fax: 998-71-262-31-83
Отпечатано: ООО « Poligraphik Tekhnology »
Ташкент, ул. Пирмухамедова,18. Тел. 90-926-25-26.

© Академия наук Республики Узбекистан, 2020 г.

ISSN 1025-8817 (Print)
ISSN 2181-077X(Online)

Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan

UZBEK JOURNAL OF PHYSICS

Volume 22, Number 4, July-August 2020

Journal is founded in 1957 year

Founder: Academy of Sciences of Republic of Uzbekistan

Journal is published in the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies of Academy of Sciences of Uzbekistan

CONTENTS

I.Sh. Muzhdabaev. Self-gravitating spherical layer of a hypothetical relativistic gas …… 199

S. Kutlimuratov, S. Nuritdinov, I. Tadzibaev. Special summary catalog of dwarf galaxies in Universe up to distance 121 Mpc …… 203

M.S. Nadirbekov, S.N. Kudiratov, M. Tulametov. Collective states of even-even nuclei in the approximation of free triaxiality …… 218

M.M. Khashaev. The generalized spherically-symmetric metric … 223

A.G. Kamilov. Effect of reverse bias exposure on the parameters of solar cells based on CIGS …… 227

D.E. Nazirov, M.F. Jurayeva, Sh.Yu. Farmonova. Investigation of diffusion and electrophysical properties of erbium, thulium, samarium, and ytterbium in silicon ……..... 237

I. Khidirov, S.Dj. Rakhmanov, A.S. Parpiev, Sh.A. Makhmudov, V.V. Getmanskii. Determination of the root mean-square displacement of atoms in $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$ alloy by the methods of neutron diffraction …….. 243

A.A. Abdukarimov, R.G. Ikramov, O.O. Mamatkarimov, A.K. Arof. Dependence of the characteristics of dye-sensitized solar cell on amount tetrapropylammonium iodide …… 250

A.A. Kholmuminov, B.M. Matyakubov. Anisotropic properties of nanofibre porous materials of silk fibroin and cotton cellulose …….. 254

© Academy of Sciences of Republic of Uzbekistan, 2020 г.

EDITORIAL BOARD

B.J. Ahmedov, Prof., Ulughbeg Astronomical Institute, Uzbek Academy of Sciences, Tashkent, Uzbekistan, +99897-7088068, ahmedov@astrin.uz – editor-in-chief
M.Sh. Kurbanov, doct. tech. sc., Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies of Academy of Sciences of Uzbekistan, Tashkent, +99897-7521485, kurbanov@iplt.uz –deputy of editor-in-chief
F.T. Umarova, PhD, Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies of Academy of Sciences of Uzbekistan, Tashkent +99890-3251531, umarova_inp@mail.ru – responsible secretary
F.Kh. Abdullaev, Prof., Physical-Technical Institute of the UAS, Tashkent, Uzbekistan, fatkhulla@yahoo.com
M.Kh. Ashurov, Acad., "Fonon", Tashkent, Uzbekistan, ashurov49@mail.ru
Kh.B.Ashurov, Prof., Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies of Academy of Sciences of Uzbekistan, ashurov@iplt.uz
S.A. Bahramov, Acad., Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan, bahramov@mail.ru
M.K.S. Bahadirhanov, Acad., Technical University, Tashkent,Узбекистан, bahazeb@yandex.ru
R.A. Ganeev, Prof., Voronezhskiy Gosudarstvenniy Universitet, Russia, rashid_ganeev@mail.ru
S.V. Garnov, Doctor Sc., Prof., Director of Prokhorov General Physics Institute, Russia, Moscow, garnov@kapella.gpi.ru
K.G. Gulamov, Acad., Physical-Technical Institute of the UAS, Tashkent, Uzbekistan, gulamov@uzsci.net
A. Dzhurakhalov, Prof. BDC Benelux, Belgium, dzhurakhalov@mail.ru
A.A. Zakhidov, Prof., University of Texas at Dallas, Dallas, USA, zakhidov@utdallas.edu
E.M. Ibragimova, Prof., Institute of Nuclear Physics of the UAS, Tashkent, Uzbekistan, ibragimova@inp.uz
K.K. Kadirjanov, Prof., The Eurasian National University L.N. Gumilyov, Nur Sultan, kadyrzhanov1945@gmail.com
D.I. Kazakov, Doctor Sc., Corresponding Member of RAS, Director of Bogoliubov laboratory of theoretical physics, Dubna, kazakovd@theor.jinr.ru
Toshitaka Kajino, д-р, проф., National Astronomical Observatory of Japan, kajino@nao.ac.jp
S. Kivalov, Doctor Sc., Albany State University of New York, USA, skivalov@albany.edu
A.P. Kuznetsov, Doctor Sc., National Research Nuclear University MIPhI, Russia, +7903-6613049, APKuznetsov@merphi.ru
H. Lubatti, Prof., University of Washington, lubatti@uw.edu
N.T.O. Mamedov, Acad., Director of the Institute of Physics National Academy of Azerbaijan, director@physics.ab.az
Z.A. Mansurov, Doctor Sc., Prof., Combustion Problems Institute, Kazakhstan, ZMansurov@kaznu.kz.
S.Z. Mirzaev, Prof., Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan, mirzaev@web.de
K.M. Mukimov, Acad., National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan, kmukimov@mail.ru
R.A. Muminov,Acad., Physical-Technical Institute of the UAS, Tashkent, Uzbekistan, detector@uzsci.net
T.M. Muminov, Acad., National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan , kholbaev-ik@mail.ru
M.M. Musahanov, Acad., National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan, yousufmm@list.ru
A.I. Nikifirov, Doctor Sc., Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of RAN, nikif@isp.nsc.ru
Satoshi Ninomiya, PhD, University of Yamanashi, Japan, sninomiya@yamanashi.ac.jp
B.L. Oksengendler, Prof., Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies of Academy of Sciences of Uzbekistan, Tashkent, oksengendlerbl@yandex.ru
V.A. Orlovich, Acad., B.I. Stepanov Institute of Physics of the NAS, Belarus, v.orlovich@dragon.bas-net.by
V.Ya. Panchenko, Acad., Chairman of the board RFBR, Moscow, Russia , vpanch@rfbr.ru
L. Rezzolla, Prof., The Director of the Institute of Theoretical Physics, Frankfurt, Germany, rezzolla@itp.uni-frankfurt.de
L.M. Sabirov, Prof., Samarkand University, Uzbekistan, sabirov@gmail.com
G.F. Smoot, Prof., University of California, США, George F Smoot III, <gfsmoot@lbl.gov>
M.J. Soileau, Prof., Vice-President of the University of Florida for Science, MJ@ucf.edu
M.Yu. Tashmetov, Prof., Institute of Nuclear Physics of the UAS, Tashkent, Uzbekistan, mannab@inp.uz
F.F. Umarov, Prof., Kazakh-British Technical University, Kazakhstan, farid1945@yahoo.com
T.B. Usmanov, Acad., Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies of UAS, Tashkent, timurbek_usmanov@mail.ru
I.G. Khidirov, Prof., Institute of Nuclear Physics of the UAS, Tashkent, Uzbekistan, khidirov@inp.uz
A.M. Shalagin, Acad., Institute of Automation and Electrometry, S.B. R.A.Sc., Novosibirsk, Russia, shalagin@iae.nsc.su
I.A. Sherbakov, Acad. Prokhorov General Physics Institute, Russia, ivan@kapella.gpi.ru
Sh.A. Egamberdiev, Acad., Ulughbeg Astronomical Institute, Uzbek Academy of Sciences, Tashkent, Uzbekistan, shuhrat@astrin.uz
B.S. Yuldashev, Acad., Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, yuldbekh@gmail.com

Journal is registred by Agency on press and information of Republic of Uzbekistan in 22.12.2006.
Registration number 0045
Typesetting and makeup are made in editorial office of Uzbek Journal of Physics

Passed for printing 22.12.2020. Dimension of paper 60×84$^{1}/_{8}$. Conventional printed sheet 6,95.Calculation publishing sheet 5,89. An edition of 55 copies. Order list № 05-2020
Address of editorial office: Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies of Academy of Sciences of Uzbekistan, M. Ulugbek region, Dormon street 33, 100125 Tashkent, Uzbekistan
Тел.: 998-71-262-31-82, +998-90-3251531, Fax: 998-71-262-31-83
Printed: OOO « Poligraphik Tekhnology »
Ташкент, ул. Пирмухамедова,18. Тел. 90-926-25-26.

© Academy of Sciences of Republic of Uzbekistan, 2020 г.

Самогравитирующий шаровой слой гипотетического релятивистского газа

И.Ш. Муждабаев*

Самаркандский филиал Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада аль-Хорезмий, ул. Ш. Мирзо, 47А, 100140, Самарканд, Узбекистан

Получена 30.09.2020

* Corresponding author: e-mail ismet.sh@mail.ru

В рамках общей теории относительности построена модель равновесной конфигурации, представляющей собой шаровой слой из гипотетического релятивистского газа, в котором возможны отклонения от закона Паскаля, устанавливающего изотропность давления, свойственную идеальной жидкости. Полученная модель может быть использована в описании наблюдательных свойств релятивистского гравитирующего объекта.

Ключевые слова: релятивистский объект, внутренние решения, равновесная гравитационная конфигурация.

Within the framework of general relativity, a model of an equilibrium configuration of gravitating object is constructed. The spherical symmetric object studied consists of a spherical layer of a hypothetical relativistic gas, where deviations from Pascal's law maybe allowed, which establish the pressure isotropy being responsible to an ideal fluid. The obtained model has importance in describing observational properties of relativistic gravitating objects.

Keywords: relativistic objects, interior solutions, equilibrium gravitating configuration

I. Введение

Среди точно решаемых задач общей теории относительности широкое применение в астрофизических приложениях получили решения, описывающие гравитационное поле изолированного невращающегося материального объекта. Предположение о наличии подобной идеализированной физической ситуации, тем не менее, с достаточно высокой точностью приемлемо к реальным астрофизическим объектам [1-6].

В случае сферической симметрии статической массы в общей теории относительности распределение изотропного давления вещества, свойственное идеальной жидкости, является монотонно убывающей функцией радиальной координаты r [5, 6].

Вследствие этого, в соответствии с условием гидростатического равновесия, невозможно существование равновесного шарового слоя вещества в собственном поле тяготения, так как давление с необходимостью должно обратиться в нуль при двух различных значениях r. Ситуация изменяется, если в тензоре энергии-импульса T_{μ}^{ν} давление вещества анизотропное: $T_1^1 \equiv p_r \neq T_2^2 = T_3^3 \equiv p_\perp$, p_r и $p_\perp$ интерпретируются как радиальное и тангенциальное давления соответственно (в работах [7-23] были найдены внутренние решения уравнений гравитационного поля для шаров с анизотропным распределением вещества и на их основе построены модели релятивистских объектов).

Для шарового слоя условия сшивки с пустой областью мира не налагают условий на тангенциальное давление $p_\perp$, а $p_r = 0$ при двух значениях $r = R_1$ и $r = R_2$ радиальной координаты. Данное требование выполняется, если распределение радиального давления имеет вид:

$$p_r = f(r)(r - R_1)(R_2 - r)\,. \qquad (1)$$

Здесь положительная функция $f(r)$ определена в интервале $R_1 < r < R_2$.

Решения указанного вида релятивистских уравнений гравитационного поля для шарового слоя вещества были рассмотрены в работах [24-26]. Простейшее аналитическое решение, полученное в [24], соответствует шаровому слою с постоянной плотностью массы $\mu = const$.

II. Основная часть

Аналитическое решение можно получить и для шарового слоя вещества в газообразном состоянии с анизотропным давлением (разумеется, если предположить существование такого гипотетического релятивистского газа, в котором возможны отклонения от закона Паскаля, устанавливающего изотропность давления, свойственную идеальной жидкости). В такой конфигурации плотность массы $\mu(r)$, также как и давление p_r, должна обращаться в нуль на внутренней $r = R_1$ и внешней $r = R_2$ границах шарового слоя.

В стандартных шварцшильдовых координатах

$$ds^2 = -e^{\lambda(r)}dt^2 + e^{\nu(r)}dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2) \qquad (2)$$

уравнения равновесия имеют вид [27]:

$$e^{-\nu}\left(\frac{\nu'}{r} - \frac{1}{r^2}\right) + \frac{1}{r^2} = 8\pi\mu\,, \qquad (3)$$

$$e^{-\nu}\left(\frac{\lambda'}{r} + \frac{1}{r^2}\right) - \frac{1}{r^2} = 8\pi p_r\,, \qquad (4)$$

$$e^{-\nu}\left(\frac{\lambda''}{2} + \frac{\lambda'^2}{4} - \frac{\lambda'\nu'}{4} + \frac{\lambda' - \nu'}{2r}\right) = 8\pi p_\perp\,. \qquad (5)$$

Штрихами обозначены производные по r; скорость света c и гравитационная постоянная G равны единице.

Запишем уравнения (3) и (4) следующим образом:

$$e^{-\nu} = 1 - \frac{m(r)}{r}\,, \qquad (6)$$

$$\lambda' = \frac{8\pi p_r r^3 + m(r)}{r^2\left[1 - \frac{m(r)}{r}\right]}\,, \qquad (7)$$

где

$$m(r) = 8\pi\int_{R_1}^{r}\mu r^2 dr\,. \qquad (8)$$

Распределение плотности массы выберем в виде:

$$\mu = \frac{B}{8\pi r^2}(r - R_1)(R_2 - r)\,. \qquad (9)$$

Тогда

$$e^{-\nu} = 1 - \frac{B}{6r}(r - R_1)^2(3R_2 - R_1 - 2r) \qquad (10)$$

Из уравнения (7) следует, что на внутренней границе $r = R_1$ рассматриваемой конфигурации

$$\left| p_r \sim \frac{\lambda'}{r} \sim \ldots 0 \right|_{r=R_1}..$$

Поэтому выбирая

$$\lambda' = \frac{S(r - R_1)}{r(T - r)}\,, \qquad (11)$$

где константы S и T такие, что $p_r(R_2)=0$, имеем:

$$e^{\lambda} = Ar^{-\frac{SR_1}{T}}(T - r)^{-S\left(1 - \frac{R_1}{T}\right)}, \quad A = const\,. \qquad (12)$$

Сшивая теперь на границе $r = R_2$ найденное решение (10)-(12) с внешним решением Шварцшильда, получаем:

$$B = 6\alpha(R_2 - R_1)^{-3}\,, \qquad (13)$$

$$A = R_2^{\frac{SR_1}{T}}(T - R_2)^{S\left(1 - \frac{R_1}{T}\right)}\left(1 - \frac{\alpha}{R_2}\right), \qquad (14)$$

$$T = R_2 - S(R_2 - R_1) + \frac{6SR_2}{B(R_2 - R_1)^2}\,, \qquad (15)$$

α – гравитационный радиус.

Во внутренней области шарового слоя $0 \langle r \langle R_1$

$$e^{\nu} = 1,\ e^{\lambda} = e^{\lambda(R_1)} = const\,.$$

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

Распределения $p_r(r)$ и $p_\perp(r)$ определяются соответственно из уравнений (4) и (5) после подстановки в них функций (10)-(12). Выражение для радиального давления приводится к следующему виду:

$$p_r = \frac{(r-R_1)(R_2-r)}{8\pi r^3(T-r)}\left[\frac{S}{(R_2-R_1)^2}(3R_1R_2 - R_1^2 - 2R_2 r) + \frac{1}{6}B(S-1)(r-R_1)(3R_2 - R_1 - 2r)\right]. \quad (16)$$

При $r = R_2$ из формулы (10) имеем:

$$1-(B/6R_2)(R_2-R_1)^{-3}\rangle 0$$

Следовательно, переписав равенство (15) в виде:

$$\frac{B}{6R_2}(R_2-R_1)^2\frac{T-R_2}{S} = 1-\frac{B}{6R_2}(R_2-R_1)^3,$$

получаем

$$\frac{T-R_2}{S} > 0\,. \quad (17)$$

Наконец, требуя, чтобы давление p_r, также как и плотность массы, при $r = 2R_1R_2/(R_1+R_2)$ принимало максимальное свое значение, можно определить и постоянную S.

III. Заключение

Таким образом, найденное решение уравнений гравитационного поля с квадратичной формой пространства-времени описывает поле

$$ds^2 = \frac{dr^2}{1-\frac{B}{6r}(r-R_1)^2(3R_2-R_1-2r)} + r^2(d\theta^2+\sin^2\theta d\varphi^2) - Ar^{-\frac{SR_1}{T}}(T-r)^{-S(1-\frac{R_1}{T})}dt^2.$$

тяготения, создаваемое шаровым слоем релятивистского анизотропного газа. В свете новых наблюдательных данных полученное новое решение уравнений Эйнштейна может быть использовано в астрофизических приложениях общей теории относительности.

Благодарности. Автор выражает свою признательность доктору физ.-мат. наук, проф. Б.Ж. Ахмедову за обсуждение результатов данной работы.

Метаданные

Self-gravitating spherical layer of a hypothetical relativistic gas

I.Sh. Muzhdabaev

Samarkand branch of Tashkent University of Informational Technology, Sh. Mirzo, 47A, 100140, Samarkand, Uzbekistan

Within the framework of general relativity, a model of an equilibrium configuration of gravitating object is constructed. The spherical symmetric object studied consists of a spherical layer of a hypothetical relativistic gas, where deviations from Pascal's law maybe allowed, which establish the pressure isotropy being responsible to an ideal fluid. The obtained model has importance in describing observational properties of relativistic gravitating objects.

Keywords: relativistic objects, interior solutions, equilibrium gravitating configuration

Литература (References)

[1] D. Kramer, Kh. Shtefani, M. Mak-Kallum, E. Kherl't. Tochnie resheniya uravneniy Einstein. Edited by E. Shmuttser (Moskva, Energoizdat, 1982).
[2] L.Sh. Grigorian, G.S. Sahakian. Theory of Superdense Matter and Degenerate Stellar Configurations, Astrophys. and Space Sci. **95**, No.2, 305-356 (1983).
[3] S.L. Shapiro, S.A. T'yukolski. Chernie dyri, belie karliki i neitronnie zvezdy (Moskva, Mir, 1985).
[4] L.Ya. Arifov, I.Sh. Muzhdabaev. Sfericheskie analiticheskie modeli v relyativistskoy teorii gravitatcii. Dep. v VINITI, № 8345-B86 (1986).
[5] Dj. Uiler, B. Garrison, M. Vakano, K. Torn. Teoriya gravitatcii i gravitatcionniy kollaps (Moskva, Mir, 1967).
[6] Ch. Mizner, K. Torn, Dj. Uiler. Gravitatsiya (Moskva, Mir, 1977).
[7] B.Kuchowicz. General Relativistic Fluid Spheres. IV. Differential Equations for Non-Charged Spheres of Perfect Fluid. Acta Phys. Polon. B **2**. No. 5, 657-667 (1971).
[8] R.L. Bowers, E.P.T. Liang. Anisotropic Spheres in General Relativity. Astrophys. J. **188**, No. 3, 657-665 (1974).
[9] H. Heintzmann, W. Hillebrandt. Neutron Stars with an Anisotropic Equation of State: Mass, Redshift and Stability. Astron. and Astrophys. **38**, No. 1, 51-55 (1975).
[10] M. Cosenza, L. Herrera, M. Esculpi, L. Witten. Some Models of Anisotropic Spheres in General Relativity. J. Math. Phys. **22**, No. 1, 118-125 (1981).

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

[11] M. Cosenza, L. Herrera, M. Esculpi, L. Witten. Evolution of Radiating Anisotropic Spheres in General Relativity. Phys. Rev. D **25**, No. 10, 2527-2535 (1982).
[12] S.Ş. Bayin. Anisotropic Fluid Spheres in General Relativity. Phys. Rev. D **26**, No. 6, 1262-1274 (1982).
[13] B.W. Stewart. Conformally Flat, Anisotropic Spheres in General Relativity. J. Phys. A **15**. No. 8, 2419-2427 (1982).
[14] . K.D. Krori, P. Borgohain, R. Devi. Some Exact Anisotropic Solutions in General Relativity. Canadian J. Phys. **62**, No. 3, 239-246 (1984).
[15] V.A. Filimonov. In abstracts of Vsesoyuznoy konferentsii «Sovremennie teoreticheskie i eksperimental'nie problemy teorii otnositel'nosti i gravitatsii». Red. V.N. Ponomarev (Moskva, 1984).
[16] L. Herrera, J. Jiménez, L. Leal, J. Ponce de León, M. Esculpi, V. Galina. Anisotropic Fluids and Conformal Motions in General Relativity. J. Math. Phys. **25**. No. 11. 3274-3278 (1984).
[17] L. Herrera, J. Ponce de León. Anisotropic Spheres Admitting a One-Parameter Group of Conformal Motions. J. Math. Phys. **26**. No. 8, 2018-2023 (1985).
[18] L. Herrera, J. Ponce de León. Confined Gravitational Fields Produced by Anisotropic Fluids. J. Math. Phys. **26**, No. 11, 2847-2849 (1985).
[19] V.A. Filimonov. Massy neitronnikh zvezd s tverdoy vnutrenney obolochkoy. Izvestiya Vuzov. Fizika **29**, No. 2, 46-49 (1986).
[20] P.S. Letelier, P.S.C. Alencar. Anisotropic Fluids with Multifluid Components. Phys. Rev. D **34**, No. 2, 343-351 (1986).
[21] L.S. Solov'ev. Ob ogranichennikh konfiguratsiyakh v obshei teorii otnositel'nosti. (Preprint № 4166/1, Institut atomnoy energii, Moskva, 1985).
[22] L.S. Solov'ev, T.D. Kuznetcova. O gazodinamike i ustoichivosti relyativistskikh zvezd. In book: Problemy teorii gravitatcii i elementarnekh chastits. Vyp.. 15. Red. K.P. Stanyukovich ((Moskva, Energoizdat, 1985).
[23] L.S. Solov'ev. Ob ogranichennikh gravitiruyushikh konfiguratsiyakh v obshei teorii otnositel'nosti. In book: Problemy teorii gravitatsii i elementarnikh chastits. Vyp. 17. Red. V.N. Mel'nikov (Moskva, Energoizdat, 1986).
[24] C. Leibovitz. An Exact Solution for a Static Spherical Shell of Matter in Vacuum. Nuovo Cimento B **59**, No. 1, 33-38 (1969).
[25] T.L. Chow. On the Line Element of a Static Spherical Shell of Matter in Vacuum. Nuovo Cimento B **37**, No. 2, 214-218 (1977).
[26] I.Sh. Muzhdabaev. Analiticheskie modeli sfericheskogo sloya veshestva s anizotropnim uravneniem sostoyaniya. In abstracts: Nauchno-metodicheskoy konferentsii «Aspekty voennikh, voenno-tekhnicheskikh nauk i ikh prilozheniya (Samarkand, SVVAKIU, 1994).
[27] L.D. Landau, E.M. Lifshits. Teoriya polya (Moskva, Nauka, 1973).

Гипотетик релятивистик газни гравитацион шарсимон қатлами

И.Ш. Муждабаев

Тошкент информацион технологиялар университетини Самарканд филиали, Ш. Мирзо кўчаси, 47А, 100140, Самарканд, Узбекистан

Умумий нисбийлик назарияси доирасида гравитацион объектларнинг мувозанат конфигурацияси модели қўрилди. Ўрганилаётган сферик-симметрик объект, гипотетик релятивистик газнинг сферик қатламидан иборат бўлиб, у ерда идеал суюқликнинг изотроплигини тушунтирадиган Паскал қонунларидан четлашиш рўй бериши мумкин. Олинган модель релятивистик гравитацион объектларнинг астрономик кузатув хусусиятларини тавсифлашда муҳим аҳамиятга ега.

Калит сўзлар: гравитацион объект, сферик қатлам, мувозанат конфигурация, гипотетик релятивистик газ

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

СПЕЦИАЛЬНЫЙ СВОДНЫЙ КАТАЛОГ КАРЛИКОВЫХ ГАЛАКТИК ВО ВСЕЛЕННОЙ ДО РАССТОЯНИЙ 121 МПК

С. Кутлимуратов[*1], И. Таджибаев[1], С. Нуритдинов[2]

[1] Чирчикский государственный педагогический институт, Ташкентская область, Чирчик, Узбекистан
[2] Национальный университет РУз, улица Университетская, дом 4, 100174, Ташкент, Узбекистан

Получена 09.10.2019

* Corresponding author: e-mail s.kutlimuratov@cspi.uz

Собран банк наблюдательных данных по карликовым галактикам и на его основе составлен специальный сводный каталог карликовых галактик до расстояния 121 Мпк. В каталоге приведены физические характеристики (экваториальные координаты, расстояние до них, абсолютная звездная величина, масса, красное смещение, видимая звездная величина в рентгеновском диапазоне) 413 карликовых галактик. Выполнен статистический анализ составленного каталога и построены зависимости основных характеристик карликовых галактик. Получены эмпирические зависимости между основными физическими характеристиками карликовых галактик. В частности, найдены линейные зависимости между массой карликовых галактик и их абсолютной звёздной величиной, а также между массой и расстоянием. Показано, что с увеличением модуля абсолютной звездной величины и расстояния до карликовых галактик линейно растет значение их масс. Однако между красным смещением и видимой величиной не была обнаружена достаточная корреляция. Показано, что по частотам встречаемости карликовые галактики разделяются на две части: 10–40 Мпк и 95–120 Мпк, что может быть связано с наличием массивных галактик.

Ключевые слова: карликовые галактики, звездообразование, сводный каталог карликовых галактик, абсолютная звездная величина, масса карликовых галактик, эмпирические зависимости

The bank of observational data on dwarf galaxies has been assembled. Based on the observational data, a special composite catalog of dwarf galaxies up to a distance of 121 Mpc was composed. This catalog contains physical characteristics (equatorial coordinates, distance to them, absolute stellar magnitude, mass (in solar masses), red shift, apparent magnitude in the X-ray range) of 413 dwarf galaxies. A statistical analysis of the composed catalog is carried out and the dependences of the main characteristics of dwarf galaxies are constructed. Empirical relationships have been obtained between the main physical characteristics of dwarf galaxies. In particular, linear relationships were found between the mass of dwarf galaxies and their absolute stellar magnitude, as well as between the mass and distance. It is shown that with an increase in the absolute magnitude and distance to dwarf galaxies, their masses increase linearly. However, no sufficient correlation was found between red shift and apparent magnitude. It is shown that the frequency of occurrence of dwarf galaxies is divided into two parts: 10-40 Mpc and 95-120 Mpc, which may be associated with the presence of massive galaxies.

Keywords: dwarf galaxies, star formation, compiled catalog of dwarf galaxies, absolute magnitude of galaxies, mass of dwarf galaxies, empirical relationships

I. Введение

Во Вселенной среди различных типов галактик встречаются карликовые галактики [1-6], состоящие из нескольких миллиардов звезд со светимостью меньше, чем $10^9 L_\Theta$. В работе [7] создана самая большая и глубокая выборка галактик в войде, разработана оригинальная методика оценки параметров звездного населения и кинематики с помощью анализа спектров, интегрированных

вдоль луча зрения. Кроме того, получены данные панорамной спектроскопии для карликовых эллиптических и линзовидных галактик в скоплениях и группах. В работе [8] по результатам щелевой спектроскопии проведена классификация около 650 новых эмиссионных объектов, выделенных предварительно по призменным спектрам Гамбургского обзора и 178 эмиссионных объектов из обзора с объективной призмой Case. Также изучено пространственное распределение голубых компактных галактик (BCG) из выборки второго Бюраканского обзора (SBS) относительно структур, формируемых массивными галактиками. Показано, что ~80% расположены в основном на периферии таких структур, в то время как остальные ~20% BCG находятся в больших войдах. Из анализа большой выборки BCG показано, что вспышки звездообразования в более чем половине из них вызываются приливными воздействиями ближайших галактик разных масс или слияниями (мержингом) карликовых галактик.

В работе [9] представлен справочный каталог по спектральному распределению энергии галактик, который содержит гомогенизированные спектрофотометрические данные для 800299 галактик с красным смещением между $0.007<z<0.6$. Они выбраны из спектроскопического обзора SDSS. Авторы приводят данные для галактик различной морфологии и светимости, а также аналитические выражения для красной ветви/последовательности в различных цветах. К сожалению, авторами не приведены наблюдательные данные для карликовых галактик в отдельности. В работах Караченцева и его коллегами [10-19] изучены различные проблемы по карликовым галактикам. Например, в работе [19] авторы представляют обзор наблюдательных данных о выборке Местного объема, которая содержит около 1000 галактик в пределах 11 Мпк вокруг Млечного Пути. Они обсуждают HII-свойства карликовых галактик в различном окружении, а также темпы звездообразования в них, полученные по данным FUV- и Hα-обзоров. Авторы также отмечают, что карликовые галактики Местного объема являются важными «пробными частицами» при определении полной массы близких групп и самого близкого скопления Девы.

В отличие от приведенных выше работ, нас интересует проблема поиска карликовых галактик во Вселенной. Для этого мы ищем ответы на следующие вопросы.

Во-первых, какие типы карликовых галактик наблюдаются во Вселенной?

Дело в том, что существует несколько основных типов карликовых галактик:

– карликовая эллиптическая галактика (*dE*), похожая на эллиптические галактики;

– карликовая сфероидальная галактика (*dSph*), подтип *dE*, отличающийся особенно низкой поверхностной яркостью;

– карликовая неправильная галактика (*dIr*), по-видимому, является эквивалентом обычных неправильных галактик в области карликовых галактик. В ряде близких *dIr*-галактик удалось обнаружить облака ионизированного водорода;

– карликовая голубая компактная галактика (*dBCG* или *BCD*) имеет признаки активного звездообразования;

– ультракомпактные карликовые галактики (*UCD*) – класс очень компактных галактик, содержащих порядка 10^8 звёзд при характерном поперечном размере около 50 пк;

– карликовая спиральная галактика, аналог спиральных галактик, но в отличие от нормальных галактик, встречается чрезвычайно редко.

Во-вторых, в чем проблема дефицита карликовых галактик?

Наблюдаемое распределение обычных галактик по количеству согласуется с результатами моделирования, но число карликовых галактик [5] оказывается на порядки величин меньше, чем ожидается по результатам моделирования [6, 7]. Для сравнения, в Местной группе галактик наблюдалось около 38 карликовых галактик, из них вокруг Млечного пути обращается 11, но результаты моделирования предсказывают наличие порядка 500 карликовых галактик-спутников у Млечного пути.

Есть два возможных решения этой проблемы.

Первое решение заключается в том, что меньшие гало действительно существуют, но только часть из них становится видимой, поскольку оставшиеся не способны притянуть достаточное количество барионного вещества для создания наблюдаемой карликовой галактики. По данным наблюдений обсерватории Кека в 2007 г. было открыто 8 ультраслабых карликовых спутников Млечного пути, 6 из которых по оценкам на 99.9% состоят из тёмной материи [8].

Вторым решением проблемы может явиться предположение о слиянии или приливном разру-

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

шении карликовых галактик крупными при сложной конфигурации взаимодействия. Приливное удаление вещества является проблемой для обнаружения карликовых галактик, поскольку в таком случае галактики обладают крайне низкой поверхностной яркостью и являются очень рассеянными, поэтому их практически невозможно наблюдать.

II. Каталоги карликовых галактик

Первые списки карликовых галактик были опубликованы известным астрофизиком Фрицем Цвикки (F. Zwicky) во второй половине 1960-х на основе прямых снимков Паломарского обзора неба. В настоящее время есть много каталогов карликовых галактик. Но информация в таких каталогах недостаточна для полного физического исследования карликовых галактик. На основе изучения существующих каталогов мы создали специальный сводный каталог карликовых галактик. Для этого мы использовали следующие работы: каталог карликовых галактик, опубликованный в работах [9-12]. В этих работах авторы наблюдали 71 карликовую галактику низкой поверхностной яркости с помощью 100-метрового радиотелескопа в Эффельсберге в поисках новых членов 27 групп северных галактик с характерными расстояниями от 8 до 15 Мпк. Также идентифицировали выборку из 41 маломассивного выброса с высоким содержанием кислорода из соотношения масса-металличность звездообразующих галактик.

В приложении к данной статье мы приводим наш сводный каталог карликовых галактик, который содержит следующие характеристики карликовых галактик: координаты относительно J2000, расстояние до них (Мпк), абсолютные звездные величины, массы (в массах Солнца), красные смещения и видимые величины. Этот каталог используется нами для изучения физических свойств карликовых галактик.

III. Анализ каталога

На основании данных, приведенных в сводном каталоге, нами найдена линейная зависимость между массой карликовых галактик и расстоянием (корреляция $r_{M\text{m},D}$=0.92). Эта взаимосвязанность является неожиданной и, возможно, частично связана с темной материей, что можно увидеть на рис. 1.

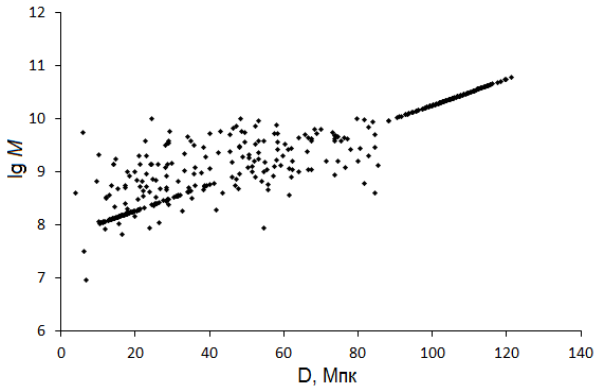


Рисунок 1. Взаимосвязанность массы и расстояния.

На основании этой диаграммы мы нашли зависимость

$$\lg M = (7.763\pm0.061)+(0.0248\pm0.00146)D. \quad (1)$$

Также найдена линейная зависимость между массой карликовых галактик и их абсолютной звёздной величиной (r_{M,M_V} = 0.55) (рис. 2).

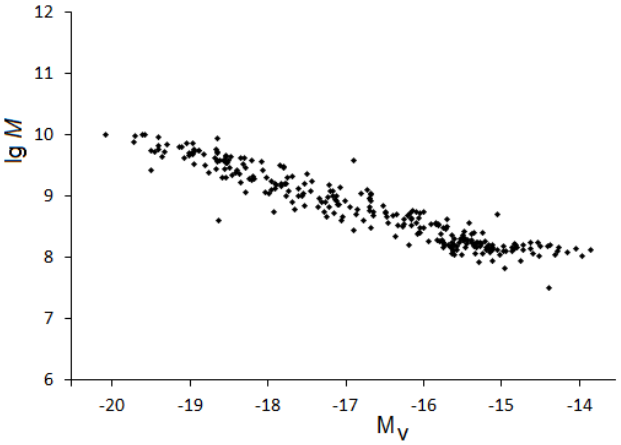


Рисунок 2. Взаимосвязанность массы и абсолютной звездной величины.

Соответственно найдена зависимость

$$\lg M = (2.766\pm0.497)+(-0.389\pm0.029)M_V. \quad (2)$$

Рассмотрена зависимость между абсолютной звездной величиной и видимой величиной и найдена линейная корреляция (коэффициент корреляции $r_{\perp}((m, M)_{\perp} v) = 0.69$). Получена соответствующая зависимость в виде:

$$m = (26.766\pm0.578)+(0.673\pm0.034)M_V. \quad (3)$$

Эта зависимость представлена на рис. 3.

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

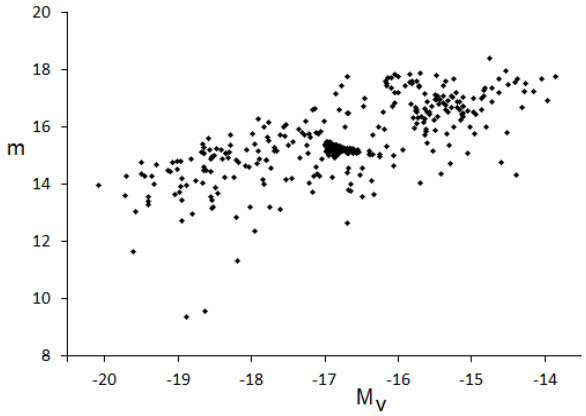


Рисунок 3. Взаимосвязанность видимой и абсолютной звездных величин.

IV. Обсуждение данных

На основе наших данных, представленных в сводном каталоге карликовых галактик, можно построить гистограмму по расстоянию до них (рис. 4, гистограмма разделена на две части). Эта гистограмма состоит из следующих частей: диапазон расстояний 1–61 Мпк и отдельно 65–121 Мпк.

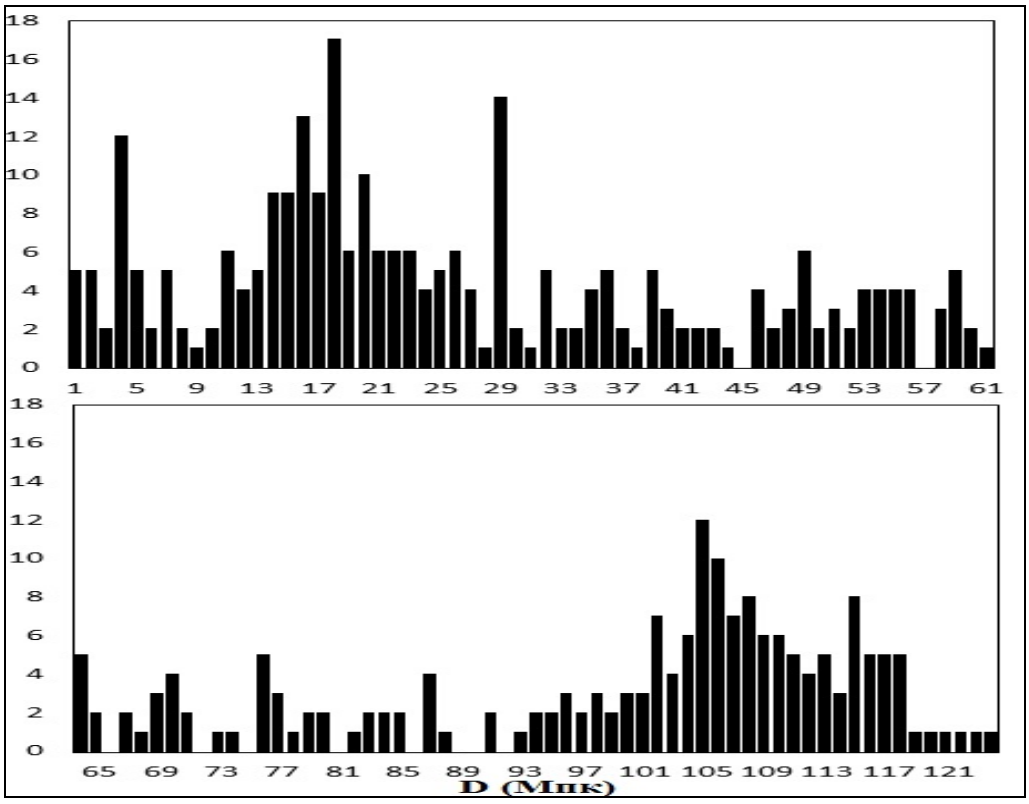


Рисунок 4. Распределение карликовых галактик до расстояний 121Мпк.

Из рис. 4 видно, что по частотам встречаемости карликовых галактик в основном их можно разделить на две части: 10–40 и 95–120 Мпк, что может быть связано с наличием массивных галактик. Отметим, результаты показывают, что обнаруженные нами связи полностью согласуются с физическими законами.

V. Заключение

Используя имеющиеся данные наблюдений, составлен сводный каталог из 413 объектов. Найдена линейная зависимость между массой карликовых галактик и их расстоянием от нас. Обнаружена линейная зависимость между массой и абсолютной звездной величиной, а также найдена ли-

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

нейная зависимость между абсолютной звездной величиной и видимой величиной.

Далее мы планируем расширить наш специальный каталог и решить проблемы, связанные с физикой карликовых галактик.

Приложение. Специальный сводный каталог карликовых галактик.

№	*RAJ*2000	*DEJ*2000	*D*	M_V	lg $\mathfrak{M}$	*z*	m_r
	"h:m:s"	"d:m:s "	Мпк	m	[$\mathfrak{M}_\square$]	-	M
1	01 13 39.3120	+00 52 26.760	16,52	-14,96	7,81	0,0039	15,76
2	01 25 34.9680	+07 59 26.880	41,26	-17,66	8,78	0,0097	15,14
3	01 48 37.0800	+28 38 33.720	53,29	-17,49	9,35	0,0125	15,35
4	01 55 59.7360	-00 11 07.800	51,57	-16,72	9,09	0,0121	16,01
5	02 02 38.7600	-09 22 13.080	77,06	-18,68	9,61	0,018	15,13
6	02 03 18.6960	+22 02 38.760	35,1	-18,55	9,57	0,0088	13,55
7	02 10 09.7920	-01 24 04.680	50,71	-18,21	9,26	0,0119	14,83
8	02 17 34.7520	-07 42 14.400	68,39	-19,1	9,79	0,016	14,45
9	02 21 55.1760	-09 28 35.760	52,43	-17,3	8,9	0,0123	15,81
10	02 22 11.9520	-08 30 36.360	66,66	-18,53	9,63	0,0156	14,9
11	02 27 47.0400	-08 37 33.960	71,42	-17,53	9,19	0,0167	16,09
12	02 43 17.5008	+03 38 40.992	59,75	-18,53	9,29	0,014	14,94
13	07 18 33.4800	+31 23 11.760	48,56	-18,67	9,75	0,0114	14,02
14	07 55 22.4880	+15 05 37.680	65,8	-19,01	9,69	0,0154	14,5
15	08 01 18.7920	+25 17 23.640	66,23	-18,41	9,38	0,0155	15,18
16	08 09 47.3760	+21 37 17.400	47,27	-17,09	8,86	0,0111	15,75
17	08 11 08.3040	+46 27 56.160	33,3	-18,46	9,33	0,0074	13,69
18	08 21 52.7040	+34 19 37.920	32,71	-15,8	8,26	0,0077	16,31
19	08 29 32.6640	+14 27 06.480	84,44	-18,29	9,46	0,0197	15,72
20	08 33 17.4960	+19 20 47.760	82,7	-19,3	9,84	0,0193	14,68
21	08 33 22.9680	+29 32 18.960	29,29	-18,94	9,76	0,0069	12,73
22	08 35 34.2480	+03 40 18.120	55,87	-16,47	8,65	0,0131	16,71
23	08 36 30.6720	+05 09 57.240	57,6	-17,96	9,1	0,0135	15,4
24	08 51 37.9200	-02 21 57.600	46,41	-19,41	9,81	0,0109	13,38
25	08 58 29.7360	+06 19 16.680	50,71	-17,68	9,32	0,0119	15,14
26	09 00 15.6960	+35 43 39.360	42,98	-19,41	9,76	0,0101	13,26
27	09 00 23.9760	+25 36 52.920	25,45	-17,53	8,83	0,006	14,14
28	09 02 41.4240	+13 06 27.720	70,12	-19,13	9,79	0,0164	14,48
29	09 11 08.3520	+42 39 22.320	25,45	-16,16	8,52	0,006	15,31
30	09 16 25.1280	+42 59 29.760	36,13	-17,73	9,07	0,0085	14,57
31	09 16 44.0160	+59 46 28.560	58,46	-18,64	9,56	0,0137	14,6
32	09 20 40.4400	+19 20 14.640	59,32	-17,6	9,12	0,0139	15,7
33	09 29 05.7360	+66 27 28.440	48,99	-18,18	9,28	0,0115	14,75
34	09 30 06.4320	+60 26 53.160	58,03	-18,34	9,22	0,0136	15,07

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

35	09 33 42.9840	+33 36 00.720	22,04	-16,07	8,63	0,0052	14,98
36	09 38 14.5920	+19 42 39.960	61,48	-16,46	8,56	0,0144	16,99
37	09 42 53.0880	+09 29 29.904	45,55	-18,76	9,37	0,0107	14,13
38	09 44 07.2000	-00 39 35.280	17,37	-16,06	8,4	0,0041	14,65
39	09 49 06.6960	+44 02 51.720	66,66	-17,98	9,04	0,0156	15,76
40	09 51 39.2880	+44 19 08.400	64,07	-17,56	8,99	0,015	15,99
41	09 51 56.9760	+68 53 02.760	62,34	-16,68	9,04	0,0146	16,49
42	09 53 55.4640	+07 02 47.400	74,45	-17,82	9,19	0,0174	15,98
43	09 55 29.6880	+08 23 26.232	23,15	-16,69	8,96	0,0041	14,38
44	09 56 46.0320	+28 49 43.680	6,34	-14,39	7,49	0,0015	14,33
45	10 00 04.6800	+45 31 11.280	23,75	-15,11	7,94	0,0056	16,35
46	10 00 05.8080	+43 11 30.840	23,75	-16,25	8,62	0,0056	15,02
47	10 01 14.3760	+37 04 15.240	20,34	-15,94	8,26	0,0048	15,19
48	10 07 34.6800	-06 31 23.520	67,53	-18,51	9,58	0,0158	14,99
49	10 08 10.3200	+02 27 48.240	28,86	-16,89	9,58	0,0068	14,24
50	10 10 37.8000	+05 09 00.720	58,46	-18,64	9,71	0,0137	14,48
51	10 17 11.7360	+04 19 52.320	17,8	-15,31	8,23	0,0045	15,35
52	10 17 32.9760	+43 08 41.280	15,67	-14,51	8,01	0,0037	15,8
53	10 19 01.4880	+21 17 00.960	24,8	-17,11	8,86	0,0036	14,34
54	10 25 04.5840	+17 08 57.840	10,15	-18,19	9,32	0,0025	11,3
55	10 29 49.2720	+16 10 51.240	45,98	-17,89	9,18	0,0108	14,89
56	10 34 00.9360	-02 21 58.680	28,44	-16,89	8,44	0,0067	15,13
57	10 34 45.8640	+50 46 05.880	18,5	-16,68	8,91	0,002	13,78
58	10 35 12.0480	+46 14 12.120	6,76	-12,16	6,95	0,0016	16,41
59	10 53 25.1760	+16 46 15.960	14,82	-17,96	9,24	0,0035	12,33
60	10 53 49.4640	+57 07 06.960	40,05	-18,94	9,72	0,0064	13,45
61	10 54 39.2400	+54 18 18.720	24,5	-19,61	9,99	0,0045	11,63
62	11 01 50.9520	+16 36 24.840	49,5	-18,88	9,74	0,0098	13,94
63	11 09 51.6960	-02 58 40.080	73,59	-18,82	9,67	0,0172	14,89
64	11 13 49.4880	+21 31 13.800	26,1	-17,07	9,13	0,0048	14,26
65	11 20 14.6880	+02 31 20.856	22,9	-18,01	9,29	0,0054	13,21
66	11 22 39.9840	+13 19 49.800	58,46	-18,39	9,42	0,0137	14,88
67	11 25 31.8000	+38 03 37.800	29,72	-17,83	9,16	0,007	14,01
68	11 25 52.0800	-00 39 41.400	80,1	-17,77	9,2	0,0187	16,17
69	11 29 15.2880	+20 34 59.160	19,92	-17,16	9	0,0047	13,72
70	11 35 04.9440	+02 33 04.680	74,45	-19,01	9,65	0,0174	14,81
71	11 35 49.2000	+16 01 35.760	73,59	-17,13	8,94	0,0172	16,62
72	11 40 28.2000	+19 24 34.920	48,13	-17,79	9,45	0,0113	14,84
73	11 41 21.9360	+46 23 35.520	10,15	-14,6	8,06	0,0024	14,74
74	11 41 25.0800	+24 57 05.760	48,13	-17,79	9,47	0,0113	14,83
75	11 45 55.0320	+17 11 32.280	46,84	-17,27	8,74	0,011	15,71
76	11 48 18.1680	-01 38 23.640	55,44	-17,54	9,03	0,013	15,66
77	11 50 02.7120	+15 01 23.160	11,9	-15,29	7,92	0,0024	14,72

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

78	11 50 20.1600	+25 57 42.480	53,29	-19,4	9,95	0,0125	13,57
79	11 52 37.1760	-02 28 09.840	14,39	-16,36	8,33	0,0034	14,1
80	11 56 32.5200	+32 07 49.080	43,41	-17,05	8,59	0,0102	15,82
81	12 00 02.7600	+24 53 21.120	47,7	-16,2	8,67	0,0112	16,53
82	12 03 53.4000	+25 26 06.720	45,55	-18,98	9,7	0,0107	13,72
83	12 06 14.4000	+58 58 15.960	45,98	-17,69	8,89	0,0108	15,26
84	12 11 44.5920	+19 29 26.160	49,42	-18,08	9,55	0,0116	14,62
85	12 13 06.4800	+17 05 55.680	61,05	-18,07	9,42	0,0143	15,2
86	12 24 22.0800	+21 09 24.840	13,12	-15,41	8,55	0,0031	14,36
87	12 24 28.5840	+13 23 08.880	85,31	-17,9	9,12	0,0199	16,28
88	12 25 52.4880	+05 48 34.200	21,19	-16,48	8,72	0,005	14,54
89	12 28 11.1120	+44 05 36.600	3,98	-18,63	8,6	0,0006	9,55
90	12 30 36.3600	+41 38 36.960	6,03	-18,89	9,74	0,0018	9,35
91	12 32 00.7920	+49 37 49.080	61,91	-18,55	9,43	0,0145	14,89
92	12 38 56.9040	+38 05 24.720	31,42	-16,95	8,82	0,0074	15
93	12 39 20.2800	-03 48 29.880	35,7	-17,34	8,95	0,0084	14,9
94	12 39 37.2720	+45 26 21.120	53,29	-17,44	9,23	0,0125	15,48
95	12 41 36.0960	-00 07 17.760	67,53	-18,35	9,61	0,0158	15,07
96	12 44 06.9360	+45 00 18.000	52,43	-18,95	9,52	0,0123	14,19
97	12 46 23.3280	+48 14 06.720	22,1	-16,25	8,53	0,003	14,94
98	12 47 17.7840	+47 09 41.760	84,01	-18,65	9,94	0,0196	15,07
99	12 49 41.8320	-04 34 46.920	12,3	-16,33	8,51	0,0047	13,64
100	12 53 13.9920	+04 27 54.000	9,68	-16,69	8,82	0,0024	12,62
101	12 54 51.9840	+02 39 09.720	17,85	-17,6	9	0,0031	13,11
102	12 56 51.4560	+16 30 24.120	17,37	-15,06	8,7	0,0041	15,09
103	12 58 47.5920	-04 23 09.960	19,92	-14,8	8,16	0,0047	16
104	13 16 52.3200	+12 32 53.520	13,55	-16,49	8,74	0,0032	13,55
105	13 19 39.1920	+30 15 23.760	48,25	-19,57	9,99	0,0071	13,03
106	13 28 46.6320	-02 02 16.800	52,43	-18,96	9,85	0,0123	13,91
107	13 30 17.3520	+31 19 57.720	68,82	-19,45	9,71	0,0161	14,29
108	13 33 08.4480	+54 49 39.000	75,32	-18,57	9,57	0,0176	15,19
109	13 34 14.9280	+31 25 30.000	73,8	-19,08	9,61	0,0166	14,77
110	13 42 59.4000	+52 41 17.880	25,03	-15,49	8,35	0,0059	15,87
111	13 43 13.1280	+36 44 57.480	84,44	-18,65	9,7	0,0197	15,28
112	13 43 26.9760	+43 11 18.600	35,27	-16,27	8,49	0,0083	15,98
113	13 49 50.2560	+37 43 50.160	34,42	-16,35	8,69	0,0081	15,7
114	13 51 53.5680	+64 22 22.080	28,4	-16,87	8,69	0,0058	14,93
115	13 55 45.4560	-06 00 10.080	28,01	-17,45	9,07	0,0066	14,21
116	13 56 47.1840	-04 41 32.280	41,69	-15,83	8,28	0,0098	16,81
117	13 56 53.6640	+36 56 43.440	84,44	-16,77	8,59	0,0197	17,45
118	14 00 32.4240	+55 14 45.600	54,15	-17,36	8,81	0,0127	15,91
119	14 01 40.2720	+07 59 52.440	76,62	-17,16	9,07	0,0179	16,59
120	14 04 53.1840	+12 43 43.680	58,03	-19,72	9,88	0,0136	13,6

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

121	14 10 12.7440	-02 34 27.840	28,75	-18,53	9,54	0,0051	13,15
122	14 18 25.5840	+25 30 06.480	60,2	-18,32	9,52	0,0149	14,92
123	14 18 43.3200	+21 49 03.000	36,13	-17,92	8,74	0,0085	14,71
124	14 21 22.2480	-03 45 31.680	39	-18,23	9,27	0,0091	14,24
125	14 29 50.9280	+44 26 51.360	42,3	-18,37	9,36	0,0092	14,24
126	14 31 09.0240	+27 14 14.280	64,07	-19,35	9,63	0,015	14,26
127	14 36 08.5920	+28 27 01.800	26,73	-16,39	8,68	0,0063	15,14
128	14 36 45.7920	+51 27 34.920	33,13	-16,68	9,02	0,0078	15,13
129	14 39 45.2880	+23 23 47.400	82,9	-18,59	9,3	0,015	15,6
130	14 45 32.4480	+31 24 55.800	20,77	-16,68	8,47	0,0049	14,56
131	14 48 48.0000	-03 42 58.680	17,3	-16,64	8,73	0,0031	13,98
132	14 49 48.7440	+36 23 47.400	26,3	-15,51	8,03	0,0062	16,22
133	14 50 56.5440	+35 34 19.560	23,1	-17,15	8,71	0,0039	14,29
134	14 54 11.7120	+30 12 34.200	39,98	-18,03	9,06	0,0094	14,6
135	14 57 38.5920	+26 40 05.880	17,79	-15,53	8,29	0,0042	15,15
136	15 05 27.1680	+23 41 17.880	37,8	-17,23	8,97	0,0162	15,09
137	15 07 08.0880	-02 39 45.720	28,86	-15,78	8,37	0,0068	15,96
138	15 07 48.3360	+55 11 08.520	47,27	-19,04	9,85	0,0111	13,63
139	15 09 15.9360	+19 50 54.960	67,53	-16,8	9,04	0,0158	16,58
140	15 17 25.2720	+42 57 21.240	76,19	-18,47	9,64	0,0178	15,23
141	15 18 39.9840	+22 05 10.680	67,53	-18,3	9,61	0,0158	15,11
142	15 27 25.8720	+11 17 03.120	55,01	-17,21	9,17	0,0129	15,75
143	15 27 44.5920	+12 58 14.880	54,58	-14,76	7,93	0,0128	18,4
144	15 29 29.0160	+26 00 27.000	28,44	-17,04	8,65	0,0067	14,86
145	15 35 00.0960	+46 48 52.560	80,53	-18,66	9,43	0,0188	15,39
146	15 35 53.6880	+38 40 39.720	79,66	-20,08	9,99	0,0186	13,95
147	15 36 19.3440	+30 40 51.960	28,5	-17,12	8,91	0,0058	14,59
148	15 48 04.1280	+04 14 32.280	55,87	-16,7	8,76	0,0131	16,47
149	15 51 01.4880	+10 01 51.960	62,34	-17,78	9,19	0,0146	15,62
150	15 54 41.2320	+16 37 02.280	35,9	-17,84	9,49	0,0079	14,14
151	16 05 40.2720	+50 45 15.840	54,58	-17,76	9	0,0128	15,51
152	16 05 47.0160	+41 19 05.520	28,01	-18,81	9,5	0,0066	12,94
153	16 06 40.9920	+06 34 50.880	20,4	-16,52	8,84	0,0058	14,33
154	16 21 28.2000	+28 38 23.640	12,27	-15,7	8,5	0,0029	14,05
155	16 27 53.4720	+48 25 29.280	57,17	-17,01	8,91	0,0134	16,19
156	16 31 48.7440	+20 24 38.520	73,15	-19,5	9,74	0,0171	14,36
157	16 38 02.9040	+26 27 09.720	61,48	-18,29	9,05	0,0144	15,36
158	16 47 10.9440	+21 05 42.720	38,27	-17,24	8,66	0,009	15,35
159	17 13 08.6880	+59 19 39.720	15,24	-16,64	8,67	0,0036	13,76
160	21 19 42.8880	-07 33 08.280	38,27	-18,49	9,46	0,009	13,86
161	21 42 32.2800	+15 18 00.000	52	-17,9	9,19	0,0122	15,15
162	22 02 31.9680	+19 45 00.360	21,1	-17,75	9,29	0,0054	13,21
163	22 08 09.1920	+04 41 24.000	57,6	-19,33	9,71	0,0135	13,98

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

164	22 16 07.6800	+22 55 59.880	54,58	-18,61	9,58	0,0128	14,46
165	22 27 26.6400	+12 05 39.840	50,28	-17,2	9,07	0,0118	15,65
166	22 39 21.8640	+13 52 55.920	74,02	-18,96	9,67	0,0173	14,81
167	23 02 59.2560	+16 36 18.720	28,9	-18,52	9,53	0,0069	13,18
168	23 19 58.0080	-00 59 07.800	51,57	-17,12	9	0,0121	15,81
169	23 20 35.1840	-00 52 51.240	61,91	-17,26	8,9	0,0145	16,2
170	23 24 23.7600	-00 06 27.000	22	-17,21	8,81	0,009	14,05
171	23 26 29.8800	+01 57 36.720	73,59	-18,64	9,58	0,0172	15,08
172	23 26 38.2800	+11 44 32.280	53,29	-18,55	9,57	0,0125	14,45
173	23 30 09.8880	+25 31 57.720	81,83	-19,71	9,97	0,0191	14,27
174	23 31 58.2720	+28 56 49.920	77,93	-19,5	9,41	0,0182	14,77
175	23 37 33.4560	+17 59 46.320	34,2	-18,54	9,65	0,0084	13,43
176	23 40 44.3040	-00 53 14.640	81,83	-16,85	8,78	0,0191	17,17
177	23 59 37.0080	+14 48 28.080	22,7	-18,21	9,57	0,0058	12,82
178	09 20 04,27	-00 30 08,97	105,62	-16,73	10,38	0,0257	15,25
179	09 25 24,23	+00 12 40.39	102,74	-16,94	10,31	0,025	15,21
180	13 13 24,25	+00 15 02.95	108,49	-16,81	10,45	0,0264	15,30
181	11 45 13,16	-01 48 17,68	112,19	-16,99	10,55	0,0273	15,35
182	09 39 09,38	+00 59 04.15	100,27	-16,73	10,25	0,0244	15,17
183	14 09 42,85	+64 29 36.30	120,00	-16,93	10,74	0,0292	15,47
184	13 18 17,82	+02 12 59.83	103,56	-16,91	10,33	0,0252	15,22
185	14 14 12,88	+01 50 12.88	104,79	-16,7	10,36	0,0255	15,24
186	09 51 25,07	+01 55 13.54	102,33	-16,63	10,30	0,0249	15,20
187	10 17 11,84	+57 55 21.69	109,73	-16,97	10,48	0,0267	15,31
188	08 58 44,96	+50 29 58.98	94,52	-16,67	10,11	0,023	15,09
189	09 51 21,17	+57 55 53.58	114,66	-16,91	10,61	0,0279	15,39
190	07 37 35,27	+32 13 11.90	111,78	-16,85	10,54	0,0272	15,34
191	08 55 48,98	+03 40 41.03	114,25	-16,98	10,60	0,0278	15,38
192	11 05 46,59	+04 34 27.37	103,97	-16,7	10,34	0,0253	15,23
193	13 02 49,18	+65 34 49.60	113,84	-16,99	10,59	0,0277	15,38
194	08 30 55,41	+42 13 24.35	102,33	-16,68	10,30	0,0249	15,20
195	07 38 29,13	+30 04 37.98	95,75	-16,61	10,14	0,0233	15,11
196	09 34 53,52	+52 44 21.29	103,15	-16,84	10,32	0,0251	15,22
197	15 22 02,70	+60 32 55.98	101,51	-16,68	10,28	0,0247	15,19
198	10 13 28,13	+54 55 44.77	104,79	-16,85	10,36	0,0255	15,24
199	08 31 56,33	+43 36 12.70	111,37	-16,97	10,52	0,0271	15,34
200	12 32 00,65	+04 39 02.10	106,85	-16,75	10,41	0,026	15,27
201	13 44 37,64	-01 15 52,73	103,56	-16,62	10,33	0,0252	15,22
202	09 41 41,84	+46 59 29.76	104,38	-16,65	10,35	0,0254	15,24
203	09 50 40,63	+47 57 57.03	101,51	-16,83	10,28	0,0247	15,19
204	08 43 10,71	+43 08 53.58	100,68	-16,79	10,26	0,0245	15,18
205	10 33 01,14	+54 02 18.06	104,38	-16,75	10,35	0,0254	15,24
206	08 09 53,53	+29 17 04.82	115,48	-16,97	10,63	0,0281	15,40

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

207	08 55 22,09	+39 23 10.02	114,25	-16,91	10,60	0,0278	15,38
208	09 04 47,11	+40 48 29.11	106,85	-16,84	10,41	0,026	15,27
209	09 56 04,31	+46 41 40.59	106,85	-16,89	10,41	0,026	15,27
210	09 31 39,60	+49 49 56.85	103,15	-16,76	10,32	0,0251	15,22
211	09 04 57,96	+41 29 36.42	98,63	-16,79	10,21	0,024	15,15
212	14 57 35,69	+41 38 16.12	103,56	-16,8	10,33	0,0252	15,22
213	09 02 49,80	+37 15 33.18	99,86	-16,87	10,24	0,0243	15,17
214	09 36 20,30	+41 50 33.76	99,45	-16,77	10,23	0,0242	15,16
215	10 00 36,23	+54 20 12.55	102,33	-16,68	10,30	0,0249	15,20
216	13 12 25,04	+58 25 40.89	113,42	-16,96	10,58	0,0276	15,37
217	10 51 42,83	+07 17 40.87	94,93	-16,83	10,12	0,0231	15,09
218	10 15 02,53	+07 48 26.68	116,30	-16,97	10,65	0,0283	15,41
219	11 42 03,02	+49 21 25.18	100,27	-16,59	10,25	0,0244	15,17
220	14 36 39,59	+50 14 24.10	106,03	-16,91	10,39	0,0258	15,26
221	13 57 58,56	+51 19 26.55	113,01	-17	10,57	0,0275	15,36
222	16 20 56,98	+37 58 44.32	112,60	-16,99	10,56	0,0274	15,36
223	15 08 31,65	+52 55 56.95	101,10	-16,89	10,27	0,0246	15,19
224	11 11 23,75	+45 41 31.69	101,51	-16,71	10,28	0,0247	15,19
225	08 40 45,44	+32 03 15.49	105,62	-16,82	10,38	0,0257	15,25
226	09 21 45,81	+38 18 09.76	110,96	-16,91	10,51	0,027	15,33
227	08 49 36,30	+54 58 10.85	107,26	-16,9	10,42	0,0261	15,28
228	07 56 23,02	+22 01 15.17	96,16	-16,97	10,15	0,0234	15,11
229	08 23 32,79	+27 07 52.78	99,45	-16,64	10,23	0,0242	15,16
230	12 16 39,46	+14 15 37.07	96,16	-16,58	10,15	0,0234	15,11
231	08 17 50,42	+25 29 21.56	113,42	-16,9	10,58	0,0276	15,37
232	09 44 52,28	+36 17 28.60	97,81	-16,75	10,19	0,0238	15,14
233	13 48 36,88	+48 52 58.23	105,62	-16,79	10,38	0,0257	15,25
234	11 06 41,00	+45 19 09.28	90,41	-16,39	10,01	0,022	15,03
235	11 17 33,07	+45 40 20.76	99,45	-16,98	10,23	0,0242	15,16
236	11 05 39,42	+46 03 28.37	102,74	-16,73	10,31	0,025	15,21
237	16 20 01,13	+37 13 01.25	115,48	-16,92	10,63	0,0281	15,40
238	14 32 02,85	+51 52 52.37	105,21	-16,7	10,37	0,0256	15,25
239	12 04 47,20	+47 14 04.78	99,45	-16,87	10,23	0,0242	15,16
240	16 15 47,11	+28 03 42.91	102,33	-16,74	10,30	0,0249	15,20
241	16 16 38,89	+29 03 32.51	102,33	-16,55	10,30	0,0249	15,20
242	13 08 21,43	+11 30 55.04	102,74	-16,92	10,31	0,025	15,21
243	14 19 14,11	+39 57 29.91	104,79	-16,79	10,36	0,0255	15,24
244	11 05 51,18	+42 58 09.23	88,36	-16,88	9,95	0,0215	15,00
245	11 59 08,00	+44 45 11.75	99,86	-16,97	10,24	0,0243	15,17
246	11 02 41,51	+44 03 45.80	101,92	-16,93	10,29	0,0248	15,20
247	11 57 26,81	+45 58 10.66	98,22	-16,86	10,20	0,0239	15,14
248	12 47 38,62	+43 31 56.17	103,15	-16,82	10,32	0,0251	15,22
249	14 46 11,91	+38 04 52.80	104,38	-16,66	10,35	0,0254	15,24

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

250	14 25 37,90	+41 28 04.85	106,44	-16,8	10,40	0,0259	15,27
251	13 29 02,45	+10 54 55.80	97,40	-16,69	10,18	0,0237	15,13
252	11 55 23,96	+11 55 51.12	91,64	-16,35	10,04	0,0223	15,05
253	13 30 48,45	+12 16 28.08	105,21	-16,72	10,37	0,0256	15,25
254	13 12 35,16	+12 57 43.34	105,62	-16,82	10,38	0,0257	15,25
255	13 29 18,77	+12 39 36.88	102,33	-16,64	10,30	0,0249	15,20
256	13 27 39,85	+50 54 09.69	121,23	-16,98	10,77	0,0295	15,49
257	12 11 07,58	+42 04 15.47	93,70	-16,61	10,09	0,0228	15,08
258	12 19 19,41	+41 32 17.88	93,29	-16,7	10,08	0,0227	15,07
259	15 13 58,20	+33 08 23.28	93,70	-16,56	10,09	0,0228	15,08
260	14 20 11,81	+38 48 13.69	112,19	-16,84	10,55	0,0273	15,35
261	12 17 14,02	+43 18 53.36	95,75	-16,7	10,14	0,0233	15,11
262	14 15 05,58	+36 22 57.77	112,19	-16,87	10,55	0,0273	15,35
263	13 56 59,77	+09 55 49.00	99,04	-16,91	10,22	0,0241	15,16
264	12 33 13,64	+11 10 28.46	100,68	-16,88	10,26	0,0245	15,18
265	14 07 04,19	+06 36 16.34	103,15	-16,82	10,32	0,0251	15,22
266	15 04 01,94	+08 33 09.71	112,19	-16,99	10,55	0,0273	15,35
267	14 16 19,47	+07 15 29.52	118,36	-16,94	10,70	0,0288	15,44
268	14 02 44,47	+50 24 47.62	108,90	-16,93	10,46	0,0265	15,30
269	15 37 21,39	+41 53 53.91	97,40	-16,67	10,18	0,0237	15,13
270	14 31 01,38	+38 04 21.50	110,55	-16,79	10,50	0,0269	15,33
271	12 42 19,04	+14 06 29.12	109,32	-16,89	10,47	0,0266	15,31
272	12 59 23,53	+15 21 37.75	104,79	-16,81	10,36	0,0255	15,24
273	15 11 00,82	+11 20 24.27	113,01	-16,98	10,57	0,0275	15,36
274	14 18 12,14	+13 59 33.98	107,26	-16,92	10,42	0,0261	15,28
275	14 29 32,68	+33 30 40.44	109,73	-16,97	10,48	0,0267	15,31
276	07 52 12,03	+46 23 40.05	91,23	-16,37	10,03	0,0222	15,04
277	07 30 03,58	+43 22 45.15	108,49	-16,88	10,45	0,0264	15,30
278	08 00 41,22	+53 38 23.81	92,88	-16,94	10,07	0,0226	15,06
279	13 40 31,20	+14 51 52.24	114,66	-16,92	10,61	0,0279	15,39
280	10 02 41,40	+32 59 40.11	119,59	-16,96	10,73	0,0291	15,46
281	10 55 15,98	+37 25 42.80	103,56	-16,88	10,33	0,0252	15,22
282	09 01 58,06	+28 58 16.80	107,67	-16,8	10,43	0,0262	15,28
283	08 45 00,34	+27 16 47.04	105,62	-16,75	10,38	0,0257	15,25
284	10 23 46,09	+37 06 38.03	107,26	-16,9	10,42	0,0261	15,28
285	12 05 09,66	+37 16 13.21	92,88	-16,8	10,07	0,0226	15,06
286	11 10 02,63	+36 56 04.91	112,60	-16,98	10,56	0,0274	15,36
287	08 20 31,61	+21 43 28.81	105,21	-16,96	10,37	0,0256	15,25
288	10 30 47,71	+32 15 02.09	88,36	-16,84	9,95	0,0215	15,00
289	13 47 02,05	+32 32 59.47	103,56	-16,64	10,33	0,0252	15,22
290	15 54 23,83	+21 34 56.46	112,60	-16,89	10,56	0,0274	15,36
291	13 56 31,56	+32 50 45.51	112,19	-16,87	10,55	0,0273	15,35
292	13 12 19,05	+34 02 01.13	95,75	-16,54	10,14	0,0233	15,11

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

293	11 20 00,00	+34 38 00.31	102,74	-16,66	10,31	0,025	15,21
294	13 03 41,91	+33 09 33.99	98,63	-16,93	10,21	0,024	15,15
295	11 51 49,13	+31 30 14.55	117,53	-16,92	10,68	0,0286	15,43
296	13 35 16,23	+28 28 59.75	108,49	-16,82	10,45	0,0264	15,30
297	13 29 56,57	+29 46 19.40	106,85	-16,89	10,41	0,026	15,27
298	15 58 34,02	+16 44 33.08	107,26	-16,89	10,42	0,0261	15,28
299	12 22 15,32	+28 18 53.16	114,25	-16,94	10,60	0,0278	15,38
300	10 46 12,18	+21 31 37.37	101,92	-16,66	10,29	0,0248	15,20
301	13 54 01,04	+20 30 34.80	110,96	-16,93	10,51	0,027	15,33
302	13 45 45,27	+21 56 50.79	108,08	-16,89	10,44	0,0263	15,29
303	11 52 32,76	+25 02 35.48	115,07	-16,89	10,62	0,028	15,39
304	11 16 12,05	+18 26 25.55	102,33	-16,77	10,30	0,0249	15,20
305	11 19 10,26	+19 13 04.12	102,33	-16,87	10,30	0,0249	15,20
306	11 48 58,99	+21 05 10.76	115,07	-16,97	10,62	0,028	15,39
307	10 10 28,78	+16 28 13.07	115,48	-16,89	10,63	0,0281	15,40
308	10 59 21,22	+19 37 36.24	110,96	-16,95	10,51	0,027	15,33
309	11 06 19,26	+15 32 27.91	111,37	-16,84	10,52	0,0271	15,34
310	09 49 41,84	+15 24 19.59	107,67	-16,83	10,43	0,0262	15,28
311	09 48 52,82	+14 31 38.99	110,14	-16,97	10,49	0,0268	15,32
312	10 11 16,62	+16 00 20.02	109,73	-16,93	10,48	0,0267	15,31
313	00 01 03.6	- 14 34 48.6	15,3	-15,12	8,14	0,0037	16,72
314	00 13 38.7	- 15 40 30.5	17,9	-15,26	8,21	0,0044	17,02
315	00 31 27.6	- 10 40 33.2	35,1	-16,16	8,63	0,0085	17,43
316	00 32 31.3	- 10 41 21.9	31,4	-15,9	8,54	0,0076	17,45
317	00 36 31.7	- 00 33 47.8	40,2	-16,14	8,76	0,0098	17,72
318	00 47 51.9	- 11 10 29.6	39,3	-16,1	8,74	0,0096	17,7
319	00 57 56.6	- 00 52 08.9	21	-15,5	8,28	0,0051	16,96
320	00 58 55.5	- 13 43 15.1	48,2	-16,69	8,96	0,0117	17,74
321	01 14 20.3	- 00 55 00.0	10,7	-14,31	8,03	0,0026	16,69
322	01 17 30.5	- 09 17 48.4	17,6	-16,19	8,20	0,0043	15,91
323	01 19 14.3	- 09 35 46.3	17,3	-14,73	8,19	0,0042	17,35
324	01 26 04.7	- 00 18 54.9	17,3	-15,73	8,19	0,0042	16,33
325	01 27 25.1	- 08 41 21.5	38,8	-16	8,73	0,0094	17,77
326	01 32 22.3	- 08 38 02.4	38,6	-16,18	8,72	0,0094	17,59
327	01 41 39.7	- 09 13 03.8	16,5	-15,35	8,17	0,0040	16,59
328	01 50 54.5	- 10 22 10.6	16,4	-14,5	8,17	0,0040	17,46
329	01 53 01.4	- 09 38 21.7	15	-14,05	8,14	0,0037	17,67
330	02 00 02.0	- 12 32 18.0	34,5	-16,15	8,62	0,0084	17,53
331	02 02 46.9	- 08 27 27.1	21	-15,39	8,28	0,0051	17,07
332	02 05 15.8	- 09 33 46.7	17,9	-14,83	8,21	0,0044	17,28
333	02 17 56.5	- 08 51 14.2	13,5	-14,98	8,10	0,0033	16,53
334	02 21 18.9	- 00 47 55.1	12,8	-14,16	8,08	0,0031	17,23
335	02 52 16.8	- 00 17 41.3	14,7	-14,63	8,13	0,0036	17,21

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

336	02 53 46.4	- 07 23 43.6	13,1	-14,86	8,09	0,0032	16,6
337	03 07 15.7	- 00 43 52.1	28,7	-15,74	8,47	0,0070	17,6
338	03 37 19.4	- 06 21 13.2	30,5	-15,81	8,52	0,0074	17,5
339	03 38 45.7	- 05 38 42.1	31,5	-15,81	8,54	0,0077	17,61
340	08 48 18.7	- 01 15 50.4	19,3	-15,74	8,24	0,0047	16,58
341	09 14 03.2	- 60 14 17.3	18,7	-15,75	8,23	0,0046	16,51
342	09 15 32.0	- 59 49 48.7	16,3	-15,27	8,17	0,0040	16,67
343	09 18 58.6	- 58 14 07.8	14	-14,73	8,11	0,0034	16,86
344	09 27 53.7	- 60 24 20.3	15,8	-15,2	8,15	0,0038	16,66
345	09 54 35.7	- 04 23 07.9	19,7	-15,21	8,25	0,0048	17,2
346	09 54 55.0	- 56 36 28.4	19,3	-15,32	8,24	0,0047	16,93
347	10 04 25.1	- 02 33 31.4	13,5	-14,28	8,10	0,0033	17,22
348	10 07 04.5	- 05 00 24.6	19,2	-15,63	8,24	0,0047	16,63
349	10 17 02.3	- 03 38 45.6	12,8	-15,15	8,08	0,0031	16,22
350	10 20 24.3	- 63 26 23.7	20,8	-15,43	8,28	0,0051	16,96
351	10 27 01.8	- 56 16 14.4	11,2	-15,6	8,04	0,0027	15,42
352	10 31 26.8	- 64 15 25.8	20,9	-15,48	8,28	0,0051	16,94
353	10 32 01.3	- 04 20 45.9	13,8	-13,85	8,11	0,0034	17,75
354	10 39 51.5	- 56 43 59.2	14,4	-15,14	8,12	0,0035	16,45
355	10 50 34.8	- 66 02 42.4	14,2	-15,11	8,12	0,0035	16,46
356	11 05 53.7	- 60 22 29.2	16,9	-15,64	8,18	0,0041	16,29
357	11 08 22.0	- 05 53 25.7	25,7	-15,25	8,40	0,0063	17,68
358	11 14 05.2	- 02 11 54.8	15,6	-15,32	8,15	0,0038	16,53
359	11 22 35.7	- 58 58 40.9	16	-15,46	8,16	0,0039	16,37
360	11 25 05.4	- 04 07 15.6	17,6	-15,12	8,20	0,0043	17,04
361	11 26 08.3	- 04 03 44.5	16,9	-15,58	8,18	0,0041	16,45
362	11 30 14.4	- 59 56 26.9	13,1	-14,95	8,09	0,0032	16,45
363	11 35 18.4	- 04 57 17.4	15,9	-14,87	8,16	0,0039	16,99
364	11 53 28.6	- 03 13 47.2	15,9	-15,66	8,16	0,0039	16,17
365	11 53 49.0	- 60 52 09.8	15,8	-15,74	8,15	0,0038	16,13
366	11 55 03.6	- 03 30 12.2	15,5	-14,26	8,15	0,0038	17,53
367	11 57 12.4	- 02 41 11.3	15,3	-15,16	8,14	0,0037	16,61
368	11 59 00.8	- 04 40 10.7	17,5	-15,69	8,20	0,0043	16,37
369	11 59 43.3	- 53 36 39.1	14,4	-15,05	8,12	0,0035	16,57
370	12 02 43.3	- 62 29 52.4	13,3	-15,62	8,09	0,0032	15,82
371	12 08 20.0	- 02 30 19.9	20,7	-15,76	8,28	0,0050	16,66
372	12 18 47.1	- 01 22 53.6	17,5	-14,37	8,20	0,0043	17,69
373	12 19 49.9	- 64 05 24.7	17,5	-15,17	8,20	0,0043	16,89
374	12 20 54.7	- 03 24 11.7	22,5	-15,49	8,32	0,0055	17,1
375	12 23 30.0	- 02 00 29.1	19,2	-15,54	8,24	0,0047	16,72
376	12 24 35.4	- 64 42 34.9	18,1	-15,35	8,21	0,0044	16,77
377	12 32 46.4	- 01 34 08.9	16,7	-14,97	8,18	0,0041	16,98
378	12 32 58.8	- 04 34 45.0	13,9	-15,62	8,11	0,0034	15,92

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

379	12 36 43.7	- 03 01 14.4	25,3	-16,04	8,39	0,0062	16,85
380	12 37 47.0	- 02 31 59.4	24,3	-16,08	8,37	0,0059	16,71
381	12 41 28.9	- 03 15 13.4	18,8	-15,38	8,23	0,0046	16,85
382	12 52 53.2	- 00 49 21.7	15,8	-15,12	8,15	0,0038	16,72
383	12 54 05.1	- 00 06 04.2	10,9	-15,02	8,03	0,0027	15,99
384	13 02 40.8	- 01 04 26.8	10,4	-13,97	8,02	0,0025	16,92
385	13 29 55.8	- 01 32 38.4	12	-15,25	8,06	0,0029	15,99
386	13 44 17.3	- 61 14 09.0	21,4	-15,61	8,29	0,0052	16,87
387	14 19 11.5	- 02 15 15.6	25,8	-15,35	8,40	0,0063	17,6
388	14 22 30.7	- 01 13 44.4	18,5	-15,45	8,22	0,0045	16,78
389	14 27 04.8	- 01 43 46.8	18,8	-14,62	8,23	0,0046	17,67
390	14 38 22.6	- 04 36 47.8	17,8	-14,81	8,20	0,0043	17,35
391	14 41 33.7	- 03 29 48.0	17,7	-15,61	8,20	0,0043	16,5
392	14 46 20.2	- 04 43 58.4	16,4	-14,4	8,17	0,0040	17,56
393	14 56 20.3	- 02 45 41.8	19,4	-14,53	8,24	0,0047	17,96
394	15 09 33.6	- 01 01 17.5	19,1	-15,28	8,24	0,0046	17,09
395	15 13 06.3	- 56 58 08.8	11,4	-15,33	8,05	0,0028	15,77
396	15 32 39.2	- 01 36 06.2	26,4	-15,48	8,42	0,0064	17,8
397	15 38 29.6	- 02 23 46.2	31,1	-15,84	8,53	0,0076	17,82
398	16 09 38.8	- 45 16 42.8	19,8	-15,76	8,25	0,0048	16,55
399	20 41 56.9	- 05 17 56.5	34	-15,7	8,61	0,0083	17,89
400	21 15 37.4	- 00 24 31.3	32	-16,1	8,56	0,0078	17,37
401	21 20 06.0	- 11 55 06.5	11,7	-15,63	8,05	0,0028	15,72
402	21 22 02.3	- 09 53 10.6	28,9	-16,04	8,48	0,0070	17,19
403	21 48 39.9	- 06 50 11.4	28,7	-15,71	8,47	0,0070	17,45
404	22 21 00.1	- 09 38 30.2	27,7	-15,72	8,45	0,0067	17,4
405	22 30 36.8	- 00 06 37.0	15,3	-14,83	8,14	0,0037	17,06
406	22 39 25.1	- 08 45 57.7	38,7	-16,04	8,72	0,0094	17,85
407	22 59 24.7	- 10 29 16.2	31,6	-15,84	8,55	0,0077	17,56
408	23 01 20.5	- 00 55 33.3	28,7	-16	8,47	0,0070	17,2
409	23 05 11.2	- 14 03 47.4	14,3	-15,57	8,12	0,0035	16,52
410	23 05 56.3	- 10 02 57.0	21,3	-15,47	8,29	0,0052	17,07
411	23 06 15.1	- 14 39 27.4	14,2	-15,19	8,12	0,0035	16,88
412	23 28 12.3	- 01 03 46.2	24,5	-15,38	8,37	0,0060	17,43
413	23 31 02.1	- 00 07 55.0	24,1	-15,63	8,36	0,0059	17,16

Метаданные

Special summary catalog of dwarf galaxies in Universe up to distance 121 Mpc

S. Kutlimuratov[1], S. Nuritdinov[2], I. Tadzibaev[1,2]

[1] Chirchik State Pedagogic Institute, Tashkent region, Chirchik, Uzbekistan

[2]National University of Uzbekistan, University street, 4, 100174 Tashkent, Uzbekistan

The bank of observational data on dwarf galaxies has been assembled. Based on the observational data, a special composite

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

catalog of dwarf galaxies up to a distance of 121 Mpc was composed. This catalog contains physical characteristics (equatorial coordinates, distance to them, absolute stellar magnitude, mass (in solar masses), red shift, apparent magnitude in the X-ray range) of 413 dwarf galaxies. A statistical analysis of the composed catalog is carried out and the dependences of the main characteristics of dwarf galaxies are constructed. Empirical relationships have been obtained between the main physical characteristics of dwarf galaxies. In particular, linear relationships were found between the mass of dwarf galaxies and their absolute stellar magnitude, as well as between the mass and distance. It is shown that with an increase in the absolute magnitude and distance to dwarf galaxies, their masses increase linearly. However, no sufficient correlation was found between red shift and apparent magnitude. It is shown that the frequency of occurrence of dwarf galaxies is divided into two parts: 10-40 Mpc and 95-120 Mpc, which may be associated with the presence of massive galaxies.

Keywords: dwarf galaxies, star formation, compiled catalog of dwarf galaxies, absolute magnitude of galaxies, mass of dwarf galaxies, empirical relationships

Литература (References)

[1] S. Paudel, R. Smith, Suk Jin Yoo, P.Calderón-Castillo, Pierre-Alain Duc, The Astrophysical Journal Supplement Series **237**, 237-273 (2018).
[2] S. van den Berg. Publication of the David Dunlap Observatory **2**, 147-150 (1959).
[3] H.J. Deeg, C. Munoz-Tunon, G. Tenorio-Tagle, E. Telles, J.M. Vilchez, J.M. Rodriguez-Espinosa, P.A. Duc, and I.F. Mirabel, Astron. Astrophys. Suppl. Ser. **129**, 455-462 (1998).
[4] C. Henkel, B. Javanmardi, D. Martínez-Delgado, P. Kroupa, K. Teuwen, Astron. Astrophys, **603**, 18-31 (2017).
[5] R. C. Brüns and P. Kroupa, Astron. Astrophys, **547**, 65-82 (2012)
[6] K.W. Huchtmeier, M. Ehle, Publ. Astron. Soc. Aust., **16**, 24-30 (1999).
[7] A.l. Teplyakova. Evolyitsiya karlikovyky galaktik i ee svyaz s okrujeniem. Diss. kand. fiz.-mat. nauk, Nizniy Arxyz, 2012, 192 s
[8] S.A.Pustilnik. Poisk i issledovanie neobychnykh malomassivnykh galaktik. Diss. dokt. fiz.-mat. nauk, Nijniy Arxyz, 2013, 408 s.
[9] I.V. Chilingarian, I.Yu. Zolotukhin, I.Yu. Katkov, Anne-Laure Melchior, E.V. Rubtsov, K.A. Grishin (RCSED), The Astrophysical Journal, Supplement Series **228**, issue 2, 14-39 (2017).
[10] V.E. Karachentseva, I.D. Karachentsev, Astron. and Astrophys. Suppl. **127**, 409 (1998).
[11] V.E. Karachentseva, I.D. Karachentsev, G.M. Richter, Astron. and Astrophys. Suppl. **135**, 221 (1999).
[12] V.E. Karachentseva, I.D. Karachentsev, The Astrophysical Journal Supplement Series **146**, 359 (2000).
[13] W.K. Huchtmeier, I.D. Karachentsev, V.E. Karachentseva, Astron. Astrophys. **506**, 677-680 (2009).
[14] E.I. Kaisina, D.I. Makarov, I.D. Karachentsev, S.S. Kaisin, Astrophysical Bulletin **67**, 115 (2012).
[15] I.D. Karachentsev, D.I. Makarov, E.I. Kaisina, Astron. Journ., **145**, 101 (2013).
[16] .D. Karachentsev, E.I. Kaisina, D.I. Makarov, Astron. Journ. **147**, 13 (2014).
[17] I.D. Karachentsev, L.N. Makarova, D.I. Makarov et al., Monthly Notices Royal Astron. Soc. **447**, 85 (2015).
[18] I.D. Karachentsev, E.I. Kaisina, D.I. Makarov, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **479**, 4136 (2018).
[19] I.D. Karachentsev, E.I. Kaisina, Astrofizicheskiy Byulleten **74**, 2, 119-137 (2019).
[20] M.L. Mateo, Annual Review of Astronomy and Astrophysics J. **36**, № 1, 435-506 (1998).
[21] B. Moore, S. Ghigna, The Astrophysical Journal **524**, № 1, L19-L22 (1999).
[22] A. Klypin, A. Kravtsov. The Astrophysical Journal **522**, №1, 89-92 (1999).
[23] J.D. Simon, M. Geha, The Astrophysical Journal **670**, №1, 313-331 (2007).
[24] D.A. Hunter, B.G. Elmegreen, E. Gehret, The Astrophysical Journal **151**, 136-136 (2016).
[25] M.S. Peeples, R.W. Pogge, K.Z.I. Stanek, The Astrophysical Journal **685**, 904-914 (2008).
[26] K.A. Douglass, M.S. Vogeley, The Astrophysical Journal **837**, 42-42 (2017).

Махсус жамланган карлик галактикалар каталоги дунёни 121 Мпс масофасигача

С. Кутлимуратов[1], С. Нуритдинов[2], И. Таджибаев[1,2]

[1]Чирчик давлат педагогик институти, Тошкент вилояти, Ўзбекистон
[2]Ўзбекистон Миллий университети, Университет кўчаси, 4-уй, 100174 Тошкент, Ўзбекистон

Карлик галактикалар бўйича кузатув маълумотлари банки йиғилган. Кузатув маълумотлари асосида 121 Мпс масофагача бўлган карлик галактикаларнинг махсус жамланма каталоги тузилди. Ушбу каталогда 413 та карлик галактикаларнинг физик параметрлари (экваториал координаталари, уларгача бўлган масофа, абсолют юлдуз катталиги, массаси (қуёш массаси бирлигида), қизилга силжиши, рентген диапазонидаги кўринма юлдуз катталиги) берилган. Тузилган каталогнинг статистик таҳлили бажарилди. Карлик галактика-ларнинг асосий физик катталиклари орасида эмпирик боғланишлар топилди. Хусусан, карлик галактикалар массаси билан уларнинг абсолют юлдуз катталиги, шунингдек масса ва масофа орасида чизиқли боғланишлар аниқланди. Карлик галактикалар абсолют каттали-ги ва уларгача бўлган масофанинг ортиши билан уларнинг массалари чизиқли равишда ортиши кўрсатилди. Бироқ, қизилга силжиш ва абсолют катталик орасида етарли корреляция топилмади. Карлик галактикаларнинг кузатилиш частотаси бўйича икки қисмга бўлинганлиги: 10-40 Мпс ва 95-120 Мпс, бу эса массив галактикалар борлиги билан боғлиқ бўлиши мумкинлиги кўрсатилган.

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

КОЛЛЕКТИВНЫЕ СОСТОЯНИЯ ЧЕТНО-ЧЕТНЫХ ЯДЕР В ПРИБЛИЖЕНИИ ПРОИЗВОЛЬНОЙ НЕАКСИАЛЬНОСТИ

М.С. Надирбеков*[,1], С.Н. Кудиратов[1], М. Туламетов[2]

[1]Институт ядерной физики АН РУз, Улугбек, 100214 Ташкент, Узбекистан
[2]Ташкентский химико-технологический институт, ул. Навои, № 32, 100011 Ташкент, Узбекистан

Получена 15.07.2019

* Corresponding author: e-mail: nodirbekov@inp.uz

Изучены возбужденные коллективные состояния тяжелых четно-четных ядер квадрупольного типа в рамках приближения произвольной неаксиальности. Спектр энергий возбужденных уровней основной, β- и γ-полос ядер ^{152}Sm, ^{156}Dy, ^{164,166}Er и ^{230}Th описаны в рамках приближения произвольной неаксиальности неадиабатической коллективной модели. Энергетическому спектру γ-полосы с большими спинами уделено особое внимание. Для описания спектра коллективных состояний рассматриваемых ядер учтены члены первого и второго порядка в разложении оператора вращательной энергии по переменной γ.

Ключевые слова: основная, β- и γ-полосы; произвольная неаксиальность; оператор вращательной энергии; полный угловой момент; спектр коллективного возбуждения; высокоспиновые состояния.

The excited collective states of heavy even-even nuclei of the quadrupole type are studied in the framework of an arbitrary nonaxiality approximation of the nonadiabatic collective model. The energy spectrum of the excited levels of the ground, β- and γ-bands of ^{152}Sm, ^{156}Dy, ^{164,166}Er and ^{230}Th nuclei are described. The energy spectrum of the gamma-band with high spins has received the special attention. In the description of the energy levels of these nuclei, the first and second order terms in the expansion of the rotational energy operator with respect to the variable γ are taken into account.

Key words: ground, β- and γ-band; free triaxiality; operator of rotational energy; total angular momentum; spectrum of collective excitation; high-spin states.

I. Введение

Неадиабатическая коллективная модель, учитывающая связь вращательного движения с продольными и поперечными колебаниями поверхности ядра, позволяет объяснить ряд закономерностей, наблюдаемых в спектрах возбуждения деформируемых неаксиальных четно-четных ядер [1-10].

В работе [5] в рамках различных приближений неадиабатической коллек тивной модели рас смотрены характеристики возбужденных уровней тяжелых ядер основной, β- и γ-полос положительной четности, а также изменения спектра энергетических уровней от ядра к ядру в четно-четных ядрах [1, 2, 5, 11, 12].

В работе [13] в рамках модели произвольной неаксиальности дано количественное описание низколежащих коллективных состояний основной, γ-вращательной и β-вращательно-вибрационной полос положительной четности.

Выявлено вырождение низкоспиновых уровней β- и γ-полос [14] в спектрах тяжелых четно-четных ядер. Оценен вклад членов первого и второго порядка в разложении оператора вращательной энергии по переменной γ в энергетические уровни коллективных состояний тяжелых ядер. Однако в работах [11-14] ΔI=1 "staggering" эффект (I – спин четно-четного ядра), наблюдаемый в γ-полосе коллективного спектра четно-четных ядер не рассматривался [15]. Для описания этого эффекта значения углового момента коллективного спектра γ-полосы должны принимать большие значения ($I \geq 8$). Поэтому описание спектра коллективных состояний с большими спинами γ-полосы является актуальным.

II. Приближение произвольной неаксиальности

Энергетические уровни основной, γ-вращательной и вращательно-β-вибрационной полос четно-четных ядер описываются оператором Гамильтона, содержащим пять динамических переменных β, γ, θ_1, θ_2, θ_3. Этот оператор определяется выражением [2]:

$$\hat{H} = \frac{\hbar^2}{2B}\left[\frac{1}{4}\frac{\partial}{\beta^4\partial\beta}\left(\beta^4\frac{\partial}{\partial\beta}\right)+\frac{1}{\beta^2\sin 3\gamma}\frac{\partial}{\partial\gamma}\left(\sin 3\gamma\frac{\partial}{\partial\gamma}\right)\right]+\hat{H}_{rot}+V(\beta,\gamma), \quad (1)$$

где B – массовый параметр,

$$\hat{H}_{rot} = \frac{1}{4\beta^2}\sum_{\lambda=1}^{3}\frac{\hat{I}_\lambda^2}{\sin^2\left(\gamma-(2\pi/3)\right)} \quad (2)$$

– оператор вращательной энергии, I_λ – проекции полного углового момента I на ось симметрии ядра, $V(\beta, \gamma)$ – потенциальная энергия β-γ-деформаций. В настоящем приближении $V(\beta, \gamma)$ можно разделить на две части в следующей форме:

$$V(\beta,\gamma) = V(\beta) + V(\gamma)/\beta^2$$

При этом $V(\beta)$ и $V(\gamma)$ выбираются в виде потенциала Дэвидсона [5].

Общее решение уравнения Шредингера с гамильтонианом (1) очень сложное. Поэтому мы будем рассматривать его приближенное решение. В настоящей работе рассматриваем приближение произвольной неаксиальности, где оператор вращательной энергии (2) разлагается в ряд по степеням $(\gamma-\gamma_0)$:

$$\hat{H}_{rot} = \hat{H}_{rot}(\gamma_0) + \left.\frac{\partial\hat{H}_{rot}}{\partial\gamma}\right|_{\gamma=\gamma_0}(\gamma-\gamma_0) + \frac{1}{2}\left.\frac{\partial^2\hat{H}_{rot}}{\partial\gamma^2}\right|_{\gamma=\gamma_0}(\gamma-\gamma_0)^2+..., \quad (3)$$

где γ_0 – параметр поперечных деформаций поверхности ядра в основном состоянии. Такой подход позволяет учитывать полный диапазон изменений γ переменной ($0 \leq \gamma \leq 60°$).

III. Энергия уровней возбужденных коллективных состояний

Энергетический спектр уравнения Шредингера с гамильтонианом (1) в нулевом приближении разложения (3) имеет следующий вид:

$$E_{n_\gamma n_\beta I\tau} = \hbar\omega\left[2n_\beta + \sqrt{4n_\gamma\frac{\mu_{\gamma_0}^{-4}}{\gamma_0^2}+\varepsilon_{I\tau}+\mu_{\beta_0}^{-4}+\frac{1}{4}}\right], \quad (4)$$

где $\hbar\omega$ – энергетический множитель; n_β и n_γ – квантовые числа β- и γ-колебаний, $\varepsilon_{I\tau}$ – собственные значения уравнения жесткого асимметричного ротатора [2]; индекс τ нумерует собственные значения, относящиеся к одинаковым значениям I; $\mu_\beta^4 = \hbar^2/BC_\beta\beta_0^4$ и $\mu_\gamma^4 = \hbar^2/BC_\gamma\gamma_0^4$ – безразмерные параметры теории; β_0 и γ_0 – параметры продольных и поперечных деформаций в основном состоянии ядра; C_β и C_γ – жесткость поверхности ядра относительно β- и γ-колебаний. В этом приближении используются следующие параметры: $\hbar\omega$, γ_0, μ_β, μ_γ.

В приближении произвольной неаксиальности энергия уровней возбужденных состояний

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

основной, γ-вращательной и γ- и β-вращательно-вибрационных полос четно-четных ядер описывается квантовыми числами n_γ, n_β, I, τ.

IV. Численные расчеты и сравнение с экспериментом

В последние годы основным источником получения информации о высокоспиновых состояниях являются реакции с тяжелыми ионами. В этих экспериментах [16] также наблюдались отклонения в энергиях уровней вращательных полос деформированных ядер. Колебания около равновесной формы ядра соответствуют возбужденным состояниям более высокой энергии. Это β-колебания около значения равновесной деформации при сохранении аксиально-симметричной формы ядра. Они не изменяют момента количества движения ядра относительно оси симметрии с K=0, поэтому вращательные полосы таких состояний (n_β=1, n_γ=0, τ=1) должны быть похожи на полосы основных состояний (n_β=n_γ=0, τ=1) [17]. γ-колебания формы ядра относительно аксиально-симметричной формы создают в направлении оси симметрии момент количества движения, равный 2. Поэтому вращательные полосы, построенные в γ-колебательном состоянии, это полосы с K=2 [17], которые соответствуют состояниям γ-полосы с квантовыми числами n_β=n_γ=0, τ=1 для нечетных I, τ=2 для четных I.

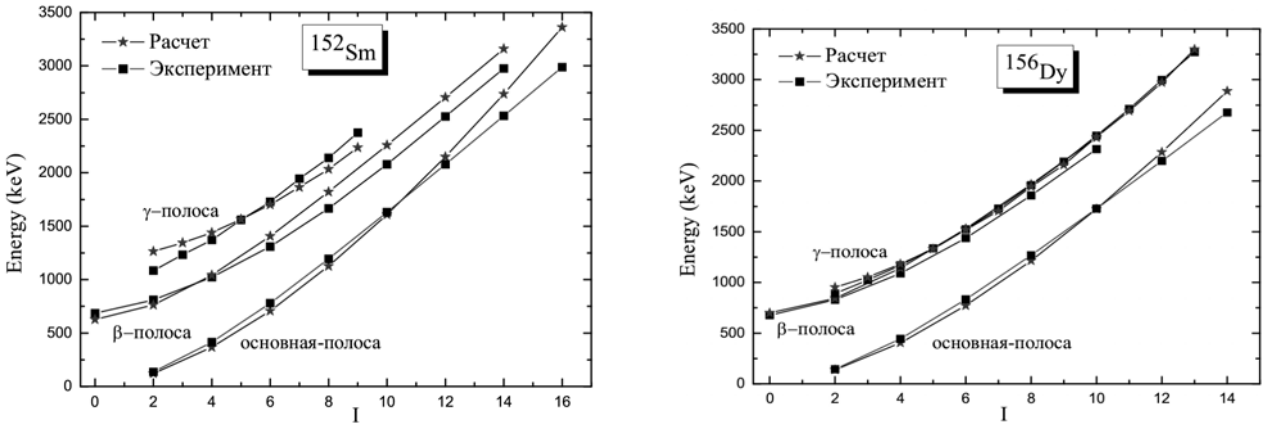


Рисунок 1. Теоретические и экспериментальные значения энергии уровней возбужденных состояний ядер ^{152}Sm ($\hbar\omega$=313.6 keV, γ_0=11.14°, μ_β=0.4593, μ_γ=0.6194, RMS = 132.7 keV) и^{156}Dy ($\hbar\omega$=349.37 keV, γ_0=13.9°^{0}, μ_β=0.4383, μ_γ=0.8928, RMS=64.94 keV).

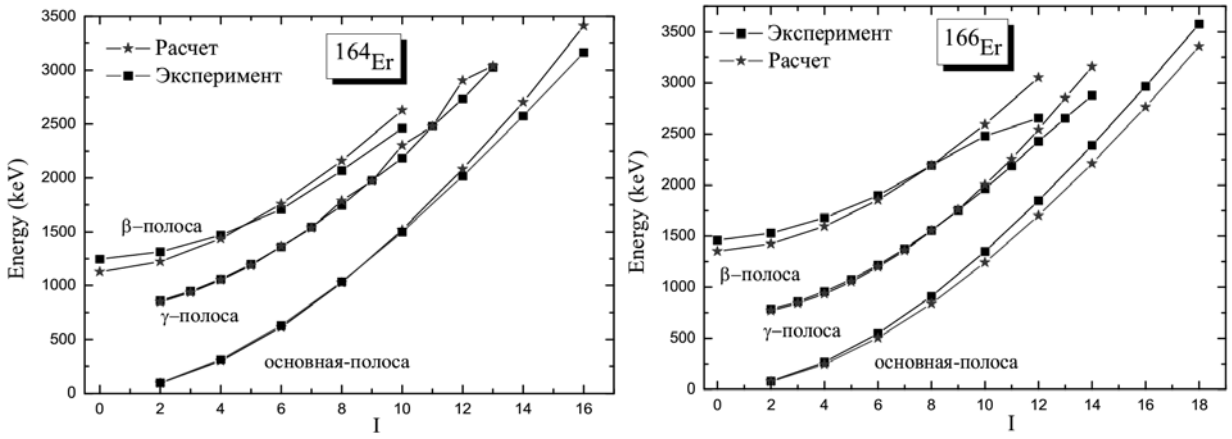


Рисунок 2. Теоретические и экспериментальные значения энергии уровней возбужденных состояний ядер ^{164}Er ($\hbar\omega$=349.37 keV, γ_0=13.9°, μ_β=0.4383, μ_γ=0.8928, RMS=64.94 keV) и ^{166}Er ($\hbar\omega$=349.37 keV, γ_0=13.9°, μ_β=0.4383, μ_γ=0.8928, RMS=64.94 keV).

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

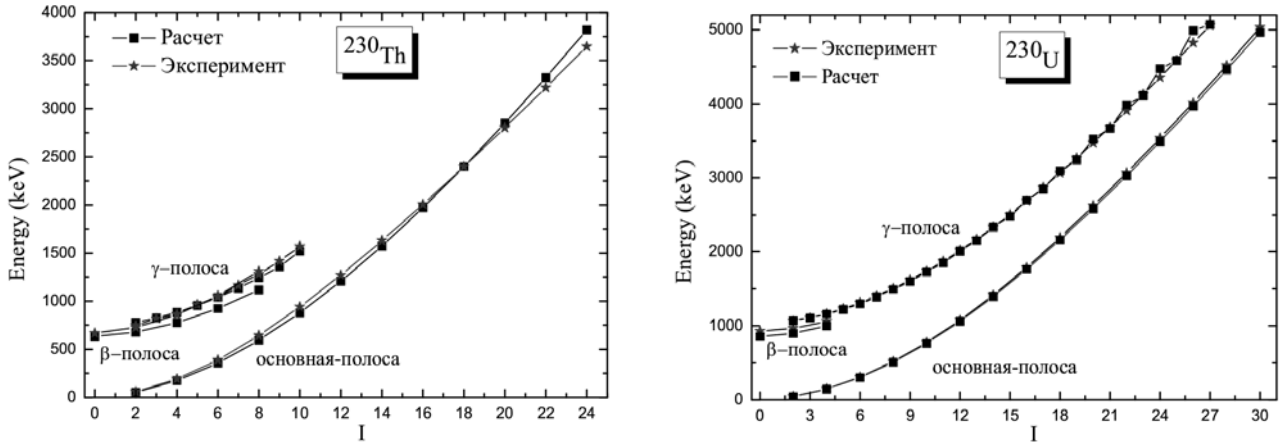


Рисунок 3. Теоретические и экспериментальные значения энергии уровней возбужденных состояний ядер ^{230}Th ($\hbar\omega$=349.37 keV, γ_0=13.9°, μ_β=0.4383, μ_γ=0.8928, RMS=64.94 keV) и ^{230}U ($\hbar\omega$=349.37 keV, γ_0=13.9°, μ_β=0.4383, μ_γ=0.8928, RMS=64.94 keV).

В настоящей работе рассчитаны энергии уровней четно-четных ядер с учетом членов первого и второго порядков в разложении оператора вращательной энергии по переменной γ (3) [13]. Формулы первого и второго порядков ук азанного разложения подробно описаны в работах [13, 15], поэтому мы их здесь не приводим.

На рисунках 1-3 сравниваются теоретические и экспериментальные [16] значения спектров энергии возбужденных уровней основной, β- и γ-полос ядер ^{152}Sm, ^{156}Dy, ^{164,166}Er, ^{230}Th и ^{230}U.

Из этих рисунков видно, что модель произвольной неаксиальности хорошо воспроизводит экспериментальные энергии уровней рассматриваемых ядер. В подписях к рисункам приведены значения теоретических параметров $\hbar\omega$, γ_0, μ_β, μ_γ и RMS. Значения параметров получены методом наименьших квадратов. Именно этим методом были получены значения RMS (Root mean square). Отметим, что RMS является хорошим критерием применимости предлагаемых моделей для описания спектра коллективных состояний тяжелых ядер.

V. Обсуждение и заключение

В настоящей работе описаны спектры энергий возбужденных уровней основной, β- и γ-полос ядер ^{152}Sm, ^{156}Dy, ^{164,166}Er, ^{230}Th и ^{230}U в рамках неадиабатической коллективной модели произвольной неаксиальности. Известно, что спектр коллективных состояний тяжелых ядер имеет сложный вид. Одной из сложных проблем, связанных со спектрами энергетических уровней является описание высокоспиновых состояний. Эти состояния возникают либо за счет коллективного вращения, либо за счет выстраивания угловых моментов отдельных нуклонов вдоль оси симметрии ядра [18]. Наличие высокоспиновых состояний, обусловленных вращением, можно объяснить связью мультипольных деформаций поверхности ядра с его вращением [19, 20]. Такая связь и осуществляется в представленной модели.

В экспериментах часто наблюдаются состояния с большими спинами в основной полосе коллективного возбуждения тяжелых ядер. Такие состояния можно встретить и в спектре γ-полосы некоторых тяжелых четно-четных ядер. В последнее время в спектрах переменной четности интенсивно изучаются эффекты высокого порядка. К таким эффектам можно отнести ΔI=1 ”staggering” эффект. Этот эффект наблюдается в спектре γ-полосы. Поэтому, чтобы воспроизвести ΔI=1 ”staggering” эффекты в этом спектре, угловые моменты в нем должны быть в пределах I=10–12. Именно такой спектр γ-полосы рассмотрен в данной работе.

Метаданные

Collective states of even-even nuclei in the approximation of free triaxiality

M.S. Nadirbekov[1], S.N. Kudiratov[1], M. Tulametov[2]

[1]Institute of Nuclear Physics, Uzbekistan Academy of Sciences, Ulugbek, 100214, Tashkent, Uzbekistan

[2]Tashkent Institute of Chemical Technology, Shaykhontour district, Navoi, No.32, 100011 Tashkent, Uzbekistan

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

The excited collective states of heavy even-even nuclei of the quadrupole type are studied in the framework of an arbitrary nonaxiality approximation of the nonadiabatic collective model. The energy spectrum of the excited levels of the ground, β- and γ-bands of ^{152}Sm, ^{156}Dy, ^{164,166}Er and ^{230}Th nuclei are described. The energy spectrum of the gamma-band with high spins has received the special attention. In the description of the energy levels of these nuclei, the first and second order terms in the expansion of the rotational energy operator with respect to the variable γ are taken into account.

Keywords: ground, β- and γ-band; free triaxiality; operator of rotational energy; total angular momentum; spectrum of collective excitation; high-spin states

References

[1] A.S. Davydov and A.A. Chaban, Nucl. Phys. **20**, 499-508 (1960).
[2] A.S. Davydov. Vozbuzhdennye sostoyaniya atomnykh yader (Atomizdat, Moskva, 1967).
[3] A.S. Davydov, Uspekhi fizicheskikh nauk **87**, 599-614 (1965)..
[4] A. Bohr and B.R. Mottelson. Nuclear Stucture, Vol. II. (Benjamin, New York, 1975).
[5] M.S. Nadirbekov and G.A. Yuldasheva, Int. J. Mod. Phys. E **23**, 1450034-1450050 (2014).
[6] Fernandez-Niello J., H. Puchta, F. Riess, W. Trautmann, Nucl. Phys. A **391**, 221-236 (1982).
[7] D. Bucurescu, Ch. Cata-Danil, M. Ivascu, and C.A. Ur, Phys. Rev. C **48**, R21-R24 (1993).
[8] F. Iachello, Phys. Rev. Lett. **85**, 3580-3583 (2000).
[9] F. Iachello, Phys. Rev. Lett. **87**, 052502-052055 (2001).
[10] A.A. Raduta, P. Buganu, and A. Faessler, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **39**, 025103-025124 (2012).
[11] M.S. Nadirbekov, O.A. Bozarov, Yadernaya Fizika **79**, 1-8 (2016).
[12] M.S. Nadirbekov, O.A. Bozarov, Yadernaya Fizika **80**, 48-62 (2017).
[13] N. Minkov, S.B. Drenska, P.P. Raychev, R.P. Roussev, and Dennis Bonatsos, Phys. Rev. C **61**, 064301-064310 (2000).
[14] A.I. Levin. Preprint IYaI AN USSR, Kiev, 1978.
[15] Yu.V. Porodzinski, E.Sh. Sukhovitski, Yadernaya Fizika **53**, 64-70 (1991).
[16] http://www.nndc.bnl.gov/ensdf/
[17] M.S. Nadirbekov, N. Minkov, W. Scheid, and M. Strecker, Int. J. Mod. Phys. E **25**, 1650022-1650035 (2016).
[18] P.N. Usmanov, A.A. Okhunov, U.S. Salikhbayev, A.I. Vdovin, Pis'ma v EChAYa **3**, 306-316 (2010).
[19] I. Yigitoglu and D. Bonatsos, Phys. Rev. C **83**, 014303-014311 (2011).
[20] L. Fortunato, EPJ A **26**, 1-30 (2005).

Жуфт-жуфт ядроларнинг уйғойган коллектив ҳолатлари иҳтиёрий ноаксиаллик яқинлашувида

М.С. Надирбеков[1], С.Н. Қудиратов[1], М. Туламетов[2]

[1]Ўзбекистон Республикаси ФА Ядро физикаси институти, Улугбек, 100214 Тошкент, Ўзбекистон
[2]Тошкент кимё-технология институти, Шайхонтоур тумани, Навоий № 32 100011 Тошкент, Ўзбекистон

Иҳтиерий ноаксиаллик яқинлашувида оғир жуфт-жуфт ядроларнинг квадрупол типдаги коллектив уйғонган ҳолатлари ўрганилди. ^{152}Sm, ^{156}Dy, ^{164,166}Er ва ^{230}Th ядроларнинг асосий, β- ва γ-полосаларининг уйғонган ҳолатлари энергетик сатҳлари ноадиабатик коллектив моделнинг иҳтиерий ноаксиаллик яқинлашуви доирасида тавсифланди. γ-полосанинг юқори спинли уйғонган ҳолатларининг энергетик спектрида алоҳида этибор қаратилди. Қаралаётган ядроларнинг энергетик сатҳларини тавсифлашда айланиш энергия операторининг γ ўзгарувчи бўйича биринчи ва иккинчи тартибдаги ёйилмасининг ҳадлари ҳисобга олинди.

Калит сўзлар: β- ва γ-полосала; иҳтиерий ноаксиаллик; айланма энергия оператори; тола айланма момент; коллектив уйғониш спектри; юқори спинли ҳолатлар.

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

THE GENERALIZED SPHERICALLY-SYMMETRIC METRIC

M.M. Khashaev*

Gubkin Russian State University of Oil and Gas, branch in Tashkent, Durmon yuli 34, Tashkent 100125, Uzbekistan

Received 21.10.2020

* Corresponding author: e-mail: khashaev@mail.ru

Рассмотрена четырехпараметрическая группа преобразований, содержащая повороты и временной сдвиг, соответствующие сферической симметрии и стационарности метрики пространства-времени. Обнаружено, что существует четверка векторных полей Киллинга, образующих алгебру Ли группы преобразований, и при этом пространственно-подобные векторы не ортогональны время-подобным. Построена метрика, соответствующая алгебре Ли векторов Киллинга. Показано, что метрика нестатична.

Ключевые слова: общая теория относительности, векторы Киллинга, дифференциальная геометрия.

Four parameter group of transformations containing rotations and time translations is considered due to spherical symmetry and stationarity of the space-time metric. It is found that there exists such a quartet of Killing vector fields which constitute the Lie algebra of the transformation group and in which space-like vectors are not orthogonal to the time-like one. The metric corresponding to the Lie algebra of Killing vectors is composed. It is shown that the metric is non-static.

Keywords: general relativity, Killing vectors, differential geometry.

I. Introduction

Stationary spherically-symmetric space-time possessing four Killing vectors [1,2], one of which is time-like and commuting with three others, which are space-like and constitute the Lie algebra so(3) of the group of rotations [3]. Space-times of this kind seemed to be exhausted after the pioneering works of K. Schwartzschild and G. Birkhoff, thus, by 1916 [4-6]. However, there was one missed opportunity because the time-like Killing vector was always assumed to be orthogonal to the space-like ones. This opportunity was explored by A. Taub and C. Misner [7,8] and below we study it thoroughly. Existence of one time-like Killing vector signifies that the space-time can be foliated with identical space-like 3-surfaces. The family of surfaces can be labeled with numerical parameter t which, thus, is a scalar function on the space-time and can be used as time coordinate. Each surface $t=const$ represents space at given shown that infinitesimally-thin rotating Killing vectors which constitute the Lie algebra SO(3):

$$[\vec{L}_1,\vec{L}_2]=-\vec{L}_3,\ [\vec{L}_2,\vec{L}_3]=-\vec{L}_1,\ [\vec{L}_3,\vec{L}_1]=-\vec{L}_2, \quad (1)$$

thus, can be foliated with 2-dimensional orbits of the group SO(3) which are spheres in form. The spheres also constitute a linearly-ordered family and can be labeled with parameter r which afterwards serves as the radial coordinate. It is natural to introduce the commonplace coordinates for the spheres which are polar angle θ and azimuthal angle φ, so finally the

space-time is endowed with spherical coordinates $\{t, r, \theta, \varphi\}$ in which the Killing vectors take the form [2]:

$$\vec{L}_1 = -\sin\varphi\frac{\partial}{\partial\theta} - \cot\theta\cos\varphi\frac{\partial}{\partial\varphi},$$
$$\vec{L}_2 = \cos\varphi\frac{\partial}{\partial\theta} - \cot\theta\sin\varphi\frac{\partial}{\partial\varphi}, \quad (2)$$
$$\vec{L}_3 = \frac{\partial}{\partial\varphi}, \quad \vec{L}_4 = \frac{\partial}{\partial t}. \quad (3)$$

The goal of the present work is to show that there exists such a quartet of Killing vector fields which constitute the Lie algebra of the transformation group and in which space-like vectors are not orthogonal to the time-like one.

II. Generalized killing vectors

Now, let us try to generalize these vectors such a way that commutative relations (1) remain in force while all of them include time-like part:

$$\vec{L}_1 = \sin\varphi\frac{\partial}{\partial\theta} + \cot\theta\cos\varphi\frac{\partial}{\partial\varphi} + a(\theta,\varphi)\frac{\partial}{\partial t},$$
$$\vec{L}_2 = \cos\varphi\frac{\partial}{\partial\theta} - \cot\theta\sin\varphi\frac{\partial}{\partial\varphi} + b(\theta,\varphi)\frac{\partial}{\partial t}, \quad (4)$$
$$\vec{L}_3 = \frac{\partial}{\partial\varphi}, \quad \vec{L}_4 = \frac{\partial}{\partial t}. \quad (5)$$

Then spherical symmetry restores in sense that though time shifts are not orthogonal to rotations, but do not distinguish them. Functions a and b are to be found from differential equations which follow from the presumption that Lie algebras (1-3) have same structure:

$$[\vec{L}_4, \vec{L}_a] = 0, \quad [\vec{L}_a, \vec{L}_b] = \varepsilon^c{}_{ab}\vec{L}_c. \quad (6)$$

Substituting the expressions (4, 5) into the commutation relations (1) yields the following differential equations:

$$-\partial_\varphi b = a, \quad \partial_\varphi a = b, \quad (7)$$

from which we conclude that the functions can be represented in the form

$$a = -A(r,\theta)\cos\varphi, \quad b = A(r,\theta)\sin\varphi. \quad (8)$$

All the rest equations reduce to single equation

$$\partial_\theta A - A\cot\theta = 0 \quad (9)$$

whose solution is $A = -l(r)/\sin\theta$. Finally, we have the following extension of the Lie algebra (2, 3):

$$\vec{L}_1 = \sin\varphi\frac{\partial}{\partial\theta} + \cot\theta\cos\varphi\frac{\partial}{\partial\varphi} + \frac{l(r)\cos\varphi}{\sin\theta}\frac{\partial}{\partial t},$$
$$\vec{L}_2 = \cos\varphi\frac{\partial}{\partial\theta} - \cot\theta\sin\varphi\frac{\partial}{\partial\varphi} - \frac{l(r)\sin\varphi}{\sin\theta}\frac{\partial}{\partial t}, \quad (10)$$
$$\vec{L}_3 = \frac{\partial}{\partial\varphi}, \quad \vec{L}_4 = \frac{\partial}{\partial t}. \quad (11)$$

Explicit form of the function $l(r)$ is to be obtained from the scalar products:

$$\langle\vec{L}_4, \vec{L}_1\rangle = \langle\vec{L}_4, \vec{L}_2\rangle = \langle\vec{L}_4, \vec{L}_3\rangle. \quad (12)$$

III. Generalized spherically-symmetric metric

In fact, we do not know what are "spherical coordinates" in a space-time whose symmetry transformations are generated by the vectors (10, 11). To clear the matter up we try to restore in outlines the form of "spherically-symmetric" metric in which the vectors satisfy the Killing equation [5,10]

$$g_{ij,k}L^k + g_{kj}L^k{}_{,i} + g_{ki}L^k{}_{,j} = 0. \quad (13)$$

Here the indices stand for rotations of coordinates $\{t, r, \theta, \varphi\}$, comma denotes partial derivative on the corresponding coordinate and L^k is the k-component of any of the vectors (10, 11). The subscript r appears only in one term $g_{ki}L^k{}_{,r}$ therefore we have to put $L^k{}_{,r} = 0$, hence, $l(r)$=*const*.

We expect that the metric to be found is similar to that of spherical coordinates with single non-diagonal component $g_{t\varphi}$, thus,

$$g_{tr} = g_{t\theta} = g_{r\theta} = g_{r\varphi} = g_{\theta\varphi} = 0, \quad (14)$$

and its coefficients but $g_{t\varphi}$ and $g_{\varphi\varphi}$ do not depend on the coordinates θ and φ:

$$g_{tt,\theta} = g_{rr,\theta} = g_{\theta\theta,\theta} = g_{tt,\varphi} = g_{rr,\varphi} = g_{\theta\theta,\varphi} = 0. \quad (15)$$

Finally, we conclude that g_{tt}, g_{rr} and $g_{\theta\theta}$ are functions of single variable r:

$$g_{tt} = f(r), g_{rr} = -g(r), g_{\theta\theta} = -h(r). \quad (16)$$

In cases of $\vec{L} = \vec{L}_4$ and $\vec{L} = \vec{L}_3$ the equation (13) reduces to:

$$g_{ij,t} = 0, g_{ij,\varphi} = 0, \quad (17)$$

therefore all metric coefficients depend only on the coordinates r and θ, so it remains to obtain them as functions of these two variables. The next task is to

© Academy of Sciences of Republic of Uzbekistan, Tashkent, 2020

solve the inverse problem on the Killing equation that is to find out the metric under which the vectors (10, 11) satisfy the Killing equation (13). For this end we substitute pairs of indices ($t\theta$), ($t\varphi$), ($\theta\varphi$), ($\varphi\varphi$) and derive the corresponding form of metric. These combinations yield two pairs of equations, one for $g_{t\varphi}$:

$$g_{tt}L^{t}{}_{,\theta} + g_{t\varphi}L^{\varphi}{}_{,\theta} = 0\,, \tag{18}$$

$$g_{t\varphi,\theta}L^{\theta} + g_{tt}L^{t}{}_{,\varphi} + g_{t\varphi}L^{\varphi}{}_{,\varphi} = 0 \tag{19}$$

and one for both $g_{t\varphi}$ and $g_{\varphi\varphi}$:

$$g_{t\varphi}L^{t}{}_{,\theta} + g_{\varphi\varphi}L^{\varphi}{}_{,\theta} + g_{\theta\theta}L^{\theta}{}_{,\varphi} = 0\,, \tag{20}$$

$$g_{\varphi\varphi,\theta}L^{\theta} + 2g_{t\varphi}L^{t}{}_{,\varphi} + 2g_{\varphi\varphi}L^{\varphi}{}_{,\varphi} = 0. \tag{21}$$

To solve the first pair substitute the vectors (10, 11) that reduces the first equation to the following:

$$\frac{\cos\varphi}{\sin^2\theta}\left(g_{tt}l\cos\theta + g_{t\varphi}\right) = 0. \tag{22}$$

Now we extract the component $g_{t\varphi}$ from this equation and substitute it into (19) to verify that this component satisfies it. The equation reduces to following:

$$\begin{aligned} &f(r)l\sin\theta - \frac{f(r)l}{\sin\theta} + f(r)l\cos\theta\cot\theta = \\ &= f(r)l\left(\sin\theta - \frac{1}{\sin\theta} + \cos\theta\cot\theta\right) = 0 \end{aligned}\,, \tag{23}$$

thus, the metric coefficient $g_{t\varphi}$ just obtained is the solution of equations (19). Now we substitute it into the (20) and obtain

$$\frac{l^2 f(r)\cos^2\theta}{\sin^2\theta} - \frac{g_{\varphi\varphi}}{\sin^2\theta} + g_{\theta\theta} = 0. \tag{24}$$

Taking into account the equations (16) we obtain the last unknown component of the metric tensor $g_{\varphi\varphi}$:

$$g_{\varphi\varphi} = l^2 f(r)\cos^2\theta - h(r)\sin^2\theta\,. \tag{25}$$

It remains to substitute this expression into the last equation (21) to make sure that this metric coefficient satisfies both the equations of the second pair. Substituting yields:

$$\begin{aligned} &\partial_\theta[l^2 f(r)\cos^2\theta - h(r)\sin^2\theta]\sin\varphi + \frac{2l^2 f(r)\cos\theta\sin\varphi}{\sin\theta} - 2[l^2 f(r)\cos^2\theta - h(r)\sin^2\theta]\cot\theta\sin\varphi = \\ &= -2l^2 f(r)\cos\theta\sin\varphi(\sin\theta - \frac{1}{\sin\theta} + \cos\theta\cot\theta) = 0. \end{aligned} \tag{26}$$

Consequently, the metric coefficients $g_{t\varphi}$ and $g_{\varphi\varphi}$ constitute the solution of equations (18-21). Finally, we have generalized spherically-symmetric metric of the form:

$$\begin{aligned} &g_{tt} = f(r),\ \ g_{t\varphi} = -f(r)l\cos\theta,\ \ g_{rr} = -g(r), \\ &g_{\theta\theta} = -h(r),\ \ g_{\varphi\varphi} = l^2 f(r)\cos^2\theta - h(r)\sin^2\theta \end{aligned} \tag{27}$$

which possesses Killing vectors given by the equation (10, 11).

We suppose that signature of the space-time is (+ -- -- --), so $f(r)$, $g(r)$, and $h(r)$ are non-negative. The metric coefficient $g_{\varphi\varphi}$ is not positively defined, but it is definitely positive under $\theta = \pi/2$. Consider length of the circle in the space *t=const* specified *r=const*, θ =*const*. It is seen that this rate is maximal under $\theta = \pi/2$ and descends out from their curve on the "sphere" *r=const*. Under some value of θ the coefficient $g_{\varphi\varphi}$ vanishes. This zero of the length of the circle specifies the axis. Thus, unlike Schwartzschild space-time, this one has axis under $\theta \neq 0$ $\theta \neq \pi$, but under the zero of $g_{\varphi\varphi}$ found from the equation (26). The equation specifies the range of the coordinate θ. Since $\vec{L}_3 = \partial/\partial\varphi$, its square is negative. Finite rotation generated by space-like Killing vectors can interchange any two of them. Consequently $\vec{L}_1$, $\vec{L}_2$,$\vec{L}_3$ are space-like.

It remains to verify that all scalar products $\langle\vec{L}_a, \vec{L}_4\rangle$ are equal to each other (12). The scalar product $\langle\vec{L}_3, \vec{L}_4\rangle$ is $g_{t\varphi}$ by definition and the scalar product $\langle\vec{L}_2, \vec{L}_4\rangle$ is

$$\begin{aligned} &\langle\vec{L}_2, \vec{L}_4\rangle = \cot\theta\sin\varphi f(r)l\cos\theta - \frac{l\sin\varphi}{\sin\theta}f(r) = \\ &= f(r)l\frac{\cos^2\theta - 1}{\sin\theta}\sin\varphi = -f(r)l\sin\theta\sin\varphi \end{aligned} \tag{28}$$

that is the same with respect to the corresponding axis. Now consider scalar products of the space-like Killing vectors. The scalar product $\langle\vec{L}_2, \vec{L}_3\rangle$ is:

© Academy of Sciences of Republic of Uzbekistan, Tashkent, 2020

$$\langle \vec{L}_2, \vec{L}_3 \rangle = [h(r) + l^2 f(r)] \sin\theta \cos\theta \sin\varphi. \qquad (29)$$

When calculating the product $\langle \vec{L}_1, \vec{L}_2 \rangle$ we omit the common factor $\sin\varphi\cos\varphi$ and all the rest is $-[h(r) + l^2 f(r)]\sin^2\theta$ that yields finally

$$\langle \vec{L}_1, \vec{L}_2 \rangle = -[h(r) + l^2 f(r)] \sin^2\theta \sin\varphi\cos\varphi, \qquad (30)$$

hence, the is same with respect to the corresponding axis metric. Thus, the metric (26) is spherically-symmetric in sense of generalized spherical symmetry discussed above.

Acknowledgments. The main idea of this work was proposed by Dr. Z.Ya. Turakulov. The author would like to express his gratitude to him for critical discussions and facilitating the communication of the mathematical content of this work.

References

[1] S.W. Hawking, G.F.R. Ellis. The large scale structure of space-time (Cambridge University Press, Cambridge, 1973).
[2] K.A. Bronnikov, S.G. Rubin. Lektsii po gravitatsii i kosmologii (MIPhI, Moskva, 2008).
[3] Dzh. Hamfris. Vvedenie v teoriju algebr Li i ih predstavlenij (MTsNMO, Moskva, 2003).
[4] K. Schwarzschild, Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften, **1**, p.189-196 (1916).
[5] C.W. Misner, K.S. Thorn, and J.A. Wheeler. Gravitation (Freeman, San Francisco, 1973).
[6] D.E. Burlankov. Vremya, prostranstvo, tyagotenie. (Regulyarnaya I haoticheskaya dinamika, Moskva, 2006).
[7] A.H. Taub, Ann. Math. **53**, 472 (1951).
[8] E. Newman, L. Tamburino, T.Unti, Journal of Mathematical Physics **4**, 915-923 (1963).
[9] A.P. Lightman, W.H. Press, R.H. Price, and S.A. Teukolsky. Problem book in relativity and gravitation (Prinston University Press, Prinston, New Jersey, 1975).
[10] B.F. Shutz. Geometrical Methods of Mathematical Physics (Cambridge University Press, Cambridge, 1980).

Умумлашган сферик симметрик метрика

М.М. Хашаев

И.М. Губкин номидаги Россия давлат нефт ва газ университети

Вақт-фазо метрикаси сферик симметрияси ва стационарлигига мос келувчи, бурилиш ва вақт силжишларини ўз ичига олган, алмаштиришларнинг тўрт параметрли группаси кўриб чиқилди. Алмаштиришлар группасининг Ли алгебрасини ҳосил қилувчи, Киллинг вектор майдонлари тўртлиги мавжудлиги ва фазога ўхшаш векторларнинг вақтга ўхшаш векторларига ортогонал эмаслиги аниқланди. Киллинг векторлари Ли алгебрасига мос келувчи метрика тузилди. Метрика статик эмаслиги кўрсатилди.

Калит сўзлар: умумий нисбийлик назарияси, Киллинг векторлари, дифференциал геометрия.

© Academy of Sciences of Republic of Uzbekistan, Tashkent, 2020

ВЛИЯНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОБРАТНЫМ СМЕЩЕНИЕМ НА ПАРАМЕТРЫ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ CIGS

А.Г. Камилов*

Физико-технический институт АН РУз, ул. Чингиза Айтматова 2Б, 100084 Ташкент, Узбекистан

Получена 25.08.2020

* Corresponding author: asliddin@rambler.ru

Приведены результаты лабораторных экспериментов по изучению влияния воздействия обратного смещения длительностью 60, 600 и 2000 с. на параметры солнечных элементов (СЭ) на основе поглощающего слоя, состоящего из Cu, In, Ga и Se (CIGS) с различными толщинами буферного слоя CdS. Показано, что для обеспечения стабильной работы СЭ CIGS в естественных условиях эксплуатации толщина их буферного слоя должна быть рассчитана с учетом влияния обратного смещения. Результаты измерений вольтамперных характеристик СЭ CIGS показали, что СЭ с меньшей толщиной буферного слоя CdS более устойчив к воздействию обратного смещения. По результатам измерений вольт-фарадных характеристик выяснено, что при воздействии обратным смещением в темноте емкость структуры увеличивается, что соответствует классической модели влияния обратного смещения, и одинакова для элементов с различной толщиной буферного слоя. После воздействия обратным смещением при освещении емкость структуры и концентрация носителей заряда уменьшается, при этом в меньшей степени в элементах с тонким буферным слоем, что также свидетельствует об их устойчивости к обратному смещению.

Ключевые слова: солнечные элементы, буферный слой, CIGS, обратное смещение, концентрация носителей, КПД, ВАХ, ВФХ.

The results of laboratory experiments to study the effect of reverse bias with a duration of 60, 600 and 2000 s. on the parameters of solar cells (SC) based on an absorbing layer consisting of Cu, In, Ga and Se (CIGS) with different thicknesses of the CdS buffer layer are shown. Experiments have shown that for the stable operation of CIGS SCs under natural operating conditions, the thickness of their buffer layer should be calculated taking into account the effect of reverse bias. The results of measuring the current-voltage characteristics of CIGS SCs with different thicknesses of the CdS layer before and after the exposure to the reverse bias showed that SCs with a smaller buffer layer thickness are more resistant to the effect of reverse bias. Based on the results of measuring the capacitance-voltage characteristics, it was found that when exposed to reverse bias in the dark, the capacitance of the structure increases, which corresponds to the classical model of the effect of reverse bias, and is the same for elements with different thicknesses of the buffer layer. After exposure to reverse bias under illumination, the capacitance of the structure and the concentration of charge carriers decrease, and to a lesser extent in elements with a thin buffer layer, which also indicates their resistance to reverse bias.

Keywords: solar cells, buffer layer, CIGS, reverse bias, carrier concentration, efficiency, I-V, C-V.

I. Introduction

Солнечные элементы $Cu(In,Ga)Se_2$ (или CIGS) привлекли большое внимание благодаря их высокой эффективности и способности адаптироваться к низкотемпературным процессам производства с большой площадью [1-3]. Однако существует несколько задач [4], которые должны быть решены прежде, чем технология CIGS сможет стать жизнеспособным конкурентом традиционной фотоэлектрической технологии на основе c-Si в промышленном масштабе. В частности, они включают проблемы, определяющие производительность панели и долгосрочную надежность в полевых условиях [5]. Одной из таких ключевых проблем надежности является частичное затенение панелей. Исследования показали, что частичное затенение преимущественно вызывает обратное напряжение на затененных элементах [6], что может вызвать долговременное ухудшение рабочих характеристик панели. Когда тень падает на некоторые элементы в цепочке фотоэлектрических модулей, находящихся под напряжением, освещенные элементы продолжают вырабатывать ток. Элементы в тени пропускают этот ток за счет обратного смещения [7, 8]. При этом затенённый элемент действует как нагрузка, потребляет энергию и значительно снижает ток нагрузки [9]. Микроскопические дефекты в слое устройства модуля действуют как слабые шунты, которые подвергаются тепловому пробою при обратном смещении, что приводит к постоянным макроскопическим шунтам [10, 11]. Эти шунты приводят к общей потере сопротивления шунта, снижая эффективность модуля.

Учитывая его важность, это явление широко изучалось в элементах c-Si [12], но для тонкопленочных СЭ проблема остается менее понятной.

Локальные дефекты от обратного смещения в модулях CIGS часто оптически видимы и имеют вид «червячного следа» [13, 14]. Эти дефекты возникают в локальных слабых местах [15, 16] и относительно легко распространяются, если не принять меры. Дефекты могут возникать даже за счет тени людей или инструментов при осмотре или очистке панелей [17, 18] и могут в стандартных условиях испытаний (STC) вызывать уменьшение максимальной мощности на 10% и более 30% соответственно в случае тени от человека и инструментов для чистки [19].

При наблюдении с помощью тепловизора [7, 20] дефект имеет вид движущейся горячей точки, которая оставляет след, состоящий из отдельных островков пористого материала, которые возникают на границе раздела CdS/ZnO в результате неоднородностей в пленке CIGS [7]. Другие авторы наблюдали такую пористость на границе CIGS/CdS с прозрачным проводящим оксидом и у обратного контакта CIGS/Mo [7, 11]. Однако до сих пор нет реального понимания механизма образования и распространения этих дефектов [21].

Для модулей на основе кремниевых пластин для оптимальной защиты от повреждения обратного смещения используются байпасные диоды. В тонкопленочных панелях используется схема монолитного соединения, образующая длинные узкие элементы, где величина обратного смещения зависит от формы тени, геометрической структуры модуля и интенсивности тени [22]. Фотоэлектрические модули CIGS, как правило, гораздо более устойчивы к затенению в отношении потерь мощности, чем модули c-Si [23]. Однако недостатком монолитно соединенного фотоэлектрического модуля является то, что почти невозможно интегрировать байпасные диоды для защиты отдельных ячеек от воздействия обратного смещения [13], и возникает необходимость поиска других средств защиты от обратного смещения и уменьшения его последствий.

Кроме образования дефектов, мало изучены механизмы влияния обратного смещения на параметры СЭ CIGS. Известно, что обратное смещение приводит к уменьшению коэффициента заполнения и метастабильному увеличению емкости перехода и значительным изменениям профилей пространственного заряда [24, 25] и таким образом является одним из механизмов возникновения метастабильных состояний в гетеропереходах $ZnO/CdS/Cu(In,Ga)Se_2$ [24, 26].

Основой расчета оптимальной толщины буферного слоя является модель, представленная Kay Orgassa [27], основанная на балансе между снижением коэффициента отражения и увеличением поглощения света в синей части спектра с увеличением толщины буферного слоя. Такое объяснение влияния буферного слоя понятно, вследствие чего дальнейшие исследования проводились для сравнения СЭ CIGS с буферным слоем

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

CdS и альтернативными [28] буферными слоями ZnO, ZnS(O,OH), ZnSe, InS и ZnMgO [29], изучения влияния толщины буферного и поглощающего слоев на квантовую эффективность СЭ CIGS [30], изучения влияния толщины буферного слоя на квантовую эффективность и электрические параметры СЭ CIGS для CdS, ZTO, ZnS and InS [31] с помощью моделирования СЭ с использованием SCAPS-1D. Экспериментальные исследования проводили для сравнения СЭ CIGS с буферным слоем CdS и ZnS [32] и определения оптимальной толщины CdS [33, 34]. Во всех случаях влияние толщины буферного слоя на характеристики СЭ CIGS изучено в основном с точки зрения оптического влияния.

В данной статье мы представляем результаты экспериментов по изучению влияния обратного смещения на СЭ CIGS с различными толщинами буферного слоя CdS. Исследуется влияние обратного смешения на выходные параметры и на плотность и распределение носителей заряда с помощью измерения и анализа вольтамперных и вольтфарадных характеристик солнечных элементов. Целью является изучение механизмов влияния обратного смещения на СЭ CIGS и их зависимости от толщины буферного слоя.

II. Методы и материалы

Основная часть экспериментов проведена в лаборатории халькогенидных солнечных элементов Ольденбургского университета Германии. Структура экспериментальных солнечных элементов представлена на рис. 1а. Она состоит из пяти компонентов: стекла, слоя молибдена, слоя CIGS, слоя CdS и слоя оксида цинка, легированного алюминием. Солнечные элементы изготовлены по стандартной технологии испарением поглощающего слоя и химическим осаждением из ванны (CBD) с раз личной толщиной буферного слоя CdS порядка 60 и 30 нм, которые обозначены соответственно как нормальная (N-norm) и тонкая

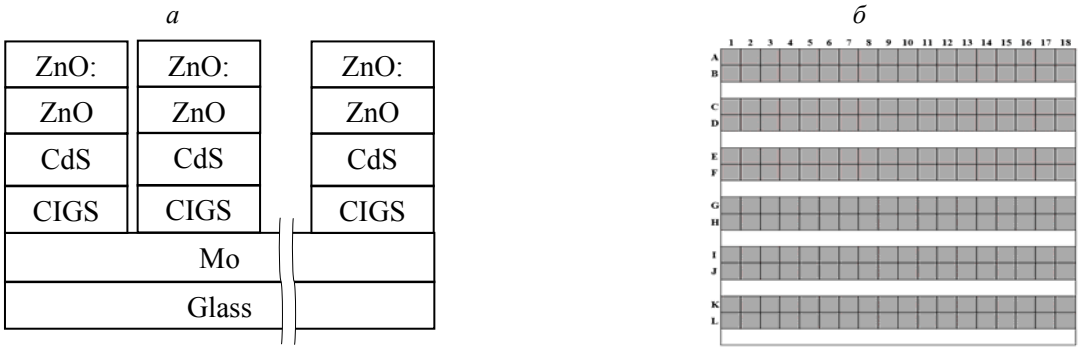


Рисунок 1. Структура (*а*) и схема разделенного солнечного элемента (*б*).

(T-thin). Для обеспечения достоверности и сопоставимости данных единый солнечный элемент размером 10×10 см был разделен на 216 ячеек размерами 5×5 мм и пронумерован (рис. 1б).

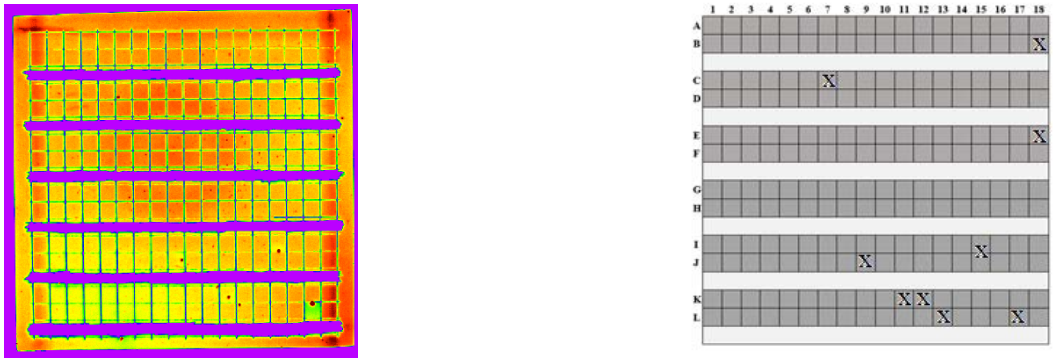


Рисунок 2. Тепловой снимок СЭ (слева) и схема определенных дефектов (справа).

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

Чтобы определить повреждения, возникшие при лазерной резке, было исследовано тепловое изображение СЭ (рис. 2а), исходя из которого дефектные ячейки были исключены из дальнейших испытаний (рис. 2б). В табл. 1 представлены перечень и характеристики основного оборудования, использованного при экспериментах

Таблица 1. Перечень и характеристики основного оборудования, использованного при экспериментах.

№	Наименование	Назначение	Диапазон	Точность
1	Solartron 1260	Анализатор частотного отклика для измерения амплитудно-фазовых характеристик	от 10 мкГц до 32 МГц.	0.1% 0.1°
2	SS100AAA	Солнечный симулятор с регулируемой температурой подставки	250 nm÷>2,200 nm	Класс AAA
3	Keithley 2400	Источник-измеритель: измерения тока/сопротивления/напряжения, источник тока/напряжения	±200 мВ до ±200 В ±1мкА до ±1А 0.2 Ом до 200 Мом	0.012%

Номенклатура экспериментов. Одна ячейка 0.5×0.5 мм использовалась только для одного эксперимента. Эксперименты проводили при воздействии обратного смещения длительностью 60, 600 и 2000 секунд при температуре ячейки 25ºC и при освещении 1.5 AM. Все эксперименты с соответствующими измерениями проводились в темноте и освещенных условиях.

Организация и иллюстрация результатов. Результатами экспериментов являются наборы данных содержания вольтамперных характеристик (ВАХ) и вольт-фарадных характеристик (ВФХ), характеризующие каждый отдельный солнечный элемент. Мы использовали общие методы обработки данных ВАХ и ВФХ с поправками (по востребованности), представленными в книге [35].

Учитывая множественность данных, были введены следующие сокращения:

L-light – измерение или воздействие проводится при освещении;

D-dark – измерение или воздействие в темноте;

T-thin – СЭ с тонким слоем CdS;

N-norm – СЭ с нормальным слоем CdS;

C –непрерывный режим напряжения: напряжение подается непрерывно;

I – прерывистый режим напряжения: напряжение подается периодически;

pre – предварительные данные, полученные до проведения какой-либо обработки (первоначальное измерение);

aft – данные, полученные после некоторой обработки (измерение после процедуры);

s – секунды, продолжительность воздействия.

III. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Как видно из табл. 2, после обработки обратным смещением в СЭ с нормальной толщиной CdS наблюдается значительное увеличение последовательного сопротивления (Rs, ом), тогда как в СЭ с тонким слоем CdS увеличение Rs более слабое. Вследствие этого фактор заполнения (FF) в СЭ с нормальной толщиной CdS при воздействии обратного смещения значительно уменьшается, а в СЭ с тонким слоем CdS практически остается неизменным (рис. 3).

Эта разница становится более заметной с увеличением времени воздействия. Аналогично, в СЭ с нормальной толщиной CdS мы отмечаем увеличение коэффициента идеальности (n) и тока насыщения (I_0, ампер), что приводит к уменьшению напряжения холостого хода (V_{oc}, вольт) (рис. 3). В то же время воздействие обратного смещения на сопротивление шунта (Rp, ом) и тока короткого замыкания (I_{sc}, ампер) мало и неоднозначно.

ВАХ, представленные на рис. 3, свидетельствуют, что с увеличением времени воздействия обратного смещения в СЭ с нормальной толщиной CdS снижается V_{oc} и ухудшается FF, что является следствием ухудшения Rs и n, и при воздействии обратного смешения при освещении 2000 с приводит к снижению КПД более чем на 25% СЭ с

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

нормальной толщиной CdS. В то же время в СЭ с тонким слоем CdS изменения мало заметны. Таким образом, как видно, уменьшение толщины буферного слоя CdS способствует выработке устойчивости к воздействию обратного смещения.

Таблица 2. Изменение параметров СЭ CIGS после обратного смещения с различным временем воздействия.

	Rp	*Rs*	*n*	I_0	I_{sc}	V_{oc}	FF	КПД
N60s_pre	210108	1.63	1.16	9.92E-13	-6.53E-03	0.67	0.79	0.14
N60s_aft	209282	2.63	1.18	1.33E-12	-6.55E-03	0.67	0.78	0.14
N600s_aft	169070	4.30	1.25	3.92E-12	-6.44E-03	0.64	0.78	0.13
N2000s_aft	153901	9.70	1.35	1.48E-11	-6.50E-03	0.55	0.72	0.10
T60s_pre	175903	1.48	1.41	1.23E-10	-6.54E-03	0.64	0.76	0.13
T60s_aft	176344	2.39	1.43	1.37E-10	-6.63E-03	0.64	0.76	0.13
T600s_aft	347580	2.68	1.44	1.26E-10	-6.61E-03	0.64	0.75	0.13
T2000s_aft	73754	4.74	1.65	6.70E-10	-6.62E-03	0.63	0.76	0.13

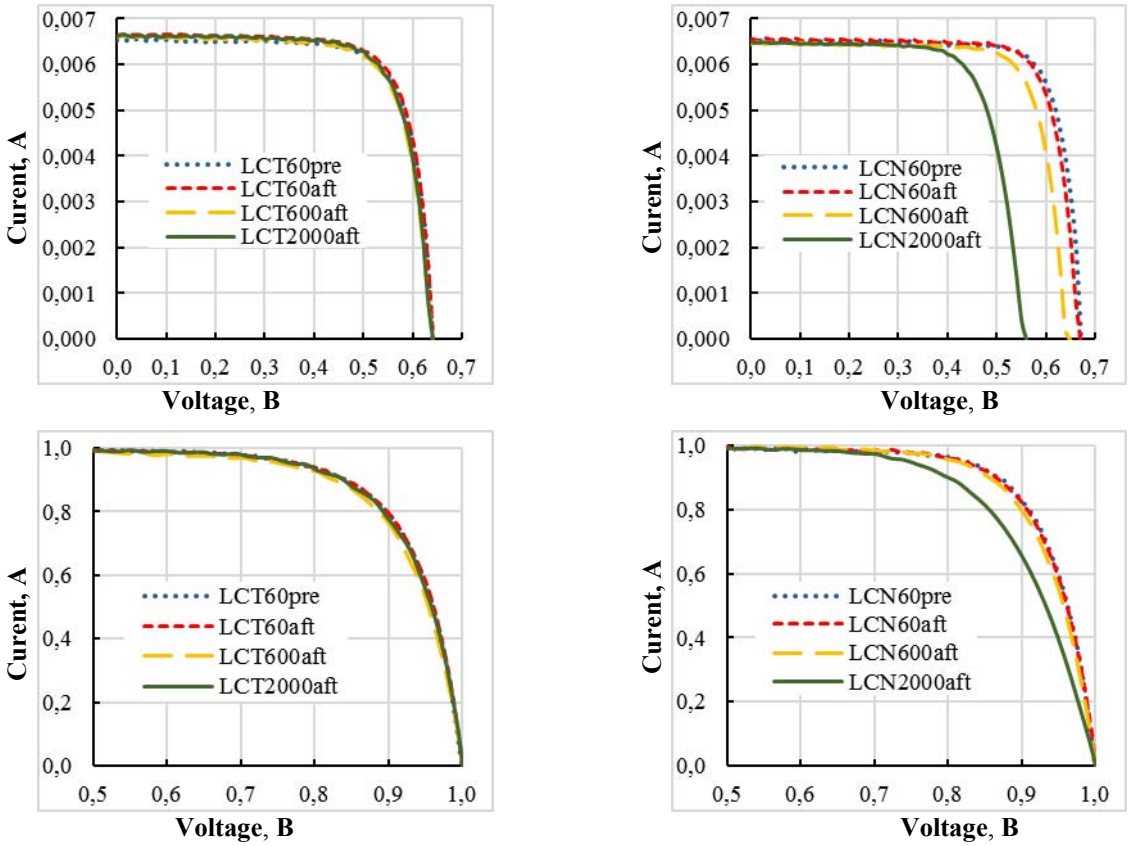


Рисунок 3. Кривые ВАХ СЭ CIGS до и после обратного смещения с различным временем воздействия.

С целью выявления природы этой устойчивости нами были проведены более детальные исследования ВФ характеристик данных структур, измерения которых проводили до и после воздействия обратного смещения при освещении (рис. 4) и в темноте (рис. 5). Следует отметить существенное отличие характера воздействия обратного смещения, поданного в темноте и при освещении,

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

в частности, при воздействии обратного смещения в темноте емкость структуры увеличивается, тогда как при воздействии обратного смещения при освещении емкость структуры, наоборот, уменьшается.

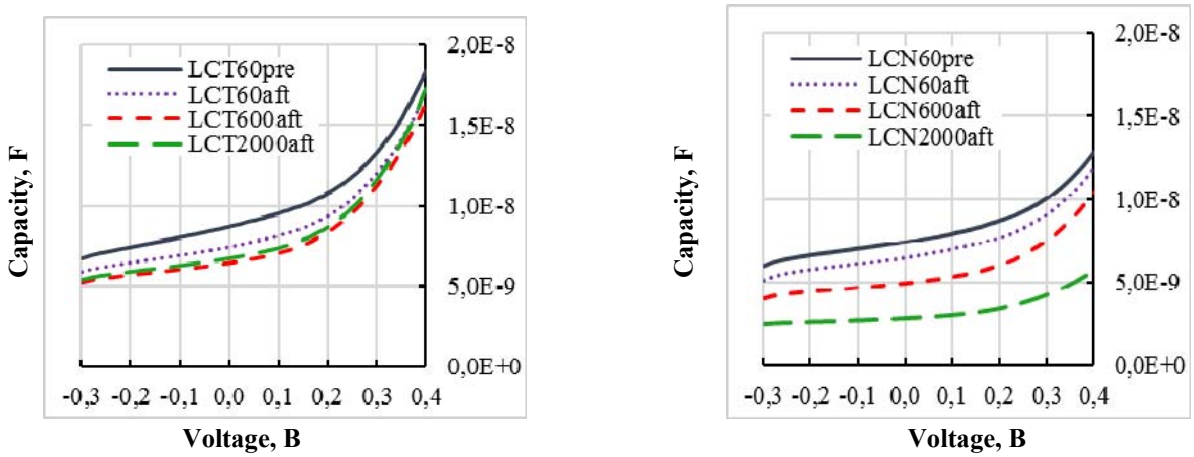


Рисунок 4. Кривые ВФХ СЭ CIGS до и после обратного смещения с различным временем воздействия при освещении.

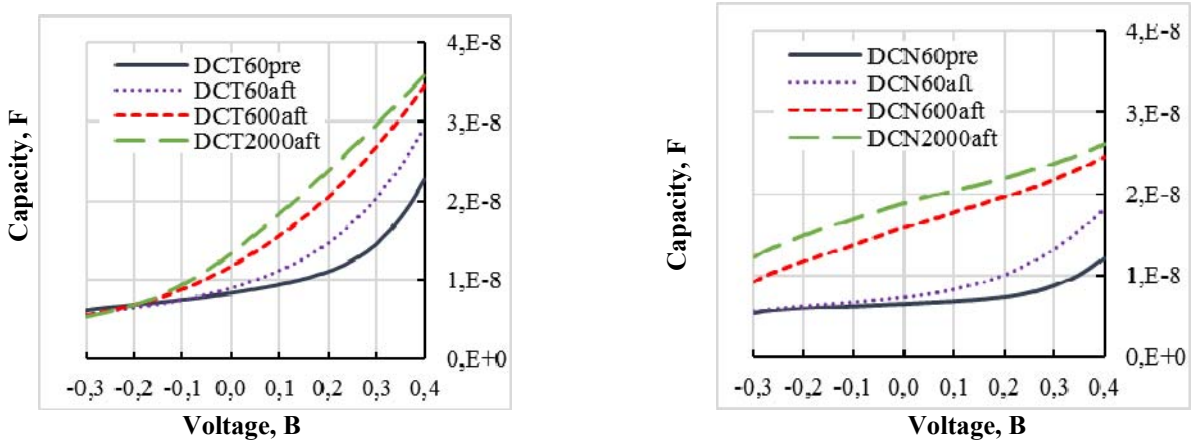


Рисунок 5. Кривые ВФХ СЭ CIGS до и после обратного смещения с различным временем воздействия в темноте.

Различие в изменении емкости в СЭ с тонкой и нормальной толщиной буферного слоя более выражено после воздействия обратного смещения при освещении, чем в темноте. Это свидетельствует о различии метастабильного изменения концентрации носителей в двух структурах за счет влияния воздействия обратного смещения, которое видно на рис. 6, 7.

Из ВФХ характеристик были вычислены распределения концентрации акцепторных примесей по глубине CIGS пленки с началом координатных осей, соответствующих границе перехода, которые представлены на рис. 6 для случая воздействия обратного смещения при освещении, а на рис. 7 для случая воздействия в темноте.

Снижение концентрации носителей после воздействия обратного смещения на рис. 6 согласуется с результатом измерения ВАХ и подтверждает увеличение Rs. Уменьшение концентрации приводит к расширению ОПЗ и изменению конфигурации дефектного комплекса (V_{Se} + V_{Cu}) [36], что объясняет увеличение n и уменьшение V_{oc}. Изменение концентрации носителей в СЭ с нормальным буферным слоем CdS пропорционально времени воздействия. Но в СЭ с тонким слоем CdS при более длительном воздействии заметно

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

некое «восстановление». Такая неоднозначность в СЭ с тонким слоем CdS наблюдается также после обратного смещения в темноте (рис. 7). Данное явление интересно для будущих исследований, так как о нем ранее не сообщалось.

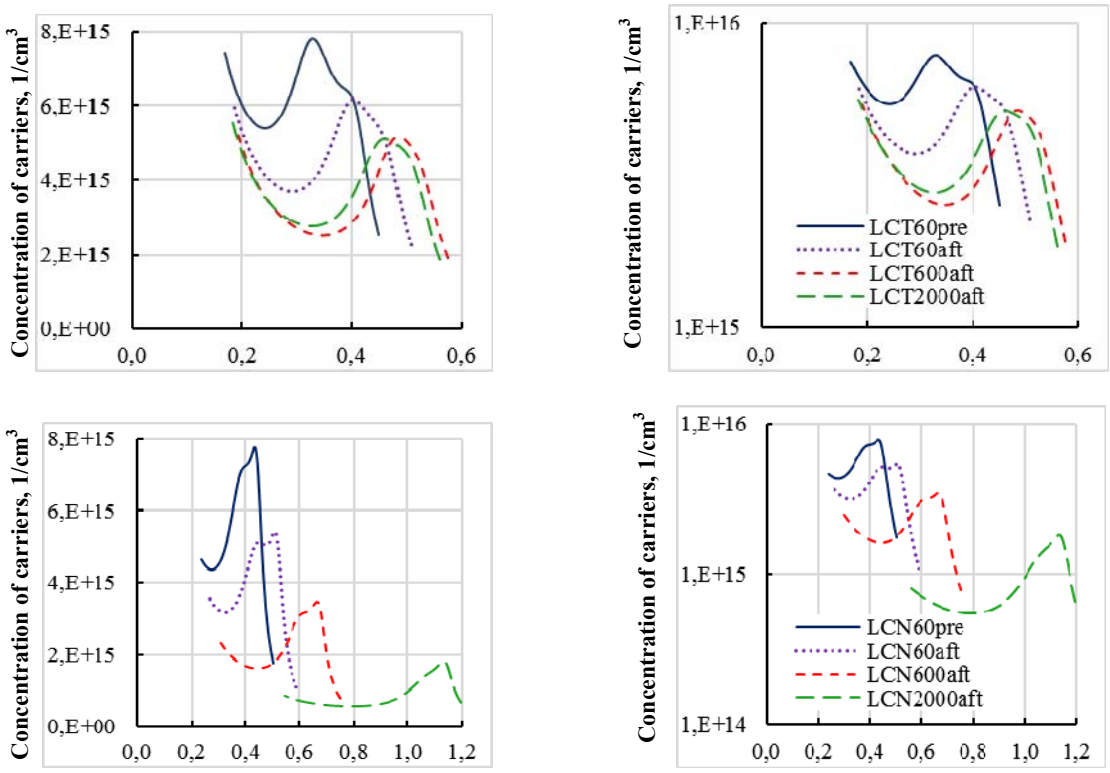


Рисунок 6. Профиль концентрации акцепторных ионов СЭ CIGS до и после обратного смещения с различным временем воздействия при освещении в линейном (слева) и полулогарифмическом (справа) масштабе.

После обратного смещения в темноте (рис. 8) происходит повышение концентрации ближе к *p-n*-переходу, тогда как после обратного смещения при освещении (рис. 7) пик концентрации отдаляется от *p-n*-перехода. При этом пик концентрации после обратного смещения в темноте также повышается со временем воздействия.

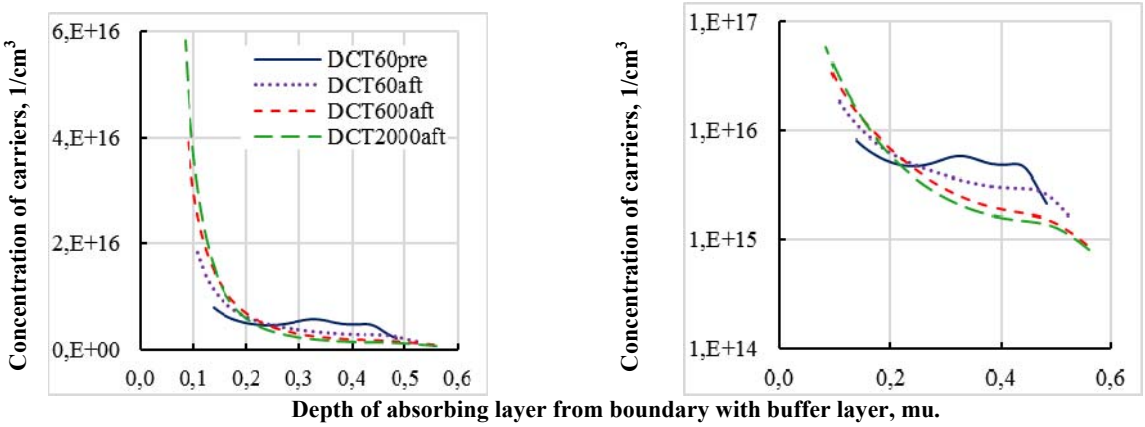


Рисунок 7а. Профиль концентрации акцепторных ионов СЭ CIGS с тонким буферным слоем до и после обратного смещения с различным временем воздействия в темноте в линейном и полулогарифмическом масштабе.

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

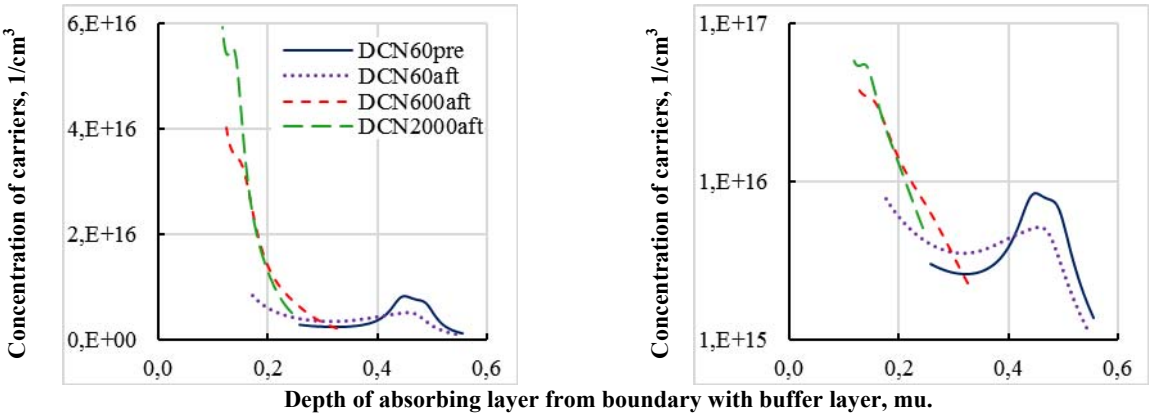


Рисунок 7б. Профиль концентрации акцепторных ионов СЭ CIGS с нормальным буферным слоем до и после обратного смещения с различным временем воздействия в темноте в линейном (слева) и полулогарифмическом (справа) масштабе

IV. Заключение

Таким образом, установлено, что воздействие обратного смешения при освещении в течение 2000 секунд приводит к снижению КПД более чем на 25% в СЭ с нормальной толщиной CdS и 0.3% в СЭ с тонким слоем CdS. Из чего следует, что уменьшение толщины буферного слоя CdS способствует устойчивости к воздействию обратного смещения.

При воздействии обратного смещения в темноте емкость структуры увеличивается, что соответствует классической модели влияния обратного смещения, и одинакова для элементов с различной толщиной буферного слоя. Воздействие обратного смещения при освещении приводит к уменьшению емкости структуры и концентрации носителей заряда. То, что это воздействие меньше для элемента с тонким буферным слоем, свидетельствует о влиянии синего спектра освещения, поглощение которого зависит от толщины буферного слоя. Так как это явление является оптическим, можно предположить, что такое поведение свойственно для СЭ с любым другим материалом буферного слоя.

Концентрация носителей в СЭ с нормальным слоем CdS изменяется пропорционально времени воздействия обратного смещения при освещении. Но в СЭ с тонким слоем CdS при более длительном воздействии заметно некоторое «восстановление».

После обратного смещения в темноте происходит повышение концентрации ближе к *p-n*-переходу, тогда как после обратного смещения при освещении пик концентрации отдаляется от *p-n*-перехода. Пик концентрации после обратного смещения в темноте также повышается со временем воздействия.

По результатам работы можно сделать вывод, что эффект обратного смещения является важным фактором для установления оптимальной толщины буферного слоя СЭ CIGS для обеспечения их стабильной работы в естественных условиях эксплуатации

Метаданные

Effect of reverse bias exposure on the parameters of solar cells based on CIGS

A.G. Kamilov

Physical-technical institute of the Uzbekistan Academy of Sciences, Chingiz Aytmatov Str., 2B, 100084 Tashkent, Uzbekistan

The results of laboratory experiments to study the effect of reverse bias with a duration of 60, 600 and 2000 s. on the parameters of solar cells (SC) based on an absorbing layer consisting of Cu, In, Ga and Se (CIGS) with different thicknesses of the CdS buffer layer are shown. Experiments have shown that for the stable operation of CIGS SCs under natural operating conditions, the thickness of their buffer layer should be calculated taking into account the effect of reverse bias. The results of measuring the current-voltage characteristics of CIGS SCs with different thicknesses of the CdS layer before and after the exposure to the reverse bias showed that SCs with a smaller buffer layer thickness are more resistant to the effect of reverse

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

bias. Based on the results of measuring the capacitance-voltage characteristics, it was found that when exposed to reverse bias in the dark, the capacitance of the structure increases, which corresponds to the classical model of the effect of reverse bias, and is the same for elements with different thicknesses of the buffer layer. After exposure to reverse bias under illumination, the capacitance of the structure and the concentration of charge carriers decrease, and to a lesser extent in elements with a thin buffer layer, which also indicates their resistance to reverse bias.

Keywords: solar cells, buffer layer, CIGS, reverse bias, carrier concentration, efficiency, I-V, C-V.

Литература (References)

[1] S. Hegedus, Prog. Photovoltaics Res. Appl. **14**, No.5, 393-411 (2006); doi: 10.1002/pip.704.
[2] S. Dongaonkar, Y. Karthik, S. Mahapatra, and M.A. Alam. In 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Jun. 2011, pp. 003348–003348; doi: 10.1109/PVSC.2011.6186664.
[3] M.A. Green, J. Mater. Sci. Mater. Electron. **18**, No.S1, 15-19 (2007); doi: 10.1007/s10854-007-9177-9.
[4] C.A. Wolden et al., J. Vac. Sci. Technol. A Vacuum, Surfaces, Film. **29**, No.3, 030801 (2011); doi: 10.1116/1.3569757.
[5] C.R. Osterwald and T.J. McMahon, Prog. Photovoltaics Res. Appl. **17**, No.1, 11-33 (2009); doi: 10.1002/pip.861.
[6] S. Dongaonkar, M.A. Alam, Y. Karthik, S. Mahapatra, D. Wang, and M. Frei. In International Reliability Physics Symposium (Apr. 2011), pp. 5E.4.1-4.5; doi: 10.1109/IRPS.2011.5784535.
[7] P.-O. Westin, U. Zimmermann, L. Stolt. In 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2009, pp. 2967-2970; doi: https://doi.org/10.4229/24thEUPVSEC2009-3BV.5.34.
[8] T.J. Silverman et al., IEEE J. Photovoltaics **5**, No.6, 1742-1747 (2015); doi: 10.1109/JPHOTOV.2015.2478071.
[9] R. Ramabadran and B. Mathur, Mod. Appl. Sci. **3**, No.10 (2009); doi: 10.5539/mas.v3n10p32.
[10] M. Nardone, S. Dahal, and J.M. Waddle, Sol. Energy **139**, 381-388 (2016); doi: 10.1016/j.solener.2016.10.006.
[11] E. Palmiotti et al., Sol. Energy **161**, 1-5 (2018); doi: 10.1016/j.solener.2017.12.019.
[12] W. Kwapil et al., J. Appl. Phys. **106**, No.6, 063530 (2009); doi: 10.1063/1.3224908.
[13] J.E. Lee et al., Prog. Photovoltaics Res. Appl. **24**, No.8, 1035-1043 (2016); doi: 10.1002/pip.2738.
[14] E.E. Van Dyk, C. Radue, and A.R. Gxasheka, Thin Solid Films **515**, No.15, 6196-6199 (2007); doi: 10.1016/j.tsf.2006.12.065.
[15] H. Guthrey et al., Prog. Photovoltaics Res. Appl. **27**, No.9, 812-823 (2019); doi: 10.1002/pip.3168.
[16] S. Johnston et al. In IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), Jun. 2017, pp. 1400-1404; doi: 10.1109/PVSC.2017.8366755.
[17] T.J. Silverman and I. Repins. In IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC) (A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC), Jun. 2018, pp. 3932-3937; doi: 10.1109/PVSC.2018.8547832.
[18] T.J. Silverman, L. Mansfield, I. Repins, and S. Kurtz, IEEE J. Photovoltaics **6**, No.5, 1333-1338 (2016); doi: 10.1109/JPHOTOV.2016.2591330.
[19] T.J. Silverman. In 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2017, pp. 1422–1426.
[20] S. Johnston et al. In IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC) (A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC), Jun. 2018, pp. 1897-1901; doi: 10.1109/PVSC.2018.8547766.
[21] K. Bakker, H.N. Åhman, T. Burgers, N. Barreau, A. Weeber, and M. Theelen, Sol. Energy Mater. Sol. Cells **205**, 110249 (2020); doi: 10.1016/j.solmat.2019.110249.
[22] S. Dongaonkar, C. Deline, and M.A. Alam, IEEE J. Photovoltaics **3**, No.4, 1367-1375 (2013); doi: 10.1109/JPHOTOV.2013.2270349.
[23] H. Ziar, B. Asaei, S. Farhangi, M. Korevaar, O. Isabella, and M. Zeman, IEEE J. Photovoltaics **7**, No.5, 1390-1399 (2017); doi: 10.1109/JPHOTOV.2017.2711429.
[24] P. Zabierowski, U. Rau, and M. Igalson, Thin Solid Films **387**, No.1-2, 147-150 (2001); doi: 10.1016/S0040-6090(00)01850-2.
[25] M. Igalson, A. Kubiaczyk, & P. Zabierowski, (2001). Deep centers and fill factor losses in the CIGS devices. MRS Proceedings, 668. doi:10.1557/proc-668-h9.2
[26] U. Rau, A. Jasenek, R. Herberholz, H.W. Schock, J.F. Guillemoles, D. Lincot, L. Kronik, The inherent stability of Cu (In, Ga)Se2-based solar cells. Proc. 2nd World Conf. on Photovolt. Energy Con. E.C. Joint Res. Centre, Ispra, 1998 p 428.
[27] Kay Orgassa, Uwe Rau, Quang Nguyen, Hans Werner Schock and Jurgen H. Werner, Role of the CdS Buffer Layer as an Active Optical Element in Cu(In,Ga)Se2 Thin-Film Solar Cells, Prog. Photovolt: Res. Appl. 2002; 10:457–463 (doi: 10.1002/pip.438)
[28] Jingjing Qu, Linrui Zhang, Hao Wang, Xuemei Song, Yongzhe Zhang, Hui Yan, Simulation of double buffer layer on CIGS solar cell with SCAPS software. Opt. Quant. Electron. **51**, 383 (2019). https://doi.org/10.1007/s11082-019-2100-9
[29] P. Chelvanathan, M.I. Hossain, & N. Amin, (2010). Performance analysis of copper-indium-gallium-diselenide (CIGS) solar cells with various buffer layers by SCAPS. Current Applied Physics, **10**(3), S387–S391. doi:10.1016/j.cap.2010.02.018
[30] N. Khoshsirat, N.A.M. Yunus, Numerical simulation of CIGS thin flm solar cells using SCAPS-1D. In: 2013 IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology (CSUDET), p 63 (2013)
[31] N. Severino, N. Bednar, N. Adamovic, Buffer layer optimization for high efficiency CIGS solar cells. Journal of Physics: Conference Series 758 (2016) 012016 doi:10.1088/1742-6596/758/1/012016
[32] M.S.R. Robin, & M.M. Rahaman, (2016). A comparative performance analysis of CdS and In2S3 buffer layer in CIGS solar cell. 2016 2nd International Conference on Electrical, Computer & Telecommunication Engineering (ICECTE). doi:10.1109/icecte.2016.7879639

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

[33] A.G. Komilov, Influence of CdS Buffer Layer Thickness on the Photovoltaic Parameters of Solar Cells. Appl. Sol. Energy 54, 308–309 (2018). doi:10.3103/S0003701X18050092
[34] D. KimJang, Y.-J. Jung, H.-S. Kim, M. Baek, D.Yi.J. Choi, Y. (2016). Optimization of CdS Buffer Layer for High Efficiency CIGS Solar Cells. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 16(5), 5074–5077. doi:10.1166/jnn.2016.12171
[35] Roland Scheer and Hans-Werner Schock. Chalcogenide Photovoltaics Physics, Technologies, and Thin Film Devices – WILEY-VCH Verlag & Co. KGaA, Germany, 2011. ISBN: 978-3-527-31459-1, PP. 384.
[36] S. Lany, & A. Zunger, (2006). Light- and bias-induced metastabilities in Cu(In,Ga)Se2 based solar cells caused by the (VSe-VCu) vacancy complex. Journal of Applied Physics, **100**(11), 113725. doi:10.1063/1.2388256

CIGS асосидаги қуёш элементларига тескари уланиш таъсири

А.Ғ.Комилов

ЎзР ФА Физика-техника институти, Чингиз Айтматов кўчаси 2Б уй, 100084 Тошкент, Ўзбекистон

Мақолада CdS буфер қатлами қалинлиги турлича бўлган мис, индий, галлий ва селен (CIGS) дан иборат ютувчи қатламли қуёш элементлари (ҚЭ) параметрларига 60, 600 ва 2000 сония давомийликдаги тескари уланишнинг таъсирини ўрганиш бўйича тадқиқотлар натижалари келтирилган. CdS буфер қатлами қалинлиги турлича бўлган CIGS ҚЭ нинг тескари уланиш таъсиридан олдин ва кейин ўлчанган вольт-ампер хусусиятлари (ВАХ) натижалари, ингичкароқ буфер қатламли ҚЭ ларининг тескари уланиш таъсирига бардошлироқ эканини кўрсатди. Қорон-ғуликдаги тескари уланиш таъсиридан, структуранинг электрик ҳажми ошади, ва бу тескари уланиш таъсирининг классик моделига мос келади. Ёруғликдаги тескари уланиш таъсири структуранинг сиғими ва аралашма ионлари концентрациясининг пасайишига олиб келади, ва бу ҳолат буфер қатлами юпқа бўлган элементларда камроқ бўлади, бу ҳам уларнинг тескари уланиш таъсирига бардошлироқ эканинидан далолат беради.

Калит сўзлар: қуёш элементлари, буфер қатлами, CIGS, тескари уланиш, ташувчининг концентрацияси, ФИК, ВАХ, ВФХ.

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

Исследование диффузии и электрофизических свойств эрбия, тулия, самария и иттербия в кремнии

Д.Э. Назиров*, М.Ф. Жураева, Ш.Ю. Фармонова

Национальный университет Узбекистана, Вузгородок, улица Университетская, дом 4, 100174 Ташкент, Узбекистан

Получена 09.01.2020

* Corresponding author: e-mail dnazirov2004@mail.ru

Исследования диффузии, растворимости и электрофизических свойств редкоземельных элементов эрбия, тулия, самария и иттербия в кремнии проведены в различных средах отжига для широкого интервала температур (1100-1250°C) комплексными методами меченых атомов, авторадиографии, измерения электропроводности и эффекта Холла, изотермической релаксации емкости и тока,. Установлены диффузионные параметры, растворимость и выявлена мелкая акцепторная природа на поверхности и в объеме кремния *n*-типа исследованных примесей редкоземельных элементов в кремнии. Вид распределения Er, Tm, Sm и Yb в кремнии представляет собой резко спадающую кривую, удовлетворительно аппроксимируемую *erfc*-функцией, соответствующей решению уравнения Фика для диффузии из постоянного источника в полуограниченное тело. Предполагается, что примеси РЗЭ Er, Tm, Sm и Yb (элементы третьей группы периодической системы), исследованные нами, являются примесями замещения и диффундируют по узлам кристаллической решетки (вакансионный механизм диффузии) кремния.

Ключевые слова: диффузия, растворимость, эрбий, тулий, самарий, иттербий, кремний *n*-типа, методы меченых атомов, авторадиографии, измерения электропроводности и эффекта Холла, изотермической релаксации емкости и тока.

By the complex methods of labeled atoms (^{169}Er, ^{170}Tm, ^{153}Sm и ^{175}Yb), autoradiography, measurements of electrical conductivity and Hall effect, isothermal relaxation of capacitance and current, diffusion, solubility and electro-physical properties of rare-earth elements: erbium, thulium, samarium and ytterbium in silicon were studied in various annealing media and for a wide temperature range (1100–1250°C). Diffusion parameters, solubility were established, and a small acceptor nature of the studied rare-earth impurities of erbium, thulium, samarium, and ytterbium was revealed on the surface and in the bulk of *n*-type silicon. The distributions of Er, Tm, Sm и Yb in silicon are the sharply decreasing curves satisfactorily approximated by the erfc-function corresponding to the solution of the Fick equation for the diffusion from a constant source into a semi-restricted body. It is assumed that impurities of Er, Tm, Sm and Yb under investigation are the substitutional impurities and they are diffused by the vacancy mechanizm.

Keywords: Diffusion, solubility, erbium, thulium, samarium, ytterbium, n-type silicon, methods of labeled atoms, autoradiography, measurement of electrical conductivity and the Hall effect, isothermal relaxation of capacitance and current.

I. Введение

Как известно, кремний легированный редкоземельными элементами (РЗЭ), привлекает все большее внимание исследователей как перспективный материал для оптоэлектроники. Это обуславливается перспективой применения Si<РЗЭ> структур в кремниевой оптоэлектронике в качестве источников света, например, для Si<Er> на длине волны 1.54 μm, соответствующей минимуму потерь и дисперсии волоконно-оптических линий связи, так и с точки зрения особенностей структур электронных оболочек этой группы элементов. Эффективность же примесей РЗЭ в кремнии, проявление оптических свойств структур зависит от спектра оптически и электрически активных центров, содержащих РЗЭ, общей концентрации и механизма диффузии редкоземельных элементов [1-5].

II. Методика эксперимента и технология

Целью настоящей работы является комплексное исследование диффузии, растворимости и электрофизических свойств примесей РЗЭ эрбия, тулия, самария и иттербия в кремнии. На поверхность образцов кремния *n*-типа с удельным сопротивлением ρ = 15 Ωсм напылялся металлический слой радиоактивного изотопа эрбия ^{169}Er, тулия ^{170}Tm, самария ^{153}Sm и иттербия ^{175}Yb или наносился из раствора слой хлорида эрбия, тулия, самария и иттербия, меченного радиоактивным изотопом эрбия ^{169}Er, тулия ^{170}Tm, самария ^{153}Sm и иттербия ^{175}Yb, также и в других партиях образцов кремния (площадь образцов ~1.5÷2.5 см^2, толщина ~350÷380 μm). Для электрических исследований диффузантами являлись стабильные изотопы металлического эрбия, тулия, самария и иттербия, или соли трёхвалентных хлорида эрбия, тулия, самария и иттербия. Диффузионный отжиг проводился на воздухе в вакуумированных ампулах (~10^{-5}÷10^{-7} мм рт. ст.), а также в откачанных ампулах в атмосфере аргона в интервале температур 1100÷1250°C.

Длительность диффузионного отжига менялась в зависимости от температуры диффузии от 5 до 48 часов. После диффузионного отжига образцы многократно промывали в плавиковой кислоте, царской водке, а также в кипящей смеси H_2O_2:HCl. После этого края образца зачищали на глубину ~100 μm, значительно превышающую глубину диффузии (~10 μm).

Профиль диффузантов определяли методом секционирования – стравливания тонких слоев (в растворе HF:HNO_3 = 1:50 с промывкой в смеси H_2O_2:HCl) и измерения остаточной активности образца. Остаточную активность образца измеряли на установке малого фона УМФ-1500М с β-счетчиком СБТ-11. Идентификацию энергетических спектров примесей РЗЭ ^{169}Er, ^{170}Tm, ^{153}Sm и ^{175}Yb также осуществляли измерением на анализаторе импульсов АИ-1024 (в ФТИ РАН, Санкт-Петербург). Толщину снятых слоев (0.05÷0.5 μm) определяли взвешиванием образца.

III. Описание результатов

Авторадиограммы, полученные до и после отжига, а также в процессе снятия слоев свидетельствовали о равномерном распределении примесей ^{169}Er, ^{170}Tm, ^{153}Sm и ^{175}Yb по сечению образца и об отсутствии включений. В предположении, что соблюдается закон Фика и что поверхностная концентрация примеси не изменяется со временем (диффузия из постоянного источника в полуограниченное тело), определен коэффициент диффузии (*D*) примесей ^{169}Er, ^{170}Tm, ^{153}Sm и ^{175}Yb в кремнии.

С этой целью экспериментальная кривая остаточного количества примеси, аппроксимировалась теоретической кривой для диффузии из постоянного источника:

$$Q(x) = 2C_0\sqrt{Dt}\ \mathrm{erfc}(x/2\sqrt{Dt}\,), \qquad (1)$$

здесь C_0 – поверхностная концентрация, x – суммарная толщина снятых слоев, t – время диффузии. Профиль концентрации носителей заряда определялся методами измерения проводимости и эффекта Холла, изотермической релаксации емкости и тока исследования диффузии, методом стравливания тонких слоев и измерения проводимости и эффекта Холла. Концентрация носителей заряда $p(x)$ определялась по формуле:

$$p(x) = \frac{1}{e}\left(\frac{d\sigma_S}{dx}\right)^2\left[\frac{d}{dx}(R_s\sigma_s^2)\right]^{-1}, \qquad (2)$$

здесь R_s – измеряемый (эффективный) коэффициент Холла; σ_s – поверхностная проводимость; e – заряд электрона. Отметим, что эта формула приведена в работе [6] в более общем

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

виде, учитывающем различие холловской и дрейфовой подвижностей.

Анализ полученных данных проводился в предположении, что выполняется закон Фика и поверхностная концентрация примеси не меняется со временем (диффузия из постоянного источника: $c(0, t) = \text{const}$). При таких предположениях и с учетом того, что толщина образца намного превосходит глубину диффузии, кривая $c(x)$ описывается функцией erfc. Как показывают результаты, эти распределения для эрбия [7], тулия [7], самария [8] и иттербия [8,9] в кремнии представляют собой резко спадающую кривую, удовлетворительно аппроксимируемую erfc-функцией, соответствующей решению уравнения Фика для диффузии из постоянного источника в полуограниченное тело. Концентрация носителей заряда $p(x)$ в кремнии, легированного эрбием, тулием, самарием и иттербием определялась с учетом подвижности носителей заряда. При этом предполагалась полная ионизация примесей Er, Tm, Sm и Yb в кремнии, т.е. считалось, что концентрация примесей Er, Tm, Sm и Yb $c(x)$ равна концентрации носителей заряда $p(x)$: $c(x)=p(x)$.

Как и в предыдущих исследованиях примесей европия [10], гадолиния [11] и скандия [12] в кремнии, электрические измерения, проведенные в нескольких точках поверхности, свидетельствовали о равномерном распределении примесей по сечению образца и об отсутствии включений второй фазы.

Вид распределения для Er, Tm, Sm и Yb представляет собой резко спадающую кривую, аппроксимируемую erfc-функцией, соответствующей решению уравнения Фика для диффузии из постоянного источника в полуограниченное тело. Концентрация носителей заряда $p(x)$ определялась с учетом подвижности носителей заряда [5].

Также при определении диффузионных параметров вместе с легированными образцами исследовались и контрольные образцы n-Si (КЭФ-15). В контрольных образцах изменений типа проводимости и значений проводимости не наблюдается. Это подтверждает, что при отжиге происходит диффузия именно примесей Er, Tm, Sm и Yb в кремний (см. таблицу).

Температурная зависимость коэффициента диффузии для примесей Er, Tm, Sm и Yb в кремнии носит аррениусовский характер (рис. 1) и может быть описана следующими соотношениями:

$$D_{Er} = 2\times10^{-3}\exp(-2.9\ \text{eV/kT}),\ \text{см}^2\text{s}^{-1},$$

$$D_{Tm} = 8\times10^{-2}\exp(-3.0\ \text{eV/kT}),\ \text{см}^2\text{s}^{-1},$$

$$D_{Sm} = 4\cdot10^{-3}\exp(\text{-2,8 эВ/kT})\ \text{см}^2\cdot\text{с}^{-1}.$$

$$D_{Yb} = 3\cdot10^{-2}\exp(\text{- 3,0 eV/kT})\ \text{см}^2\cdot\text{с}^{-1}$$

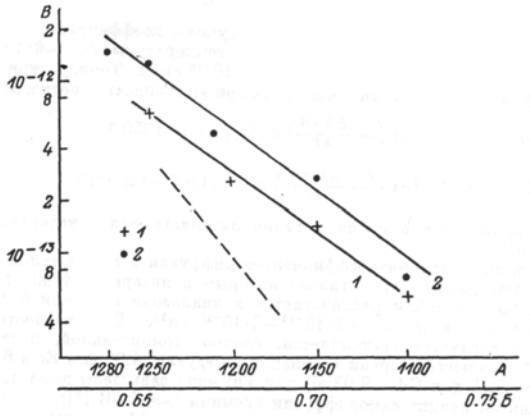


Рисунок 1. Температурная зависимость коэффициента диффузии Er (1), Tm (2) в кремнии. A – температура, °C; В - $10^3/T$, K^{-1}; Б – D, см^2/с.

Таблица. Коэффициенты диффузии Er, Tm, Sm и Yb в кремнии.

Температура диффузии, °C №	Коэффициент диффузии в кремнии; D, см^{2}с$^{-1}$			
	Эрбий (Er)	Тулий (Tm)	Самарий (Sm)	Иттербий (Yb)
1100	5.9×10^{-14}	6.4×10^{-14}	2×10^{-13}	3×10^{-13}
1150	1.2×10^{-13}	2.8×10^{-13}	4.9×10^{-13}	7.2×10^{-13}
1200	2.6×10^{-13}	4.9×10^{-13}	9.6×10^{-13}	1.6×10^{-12}
1250	7.1×10^{-13}	1.4×10^{-13}	2×10^{-12}	4×10^{-12}

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

Глубина проникновения примесей Er, Tm, Sm и Yb в кремний, для оценки которой нами использовалась величина $2\sqrt{Dt}$, во всем исследованном интервале температур не превышает нескольких микрометров. Поверхностные концентрации примесей Er, Tm, Sm и Yb в кремнии составляют при этом величину ~10^{18}÷10^{19} см$^{-3}$.

Как показывает анализ полученных данных, коэффициенты диффузии в зависимости от температуры и энергии активации примесей Er, Tm, Sm и Yb в кремнии располагаются в диапазоне значений, характерных для диффузии типичных элементов III B группы периодической системы, диффундирующих по узлам кристаллической решетки. Сопоставление наших данных по диффузии примесей Er, Tm, Sm и Yb в кремнии с ранними результатами по диффузии других РЗЭ в кремнии, полученными с помощью радиоактивной и др. методик, использованных выше, показывает, что способ нанесения диффузанта и среда диффузии существенно не влияют на диффузионные параметры редкоземельных элементов в кремнии.

IV. Результаты и обсуждение

Обнаружено, что примеси Er, Tm, Sm и Yb проявляют, как и другие редкоземельные элементы, исследованные нами, мелкую акцепторную природу на поверхности и в объеме кремния *n*-типа после диффузионного отжига. Методом эффекта Холла определена подвижность носителей заряда – дырок в диффузионно-легированных слоях кремния. Подвижность носителей заряда в диффузионных слоях Si<Er>, Si<Tm>, Si<Sm> и Si<Yb> равна ~145÷250 см^2/В·с и уменьшается с увеличением концентрации примесей Er, Tm, Sm и Yb в кремнии (рис. 2, 3)

По температурной зависимости коэффициента Холла – концентрации носителей заряда, а также методом изотермической релаксации емкости и тока каких-либо глубоких уровней в запрещенной зоне кремния, характерных для Er, Tm, Sm и Yb в кремнии, не обнаружено (рис. 4, 5).

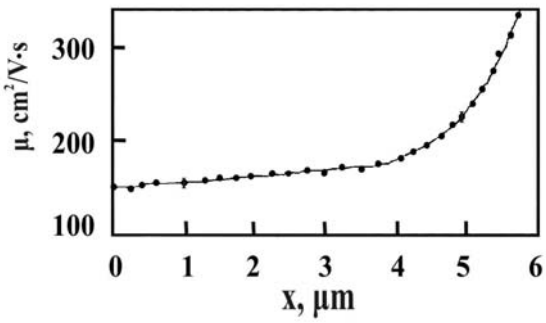


Рисунок 2. Профиль распределения подвижности носителей заряда в Si<Sm>. T = 1150°C , t= 10 h.

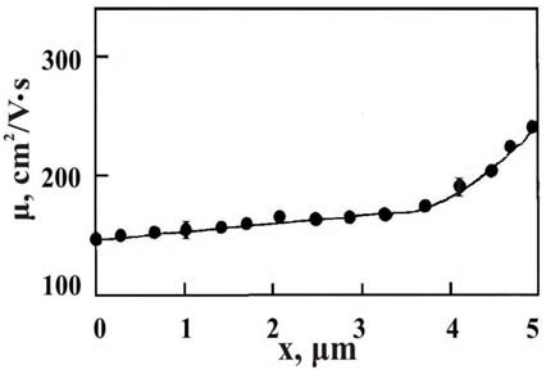


Рисунок 3. Профиль распределения подвижности носителей заряда в Si<Yb>. T = 1150°C , t= 10 h.

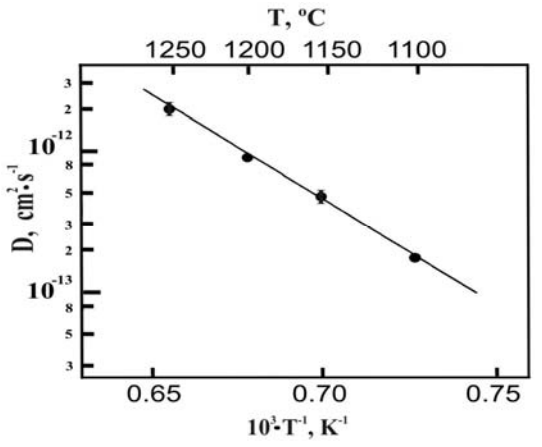


Рисунок 4. Температурная зависимость коэффициента диффузии самария в кремнии.

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

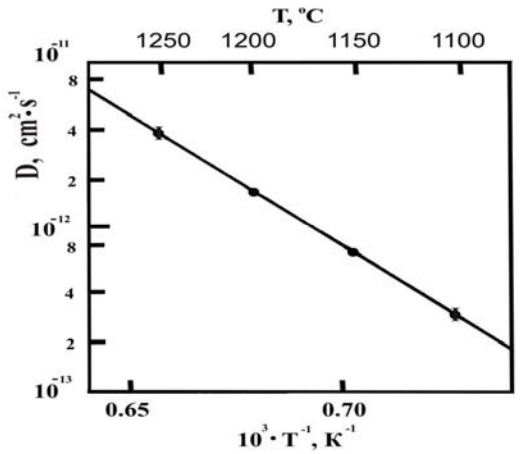


Рисунок 5. Температурная зависимость коэффициента диффузии иттербия в кремнии.

Концентрационное распределение носителей заряда в слоях кремния с примесями Er, Tm, Sm и Yb, определенное с помощью электрических измерений, может быть описано соотношением:

$C \approx (2 \div 4) \cdot 10^{17}\, erfc(x/2\sqrt{Dt})$, см$^{-3}$.

При этом поверхностная концентрация атомов Er, Tm, Sm и Yb в кремнии, определенная с помощью метода меченых атомов, составляет $\sim 10^{18} \div 10^{19}$ см$^{-3}$. Таким образом, концентрация электрически активных РЗЭ примесей Er, Tm, Sm и Yb в кремнии составляет менее 10% от общей их концентрации в кремнии.

Сопоставление полученных данных с ранними результатами по диффузии РЗЭ в кремнии, полученными с помощью радиоактивной и др. методик, показывает, что способ нанесения диффузанта и среда диффузии не влияют существенно на диффузионные параметры РЗЭ в кремнии.

Таким образом, можно предположить, что примеси РЗЭ Er, Tm, Sm и Yb (элементы третьей группы периодической системы), исследованные нами, также являются примесями замещения и диффундируют по узлам кристаллической решетки (вакансионный механизм диффузии) кремния [2, 3, 10-12].

Метаданные

Investigation of diffusion and electrophysical properties of erbium, thulium, samarium, and ytterbium in silicon

D.E. Nazirov, M.F. Jurayeva, Sh.Yu. Farmonova

National University of Uzbekistan, University street, 4, 100174 Tashkent, Uzbekistan

By the complex methods of labeled atoms (^{169}Er, ^{170}Tm, ^{153}Sm и ^{175}Yb), autoradiography, measurements of electrical conductivity and Hall effect, isothermal relaxation of capacitance and current, diffusion, solubility and electrophysical properties of rare-earth elements: erbium, thulium, samarium and ytterbium in silicon were studied in various annealing media and for a wide temperature range (1100–1250°C). Diffusion parameters, solubility were established, and a small acceptor nature of the studied rare-earth impurities of erbium, thulium, samarium, and ytterbium was revealed on the surface and in the bulk of *n*-type silicon. The distributions of Er, Tm, Sm и Yb in silicon are the sharply decreasing curves satisfactorily approximated by the erfc-function corresponding to the solution of the Fick equation for the diffusion from a constant source into a semi-restricted body. It is assumed that impurities of Er, Tm, Sm and Yb under investigation are the substitutional impurities and they are diffused by the vacancy mechanizm.

Keywords: Diffusion, solubility, erbium, thulium, samarium, ytterbium, n-type silicon, methods of labeled atoms, autoradiography, measurement of electrical conductivity and the Hall effect, isothermal relaxation of capacitance and current.

Литература (References)

[1] V.I. Fistul'. Atomy legiruyushikh primesey v poluprovodnikakh (sostoyanie i povedenie) (Moskva, Fizmatlit (2004).
[2] D.E. Nazirov, A.R. Regel', G.S. Kulikov. Kremniy, legirovanniy redkozemel'nimi elementami. Preprint FTI RAN, Sankt-Peterburg, № 1122, 1-56 (1987).
[3] B.I. Boltaks. Diffuziya i tochechnie defekty v poluprovodnikakh (Leningrad, Nauka, 1972).
[4] Diffusion in Crystalline Solids. Ed. by G.E. Murch and A.S. Novic (Academic Press, Inc., New York. 1984).
[5] E. Wong, H. Liu, Sh.Q. Man, E.Y.B. Pun, P.Sh. Chung. Erbium. Jpn. J. Appl. Phys. **37**, 3669 (1998).
[6] R. Baron, G.A. Shifrin, O.J. Marsh, J.W. Mayer. Journal of Applied Physics **40**, 3702 (1969).
[7] D.E. Nazirov, G.S. Kulikov, R.Sh. Malkovich. FTP **25**, 1653 (1991).
[8] D.E. Nazirov, FTP **37**, 1056 (2003).
[9] S. Zaynabidinov, D.E. Nazirov,,M.I. Bazarbaev. Elektronnaya obrabotka materialov **4,** 90 (2006).
[10] D.E. Nazirov, FTP **37**, 570 (2003).
[11] D.E. Nazirov, Elektronnaya obrabotka materialov **6**, 76 (2006).
[12] G.K. Azimov, S. Zaynabidinov, D.E. Nazirov, FTP **23,** 556 (1989).

Кремнийда эрбий, тулий, самарий ва иттербий атомларининг диффузияси ва электрофизик хоссалари

Д.Э. Назиров, М.Ф. Жураева, Ш.Ю.Фармонова

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

Мирзо Улуғбек номидаги Ўзбекистон миллий университети, Университет кўчаси, 4-уй, 100174 Тошкент, Ўзбекистон

Кремнийда ноёб ер элементлари: эрбий, тулий, самарий ва иттербий атомларининг диффузияси, эрувчанлиги ва электрофизик хосссалари комплекс тарзда нишонланган атомлар (^{169}Er, ^{170}Tm, ^{151}Sm, ^{175}Yb), авторадиография, электр ўтказувчанлик ва Холл эффекти, сиғим ва токнинг изотермик релаксациясини ўлчаш каби усуллар ёрдамида, қиздиришнинг турли муҳитларида ва температураларнинг кенг оралиғида (1100–1250°C) ўрганилди. Тадқиқ этилган ноёб ер элементлари киришмаларининг диффузиявий параметрлари, эрувчанлиги ва акцептор табиати аниқланди. Er, Tm, Sm ва Yb билан легирланган кремнийдаги киришмаларнинг доимий манбадан диффузия учун Фик тенгламаси ечими erfc-функцияси билан ифодаланиши мумкин бўлган. Диффузия параметрлари нишонланган атомлар усули ёрдамида олинган. Шунингдек, диффузиявий параметрларини аниқлашда *n*-Si (КЭФ-15) намунавий Er, Tm, Sm, Yb киришмалар билан легирланланган ва киришмалар билан легирланмаган кремний намуналари тадқиқланган.

Калит сўзлар: диффузия, эрувчанлик, эрбий, тулий, самарий ва иттербий, n-кремний, нишонланган атомлар, авторадиография, ўтказувчанлик ва Холл эффекти, сиғим ва токнинг изотермик релаксациясини ўлчаш каби усуллар

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕКВАДРАТИЧНОГО СМЕЩЕНИЯ АТОМОВ В СПЛАВЕ $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$ МЕТОДОМ ДИФРАКЦИИ НЕЙТРОНОВ

И. Хидиров*, С.ДЖ. Рахманов, А.С. Парпиев, Ш.А. Махмудов, В.В. Гетманский

Институт ядерной физики АН РУз, Улугбек, 100214, Ташкент, Узбекистан

(Получена 06.07.2020)

* Corresponding author: e-mail khidirov@inp.uz, Phone: +00 999 999 999

В работе определено среднеквадратичное смещение атомов в новом кубическом тугоплавком сплаве $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$ методами наименьших квадратов и полнопрофильного анализа по данным дифракции нейтронов. Данный сплав получен методом порошковой металлургии спеканием мелких порошков кубических карбидов титана TiC и молибдена MoC. Среднеквадратичные смещения атомов в сплаве определены двумя способами по данным дифракции нейтронов (методом наименьших квадратов и методом полнопрофильного анализа дифрактограмм) и оказались идентичными. Их значения оказались значительно больше, чем в стехиометрических сплавах TiC и TiN, имеющих аналогичную кубическую структуру и близкие геометрические параметры атомов со сплавом $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$. Такая же тенденция наблюдается и для сплавов $TiC_{0.50}N_{0.50}$ и $TiC_{0.30}N_{0.70}$ относительно тех же бинарных сплавов. Обнаруженное различие в значениях среднеквадратичного смещения атомов объяснено возникновением больших статических искажений в решетке сплава $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$ из-за различия в конфигурациях внешних валентных электронов Ti ($3d^24s^2$) и Mo ($4d^55s^1$), а в сплавах $TiC_{0.50}N_{0.50}$ и $TiC_{0.30}N_{0.70}$ из-за различия в конфигурациях внешних валентных электронов атомов C ($2s^22p^2$) и N ($2s^22p^3$).

Ключевые слова: карбид титана TiC и молибдена MoC, сплав $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$, кристаллическая структура, полное среднеквадратичное смещение атома, динамическое и статическое искажение решетки, дифракция нейтронов, метод наименьших квадратов, полнопрофильный анализ дифрактограмм, внешние валентные электроны.

The root-mean-square displacement of atoms in the new cubic refractory alloy $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$ has been determined by the methods of least squares and full-profile analysis based on neutron diffraction data. The values of the root-mean-square displacements of atoms in this alloy, obtained by two methods, are identical. They turned out to be much higher than in similar cubic stoichiometric TiC and TiN alloys. It is shown that the same tendency is also observed for the $TiC_{0.50}N_{0.50}$ and $TiC_{0.30}N_{0.70}$ alloys. The observed difference in the values of the root-mean-square values of the atoms is explained by the appearance of large static distortions in the lat-lattice of the $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$ alloy due to the difference in configurations of the outer valence elec electrons Ti ($3d^24s^2$) and Mo ($4d^55s_1$), and in the $TiC_{0.50}N_{0.50}$ and $TiC_{0.30}N_{0.70}$ alloys due to the difference in configurations of the outer valence electrons of C ($2s^22p^2$) and N ($2s^22p^3$) atoms.

Keywords: titanium TiC and molybdenum carbide MoC, $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$ alloy, crystal structure, total rms atomic displacement, dynamic and static lattice distortion, neutron diffraction, least squares method, full-profile diffraction pattern analysis, external valence electrons

I. Введение

В последнее время в связи с острым дефицитом вольфрама возникла необходимость нахождения сплавов, замещающих вольфрам. Одним из таких сплавов может быть сплав системы Ti-Mo-C [1-3]. Получению и изучению свойств однофазных сплавов системы Ti-Mo-C посвящен ряд работ [4-9]. Однако получение однофазных сплавов системы Ti-Mo-C с большим содержанием Mo затруднительно из-за резкого отличия термодинамических параметров компонентов [7, 8]. Если до настоящего времени был получен однофазный кубический сплав данной системы состава $Ti_{0.90}Mo_{0.10}C$ [8], то в работе [10] показали, что способом порошковой металлургии можно получить сплав с содержанием компонентов $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$. Этот сплав имеет кристаллическую структуру типа NaCl с параметром решетки a = 4.338±0.001 Å. Поскольку химический состав полученного сплава является новым, представляет интерес изучить его свойства.

Одним из фундаментальных свойств твердого тела является среднеквадратичное смещение (СКС) его атомов из равновесного положения из-за тепловых колебаний. Согласно [10], кристаллическая структура $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$ является кубической с четко выраженными и сильными интенсивностями дифракционных максимумов на нейтронограмме. Это позволяет определить среднеквадратичное смещение атомов в данном сплаве с большой надежностью методом дифракции нейтронов. Целью работы является определение среднеквадратичного смещения атомов в сплаве $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$ методом дифракции нейтронов.

II. Методика эксперимента

Образец $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$ получили методом порошковой металлургии спеканием перемешанных порошков кубических карбидов TiC и MoC в соответствующих пропорциях. Кубические карбиды титана TiC и молибдена MoC получены методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза [11]. Порошки кубических карбидов титана и молибдена тщательно перемешивали в течение 4 ч в агатовой ступке. Средний размер частиц порошков $\overline{r}$ = 40 мкм. Далее из перемещанных порошков готовили цилиндрический брикет под давлением 3×10^6 Н/м^2. Приготовленный брикет отжигали в высокотемпературной вакуумной печи типа СШВ 1.2.5/25 И1 при температуре 2200°C в графитовом стаканчике в течение 8 ч, затем охлаждали вместе с печью [10]. Образец представляет собой спеченный сплав цилиндрической формы размером 8×70 мм^2.

Химический состав синтезированных образцов определили методом химического анализа, а также минимизацией факторов расходимости экспериментальных и расчетных интенсивностей дифракционных отражений на нейтронограмме образца. Точность химического анализа составляет 0.3%.

Для оценки однородности образцов по кристаллической структуре использовали рентгенографию из-за ее более высокого углового разрешения [12]. Для этого рентгенограммы образцов снимали на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М с использованием Cu K_α-излучения в интервале углов Брэгга 2θ=10°–110° со скоростью вращения детектора 1 град/мин (Ni-фильтр, $\lambda_{ср}$ = 1.5418 Å). Для определения параметров решетки по рентгенограмме использовали съемку узкого интервала углов около дифракционного максимума со скоростью вращения детектора 1/4 град/мин при 2θ>101°. Согласно рентгенограмме, синтезированный образец однофазный и однородный, о последнем свидетельствует четкое разделение α_1 и α_2 дублета Cu K-излучения при углах Брэгга 2θ>60° на рентгенограмме, соответствующей ГЦК-решетке со структурой типа NaCl. Параметр решетки образца a_0=4.335±0.002 Å.

В качестве основного метода определения СКС атомов в сплаве $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$ выбрана дифракция нейтронов, одинаково позволяющая получить более достоверную информацию о положении тяжелых и лёгких атомов (неметаллов) в кристаллической решетке [13, 14].

Нейтронограмммы образца снимали при комнатной температуре на нейтронном дифрактометре DN-500, установленном на тепловой колонне ядерного реактора ВВР-СМ ИЯФ АН РУз (λ=1.085 Å) [15]. Отношение интенсивностей самого сильного дифракционного максимума от плоскости с индексами Миллера (111) и фона эталонного образца Ni с кубической структурой при полной ванадиевой кассете размером 8×70 мм^2 равно 22. Измерения нейтронограммы проводили так, чтобы статистическая ошибка в определении

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

интегральной интенсивности дифракционных максимумов составляла от 3 до 5% в зависимости от положения максимумов по оси угла Брэгга. Нейтронограмму образца снимали по три раза, чтобы исключить случайную ошибку. Кроме того, до и после измере-ния нейтронограммы образца измеряли нейтронограмму эталонного образца Ni для проверки достоверности нейтронографических данных.

Для обработки нейтронограммы использовали метод полнопрофильного анализа дифрактограмм, предложенный Международной ассоциацией кристаллографов [16]. СКС атомов в сплаве определяли как линейным, так и нелинейным методами наименьших квадратов. Последний в кристаллографии получил название полнопрофильного анализа дифрактограмм (метод Ритвелда). Он привлекателен тем, что в нем все уточняемые структурные, профильные и инструментальные параметры входят в формулу профильной функции нелинейно. Методы оценки нелинейных параметров представляют собой итерационный процесс. Параметры функций, включающие структурные, приборные и другие характеристики, также уточняются с помощью нелинейного метода наименьших квадратов [17].

III. Результаты эксперимента и обсуждение

Нейтронограмма исследуемого сплава приведена на рис. 1. Она индицируется в рамках пространственной группы (пр. гр.) $Fm\,\bar{3}\,m$, подробно описанной в [18], где атомы Ti и Mo взаимозамещены и статистически расположены в позициях 4(*b*), а атомы C расположены в позициях 4(*a*). Параметр решетки a = 4.338±0.001 Å. Над дифракционными максимумами проставлены индексы Миллера отражающих плоскостей в пр. гр. $Fm\,\bar{3}\,m$. Результаты нейтроноструктурного анализа согласуются с данными работы [10].

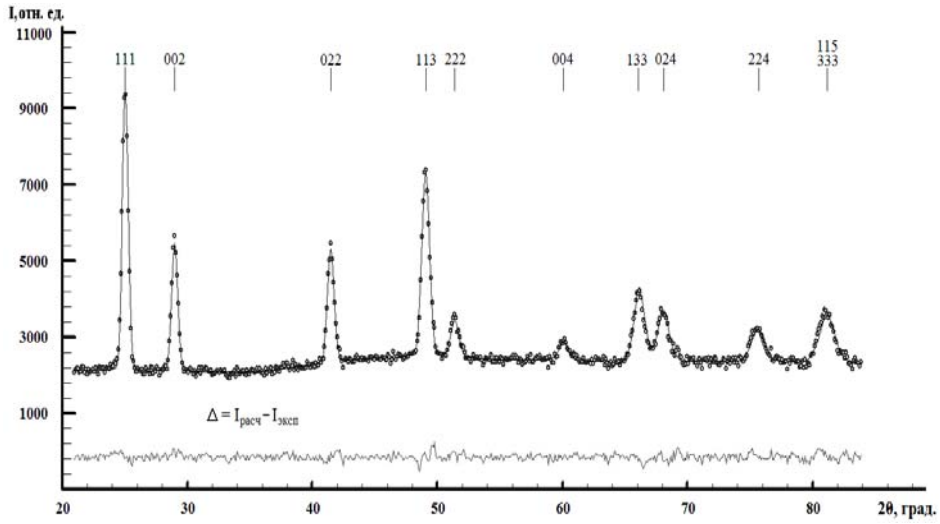


Рисунок 1. Нейтронограммы сплава $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$: точки – эксперимент, сплошная линия – расчет в рамках пр. гр. $Fm\,\bar{3}\,m$, Δ – разность экспериментальных и расчетных значений интенсивностей дифрактограмм. Над дифракционными максимумами проставлены индексы Миллера отражающих плоскостей в рамках пр. гр. $Fm\,\bar{3}\,m$.

Для поликристаллического образца цилиндрической формы экспериментально наблюдаемая интенсивность нейтроно-дифракционного отражения для кубической структуры, как вытекает из выражения структурного фактора, приведенного для пр. гр. $Fm\,\bar{3}\,m$ в [19], в конечном итоге определяется следующим выражением:

$$I_{эксп} = kI_0 \exp\left(-\frac{16\pi^2 \overline{u_\Sigma^2}}{3}\frac{\sin^2\theta}{\lambda^2}\right) \qquad (1)$$

где I_0 – расчетная интенсивность дифракционного максимума без учета теплового фактора (СКС атомов), k – коэффициент, зависящий от геометрии прибора и образца; $\overline{u_\Sigma^2} = (\overline{u_{Ti}^2} + \overline{u_{Mo}^2} + \overline{u_C^2})/3$ – усредненое среднеквадратичное смещение атом-

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

ного комплекса (в дальнейшем атома), причем каждый $\overline{u_i^2}$ состоит из среднеквадратичной амплитуды тепловых колебаний атомов и статических искажений решетки: $\overline{u_i^2} = \overline{u_{дин}^2} + \overline{u_{ст}^2}$ [20]. Статическое смещение атомов из идеального положения возникает из-за различия в размерах атомов и отклонения состава сплава от стехиометрии. Согласно выражению (1), график зависимости $\ln(I_{экс.}/I_{расч})$ от $\sin^2\theta/\lambda^2$ является прямой линией, по наклону которой можно определить тепловой фактор:

$$2B = (-16\pi^2 \overline{u_\Sigma^2})/3, \qquad (2)$$

а затем $\overline{u_\Sigma^2}$ по формуле (2). Для построения данной зависимости использовали наиболее сильные дифракционные максимумы. Такой метод определения СКС атомов в кубических кристаллах в последнее время широко применяется в нейтронографии и стал общепризнанным методом [14, 21]. В принципе среднеквадратичное смещение атомов в кубических кристаллах можно определить также и другими методами: рентгенографией, калориметрией, через механические свойства. Однако нейтронографический метод определения СКС по сравнению с другими методами имеют ряд преимуществ. Во-первых, этот метод привлекателен тем, что $\overline{u^2}$ определяется непосредственно из эксперимента без всяких промежуточных расчетов. Во-вторых, амплитуда рассеяния нейтронов не зависит от угла Брэгга, поглощение нейтронов в веществах незначительно, эффектом экстинкции можно пренебречь, рассеяние нейтронов происходит непосредственно на ядрах [22]. Все эти факторы позволяют существенно повысить точность и достоверность определения значения $\overline{u^2}$. Преимущества нейтронографического метода определения СКС отмечали также в работе [23]. Зависимость прямой линии $\ln(I_{эксп}/I_0)$ от $\sin^2\theta/\lambda^2$ приведена на рис. 2. Наклон прямой линии $\ln(I_{экс.}/I_{расч.})$ в функции $\sin^2\theta/\lambda^2$ определили методом наименьших квадратов. В табл. 1 приведено полученное значение $\overline{u_\Sigma^2}$ для данного сплава.

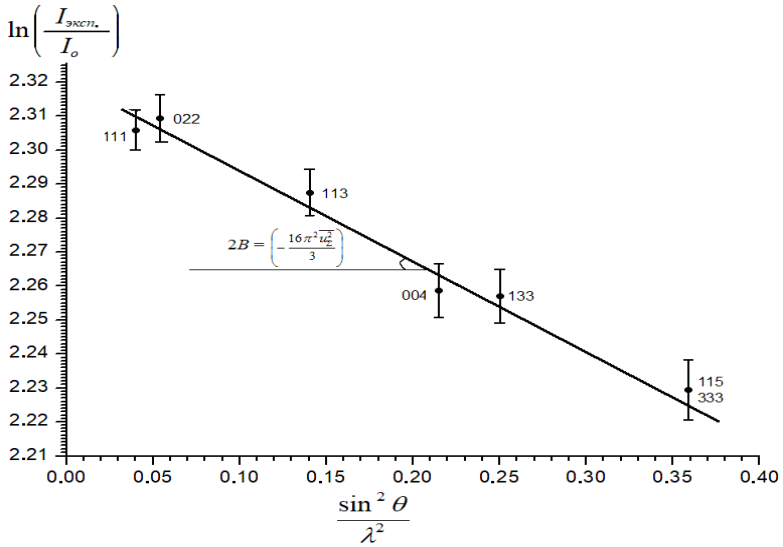


Рисунок 2. Зависимость $\ln(I_{эксп}/I_0)$ от $\sin^2\theta/\lambda^2$ для сплава $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$. Над точками указаны индексы Миллера отражающих плоскостей *hkl* в рамках пр. гр. $Fm\bar{3}m$.

В работе [10] для теплового фактора B в сплаве $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$ методом польнопрофильного анализа было получено значение $B = 0.32\pm0.03$ Å^2, из которого, согласно формуле (2), вытекает, что для данного сплава $\sqrt{\overline{u_\Sigma^2}} = 0.110\pm0.001$ Å. Как видно из таблицы, оно практически точно совпадает со значением $\sqrt{\overline{u_\Sigma^2}}$, полученным методом наименьших квадратов. В таблице также приведены значения среднеквадратичного смещения атома в ряде изоструктурных родственных сплавов, полученные в [24, 25]. Как видно из таблицы,

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

$\sqrt{\overline{u_\Sigma^2}}$ для атомов в сплаве $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$ не сильно отличается от значений для атомов стехиометрических карбонитрида титана $TiC_{0.50}N_{0.50}$ и $TiC_{0.30}N_{0.70}$. Разница между этими величинами не более 5%, т.е. лежит в пределах ошибок определения этих величин.

Таблица. Среднеквадратичное смещение атомов в решетке и параметры решетки ряда кубических тугоплавких сплавов на основе титана.

№	Образец	$\sqrt{\overline{u_\Sigma^2}}$, Å	Параметр решетки *a*, Å
1	$Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$	0.110±0.003	4.338±0.001
2	$TiC_{0.97}$ [24]	0.084±0.003	4.326±0.001
3	$TiN_{0.97}$ [25]	0.089±0.002	4.226±0.003
4	$TiC_{0.50}N_{0.50}$ [25]	0.105±0.003	4.302±0.002
5	$TiC_{0.30}N_{0.70}$ [25]	0.105±0.002	4.302±0.002

В то же время разница этих величин по сравнению со среднеквадратичным смещением бинарных сплавов $TiC_{0.97}$ и $TiN_{0.97}$ больше на 31% и 24% соответственно. Увеличение усредненного полного СКС атомов в сплаве $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$ не может быть объяснено увеличением амплитуды тепловых колебаний $\sqrt{\overline{u_{дин}^2}}$, так как она обратно пропорциональна массе элемента, а в данном случае значительная часть атомов Ti с относительно легкой массой заменена тяжелыми атомами Mo. Наблюдаемую закономерность можно объяснить возникновением статических искажений в решетке систем Ti-Mo-C и Ti-C-N. Согласно работе [24], в стехиометрическом бинарном кубическом сплаве TiC статическое смещение $\sqrt{\overline{u_{ст}^2}}$ практически отсутствует. Можно предположить, что оно отсутствует и в изоструктурном с карбидом титана TiC стехиометрическом кубическом нитриде титана TiN. Однако в рассматриваемых тройных соединениях, хотя они являются стехиометрическими, и атомные радиусы Ti и Mo близки [26] (у Ti 1.47 Å, а у Mo 1.40 Å), *a* также близки и у углерода C (0.77 Å) и азота N (0.71 Å) [26] (менее 10% , т.е. удовлетворяется условие Вегарда образования твердого раствора), в трехкомпонентных сплавах, по-видимому, появляются статические искажения из-за различия во внешних электронных конфигурациях составляющих элементов Ti и Mo. Они существенно различаются; имеют вид $3d^2 4s^2$ для Ti и $4d^5 5s^1$ для Mo [26]. Они также различны для C ($2s^2 2p^2$) и N ($2s^2 2p^3$) [26]. Поскольку стехиометрические сплавы TiC и TiN имеют весьма близкие значения СКС (см. таблицу), и в них отсутствуют статические искажения, то следует предположить, что в стехиометрических трехкомпонентных сплавах различие в конфигурациях валентных внешних электронов приводит к появлению статических искажений в решетке. Из-за этих различий возникают неоднородные силы притяжения, приводящие к искажению кристаллической решетки. Об этом также свидетельствует завышенное значение параметра решетки сплава $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$ по сравнению с другими сплавами (см. таблицу).

IV. Заключение

Определено усредненное полное среднеквадратичное смещение атомов в сплаве $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$ по данным дифракции нейтронов методами наименьших квадратов и полнопрофильного анализа дифрактограмм. Показано, что замена в кубическом карбиде титана TiC части атомов металла (Ti) или части атомов неметалла (C) одного сорта другим, отличающимся внешней валентной электронной конфигурацией, приводит к возникновению статических искажений в подрешетках кубических трехкомпонентных сплавов $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$, $TiC_{0.50}N_{0.50}$ и $TiC_{0.30}N_{0.70}$. Это приводит к увеличению полного среднеквадратичного смещения атомов сплава по сравнению с кубическими бинарными сплавами TiC и TiN. Следовательно, заменой части атомов Ti на Mo или же части атомов C на N в решетке карбида титана TiC можно менять динамические характеристики его кристаллической решетки.

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

Метаданные

Determination of the root mean-square displacement of atoms in $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$ alloy by the methods of neutron diffraction

Khidirov, S.Dj. Rakhmanov, A.S. Parpiev, Sh.A. Makhmudov, V.V. Getmanskii

Institute of Nuclear physics, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, 100214, Tashkent, Uzbekistan

The root-mean-square displacement of atoms in the new cubic refractory alloy $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$ has been determined by the methods of least squares and full-profile analysis based on neutron diffraction data. The values of the root-mean-square displacements of atoms in this alloy, obtained by two methods, are identical. They turned out to be much higher than in similar cubic stoichiometric TiC and TiN alloys. It is shown that the same tendency is also observed for the $TiC_{0.50}N_{0.50}$ and $TiC_{0.30}N_{0.70}$ alloys. The observed difference in the values of the root-mean-square values of the atoms is explained by the appearance of large static distortions in the lattice of the $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$ alloy due to the difference in configurations of the outer valence electrons Ti ($3d^24s^2$) and Mo ($4d^55s_1$), and in the $TiC_{0.50}N_{0.50}$ and $TiC_{0.30}N_{0.70}$ alloys due to the difference in configurations of the outer valence electrons of C ($2s^22p^2$) and N ($2s^22p^3$) atoms.

Keywords: titanium TiC and molybdenum MoC carbide, $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$ alloy, crystal structure, NaCl-type structure, total rms atomic displacement, dynamic and static lattice distortion, neutron diffraction, least squares method, full-profile diffraction pattern analysis, external valence electrons.

References

[1] P.V. Burkov, C.N. Kul'kov, Polzynovskiy vestnik No.2 (part 2), 55-61 (2005)
[2] D. Bandyopadhyay, B. Haldar, R.C. Sharma,N. Chakraborti, Journal of Phase Equilibria **20**, No.3, 332-336 (1999).
[3] L. Cheng, Q. Cai, W. Yu, L.J. Yu, H. Mimura, Materials Characterization **142**, 195-202 (2018).
[4] Z. Wang, H. Zhang, C. Guo, Z.Leng, Z. Yang, X. Sun, Ch. Yao, Z. Zhang, F. Jiang, Materials and Design **109**, 361-366 (2016).
[5] S.H. Koutzaki, J.E. Krzanowski, J.J. Nianaparampil, Metall. Mater. Trans. A **33**, 1579-1588 (2002).
[6] X. Wang, M. Zhang, S. Qu, Optics and Lasers in Engineering **48**, No.9, 893-898 (2010).
[7] J.H. Shim, C.S. Oh, D.N. Lee, Metallurgical and Materials Transactions B **27,** No.6, 955-966 (1996).
[8] P.V. Burkov. Strukturoobrazovanie, fazovy sostav i svoystva kompozitsionnykh materialov na osnove karbida titana (Tomsk, TPU, 2011).
[9] P.V. Burkov, Perspektivnye materially No.3, 61-66 (2002).
[10] I. Khidirov, S.D. Rakhmanov, Sh.A. Makhmudov, V.V. Getmanskiy, Uzbek J. Phys. **21,** No. 2, 111-114 (2019).
[11] A.P. Amosov, I.P. Borovinskaya, A.G. Merzhanov. Poroshkovaya tekhnologiya samorasprostranya-yushegosya vysokotemperaturnogo sinteza materialov (Moskva, Mashinostroenie, 2007)
[12] S.S. Gorelik, L.N. Rastorguev, Yu.A. Skakov. Rentgenograficheskiy i elektronoopticheskiy analiz (Mockva, MISIS, 1994).
[13] Yu. Nozik, K.P. Ozerov, K. Khennig. Neytrony i tverdoe telo. Strukturnaya neytronografiya. T. 1 (Moskva, Atomizdat, 1979).
[14] A.I. Gusev, A.A. Rempel'. Strukturnie fazovie perekhodi v nestekhiometricheskikh soedineniyakh (Moskva, Nauka, 1988).
[15] Sh. Shoyusupov, V.V. Getmanskiy, I. Khidirov i drygie, Uzbekskiy zhurnal problem energetiki i informatiki № 2, 11-16 (2002).
[16] G. Will. Powder Diffraction: The Rietveld Method and the Two Stage Method of Determine and Refine Crystal Structures from Powder Diffraction Data (New York, Springer, 2005).
[17] M.G. Krzhizhanovskaya, V.A. Firsova, R.S. Bubnova. Primenenie metoda Ritvelda dlya resheniya zadach poroshkovoy difraktometrii. Uchebnoe posobie (Sankt-Peterburgskiy universitet, 2016).
[18] International Tables for Crystallography. Vol. A: Space-Group Symmetry. Ed. Theo Hahn (Dordrecht, The Netherlands, Springer, 2005).
[19] International Tables for Crystallography. Vol. C: Mathematical, Physical and Chemical Tables. Ed. Prince E. (Dordrecht, The Netherlands, 2004).
[20] G.S. Zhdanov, A.G. Khundzhua. Lektsii po fizike tverdogo tela (Moskva, MGU, 1988).
[21] A.I. Gusev. Nestekhiometriya, besporyadok, blizhniy i dal'niy poryadok v tverdom tele (Moskva, Fizmatlit, 2007).
[22] Z.P. Ozerov, Poverkhnost′ No. 7, 8-19 (1997).
[23] Yu.M.Tsipenyuk, Physics Uspekhi **55**, No.8, 855-867 (2012).
[24] I. Khidirov, A.S. Parpiev, Kristallografiya **56**, No.3, 504-508 (2011).
[25] I. Khidirov, S.D. Rakhmanov, Al'ternativnaya energetika i ekologiya No.13-15, 68-76 (2017).
[26] V.M. Kamishov, E.G. Miroshnikova, V.P. Tataurov. Stroenie veshestva (SPb, Lan', 2017).

$Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$ қотишмаси атомларининг ўртача квадратик силжишини нейтронлар дифракцияси методи билан аниқлаш

И. Хидиров, С.ДЖ. Рахманов, А.С. Парпиев, Ш.А. Махмудов, В.В. Гетманский

Ўзбекистон Республикаси ФА Ядро физикаси институти, Улугбек, 100214 Ташкент, Ўзбекистон

Коррозияга чидамли янги $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$ куб структурали қотишмасида атомларнинг ўртача квадратик силжиши нейтронлар дифракцияси маълумотларидан фойдаланилиб икки хил усулдан – энг кичик квадратлар ва дифрактограммани тўла

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

профилли таҳлил усулларидан фойдаланиб аниқланди. Бу катталик кристалл структураси айнан бир хил ва атомларининг геометрик параметр-лари мазкур қотишманикига ўхшаш бўлган куб структурали стехиометриявий TiC ва TiN қотишмаларига қараганда анча катта эканлиги аниқланди. Аниқланган ушбу фарқ Ti ($3d^2 4s^2$) ва Mo ($4d^5 5s^1$) ташқи валент электронлари конфигурацияларининг турлича эканлиги туфайли кристалл панжарада катта статик бузилишларнинг пайдо бўлиши билан тушунтирилди. Шунингдек, $TiC_{0.50}N_{0.50}$ ва $TiC_{0.30}N_{0.70}$ қотишмаларда ҳам бинар қотишмаларга нисбатан шундай қонуният кузатилди. Кузатилган қонуният $Ti_{0.70}Mo_{0.30}$, $TiC_{0.50}N_{0.50}$ ва $TiC_{0.30}N_{070}$ қотишмаларининг таркибидаги Ti ($3d^2 4s^2$) ва Mo ($4d^5 5s^1$) ҳамда C ($2s^2 2p^2$) ва N ($2s^2 2p^3$) атомларнинг ташқи валент электронларнинг кон-фигурацияси ҳар хил эканлиги сабабли атомлар орасидаги таъсир кучларининг анизотропияси туфайли кристалл панжаранинг бузилиши деб тушунтирилди.

Қалит сўзлар: титан TiC ва молибден MoC карбиди, $Ti_{0.70}Mo_{0.30}C$ қотишмаси, кристалл структураси, атомнинг тўла ўртача квадратик силжиши, панжаранинг динамик бузилиши ва статик бузилиши, нейтронлар дифракцияси, энг кичик квадратлар усули, дифрактограмманинг тўла профилли таҳлил усули, ташқи валент электронлар тузилиши.

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

Dependence of the characteristics of dye-sensitized solar cells on amount tetrapropylammonium iodide

A.A. Abdukarimov[*,1], R.G. Ikramov[1], O.O. Mamatkarimov[1], A.K. Arof[2]

[1] Namangan Engineering and Technology Institute, Kasansay street, 160115, Namangan, Uzbekistan
[2] Universiti Malaya, 50603, Kuala Lumpur, Malaysia.

Received 16.11.2019

* Corresponding author: e-mail abdullaziz.abdukarimov@mail.ru, Phone: +998972523262

В данной работе было подготовлено несколько жидких электролитов (LE). Электролиты содержат соль йодида тетрапропиламмония (TPAI) с различным содержанием соли, пропиленкарбонат (PC), этиленкарбонат (EC), полиэтиленоксид (PEO), диметилформамид (DMF) и (I/I^{3-}) окислительно-восстановительную пару. LE был использован в DSSC. Были изготовлены DSSC и измерены характеристики плотности тока (J-V). Самая высокая эффективность преобразования падающих фотонов (IPCE) при 520 нм составляет 45.5% для DSSC с 0.25 г TPAILE. В AM1,5 DSSC с LE демонстрирует эффективность 6,61% с J_{sc}=18,69мА $см^{-2}$, V_{oc}=0,68В и коэффициентом заполнения (FF)=0,52.

Ключевые слова: ионная проводимость; жидкий электролит; сенсибилизированный красителем солнечный элемент (DSSC); тетрапропиламмоний йодид (TPAI).

In this work, several liquid electrolytes (LE) have been prepared. The electrolytes contain tetrapropylammonium iodide (TPAI) salt with different salt content, propylene carbonate (PC), ethylene carbonate (EC), polyethylene oxide (PEO), dimethylformamide (DMF) and (I^-/I^{3-}) redox couple LE was used in the Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC). DSSCs were fabricated and current density-voltage (*J-V*) characteristics measured. The highest incident photon conversion efficiency (IPCE) at 520 nm is 45.5% for DSSC with 0.25 g TPAI LE. At AM 1.5, DSSC with LE exhibits efficiency of 6.61% with J_{sc}= 18.69 mA cm^{-2}, V_{oc}= 0.68V and fill factor (FF*)* = 0.52.

Keywords: Ionic conductivity; liquid electrolyte; dye-sensitized solar cell (DSSC); tetrapropylammonium iodide (TPAI).

I. Introduction

Dye-sensitized solar cells (DSSC), being one of the topmost popular and fast growing solar renewable energy, are flexible, low in cost and simple to fabricate [1]. Moreover, they can be operated under diffused light condition and used for indoor applications [2]. A DSSC primarily consists of three elements i.e. redox mediator-containing electrolyte sandwiched between dyed photo anode and counter electrode. The electrolyte is one crucial constituent in restoring the dye rejuvenation by means of oxidation [3]. A typical electrolyte for DSSC is in liquid form. The redox couple is a key component of the DSC. The reduced part of the couple regenerates the photo-oxidized dye.The formed oxidized species diffuses to the counter electrode, where it is reduced. The photovoltage of the device depends on the redox couple because it sets the electrochemical potential at the counter electrode. The redox couple also affects the electrochemical potential of the TiO_2 electrode through

the recombination kinetics between electrons in TiO_2 and oxidized redox species [4]. Using liquid electrolyte (LE), the highest photo conversion efficiency of 14.3% has been attained owing to its excellent ionic conductivity [5].

In this work, we have prepared LE varying amount and the influence of this type of electrolyte on the performance of DSSCs will be presented. The polymer chosen here is polyethylene oxide (PEO) which is a synthetic polymer with monomer unit –CH_2CH_2O–PEO was first used as polymer host for electrolyte in solid form by Prof. P.V. Wright in 1975 [6]. Since then, it has become one of the most popular polymer matrices as it is capable of solvating many types of salts in high concentration. The LE contain the same ingredients, i.e. tetrapropylammonium iodide (TPAI) salt, ethylene carbonate (EC), propylene carbonate (PC) and iodine (I_2) crystals. Additionally for LE, dimethylformamide (DMF) is used to dissolve PEO. TPAI salt is preferred here as it is deemed as the best performing salt following the work of Bandara et al. [6].

II. Experimental

II.1. Electrochemical Impedance Spectroscopy of Liquid Electrolyte

The electrolyte was placed between two stainless steel electrodes of 2 cm diameter. Impedance measurement was carried out using the HIOKI 3531 Z Hi-Tester at room temperature (RT) from 50 Hz to 100 kHz [7, 8]. The bulk resistance (ρ) of the electrolyte was obtained at the point of intersection of the impedance data with the real impedance axis of the Nyquist plot. The ionic conductivity (σ) for every sample was calculated following the equation [9, 10, 11]:

$$\sigma = l/\rho s ,$$

where l and s are the thickness of the electrolyte sample and the electrolyte/electrode contact area, respectively.

II.2. TiO_2 Photoelectrode and Pt Counter Electrode Preparation

P90 TiO_2 powder of 0.5 g mass was mixed with 2mL nitric acid, HNO_3 (pH=1) and ground for 30 min in a mortar. The slurry obtained was spin-coated for 60s on a cleaned fluorine doped tin oxide (FTO) glass at 2350 rpm to form the compact layer. The electrode was annealed at 450°C for 30 min. A second TiO_2 layer was prepared by mixing and grinding 0.5 g P25 TiO_2 powder in 2 mL HNO_3. For homogeneity, 0.1 g carbowax and a few drops of Triton X-100 surfactant were added and by the doctor blade method was deposited on the compact layer [8]. The electrode was again annealed for 30min at 450°C. The Pt counter electrode (CE) was prepared using drop cast method on bare FTO glass and sintered as for the TiO_2 photoelectrode. The photoanode TiO_2 layer was soaked in 10mL solution of ethanol and N3 dye for 24 h in a dark environment at RT [12,13].

II.3. Fabrication of Dye-Sensitized Solar Cell

The LE were used as electrolyte in DSSC fabrication following the configuration of FTO/(TiO_2/dye/LE/Pt/FTO.

The photocurrent density (J) and voltage (V) were measured using the Keithley 2400 electrometer under irradiation intensity of 1000 Wm^{-2}. The active area of the DSSC was 0.20 cm^2. The fill factor (FF) was calculated following the equation [14, 15, 16]:

$$\mathrm{FF} = \frac{J_{\max} V_{\max}}{J_{sc} V_{oc}} ,$$

where J_{max} and V_{max} are the maximum current density and maximum voltage, respectively. J_{sc} is the short-circuit current density and V_{oc} is open-circuit voltage. Power conversion efficiency (η) was calculated following:

$$\eta = \frac{V_{oc} J_{sc} \mathrm{FF}}{P_{in}} 100\% ,$$

where P_{in} is incident light power density [9].

The incident photon to current conversion efficiency (IPCE) measurements were obtained using a Newport Model 70528 Oriel Monochromator Illuminator [8-9]. IPCE value demonstrates how much current was produced by the cell as it was illuminated by photons of a given frequency.

III. Result and discussion

III.1. Conductivity of Liquid Electrolyte

Table 1 lists the bulk resistance and conductivity values of LEs having different salt content. Bulk resistance decreased with salt content and the conductivity showed an opposite trend. Conductivity has been incremented with the addition of more salt that provided more conducting ions. The RT ionic conductivity increased with TPAI content for LEs.

It can be clearly seen that the conductivity shows increment with increasing TPAI salt concentration up to 0.25 g TPAI. TPAI consists of $(CH_3CH_2CH_2)_4N^+$

© Academy of Sciences of Republic of Uzbekistan, Tashkent, 2020

cations and I^- anions, which formed a crystal salt by ionic bonding between the two.

When TPAI was dissolved in EC, PC and DMF, the cations and anion ions were separated and created free charges in the PEO- and PMMA-based LE where conduction can be occurred when a potential is applied[17, 18]. Hence, the number of free ions is dependent on the TPAI salt concentration.

Therefore, the increment in conductivity with increasing TPAI content shown in Table 1 was due to increasing number density of free ions in PEO and PMMA-based LE.

Table 1: The bulk resistance and conductivity values of LEs at different TPAI amounts,

TPAI (g)	P (Ω)	Σ (mS cm^{-1})
0.05	31.1	4.00
0.10	19.8	6.34
0.15	15.5	8.06
0.20	14.8	8.47
0.25	14.2	8.98

Since all the other components of DSSC except the electrolyte is same for all fabricated cells, the electrolytes' conductivity is very crucial to DSSC performance.

III.3. Incident Photon Conversion Efficiency (IPCE)

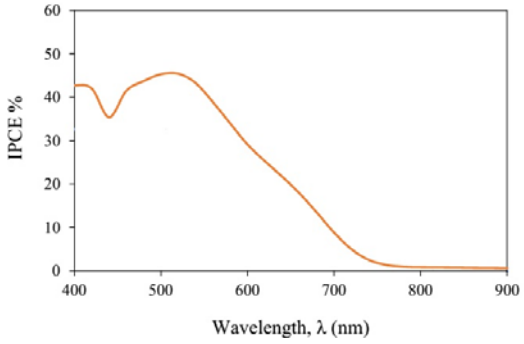


Figure 2. IPCE plots of DSSCs using the highest conducting liquid electrolytes with 0.25 g TPAI.

III.2. *J-V* Characteristics of Dye-sensitized solar cells

The *J-V* characteristics of the fabricated DSSCs are shown in Figure 1. All LEs have been used to fabricate DSSCs. The *J-V* characteristics of corresponding parameters are tabulated in Table 2.

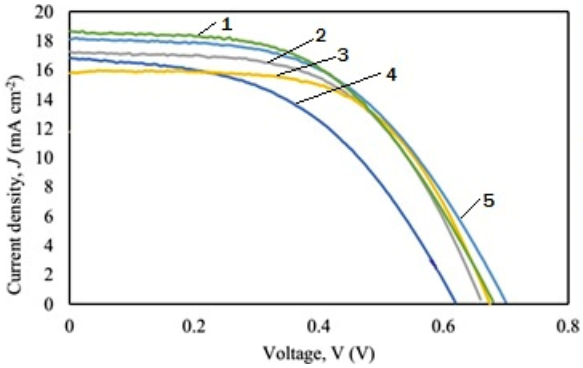


Figure 1. *J-V* characteristics of DSSC for LEs: *1* – 0.25 g TPAI, *2* – 0.1 g TPAI, *3* – 0.15 g TPAI, *4* – 0.05 g TPAI, *5* – 0.20 g TPAI.

Table 2. Dye-sensitized solar cells parameters of cells using Les.

Designation	0.05 g TPAI	0.1 g TPAI	0.15 g TPAI	0.20 g TPAI	0.25 g TPAI
J_{sc}(mA cm^{-2})	16.85	17.28	15.76	18.12	18.69
V_{oc}(V)	0.62	0.66	0.67	0.7	0.68
FF	0.48	0.53	0.6	0.52	0.52
Efficiency (%)	5.01	6.04	6.33	6.59	6.61

The IPCE graphs of DSSCs using the highest conducting LE under illumination at different wavelengths of light are shown in Fig. 2. As can be observed, the highest value of IPCE for DSSC is shown at the wavelength around 520 nm which is in agreement with the optical properties of the N3 dye. The most efficient DSSC in the LE system exhibits the highest IPCE value of 45.5 %.

IV. Conclusion

LE containing TPAI, EC, PC, DMF and I_2 have been prepared and tested in DSSCs.The higher conductivity of LE efficiency of 6.61 %. The most efficient DSSC in the LE system exhibits the highest IPCE value of 45.5 %.

References

[1] R. Katoh and A. Furube. J. Photochem. Photobio. C: Photochem. Rev. **20**, 1 (2014).
[2] H. Hug, M. Bader, P. Mair, T. Glatzel. Appl. Energy **115**, 216 (2014).

© Academy of Sciences of Republic of Uzbekistan, Tashkent, 2020

[3] A.K. Bharwal, N.A. Nguyen, and C. Iojoiu, Solid State Ionics **307**, 6 (2017).
[4] G. Boschloo, A. Hagfeldt, Accounts of Chemical Research **42**, 1819 (2009).
[5] K. Kakiage, Y. Aoyama, T. Yano, K. Oya, J.-I. Fujisawa, M. Hanaya, Chem. Commun. **51**, 15894 (2015).
[6] T.M.W.J. Bandara, W.J.M.J.S.R. Jayasundara, M.A.K.L. Dissanayake, M. Furlani, I. Albinsson, B-E. Mellander, Electrochimica Acta **109**, 609 (2013).
[7] M.M. Noor, M.H. Buraidah, S.N.F. Yusuf, M.A. Careem, S.R. Majid, A.K. Arof, International Journal of Photoenergy (2011). Article ID 960487.
[8] Shahan Shah, N.N.S. Baharun, S.N.F. Yusuf, A.K. Arof,. Materials Science and Engineering **515** (2019).
[9] H. Qi, X. Sui, J. Yuan, Y. Wei, L. Zhang, Mater. Eng. **295**, 695 (2010).
[10] J. Shi, S. Peng, J. Pei, Y. Liang, F. Cheng, Chen, Appl. Mater. Interfaces **1**, 944 (2009).
[11] J.P. Southall, H.V.S.A. Hubbard, S.F. Johnston, V. Rogers, G.R. Davies, J.E. McIntyre, I.M. Ward, Solid State Ion. **85**, 51 (1996).
[12] L.P. Teo, T.S. Tiong, M.H. Buraidah, A.K. Arof, Opt. Mater. **85**, 531 (2018).
[13] J. Theerthagiri, A.R. Senthil, M.H. Buraidah, J. Madhavan, A.K. Arof, Ionics **21**, 2889 (2015).
[14] L.You, K. Duan, G. Zhang, T. Yang, X. Song, S. Wang, J.N. Liu, J. Phys. Chem. C **123**, 5942 (2019).
[15] A.K. Arof, S. Amirudin, S.Z. Yusof, and I.M. Noor, Cite this: Phys. Chem. Chem. Phys. **16**, 1856 (2014).
[16] A. Abdukarimov, Sh. Shah, L.P. Teo, M.H. Buraidah, Z.H.Z. Abidin, O.O. Mamatkarimov, A.K. Arof, Optical and Quantum Electronics **52**, 152 (2020).
[17] O.O. Mamatkarimov, R. Khamidov, A. Abdukarimov. Materials Today: Proceedings **17**, 442 (2019).
[18] A.K. Arof, N.A. Mat Nor, N. Aziz, M.Z. Kufian, A.A. Abdulaziz, O.O. Mamatkarimov, Materials Today: Proceedings **17,** 388 (2019).

Юқори сезгир бўёқли қуёш элементлари характеристикаларининг тетропропил-аммоний йодид миқдорига боғлиқлиги

А.А. Абдукаримов[1], Р.Г. Икрамов[1], О.О. Маматкаримов[1], А.К. Ароф[2]

[1] Наманган муҳандилик технология институти, Косонсой 7, 160115, Наманган, Ўзбекистон
[2] Малая университети, 50603, Куала Лумпур, Малайзия

Ушбу ишда бир нечта суюқ электролитлар тайёрланди. Электролитлар таркибида турли миқдордаги тетрапропиламмоний йодид (TPAI) тузи, пропиленкарбонат (PC), этиленкарбонат (EC), полиэтиленоксид (PEO), диметилформамид (DMF) ва (I/I^{3-}) мавжуд. Электролит DSSC тайёрлашда ишлатилди ва унинг волт-ампер характеристикаси олинди. Фотонларнинг фототокка айланиш самарадорлигининг энг юқори қиймати 0.25 г TPAI электролит учун 520 нм тўлқин узунликда 45.5% ни ташкил этди. DSSC нинг самарадорлиги 6.61%, J_{sc}=18.69 мА·см$^{-2}$, V_{oc}=0.68 В ва тўлдириш коэффициенти (FF)=0.52.

Калит сўзлар: ион ўтказувчанлик, суюқ электролит, юқори сезгир бўёғли қуёш элементи (DSSC), тетрапропиламмоний йодид (TPAI).

© Academy of Sciences of Republic of Uzbekistan, Tashkent, 2020

АНИЗОТРОПНЫЕ СВОЙСТВА НАНОВОЛОКОННЫХ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ФИБРОИНА ШЕЛКА И ХЛОПКОВОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

А.А. Холмуминов[1], Б.М. Матякубов[*2]

[1]Национальный университет РУз, Вузгородок, улица Университетская, дом 4, 100174 Ташкент, Узбекистан
[2]Военно-технический институт Национальной Гвардии РУз,Ташкентская область, Зангиатинский район, поселок Чигатай-актепа, 100109, Ташкент, Узбекистан

(Получена 21.11.2019)

* Corresponding author: e-mail matyakubov-bekzod@mail.ru Phone:+998 90 006 05 01

В статье приводятся результаты исследований по получению нановолоконных анизотропных нанопористых материалов на основе фиброина шелка и хлопковой целлюлозы методом электроспиннинга с использованием вращающегося экрана - приёмника нановолокон в виде тонкого материала. Показано различие в анизотропных свойствах нановолоконного материала методом двулучепреломления, сорбции паров воды и фильтрации жидкофазной смеси. Выявлена возможность использования нановолоконных нанопористых материалов фиброина и хлопковой целлюлозы в качестве нанофильтра газообразных и жидкофазных смесей.

Ключевые слова: фиброин, целлюлоза, электроспиннинг, нановолокно, наноматериал, формирование, полимер, шелк, структура, температура, свойства, анизотропия.

The article presents the results of a study on the production of nanofibre anisotropic nanoporous materials based on silk fibroin and cotton cellulose by electrospinning using a rotating screen-receiver of nanofibers in the form of a thin material. The difference in the anisotropic properties of the nanofiber materials is shown by the method of birefringence, sorption of water vapor and filtration of a liquid-phase mixture. The possibility of using nanofiber nanoporous materials of silk fibroin and cotton cellulose as nanofilters of gaseous and liquid-phase mixtures was revealed.

Keywords: fibroin, cellulose, electrospinning, nanofiber, nanomaterial, formation, polymer, silk, structure, temperature, properties, anisotropy.

I. Введение

Динамичное развитие современной нанонауки и нанотехнологии тесно связано с разработкой новых наноматериалов, в частности, нановолокон полимеров с анизотропными свойст-вами методом электроспиннинга [1, 2]. Метод основан на формировании нановолокон при вытягивании струи прядильной жидкости (раствора, расплава, смеси) полимеров из фильеры (анод) до приёмника-экрана (катод) под действием высокого напряжения (1–30 кВ) постоянного тока [3]. Толщина нановолокон регулируется подбором состава прядильной жидкости, диаметра фильеры, расстояния от анода до катода, величины высокого напряжения. Сформированные нановолокна плотно укладываются на поверхность экрана в виде нетканого материала.

Нановолокно, подобно обычным микроволокнам, является анизотропным из-за высокой степени ориентационной укладки и кристаллизации полимеров в нем [4]. Анизотропные волокна

в принципе определяют анизотропные свойства получаемого материала в зависимости от их степени упорядоченной укладки. Причем анизотропное свойство материала может измениться под действием различных факторов, например, растяжения, сжатия, набухания в жидкостях, фильтрации газообразных и жидкофазных смесей под давлением и т.п. Особый интерес представляет выбор исходного полимера, проявляющего в нановолоконном материале определенную устойчивость, биоактивность, биодеградируемость, склонность к взаимодействию с окружающими веществами. Таким полимером может быть фиброин шелка (ФБ), имеющий в элементарном звене ионогенные аминные и карбоксильные группы, а также хлопковая целлюлоза (ХЦ), в мономере которой содержатся гидрофильные гидроксильные группы [5].

Важным моментом является равномерная укладка нановолокон на поверхности экрана, имеющего обычно площадь 20×20 см^2. Это представляется возможным в случае использования экрана, перемещающегося или вращающегося перпендикулярно к оси иглообразной фильеры. С учетом этого была проведена работа, в которой использован специально собранный вращающийся экран для получения материалов с упорядоченной укладкой нановолокон в получаемом материале и выявления их анизотропных свойств при сорбции паров воды и фильтрации отработанного машинного масла.

II. Объекты и методы исследования

Образец фиброина был выделен из состава волокон кокона натурального шелка путем промывания биоклея, серицина, в воде при температуре 90°C в течение 4 часов, а также жировосков в этаноле и ацетоне на аппарате Сокслет. В качестве растворителя, способного разрушить кристаллические участки очищенных волокон без деструкций молекул ФБ, использовали 50%-ный водный раствор $CaCl_2$ при температуре 90°C. Ионы Ca и Cl из раствора ФБ удаляли путем диализа с ипользованием полупроницаемой мембраны ксантатаната целлюлозы. При этом очищенный ФБ осаждался с аморфным состоянием цепей. Прядильные растворы ФБ приготовлены в муравьиной кислоте (МК) и выявлено, что концентрация (C) данного биополимера около 12–18% является оптимальной для формования нановолокон толщиной 50–200 нм. Для проведения сравнительных исследований выбрали очищенные волокна хлопковой целлюлозы и прядильные растворы данного образца, приготовленные в трифторуксусной кислоте (ТФУК).

Электроспиннинг нановолокон из прядильных растворов биополимеров проводили под действием высокого напряжения 15 кВ [6]. При этом использовали иглообразную фильеру диаметром капилляра 0.05 см, расстояние от фильеры до экрана составляло 10 см. Упорядоченную равномерную укладку нановолокон осуществляли на поверхности экрана, вращающегося с частотой 15 об/мин. Также получали нановолоконные материалы при отсутствии вращения экрана. Сравнительные исследования проводили для образцов нановолоконных материалов с использованием методов двулучепреломления (ДЛП), сорбции паров воды и набухании при фильтрации жидкостей.

III. Результаты и их обсуждение

Согласно [7], методом двулучепреломления определен фактор ориентации (β), характеризующийся оптической анизотропией нановолоконных материалов. Получены результаты для образцов нановолоконных материалов толщиной d_n = 0.1 см, сформированных при вращении экрана β = 0.75 для ФБ и β = 0.65 для ХЦ. В случае образцов, полученных без вращения экрана определены следующие значения β = 0.06 для ФБ и β = 0.04 для ХЦ. Высокие значение β свидетельствуют о том, что при укладке нановолокон на поверхность вращающегося экрана формируются материалы с высокой степенью упорядоченности и нановолоконные материалы являются анизотропными. В случае отсутствия вращения экрана значения β на порядок ниже, что характеризует большую изотропность полученных нановолоконных материалов.

Опыты по сорбции паров воды в нановолоконных материалах проводили на высоковакуумной установке с ртутными затворами и кварцевыми весами Мак-Бэна при температуре 298 К и остаточном давлении воздуха 10^{-3}–10^{-4} Па. В качестве сорбата выбрали воду. Получены типичные S-образные изотермы сорбции, которые приведены на рис. 1 в виде зависимости показателя сорбции (x/m) от относительной влажности (P/P_0). Видно, что анизотропные образцы ФБ (1) и ХЦ (2) сравнительно меньше сорбируют пары воды,

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020

чем изотропные образцы ФБ (1′) и ХЦ (2′). Причем, ФБ нановолокна меньше сорбируют пары воды по сравнению с ХЦ. Видимо, нановолокна ФБ плотно упакованы, что в определенной степени ограничивает сорбцию паров воды в объем материала [8-11]. Такой вывод хорошо согласуется с данными двулучепреломления. С другой стороны, наличие сравнительно большого количества гидрофильных групп ХЦ также приводит к повышенному взаимодействию материала с парами воды. Подобные различия были обнаружены при расчете капиллярно-пористых и структурных показателей нановолоконных материалов ФБ и ХЦ, а именно, сорбционного объема (X_m), удельной поверхности ($S_{уд}$), суммарного объема пор (W_0), среднего радиуса пор (r_k), которые приведены в таблице [12, 13].

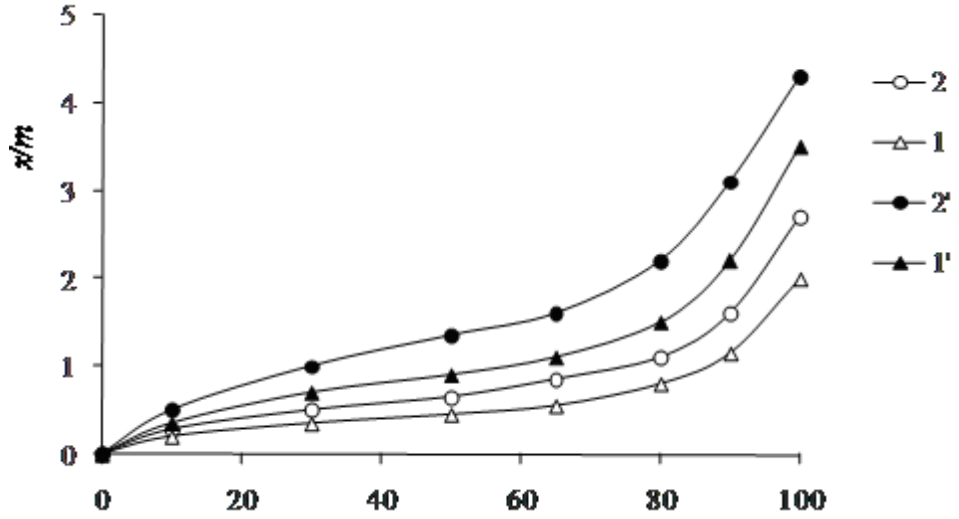


Рисунок 1. Изотермы сорбции паров воды для нановолоконных материалов: фиброина (1, 1') и целлюлозы (2, 2').

Таблица 1. Капилярно-пористые и структурные показатели нановолоконных материалов ФБ и ХЦ

Образец	Изотропные		Анизотропные	
	ФБ	ХЦ	ФБ	ХЦ
$X_м$, г/г	0.0054	0.0056	0.0044	0.0040
$S_{уд}$, м^2/г	23.04	28.33	14.75	12.96
W_0, см^3/г	0.042	0.067	0.026	0.022
r_k, нм	4.53	6.66	3.85	3.18

Отсюда видно заметно завышенное значение сорбционных показателей в случае ХЦ, т.е. большие объемы пор обусловлены повышенной жесткостью нановолоконных материалов целлюлозы по сравнению с фиброином. Тем не менее, выявленные радиусы пор достаточно большие для проникновения небольших молекул в объем нановолоконных материалов [14].

Из полученных результатов следует, что нановолоконные материалы ФБ и ХЦ являются нанопористыми, способными сорбировать пары воды и подобные ею жидкости с размерами не более 4-6 нм, сохраняя свои формы без существенных деформационных изменений [15].

Безусловно, нанопористые материалы на основе нановолокон ФБ и ХЦ проявляют специфические взаимодействия с газообразными и жидкофазными веществами. Они могут селективно фиксировать или удерживать их составляющие в зависимости от химической природы, строения и размерности. Такая селективность наиболее ярко проявляется, когда через нановолоконный нанопористый материал пропускаются коллоидные и молекулярно-дисперсные смеси. Для выявления таких особенностей нановолоконных нанопористых анизотропных материалов ФБ и ХЦ исследовали эффективность фильтрации, в качестве нанофильтра, пропуская через них отработанное машинное масло, содержащее микро- и наноразмерные частицы [16, 17]. Причем, машинное масло является химически нейтральным относительно нановолокон ФБ и ХЦ. Это дало возмож-

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020

ность для проведения сравнительных опытов образцов нановолоконных анизотропных материалов ФБ и ХЦ с размерами пор 50 и 100 нм. При этом толщина нановолоконного материала составляла d_n = 0,01 см.

Исследование проводили следующим образом: через нанофильтр массой (m_n), находящийся в воронке, пропускали m_o=100 мл отработанного машинного масла коричневого цвета. На выходе, после протекания через нанофильтр, масло имело светло-желтый цвет, масса его уменьшилась (m_i), т.е. определенная часть массы (m_p) из состава удержалась на нанофильтре. Это свидетельствовало о протекании и фильтрации масла, которая происходила интенсивно в течение 80 мин. При этом об эффективности фильтрации судили по отношению m_i/m_0 от времени (t) наблюдения (рис.2). Видно, что процесс фильтрации носит кинетический характер, т.е. с увеличением времени и размеров нанопор масса продукта фильтрации (m_i) повышается монотонно до 60 мин, далее стабилизуется. Причем, уменьшение размеров пор нановолоконного материала способствует росту эффективности удержания примесей [18, 19]. Выявлено, что степень очистки отработанного машинного масла при пропускании через нановолоконный нанопористый материал без всяких внешних деформационных воздействий составляет примерно 65% в случае использования нанопор 100 нм, почти 85% в случае нанопор 50 нм.

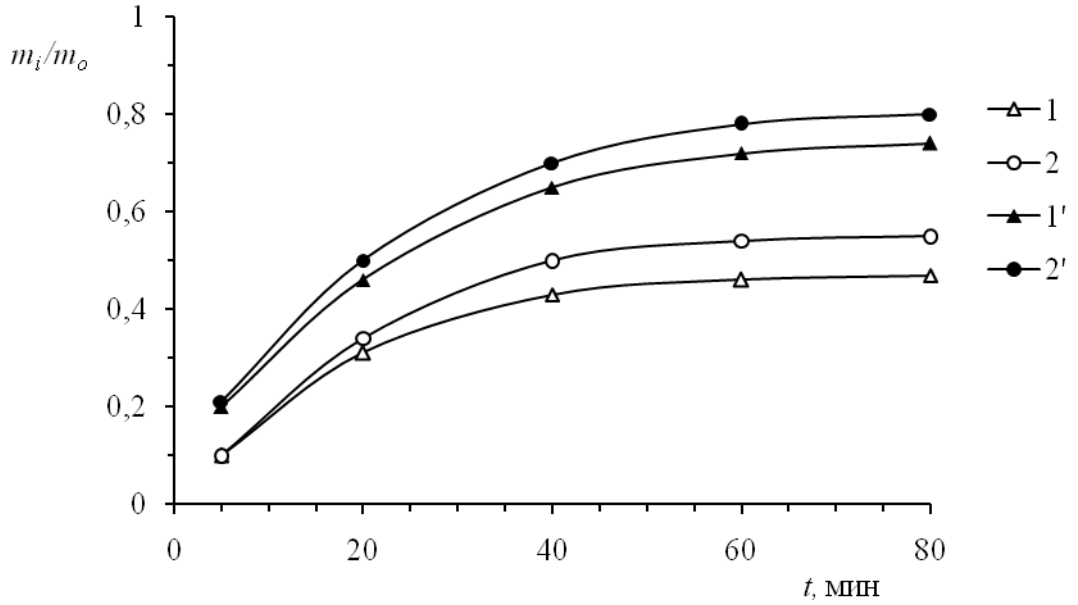


Рисунок 2. Зависимость относительного изменения массы (m_i/m_0) от времени (t) при пропускании машинного масла через нановолоконные материалы ФБ (1, 1′) и ХЦ (2,2′) со средними размерами поры 100 нм (1, 2) и 50 нм (1′, 2′).

Из рис. 2 видно, что нановолоконные нанопористые анизотропные материалы из ФБ и ХЦ могут быть рекомендованы для практического применения в качестве нанофильтров [20].

IV. Заключение

Таким образом, результаты исследования показали возможность получения нановолоконных пористых анизотропных материалов на основе фиброина и целлюлозы методом электроспиннинга с использованием приемника нановолокон типа вращающего экрана. Исследование данных материалов на предмет выявления сорбционных и фильтрующих способностей дали положительные результаты, на основе которых на последующем этапе возможны разработки наноматериалов со специальными свойствами.

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020

Anisotropic properties of nanofibre porous materials of silk fibroin and cotton cellulose

A.A. Kholmuminov[1], B.M. Matyakubov[2]

[1]National University of Uzbekistan, University street, No.4, 100174 Tashkent, Uzbekistan
[2]Military Technical Institute of National Guard of the Republic of Uzbekistan, Tashkent region, Zangiata district, Chigatay-aktepa village, 100109, Tashkent, Uzbekistan

The article presents the results of a study on the production of nanofibre anisotropic nanoporous materials based on silk fibroin and cotton cellulose by electrospinning using a rotating screen-receiver of nanofibers in the form of a thin material. The difference in the anisotropic properties of the nanofiber materials is shown by the method of birefringence, sorption of water vapor and filtration of a liquid-phase mixture. The possibility of using nanofiber nanoporous materials of silk fibroin and cotton cellulose as nanofilters of gaseous and liquid-phase mixtures was revealed.

Keywords: fibroin, cellulose, electrospinning, nanofiber, nanomaterial, formation, polymer, silk, structure, temperature, properties, anisotropy.

References

[1] A. Greiner, J.H. Wendorff, Adv. Polym. Sci. **219**,165 (2008).
[2] P.A. Vityaz. Nanomaterialovedenie. Uchebnoe posobie (Minsk, Vysshaya shkola, 2015).
[3] C. Kim and K.S. Yang, Applied Physics Letters **83**, No.6, 1216 (2003).
[4] M. Alessandro, R.D. Ramsier and G.G. Chase, Nano Letters **4**, No.11, 2215 (2004).
[5] Weitao Zhou, Jianxin He, Fibers and Polymers **2**, No.4, 431 (2018).
[6] A. Theron, E.A. Zussman, A.L. Yarin, Nanotechnology **3**,No.12, 384 (2001).
[7] A.A. Kholmuminov, Yu.N. Kholmatova, T.V. Voronina, Biophysics **46**, No.1, 87 (Moscow, 2001).
[8] A.A. Kholmuminov, B.M. Matyakubov, Journal of Scientific and Engineering Research **6**, No.11, 232 (2019)
[9] D.Sh. Shakarova, Ch.K. Begimkulova, A.A. Kholmuminov, International Journal of Advanced Scientific and Technical Research **3**, No.8, 62 (2018).
[10] A.A. Hashim, Polymer Thin Films, Nano Electronics, e-book, UK (2010) www.intechweb.org
[11] P.R. Sajanlal, T.S. Sreeprasad, A.K. Samal, and T Pradeep, Nano Reviews **2**, No.1,70 (2011.
[12] D. Li, Y. Wang, Y. Xia, Adv. Mater. **16**, No.4, 361 (2004).
[13] Yi. Bingcheng, Huihua Yuan, Xianliu Wang, Yanzhong Zhang, Journal of Materials Chemistry B **6**, No.23, 3934 (2018). doi: 10.1039/C8TB00535D.
[14] M. Campoy-Quiles, P.G. Etchegoin, D.C. Bradley, Phys. Rev. B **72**, No.4, 901 (2005).
[15] Mohammed Ibn-Elhaj, Martin Schadt, Nature **410**, 796 (2001).
[16] M. Campoy-Quiles, J. Nelson, Physica Status Solidi C **5**, No.5, 1270 (2008). Doi 10.1002/pssc.200777835.
[17] Stefano Pagliara, S. Vitiello, A. Camposeo, A. Polini, R. Cingolani, G. Scamarcio, and D. Pisignano, Journal of Physical Chemistry C **115**, No.42, 399 (2011). Doi: 10.1021/jp204582j.
[18] Etienne Harté, Isabel D. Alves, Optics Express **27**, No.3, 3264 (2019).
[19] N.A. Kozlov, A.D. Mitrofanov. Fizika polimerov (Uchebnoe posobie) (Vladimir, Vladimirskiy gosudarstvenny universitet, 2001
[20] N. Amiraliyan, M. Nouri, H. Kish, Polym. Sci. A **52**, No.2, 407 (2010).

Ипак фиброини ва пахта целлюлозаси асосидаги нанотолали ғовакли материалларнинг анизотропик хоссалари

А.А. Холмуминов[1], Б.М. Матякубов[2]

[1] Ўзбекистон Миллий Университети, Университет кучаси, 4-уй, 100174 Тошкент, Узбекистон
[2]ЎзР Миллий гвардияси Ҳарбий-техник институти, Тошкент вилояти, Зангиота тумани, Чигатай-октепа, 100109, Ташкент, Узбекистан

Мақолада электроспиннинг усулида нанотолаларни қабул қилиб олувчи айланувчи экран ишлатилган ҳолда ипак фиброини ва пахта целлюлозаси асосида нанотолали наноғовакли анизотропик материалларни олиш бўйича тадқиқот натижалари келтирилган. Нанотолали материалнинг анизотроп хусусиятларидаги фарқлар қўш нурни синиши, сув буғининг сорбцияси ва суюқ фазали аралашманинг фильтрлаш усуллари ёрдамида кўрсатиб берилган. Газсимон ва суюқ фазали аралашмаларнинг нанофильтрловчи сифатида нанотолали наноғовакли фиброин ва пахта целлюлозаси асосидаги материалларидан фойдаланиш имконияти аниқланган.

Қалит сўзлар: фиброин, целлюлоза, электр спиннинг, нанотола, наноматериал, шакллантириш, полимер, ипак, тузилиш, харорат, хосса, анизотропия.

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020